

# 光電子増倍管

PHOTOMULTIPLIER TUBE

その基礎と応用

第4版



**HAMAMATSU**  
PHOTON IS OUR BUSINESS

## はじめに

光による計測技術は、より極限領域の精密な現象の解明への大きな手法となってきました。そして光による計測は、非破壊による物質の分析、高速な現象の計測、高感度検出などに特長づけられます。特に近年の科学計測分野、医学、高エネルギー物理、分光分析、バイオテクノロジー、光学、半導体などのあらゆる分野において、ますます光センサの性能向上が求められています。

光センサを動作原理から分類すると、外部光電効果、内部光電効果、熱型と大きく3つのタイプに分けられます。外部光電効果は、真空中におかれた金属や半導体に光をあてたとき、表面から真空中に電子が放出される現象です。これを利用した製品としては光電管、光電子増倍管があり、高速応答、超高感度（微弱光検出性）に特長があり、前述の各分野の機器・装置などに幅広く用いられています。

内部光電効果を利用したものは、光導電型と光起電接合型に分けられます。代表的なものとして、光導電セル、Si フォトダイオード、アバランシェ・フォトダイオード (APD)、MPPC (マルチピクセルフォトンカウンタ) などがあり、高感度かつ小型という特長をもち、カメラの露出計、光ディスクの読み出し、光通信などのセンサに汎用されています。熱型検出器は、感度は低いものの波長依存性がなく、警報機などの温度センサなどに用いられています。

それらのうち、本書は特に光電子増倍管に関する基本構造、諸特性、応用などが記述されています。

本書は、光電子増倍管を使用するにあたり、その性能を十分に生かし、さらにより高信頼性、安定に、かつ適切に動作させるための手引書です。特に、これから初めて光電子増倍管を使おうとする技術者のためのガイダンス、すでにお使いいただいている技術者の方の手引書となり、各分野での研究、開発、また製品のさらなる性能向上にお役立ていただけることを期待いたします。



# 目次

## 第1章 序

1.1 本書の構成と概要.....	2
1.2 測光の単位について.....	4
1.2.1 光の波長による分類と単位.....	4
1.2.2 光の強度の単位.....	5
1.3 歴史.....	10
1.3.1 光電面の歴史.....	10
1.3.2 光電子増倍管の歴史.....	11
第1章 参考文献.....	12

## 第2章 光電子増倍管の基本原理

2.1 光電子増倍管の構造と増倍原理.....	14
2.2 光電子放出.....	15
2.3 電子軌道.....	17
2.4 電子増倍部(ダイノード).....	19
2.5 陽極(アノード).....	20
第2章 参考文献.....	21

## 第3章 光電子増倍管の基本的な使い方

3.1 光電子増倍管の使用に際して.....	24
3.1.1 選択.....	24
3.1.2 使用方法.....	25
3.1.3 注意事項.....	26
3.2 周辺機器.....	27
3.2.1 高圧電源.....	27
3.2.2 デバイダ回路.....	27
3.2.3 磁気シールドケース・ハウジング.....	27
3.2.4 アンプ.....	27
3.2.5 光電子増倍管モジュール.....	28
3.2.6 信号処理(出力接続回路).....	29

## 第4章 光電子増倍管の特性

4.1 光電面の基本特性.....	32
-------------------	----

4.1.1	光電面の種類 .....	32
	(1) Cs-I .....	32
	(2) Cs-Te .....	32
	(3) Sb-Cs .....	32
	(4) バイアルカリ (Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs) .....	32
	(5) 低暗電流バイアルカリ (Sb-Na-K) .....	32
	(6) マルチアルカリ (Sb-Na-K-Cs) .....	33
	(7) Ag-O-Cs .....	33
	(8) GaAsP(Cs) .....	33
	(9) GaAs(Cs) .....	33
	(10) InGaAs(Cs) .....	33
	(11) InP/InGaAsP(Cs), InP/InGaAs(Cs) .....	33
	反射型光電面 .....	36
	透過型光電面 .....	37
4.1.2	入射窓材の種類 .....	38
	(1) MgF <sub>2</sub> 結晶 .....	38
	(2) サファイア .....	38
	(3) 石英ガラス .....	38
	(4) UV 透過ガラス (UV ガラス) .....	38
	(5) 硼硅酸ガラス .....	38
4.1.3	分光感度特性 .....	39
	(1) 放射感度 .....	39
	(2) 量子効率 .....	39
	(3) 分光感度特性の測定法と算出法 .....	39
	(4) 感度波長範囲 (短波長限界, 長波長限界) .....	40
4.1.4	ルーメン感度 .....	40
	(1) 陰極ルーメン感度 .....	41
	(2) 陽極ルーメン感度 .....	42
	(3) 青感度指数と赤感度比 .....	43
4.1.5	ルーメン感度と分光感度 .....	44
4.2	ダイノードの基本特性 .....	45
4.2.1	ダイノードの種類と特長 .....	45
	(1) サーキュラケージ型 .....	46
	(2) ボックス型 .....	46
	(3) ラインフォーカス型 .....	46
	(4) ベネシアンブラインド型 .....	46
	(5) メッシュ型 .....	46
	(6) MCP(Microchannel Plate・・・マイクロチャンネルプレート)型 .....	46
	(7) メタルチャンネル型 .....	46
	(8) 電子打込み型 .....	46
	(9) ボックスライン型 .....	46
	(10) サーキュラライン型 .....	47
4.2.2	収集効率とゲイン (電流増倍率) .....	47
	(1) 収集効率 .....	47

(2) ゲイン (電流増倍率) .....	48
4.3 光電子増倍管の諸特性 .....	50
4.3.1 時間特性 .....	50
(1) 上昇時間・下降時間・電子走行時間 .....	51
(2) T.T.S.(Transit Time Spread) .....	52
(3) 光電子走行時間差 C.T.T.D.(Cathode Transit Time Difference) .....	54
(4) C.R.T.(Coincident Resolving Time) .....	55
4.3.2 リニアリティ特性 (直線性) .....	56
(1) 陰極リニアリティ特性 .....	56
(2) 陽極リニアリティ特性 .....	56
(3) リニアリティ測定法 .....	58
4.3.3 ユニフォミティ .....	61
(1) 入射位置によるユニフォミティ .....	62
(2) アンギュラーレスポンス .....	64
4.3.4 安定性 .....	65
(1) ドリフト (経時変化特性)、ライフ (寿命) 特性 .....	65
(2) エージング、ウォーミングアップ .....	66
4.3.5 ヒステリシス特性 .....	67
(1) 光ヒステリシス特性 .....	67
(2) 電圧ヒステリシス特性 .....	68
(3) ヒステリシスの軽減 .....	69
4.3.6 暗電流 .....	69
(1) 原因 .....	69
(2) 暗電流の表現方法 .....	73
4.3.7 光電子増倍管の信号対雑音比 (SN 比) .....	75
4.3.8 アフターパルス .....	79
アフターパルスの種類 .....	79
4.3.9 偏光特性 .....	80
第 4 章 参考文献 .....	82

## 第 5 章 光電子増倍管のデバイダ回路およびアクセサリ

5.1 デバイダ (電圧分割) 回路 .....	86
5.1.1 デバイダ回路の基礎 .....	86
5.1.2 陽極側接地と陰極側接地 .....	87
5.1.3 デバイダ電流とリニアリティ .....	88
(1) 直流出力モードのリニアリティを実現するためのデバイダ回路 .....	91
(2) パルス出力モードのリニアリティとその対策 .....	96
5.1.4 デバイダ回路の電圧配分 .....	99
(1) 陽極および後段の電圧配分 .....	99
(2) 陰極および前段の電圧配分 .....	100
5.1.5 高速応答性を重視する対策 .....	101

5.1.6	実際の高速応答デバイダ回路例 .....	103
5.1.7	ゲート回路 .....	104
5.1.8	ゲイン調整回路 .....	105
5.1.9	デバイダ回路製作上の注意点 .....	107
	(1) デバイダ回路に使用する部品の選択 .....	107
	デバイダ用抵抗 .....	107
	負荷抵抗およびダンピング抵抗 .....	108
	デカップリングコンデンサおよびカップリングコンデンサ .....	108
	プリント基板 (PCB) .....	109
	リード線およびコネクタ .....	109
	コーティング材およびポッティング材 .....	110
	(2) 部品実装上の留意点 .....	111
	全般 .....	111
	抵抗実装 .....	111
	コンデンサ実装 .....	112
	プリント基板実装 .....	112
	リード線およびコネクタ実装 .....	112
	信号出力系の実装 .....	113
	コーティングおよびポッティング .....	113
5.2	高圧電源の選択 .....	114
5.3	外部回路との接続 .....	117
5.3.1	出力信号の計測法 .....	117
5.3.2	カップリングコンデンサの影響 .....	119
	出力波形 .....	119
	ベースラインシフト .....	120
5.3.3	光電子増倍管出力の電流・電圧変換 .....	120
	(1) 負荷抵抗による電流・電圧変換 .....	120
	(2) オペアンプによる電流・電圧変換 .....	122
	(3) オペアンプを使用した電荷増幅器 .....	124
5.3.4	高速光電子増倍管の出力回路 .....	126
5.3.5	光電子増倍管測定におけるアンプの選択 .....	128
	(1) シングルフォトンカウンティングの場合 (第6章フォトンカウンティング法参照) .....	128
	(2) アナログ計測の場合 .....	129
	(3) アンプの取り扱い留意点 .....	129
5.4	ハウジング .....	131
5.4.1	光の遮蔽 .....	131
5.4.2	電界の遮蔽 (シールド) .....	131
5.4.3	磁界の遮蔽 (シールド) .....	131
	(1) 磁気シールドケースの遮蔽度と磁界の方向性 .....	132
	(2) 飽和特性 .....	134
	(3) 周波数特性 .....	136
	(4) 端末効果 .....	136

(5) 光電子増倍管の磁気特性とシールド効果 .....	137
(6) 磁気シールドケースの取り扱い .....	138
5.5 冷却 .....	139
第5章 参考文献 .....	142
<b>第6章 フォトンカウンティング法</b>	
6.1 アナログ方式とデジタル（フォトンカウンティング）方式 .....	144
6.2 フォトンカウンティング法の原理 .....	145
6.3 フォトンカウンティング法の動作法と特性 .....	147
(1) 具体的な回路構成 .....	147
(2) フォトンカウンティング法における基本的特性 .....	147
第6章 参考文献 .....	154
<b>第7章 シンチレーションカウンティング法</b>	
7.1 シンチレータと光電子増倍管 .....	156
7.2 諸特性 .....	159
(1) エネルギー分解能 .....	159
(2) 相対パルス波高値 .....	162
(3) リニアリティ .....	162
(4) ユニフォミティ .....	164
(5) 安定性 .....	164
(6) 雑音 .....	165
(7) プラトー特性 .....	167
第7章 参考文献 .....	169
<b>第8章 光電子増倍管モジュール</b>	
8.1 光電子増倍管モジュールとは .....	172
8.2 電源回路 .....	172
(1) 高圧電源回路 .....	172
(2) 入力電圧 .....	174
(3) 出力と消費電流 .....	174
8.3 電流出力型と電圧出力型 .....	174
(1) ゲイン調整方法 .....	174
(2) リップルノイズ .....	175
(3) セトリングタイム .....	176
8.3.1 電流出力型モジュール .....	176
(1) リニアリティ特集（直流出力モード） .....	177
8.3.2 電圧出力型モジュール .....	177
(1) 周波数特性 .....	178
(2) オフセット電圧 .....	178
(3) 出力信号電圧 .....	178

8.4	フォトンカウンティングヘッド .....	179
	(1) 出力特性 .....	179
	(2) 計数感度 .....	180
	(3) ダークカウント .....	180
	(4) パルスペア分解能 .....	180
	(5) カウントリニアリティ .....	180
	(6) カウントリニアリティの改善 .....	181
	(7) 過大光検出出力 .....	181
8.5	ゲート機能 .....	182
8.5.1	ゲート動作 .....	182
	(1) 動作原理 .....	182
	(2) 動作方式 .....	183
	(3) 動作方法 .....	183
8.5.2	ゲート特性 .....	183
	(1) 時間特性 .....	183
	(2) スイッチングノイズ .....	184
	(3) 消光比 .....	184
8.6	CPU+ インターフェース内蔵型 .....	185
8.7	故障 .....	185
8.7.1	原因 .....	185
8.7.2	トラブルシューティング .....	186
	(1) 信号が出ない .....	186
	(2) ゲインコントロールできない .....	186
	(3) 出力信号波形が現象と異なる .....	186
	(4) フォトンカウンティングヘッドの出力パルス数が 0 .....	186
	(5) 暗電流が変動する .....	186
8.8	関連光学製品 .....	187
第 9 章	マルチアノード型および位置検出型光電子増倍管	
9.1	マルチアノード型光電子増倍管 .....	190
9.1.1	マトリックスタイプマルチアノード型光電子増倍管 .....	191
9.1.2	リニアタイプマルチアノード型光電子増倍管 .....	197
	9.1.2.1 小型分光器内蔵タイプ .....	199
9.2	重心位置検出型光電子増倍管 .....	200
第 10 章	マイクロ PMT	
10.1	マイクロ PMT の概要 .....	204
10.2	マイクロ PMT の動作原理 .....	205
10.3	主な特長 .....	206

10.4 諸特性.....	206
(1) 分光感度特性.....	206
(2) ゲイン特性.....	207
(3) 暗電流特性.....	207
(4) 時間特性.....	208
(5) ユニフォミティ特性.....	209
(6) 磁気特性.....	209
第10章 参考文献.....	210
第11章 MCP 内蔵型光電子増倍管	
11.1 構造.....	212
11.1.1 MCP の構造.....	212
11.1.2 MCP-PMT の構造.....	213
11.1.3 デバイダ回路とハウジング構造.....	214
11.2 MCP-PMT の基本特性.....	215
11.2.1 ゲイン特性.....	215
11.2.2 時間特性.....	216
(1) 上昇時間／下降時間.....	216
(2) 走行時間 (Transit Time).....	216
(3) T.T.S. (Transit Time Spread) 及び I.R.F. (Instrument Response Function).....	216
(4) MCP-PMT の時間特性.....	218
11.2.3 温度特性および冷却器について.....	219
11.2.4 飽和特性.....	220
(1) 不感時間 (Dead Time).....	220
(2) DC 光による飽和.....	221
(3) パルス光による飽和.....	222
(4) フォトンカウンティング法における飽和ゲイン特性 (波高分布).....	223
(5) フォトンカウンティング法によるカウントリニアリティ.....	223
11.2.5 磁気特性.....	224
11.3 ゲート付 MCP-PMT.....	226
第11章 参考文献.....	228
第12章 HPD (Hybrid Photo-Detector)	
12.1 動作原理.....	230
12.2 HPD の特長.....	231
12.3 HPD の諸特性.....	232
12.3.1 波高分解能.....	232
12.3.2 ゲイン特性・電子打込みゲインの均一性.....	232
12.3.3 時間特性.....	234

12.3.3.1	上昇時間・下降時間・電子走行時間	234
12.3.3.2	T.T.S. (Transit Time Spread)	236
12.3.4	ユニフォミティ特性	237
12.3.5	温度特性	238
12.3.5.1	リーク電流とブレイクダウン電圧の温度依存性	238
12.3.5.2	アバランシェゲインの温度依存性	239
12.3.6	アフターパルス	239
12.3.7	X線フィードバックによる影響	240
12.3.8	ドリフト特性	240
12.3.9	ライフ(寿命)特性	241
12.4	HPDの使用上の注意事項	242
第12章	参考文献	243

## 第13章 環境性と信頼性

13.1	周囲温度の影響	246
13.1.1	温度特性	246
	(1) 感度	246
	(2) 暗電流	247
13.1.2	高温用光電子増倍管	248
13.1.3	保存温度および冷却時の注意	251
13.2	湿度の影響	251
13.2.1	動作時湿度	251
13.2.2	保存時湿度	251
13.3	周囲磁界の影響	252
13.3.1	磁気特性	252
13.3.2	高磁界用光電子増倍管	253
13.3.3	磁化	254
13.4	振動・衝撃	255
13.4.1	非動作時の耐振・耐衝撃性	255
13.4.2	動作状態での耐振動・耐衝撃性(共振)	255
13.4.3	試験方法・条件	257
13.4.4	耐振用光電子増倍管	258
13.5	ヘリウムガスの影響	260
13.6	放射線の影響	261
13.6.1	窓材透過率の劣化	261
13.6.2	窓材発光	265
13.7	気圧の影響	266

13.8	周囲電位の影響	267
13.8.1	実験	267
13.8.2	対策	269
13.9	信頼性	270
13.9.1	ライフ（寿命）特性	270
13.9.2	電流ストレスと安定性	271
13.9.3	温度ストレスと安定性	272
13.9.4	信頼度	273
	(1) 故障モード	273
	(2) 故障率	273
	(3) 平均寿命	273
	(4) 信頼度	274
13.9.5	浜松ホトニクスにおける信頼度試験と判定基準	275
第13章	参考文献	276

## 第14章 各種応用

14.1	光分析装置	278
14.1.1	概要	278
14.1.2	応用例	278
	(1) 紫外一可視分光光度計 (UV-Visible Spectrophotometer)	278
	(2) 原子吸光分光光度計 (Atomic Absorption Spectrophotometer)	279
	(3) 発光分光分析装置 (Atomic Emission Spectrophotometer)	279
	(4) 蛍光分光光度計 (Fluorospectrophotometer)	280
14.2	環境測定	281
14.2.1	概要	281
14.2.2	応用例	281
	(1) 窒素酸化物 (NO <sub>x</sub> ) 分析計	281
	(2) 硫黄酸化物分析計	282
	(3) ダストカウンタ	283
	(4) レーザレーダ (LIDAR)	284
14.3	医用装置	285
14.3.1	PET (Positron Emission Tomography)	285
14.3.2	プラナーイメージング装置	287
14.3.3	ガンマカメラ (Gamma Camera)	288
14.3.4	X線画像診断装置	290
	(1) コンピューテッド・ラジオグラフィ (CR)	290
14.3.5	検体検査	291
	(1) R.I.A. (Radioimmunoassay)	293
	(2) 蛍光イムノアッセイ	294

(3) 化学発光免疫測定装置 .....	294
14.4 顕微鏡.....	295
14.4.1 概要 .....	295
14.4.2 応用例 .....	295
(1) 共焦点レーザ走査顕微鏡 .....	295
(2) 2光子顕微鏡 .....	296
(3) 蛍光相関分光法 .....	296
14.5 生命科学.....	297
14.5.1 概要 .....	297
14.5.2 応用例 .....	297
(1) フローサイトメータ .....	297
(2) リアルタイム PCR / デジタル PCR .....	298
14.6 高エネルギー物理実験 .....	299
14.6.1 概要 .....	299
14.6.2 衝突型実験装置.....	299
(1) ホドスコープ.....	299
(2) TOF カウンタ.....	300
(3) カロリメータ.....	300
(4) チェレンコフカウンタ .....	301
14.6.3 陽子崩壊実験・ニュートリノ観測実験 .....	302
14.6.4 ガンマ線望遠鏡.....	304
14.6.5 ダークマター実験.....	305
14.7 石油探層.....	306
14.8 放射線監視装置 .....	307
14.8.1 概要 .....	307
14.8.2 応用例 .....	307
(1) 携帯型放射線モニタ (Pager) .....	307
(2) モニタリングポスト .....	308
(3) 光刺激ルミネッセンス線量計 (Optically Stimulated Luminescence: OSL) .....	308
14.9 工業計測への応用 .....	309
14.9.1 概要 .....	309
14.9.2 応用例.....	309
(1) 半導体ウェーハ検査装置 .....	309
(2) 厚さ計 .....	309
(3) ピンホール検査 .....	310
14.10 固体表面分析 .....	311
14.10.1 固体表面分析装置 .....	311
第 14 章 参考文献 .....	313

# 第 1 章

## 序

## 1.1 本書の構成と概要

本書の各章に記述されている内容についての概略を以下に記します。

### 第1章 「序」

本論に先立ち、光の波長及び光の強度の単位についてふれます。さらに、光電面、光電子増倍管の開発の歴史について解説しています。

### 第2章 「光電子増倍管の基本原理」

光電子増倍管(Photomultiplier Tube)を構成する基本要素である光電子放出、電子軌道、電子増倍部（ダイノード部）による電子増倍の原理、陽極（アノード）について解説しています。

### 第3章 「基本的な使い方」

初めて光電子増倍管を使用される方を対象として、光電子増倍管の選択方法、動作方法、信号の処理方法について解説しています。

### 第4章 「光電子増倍管の特性」

光電子増倍管の基本特性および諸特性について詳しく解説しています。

### 第5章 「光電子増倍管の接続回路とその使い方」

光電子増倍管を実際に正しく動作させるための基本回路と必要なアクセサリについてその使い方を解説しています。

### 第6章 「フォトンカウンティング法」

光の絶対量が少なく極微弱な光の測定に使用されているフォトンカウンティング法の原理、使用法、特性、利点等について解説しています。

### 第7章 「シンチレーションカウンティング法」

光電子増倍管をシンチレーションカウンティング法で放射線計測に使用する場合の特性の定義、測定方法、代表的な数値例などについて解説しています。

### 第8章 「光電子増倍管モジュール」

光電子増倍管をさらに使いやすく、さらに広く使用していただくために開発された光電子増倍管モジュールについて解説しています。

### 第9章 「位置検出型光電子増倍管」

マルチアノード型光電子増倍管および重心位置検出型光電子増倍管の構造、特性および応用例について解説しています。

## 第10章 「マイクロPMT」

これまでのPMTの製造方法を1から見直し、MEMS技術を応用することで開発した、世界最小のPMTであるマイクロPMTについて解説しています。

## 第11章 「MCP 内蔵型光電子増倍管」

マイクロチャンネルプレート(Microchannel plate : MCP)を内蔵した高感度かつ超高速光検出器であるマイクロチャンネルプレート内蔵型光電子増倍管(MCP-PMT)について解説しています。

## 第12章 「HPD」

電子管に半導体素子を内蔵したハイブリッド型フォトディテクタ(HPD)について解説しています。

## 第13章 「環境性と信頼性」

光電子増倍管の環境性と信頼性に対する特性および使用方法を記述しています。特に、周囲温度、湿度、磁界等の影響とその対策について解説しています。

## 第14章 「各種応用」

光電子増倍管の応用について解説しています。各種の応用分野で光電子増倍管がどのように使われているかについて解説しています。

## 1.2 測光の単位について

光電子増倍管の記述をするに先だって、本節では光の量（測光）の単位系について解説します。ここでは、測光領域における光の波長域とその単位及び光の強度の単位系について述べます。ここではそれらの概要のみ記述しますので、詳細は専門書を参照してください。<sup>1)2)</sup>

### 1.2.1 光の波長による分類と単位

電磁波は $\gamma$ 線からミリ波まで極めて広い範囲にわたり、光は電磁波のある特定の波長領域と定義されます。

表1-1に、光を波長で分類した時の、称呼領域と単位変換図を示します。一般的に光と言われる領域は表1-1に示すように波長域で $10^2$  nm $\sim$  $10^6$  nmあたりを指します。表中、350 nm $\sim$ 750 nmの可視域に対し、波長が短くなると、紫外域（350 nm以下）、空気の吸収が生じる真空紫外域（200 nm以下）、極紫外域（100 nm以下）、さらに短波長域は「軟X線、X線」と呼ばれる波長領域（10 nm以下）となります。また、可視域より長波長になると、近赤外域（750 nm以上）、赤外域（数 $\mu$ m以上）、遠赤外域（数10  $\mu$ m以上）とよばれる領域となります。

波 長 (nm)	称呼領域	周波数 (Hz)	エネルギー (eV)
10	X 線 軟X線		
$10^2$	極紫外域	$10^{16}$	$10^2$
200	真空紫外域		10
350	紫外域	$10^{15}$	
750	可視域		
$10^3$	近赤外域		1
$10^4$	赤外域	$10^{14}$	
		$10^{13}$	$10^{-1}$
$10^5$			$10^{-2}$
	遠赤外域	$10^{12}$	
$10^6$			$10^{-3}$

表 1-1 光の波長領域と単位換算図

ここで光量子のエネルギー E(J)は以下の式1-1から求められます。

$$E = hv = h \frac{c}{\lambda} \dots\dots\dots (式 1-1)$$

h：プランクの定数  $6.626 \times 10^{-34}$  J·s  
 v：光の振動数 (Hz)  
 c：光速  $3 \times 10^8$  m/s  
 λ：波長 (m)

ここで、式1-1にEをeV単位で、波長をnm単位で、及び定数h、cをそれぞれ代入すると、式1-2のように書き換えられます。ここで1 (eV)は $1.6 \times 10^{-19}$  Jです。

$$E(\text{eV}) = \frac{1240}{\lambda} \dots\dots\dots (式 1-2)$$

これにより、光のエネルギーは波長の逆数に比例して強くなることがわかります。

## 1.2.2 光の強度の単位

ここでは光の強度の単位とその定義についてふれます。

光の放射量は純物理量であり、ワット W(J/s)を単位として定義されます。これに対して測光量はいわゆる心理物理量であり、ルーメン lmを単位として定義されます。

毎秒N個の強さで波長λ(nm)の光量子があったとすると、W=J/sの関係から、式1-1は以下の式1-3のように書き換えられます。

$$W = NE = \frac{Nhc}{\lambda} \dots\dots\dots (式 1-3)$$

ここで各定数を代入すると、以下の式が得られます。

$$W = \frac{N \times 2 \times e^{-16}}{\lambda}$$

上式は、光の放射量(W)と毎秒あたりの光量子数(N)との関係を示し、覚えておくと便利な式です。

表1-2に放射量と測光量 ([ ]内) の単位の比較表を示します。(説明は次節にて)

量	単位名	単位記号
放射束 [光束]	ワット [ルーメン]	W [lm]
放射エネルギー [光量]	ジュール [ルーメン秒]	J [lm·s]
放射照度 [照度]	ワット每平方米 [ルクス]	W/m <sup>2</sup> [lx]
放射発散度 [光束発散度]	ワット每平方米 [ルーメン每平方米]	W/m <sup>2</sup> [lm/m <sup>2</sup> ]
放射強度 [光度]	ワット毎ステラジアン [カンデラ]	W/sr [cd]
放射輝度 [輝度]	ワット毎ステラジアン每平方米 [カンデラ每平方米]	W/(sr·m <sup>2</sup> ) [cd/m <sup>2</sup> ]

表 1-2 放射量と測光量 ([ ]内) の単位比較

## 1. 放射束 [光束]

放射束は、放射量における単位であり表1-2の [ ] 内に示す光束は測光量における単位を示します。以下の記述において、すべてこの方式に従って区別します。放射束( $\Phi_e$ )は、ある面を単位時間あたりに通過する放射エネルギー( $Q_e$ )であり、以下の式 (1-4) で定義されます。

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt} (\text{J/s}) \quad \dots\dots\dots (式 1-4)$$

他方測光量である、光束( $\Phi$  : 単位ルーメン)は、以下の式により定義されます。

$$\Phi = K_m \int \Phi_e(\lambda) \cdot V(\lambda) d\lambda \quad \dots\dots\dots (式 1-5)$$

ここで  $\Phi_e(\lambda)$  : ある放射束の分光放射密度 (分光放射束)

$K_m$  : 最大視感度 (683 lm/W)

$V(\lambda)$  : 標準視感度

最大視感度( $K_m$ )は、放射量と測光量を結び付ける変換係数です。

また $V(\lambda)$ は標準的な人間の目の分光感度分布を表します。図1-1及び表1-3に国際的に定められた $V(\lambda)$ の分布及び数値を示します。

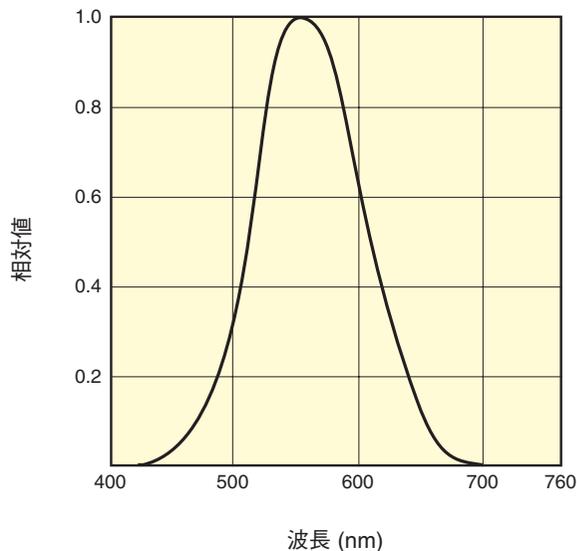


図 1-1 標準視感度分布

波長(nm)	標準比視感度	波長(nm)	標準比視感度
400	0.0004	600	0.631
10	0.0012	10	0.503
20	0.0040	20	0.381
30	0.0116	30	0.265
40	0.023	40	0.175
450	0.038	650	0.107
60	0.060	60	0.061
70	0.091	70	0.032
80	0.139	80	0.017
90	0.208	90	0.0082
500	0.323	700	0.0041
10	0.503	10	0.0021
20	0.710	20	0.00105
30	0.862	30	0.00052
40	0.954	40	0.00025
550	0.995	750	0.00012
555	1.0	60	0.00006
60	0.995		
70	0.952		
80	0.870		
90	0.757		

表 1-3 波長別標準比視感度表

## 2. 放射エネルギー [光量]

放射エネルギー ( $Q_e$ )とは、放射束の時間的積分量です。

同様に、光量( $Q$ )は光束の時間的積分量と定義されます。それぞれ、式1-6、式1-7で示されます。

$$Q_e = \int \Phi_e dt \text{ (W}\cdot\text{s)} \quad \dots\dots\dots \text{(式 1-6)}$$

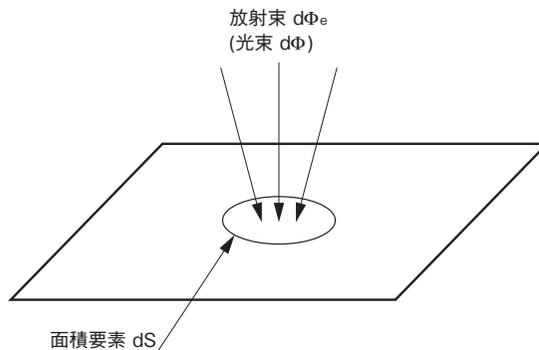
$$Q = \int \Phi dt \text{ (lm}\cdot\text{s)} \quad \dots\dots\dots \text{(式 1-7)}$$

## 3. 放射照度 [照度]

放射照度 [照度] は、ある面に入射する放射束 (光束) をその微小面積で割ったものです。(図 1-2参照) それらを式で表すと、式1-8、式1-9のようになります。

$$\text{放射照度 } E_e = \frac{d\Phi_e}{dS} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad \dots\dots\dots \text{(式 1-8)}$$

$$\text{照度 } E = \frac{d\Phi}{dS} \text{ (lx)} \quad \dots\dots\dots \text{(式 1-9)}$$



THBV4\_0102JA

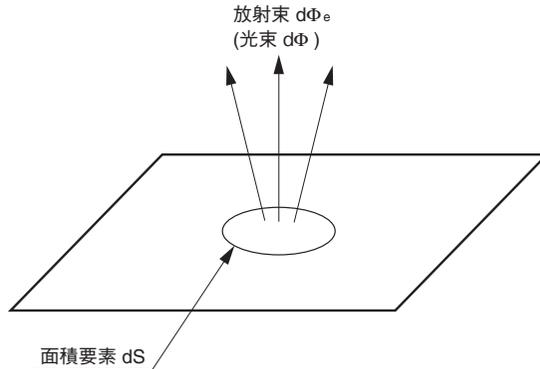
図 1-2 放射照度

#### 4. 放射発散度 [光束発散度]

放射発散度 [光束発散度] は、光を放出する面において、放出される放射束(光量)を、その微小面積で割った量です。(図1-3参照)それぞれ、以下の式1-10、式1-11で表されます。

$$\text{放射発散度 } Me = \frac{d\Phi_e}{dS} \text{ (W/m}^2\text{)} \quad \dots\dots\dots \text{(式 1-10)}$$

$$\text{光束発散度 } M = \frac{d\Phi}{dS} \text{ (lm/m}^2\text{)} \quad \dots\dots\dots \text{(式 1-11)}$$



THEV4\_0103JA

図 1-3 放射発散度

#### 5. 放射強度 [光度]

放射強度 [光度] は、点状の放射源からその微小立体角内に出ていく放射束 (光束) を微小立体角で割った量です。(図1-4参照) それぞれ、式1-12、式1-13で表されます。

$$\text{放射強度 } I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega} \text{ (W/sr)} \quad \dots\dots\dots \text{(式 1-12)}$$

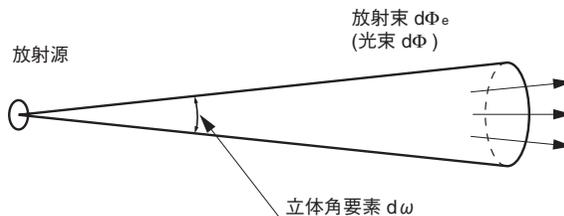
$\Phi_e$  : 放射束 (W)

$\omega$  : 立体角 (sr)

$$\text{光度 } I = \frac{d\Phi}{d\omega} \text{ (cd)} \quad \dots\dots\dots \text{(式 1-13)}$$

$\Phi$  : 光束 (lm)

$\omega$  : 立体角 (sr)



THEV4\_0104JA

図 1-4 放射強度

6. 放射輝度 [輝度]

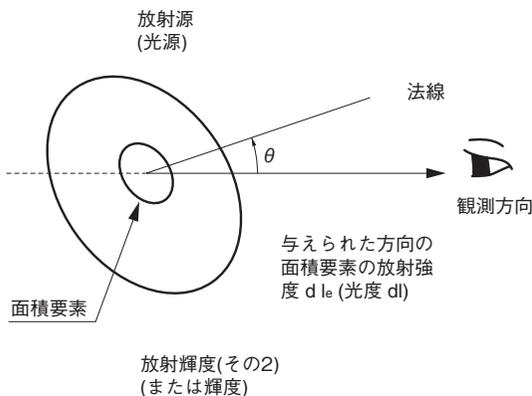
放射輝度 [輝度] は、放射源のある方向への放射において、放射強度 (光度) を放射量の正射影面積で割った量です。(図1-5参照) それぞれ、式1-14、式1-15に定義されます。

$$\text{放射輝度 } L_e = \frac{dI_e}{dS \cos\theta} \quad (W/(sr \cdot m^2)) \quad \dots\dots\dots \text{(式 1-14)}$$

- le : 放射強度
- S : 面積
- θ : 観測方向と微小面の法線となす角

$$\text{輝度 } L = \frac{dI}{dS \cos\theta} \quad (cd/m^2) \quad \dots\dots\dots \text{(式 1-15)}$$

- I : 光度 (cd)



THBV4\_0105JA

図 1-5 放射輝度比較

これまで、基本的な測光の単位について述べてきました。ここでは、定量的にはSI単位を用いて説明しましたが、場合によっては、SI単位によらない場合もあります。

表1-4、1-5に輝度、照度のSI、非SI単位系における比較表を示します。それらの間の変換が必要な時に利用して下さい。

	単位名	記号	換算式
SI単位系	ニト スチルブ アポストルブ ランベルト	nt sb asb L	1 nt = 1 cd/m <sup>2</sup> 1 sb = 1 cd/cm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> cd/m <sup>2</sup> 1 asb = 1/π cd/m <sup>2</sup> 1 L = 1/π cd/cm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> /π cd/m <sup>2</sup>
非SI単位系	フートランベルト	fL	1 fL = 1/π cd/ft <sup>2</sup> = 3.426 cd/m <sup>2</sup>

表 1-4 輝度の単位

	単位名	記号	換算式
SI単位系	フォト	ph	1 ph = 1 lm/cm <sup>2</sup> = 10 <sup>4</sup> lx
非SI単位系	フートキャンドル	fc	1 fc = 1 lm/ft <sup>2</sup> = 10.764 lx

表 1-5 照度の単位

## 1.3 歴史

### 1.3.1 光電面の歴史<sup>3)</sup>

1887年、Herts<sup>4)</sup>は、負電極を紫外線にさらすことで光電効果を発見しました。翌1888年には、Hallwacks<sup>5)</sup>によってさらにはっきりとした光電効果が確認されました。1889年には、Elster、Geiter<sup>6)</sup>により、アルカリ金属（ナトリウム・カリウム）によって可視光線による光電効果が報告されました。この後、さまざまな光電子放出の実験や論争が行われ「光電子放出は光子の自由電子への転換を表す」というEinsteinの概念（量子論-1905年）<sup>7)</sup>が立証され、受け入れられていきました。このような流れの中で、1913年には、前述のElsterとGeiterにより光電管が作られました。1929年Koller<sup>8)</sup>とCampbell<sup>9)</sup>らにより、Ag-O-Cs（銀酸化セシウム(S-1)）の複合光電子放出面（光電面）が発見されました。この光電面は、以前より使われていた材料よりも二桁程度大きい光電感度比を示し、可視域から赤外域にかけて高い感度が得られました。1930年には、両氏によりこのS-1光電面を持つ光電管が作られました。また、同じ年、日本でも浅尾氏によりS-1光電面の銀増感法が報告されています。これ以降、可視域用バイアルカリ光電面、赤外域まで高感度であるマルチアルカリ光電面、紫外検出用アルカリハライド光電面などが次々と開発されました<sup>10)~13)</sup>。2007年、光電面製法の工夫により、量子効率を大幅に改善することに成功しました。この光電面は350 nmで43 %の量子効率を得られ、ウルトラバイアルカリ（Ultra bialkali: UBA 平均QE43 %）と命名されました。ウルトラバイアルカリの他、35 %の量子効率を得られるスーパーバイアルカリ（Super bialkali:SBA）が開発されました。また、-100 °C以下の低温や、200 °Cの高温など過酷な使用環境でも安定的に動作する光電面を開発しました。

この他に、紫外から近赤外域で高い感度をもつNEA (Negative Electron Affinity) 型構造のGaAs<sup>14)~19)</sup>、InGaAs<sup>20)21)</sup>などのIII-V族化合物半導体を用いた光電面も開発され、実用化されています。現在では、上記光電面を有する光電子増倍管が、多数揃えられており、目的に応じて使われています。

### 1.3.2 光電子増倍管の歴史

光電子増倍管の歴史は、光電面に加え二次電子面および増倍部の開発とともに発展してきました。

二次電子面の最初の報告は、1902年、Austin<sup>22)</sup>らによりなされました。これ以降、電子増倍の目的で二次電子面（二次電子放出）が研究されていきました。1935年にはIams<sup>23)</sup>らにより、光電面と二次電子面を組み合わせた1段の増倍部を持つ3極光電子増倍管が作られ、映画のサウンドピックアップに用いられました。翌1936年、Zworykin<sup>24)</sup>らにより、多段の増倍部を持つ光電子増倍管が開発されました。これは、電界と磁界を利用して電子移動を行うものでした。1939年、ZworykinとRajchman<sup>25)</sup>が、静電集束型（これは、現在の光電子増倍管の基本構造となっている）の光電子増倍管を開発しました。この光電子増倍管には、当初Ag-O-Cs光電面が使われましたが、その後Sb-Cs光電面が使われました。

さらにその後、1949年<sup>26)</sup>、1956年にMorton<sup>27)</sup>らによって改良、開発の加えられた光電子増倍管の構造が発表されました。増倍部構造に関しては、サーキュラケージ型、リニアフォーカス型、ボックスアンドグリッド型が開発された他、磁界集束増倍器<sup>28)</sup>、透過型二次電子面<sup>29)~31)</sup>、チャンネル型増倍管<sup>32)</sup>などもその後開発されました。

浜松ホトニクス（当時浜松テレビー1983年社名変更）では、1953年に、Sb-Cs光電面を持つ光電管を初めとするさまざまな光電管の製造を開始しました。1959年には、サイドオン光電子増倍管（製品名931A、1P21、R106：Sb-Cs光電面）を発売し、分光分析用として使われていきました。1962年、Ag-Bi-O-Cs光電面を持つサイドオン光電子増倍管（製品名R132、R136）を発売しました。この光電面は、Sb-Cs光電面に比べて、赤色波長の感度が良いため、分光分析用には当時としては最適でした。さらに1965年より、ヘッドオン光電子増倍管（製品名6199：Sb-Cs光電面）の発売が始まりました。1967年、当時一番小さい光電子増倍管だった1/2インチサイドオン光電子増倍管（製品名R300：Sb-Cs光電面）を発売しました。1969年には、マルチアルカリ(Na-K-Cs-Sb)光電面を持つ光電子増倍管（製品名R446-サイドオン、R375-ヘッドオン）を発売しました。この後、1974年には、赤色波長の感度増強を図った高感度マルチアルカリサイドオン光電子増倍管（製品名R928）を発売しました。この高感度化は、当時、飛躍的な進展でありました。これ以降も世界で最も小型（3/8インチR1635）のものから最も大型（20インチR1449、R3600）のものまで、また増倍部にマイクロチャンネルプレートを用いた超高速特性（時間分解能30ピコ秒）を持つマイクロチャンネルプレート光電子増倍管(R3809)、1テスラの高磁場下で $10^5$ のゲインを有するメッシュ型構造を用いた光電子増倍管(R5924)、光電面からの光電子を直接、半導体に打ち込むことで光電子を増倍し、増倍ゆらぎが非常に少ないハイブリッド型フォトディテクタ(HPD)、メタルチャンネル型増倍部を採用し、TO-8メタルパッケージに内蔵した小型光電子増倍管(R7400)、位置検出が可能な位置検出型光電子増倍管、薄型で有効面積比の高いフラットパネル光電子増倍管、MEMS技術を応用することで、指先に乗る超小型光電子増倍管（マイクロPMT）など、多方面の応用に合わせた多種多様な光電子増倍管を世に送り出しています。



## 第1章 参考文献

- 1) 照明学会：ライティングハンドブック，オーム社（1987）
- 2) John W.T.WALSH:Photometry, DOVER Publications, Inc.New York
- 3) T.Hiruma: SAMPE Journal, 24, 35 (1988)  
A.H.Sommer: Photoemissive Materials, Robert E.Krieger Publishing Company (1980)
- 4) H.Herts: Ann. Physik, 31, 983 (1887)
- 5) W.Hallwachs: Ann. Physik, 33, 301 (1888)
- 6) J.Elster and H.Geitel: Ann. Physik, 38, 497 (1889)
- 7) A.Einstein: Ann. Physik, 17, 132 (1905)
- 8) L.Koller: Phys. Rev., 36, 1639 (1930)
- 9) N.R.Campbell: Phil. Mag., 12, 173 (1931)
- 10) P.Gorlich: Z.Physik, 101, 335 (1936)
- 11) A.H.Sommer: U.S.Patent 2, 285, 062, Brit. Patent 532, 259
- 12) A.H.Sommer: Rev. Sci. Instr., 26, 725 (1955)
- 13) A.H.Sommer: Appl. Phys. Letters, 3, 62 (1963)
- 14) A.N.Arsenova-Geil and A.A.Kask: Soviet Phys. - Solid State, 7, 952 (1965)
- 15) A.N.Arsenova-Geil and Wang Pao-Kun: Soviet Phys. - Solid State, 3, 2632 (1962)
- 16) D.J.Haneman: Phys. Chem. Solids, 11, 205 (1959)
- 17) G.W.Gobeli and F.G.Allen: Phys. Rev., 137, 245A (1965)
- 18) D.G.Fisher, R.E.Enstrom, J.S.Escher, H.F.Gossenberger: IEEE Trans. Elect. Devices, Vol ED-21, NO.10, 641 (1974)
- 19) C.A.Sanford and N.C.Macdonald: J. Vac. Sci. Technol. B8(6), NOV/DEC 1853 (1990)
- 20) D.G.Fisher and G.H.Olsen: J. Appl. Phys. 50(4), 2930 (1979)
- 21) J.L.Bradshaw, W.J.Choyke and R.P.Devaty: J. Appl. Phys. 67(3), 1, 1483 (1990)
- 22) H.Bruining: Physics and applications of secondary electron emission., McGraw-Hill Book Co., Inc. (1954)
- 23) H.E.Jams and B.Salzberg.: Proc. IRE, 23, 55 (1935)
- 24) V.K.Zworykin, G.A.Morton, and L.Malter.: Proc. IRE, 24, 351 (1936)
- 25) V.K.Zworykin and J.A.Rajchman: Proc. IRE, 27, 558 (1939)
- 26) G.A.Morton: RCA Rev., 10, 529 (1949)
- 27) G.A.Morton: IRE Trans. Nucl. Sci., 3, 122 (1956)
- 28) Heroux, L., and H.E.Hinteregger: Rev. Sci. Instr., 31, 280 (1960)
- 29) E.J.Sternglass: Rev. Sci. Instr., 26, 1202 (1955)
- 30) J.R.Young: J.Appl.Phys., 28, 512 (1957)
- 31) H.Dormont, and P.Saget: J. Phys. Radium (Physique Appliquee), 20, 23A (1959)
- 32) G.W.Goodrich, and W.C.Wiley: Rev. Sci. Instr., 33, 761 (1962)

## 第2章

# 光電子増倍管の基本原理

本章では光電子増倍管の構造及び動作原理、光電子放出の原理、電子軌道、そして電子増倍部について記述します。

## 2.1 光電子増倍管の構造と増倍原理<sup>1)~5)</sup>

光電子増倍管は一般的にガラス管に封じられた真空管で、入射窓、光電面（陰極）、集束電極、電子増倍部（ダイノード）、陽極より構成されています。その構造を図2-1に示します。

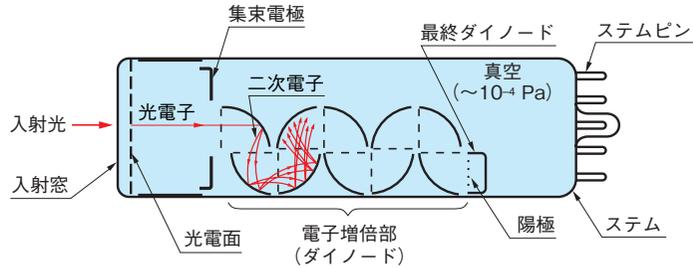


図 2-1 光電子増倍管の構造図

光電子増倍管に入射した光は以下に示す過程を経て信号出力されます。

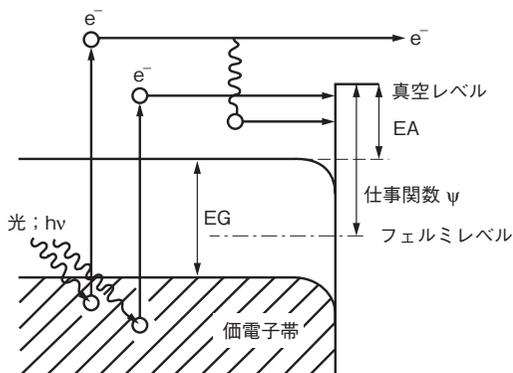
- (1) ガラス窓を透過します。光電面内の電子を励起し、真空中に光電子を放出(外部光電効果)します。
- (2) 光電子は集束電極で加速・収束され、第1ダイノードに衝突し二次電子を放出することにより、電子増倍します。
- (3) 二次電子増倍がそれ以降の電子増倍部に衝突し、二次電子放出を繰り返します。
- (4) 最終ダイノードより放出された二次電子群は最終的に $10^6$ 倍～ $10^7$ 倍になり、陽極(アノード)より取り出されます。

## 2.2 光電子放出<sup>6)7)</sup>

光電変換は、真空中への光電子放出で代表される外部光電効果と、光電子を伝導帯へ励起する内部光電効果に大別されます。光電面は前者の機能を持ち、後者においては光導電および光起電力などに応用されます。

光電面は一種の半導体であり、図2-2に示すようなバンドモデルとして考えられます。(1)にアルカリ光電面、(2)にⅢ-V族化合物半導体光電面 (GaAs、GaAsP、InGaAs など) のバンドモデルを示します。

(1) アルカリ光電面



(2) Ⅲ-V族化合物半導体光電面

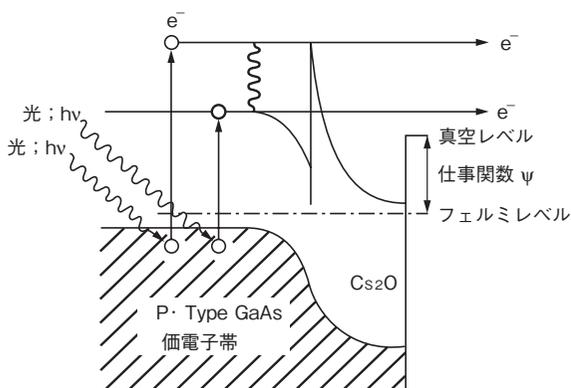


図 2-2 光電面のバンドモデル

半導体には、電子が存在することができない禁止帯の幅である『エネルギーギャップ(EG)』と伝導帯と真空準位障壁(真空レベル)の間隔である『電子親和力(EA)』、そしてフェルミレベルと真空準位障壁(真空レベル)との間のエネルギー差である『仕事関数( $\phi$ )』が存在します。

光電面に光子が入射すると、価電子帯の電子が光子エネルギー ( $h\nu$ )を吸収して励起され、表面に拡散していきます。拡散した電子は真空準位障壁を越え、光電子として真空中に放出されます。これらはいずれも確率過程で示され、量子効率(出力電子数/入射光子数) $\eta(\nu)$ は次式で与えられます。

$$\eta(\nu) = (1-R) \frac{P\nu}{k} \cdot \left( \frac{1}{1+1/kL} \right) \cdot P_s$$

ここで

- R : 反射係数
- k : 光子の全吸収係数
- Pv: 光吸収のうち、真空レベル以上に電子が励起される確率
- L : 励起電子の平均逸脱距離
- P<sub>s</sub>: 表面に達した電子の真空中に放出される確率
- $\nu$  : 光の振動数

この式において適当な物質を選び、R, k, Pvを決定した場合、量子効率を支配するものはL(励起電子の平均逸脱距離)とP<sub>s</sub>(電子の真空中に放出される確率)となります。Lは良好な結晶を使用することにより長くなり、P<sub>s</sub>は電子親和力(EA)に強く依存します。

図2-2(2)に、Ⅲ-V族化合物半導体光電面<sup>8)~10)</sup>のバンドモデルを示します。このⅢ-V族化合物半導体光電面の表面層にCs<sub>2</sub>Oなどを用い、正に帯電させると空乏層ができバンド構造が湾曲します。この湾曲により電子親和力を負にすることができます。このような状態をNEA(Negative Electron Affinity)と言います。NEAの効果は表面に達した電子の真空中に放出される確率(P<sub>s</sub>)を増大することであり、特に励起エネルギーの低い長波長光での量子効率を高くします。さらに空乏層の影響で励起電子の平均逸脱距離(L)も長くします。

光電面は、構造により反射型と透過型に大別できます。反射型は通常金属板上に光電面を形成し、光電子は光の入射方向と反対方向に放出されます。透過型は、通常光学的に透明な平板上に薄膜状の光電面を形成し、光電子は光の入射方向と同一方向に放出されます。(図2-3, 2-4, 2-5, 2-6参照)前者は主に、光電子増倍管の側管部より光を入射するサイドオン型に使われ、後者は円筒管の端面より入射するヘッドオン型に使われています。

また、光電面に使われるアルカリ金属の組合せや製法によって最高感度波長と、長波長側の限界が決まります。光電感度<sup>11)</sup>はJEDEC (Joint Electron Devices Engineering Council) にて、光電面材料と窓材の組み合わせによって“S”ナンバーで登録されています。現在は一部のもの(S-1, S-11, S-20, S-25)のみ、使われています。各種類の分光感度特性は、第4章を参照してください。

## 2.3 電子軌道

光電子、二次電子をダイノードに効率よく集め、さらに電子の走行距離による時間的分散をできるだけ小さくするため、電子軌道解析<sup>12)~16)</sup>を行うことにより最適な電極設計がなされています。

光電子増倍管内での電子の運動は、電界によって左右されますが、この電界は電極の形状、配置および供給電圧によって支配されます。電位分布を求め、運動方程式を解くことによって、電子軌道が決まっています。

光電面と第1ダイノード間の集束部については、光電面の形状（平面形または曲面形）、集束電極の形状、配置、供給電圧を考慮して、光電面から放出された光電子を効率良く第1ダイノードに入射するように配置しており、第1ダイノードの収集効率、放出された光電子数に対する第1ダイノードの有効領域に入射した電子数の比で表され、60%～90%の値が得られています。

第1ダイノード以降の電子増倍部は、通常、曲面状の電極を多段に繰り返して配置されます。

図2-3, 2-4, 2-5に、サーキュラケージ(Circular Cage)型、ラインフォーカス(Linear Focus)型、メタルチャンネル型の電子軌道モデル図を示します。各種類の特長については、第4章4.2.1を参照してください。

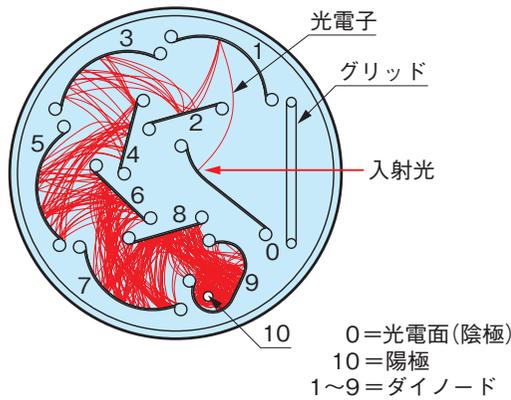


図 2-3 サーキュラケージ型

THBV4\_0203JA

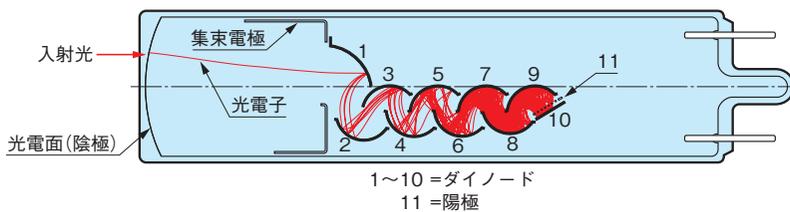


図 2-4 ラインフォーカス型

THBV4\_0204JA

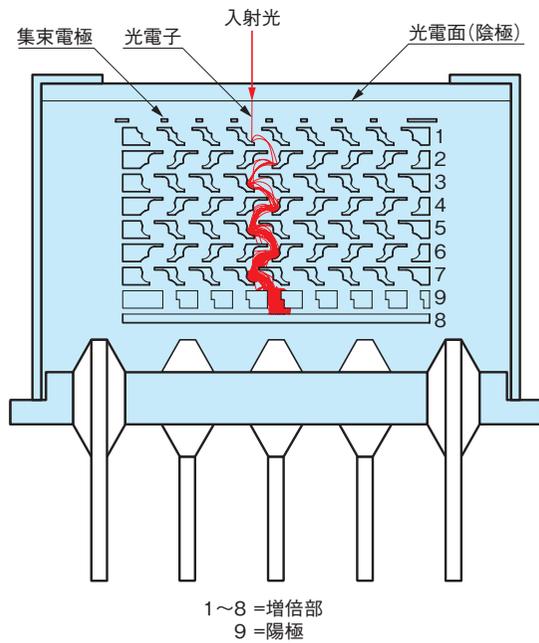


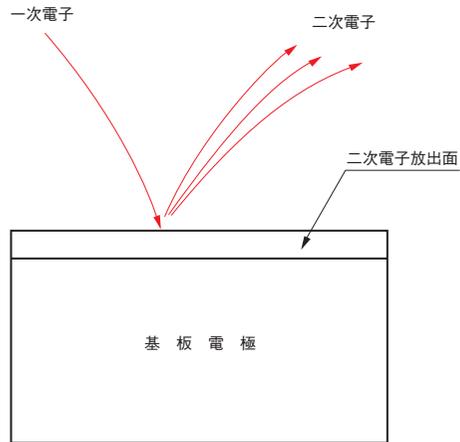
図 2-5 メタルチャンネル型

THBV4\_0205JA

## 2.4 電子増倍部 (ダイノード)

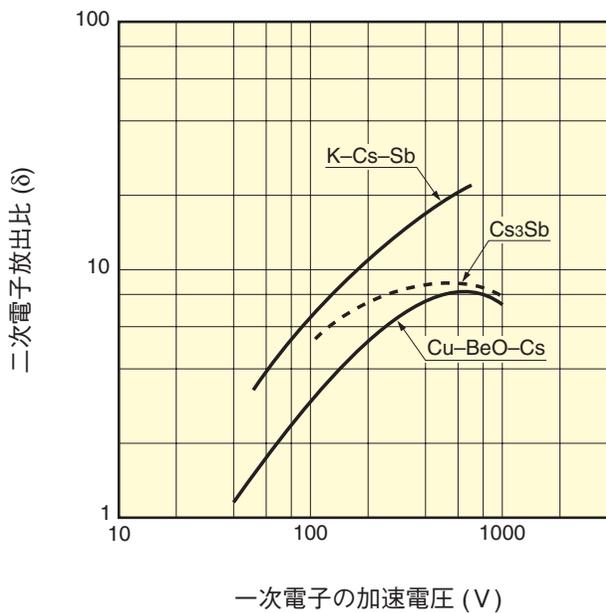
前記のように光電子増倍管の電位分布と電極構造は最適に設計されており、光電子は、第1ダイノードから最大19段の電子増倍部で多段増倍され、10倍～ $10^8$ 倍の電流増倍を得て陽極に送られます。

二次電子放出材料<sup>17)~21)</sup>には、一般的にはアルカリ-アンチモン(Sb)、酸化ベリリウム(BeO)、酸化マグネシウム(MgO)などが使われていますが、基板はニッケル金属、ステンレス金属やベリリウム銅合金などが用いられます。図2-7に、電子増倍部の二次電子増倍機能のモデルを示します。



THBV4\_0206JA

図 2-6 電子増倍部の二次電子放出モデル



THBV4\_0207JA

図 2-7 二次電子放出比

初速エネルギー  $E_p$  を持つ一次電子1個により、ダイノードから  $\delta$  個の二次電子が放出されます。この  $\delta$  を二次電子放出比といいます。図2-8に各種ダイノード材料の加速電圧と二次電子放出比  $\delta$  の関係を示します。このとき、光電子増倍管の電子増倍率であるゲイン  $\mu$  は次式で表されます。

$$\mu = \delta^n$$

$\delta$  : 各ダイノードの二次電子放出比

$n$  : ダイノードの段数

このゲインの詳細については第4章4.2.2に記述します。

また、電子増倍部構造の種類や電子増倍部の段数などによってゲイン、時間応答特性、直線性（リニアリティ）などが異なり、使用目的に応じて、選択の必要があります。これらの特長は第4章4.2.1に記述します。

## 2.5 陽極（アノード）

陽極とは、多段の電子増倍部で増幅された二次電子を収集し、外部へ電流として取り出す電極です。

陽極の構造は、前述の電子軌道などにより最適な形状に設計されており、一般的には線状や平板状あるいは網状電極などで作られています。また、空間電荷効果による影響を最小限に抑えるために最終段ダイノードと陽極間に一定以上の電位差を設けてなるべく大きな電流出力が得られるように配慮されています。

## 第2章 参考文献

- 1) 浜松ホトニクス(株)：光電子増倍管と関連製品(2015)
- 2) 浜松ホトニクス(株)：光電子増倍管(フォトマル)の特性と使用法, No. 79-57-03(1982)
- 3) S.K. POULTNEY: Advances in Electronics and Electron Physics 31, 39(1972)
- 4) D.H. Seib and L.W. Ankerman: Advances in Electronics and Electron Physics, 34, 95(1973)
- 5) J.P. Boutot, et al.: Advances in Electronics and Electron Physics 60, 223(1983)
- 6) T.Hiruma: SAMPE Journal, 24, 6, 35-40(1988)
- 7) 林 達郎：分光研究. 22, 233(1973)
- 8) H. Sonnenberg: Appl. Phys. Lett., 16, 245(1970)
- 9) W.E.Spicer: et al., Pub.Astrom. Soc. Pacific, 84, 110(1972)
- 10) 萩野 実, 他：テレビ誌. 32, 670(1978)
- 11) 本間 厚：ぶんせき. 1, 52(1982)
- 12) K.J.VAN.OOSTRUM: PHILIPS TECHNICAL REVIEW, 42, 3(1985)
- 13) K.OBA & ITO: ADVANCES IN ELECTRONICS AND ELECTRON PHYSICS. 64B.343
- 14) YAKOBSON: A.M., RADIOTEKH & ELECTRON, 11, 1813(1966)
- 15) BRUINING, H: IN, PHISICS AND APPLICATIONS OF SECONDERY ELECTRON EMISSION(1954)
- 16) J.Rodeny and M.Vaughan: IEEE Transaction on Electron Devices, 36, 9(1989)
- 17) B.Gross and R.Hessel: IEEE Transaction on Electrical Insulation, 26, 1(1991)
- 18) H.R.Krall: et al., IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-17, 71(1970)
- 19) J.S.Allen: Rev. Sci. Instr., 18(1947)
- 20) A.M.Tyutikov: Radio Engineering And Electronic Physics, 84, 725(1963)
- 21) A.H.Sommer: J.Appl. Phys., 29, 598(1958)

メ 毛

## 第3章

# 光電子増倍管の基本的な使い方

本章では光電子増倍管 (Photomultiplier Tube ...以後PMTと略す場合もあります。) を初めて使用する方を対象として、光電子増倍管の選択方法、使用方法、周辺機器についての手引きが書かれています。詳細は次章以降を参照してください。

## 3.1 光電子増倍管の使用に際して

### 3.1.1 選択

光電子増倍管には以下に示すように、形状、感度、構造等の違いで多数の製品が存在します。それぞれに特徴を持っており、使用する用途に最適なものを選択することが重要です。

種類	サイズ (mm)	光電面有効 エリア (mm)	感度波長 範囲 (nm)	光電面種類	入射窓材	電極構造	Dy段数	ピン配列
サイドオン型	φ13 (1/2")	4 × 13	185 ~ 650	バイアルカリ				
	φ28 (1-1/8")	8 × 24	300 ~ 650					
ヘッドオン型	φ10 (3/8")	φ8	160 ~ 900	マルチアルカリ	硼珪酸 UV 石英 MgF <sub>2</sub> …など	サーキュラーケージ ボックス ラインフォーカス メッシュ メタルチャンネル …など	8段 9段 10段 12段 …など	10 PIN 12 PIN 14 PIN 20 PIN …など
	φ13 (1/2")	φ10	185 ~ 900	GaAs				
	φ19 (3/4")	φ15	185 ~ 930	GaAsP				
	φ25 (1")	φ22	115 ~ 320	CsTe				
	φ28 (1-1/8")	φ25	115 ~ 195	CsI				
	φ38 (1-1/2")	φ34	185~1010	InGaAs				
	φ52 (2")	φ46	300~900	InP/InGaAs				
	φ76 (3")	φ70	300~1700	…など				
	φ127 (5")	φ120	…など	…など				
	…など	…など	…など	…など				

表 3-1 光電子増倍管の種類

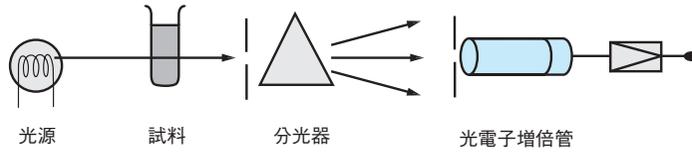


図 3-1 光電子増倍管

光電子増倍管を選択するには、まずは、光電子増倍管の種類とサイズ、光電面（受光面）の大きさ、感度波長範囲で候補品を絞り込むとよいでしょう。したがって、検出する光の状態・性質や波長はあらかじめ把握しておく必要があります。

カタログには、上記の他に供給電圧、感度、ゲイン（電流増倍率）、暗電流、時間特性なども記載されていますので、使用する用途に必要なとされる条件があれば、重要な項目から順番に仕様を選択していき、さらに候補品を絞り込むことができます。

吸光分光計測に光電子増倍管を用いる場合を例にとって、選択の目安を以下の表に示します。



THBV4\_0302JA

図 3-2 吸光分光光度計への応用

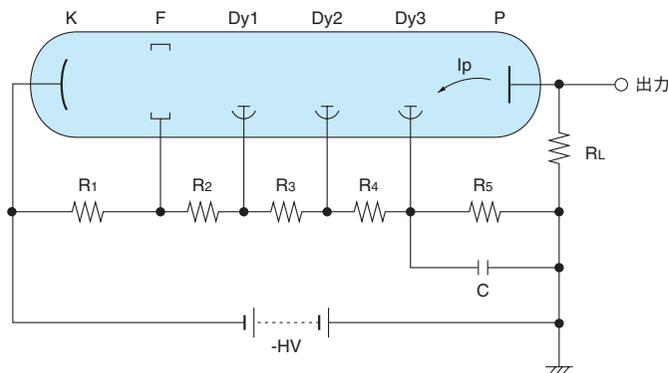
検出する光の状態	選択項目	
	光電子増倍管	周辺回路条件
光の波長	入射窓材、光電面の種類 感度波長範囲	
光の強度	ゲイン（電極への供給電圧） 暗電流	信号処理方法 (アナログ法、フotonカウンティング法)
光の広がり度合い	光電子増倍管の形状 光電子増倍管の種類 光電面有効エリア	
光現象の速さ	時間特性	接続回路の周波数帯域

表 3-2 光電子増倍管の選択

### 3.1.2 使用方法

光電子増倍管は、入射光に比例した電流を出力する電流源とみなすことができるデバイスです。太陽電池やフォトダイオードをイメージすれば考えやすいかもしれませんが、これらとの違いは、非常に微弱な光を十分な電流量として出力できることです。計測可能となる出力を得るためには、光電子増倍管を正しく動作させることが重要です。

光電子増倍管を動作させるためには、必ず、高電圧（通常500 V～2000 V程度）と電圧分割回路（以下、デバイダ回路）が必要になります。性能を十分に発揮するためには、各電極にそれぞれ最適な電圧を供給する必要がありますが、複数の独立高圧電源を使用することは実用的ではないため、通常は1つの高圧電源と抵抗により電圧を分割するデバイダ回路を用いて、各電極に最適な電圧を供給します。



THBV4\_0303JA

図 3-3 光電子増倍管とデバイダの基本

光電子増倍管は極微弱光を検出できるため、わずかな外来光でも測定結果に影響してしまいます。そのため、用途に応じて外的要因から遮蔽するためのシールドケースやハウジング、信号増幅用のアンプなどを用います。また、測定系全体を入れることができる暗箱等が必要になる場合もあります。

信号処理には、電流計やオシロスコープを用いるのが一般的です。また、必要に応じてアンプを接続する場合もあります。

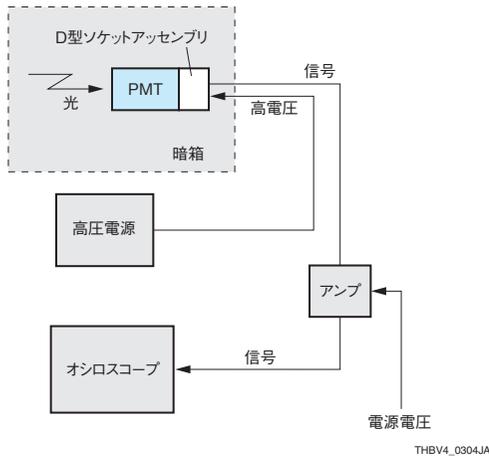


図 3-4 接続ブロック図

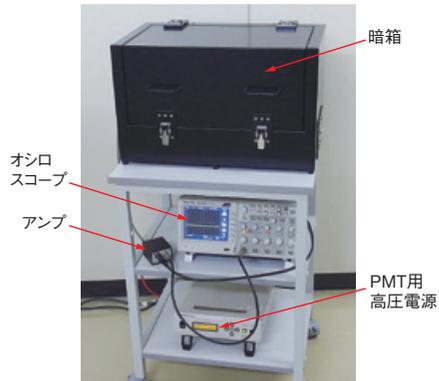


図 3-5 接続例

### 3.1.3 注意事項

光電子増倍管はガラス製品です。振動や衝撃、過度な力を与えないように丁寧に注意深く取り扱ってください。薄いガラスで密封された真空管ですので割れば破片が飛散します。

強い光入射は動作させていない状態でも性能を劣化させます。太陽光はもちろんのこと、室内光の入射でも暗電流の増加や、長時間にわたる場合は感度劣化を招くことがありますので、保管状態にも注意が必要です。

特性は温度等周囲環境の影響を受けます。特に暗電流において顕著ですので、通常、温度・湿度は室内環境とし磁界・周囲電位にも注意してください。

高電圧の取扱いに注意してください。間違った使用方法は、光電子増倍管や接続した周辺機器の破損だけではなく、感電や火災等の危険があります。

## 3.2 周辺機器

### 3.2.1 高圧電源

通常500 V～2000 V程度の正極性もしくは負極性出力の高圧電源が必要になります。使用する光電子増倍管に供給する電圧とデバイダ回路に流れる電流を考慮して選択します。高圧電源の安定性は光電子増倍管の出力に影響を与えますので、安定性が優れた高圧電源を選択することが望ましいです。

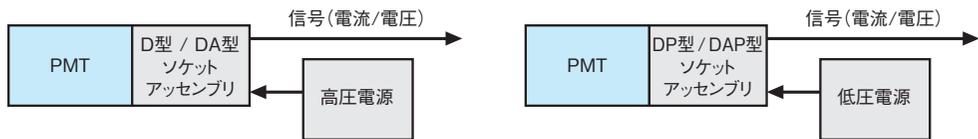
### 3.2.2 デバイダ回路

デバイダ回路を用いて高圧電源の出力を各電極に供給します。用途に最適なデバイダ回路を用いることで光電子増倍管の性能を発揮させることができます。

光電子増倍管の使用の簡便性を考え、デバイダ回路を内蔵した各種ソケットアッセンブリも用意されています。

- ・D型ソケットアッセンブリ（デバイダ回路内蔵型）
- ・DA型ソケットアッセンブリ（デバイダ回路・アンプ回路内蔵型）
- ・DP型ソケットアッセンブリ（デバイダ回路・高圧電源回路内蔵型）
- ・DAP型ソケットアッセンブリ（デバイダ回路・アンプ回路・高圧電源回路内蔵型）

DP型やDAP型ソケットアッセンブリには高圧電源回路が内蔵されていますので、これらを使用する場合は別に高圧電源を用意する必要はありません。



THEV4\_0306JA

図 3-6 ソケットアッセンブリ接続例

### 3.2.3 磁気シールドケース・ハウジング

光電子増倍管の特性は外部から加わる磁界、電界によって変化する場合があります。また、非常に高感度であるため、測定光以外の光を検出してしまいSN比を悪化させてしまうこともあります。これらの外的要因を遮蔽するために磁気シールドケースやハウジングを用いて、光電子増倍管への影響を軽減、除去します。

### 3.2.4 アンプ

光電子増倍管は入射する光の大きさによって出力電流が変動し、さらに接続する機器の負荷によって出力電圧が変わります。また、接続する信号処理機器は通常電圧信号を対象としているため、電流計を除けば、何らかの方法で出力電流を電圧信号に変換する必要があります。

アンプを用いることで、アノード電位を安定させることができ、また、光電子増倍管の高インピーダンスの電流信号を低インピーダンスの電圧信号に変換増幅でき、外来ノイズの影響も受けにくくなります。



図 3-7 周辺機器

(左から 高圧電源、ソケットアセンブリ、磁気シールドケース、アンプ)

### 3.2.5 光電子増倍管モジュール

光電子増倍管を簡便にご使用いただくために、光電子増倍管及びデバイダ回路、高圧電源回路を一体化した光電子増倍管モジュールも製品化されています。

低電圧を入力するだけで動作させることができ、高電圧を扱う必要がないため取り扱いやすく、遮光性にも優れています。また、装置への組み込み、機器接続も容易にできます。簡単に計測を始めることができますので、特に初めて光電子増倍管を使う方にお勧めします。

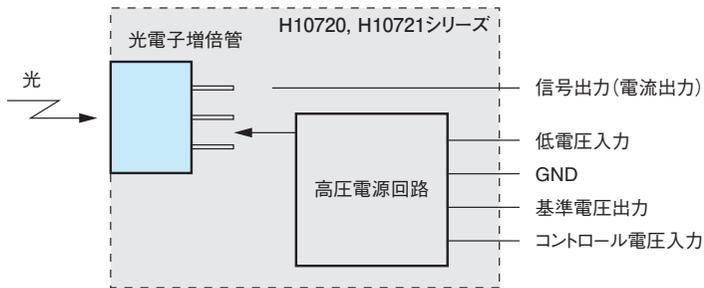


図 3-8 内部構成図

THBV4\_0308JA

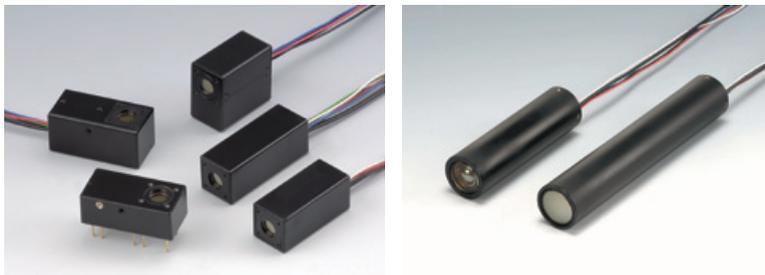


図 3-9 光電子増倍管モジュール 外観

上記構成に、アンプ回路、ゲート回路、フォトンカウンティング回路などを組み込んだものや、USBインターフェース等でパソコンと接続できる光電子増倍管モジュールも製品化されています。

### 3.2.6 信号処理（出力接続回路）

入射光の強度や時間的特性などに応じて、最適な接続回路を用いて信号処理することが望まれます。

入射する光が比較的強い領域からやや弱い領域までは、直流あるいは交流（アナログ方式）で信号処理しますが、微弱光領域では、光の最小単位である光子を1個ずつ数えるフォトンカウンティング法（デジタル方式）を用いることが多いです。アナログ方式ではオシロスコープで計測したり、AD（アナログーデジタル）変換してパソコンに取り込んだりして処理します。デジタル方式では、フォトンに対応するパルス数を計測します。

メ 毛

## 第4章

# 光電子増倍管の特性

本章では、光電子増倍管の基本特性および諸特性について詳しく解説します。4.1では、代表的な光電面の分光感度特性を述べるとともに、光電感度の定義、測定方法を記述しています。4.2では、電子増倍部（ダイノード）の種類、構造とその特性例を述べます。4.3では、光電子増倍管の時間特性、安定性、感度均一性、SN比などの代表的な諸特性について、その定義、測定法、具体的な製品の代表例について示すとともに、使用にあたっての留意点についても解説します。

## 4.1 光電面の基本特性

ここでは現在までに実用化されている光電面の種類および入射窓材の種類を紹介し、光電感度の評価方法である量子効率、放射感度、ルーメン感度などについて説明します。

### 4.1.1 光電面の種類

光電面<sup>1)~15)</sup>の多くは仕事関数が低いアルカリ金属を主成分とする化合物半導体でできています。現在までに実用となっている光電面の種類は10種類程あり、しかもそれぞれに透過型と反射型があり特性が異なっています。以下に光電面材料の主なものの特性を示します。

#### (1) Cs-I

太陽光に感度がないため「ソーラブラインド」と呼ばれています。200 nm以上の波長に対してほとんど感度を持たないため、真空紫外域の計測に用います。入射窓にはMgF<sub>2</sub>結晶か石英ガラスが使われ、波長範囲は115 nm (160 nm) ~200 nmです。

#### (2) Cs-Te

300 nm以上の波長に対してはほとんど感度を持たず、Cs-I同様、「ソーラブラインド」と呼ばれています。この種の光電面は透過型と反射型では波長範囲は変わりませんが、反射型は透過型に比べて感度が高くなっています。入射窓には石英ガラスかMgF<sub>2</sub>結晶が使われています。

#### (3) Sb-Cs

紫外線から可視光に感度をもっています。光電面の電気抵抗が後述するバイアルカリより低いため、測定光が強く、陰極に大電流が流れるときや、冷却のため光電面抵抗が大きくなりダイナミックレンジが問題となるなどには有利です。一部の反射型光電面に使用されています。

#### (4) バイアルカリ(Sb-Rb-Cs, Sb-K-Cs)

2種類のアルカリ金属を使うため、「バイアルカリ」と呼ばれます。透過型はSb-Csによく似た分光感度特性を持ち、Sb-Csより高感度、低暗電流です。またNaI(Tl)シンチレータの発光波長とよく一致しているため、シンチレーションカウンティングによる放射線計測に多く使われています。反射型は同じ材料でも製法が異なり、長波長側の感度が増強され、紫外域から700 nm程度の波長範囲を持ったものもあります。

#### (5) 低暗電流バイアルカリ(Sb-Na-K)

前述のバイアルカリと同じく2種類のアルカリ金属が使われています。分光特性は前述のバイアルカリ光電面とほぼ等しいのですが、他の一般的な光電面の保障上限温度が50℃に対し、175℃の高温に耐えることができるため、石油探査など高温下での用途に多く使用されています。また、常温では非常に暗電流が少ないため微弱光の検出に有利であり、フォトンカウンティング法や低ノイズ性を必要とする応用などにも使われています。

**(6) マルチアルカリ(Sb-Na-K-Cs)**

3種類以上のアルカリ金属を使用した光電面です。紫外から850 nmあたりの広い波長域をもつので分光光度計などに広く使用されています。また900 nmを超える波長まで伸びた赤外延長型もあり、分光光度計や窒素酸化物計測用の気相化学発光検出器など多くの用途に使われています。

**(7) Ag-O-Cs**

透過型は400 nm ~ 1200 nmまでの可視光から近赤外線に感度があります。他の光電面に比べると可視域の感度は低いのですが近赤外域に感度をもっているため、一般的に近赤外専用として使われています。

**(8) GaAsP(Cs)**

ガリウム-ヒ素リンの結晶をセシウムで活性化したもので、透過型光電面として実用化されており、紫外域に感度を持ちませんが、可視域で非常に高い量子効率(約40%)が得られます。他のアルカリ金属を主体とする光電面と比べ、強い入射光に対し感度劣化を比較的起こしやすいので注意が必要です。

**(9) GaAs(Cs)**

ガリウム-ヒ素の結晶をセシウムで活性化したもので、反射型および透過型光電面として実用化されています。反射型は紫外から900 nm付近まで感度があり、300 nm ~ 850 nmにわたって高感度でほぼ平坦な分光感度特性を示します。透過型では、短波長は吸収されるため、波長範囲は狭くなります。これら光電面は他のアルカリ金属を主体とする光電面と比べ強い入射光に対し比較的感度劣化を起こしやすいので注意が必要です。

**(10) InGaAs(Cs)**

GaAs(Cs)より更に赤外側まで感度を持つ光電面です。また900 nm ~ 1000 nm近辺での量子効率がAg-O-Csに比べ、優れています。これらの光電面は他のアルカリ金属を主体とする光電面と比べ、強い入射光に対し比較的感度劣化を起こしやすいので注意が必要です。

**(11) InP/InGaAsP(Cs), InP/InGaAs(Cs)**

InP基板にInP/InGaAsPまたはInP/InGaAs層を成長させ、P/N接合を用いた電界補助型光電面(Field-assisted photocathode)を形成し、独自の半導体微細加工技術により実用化したものです<sup>16)17)</sup>。光電面にバイアス電圧をかけ、伝導体障壁を下げることで、1.4  $\mu$ mまたは1.7  $\mu$ mまでの広い範囲で高感度を実現しています。ただ、常温では暗電流が多いため、-60  $^{\circ}$ C ~ -80  $^{\circ}$ C程度に冷却して使用されます。透過型では、短波長が吸収されるため、波長範囲は狭くなります。バンドモデルを図4-1に示します。

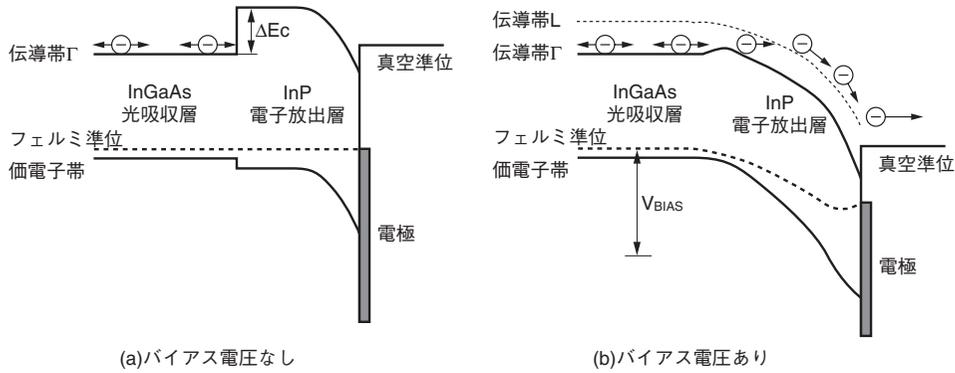


図 4-1 バンドモデル

THBV4\_0401JA

主な光電面の特性を図4-2、図4-3と表4-1に示します。図中における光電面放射感度の定義は、4.1.3分光感度特性で説明します。各々の管球ごとに特性のばらつきがあるため実際のデータとは異なる場合もあります。

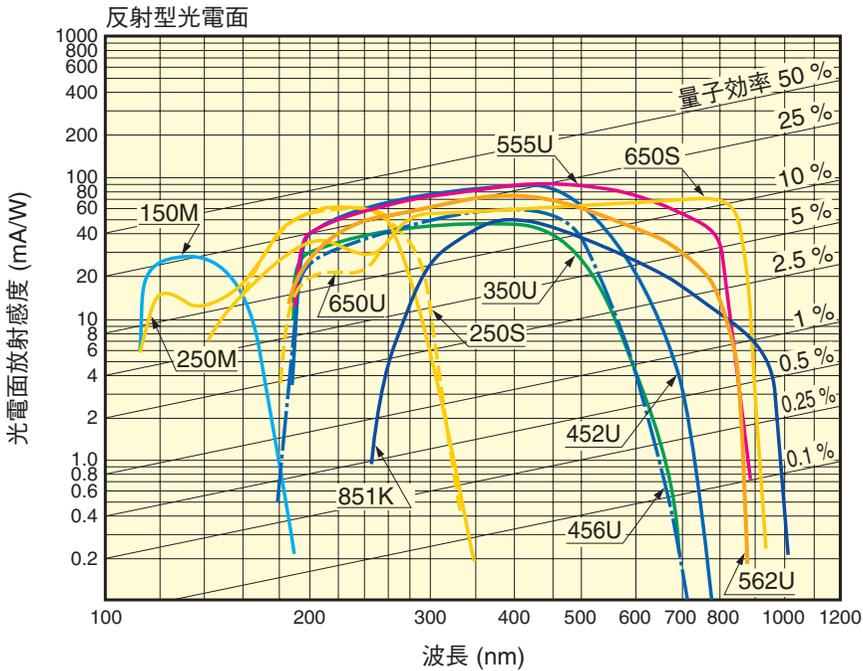
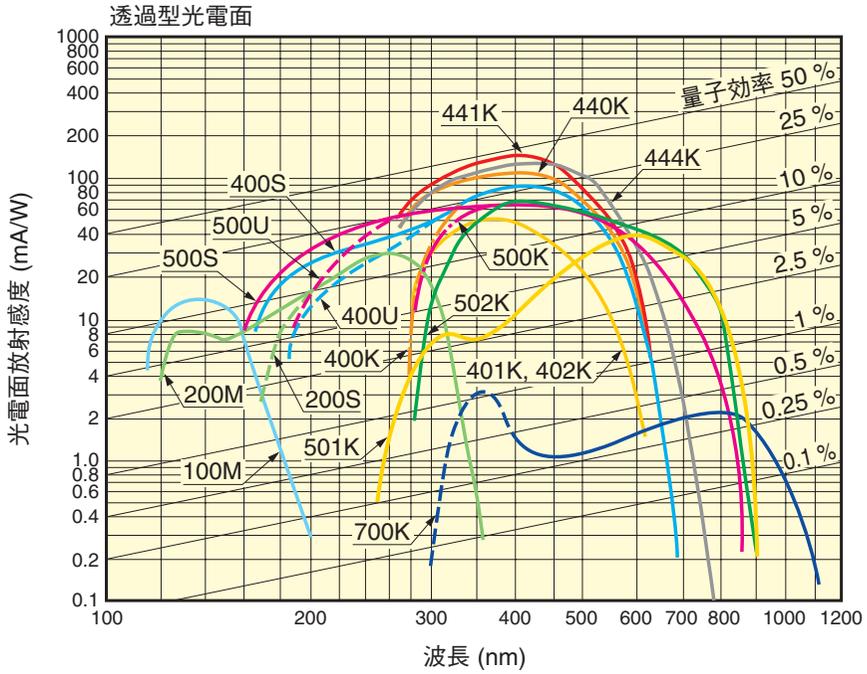


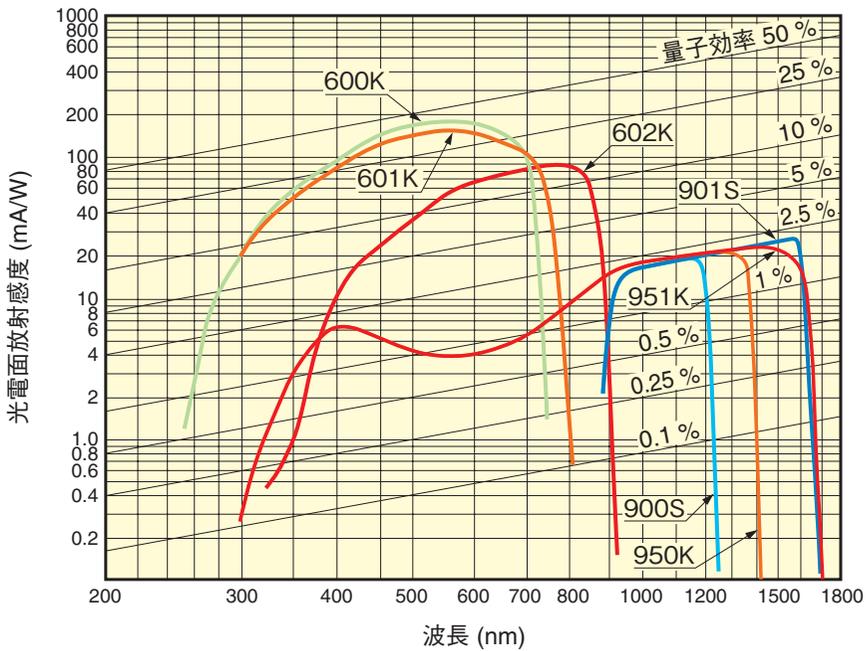
図 4-2(a) 反射型各種光電面分光感度特性

THBV4\_0402JBa



THBV3\_0402JBB

図 4-2(b) 透過型各種光電面分光感度特性



THBV4\_0403JC

図 4-3 半導体結晶光電面の分光感度特性

## 反射型光電面

分光カーブ	光電面	入射窓	ルーマン 感度 (Typ.) ( $\mu\text{A}/\text{lm}$ )	分光感度特性				
				波長範囲 (nm)	ピーク波長			
					放射感度		量子効率	
					(mA/W)	(nm)	(%)	(nm)
150M	Cs-I	MgF <sub>2</sub>	—	115~195	25.5	130	26	125
250S	Cs-Te	石英	—	160~320	62	230	37	210
250M	Cs-Te	MgF <sub>2</sub>	—	115~320	63	200	35	220
350U	Sb-Cs	UV	40	185~650	48	340	20	280
452U	バイアルカリ	UV	120	185~750	90	420	30	260
453K	バイアルカリ	硼硅酸	60	300~650	60	400	20	370
453U	バイアルカリ	UV	60	185~650	60	400	23	330
456U	低暗電流バイアルカリ	UV	60	185~680	60	400	19	300
550U	マルチアルカリ	UV	150	185~850	45	530	15	250
552U	マルチアルカリ	UV	200	185~900	68	400	26	260
555U	マルチアルカリ	UV	525	185~900	90	450	30	260
556U	マルチアルカリ	UV	200	185~850	80	430	27	280
557U	マルチアルカリ	UV	650	185~900	109	450	35	260
561U	マルチアルカリ	UV	200	185~830	70	530	24	250
562U	マルチアルカリ	UV	300	185~900	76	400	26	260
650U	GaAs(Cs)	UV	550	185~930	62	300~800	23	300
650S	GaAs(Cs)	石英	550	160~930	62	300~800	23	300
850U	InGaAs(Cs)	UV	100	185~1010	40	400	14	330
851K	InGaAs(Cs)	硼硅酸	150	300~1040	50	400	16	370
950K	InP/InGaAsP(Cs)	硼硅酸	—	300~1400	21	1300	2	1000~1300
951K	InP/InGaAs(Cs)	硼硅酸	—	300~1700	24	1500	2	1000~1500

表 4-1 分光感度特性一覧 (1)

## 透過型光電面

分光カーブ	光電面	入射窓	ルーマン 感度 (Typ.) ( $\mu\text{A}/\text{lm}$ )	分光感度特性				
				波長範囲 (nm)	ピーク波長			
					放射感度		量子効率	
					(mA/W)	(nm)	(%)	(nm)
100M	Cs-I	MgF <sub>2</sub>	—	115~200	14	140	13	130
200S	Cs-Te	石英	—	160~320	29	240	16	210
200M	Cs-Te	MgF <sub>2</sub>	—	115~320	29	240	17	200
201S	Cs-Te	石英	—	160~320	31	240	17	210
400K	バイアルカリ	硼硅酸	95	300~650	88	420	27	390
400U	バイアルカリ	UV	95	185~650	88	420	27	390
400S	バイアルカリ	石英	95	160~650	88	420	27	390
401K	高温用バイアルカリ	硼硅酸	40	300~650	51	375	17	375
402K	低暗電流バイアルカリ	硼硅酸	40	300~650	54	375	18	375
500K	マルチアルカリ	硼硅酸	150	300~850	64	420	20	375
500U	マルチアルカリ	UV	150	185~850	64	420	25	280
500S	マルチアルカリ	石英	150	160~850	64	420	25	280
501K	赤感度増強型マルチアルカリ	硼硅酸	200	300~900	40	600	8	580
502K	マルチアルカリ	硼硅酸(プリズム)	230	300~900	69	420	20	390
600K	GaAsP(Cs)	硼硅酸	700	280~720	180	550~650	40	480~530
601K	赤感度増強型GaAsP(Cs)	硼硅酸	750	280~820	160	550~650	36	480~530
602K	GaAs(Cs)	硼硅酸	700	370~920	85	750~850	12	600~750
700K	Ag-O-Cs	硼硅酸	20	400~1200	2.2	800	0.36	740
900S	InP/InGaAsP(Cs)	石英	—	950~1200	18	1100	2	1000~1100
901S	InP/InGaAs(Cs)	石英	—	950~1700	24	1500	2	1000~1550
440K	スーパーバイアルカリ	硼硅酸	105	300~650	110	400	35	350
441K	ウルトラバイアルカリ	硼硅酸	135	300~650	130	400	43	350
442K	スーパーバイアルカリ	硼硅酸	105	230~700	110	400	35	350
443K	ウルトラバイアルカリ	硼硅酸	135	230~700	130	400	43	350
444K	緑感度増強型マルチアルカリ	硼硅酸	160	300~700	127	420	40	380

表 4-1 分光感度特性一覧 (2)

### 4.1.2 入射窓材の種類

前述した光電面は一般的に紫外線に対しても高い感度を持っていますが、入射窓材によっては紫外線を吸収するため、短波長限界は使用する窓材の紫外線吸収特性により決まります<sup>18)~22)</sup>。光電子増倍管に使用される窓材としては以下のものがあります。

#### (1) MgF<sub>2</sub>結晶

ハロゲン化アルカリの結晶は、紫外線透過率の優れた窓材としてよく知られていますが、潮解性があるのが欠点です。その中でフッ化マグネシウム(MgF<sub>2</sub>)結晶はほとんど潮解性がなく実用的な窓材で、115 nmまでの真空紫外線を透過します。

#### (2) サファイア

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>結晶でできています。紫外領域の透過率はUV透過ガラスと石英ガラスの中間ぐらいです。ただし、短波長のカットオフは150 nm付近で石英ガラスより短い波長まで透過します。

#### (3) 石英ガラス

石英ガラスは160 nmまでの紫外線を透過します。また、熱膨張率がステムピンに使用されているコバル合金と大きく異なるため、ステム部の硼硅酸ガラスとの間に少しずつ熱膨張率の異なるガラスを数種類入れる、いわゆる「段つなぎ」が用いられています(図4-4)。段つなぎ部分は機械的に弱いため取扱いに注意が必要です。一部製品では石英ガラスとコバル合金との間にアルミニウムをはさみ、圧力を加えることにより接着する方法もあります。

石英ガラスはヘリウムガスを透過しやすく、ヘリウムガス雰囲気では使用できません。

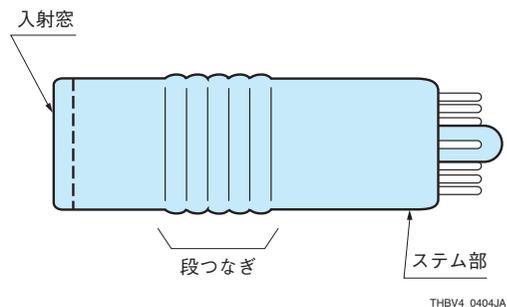


図4-4 段つなぎ

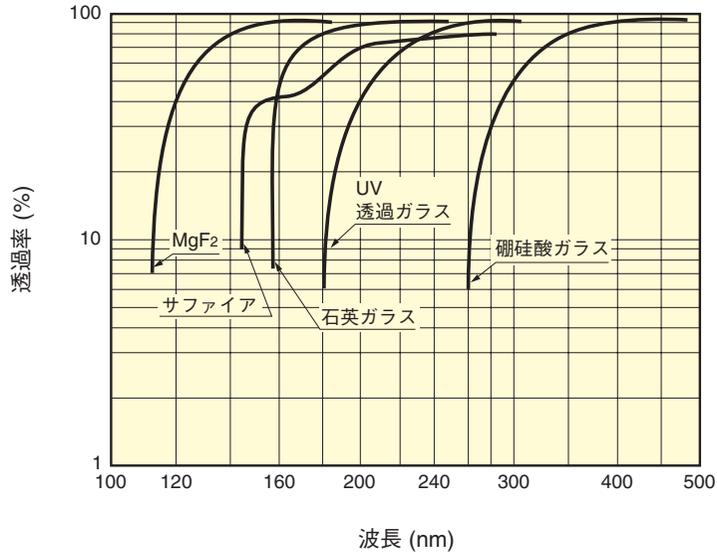
#### (4) UV透過ガラス(UVガラス)

紫外線(UV)をよく通すことからこの名前があります。透過する紫外線の波長は、185 nmまでです。

#### (5) 硼硅酸ガラス

最もよく使用される材料で、光電子増倍管のステムの引出し線に使われるコバル合金と熱膨張率が近い「コバルガラス」とも呼ばれています。300 nmより波長が短い紫外線は透過しないので、これ以下の紫外線の検出には適しません。また、バイアルカリ光電面のヘッドオン型光電子増倍管にはノイズの原因となるカリウム(K<sup>40</sup>)の含有量の少ないKフリーガラスと呼ばれる硼硅酸ガラスを使用したものがあります。Kフリーガラスは、主にシンチレーション計測用の光電子増倍管として使用され、低バックグラウンドシンチレーション計測に使用されます。K<sup>40</sup>によるノイズについては第4章4.3.6暗電流の項で述べます。

図4-5に各入射窓材の分光透過率特性を示します。



THBV4\_0405JA

図 4-5 入射窓材の透過率

### 4.1.3 分光感度特性

光電子増倍管の光電面は入射光子を光電子に変換します。その変換効率(陰極放射感度)は入射光の波長によって異なります。陰極放射感度と入射光の波長の関係を分光感度特性と言います。一般的に分光感度特性は、放射感度と量子効率の両方で表されます。

#### (1) 放射感度

放射感度はある波長における光によって生じた光電流を入射光の放射束ワット (W) で割った値で示されます。放射感度の単位はアンペア/ワット(A/W)で表されます。また分光放射感度の最大値を100とし、パーセント(%)表示したものを相対分光感度と呼びます。

#### (2) 量子効率

光電面から放出される光電子数を入射する光子数で割った値で示します。量子効率は一般的に $\eta$ の記号が使われ、パーセントで表されます。入射光子は光電面物質の価電子帯の電子にエネルギーを与えますが、エネルギーを得た電子が必ずしも光電子として飛び出すわけではなく、ある確率過程が存在します。波長の短い光子は波長の長い光子に比べ1光子あたりのエネルギーが高く光電子放出の確率が高くなります。

#### (3) 分光感度特性の測定法と算出法

放射感度と量子効率の測定には精密に値付けされた標準光電管あるいは光半導体素子を二次標準として用います。具体的にはまずこの標準光電管あるいは光半導体素子で測定したい波長の入射光の放射束 $L_p$ を測定します。次に放射感度を求めたい光電子増倍管で、光電流 $I_k$ を測定します。放射感度 $S_k$ は次の式より求めることができます。

$$S_k = \frac{I_k}{L_p} \text{ (A/W)} \dots\dots\dots \text{ (式 4-1)}$$

また量子効率  $\eta$  はその波長の放射感度  $S_k$  (A/W) から次式を用いて引き出すことができます。

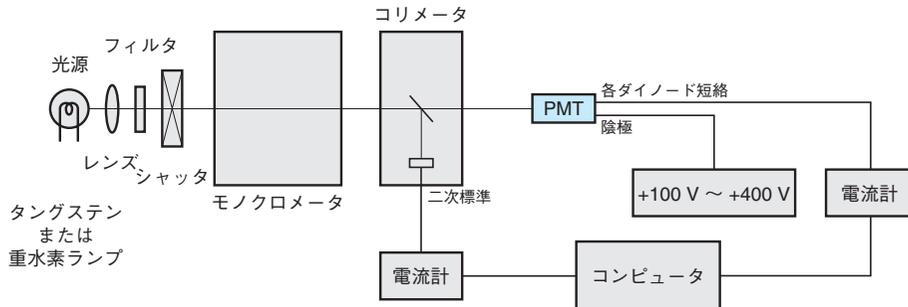
$$\eta (\%) = \frac{h \cdot c}{\lambda \cdot e} \cdot S_k = \frac{1240}{\lambda} \cdot S_k \cdot 100 (\%) \dots\dots\dots (式 4-2)$$

$h$ :  $6.63 \times 10^{-34}$  J·s

$c$ :  $3.00 \times 10^8$  m·s<sup>-1</sup>

$e$ :  $1.60 \times 10^{-19}$  C

ここで  $h$  はプランク定数、 $\lambda$  は入射光波長(nm)、 $c$  は真空中の光の速度、 $e$  は電子の電荷で量子効率  $\eta$  はパーセントで表されます。



THBV4\_0406JA

図 4-6 分光感度測定系

#### (4) 感度波長範囲(短波長限界, 長波長限界)

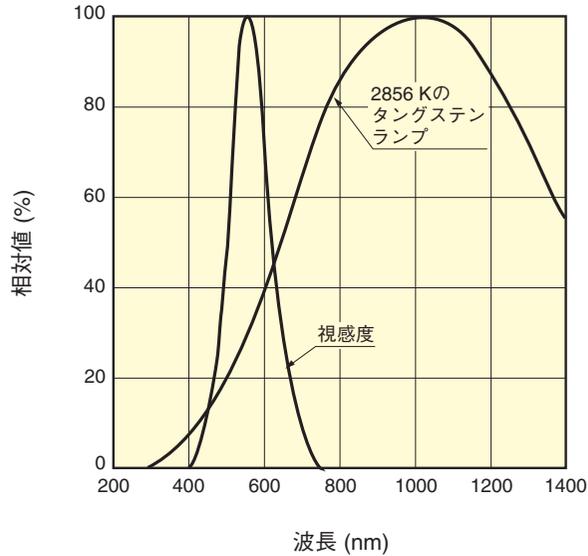
分光感度特性の短波長側でカットオフされる波長を短波長限界、長波長側でカットオフされる波長を長波長限界といいます。短波長限界は入射窓の材質によって決まり、長波長限界は光電面の種類によって決まります。この短波長限界から長波長限界までを感度波長範囲といいます。

本資料には、光電子増倍管の感度波長範囲が記されています。浜松ホトニクスでは、短波長限界は窓材の吸収が急激に増大する波長を定義しています。そして長波長限界では次のように定義しています。バイアルカリ系、Ag-O-Cs系の光電面は陰極感度が最大放射感度の1%まで下がる波長、マルチアルカリ系の光電面は最大放射感度の0.1%まで下がる波長です。

実使用における限界波長は入射光、光電面感度、暗電流、測定系のSN比などを総合して決められるものです。

#### 4.1.4 ルーメン感度

分光感度特性の測定は高額な装置が必要であるうえ、測定に時間がかかるため、一般的な光電子増倍管の感度の評価はルーメン感度で行われます。1カンデラ(cd)の点光源より、1 m離れた所の面の明さを1ルクス(lx)といい、この照度1 lxである面上の面積1 m<sup>2</sup>を通過する光束を1ルーメン(lm)といいます。測定には分布温度2856 ケルビン (K)の標準タングステンランプが用いられ、この光源の1 lmに対する出力電流をルーメン感度といいます。図4-7に視感度と分布温度2856 Kのタングステンランプの相対発光分布曲線を示します。



THBV4\_0407JA

図 4-7 視感度と分布温度 2856 K のタングステンランプの発光分布

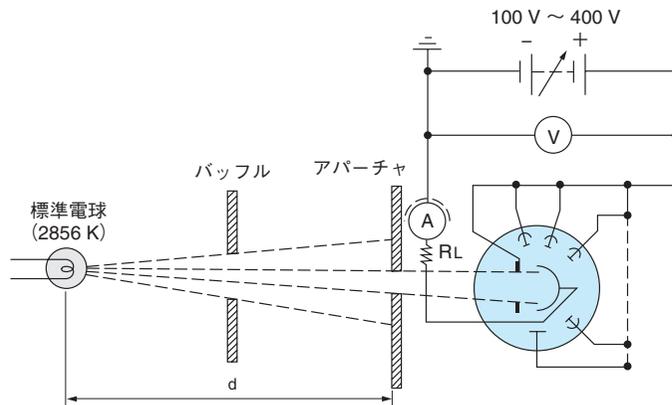
同一品種内での感度の比較にはルーメン感度を使うと便利です。しかしルーメン(lm)は標準視感度に対する光束なので、これらの値は視感度域(350 nm~750 nm)と異なる分光感度を持つ光電子増倍管には意味はありません。Cs-Te, Cs-Iなど、タングステンランプの発光波長域に感度のない光電面では、特定の波長の放射感度により比較をします。

ルーメン感度には陰極単体の特性を示す陰極感度と、増倍後の特性を示す陽極感度があります。

### (1) 陰極ルーメン感度

陰極ルーメン感度<sup>23)25)</sup>は、分布温度2856 Kのタングステンランプからの入射光束に対する光電面からの光電子流(陰極電流)の大きさで表されます。この測定では図4-8に示すように各ダイノードを短絡させ同電位にして二極管動作で測定します。

光電面の感度を示す値です。



THBV4\_0408JA

図 4-8 陰極ルーメン感度測定

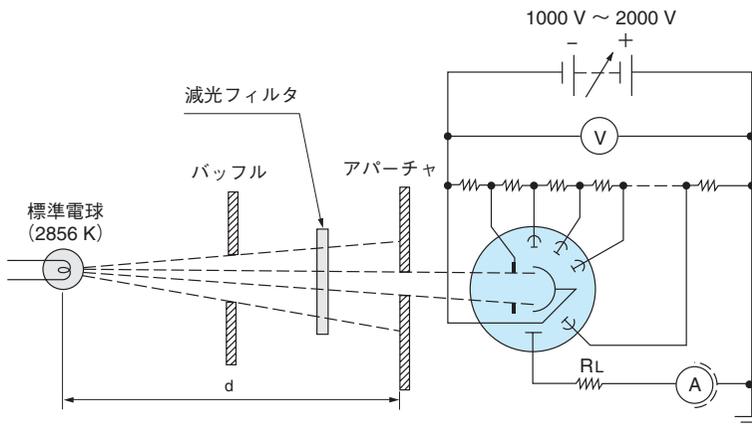
測定入射光量は $10^{-5}$  lm $\sim$  $10^{-2}$  lm程度が使われます。入射光量が大きすぎると光電面の面抵抗による誤差を生じます。従って光電面寸法とその材質によって最適値が決められます。

光電流の測定には微小電流計が用いられますが、この電流値は数nA $\sim$ 数 $\mu$  Aと微小なもので、漏洩電流やノイズに対する対策を十分に行う必要があります。またソケットやステムの汚れや周囲の湿度に注意し、しっかりした電気的なガード対策を施す必要があります。

光電子増倍管に供給する電圧は、供給電圧 $\sim$ 陰極電流特性が完全に飽和している必要があります、100 V $\sim$ 400 Vです。陰極の飽和特性については第4章4.3.2リニアリティの項で述べます。電流計は陰極に接続し、保護用に100 k $\Omega$  $\sim$ 1 M $\Omega$ の抵抗( $R_L$ )を直列に付けて測定します。

## (2) 陽極ルーメン感度

陽極ルーメン感度<sup>23)25)</sup>は、光電面上の入射光束に対する陽極出力電流の大きさを表されます。この測定では図4-9で示されるように各電極に正規の電圧配分を与えます。光源は陰極ルーメン感度の測定と同じものを用いますが、減光フィルタなどで入射光量を $10^{-10}$  lm $\sim$  $10^{-5}$  lm程度に下げて使われます。電流計は、陽極に接続します。陰極ルーメン感度にゲインを掛けた数値です。光入力に対する出力の大きさの指標になります。



THEBV4\_0409JA

図 4-9 陽極ルーメン感度測定

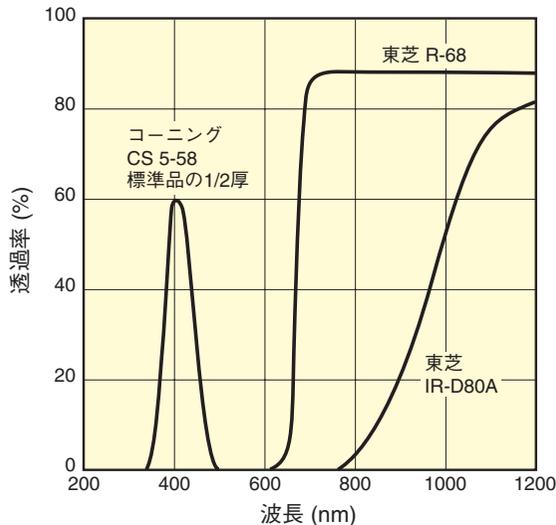
### (3) 青感度指数と赤感度比

分光感度の簡単な比較の方法として、ルーメン感度のほか、青感度指数、赤感度比が用いられます。

陰極青感度指数は、陰極ルーメン感度の測定時に青フィルタを光電子増倍管の前に入れたときの陰極感度です。使用されるフィルタはCS 5-58(コーニング社製)を半分の厚さに研磨したものです。光電子増倍管への入射光は青フィルタを透過した光なので直接的にルーメンで表すことはできません。そのため、浜松ホトニクスでは単位は無名数を用いています。シンチレーションカウンティングにおいてよく使われるNaI(Tl)シンチレータの発光波長(ピーク420 nm)とこのフィルタの透過率とはよく一致しているため、シンチレーション光に対する感度はこのフィルタを使った時の感度と良い相関があります。またこの青感度指数はシンチレーション計測のエネルギー分解能に影響を与える重要な値となっています。詳しくは第7章シンチレーションカウンティング法を参照してください。

次に赤感度比は、分光感度が近赤外域まで延びている光電子増倍管の特性評価に使用されます。ルーメン感度の測定と同じ条件で、長波長透過フィルタを入れたときの陰極感度を赤感度と言い、さらに赤感度を陰極ルーメン感度で割った値が赤感度比です。使用されるフィルタはAg-O-Cs光電面ではIR-D80A(東芝社製)を用い、それ以外ではR-68(東芝社製)を用いています。赤感度比はフィルタの種類が異なれば値も変わります。

これら青感度指数と赤感度比に使用されるフィルタの特性を図4-10に示します。

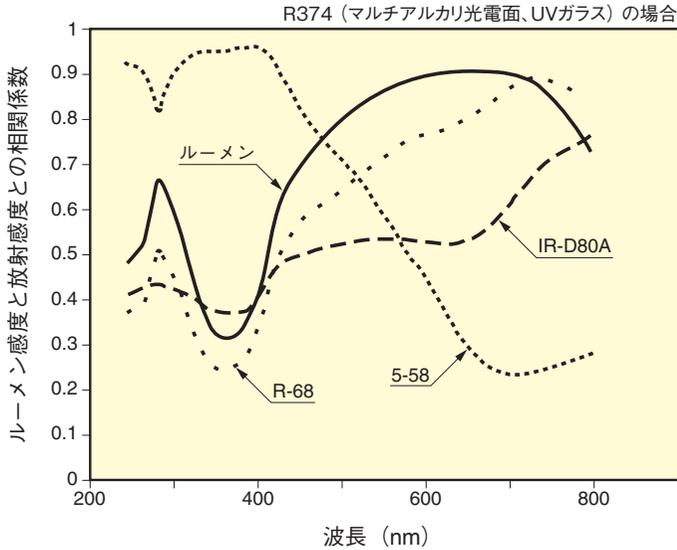


THBV4\_0410JA

図 4-10 各種フィルタの分光透過率

### 4.1.5 ルーメン感度と分光感度

ルーメン感度と分光感度特性は、特定の波長域である程度の相関があります。図4-11はルーメン感度・青感度指数(CS 5-58)・赤感度(R-68, IR-D80A)と各波長での光電面の放射感度の相関性を表したものです。



THBV4\_0411JA

図 4-11 各波長に対する相関関係

図より光電子増倍管の放射感度は450 nmまでは青感度指数と非常によく相関があり、500 nm～700 nmではルーメン感度、700 nm～800 nmではフィルタに東芝R-68を用いた赤感度、そして800 nm以上ではフィルタに東芝IR-D80Aを用いた近赤外感度と相関性があることが分かります。これらの相関値からある波長で光電子増倍管の感度を選別する場合、あえて分光感度測定を行わなくてもその波長で最も高い相関値をもつフィルタを使用することにより容易に選別することができます。

## 4.2 ダイノードの基本特性

ここでは、現在までに製品化されているダイノードの種類を紹介し、基本特性である収集効率とゲインについて説明します。

### 4.2.1 ダイノードの種類と特長

ダイノードには多くの種類があり構造や段数などによってゲイン、時間応答特性、出力直線性（リニアリティ特性）等特長があるため、使用目的に応じて、選択の必要があります。図4-12にその断面図を示し、以下に各々の簡単な特長を示します。メッシュ型ダイノードを用いたものについては第9章で、マイクロチャンネルプレートを用いた場合については第11章で、電子打込み型については第12章で詳しく述べます。

また、これらの構造を組み合わせることで特長を生かしたボックスライン型、サーキュラライン型などの製品もあります。

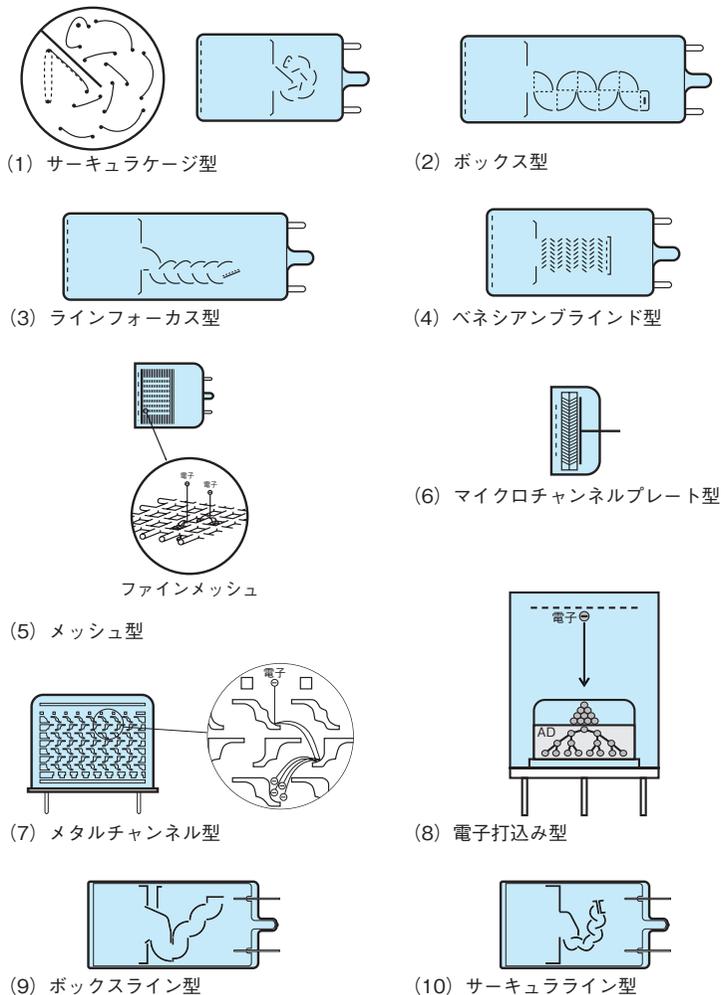


図 4-12 ダイノードの種類

### (1) サーキュラージュ型

形状が小さいため、コンパクトにできる利点があり、全てのサイドオン型と一部のヘッドオン型光電子増倍管に用いられています。また、時間応答特性にも優れて、比較的低い電圧でも高いゲインが得られるのが特長です。

### (2) ボックス型

ヘッドオン型光電子増倍管に使われており、光電子の収集効率に優れています。

### (3) ラインフォーカス型

ボックス型と同様にヘッドオン型光電子増倍管に使われます。高速時間応答特性を有し、時間分解能やパルスリニアリティ特性が優れています。

### (4) ベネシアンブラインド型

光電子の電界収集が容易で、主として大口径のヘッドオン型光電子増倍管に用いられています。

### (5) メッシュ型

メッシュ型はメッシュ状のダイノードを積み重ねた構造をしています。コースメッシュ型とファインメッシュ型があり、リニアリティ特性に優れ、磁界の影響も受けにくくなっています。クロスプレート（クロスワイヤ）アノードやマルチアノードを使用すれば、入射光の位置を検出することも可能です。ファインメッシュ型は高磁界用光電子増倍管に使用されません。(詳しくは第9章を参照)

### (6) MCP(Microchannel Plate・・・マイクロチャンネルプレート)型

厚さ1 mm以下のマイクロチャンネルプレート(MCP)を使っているため特に優れた時間応答特性を有しています。また磁界によるゲインへの影響も小さく、メッシュ型と同様にマルチアノードを使用することにより位置検出機能を持たせることも可能です。(詳しくは第13章を参照)

### (7) メタルチャンネル型

電子軌道シミュレーションと微細加工技術によって、極薄型の電極を形成し、高精度で積層したものです。ダイノードが近接しているため、小型で時間特性が優れています。

磁界によるゲイン変化も比較的小さくなっています。マルチアノードと組み合わせることで、多チャンネル検出や位置情報を得ることもできます。(詳しくは第9章を参照)

### (8) 電子打込み型

光電子を高電圧で加速し、そのエネルギーを半導体素子に与えてゲインを得る方法です。構造が簡単な上、雑音指数が小さく、ユニフォミティ特性、リニアリティ特性にも優れています。

### (9) ボックスライン型

ボックス型とラインフォーカス型を組み合わせた構造をしています。ボックス型に比べて時間応答特性、時間分解能、パルスリニアリティ特性が良く、ラインフォーカス型に比べて電子収集効率が高いという特長があります。

### (10) サーキュラライン型

サーキュラケージ型とラインフォーカス型を組み合わせた構造をしています。サーキュラケージ型のコンパクトさを維持したまま、パルスリニアリティ特性が向上しています。

電気的特性はダイノードの種類だけでなく光電面の大きさやフォーカス系によっても左右されるため一概に言えませんが、ヘッドオン型光電子増倍管各ダイノード別の大きな特性を表4-2（管径127 mm（5インチ）まで）に示します。磁気特性は軸方向磁場で、特性があまり変化しない上限値です。

特性 ダイノード	時間特性 上昇時間[ns]	パルスリニアリティ 特性(2%)[mA]	磁気特性 [mT]	ユニフォ ミティ	収集 効率	特 長
サーキュラケージ	0.9~3.0	1~10	0.1	△	○	コンパクト、高速
ボックス	6~20			○	◎	高収集効率
ラインフォーカス	0.7~3	10~250		△	○	高速、高リニアリティ
ベネシアンブラインド	6~18	10~40		○	△	大口径用
メッシュ	1.5~5.5	300~1000	500~1500*	○	△	高磁場用、高リニアリティ
MCP	0.1~0.3	700	1500*	○	△	超高速
メタルチャンネル	0.65~1.5	30	5**	○	○	コンパクト、高速
電子打込み型	内蔵素子に依存		—	◎	◎	高電子分解能

\* 管軸方向

\*\*メタルパッケージ型PMT

表 4-2 ダイノード 特性例

## 4.2.2 収集効率とゲイン(電流増倍率)

### (1) 収集効率

光電子増倍管の電流増倍機構は、電子の軌道を考慮して設計され、効率良くダイノード間で増倍するように考慮されていますが、それでも増倍に寄与しない電子がある程度存在します。

光電子増倍管において、光電面から出た光電子数と最終的に陽極から出力されるパルス数の割合を収集効率と呼んでいます。一般的には第1ダイノードの有効部分に入射することが重要となっており、この有効部分とは第1ダイノードに入射した光電子が第2ダイノード以後で抜けることなく、有効に増倍する部分を意味します。第2ダイノード以後でも増倍に寄与しない二次電子は存在するのですが、後段にいくほど二次電子の数が増えるため収集効率に与える影響は少なくなります。

図4-13は、28 mm径ヘッドオン型光電子増倍管における陰極—第1ダイノード間の電圧に対する第1ダイノードにおける相対収集効率の一例です。陰極—第1ダイノード間の電圧が適切でないと光電子は第1ダイノードの有効部分に入射しないため収集効率に影響があります。特にこの電圧が低い場合、第1ダイノードの有効部分に到達する光電子の数が少なくなり収集効率が低下します。

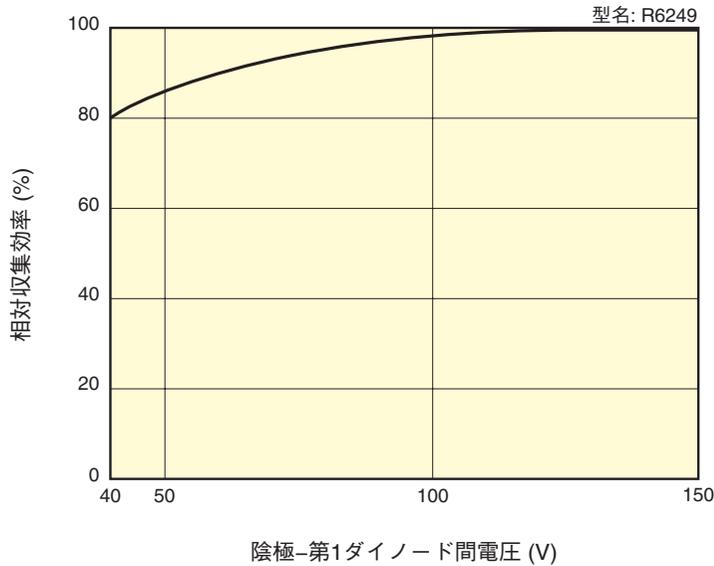


図 4-13 相対収集効率の電圧特性

THBV4\_0413JA

図4-13から陰極-第1ダイノード間にはを100 V程度かけることが適当です。収集効率はシンチレーション計測を行う際のエネルギー分解能や検出効率、SN比に直接影響を与えます。検出効率とは、微弱光測定において光電子増倍管に入射する信号のうち検出された割合をいい、フォトンカウンティング法においては光電面の量子効率と収集効率の積で表されます。

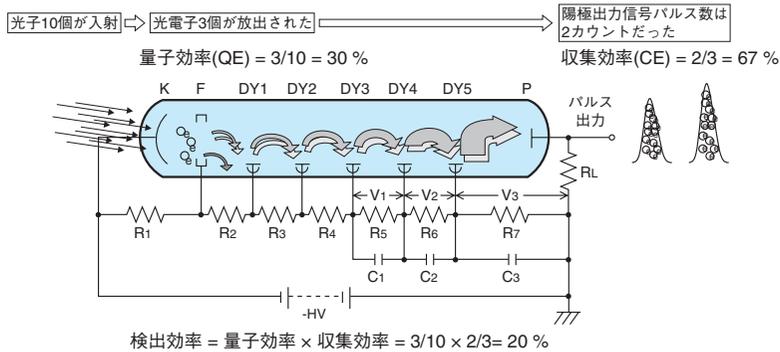


図 4-14 検出効率の例

THBV4\_0414JA

## (2) ゲイン (電流増倍率)

二次電子放出比  $\delta$  はダイノード間の電圧  $E$  の関数であり、次の式で表わされます。

$$\delta = a \cdot E^k \dots\dots\dots (式 4-3)$$

ここで  $a$  は定数、 $k$  は電極の構造・材質で決まり、0.7~0.8の値をとります。

光電面から放出された光電子流  $I_k$  は、第1ダイノードに入射して二次電子流  $I_{d1}$  を放出します。この時の第1ダイノードにおける二次電子放出比  $\delta_1$  は次の式で表されます。

$$\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_k} \dots\dots\dots (式 4-4)$$

さらにこの電子は第1ダイノード→第2ダイノード→…第  $n$  ダイノードとカスケード的に増倍されます。第2ダイノード以後の  $n$  段目の二次電子放出比  $\delta_n$  は次の式で表されます。

$$\delta_n = \frac{I_{dn}}{I_{d(n-1)}} \dots \dots \dots \text{(式 4-5)}$$

陽極電流 $I_p$ は、以下の式で与えられます。

$$I_p = I_k \cdot \alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \dots \delta_n \dots \dots \dots \text{(式 4-6)}$$

さらに

$$\frac{I_p}{I_k} = \alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \dots \delta_n \dots \dots \dots \text{(式 4-7)}$$

ここで $\alpha$ は収集効率です。

この $\alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \dots \delta_n$ をゲイン（電流増倍率）といい、 $\mu$ で表わします。

$$\mu = \alpha \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \dots \delta_n \dots \dots \dots \text{(式 4-8)}$$

従って、 $\alpha = 1$ とし、光電子増倍管のダイノードの数を $n$ とすると、等分割デバイダの場合、ゲイン $\mu$ の供給電圧 $V$ に対する変化は次の式になります。

$$\mu = (a \cdot E)^n = a^n \left(\frac{V}{n+1}\right)^{kn} = A \cdot V^{kn} \dots \dots \dots \text{(式 4-9)}$$

ただし、 $A = a^n / (n+1)^{kn}$ とします。この式から、ゲイン $\mu$ は供給電圧の $kn$ 乗に比例することがわかります。代表的な供給電圧対ゲイン特性を図4-15に示します。図4-15は両対数グラフで描かれているためこの直線の傾きが $kn$ となります。このように、一般的には供給電圧を上げる程、ゲインは高くなります。ゲインは供給電圧の $kn$ 乗により変動するため光電子増倍管に使用する高圧電源のドリフト、リップル、温度変動、入力変動、負荷変動などの安定性は、光電子増倍管のゲインに大きな影響があります。

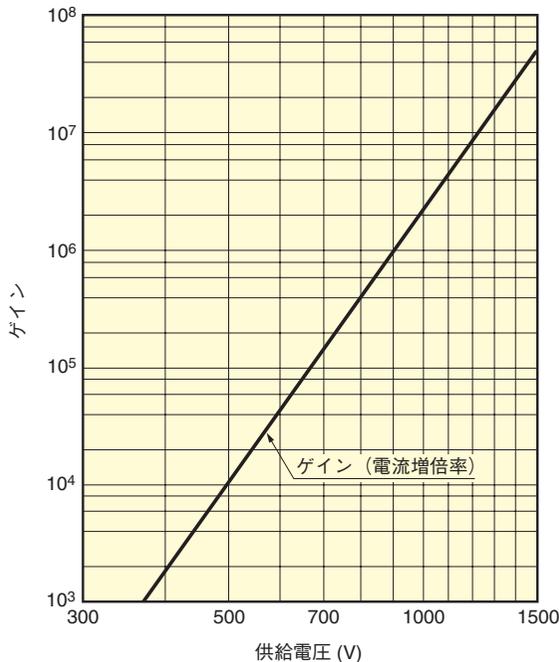


図 4-15 ゲインの電圧特性

## 4.3 光電子増倍管の諸特性

ここでは光電子増倍管を使用するうえで重要となる諸特性とその評価法、使用法について述べます。

### 4.3.1 時間特性

光電子増倍管は非常に高速の時間特性<sup>1)23)~27)</sup>を持った光検出器です。これらの時間特性は主として陰極から放出された光電子が陽極まで増幅される間に生ずる走行時間およびその差によって決まります。したがって、高速測光用の光電子増倍管では入射窓の内側に曲率を持たせたり、走行時間差を極力少なくするような電極設計がなされています。

ダイノード別の52 mm径光電子増倍管の時間特性を表4-3に示します。表からわかるように、ラインフォーカス型、メタルチャンネル型が最も時間特性が良く、ボックス型やベネシアンブラインド型のはそれより劣ります。

単位：ns

ダイノード	上昇時間	下降時間	パルス幅 (FWHM)	電子走行時間	T.T.S.
ラインフォーカス	0.7~3	1~10	1.3~5	16~50	0.37~1.1
サーキュラージュ	3.4	10	7	31	3.6
ボックス	~7	25	13~20	57~70	~10
ベネシアンブラインド	~7	25	25	60	~10
メッシュ	2.5~2.7	4~6	5	15	~0.45
メタルチャンネル	0.65~1.5	1~3	1.5~3	4.7~8.8	0.4

T.T.S. : Transit Time Spread (走行時間拡がり)

表 4-3 時間特性 (52 mm 径光電子増倍管)

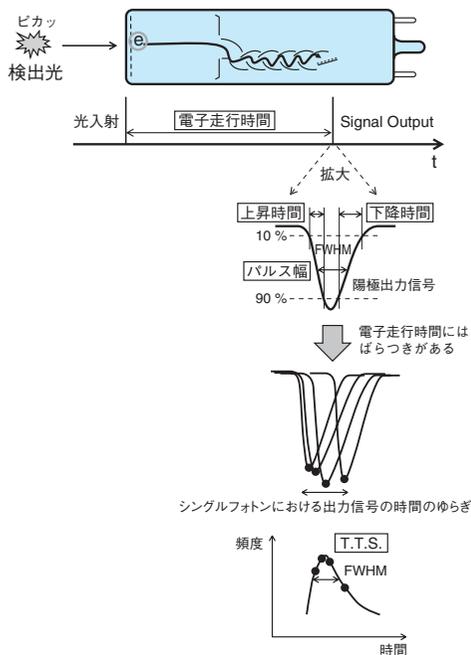


図 4-16 時間特性の概念

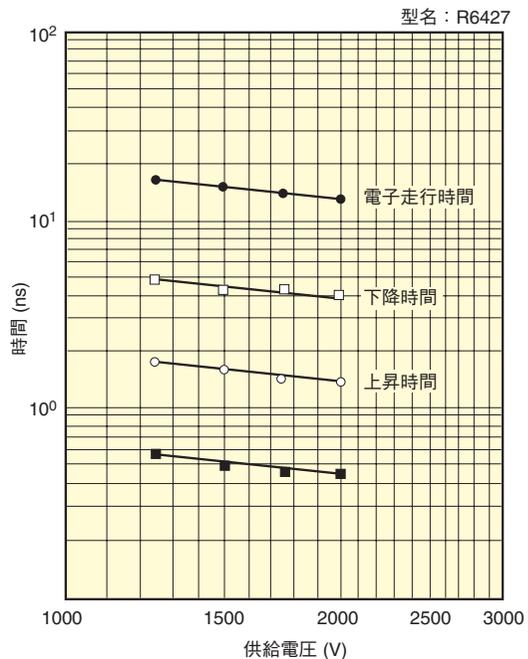


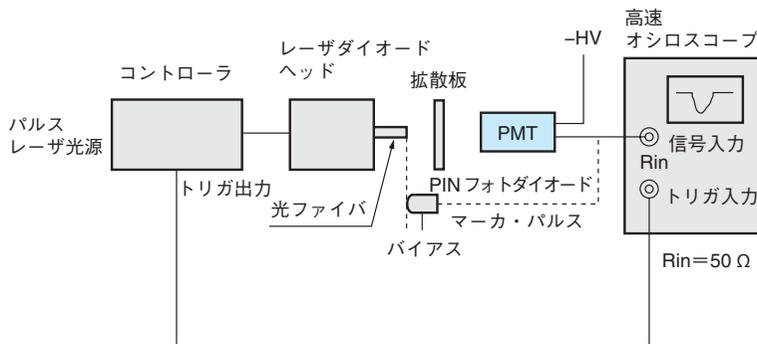
図 4-17 時間特性の電圧依存性

主に時間特性は電極の構造で決まりますが、供給電圧にも依存します。電界強度を増せば、すなわち供給電圧を上げれば、電子走行速度が速くなり、電子走行時間も短くなります。一般的に時間特性は供給電圧の平方根に反比例し改善されます。図4-17に供給電圧対時間特性の一例を示します。

以下に時間特性の定義および測定法を示します。

### (1) 上昇時間・下降時間・電子走行時間

図4-18に測定系を示します。また図4-19に上昇時間(ライズタイム: Rise Time)、下降時間(フォールタイム: Fall Time)、電子走行時間(トランジットタイム: Transit Time)の一例を示します。

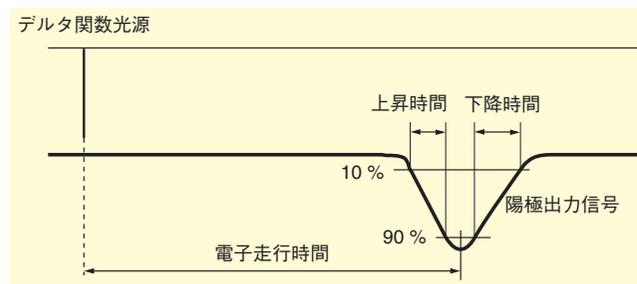


THEBV4\_0418JA

図 4-18 上昇、下降、電子走行時間の測定系

光源にはレーザダイオードを用います。これは光電子増倍管の時間特性と比べて十分短いためデルタ関数光源と考えることができます。測定は通常高速オシロスコープにて光電子増倍管の出力波形をリアルタイムあるいはサンプリング合成することによって波形を得ます。この出力パルス波形は陰極のあらゆる場所から出た波形が合成されたものです。上昇、下降時間は、主として入射光位置による電子走行時間差によって決まり、電極による電界分布および電界強度(供給電圧)にも依存します。

図4-19に示されているように、上昇時間は出力パルス波高値が10%から90%に達するまでの時間、下降時間は逆に90%から10%に戻るまでの時間で示されます。これらが問題になる時間領域の測定では特に波形歪が生じやすいため、インピーダンスの整合をとることが必要です。加えて、ダンピング抵抗(第5章5.1.5参照)の付いたデバイダ回路などを用いることもあります。



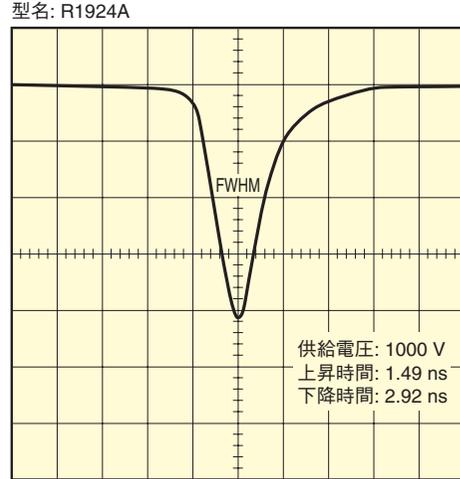
THEBV4\_0419JA

図 4-19 上昇、下降、電子走行時間

図4-20は実測した光電子増倍管の出力波形です。一般的に下降時間は上昇時間に比べ2倍～3倍長くなります。従って繰り返しの多いパルスを計測するときにはパルス同士が重ならないように考慮する必要があります。なお、出力パルスの半値幅(FWHM: Full Width at Half Maximum)はおよそ上昇時間の約2.5倍となります。

電子走行時間は入射光が光電面に入ってから出力パルスが現れるまでの時間です。光電子増倍管の光電面の位置に置き換えたPINフォトダイオードを基準(ゼロ秒)として、そこから光電子増倍管の出力パルスの最大値までの時間差を測定します。この電子走行時間は繰り返しパルスを用いる蛍光寿命測定など測定系の遅延時間を決める上での目安となります。

注) 上昇時間、下降時間はそれぞれ立ち上がり時間、立ち下り時間とも呼ばれますが、ここでは上昇時間、下降時間とします。



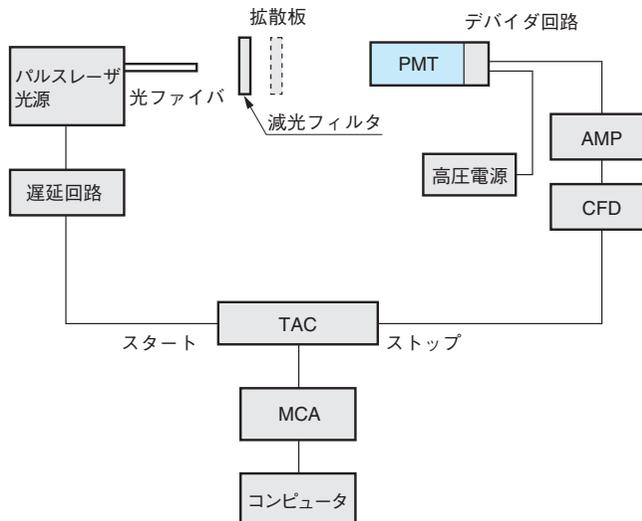
2 (ns/div)

THBV4\_0420JA

図 4-20 出力波形

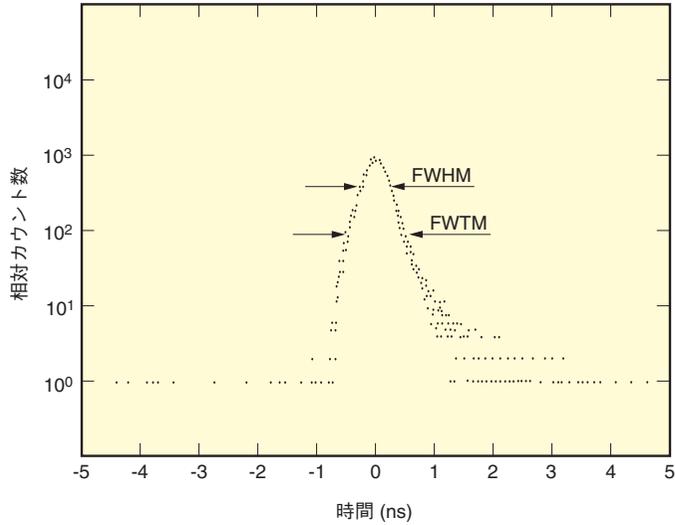
## (2) T.T.S.(Transit Time Spread)

光電面を単一光子により全面照射したときの単一光電子パルスの走行時間のゆらぎを電子走行時間拡がり (T.T.S.: Transit Time Spread) と呼びます。測定系を図4-21に測定結果を図4-22に示します。



THBV4\_0421JA

図 4-21 T.T.S. の測定系



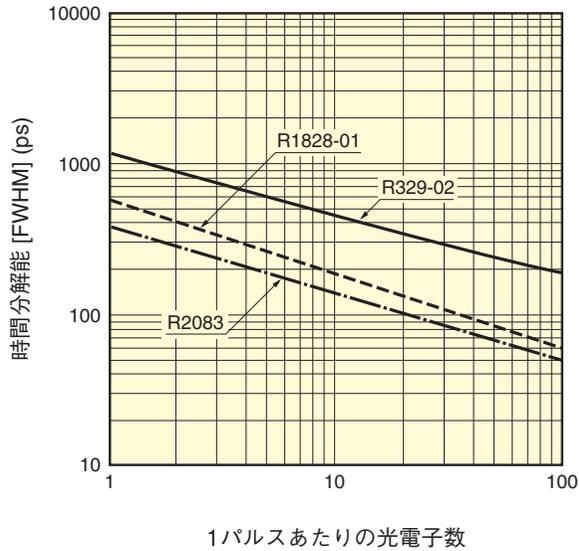
THBV4\_0422JA

図 4-22 T.T.S. の例

パルスレーザー光源からのトリガ信号を遅延回路に通した後、時間差を波高値に変換するT.A.C.(Time-to-Amplitude Converter)のスタート信号に入れ、一方光電子増倍管からの出力信号はパルス波高値の揺らぎに起因する時間ジッタを減少させたタイミング精度の良いディスクリミネータであるC.F.D.(Constant Fraction Discriminator)を通してT.A.C.のストップ信号へ入れます。T.A.C.はスタート信号からストップ信号までの時間に比例した波高パルスを発生し、このパルスはマルチチャンネル波高分析器(M.C.A.: Multichannel Analyzer)に入り波高分析されます。従ってスタート信号からストップ信号までの時間間隔は電子走行時間に対応するため、それぞれの波高値を多数回メモリに積算して得られるM.C.A.上のヒストグラムは電子走行時間の統計的拡がりを示すことになります。

浜松ホトニクスでは通常T.T.S.はこのヒストグラムの半値幅(FWHM)で表しますが、他では標準偏差で表されることもあります。半値幅(FWHM)の値はそのヒストグラムがガウス分布の場合、標準偏差の2.35倍と等価です。また、1パルスあたりの光電子数が増えたとこの特性も良くなり、およそ光電子数の平方根に反比例してT.T.S.は改善されます。

この様子を図4-23に示します。

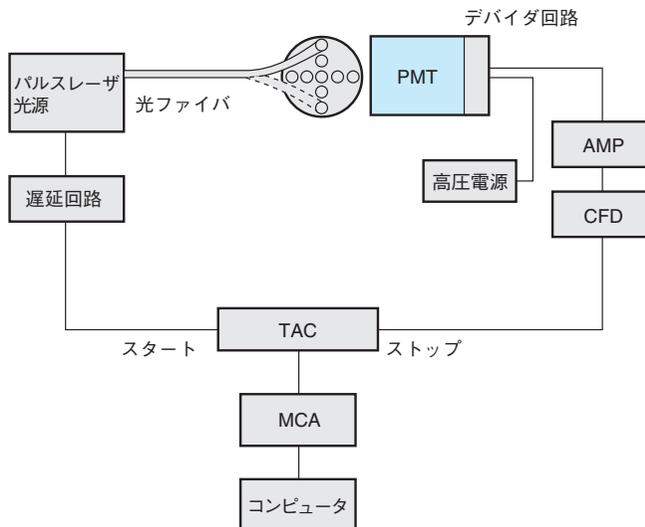


THBV4\_0423JA

図 4-23 光電子数 対 時間分解能

### (3) C.T.T.D.(Cathode Transit Time Difference)

光電面上にその入射位置を変えたときの電子走行時間の違いをC.T.T.D.(光電子走行時間差)と呼びます。通常時間特性は光電面に全面照射して測定されますが、この測定は図4-24のようにアパーチャを用いスポット光を光電面上に移動させて照射場所ごとに電子走行時間差の測定を行います。



THBV4\_0424JA

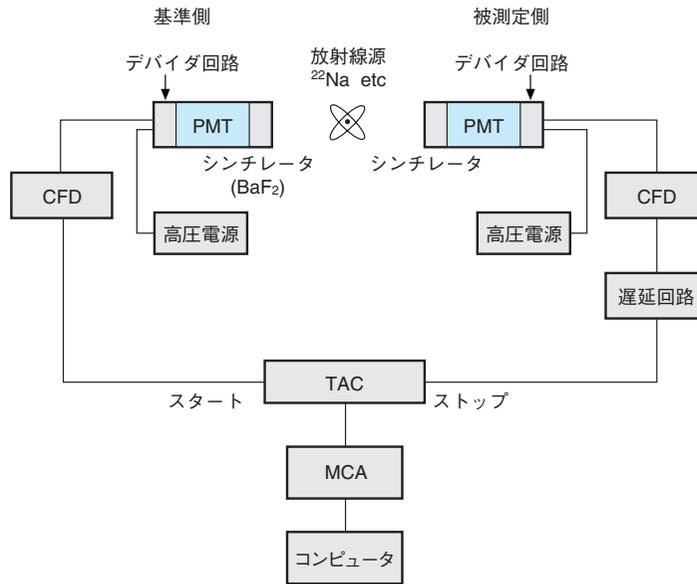
図 4-24 C.T.T.D. の測定系

具体的にはT.T.S.の測定系を用い、スポット位置を変えたときに得られる各ヒストグラムのピーク値の移動(時間差に相当)を測定します。データは光電面の中心に光を照射したときの電子走行時間を基準としたときの各場所での電子走行時間差で示されます。

実際の応用にはこの特性は直接的に必要な規格ではなく、主に光電子増倍管製作上の評価に用いられますが前記の上昇時間、下降時間、T.T.S.、次に述べるC.R.T.特性に影響を与えます。

#### (4) C.R.T.(Coincident Resolving Time)

これもT.T.S.と同様に走行時間のゆらぎを測定するものですが、ポジトロンCTやT.O.F.(Time of Flight)測定に用いられるのと類似の測定系が使われます。そのため同種の測定に使用する場合、その光電子増倍管の性能を評価する値として実用性が高いといえます。測定系を図4-25に示します。



THBV4\_0425JA

図 4-25 C.R.T. の測定系

放射線源には $^{22}\text{Na}$ 、 $^{68}\text{Ge-Ga}$ などが、シンチレータには基準側に $\text{BaF}_2$ 、被測定側には $\text{LSO:Ce}$ 、 $\text{BaF}_2$ 、 $\text{LaBr}_3\text{:Ce}$ 、プラスチックシンチレータなどが使われます。放射線源とシンチレータは用途によって適した組み合わせが用いられます。放射線源は2つの光電子増倍管の真ん中に置かれ、これらの線源からは対向した方向に $\gamma$ 線が同時に放出されるため2つのシンチレータから同時に発光が起こります。2つの光電子増倍管からの信号の一方を同時計数回路(T.A.C.)のスタート入力に、他方を適切なトリガのタイミングを得るためにディレイラインを通してT.A.C.のストップ入力に入れます。その後T.T.S.と同じように多数回の現象をM.C.A.にて波高分析(時間分布)を行います。これはT.A.C.に入った信号の時間的ゆらぎを統計的に示したもので、主に2つの光電子増倍管の電子走行時間のゆらぎに起因します。図4-17、図4-23のように電子走行時間のゆらぎは1パルスあたりの光電子数の平方根に反比例し、また供給電圧の平方根にも反比例します。そのため一般的に放射線源のエネルギーが高いほど、供給電圧が高いほどこの特性も改善されます。 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ を個々の光電子増倍管の電子走行時間のゆらぎとすれば

$$\text{C.R.T.} = (\tau_1^2 + \tau_2^2)^{1/2} \dots\dots\dots \text{(式 4-10)}$$

で表されます。

### 4.3.2 リニアリティ特性（直線性）

光電子増倍管はフォトンカウンティング法を含めた極微弱光領域において、広い範囲で入射光量に対する陽極出力電流のリニアリティ特性(直線性)<sup>1)24)27)28)</sup>が良い光検出器です。すなわち広いダイナミックレンジを有しています。しかし、あまり強い入射光を受けると理想的な直線性からのずれを生じます。この原因は主として陽極付近のリニアリティ特性によりますが、透過型光電面をもつ光電子増倍管を低電圧、大電流で動作させた場合、陰極のリニアリティ特性も影響することがあります。陰極、陽極双方のリニアリティ特性は供給電圧が一定の場合、入射波長にはよらず電流値のみに依存します。

#### (1) 陰極リニアリティ特性

25 °C

光電面の種類	特性項目	波長域（ピーク波長）(nm)	リニアリティの上限の目安（平均電流）
Ag-O-Cs		300～1200（800）	1 μA
Sb-Cs		～ 650（440）	1 μA
Sb-Rb-Cs		～ 650（420）	0.1 μA
Sb-K-Cs		～ 650（420）	0.01 μA
Sb-Na-K		～ 650（375）	10 μA
Sb-Na-K-Cs		～ 850（420） 900（600） 赤外延長型	1 μA
Ga-As (Cs)		～ 930（300～700）	(*) 1 μA
Ga-As-P (Cs)		～ 720（580）	(*) 1 μA
Cs-Te		～ 320（210）	0.1 μA
Cs-I		～ 200（140）	0.1 μA

(\*) ただし、大量光では劣化しやすい

表 4-4 光電面諸特性

光電面は半導体のため電気抵抗をもちますが、その値は光電面によって異なります。そのため表4-4に示すように光電面の種類によって陰極のリニアリティ範囲が異なっています。また、有効光電面の面積によっても流せる電流の限界値は変わってきます。ただし、この特性は透過型光電面についてのものであって、金属板の上に光電面が作られている反射型光電面では光電面抵抗が十分低いため問題にはなりません。光電面抵抗の影響を軽減し、かつ収集効率を維持するために、構造によっても異なりますが一般的に光電面—第1ダイノード間には50 V～300 V程度の電圧を供給することが望まれます。また光電面は温度が下がると面抵抗が増加するため、極低温に冷却する場合は光電面抵抗の温度特性についての考慮が必要です。

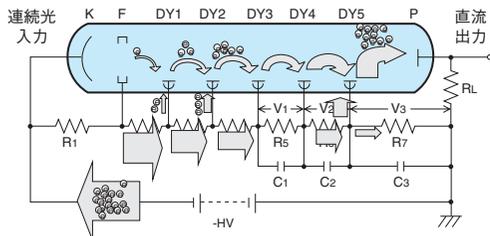
#### (2) 陽極リニアリティ特性

陽極リニアリティ特性を決定する要因には、デバイダ回路によるものと電子増倍部での大電流による空間電荷効果の影響によるものと2つがあります。

以下に示すように、直流的な用途では主としてデバイダ回路、パルスの用途では空間電荷効果によってリニアリティが制限されます。

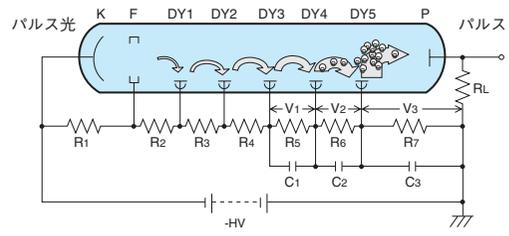
リニアリティ — 直流出力モード — 信号電流によるデバイダ電圧の変化によるもの  
 — パルス出力モード — 空間電荷効果によるもの

直流出力モードでのリニアリティ



PMTを動作させた場合、Rは一定だがIが小さくなると電圧も小さくなる(V=I-R)から、各Dy間(特に後段)の電圧が低くなる。

パルス出力モードでのリニアリティ



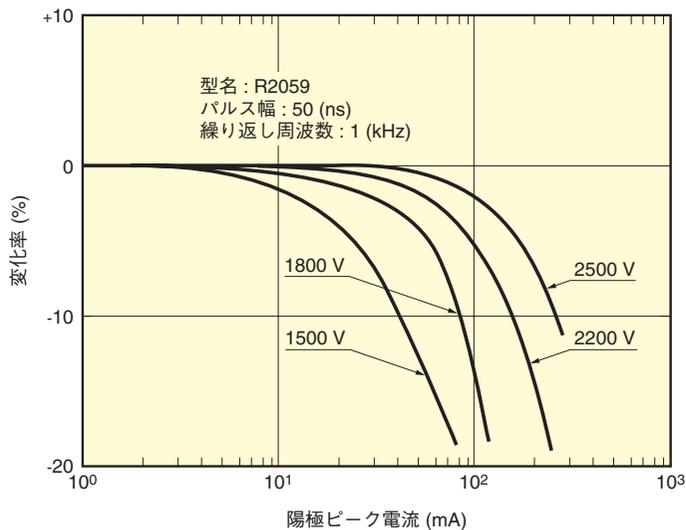
パルス電流値が増加した場合、特に終段付近では電子密度が高まり、空間電荷の影響により電極間電流が阻害され飽和が生じる。

THBV4\_0426JA

図 4-26 リニアリティとは

デバイダ回路によるものについては第5章5.1.3で述べます。パルス出力モードによるリニアリティは主として信号のピーク電流により決まります。強い光パルスが入るとダイノード後段で大電流が流れ、電子の空間電荷密度が高くなるために飽和現象が現れますが、この影響はダイノードの種類によって異なります。ダイノードの飽和特性を前述の表4-2に示してあります。この空間電荷の影響はダイノード間の電界分布と電界強度で決まります。メッシュ型はリニアリティ特性が非常に優れていますが、これは電極間が狭いために電界強度が高く、ダイノード面積も広く単位面積あたりの信号の電荷密度が低いため空間電荷の影響を受けにくい構造になっているためです。一般的にダイノードの種類によらず、供給電圧を上げるとダイノード間の電界強度が増すためパルスリニアリティ特性は良くなります。

図4-27にR2059における供給電圧とパルス入力に対するリニアリティの関係を示します。また電流密度の高くなるダイノード後段の分割電圧を高くしたデバイダ(テーパデバイダと呼ばれる)を使うことによっても、この特性を改善することができます。この件についても第5章5.1.4において記述します。テーパデバイダの分割比は各々のダイノードの構造と特性に合った電界分布と電界強度を作り出す必要があるため、一様でなく複雑な値となります。



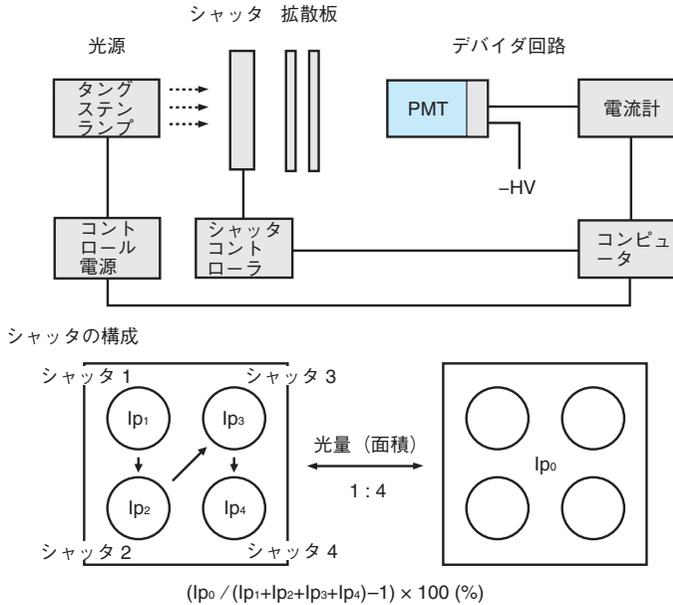
THBV4\_0427JA

図 4-27 リニアリティの電圧依存性

(3) リニアリティ測定方法

大きくは直流出力とパルス出力の測定方法を次に示します。

(a) 直流出力



THEV4\_0428JA

図 4-28 直流出力のブロックダイアグラム

ここでは浜松ホトニクスで使われている方法を紹介します。直流出力では図4-28のように光源と光電子増倍管の間に4個のシャッタ付アパーチャが取り付けられていて、順次1、2、3、4のそれぞれのアパーチャおよび4つ全部のアパーチャをすべて開け、そのつど光電子増倍管の出力(それぞれ $I_{p1}, I_{p2}, I_{p3}, I_{p4}, I_{p0}$ とする)を測定します。その後 $(I_{p1} + I_{p2} + I_{p3} + I_{p4})$ と $I_{p0}$ の比

$$(I_{p0} / (I_{p1} + I_{p2} + I_{p3} + I_{p4}) - 1) \times 100 (\%) \dots\dots\dots (式 4-11)$$

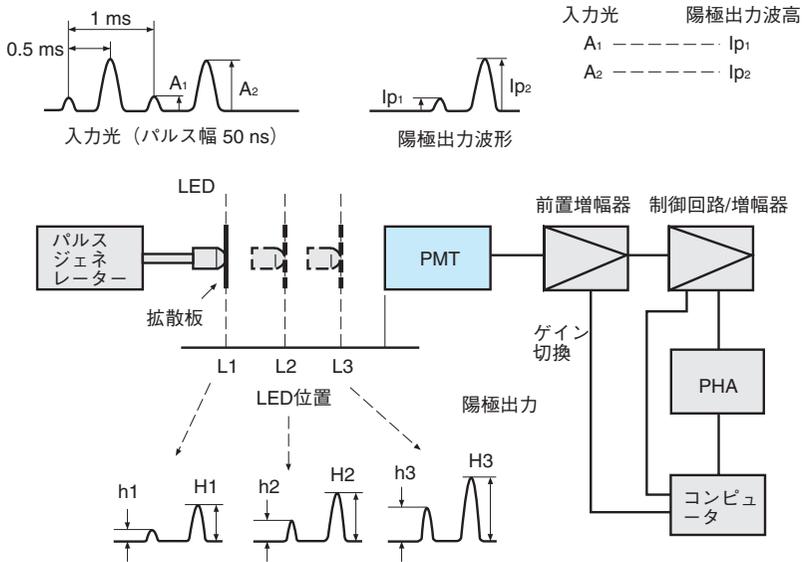
をとります。この値が直線性からのずれを表しており、もし直線性があれば

$$I_{p0} = I_{p1} + I_{p2} + I_{p3} + I_{p4} \dots\dots\dots (式 4-12)$$

になり、式4-11のもゼロとなり直線性からのずれはないことになります。さらに、光源の光量を変えて、すなわち光電子増倍管の出力電流を変えて測定を繰り返せば図4-29のように出力電流対直線性のずれを知ることができます。この特性は主にデバイダ回路の電流値、構成に大きく依存します。

また、簡易的には、あらかじめ校正された減光フィルタを用い、光量を可変して測定する方法もあります。

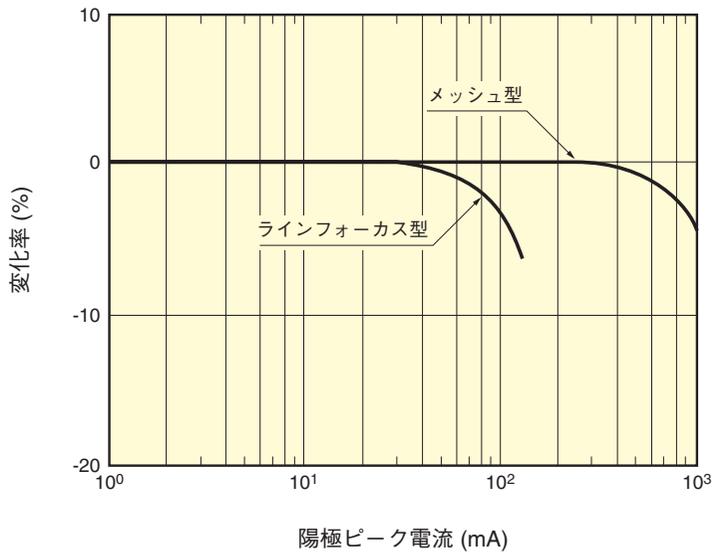




THBV4\_0430JA

図 4-30 パルス出力のブロックダイアグラム

光源(LED)と光電子増倍管(PMT)の距離を可変することにより出力電流を変えて測定を繰り返すと図4-31のような特性が得られます。



THBV4\_0431JA

図 4-31 パルスリニアリティ特性

### 4.3.3 ユニフォミティ

ユニフォミティとは、光の入射位置の違いによる出力感度の均一性のことです。陽極ユニフォミティは光電面と電子増倍部(ダイノード部)でのそれぞれの積として考えられます。

図4-32に入射波長が400 nmの時の陽極ユニフォミティの例を示します。これは直径1 mmのスポット光を光電面上で走査した時のものです。

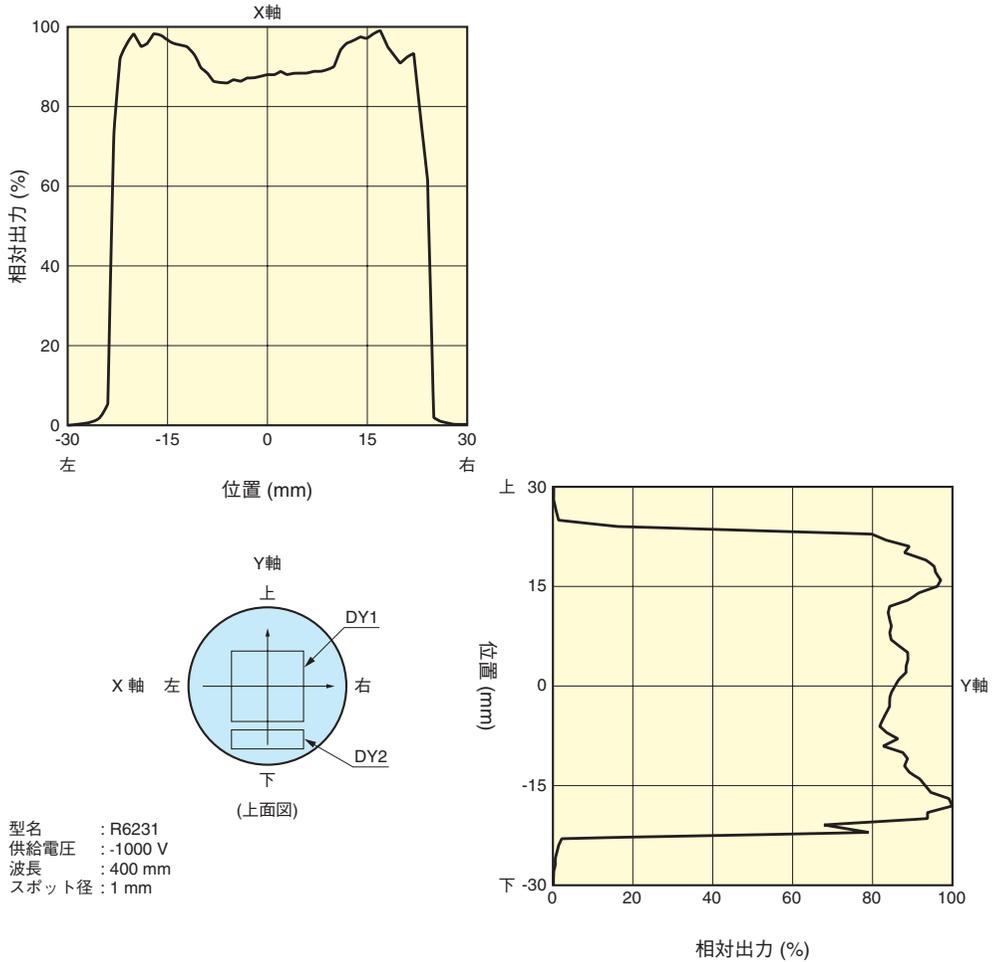
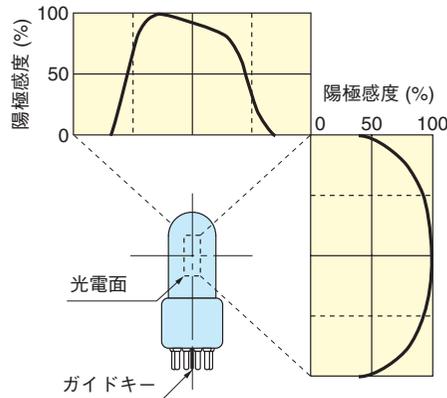


図 4-32 ユニフォミティ

一般的に光電面、陽極とも長波長、特に限界波長に近くなるにつれユニフォミティは悪くなります。これは限界波長に近いと陰極感度は光電面の表面状態に強く依存するようになるため、陰極感度のムラが大きくなるためです。また供給電圧があまり低くなるとダイノード間の電子収集が悪化し、ユニフォミティに影響を与えることがあります。

ヘッドオン型の光電子増倍管はサイドオン型に比べてユニフォミティが優れていますが、医用分野で用いられているガンマカメラのような位置検出用途ではこの特性が装置の性能を左右するので、特に吟味したものが使われます。図4-33にサイドオン型の一般的なユニフォミティのデータを示します。測定方法は上記ヘッドオン型のもと同じです。ダイノード別のユニフォミティ特性は表4-2に示したように、ボックス型やベネシアンブラインド型、メッシュ型が優れています。



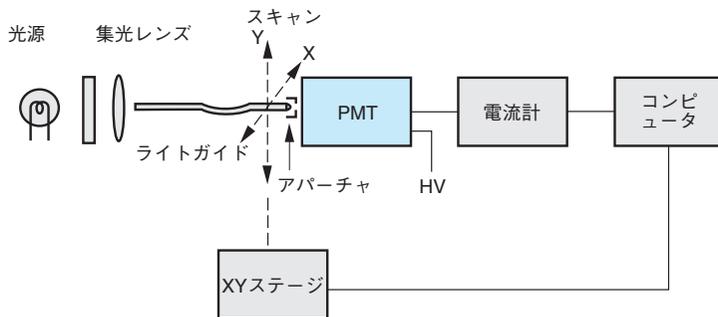
THBV4\_0433JA

図 4-33 サイドオン型光電子増倍管のユニフォミティ

ユニフォミティは、使用法の違いを考慮して入射位置によるユニフォミティと入射角度によるユニフォミティ (アンギュラーレスポンス) によって評価されます。以下に浜松ホトニクスで用いられている測定方法、特性例を述べます。

### (1) 入射位置によるユニフォミティ

光電面上の二次元方向にスポット光をスキャンさせた時の出力電流変化をグラフに表したものです。測定系を図4-34に示します。

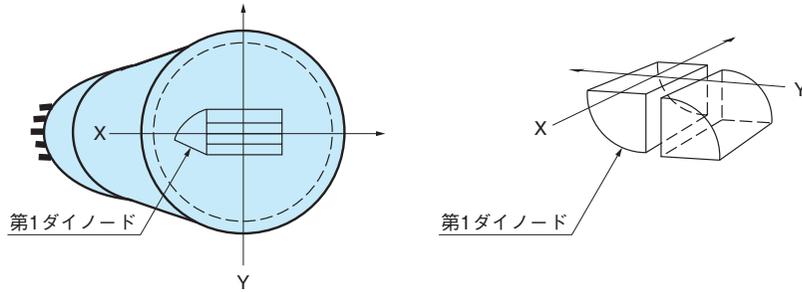


THBV4\_0434JA

図 4-34 ユニフォミティ測定系

便宜上、X軸、Y軸に分けて走査します。普通このX、Y軸の方向は図4-35に示すように第1ダイノードの向きによって決めています。

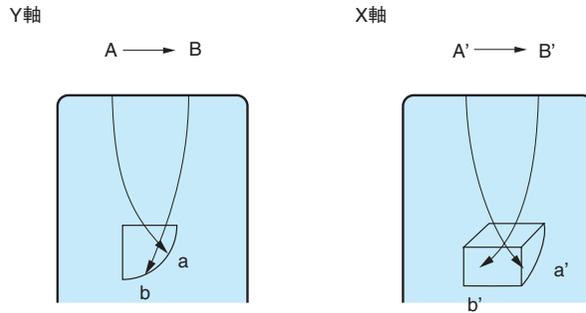
図4-35にヘッドオン型のX、Y軸と第1ダイノードの位置関係を示します。ダイノードでの損失電子の割合は、光電子の第1ダイノードへの入射位置に最も左右されます。測定データは図4-32を参照してください。



THBV4\_0435JA

図 4-35 ヘッドオン型のユニフォミティ

光電面上のX、Y軸をスポット光で走査するとき、図4-36のように光電子が第1ダイノードのX、Y軸を移動していると考えられます。



THBV4\_0436JA

図 4-36 光電子放出の位置とダイノードとの位置関係

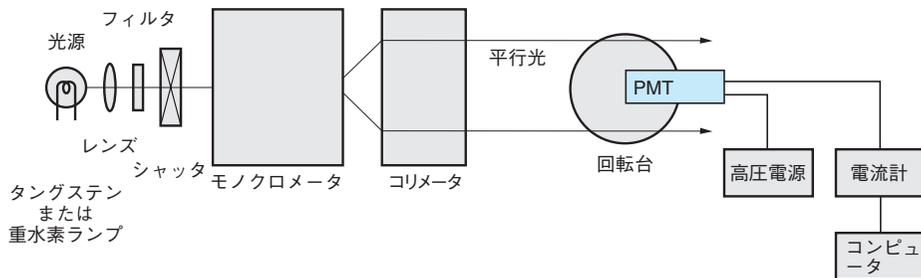
X軸は、ダイノードが管軸に対して対称な方向を横切っているため、一般的にY軸と比べユニフォミティ特性が良いのが普通です。

また、光電面を格子状に分割して感度分布を二次元的に表したり、三次元表示をすることもあります。

陽極出力の不均一性は、ヘッドオン型光電子増倍管では20%～40%、サイドオン型ではそれ以上になることがあります。このユニフォミティの影響を軽減するには、入射窓の直前に拡散板を置いたり入射窓の表面をすりガラス状にした光電子増倍管を使うなどの方法があります。

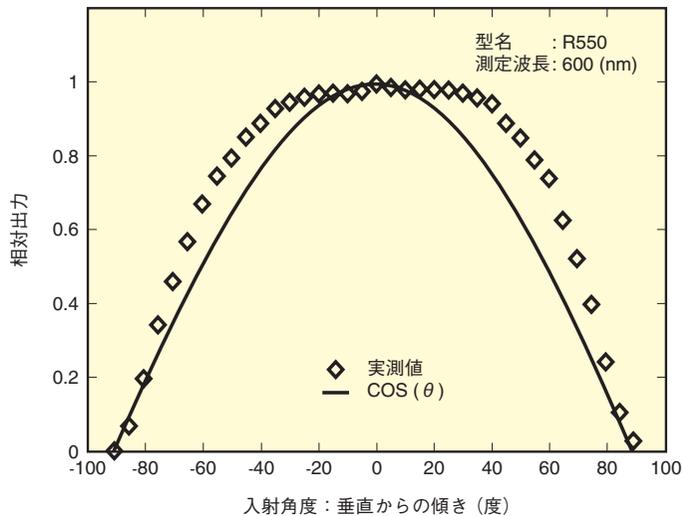
## (2) アンギュラーレスポンス

入射光が光電面に斜めに入射した時の特性を表すのが入射角依存性で、アンギュラーレスポンス<sup>28)~30)</sup>と呼ばれています。この測定では、平行光を光電面全面に照射し、光電子増倍管を回転した時の回転角対出力電流で表されます。その測定系を図4-37に、測定データを図4-38に示します。回転台を回すと光電面の投影面積は減少するため、角度依存性がない場合でも出力電流は入射角のコサイン値で表される曲線となります。普通、入射光が斜めに入ると光電面の感度は上がります。そのため斜めより光を入射させた時、コサイン値の曲線より感度は高くなります。これは斜め入射の場合、入射光が光電面を通過する距離が結果的に長くなるためと考えられます。また波長が長いほどこの変化は大きくなります。



THBV4\_0437JB

図 4-37 アンギュラーレスポンスの測定系



THBV4\_0438JA

図 4-38 アンギュラーレスポンス

#### 4.3.4 安定性

光電子増倍管の時間経過に対する出力変化特性を一般的にドリフト特性、ライフ特性といい、変化の直接の原因となる電圧、電流、温度などのストレスによって受ける劣化は、疲労(fatigue)とも呼ばれます。

##### (1) ドリフト（経時変化特性）、ライフ（寿命）特性

ドリフト<sup>1)31)</sup>は主として短時間の経時変化をいい、1000時間～10 000時間以上にわたる長時間の変化特性は寿命(ライフ)特性と呼ばれます（第13章 13.9.1参照）。光電子増倍管を長時間動作させても陰極感度が大きな経時変化を起こすことはまれで、ほとんどダイノードの二次電子放出比の変化に依存しています。つまりドリフト特性、ライフ特性とは時間に対するゲイン変化の大きさを表す特性とも言えます。

単位時間あたりのドリフト特性は一般的に動作時間が長いほど良くなります。さらに動作後ある短期間非動作放置されていてもこの傾向はある程度存続するため、使用前にエージングあるいは電源電圧を一定時間供給することによってより安定に使用することが可能です。

また、ドリフト特性、ライフ特性は信号出力電流の大きさに強く依存しますので通常は平均電流として数 $\mu\text{A}$ 以下でを使用することをお勧めします。

浜松ホトニクスでは、ドリフト特性は通常連続入射光による直流レベルでの出力信号電流の経時変化を記録します。当社の代表的な光電子増倍管のドリフト特性を図4-39に示します。一般的に光電子増倍管のドリフトは動作の初期に大きく、時間経過にともなって安定する性質があります。またパルス動作または間欠動作(動作、非動作の繰り返し)における光電子増倍管出力の経時変化特性も、平均出力電流値が同じであれば、経時変化のパターンおよび変化の大きさは直流レベルのドリフト特性と変わりません。

この他、シンチレーションカウンティング用光電子増倍管に特有の評価方法がありますが、それらについては第7章シンチレーションカウンティング法の項で述べます。

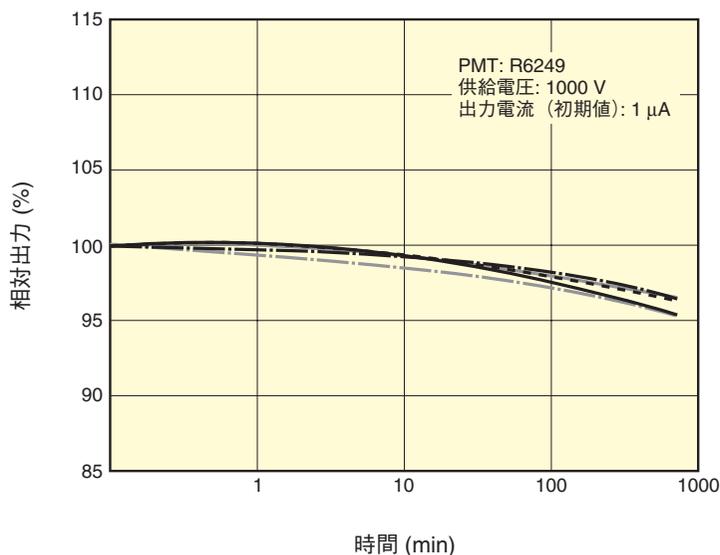


図 4-39 ドリフト特性の例

## (2) エージング、ウォーミングアップ

数%以内の出力安定性が求められる用途では、以下に述べるエージングやウォーミングアップをお勧めします。

### (a) エージング

陽極出力電流が最大定格を超えない範囲で一定の光を入射し数時間から数十時間連続動作を行うものです。これによりドリフト特性が安定します。また、使用直前には次項のウォーミングアップを併用するとより安定になります。

### (b) ウォーミングアップ

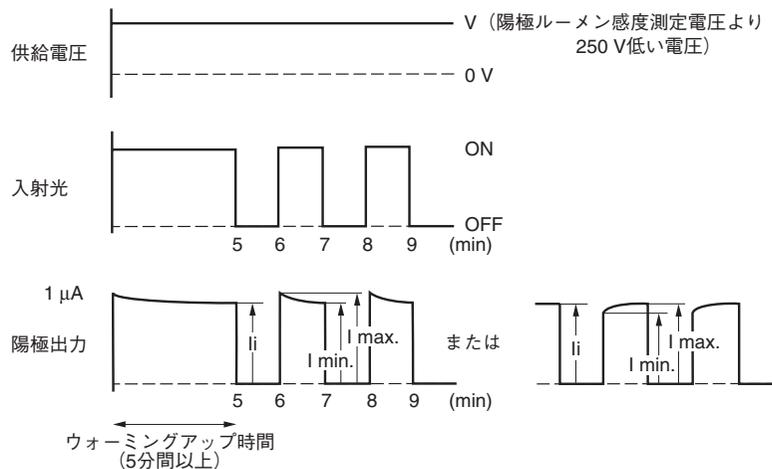
光電子増倍管の使用前に、数十分程度のウォーミングアップを行なうことを安定な動作を得るためにはお勧めします。このウォーミングアップ時間は特に間欠動作の場合、使い初めは長く、使い込んだ後は短い時間で済ませることができます。陽極電流が大きい場合は短い時間で、小さい場合は長くすることで同じ効果が得られます。一般的には実際の使用で供給する程度の電圧を与え、陽極電流を数 $\mu\text{A}$ 流した状態での数十分程度のウォーミングアップを行います。しかし、微小電流動作(平均出力電流で数十nAから数百nA)の場合は、暗中で1時間程度電圧を供給しておくだけでもある程度のウォーミングアップは効果があります。

### 4.3.5 ヒステリシス特性

入射光、または供給電圧がステップ関数的に変化したとき、出力が同じステップ関数とならないことがあります。この現象をヒステリシス<sup>1)32)</sup>と呼び、直前の動作履歴にも依存します。出力信号が、一度大きく振れてから収束するような特性をオーバーシュートと呼び、低めの値から収束していくような特性をアンダーシュートと呼んでいます。ヒステリシスは測定条件によって光ヒステリシスあるいは電圧ヒステリシスと呼ばれます。

#### (1) 光ヒステリシス特性

光電子増倍管に一定電圧が供給されていて、入射光がステップ関数で変化するときの出力波形を、光ヒステリシス特性といいます。標準的な光ヒステリシス特性の測定方法を図4-40に表します。



THBV4\_0440JA

図4-40 光ヒステリシス

供給電圧は陽極ルーメン感度測定電圧より250 V低い電圧を供給し、陽極電流約 $1 \mu\text{A}$ で5分以上ウォーミングアップし、そして1分間入射光を遮断し、その後1分間光を入射します。そして再現性を確かめるために、これを二度繰り返します。そのときの再現性のある出力変化割合が、下記の式によりパーセントで表されます。

$$\text{光ヒステリシス } H_L = ((I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}) / I_i) \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-17)}$$

ここで、 $I_{\text{MAX}}$ ：最大値、 $I_{\text{MIN}}$ ：最小値、 $I_i$ ：平均値を示します。

表4-5に代表的な光電子増倍管の光ヒステリシスの値 $H_L$ を示します。一般的にこの特性は一部の特殊な品種を除いて $\pm 1\%$ 以内です。光ヒステリシス特性は出力電流の違いによりヒステリシスのパターンや値が変わることがあります。

## (2) 電圧ヒステリシス特性

入射光の光量がステップ関数的に変化するとき、それに対応するように供給電圧をステップ関数的に変えて、出力を一定にするような帰還回路と共に使われるとき、出力信号のオーバーシュートやアンダーシュートの現象は極力小さくすることが重要です。一般的に光ヒステリシスより大きな値を示し、また光ヒステリシスが小さくても電圧ヒステリシスは大きいこともあります。表4-5に代表例を示します。

光電子増倍管	光ヒステリシス (%)	電圧ヒステリシス (%)	管径 (mm)
R6350	0.8	3.0	13 mm サイドオン型
R11568	0.5	1.0	28 mm サイドオン型
R928	0.5	1.0	28 mm サイドオン型
R12421	0.3	1.0	13 mm ヘッドオン型
R6249	0.4	2.0	28 mm ヘッドオン型
R1306	0.07	0.06	52 mm ヘッドオン型

表 4-5 標準的なヒステリシス特性の例

電圧ヒステリシス特性の測定方法を図4-41に示します。供給電圧は陽極ルーメン感度測定電圧より700 V低い電圧を用い、陽極電流約0.1  $\mu$ Aで5分間以上動作させた後、測定します。

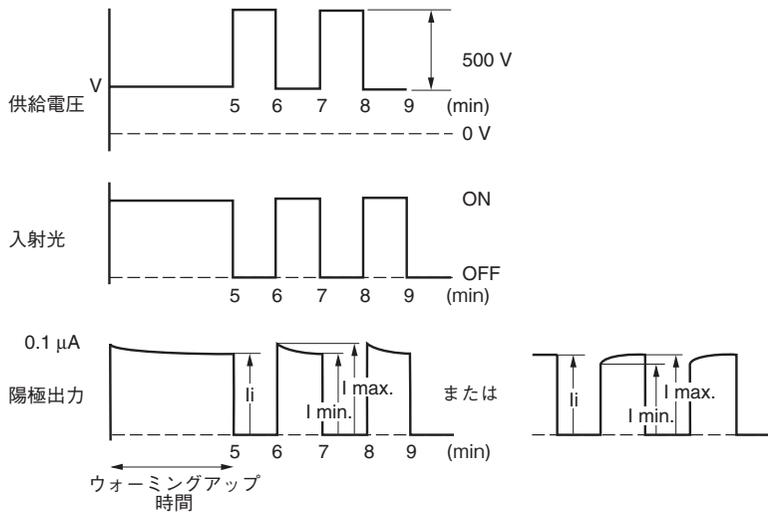


図 4-41 電圧ヒステリシス

THBV4\_0441JA

その後1分間光を遮断して電圧500 Vをステップ関数的に増加した後再び電圧と光量を始めの条件に戻します。そのときの再現性のある出力変化割合を、次の式によりパーセントで示します。一般的に電圧変化が大きい程、電圧ヒステリシスの値は大きくなります。

$$\text{電圧ヒステリシス } H_V = ((I_{\text{MAX}} - I_{\text{MIN}}) / I_i) \times 100 (\%) \dots\dots\dots \text{(式 4-18)}$$

ここで、 $I_{\text{MAX}}$  : 最大値、 $I_{\text{MIN}}$  : 最小値、 $I_i$  : 平均値を示します。

### (3) ヒステリシスの軽減

信号光が長時間遮断されているときは、疑似光を入射して光電子増倍管の出力電流に大きな変化がないようにすることで、光ヒステリシス特性を改善させることができます。電圧ヒステリシスはHA処理(第13章13.8.2参照)を用いることで改善される場合があります。

また、サイドオン型PMTなどの一部製品では、入射光の照射サイズを小さくすることで電圧ヒステリシスは改善されます。

## 4.3.6 暗電流

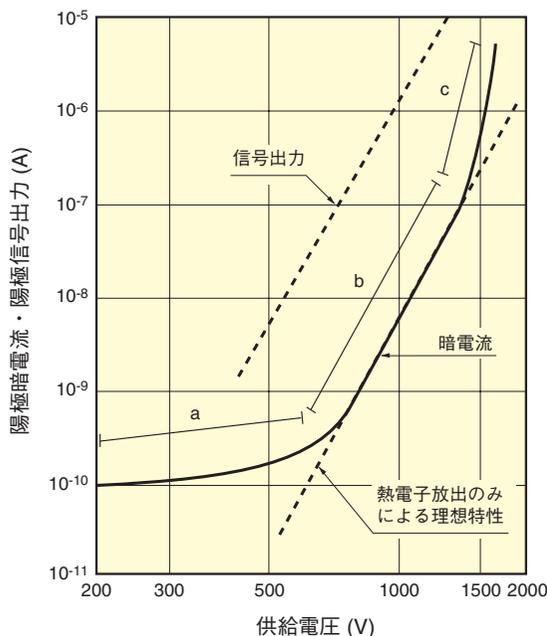
光電子増倍管を動作させると光が入射していない状態でもわずかながら電流が流れています。これを暗電流<sup>1)23)25)33)</sup>といい、微小電流、微弱光を取り扱う光電子増倍管にとって極力小さいことが望まれます。

### (1) 原因

暗電流を原因別に分類すると次のようになります。

- (a) 光電面およびダイノード面からの熱電子放出
- (b) 管内の陽極と他の電極間、およびシステムにおいて陽極ピンと他のピン間の漏洩電流
- (c) ガラスや電極支持材の発光
- (d) 電界放出
- (e) 残留ガスのイオン化 (イオンフィードバック)
- (f) 宇宙線やガラス中の放射性同位元素からの放射線や、環境ガンマ線によるガラスの発光

暗電流は供給電圧に伴って増加しますが、その増加率は一様ではありません。典型的な供給電圧対暗電流の様子を図4-42に示します。



THBV4\_0442JA

図 4-42 供給電圧対暗電流特性

この特性は供給電圧によって3つの部分に分けて考えることができます。すなわち低電圧領域(図中a)の部分は漏洩電流に、中電圧領域(図中b)の部分は熱電子放出に、また高電圧領域(図中c)の部分は主として電界放出やガラス、電極支持材の発光に、それぞれ支配されています。一般的にbの領域が最もSN比が高いため、この領域の供給電圧範囲で使うのが適切です。

イオンフィードバック<sup>34)</sup>と宇宙線、放射性同位元素によるノイズ<sup>34)35)36)</sup>はパルス動作の際には問題となることがあります。

また、光電面を室内光に曝らした場合、暗電流は1時間～2時間暗中に放置すれば元にもどりますが、太陽光など極端に強い光(10 000 lx以上)では回復不可能な損傷を受ける場合があります。従って、使用前には暗中に放置しておくことをお勧めします。

浜松ホトニクスでは、30分間暗中放置後の暗電流を測定し、その値を検査成績書として添付していますが、これは30分間暗中放置すれば、長期暗中放置後の暗電流値にかなり近づくことと暗電流測定の作業性を考慮して決められています。そのためさらに長期間暗中放置されれば、更に低い暗電流を得ることができます。先に述べた6つの暗電流の原因について以下各原因ごとに説明します。

#### a) 熱電子放出

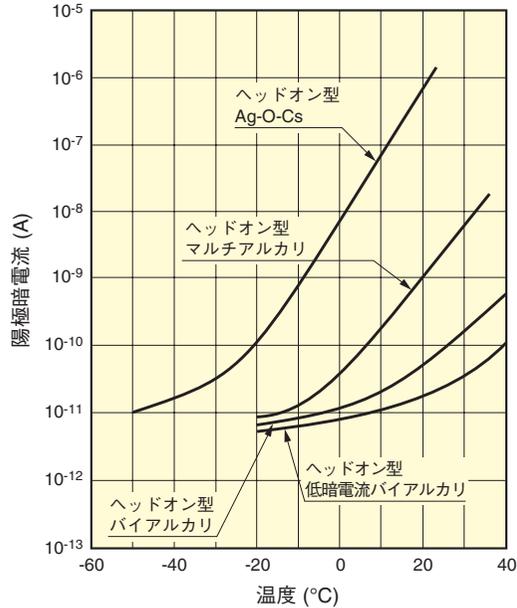
光電面やダイノード面は仕事関数の低い物質により構成されているため常温でも熱電子を放出します。この効果はW.Richardsonによって研究され、次式<sup>37)</sup>で表されます。

$$i_s = AT^{5/4} e^{(-e\psi/KT)} \dots\dots\dots (式 4-19)$$

$\psi$  : 仕事関数                      T : 絶対温度  
 $e$  : 電子の電荷                    A : 定数  
 K : ボルツマン定数

この式によれば熱電子放出は光電面の仕事関数と温度の関数であることがわかります。仕事関数の大小、つまり光電面の種類によって熱電子放出量は決まることとなります。光電面の仕事関数が低いとエネルギーの低い光すなわち長波長まで感度は延びますが、熱電子放出も多くなることが上式よりわかります。一般的なアルカリ金属を主成分とする光電面では、長波長域に感度があるAg-O-Cs光電面(図4-2参照)の暗電流が高く、限界波長の短い紫外用光電面(Cs-Te, Cs-I)の暗電流が低い値を示します。

また上式によれば、温度を下げれば暗電流も下がり、図4-43のように冷却によって大幅に暗電流が下がることがわかります。

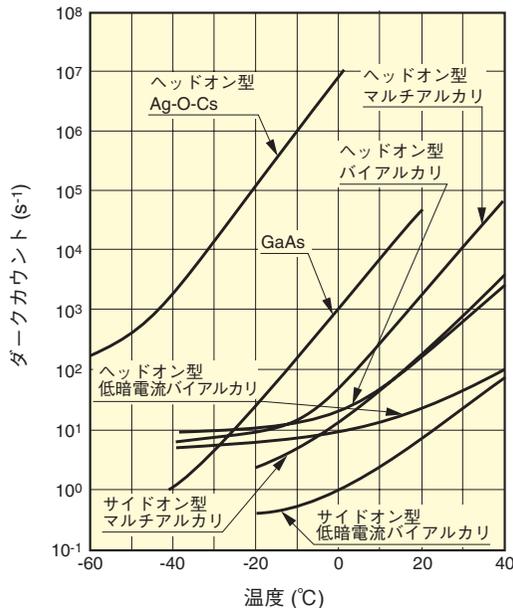


THBV4\_0443JA

図 4-43 陽極暗電流の温度特性

しかし冷却によって暗電流が小さくなくても、漏洩電流があるために、限りなく下がるわけではありません。熱電子放出は光電面とダイノードの両方から放出されますが、光電面の表面積が大きいことや、ダイノードでは後段にゆくほど出力への寄与が減ることから、光電面からの熱電子放出の影響が最も大きいものとなります。そのため、供給電圧に対する熱電子放出による暗電流の変化は、ゲインの傾きとほぼ等しくなります。

また、フォトンカウンティング法で行った暗電流パルスの温度特性例を図4-44に示します。これも当然のことながら光電面を冷却すると、暗電流パルス数も減少します。



THBV4\_0444JA

図 4-44 暗電流パルスの温度特性

**b) 漏洩電流**

光電子増倍管は500 V～3000 Vもの高電圧で、数nA～数十 $\mu$ Aの微弱電流を取り扱うため、使用する絶縁材料の性能が極めて重要になります。たとえば絶縁抵抗が $10^{12}$   $\Omega$ 程度でも、漏洩電流はナノアンペアの単位になってしまいます。絶縁材料からの漏洩電流のため供給電圧との関係は、図4-42に見られるように光電子増倍管のゲインとは無関係でオームの法則で与えられる式、電流値(I)=供給電圧(V)/絶縁抵抗(R)によって決まります。一方、熱電子放出による暗電流は供給電圧に対して指数関数的に変化するため、前述のように供給電圧が低くなるほど、相対的に漏洩電流の暗電流に占める割合が増加してきます。

原因は、光電子増倍管内部すなわち陽極とダイノード間で起こる場合と、ステム、ベース、ソケットの陽極ピンと他のピン間で起こる場合があります。特に後者のステム、ベース、ソケットにおける漏洩電流は表面の汚れまたは付着した水分によって増大するため、これらを清浄にしておくことと湿度に対する注意が大切です。汚れは、アルコールで洗浄して除去できる場合が多く、漏洩電流の低減に有効です。

**c) ガラスや電極支持材からの発光**

光電面やダイノードから飛び出した電子の中には正規の軌道はずれて出力信号に寄与しないものがあります。これらの漏れ電子が側管ガラスに当たるとわずかながら発光します。一般的に光電子増倍管の光電面には負の高電圧が供給され、外部には接地電位の金属ケースを用いることが多いため、このような衝突現象が起きやすくなりますが、HA処理によってこの問題が軽減できます。HA処理については、第13章13.8.2で述べます。

**d) 電界放出**

光電子増倍管の供給電圧が高くなり過ぎると、電界により電子が引き出され、暗電流が急激に増加します。これは図4-42のcの部分で示されます、この現象が起きると光電子増倍管の寿命を著しく縮めるため、最大供給電圧が定められています。一般的に、この電圧値以下で使用すれば問題はありますが、安全を考慮して最大供給電圧の2割～3割程度低い電圧でを使用することをお勧めします。

**e) 残留ガスのイオン化 (イオンフィードバック)**

光電子増倍管の内部は $10^{-6}$  Pa～ $10^{-5}$  Paもの高真空ですが、それでも残留ガスの影響は無視できません。このガス分子は電子との衝突によってイオン化され、そのうちの正イオンは比較的前段のダイノード、もしくは光電面に当たって多数の二次電子を発生させ、結果として大きな雑音パルスを出力させます。この雑音パルスは信号電流より時間的に少し遅れて出力されるためパルス動作の際、アフターパルス<sup>38)39)40)</sup>として測定値に誤差を生じることがあります。

**f) 宇宙線、ガラス中の放射性同位元素からの放射線や環境ガンマ線によるガラスの発光**

地球には多くの宇宙線が降りそそいでいますが、その中で、光電子増倍管の雑音源となるのは主としてミュオン( $\mu$ )です。ミュオンがガラス窓を通るとチェレンコフ放射により多数の光子を放出します。また一般的にガラスは酸化カリウム( $K_2O$ )などを含有していますが、カリウムには微量の放射性同位元素<sup>40</sup>Kが含まれています。<sup>40</sup>Kはベータ線、ガンマ線を放出し、雑音源となることがあります。また建築物などに含まれている放射性同位元素が発する環境ガンマ線も雑音源となることがあります。しかし、ここで述べている雑音パルスは頻度が非常に低いため、液体シンチレーション計測などの非常に信号数の少ない特殊な応用を除いて通常は無視できます。

## (2) 暗電流の表現方法

微弱光検出では暗電流が検出限界を決める大きな要因です。暗電流を表現する場合にはいろいろな方法があり、以下にそのいくつかについて紹介します。

### a) 直流的表現

一般的に浜松ホトニクスでは、ある一定電圧で測定された暗電流の値を検査成績書として添付しています。また、ある陽極感度を得る供給電圧にて定義する方法もあります。その表現方法として、等価暗電流と、EADCI (Equivalent Anode Dark Current Input)があります。

等価暗電流は、ある陽極ルーメン感度の時の暗電流で、通常その陽極感度になる電圧とその電圧での暗電流という形で表します。陽極感度を一定に保った動作状態で使われている時に便利です。

EADCIは、暗電流に等しい陽極電流を得るために必要な入射光量をルーメン(lm)またはワット(W)で表したもので、次式から算出することができます。

$$\text{EADCI (lm)} = \text{暗電流 (A)} / \text{陽極ルーメン感度 (A/lm)} \quad \dots\dots \text{(式 4-20)}$$

ワット(W)で表すときは波長を決めて、その時の陽極放射感度(A/W)で暗電流を割ります。図4-45に実際の等価暗電流特性の様子を表していますが図中には陽極暗電流、陽極ルーメン感度も示してあります。EADCIが小さい値の時の供給電圧領域で使えば良い信号対雑音比(SN比)が得られますが、図より供給電圧が約1000 Vの付近で、陽極ルーメン感度が約3桁の範囲でEADCIの値が小さく平坦な部分があるのがわかります。

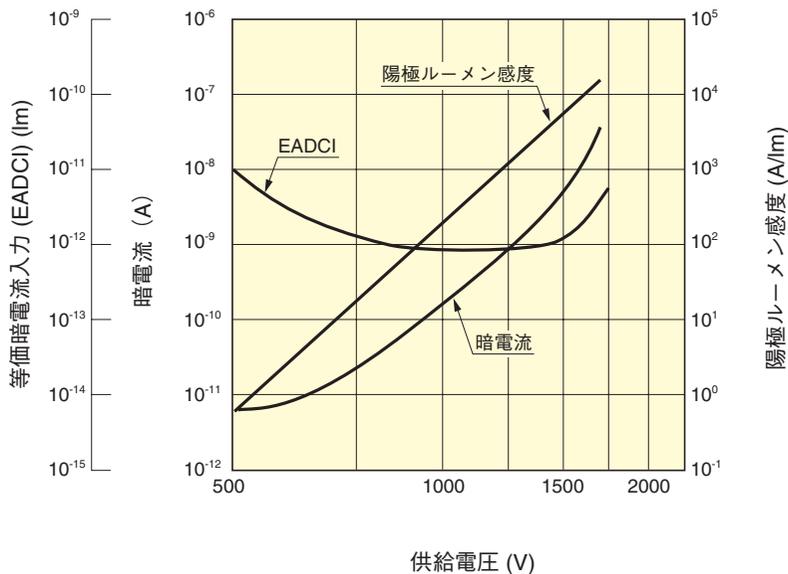


図 4-45 等価暗電流特性例

## b) 交流的表現

一般的に微弱光測定において暗電流は減算できるため、むしろそのノイズのゆらぎ成分により検出限界が決められます。そのような場合、検出限界はENI (Equivalent Noise Input)で表されます。ENIとはこのノイズ電流と等価な信号電流を得るのに必要な入射光量、つまりSN比が1となる入射光量で、ピーク波長またはある特定の波長におけるワット(W)数で表す場合にはNEP(Noise Equivalent Power)とも呼ばれます。

雑音は回路系の周波数帯域幅の平方根にも比例し、ENI<sup>23)</sup>は下記のように定義されます。

$$\text{ENI} = (2e \cdot I_d \cdot \mu \cdot B)^{1/2} / S \quad (\text{W}) \quad \dots\dots\dots \text{(式 4-21)}$$

e: 電子の電荷 ( $1.6 \times 10^{-19}$  C)

I<sub>d</sub>: 陽極暗電流 (A)

μ: ゲイン

B: 回路系の周波数帯域幅 (Hz)

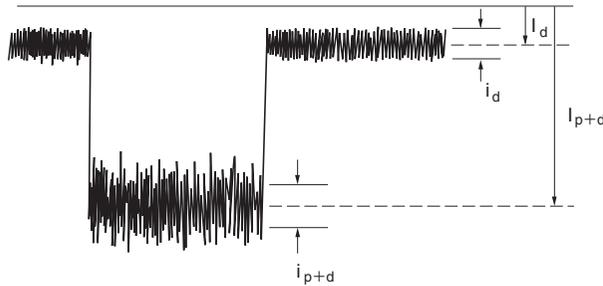
S: 陽極放射感度 (A/W)

一般的に、B = 1 Hzが使われ、ピーク波長で $10^{-15}$  W ~  $10^{-16}$  Wの値をとります。

### 4.3.7 光電子増倍管の信号対雑音比 (SN比)

光電子増倍管の出力波形を観測すると、光入力がなくとも発生する雑音成分と、信号光により発生する雑音成分が見られます。通常、これらの雑音成分は光電面からの熱電子による暗電流および信号電流によるショットノイズが支配的であることから、ここではこの両者を考えます。

以下のSN比は電流の実効値で定義し、雑音成分はr.m.s. (root mean square)で表すものとします。今、図4-46に示すような信号、雑音波形からSN比を求める場合を考えてみます。



THBV4\_0446JA

図 4-46 信号対雑音比の特性例

雑音成分の平均値 :  $I_d$   
 雑音成分の交流分 :  $i_d$  (r.m.s.)  
 信号の平均値(雑音成分含む) :  $I_{p+d}$   
 信号の交流分(雑音成分含む) :  $i_{p+d}$  (r.m.s.)

ここでSN比<sup>25)41)42)</sup>は以下の式より求められます。 $I_p$ は信号成分の平均値で、 $I_{p+d}$ から $I_d$ を減算して求めます。

$$\text{SN比} = I_p / i_{p+d} \quad \dots \dots \dots \text{(式 4-22)}$$

今、暗電流 $I_d$ が無視できる( $I_p \gg I_d$ )場合、SN比は

$$\text{SN比} \approx I_p / i_p \quad \dots \dots \dots \text{(式 4-23)}$$

ここで $I_p$ は信号成分の平均値、 $i_p$ はその交流分(r.m.s.)です。 $i_p$ は、光子およびその光電子放出過程での統計的揺らぎによる成分と、増倍過程により発生する成分からなります。

一般的に増倍過程における雑音成分は、雑音指数F(Noise Figure)<sup>42)</sup>を用い次式で定義され、入出力でのSN比の劣化具合を表します。

$$F = (S/N)_{in}^2 / (S/N)_{out}^2 \quad \dots \dots \dots \text{(式 4-24)}$$

$(S/N)_{in}$ は光電子増倍管入力側のSN比、 $(S/N)_{out}$ は光電子増倍管出力側のSN比を意味します。そしてn段ダイノードをもつ光電子増倍管でのカスケード増倍過程における雑音指数は以下の式で与えられます。

$$F = 1 + 1/\delta_1 + 1/\delta_1\delta_2 + \dots + 1/\delta_1\delta_2\cdots\delta_n \quad \text{..... (式 4-25)}$$

ここで、 $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\dots$ 、 $\delta_n$ は各段の二次電子放出比です。  
さらに $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\dots$ 、 $\delta_n = \delta$ とおけば、式4-25は以下の式に簡略化されます。

$$F \approx \delta/(\delta-1) \quad \text{..... (式 4-26)}$$

したがって、交流分 $i_p$ はこの雑音指数を加味すると以下の式で表現されます。  
ここで $\alpha$ は収集効率(4.2.2参照)です。

$$i_p = \mu(2 \cdot e \cdot I_k \cdot \alpha \cdot B \cdot F)^{1/2} \quad \text{..... (式 4-27)}$$

ここで、 $\mu$ はゲイン、 $e$ は電子の電荷、 $I_k$ は陰極電流、 $B$ は測定系の周波数帯域幅です。これと式4-25から

$$i_p = \mu(2 \cdot e \cdot I_k \cdot \alpha \cdot B(1 + 1/\delta_1 + 1/\delta_1\delta_2 + \dots + 1/\delta_1\delta_2\cdots\delta_n))^{1/2} \quad \text{..... (式 4-28)}$$

一方、平均陽極電流 $I_p$ は以下の式で表されます。

$$I_p = I_k \cdot \alpha \cdot \mu \quad \text{..... (式 4-29)}$$

式4-28、式4-29から

$$\begin{aligned} \text{SN比} &= I_p / i_p \\ &= \left( \frac{I_k \alpha}{2eB} \cdot \frac{1}{1 + 1/\delta_1 + 1/\delta_1\delta_2 + \dots + 1/\delta_1\delta_2\cdots\delta_n} \right)^{1/2} \end{aligned}$$

$\alpha=1$ とにおいて式4-26で簡略化すると

$$\text{SN比} \approx \left( \frac{I_k}{2eB} \cdot \frac{1}{\delta/(\delta-1)} \right)^{1/2} \quad \text{..... (式 4-30)}$$

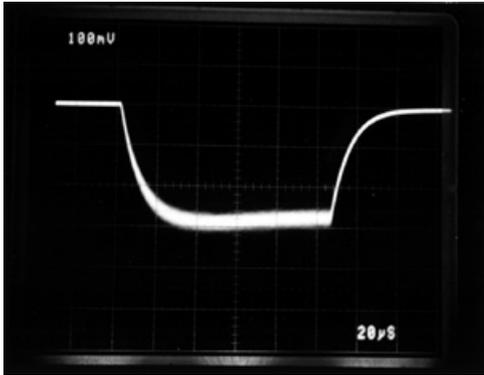
この式から、SN比は陰極電流 $I_k$ の平方根に比例し、周波数帯域幅 $B$ の平方根に反比例することがわかります。

ここで式4-30に、一般的な光電子増倍管の場合に得られる $\delta=6$ を代入すると、 $\delta/(\delta-1)$ は1.2となり1に近い値を取ります。そのため増倍過程での雑音を無視すれば、およそのSN比は以下のように書きかえられます。

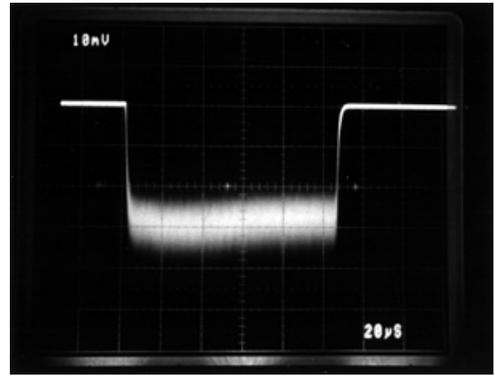
$$\text{SN比} = (I_k/2eB)^{1/2} \approx 1.75 \times 10^3 \sqrt{\frac{I_k (\mu\text{A})}{B (\text{MHz})}} \quad \text{..... (式 4-31)}$$

図4-47は、ある条件において、光量および負荷抵抗を変えた場合の、出力電圧波形を観察したもので、式4-31の関係が確認できます。

(a)  $R_L = 20 \text{ k}\Omega$



(b)  $R_L = 2 \text{ k}\Omega$  ((a)に比べ帯域が10倍)



(c) 光量を(b)の10倍にしたとき

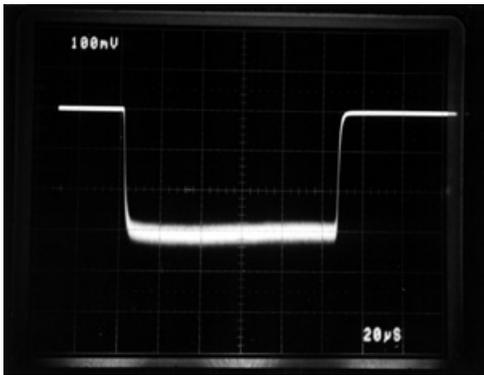


図 4-47 R329 の光量、負荷抵抗を変えたときの SN 比の変化

以上は暗電流を無視した場合であり、本来のSN比は陰極等価暗電流 ( $I_d$ ) と増幅回路によるノイズ電流( $N_A$ )の寄与を考慮し、式4-30は下記のように書き換えられます。

$$\text{SN比} = \frac{I_k}{(2eB \cdot \delta / (\delta - 1) \cdot (I_k + 2I_d) + N_A^2)^{1/2}} \dots\dots\dots \text{(式 4-32)}$$

また増幅回路のノイズが無視( $N_A=0$ )できるとき、SN比は次のようになります。

$$\text{SN比} = \frac{I_k}{(2eB \cdot \delta / (\delta - 1) \cdot (I_k + 2I_d))^{1/2}} \dots\dots\dots \text{(式 4-33)}$$

ここで陰極電流 $I_k$ は以下のパラメータを使い、 $I_k = \eta \cdot e \cdot P \cdot \lambda / hc$ で表わされます。

- |                     |                      |
|---------------------|----------------------|
| $I_k$ : 陰極電流 (A)    | $e$ : 電子の電荷 (C)      |
| $\lambda$ : 波長 (m)  | $h$ : プランク定数 (J·s)   |
| $c$ : 光速 (m/s)      | $\eta$ : 量子効率        |
| $P$ : 入射光量 (W)      | $B$ : 周波数帯域 (Hz)     |
| $\delta$ : 二次電子放出比  | $N_A$ : 増幅回路のノイズ (A) |
| $I_d$ : 陰極等価暗電流 (A) |                      |

式4-33で $F=(\delta/(\delta-1))$ とおくと

$$\begin{aligned} \text{SN比} &= \frac{I_k}{(2 \cdot e \cdot (I_k + 2 \cdot I_{da}) \cdot F \cdot B)^{1/2}} = \frac{I_k \cdot \mu}{(2e(I_{ph} + 2I_{da})FB \cdot \mu^2)^{1/2}} \\ &= \frac{I_p}{\sqrt{2e(I_p + 2I_{da})\mu FB}} = \frac{S_p P_i}{\sqrt{2e(S_p P_i + 2I_{da})\mu FB}} \end{aligned}$$

ただし、 $I_p$ は陽極信号電流、 $I_{da}$ は陽極暗電流

また、 $I_p = I_h \cdot \mu = S_p \cdot P_i$

$S_p$ は陽極放射感度、 $P_i$ は入射光パワー

ここでSN比=1とおくと

$$\begin{aligned} S_p P_i &= \sqrt{2e(S_p P_i + 2I_{da})\mu FB} \\ (S_p P_i)^2 - 2e(S_p P_i + 2I_{da})\mu FB &= 0 \quad \text{を与える変数} P_i \text{を求めると、} \\ S_p P_i &= \frac{-(-2eS_p \mu FB) \pm \sqrt{(-2eS_p \mu FB)^2 - 4S_p^2(-4eI_{da}\mu FB)}}{2S_p^2} \end{aligned}$$

したがって、

$$P_i = \frac{e\mu FB}{S_p} + \frac{\sqrt{(e\mu FB)^2 + 4eI_{da}\mu FB}}{S_p}$$

となり、検出限界が求められます。

これをプロットしたものが図4-48で、暗電流のみを考慮したENI（式4-21による）と比較すると、特に高帯域で違いが顕著になります。したがって、検出限界は回路系の周波数帯域幅 $B$ が小さい場合（約数kHzまで）についてはENIで近似できますが、高周波数領域では信号光に起因するショットノイズ成分が支配的になります。（第6章 フォトンカウンティング法参照）

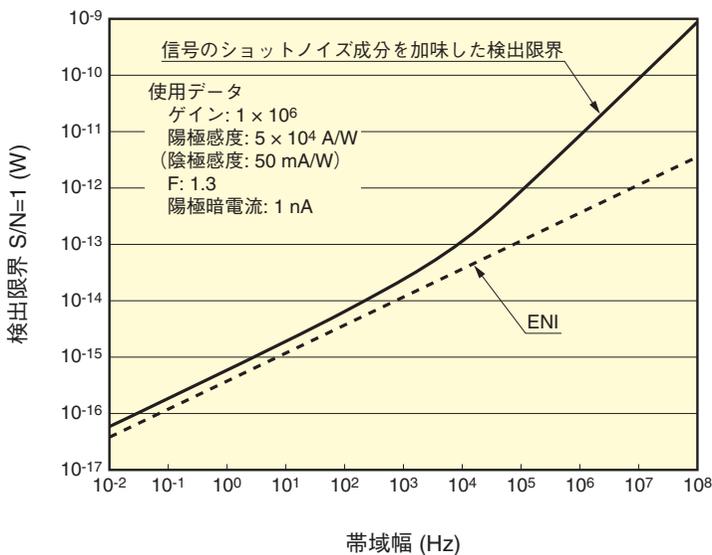


図 4-48 信号のショットノイズ成分を加味した検出限界

ショットノイズの影響を少なくし、良好なSN比を得るには以下の点を注意してください。

- (1) 使用する波長域で、できるだけ量子効率の高い光電子増倍管を使用する。
- (2) 集光効率を良くし、できるだけ損失のないように光を光電子増倍管に導く。
- (3) 集光に都合の良い形状の光電子増倍管を使用する。
- (4) 観測系に支障のないかぎり帯域幅を狭くする。

### 4.3.8 アフターパルス

シンチレーションカウンティングやレーザーパルスの検出など、光電子増倍管でパルス計測を行う場合、信号に対応する出力パルスの後に疑似パルスが観測される場合があります。このような出力パルスをアフターパルスと呼びます。これは、強いパルス光の後の微弱な信号を観測する際に邪魔になったり、シンチレーションカウンティング(第7章参照)でのエネルギー分解能の低下、パルス計数測定において誤差となったりします。

#### アフターパルスの種類

アフターパルスには信号パルス直後(数nsから数十ns後)に発生する速い成分と、更に遅れて数百nsから数 $\mu$ sまでに分布する遅い成分があり、各々原因は異なります。一般的にアフターパルスというと、主に後者を指します。

速い成分の多くは、第1ダイノードでの弾性散乱電子によって起こるものです。第1ダイノード付近に特殊な電極を設けることで発生確率を約十分の一にした光電子増倍管もあります。しかし一般的には時間遅れが小さいので、後続の信号処理回路の時定数に隠れてしまい問題とならない場合が多いのですが、速い蛍光寿命などを時間相関フォトンカウンティング法によって計測しようとするときや、レーザーレーダ(LIDAR)、自己相関法による蛍光計測・粒子計測などでは重要です。

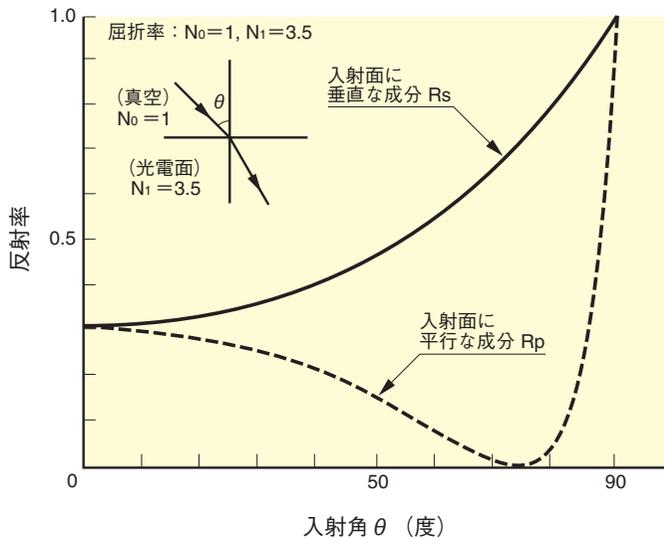
一方遅い成分は、光電子増倍管の残留ガスが電子との衝突によってイオン化され、これらの正イオンが光電面などに戻ること(イオンフィードバック)により、多数の光電子を発生させるために起ります。またアフターパルスの大きさもイオンの種類、発生場所によって異なるため、信号パルスからの遅れも、通常数百nsから数 $\mu$ sにわたり、光電子増倍管の供給電圧にも依存します。特にヘリウムガスは石英ガラスを容易に透過するためアフターパルスの要因になり易く、使用・保管環境に注意が必要です。なお、エージング(第4章4.3.4参照)を行うことで一時的にアフターパルスを減少させることができますが、恒久的なものではありません。また、ヘリウム等の不活性ガスによるアフターパルス成分に関しては、エージングしても改善しません。

実際の計測では、アフターパルスの頻度あるいは電荷量が問題となることがあります。光電子増倍管の供給電圧またはゲインが高い場合、発生イオン数が同じでも出力電荷量は大きくなる傾向があります。一方、フォトンカウンティングなどのパルス計数法では、あるしきい値を超えたアフターパルスの頻度のみが問題となります。

電極構造によっては信号の直前に光電面の透過光による疑似パルス(プリパルス)が観測されることもあります。しかし信号に近接しており波高値も小さいため、問題となることはほとんどありません。

### 4.3.9 偏光特性

光の偏光を測定する場合、光電子増倍管の持つ偏光特性<sup>43)44)</sup>を考慮する必要があります。これは光電子増倍管が偏光特性を有し、偏光面の違いによって感度が変わることがあるためです。また、一般的に分光器などの光学系にて偏光を発生する場合があります。入射光が光電面に斜め入射したとき、偏光成分により反射率が変わるため見かけの感度が変化することが主な原因です。図4-49に入射面に平行な成分(P成分)と垂直な成分(S成分)の入射角を変えた時の反射率を示します。この図では吸収係数はゼロと仮定した時の計算例であるため、実際の光電面ではもう少し複雑となります。



THBV4\_0449JA

図 4-49 反射率の角度依存性

入射光の偏光面が入射面の垂線に対して角度  $\theta$  を持つとき、光電流  $I$  は次式で表されます。

$$I\theta = I_S \cos^2 \theta + I_P \sin^2 \theta = \frac{1}{2} (I_P + I_S) \left( 1 - \frac{I_P - I_S}{I_P + I_S} \cdot \cos^2 \theta \right) \quad \dots \dots \dots \text{(式 4-34)}$$

但し、

$I_S$ : 光電面に垂直な成分による光電流

$I_P$ : 光電面に平行な成分による光電流

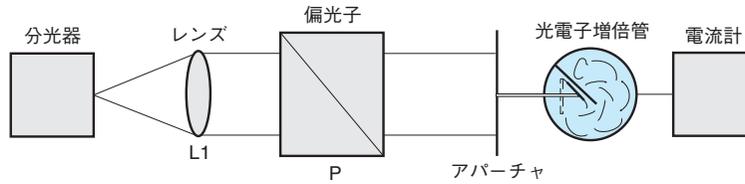
ここで、

$$I_0 = \frac{I_P + I_S}{2}, P = \frac{I_P - I_S}{I_P + I_S} \quad \dots \dots \dots \text{(式 4-35)}$$

と置き、上式に代入すると、下式が得られます。

$$\theta = I_0 (1 - P \cdot \cos^2 \theta) \quad \dots \dots \dots \text{(式 4-36)}$$

この  $P$  は偏光度と呼ばれ、光電子増倍管の偏光特性を表しており、通常図4-50のような光学系で測定します。



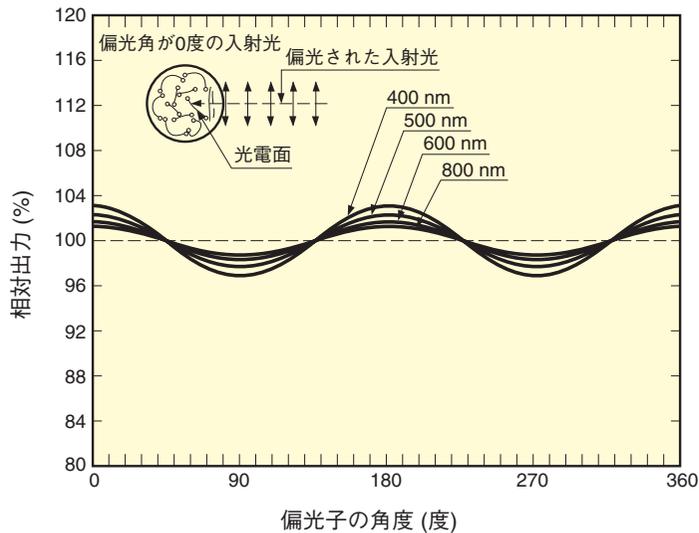
THEBV4\_0450.JA

図 4-50 偏光特性測定回路光学系

分光器からの単色光は $L_1$ (コリメータレンズ)により平行光となり、偏光子(P)で直線偏光化されます。そしてその光は $L_2$ (コンデンサレンズ)で集光され光電子増倍管に入射します。偏光特性は、偏光子の回転角に応じた光電子増倍管出力の変化を測定することにより得られます。

この場合、光源の偏光成分を除いておく必要があります。これには偏光子の前に磨りガラスなどの拡散板を入れる方法と、光電子増倍管を光軸に対して90度回転させ、0度と90度の2つの測定値から補償する方法があります。

このような測定法で得られた反射型光電面の光電子増倍管の偏光特性の例を図4-51に示します。原理的には、光電面に対し斜めに入射光が入った時、この特性が生じます。また、透過型光電面に垂直に入射させた時は偏光度Pの値はほとんどありません。



THEBV4\_0451.JA

図 4-51 反射型光電面の光電子増倍管の偏光性特性例

反射型光電面の光電子増倍管の場合、光電面が入射窓とある角度を持って配置されています。そのため通常の光入射では偏光特性が表れます。入射光が光電面に対し垂直に近くなるに従って偏光特性Pは小さくなっていきます。

アルカリアンチモン系の反射型光電面の光電子増倍管は偏光特性の対策を施してあるため3%以下と低くなっています。ただしGaAs光電面など単結晶をもつものは反射率が高いため、20%前後です。

偏光特性がどうしても無視できない場合には、光電子増倍管の直前に磨りガラスなどの拡散板を入れるか、光電子増倍管の入射窓を磨りガラス状にする方法で影響を軽減できます。

## 第4章 参考文献

- 1) 浜松ホトニクス(株)：光電子増倍管と関連製品
- 2) 和田正信：光電装置. 近代科学社(1970)
- 3) T.Hirohata and Y.Mizushima: Japanese Journal of Applied Physics. 29, 8, August, 1527(1990)
- 4) T.Hirohata, T.Ihara, M.Miyazaki, T.Suzuki and Y.Mizushima: Japanese Journal of Applied Physics. 28, 11, 2272(1989)
- 5) W.A.Parkhurst, S.Dallek, and B.F.Larrick, J.Electrochem.: Soc 131, 1739(1984)
- 6) S.Dallek, W.A.Parkhurst, and B.F.Larrick, J.Electrochem.: Soc 133, 2451(1986)
- 7) R.J.Cook: Phys. Rev. A25, 2164; 26, 2754(1982)
- 8) H.J.Kimble and L.Mandel: Phys. Rev. A30, 844(1984)
- 9) M.Miyao, T.Wada, T.Nitta and M.Hagino: Appl. Surf. Sci. 33/34, 364(1988)
- 10) Tailing Guo, J.Vac: Sci. Technol. A 7, 1563(1989)
- 11) Huairong Gao, J.Vac: Sci. Technol. A. 5, 1295(1987)
- 12) C.A.Sanford and N.C.MacDonald, J: Vac. Sci. Technol. B 6.2005(1988)
- 13) C.A.Sanford and N.C.MacDonald, J: Vac. Sci. Technol. B 7.1903(1989)
- 14) M.Domke, T.Mandle, C.Laubchat, M.Prietsch, and G.Kaindl: Surf. Sci. 189/190, 268(1987)
- 15) D.Rodway: Surf. Sci. 147, 103(1984)
- 16) M.Niigaki, T.Hirohata, T.Suzuki, H.Kan and T.Hiruma : Appl. Phys. Lett.71(17)27,Oct,1997
- 17) 中村公嗣, 久嶋浩之：応用物理 第67巻 第5号 (1998)
- 18) 作花済夫：ガラス非晶質の科学. 内田老鶴圃(1983)
- 19) 泉谷徹郎：新しいガラスとその物性. 経営システム研究所(1984)
- 20) 土橋正二：ガラスの化学. 講談社(1972)
- 21) 森谷太郎, 成瀬 省, 功刀雅長, 田代 仁：ガラス工学ハンドブック. 朝倉書店(1964)
- 22) 作花済夫, 境野照夫, 高橋克明：ガラスハンドブック. 朝倉書店(1984)
- 23) 電子機械工業会規格 ET-61A 1969.5.8
- 24) IEEE STD 398-1972
- 25) IEC PUBLICATION 306-4(1971)
- 26) 久米英浩, 木下勝之, 井尚登, 山崎：分光研究. 38, 5(1989)
- 27) 林 達郎：“PHOTOMULTIPLIER TUBES FOR USE IN HIGH ENERGY PHYSICS”  
浜松ホトニクス(株)：APPLICATION RES-0791-02
- 28) 浜松ホトニクス(株)：シンチレーション用光電子増倍管の使い方, No.77-50 Apr(1977)
- 29) T.H.Chiba and L.Mandel J: Opt.Soc.Am. B, 5, 1305(1988)
- 30) D.P.Jones: Appl.Opt. 15, 4(1976)
- 31) D.E.Persyk: IEEE Trans. Nucl. Sci. 38, 128(1991)

- 32) 松尾正之：電気工学基礎講座5電子回路. 朝倉書店
- 33) D.V.O'Connor, D.Phillips 平山 訳: ナノ・ピコ秒の蛍光測定と解析法. 108, 学会出版センター(1988)
- 34) G.F.Knoll: "RADIATION DETECTION and MEASUREMENT" John Wiley & Sons, Inc.(1979)  
木村, 阪井 共訳：放射線計測ハンドブック第2版. 285, 日刊工業新聞社(1991)
- 35) C.E.Miller et al: IEEE Trans. Nucl.Sci.NS-3, 91(1956)
- 36) 田中 他 共訳：微弱放射能測定技術. 40, コロナ社(1968)
- 37) 理化学辞典. 岩波書店
- 38) G.A.Morton et al: IEEE Trans.Nucl.Sci.NS-14 No.1, 443(1967)
- 39) R.Staubert et al: Nucl.Instrum. & Methods 84, 297(1970)
- 40) S.J.Hall et al: Nucl.Instrum. & Methods 112, 545(1973)
- 41) 浅井, 稲葉：画像技術 7月号. 15(1971)
- 42) 林 達郎：分光研究. 22, 4, 233(1973)
- 43) S.A.Hoenig and A.Cutler III: Appl.Opt.5, 6, 1091(1966)
- 44) H.Hora: Phys.Stat.Soli Vol(a), 159(1971)

メ 毛

## 第 5 章

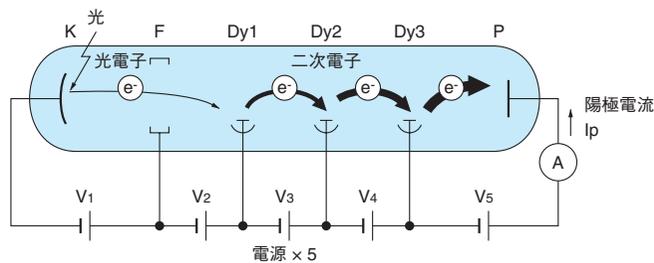
# 光電子増倍管のデバイダ回路およびアクセサリ

この章では、実際に光電子増倍管を正しく動作させるための基本回路と必要なアクセサリについてその使い方<sup>1)</sup>の説明をします。

## 5.1 デバイダ（電圧分割）回路

### 5.1.1 デバイダ回路の基礎

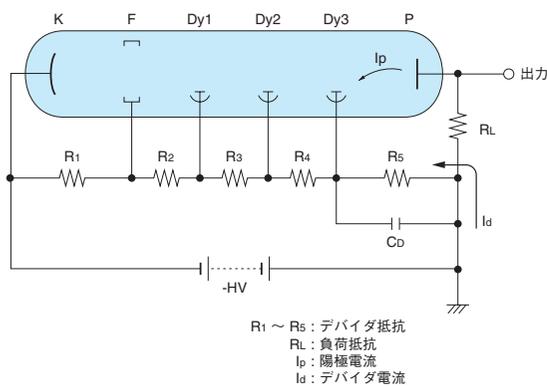
光電子増倍管を動作させるためには、光電面（陰極、カソード/K）と、陽極（アノードまたはプレート/P）との間に、通常500 V ~ 3000 V程度の高電圧を供給するとともに、光電子収束電極（フォーカス/F またはグリッド/G）、10 段前後の二次電子増倍電極（ダイノード/Dy）、さらに品種によっては加速電極（アクセラレータ/Acc）等の各電極に、段階的に電圧を供給する必要があります。図5-1に光電子増倍管の動作概念を示しますが、このような複数の独立電源を使用する代わりにひとつの高圧電源出力を抵抗により分割するデバイダ回路を用います。



THBV4\_0501JA

図 5-1 光電子増倍管の動作概念図

実際には図5-2に示すように、陰極と陽極の間を複数の抵抗（100 kΩ ~ 1 MΩ）により高電圧を分圧して、各電極に規定の電圧を与える方法がとられます。また、デバイダ抵抗以外に一部トランジスタやツェナーダイオードを含めて分圧を作る方法もあります。これらの回路を電圧分割回路(Voltage Divider Circuit)、一般的にはデバイダ回路と呼んでいます。標準的な光電子増倍管のデバイダ回路は、それぞれの光電子増倍管に適した分割比を採用します。



THBV4\_0502JA

図 5-2 デバイダ回路例（陽極接地型）

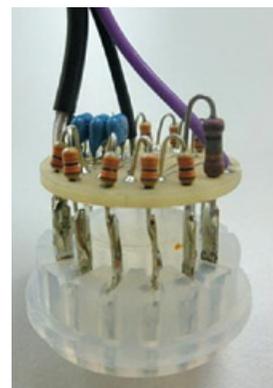


図 5-3 光電子増倍管用デバイダの例

図5-2回路中の $I_d$ はデバイダ回路を流れる電流でデバイダ電流と呼ばれ、後述のリニアリティ特性と深い関係があります。 $I_d$ は供給電圧 $V$  (= -HV) をデバイダ抵抗の和で割った値すなわち次式(5-1)で表します。

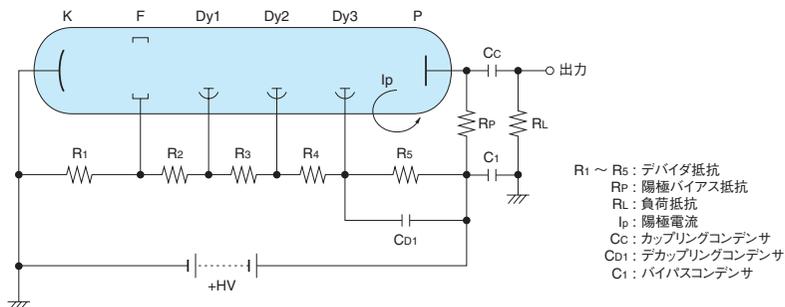
$$I_d = \frac{V}{(R_1+R_2+R_3+R_4+R_5)} \quad \dots\dots\dots \text{式 5-1}$$

## 5.1.2 陽極側接地と陰極側接地

一般的には電流計や、電流・電圧変換用の演算増幅器 (オペアンプ) 回路をはじめとする外部回路と光電子増倍管の陽極との電位差をなくして接続を容易にするため、図5-2のように陽極側を接地して陰極に負高電圧(-HV)を供給する方法をとります。この方法は直流・パルス両モードの信号出力が得られ、多くの用途に採用されています。

しかし、この方法において、光電子増倍管の側管に接地電位の金属製ホルダやハウジング、磁気シールドケースなどを接近させたり接触させたりした場合には、光電子増倍管内部の電子がガラス管 (バルブ) 周囲の接地電位に引き寄せられ、ガラス側管内壁に衝突して発光し雑音を著しく増加させることがあります。またヘッドオン型の光電子増倍管の場合、陰極付近の側管あるいは面板を接地すると、ガラスのわずかな導電性のために陰極と接地の間に微小電流が流れて光電面が電気的な変化を受け、著しい劣化を招く危険性があります。このためハウジングの設計や、電磁シールドケースの使用には細心の注意が必要です。上記の理由により、接地電位の電磁シールドケース内に光電子増倍管を固定する目的で、側管周りにソフトテープなどの緩衝材を巻く場合でも、絶縁性の優れたものを選択することが非常に大切です。

以上の問題は側管周りに黒色導電性塗料を塗布して陰極電位に接続し、さらに安全のために絶縁被覆を施した「HA処理 (HA TREATMENT)」により解決します。しかしフォトンカウンティング法 (光子計数法) や、シンチレーションカウンティングの用法においては接地されたシンチレータを光電子増倍管の面板と密着させて使用するため、図5-4のような陰極側接地 (正高電圧供給方式) が多く採用されます。その場合には陽極に供給されている正高電圧(+HV)と信号とを分離するカップリングコンデンサ( $C_c$ )を使用するため、直流信号を取り出すことはできなくなり、パルス出力専用となります。この回路では、シンチレーションカウンティングなどで計数率が高くなった場合には、ベースラインシフトの問題が生じたり、カップリングコンデンサに漏洩電流があると雑音を発生させたりするため、注意が必要です。



THBV4\_0504JA

図 5-4 陰極側接地型デバイダ回路

なお、図5-4（陰極接地型デバイダ回路）における $R_p$ は、 $Dy_3$ からの放出された二次電子を陽極に収集するための電位を与える抵抗となり、 $R_L$ が負荷抵抗となります。陽極から見た実際の負荷抵抗は $R_p$ と $R_L$ の合成値となります。

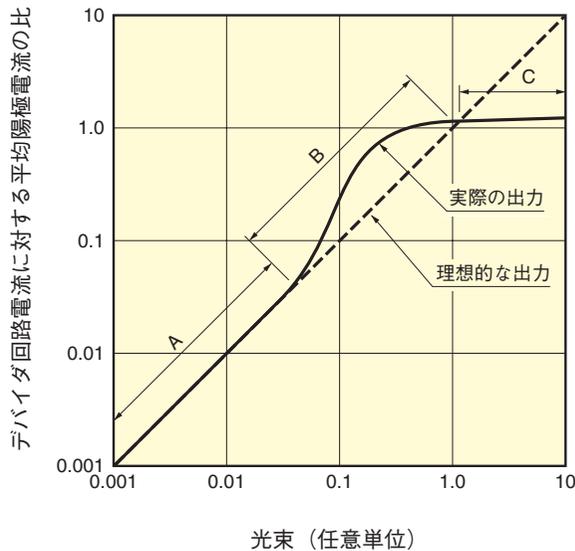
$$\text{実際の負荷抵抗値} = \frac{R_p \times R_L}{R_p + R_L}$$

（厳密には、信号周波数や $C_c$ 、配線インダクタンスなど回路中のインピーダンスを含めた考慮が必要ですが、簡易的にはこれらを無視できます。）

### 5.1.3 デバイダ電流とリニアリティ

光電子増倍管の陽極側・陰極側いずれの接地法においても、また直流・パルスいずれの出力モードにおいても、入射光量と出力の比例関係（リニアリティまたは直線性）は、ある入射光量レベル以上では理想的なリニアリティが保たれなくなります。

図5-5においてAは良好なリニアリティが保たれている範囲、Bは理想状態より出力が大きくなるオーバーリニアリティと呼ばれる範囲、そしてCは飽和部で理想状態より出力が小さくなる範囲です。測光精度を要求する場合には、最大出力電流はAの範囲に制限されます。また、下限は光電子増倍管の暗電流やノイズ、および外部回路系のリーク電流やノイズにより制限されます。



THBV4\_0505JA

図 5-5 光電子増倍管のリニアリティとデバイダ回路電流の関係

はじめに、光電子増倍管の直流出力モードの概念を説明します。分かり易くするため、モデルとして簡略化された3個のダイノードを有する光電子増倍管を用い、4つのデバイダ抵抗 $R_n$ はすべて等しいものとします。

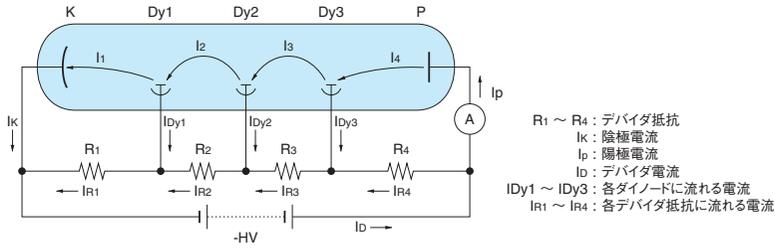


図 5-6 光電子増倍管とデバイダ回路の電流の流れ

THBV4\_0506JA

まず、光電子増倍管に光入力のない場合を示します。

光電子増倍管に高電圧を供給し、光入力のない無信号動作状態において、光電子増倍管の暗電流を無視した場合、図5-6の回路中を流れる電流のみを図5-7に示します。図中、各部の電流および電圧は以下ようになります。

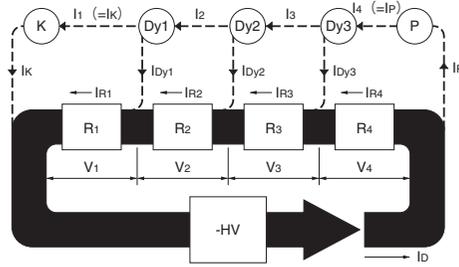


図 5-7 光入力のない場合の動作

THBV4\_0507JA

光電子増倍管内各部の電極間電流

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 (= 0 \text{ A})$$

光電子増倍管電極電流

$$I_K = I_{Dy1} = I_{Dy2} = I_{Dy3} = I_P (= 0 \text{ A})$$

デバイダ回路各部の電流

$$I_{R1} = I_{R2} = I_{R3} = I_{R4} = I_D = (HV / \sum_{n=1}^4 R_n)$$

デバイダ回路各部の電圧

$$V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = I_D \cdot R_n (= HV/4)$$

続いて、光電子増倍管に光入力のある場合を示します。

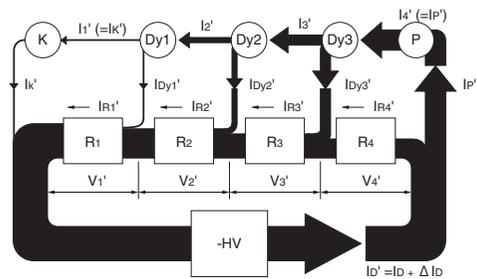


図 5-8 光入力のある場合の動作

THBV4\_0508JA

図5-7の状態から光電子増倍管に光入力を与えて光電流が流れている状態は、便宜上図5-8のように考えることができます。ここでは動作時の電流・電圧等の略号には無信号動作時と区別するため、すべて「'」を付けて表しています。無信号動作時に $I_D$ であったデバイダ回路電流は、光電子増倍管内部に電流が流れることにより、 $\Delta I_D$ （光電子増倍管内部に流れる平均電極間電流に等しい）が加算されて $I_D'$ となります。ただし、光電子増倍管のリニアリティが良好な範囲（図5-5のA分部分）においては、 $\Delta I_D$ は $I_D$ に対して微小であり、デバイダ電流が純粋に光電子増倍管内部電流に分流すると見なしても構いません。続けてデバイダ回路と光電子増倍管内の状態をみると、各電極間に挿入されているデバイダ抵抗 $R_n$ に流れる電流 $IR_n'$ は以下のようになります。

$$IR_n' = I_D' - I_n'$$

ここで、光電子増倍管内に分流する電極間電流 $I_n'$ は

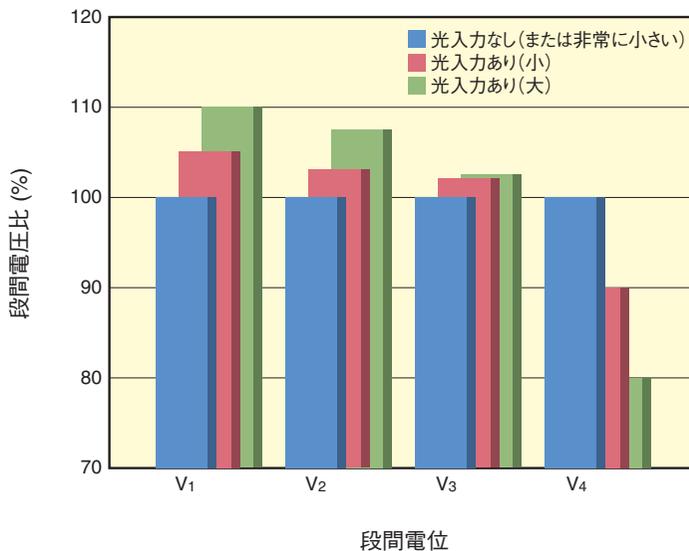
$$I_1' < I_2' < I_3' < I_4'$$

であるため、電極間電圧 $V_n'$ （ $= IR_n' \cdot R_n$ ）は

$$V_1' > V_2' > V_3' > V_4'$$

のように初段から終段に向かって小さくなります。

この状態を図5-9に示しますが、無信号動作時の $V_4$ と比較して動作時の $V_4'$ は減少します。一方、その減少分は他の電極間に分配され、結果として $V_1'$ 、 $V_2'$ 、 $V_3'$ は無信号動作時よりも増加することになります。 $V_4'$ は最終ダイノードから放出された二次電子を陽極に収集するためのみに必要で、20 V ~ 30 Vまで低下しても陽極電流にはほとんど影響を与えません。一方、 $V_1'$ 、 $V_2'$ 、 $V_3'$ の増加は直接 $Dy_1$ 、 $Dy_2$ 、 $Dy_3$ の二次電子放出比（ $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 、 $\delta_3$ ）を上昇させ、総合的なゲイン $\mu$ （ $= \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \delta_3$ ）を増大させます。これが図5-5のB部に生じるオーバーリニアリティの原因です。さらに入射光量が増加して $V_4'$ が0 Vに近づくにつれ、陽極への二次電子収集効率が大きく低下するため、C部分の飽和が生じます。



(段間電圧比は光入力がない場合での段間電位を100%としています)

図 5-9 光入力による段間電圧の変化

### (1) 直流出力モードのリニアリティを実現するためのデバイダ回路

前述の光電子増倍管への光入力による段間電圧の変化に対して、直流出力モードでのリニアリティを改善するためには、光電流が流れた場合の段間電圧変化を最小にすればよいことがわかります。光電子増倍管の種類およびデバイダ回路によっても異なりますが、直流出力を得る場合、一般的に出力電流の実用最大値はデバイダ電流の1/20～1/50とされています。±1%以内のリニアリティが必要であれば、最大出力はデバイダ電流の1/100以下に抑えなければなりません。

この方策を含め、具体的にはいくつかの方法があります。

#### ① デバイダ電流を増やす

図5-10にφ28 mmサイドオン型光電子増倍管のリニアリティと、陽極電流のデバイダ電流に対する比の関係を示します。例えば誤差1%の出力を求める場合、同図からリニアリティを保つことのできる陽極電流の上限は、デバイダ電流の1.4%程度までに抑える必要があることがわかります。ただし、この関係は計算上のものであり、たとえ同種類の光電子増倍管であっても、供給電圧やダイノードゲインの個体差等によって特性は異なります。確実に測光精度を確保するためには、デバイダ電流は同図で求めた値の2倍以上にする必要があります。

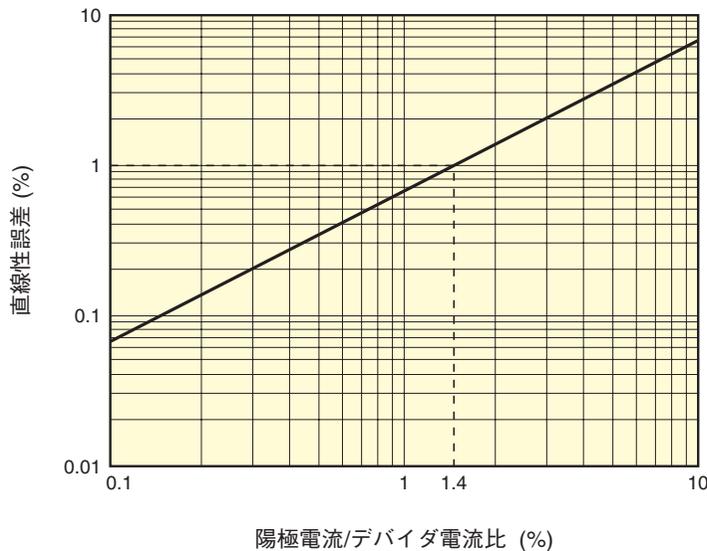


図 5-10 陽極電流とデバイダ電流比に対するリニアリティ

THBV4\_0510JA

良好なりニアリティを得るためには、単純にはデバイダ電流を増やせばよいことになります。しかし、それは消費電力を大きくし高圧電源の出力電流不足などを招いてしまいます。また消費電力の増加はデバイダ回路の発熱を伴い、この熱が光電子増倍管に伝達された場合には、暗電流の増加や出力安定度の低下をもたらす恐れがあり注意が必要です。

## ②アクティブ型デバイダ回路を使用する

終段（陽極）付近のデバイダ抵抗数個をトランジスタに置き換えたアクティブ型デバイダ回路を使用すれば、トランジスタの特性を利用することにより、電極間電圧は光電子増倍管内部の電極間電流の影響を受けず、デバイダ電流の60%～70%程度まで良好なリニアリティを得ることができます。図5-11に基本回路を示します。

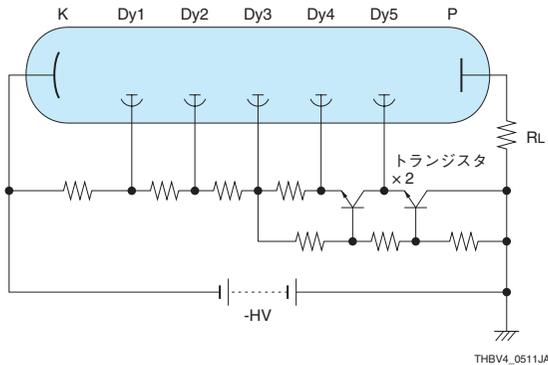


図 5-11 アクティブ型デバイダ回路



図 5-12 アクティブ型デバイダ回路の例

図5-11の回路において、トランジスタのエミッタはダイノードと接続されています。ここでトランジスタのエミッタはベースより僅かに低い電位（概ね0.6 V程度）となる特性があるため、エミッタに接続されたダイノード電位はベース電位によって定まることになります。このことから、各トランジスタのベース電位をベース側に設けた抵抗により設定することでトランジスタに接続した各ダイノードの電位を決めることができます。この場合のベース電位あるいはダイノード電位は、トランジスタのコレクターエミッタ間電流が変わっても、言い換えると光電子増倍管の中を流れる電流が変化してもその影響を受けず、電位は安定しており、光電子増倍管のリニアリティを効果的に得ることができます。

実際にアクティブ型デバイダ回路を構成する場合は、光電子増倍管内の電流の変化量が大きい終段から数段（2段から4段程度）にトランジスタを配置するのが効果的です。

また、使用するトランジスタには以下の考慮が必要です。

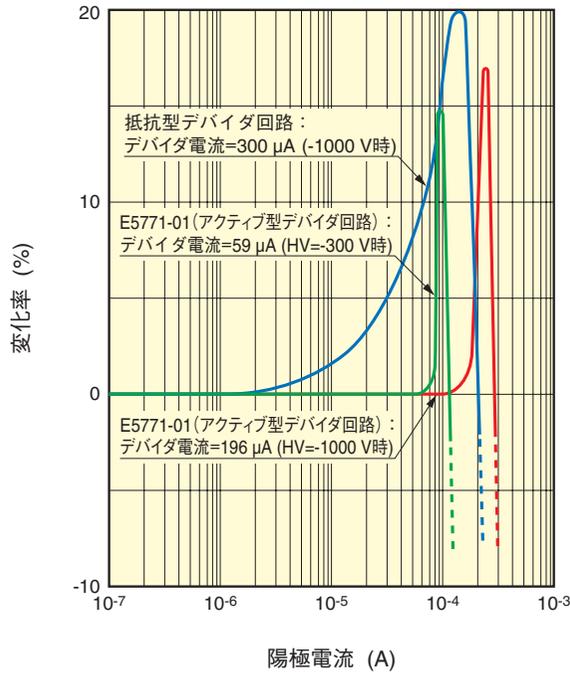
- ・電流増幅が大きく、実際に掛かる光電子増倍管の段間電圧に対して、コレクターエミッタ間の定格電圧が十分ディレーティングが取れるものとします。
- ・直流電流増幅率 $h_{fe}$ が大きく、コレクタに十分な電流を流せるトランジスタを選択します。
- ・周波数特性の良好なトランジスタを選択します。
- ・トランジスタを使用する段数は光電子増倍管の使用条件を考慮して決定します。
- ・必要に応じて、トランジスタのベース・エミッタ間の逆バイアス保護をダイオードなどで行います。

図5-13にアクティブ型デバイダ回路のリニアリティを示します。

アクティブ型デバイダ回路は抵抗型デバイダ回路と比較すると、同じ電力を供給した場合、すなわち同じデバイダ電流を流した場合には、陽極出力に関して高いリニアリティを得ることができ、効率が良いと言えます。

ただし、陽極出力電流がデバイダ電流に近づいた際にはデバイダ回路が飽和した状態となり、抵抗型デバイダ回路の場合より急峻な出力変化（ゲインジャンプ）となる変動が現れるため、この変化を起こす部分では注意が必要です。

なお、浜松ホトニクス製の主なアクティブ型デバイダ回路を採用した製品は、一般的な光電子増倍管を定格電圧で動作させた場合、平均陽極電流の最大定格である100  $\mu\text{A}$ まで安定した出力が得られるように設定されています。

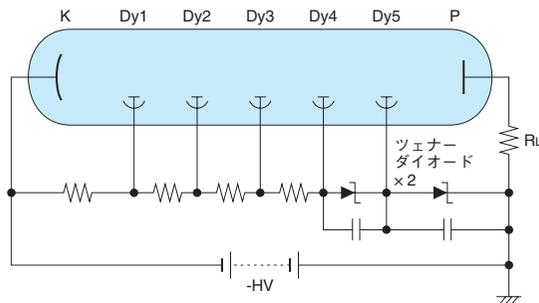


THBV4\_0513JA

図 5-13 アクティブ型デバイダ回路のリニアリティ

### ③ ツェナーダイオードを使用する

陽極付近のデバイダ抵抗数個をツェナーダイオード (定電圧ダイオード) に置き換えることにより、電極間の電圧を安定させ、リニアリティを向上させることができます。ただし、供給電圧を大幅に変化させた場合には、他の電極間電圧との間に電圧配分比のバランスを崩しますので、実際には電圧可変範囲は制限されます。また、供給電圧を低下させたり、陽極電流が増加してツェナーダイオードを流れる電流が不足した場合などには、ツェナーノイズを発生する恐れもあります。このため、デバイダ電流を十分大きくとることや、ツェナーダイオードと並列に雑音吸収用のコンデンサを接続します。その上で、後続の信号処理回路の帯域を必要最小限に狭めるなどの対応も必要となります。図5-14に回路例を示します。



THBV4\_0514JA

図 5-14 ツェナーダイオードを使用したデバイダ回路

## ④コッククロフト・ウォルトン回路を使用する

図5-15のようなコッククロフト・ウォルトン (Cockcroft-Walton Voltage Multiplier、あるいはCW)回路を使用した場合も、良好なリニアリティを得ることができます。

コッククロフト・ウォルトン回路はダイオードを直列に接続し、その接続点の一つおきに、それぞれの側にコンデンサを一つ一つ直列に積み重ねています。このような構成とすることにより、各ダイノード接続点に基準電圧を $V$ とすると $V$ 、 $2V$ 、 $3V$ …の電位を与えることができる電圧昇圧回路 (倍圧回路) となります。この回路は抵抗型デバイダ回路の電圧分割としての役割を兼ね備えた上、抵抗などと比べ熱損失の少ない部品で構成されるため、非常に消費電力が低く、電池もしくはバッテリー駆動などにも適した回路です。また発振回路に低電圧を供給することにより高電圧を発生しますので、高圧電源を別途用意する必要はなく、光電子増倍管を使用したモジュールの小型化に有効な手段と言えます。

注意する点として、整数倍で昇圧する回路構成であるため、整数比でない電圧分割比 (デバイダレシオ) への対応は難しくなります。また、発振回路を内蔵しているため、発振回路のノイズが陽極出力へ誘導されないよう配慮が必要です。

なおコッククロフト・ウォルトン回路に関しては、その応用を第8章8.2で詳しく述べます。

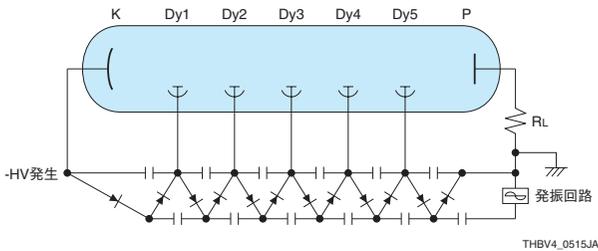


図 5-15 コッククロフト・ウォルトン回路

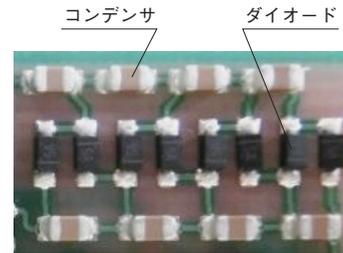


図 5-16 CW回路の実装例

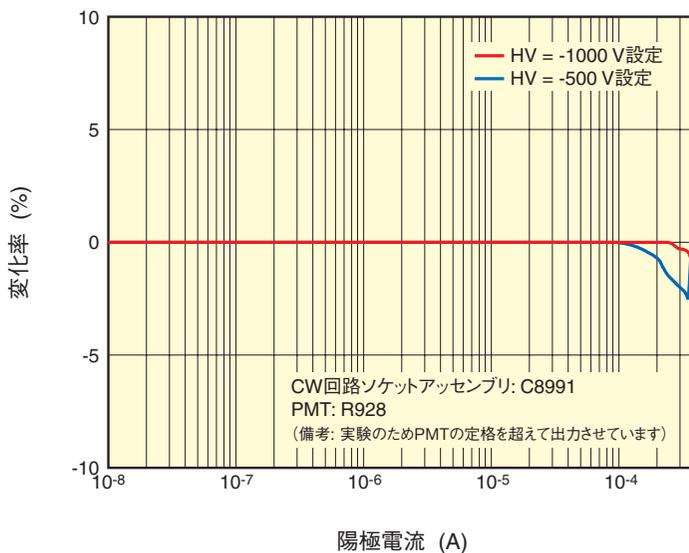


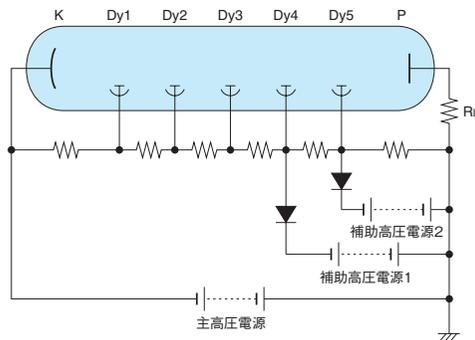
図 5-17 コッククロフト・ウォルトン回路のリニアリティ

### ⑤複数の高圧電源を使用する

これは図5-18に示すように陽極付近のダイノード数段に外部の別電源（補助高圧電源）から直接電圧を供給する方法です。ブースタ方式とも呼ばれ、適用例として高エネルギー物理学実験等の高パルス・高カウントレート用途が挙げられます。

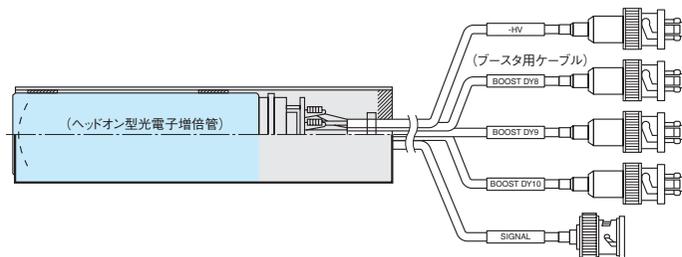
光電子増倍管内で大きな電流供給が必要となるダイノードに直接電圧を与えた上で電流供給することで、陽極出力電流が大きくなって抵抗型デバイダ回路のような段間電圧変化を引き起こすことなく電圧分割比を正常に保つことができます。さらに直接電源に接続されたダイノードに対して十分な電流供給ができるため、良好なリニアリティを得られます。

一方、複数の電源を用いることから、光電子増倍管のゲイン調整を行うために全体の高電圧供給を可変する場合には、主高圧電源だけではなく、ブースタ用の補助高圧電源の調整が必要となります。また、ブースタ用電源に対しては電流の流れ込み防止などの配慮も必要です。図5-19に終段から3段にかけて補助高圧電源を接続できるようにしたアッセムブリの例を示します。



THEV4\_0518JA

図 5-18 複数高圧電源方式（ブースタ方式）



THEV4\_0519JA

図 5-19 ブースタ方式デバイダ搭載の光電子増倍管アッセムブリ

### ⑥ハイリニアリティアクティブ型デバイダ回路を使用する

ハイリニアリティアクティブ型デバイダ回路は、②のトランジスタを用いたアクティブ型デバイダ回路をさらに特性向上させたデバイダ回路です。半導体を使用し、すべてのダイノード電位を安定化させることで、デバイダ電流による光電子増倍管の出力電流の制約がなくなり、光電子増倍管本来の性能を十分に発揮できるようになります。良好なリニアリティ特性を備えながら、デバイダ回路の低消費電力化も実現しています。また、入射光が大きくなり陽極電流が増えても、ダイノード電位の変動がほとんどなく、抵抗型デバイダ回路などで発生するオーバーリニアリティの現象は全く現れません（図5-21参照）。さらに、常時デバイダ回路に流れる電流がほとんどなくなり、陽極出力に応じたデバイダ電流だけが流れるようになります。このため、デバイダ回路の発熱は最小限に抑えられ、暗電流増加の要因が減ります。

陽極出力に応じて、デバイダ電流が変わりますので、使用する高圧電源は安定度が求められます。この方式のデバイダ回路を用いたソケットアッセンブリとしてE12788、推奨する高圧電源としてC12789があります。



ハイリニアリティアクティブ型デバイダ回路搭載  
ソケットアッセンブリ E12788



ハイリニアリティアクティブ型デバイダ回路用  
高圧電源 C12789

図 5-20 ハイリニアリティアクティブ型デバイダ回路搭載ソケットアッセンブリと推奨高圧電源

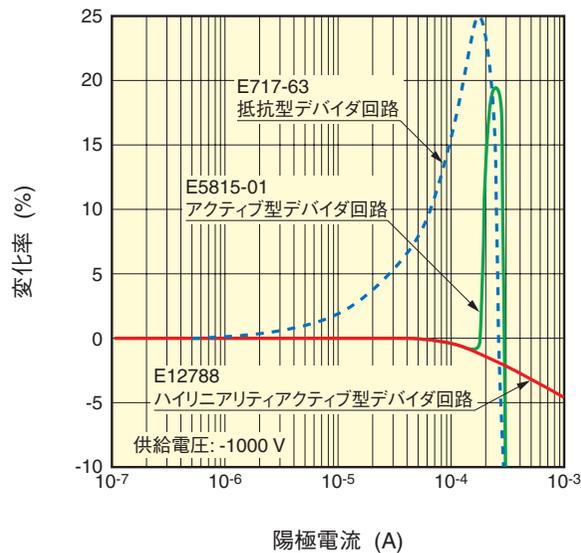


図 5-21 ハイリニアリティアクティブ型デバイダ回路のリニアリティ

## (2) パルス出力モードのリニアリティとその改善策

シンチレーションカウンティングのように光電子増倍管への入力光がパルス状の場合、カウントレートが低く平均陽極電流として低くても、ひとつひとつのパルスはピーク値が数mAから数十mAにも達する場合があります。このようなパルス出力モードにおいては、極端な場合、ピーク電流値はデバイダ電流値の数倍以上にも達します。この時、光電子増倍管内部の陽極付近では、デバイダ回路から十分な電極間電流を供給することができず、リニアリティが保てなくなります。

このような大きなパルス信号時でもリニアリティを保つことのできる対策があり、その回路方式を示します。

デカップリングコンデンサによるパルスリニアリティの改善

前述のブースタ方式を採用することでも、パルス信号に対してダイノードへの十分な電流供給ができ、パルス出力信号のリニアリティは保つことができますが、回路部の大きさやコストの面で使いやすいものではありません。通常は陽極から数段のダイノードに対してデカップリングコンデンサを接続して、信号パルスの形成中に光電子増倍管に電極間電流を補給し、陽極付近の各ダイノード間と最終ダイノードと陽極間の電圧降下を抑制します。

デカップリングコンデンサの接続法には直列法 (図5-22) と並列法 (図5-23) とがありますが、コンデンサの耐圧の関係から直列法が広く採用されています。

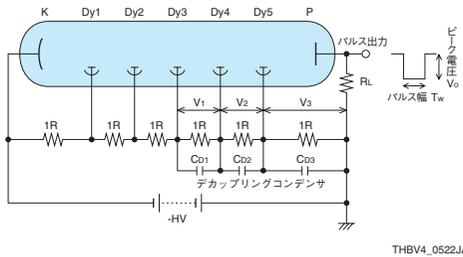


図 5-22 直列にデカップリングコンデンサを追加したデバイダ回路

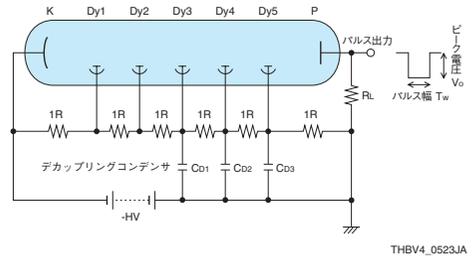


図 5-23 並列にデカップリングコンデンサを追加したデバイダ回路

ここで図5-22の回路を例にとり、コンデンサの値を求める手順を以下に述べます。

まず必要とするパルス出力のピーク電圧を $V_0$ 、パルス幅を $T_w$ 、負荷抵抗を $R_L$ とすると、1回当たりの出力パルス電荷量 $Q_0$ (クーロン)は次式(5-2)<sup>2)</sup>で表します。

$$Q_0 = T_w \frac{V_0}{R_L} \dots\dots\dots (式 5-2)$$

ここで $Q_0$ を使ってデカップリングコンデンサ $C_{D1} \sim C_{D3}$ の容量 (F/ファラッド) を求めてみることにします。

$C_{D3}$ に蓄えられる電荷量を $Q_3$ とすると、 $\pm 3\%$ 以内のリニアリティを期待するためには一般的に

$$Q_3 \geq 100 Q_0 \dots\dots\dots (式 5-3)$$

の関係が成立する必要があるとあり、 $V_3$ を $C_{D3}$ の両端電圧としたとき、 $Q=CV$ の関係から $C_{D3}$ は次式(5-4)で表されます。

$$C_{D3} \geq 100 \frac{Q_0}{V_3} \dots\dots\dots (式 5-4)$$

次に $C_{D1}$ 、 $C_{D2}$ の計算をします。

光電子増倍管のダイノード1段当たりの二次電子放出比 $\delta$ は段間電圧を100 Vした場合には通常3~5ですが、段間電圧が70 V~80 Vに下がる場合も考慮して、ここでは各ダイノード間の $\delta$ を2として計算すると、 $C_{D2}$ 、 $C_{D1}$ に蓄えられる電荷量 $Q_2$ 、 $Q_1$ は、

$$Q_2 = \frac{Q_3}{2} \quad Q_1 = \frac{Q_2}{2} = \frac{Q_3}{4}$$

となり、 $C_{D2}$ 、 $C_{D1}$ の容量は $C_{D3}$ の場合と同様に次のとおり求められます。

$$C_{D2} \geq 50 \frac{Q_0}{V_2}$$

$$C_{D1} \geq 25 \frac{Q_0}{V_1}$$

( $V_2$ 、 $V_1$ はそれぞれ $C_{D2}$ 、 $C_{D1}$ の両端電圧)

さらに大電流出力を取り、 $Dy3$ 以前の段にもデカップリングコンデンサを挿入する必要がある場合にも同様の計算を継続すればよいです。

ここで一例として、出力パルスのピーク電圧 $V_0=50$  mV、パルス幅 $T_w=1$   $\mu$ s、負荷抵抗 $R_L=50$   $\Omega$ 、段間電圧 $V_3$ 、 $V_2$ 、 $V_1$ をそれぞれ100 Vとして各コンデンサの値を求めてみます。まず出力パルス1個当りの電荷量は次のように求められます。

$$Q_0 \geq \frac{50 \text{ mV}}{50 \Omega} \times 1 \mu\text{s} = 1 \text{ nC}$$

デカップリングコンデンサ $C_{D3}$ 、 $C_{D2}$ 、 $C_{D1}$ に必要な値はそれぞれ次のように計算されます。

$$C_{D3} \geq 100 \cdot \frac{1 \text{ nC}}{100 \text{ V}} = 1 \text{ nF}$$

$$C_{D2} \geq 50 \cdot \frac{1 \text{ nC}}{100 \text{ V}} = 0.5 \text{ nF}$$

$$C_{D1} \geq 25 \cdot \frac{1 \text{ nC}}{100 \text{ V}} = 0.25 \text{ nF}$$

上記のコンデンサの容量は最低限必要な値で、一般的にはこの10倍ぐらい高い容量のものを使い余裕を持った設計をするのが望ましいです。また、出力パルス電流がさらに大きくなる場合には、 $C_{D1} \sim C_{D3}$ の値を大きくするとともに、必要に応じてデカップリングコンデンサを接続する電極間を増やさなくてはなりません。

この方法であっても、カウントレートが高くデューティ比が大きくなり、平均陽極電流として無視できなくなった場合には、デバイダ電流は直流出力モードと同様に平均陽極電流の数十倍以上に保つ必要があります。このためアクティブ型デバイダ回路やブースタ方式は、高デューティ比におけるパルスリニアリティに対しても効果が見込めます。

図5-24にパルスリニアリティを重視したアッセムブリの例を示します。図5-23のようにデバイダ回路の終段から中段にかけてGNDに対し、セラミックコンデンサを搭載させています。



図5-24 パルスリニアリティ対策を施した光電子増倍管アッセムブリ

なおデカップリングコンデンサを付加しても、第4章で述べた光電子増倍管内のダイノードの空間電荷による飽和の場合には、パルスリニアリティの悪化を防げません。

こちらについての対策は、次の5.1.4デバイダ回路の電圧分割比にて述べます。

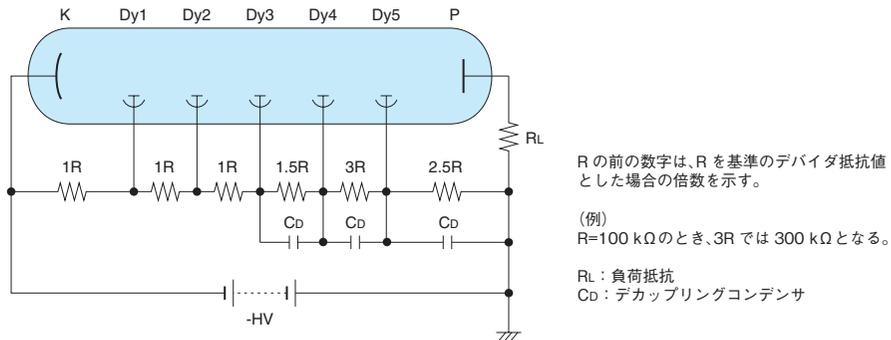
### 5.1.4 デバイダ回路の電圧配分

#### (1) 陽極および後段の電圧配分

デカップリングコンデンサを使用してパルス出力のリニアリティ対策を十分に施した状態でも、電子増倍部の段間電圧を固定したままパルス入射光量を増加していくと、ある値で出力の飽和が生じます。これは電極間の電子密度が増大して空間電荷の影響が現われ、電子流が妨げられるためです。この飽和電流値は特に光電子増倍管の終段付近のダイノードと陽極の電極構造、および電極間の供給電圧によって異なります。この影響に対しては、電子密度の高くなる陽極側（後段）の2～4段の電圧を標準電圧配分より高くなるように設定して電極間の電位勾配を高め、より大きな電荷量を扱えるようにして空間電荷の影響に打ち勝つようにする対策が必要となります。一般的には陰極側の前段から後段に向かって段間電圧を上げていく、「テーパデバイダ」を採用しています。

テーパデバイダにより大きなパルス電流を出力できるようになりますが、その場合はデバイダレシオ（電圧分割比）の変更によるゲインの低下や収集効率の変化、および電極間の耐圧に対する注意が必要となります。

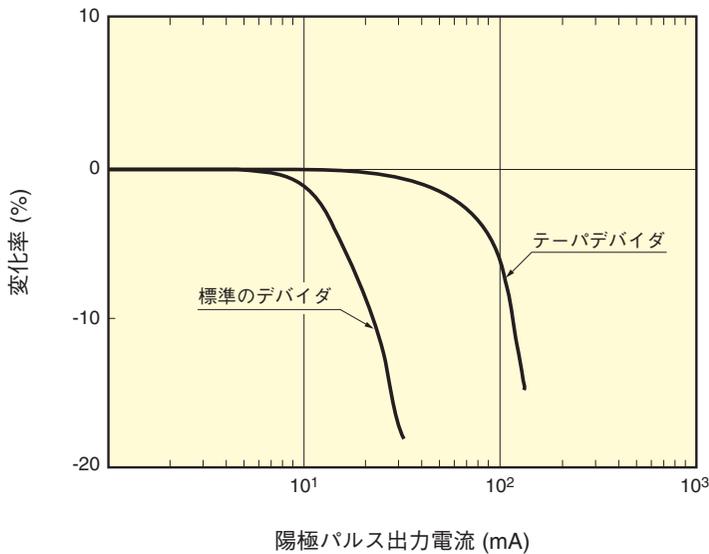
ダイノード5段タイプの光電子増倍管を使ったテーパデバイダの例を図5-25に示します。前段に対し後段の段間電圧を高めるようデバイダレシオを大きくしていますが、Dy5-P（陽極）間の電圧に関してはDy4-Dy5間の電圧より低くしてあります。その理由は最終ダイノード—陽極間は光電子増倍管の収集電極部としての構造から電極間が狭いことが多く、比較的低電圧でも放出された二次電子を陽極に収集し十分な電位勾配が得られるためです。



THBV4\_0525JA

図 5-25 デカップリングコンデンサとテーパデバイダによるパルスリニアリティ対策

最適なりニアリティ特性の得られるデバイダレシオは、光電子増倍管の種類によって異なります。高エネルギー物理学用には高いパルス出力を要求される場合が多いため、浜松ホトニクスの高エネルギー用光電子増倍管カタログには推奨のデバイダレシオ(テーパデバイダ用)と最大出力電流値が記載されています。これらに基づいたテーパデバイダを用いると、標準のデバイダ(標準分割比としたデバイダ)と比べ5倍～10倍リニアリティ特性が向上します。図5-26はテーパデバイダと標準のデバイダでパルスリニアリティ特性を測定したものです。テーパデバイダを使用することによっておよそ10倍パルスリニアリティ特性が改善されていることがわかります。ただし、テーパデバイダを使うと標準のデバイダと比べてゲインが1/3～1/5前後に下がるため、供給電圧を上げるように調節する必要があります。



THBV4\_0526JA

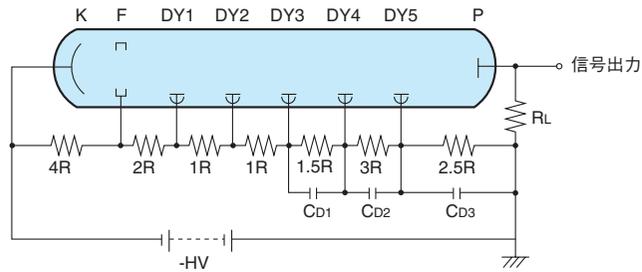
図 5-26 テーパデバイダを用いたパルスリニアリティ特性

なお、以上のデカップリングコンデンサおよびテーパデバイダによるパルスリニアリティ対策は、陰極側接地型デバイダにも同様に適用できます。

## (2) 陰極および前段の電圧配分

前項に述べたように後段および陽極付近の電圧分割比はリニアリティ特性を左右する重要なものです。これに対し、陰極から集束電極および第1ダイノードまでの電圧配分は、光電子の収集効率と第1ダイノードの二次電子放出比に影響を与えます。これらは出力のSN比、シングルフォトン、およびマルチフォトン領域での出力パルス波高の分散、電子走行時間拡がり(T.T.S.)などを左右する要因となります。その他にも前段の電圧配分は陰極リニアリティ、シンチレーションカウンティングにおいてのエネルギー分解能、磁気特性などに影響を及ぼすため、後段の電圧配分と同様、その設定には十分な注意を払わなければなりません。特別なものを除きカタログに記載されているダイノード前段の電圧分割比は、収集効率、時間特性、SN比を考慮して決められていますが、これは定格電圧を供給した場合を基準にしています。そのため供給電圧が定格電圧の1/2以下になる時などは、前段の電圧分割比を上げたり、ツェナーダイオードを挿入し定電圧を加えるなどの工夫が必要となる場合があります。なお、収集効率、出力のSN比、その他の諸特性については第4章に詳しく述べられていますので、そちらを参照してください。

図5-25に示したテーパデバイダをもとに、陰極から第1ダイノードまで前述の対策を施した回路の一例を図5-27に示します。



THBV4\_0527JA

図 5-27 前段および後段をテーパとしたデバイダ回路

光電子増倍管のカタログに記載の推奨電圧分割比は、幅広い用途に適応可能なゲインを重視したものです。これに対し、高いピーク出力電流となるパルス動作モードの場合や供給電圧が標準値より低い場合などでは、測定条件に合わせたデバイダ分割比を選択します。

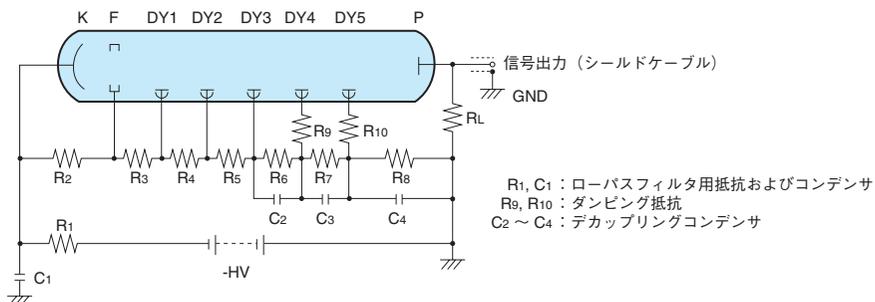
例えば、シングルフォトンカウンティング（単一光子計数法）やショットノイズが問題となるような極微弱光の測定では、デバイダ回路前段の電圧配分比を上げることで、光電子増倍管の収集効率を高めるとともにショットノイズの低減する効果が期待できます。

また、時間特性が重要な飛行時間計測(TOF)、蛍光寿命計測などの用途については、陰極、集束電極、第1ダイノード付近に対して精密に設計された電子レンズ系に適正な電圧を供給することが重要です。

### 5.1.5 高速応答性を重視する対策

光電子増倍管は原理的に極めて応答速度の速い光検出器です。この特性を生かすためには、デバイダ回路を含めた高速信号の取り扱いに配慮します。

高速信号において外来雑音（ノイズ）はSN比の悪化の大きな要因となるので、高電圧供給ラインの雑音対策が必要です。図5-28に示したデバイダ回路では、抵抗 $R_1$ およびコンデンサ $C_1$ よりなるローパスフィルタを形成し高電圧供給ラインからの雑音を軽減しています。通常、 $R_1$ には数十 $k\Omega$ の金属皮膜抵抗、 $C_1$ には $0.001\mu\text{F} \sim 0.05\mu\text{F}$ の高耐圧セラミックコンデンサを使用します。



THBV4\_0528JA

図 5-28 高電圧電源の雑音対策および信号出力のリングング対策を施したデバイダ回路

ローパスフィルタ回路のカットオフ周波数 ( $f_c$ : 損失3 dB時) は次式で表されます。

$$f_c = \frac{1}{2\pi \cdot R_1 \cdot C_1} \text{ (Hz)} \dots\dots\dots \text{(式 5-5)}$$

ここで、 $R_1$ は抵抗値 ( $\Omega$ )、 $C_1$ はコンデンサ容量 (F)

算出されたカットオフ周波数以上で損失が大きくなり、前述の定数を用いれば、数十kHz以下となるローパスフィルタを構成することができます。

なお、カットオフ周波数を下げするために $R_1$ の値を大きくしすぎると、この抵抗での電圧降下が大きくなり、実際に光電子増倍管に供給される電圧が低下してしまうため、配慮して回路設計をします。

また、接続する高圧電源の立ち上がりが速い場合やオーバーシュートなどの過渡電圧がある場合には、 $R_1$ の定格電力を超え破損させてしまうことがあるため注意します。

次に上昇時間10 ns以下の高速出力パルスを取り扱う場合、出力信号の波形が乱れることがあります。これらは光電子増倍管の電極構造やデバイダ回路を含めた信号出力系のリアクタンスによる共振の影響です。こちらの解決策として、図5-28の抵抗 $R_9$ 、 $R_{10}$ のように最終ダイノードと必要に応じてその前段のダイノードにも挿入することで出力波形が改善できます。この抵抗を一般的にダンピング抵抗と呼び、ここでは接続したダイノードを流れる信号電流が、抵抗と付随する容量成分によってリアクタンス分が調整され共振ノイズを抑制します。この効果により滑らかな波形となります。ダンピング抵抗には、10  $\Omega$  ~ 200  $\Omega$ 程度の抵抗を用いますが、この値が大きすぎると時間応答特性を悪化させるため、実際に波形を観察しながら必要最小限の値を決定します。また、無誘導型でない抵抗を使用した場合には、誘導ノイズを発生させてしまうことがありますので、注意が必要です。

図5-29は通常の抵抗型デバイダ回路において、ダンピング抵抗の有無による出力波形を比較観測したもので、ダンピング抵抗を用いることによって下降時間部分でのリングングが軽減していることがわかります。

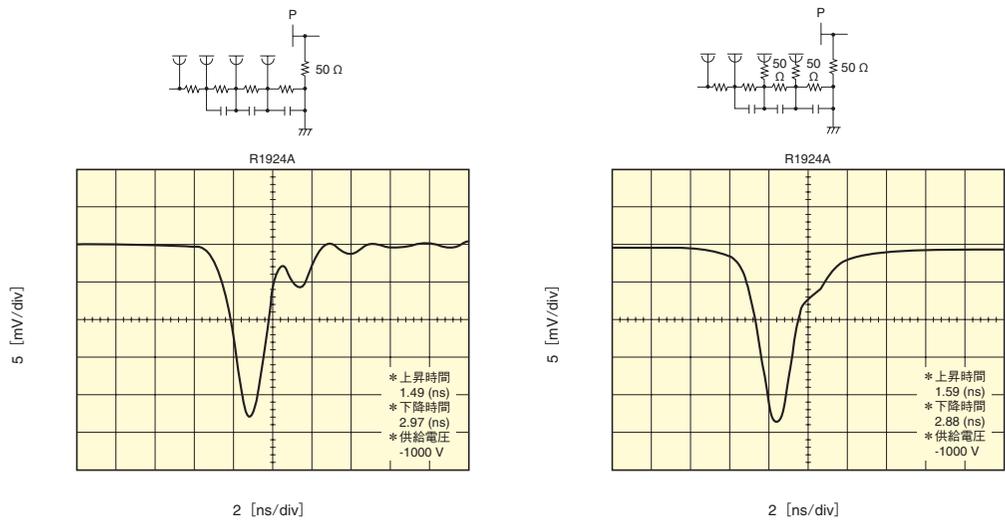
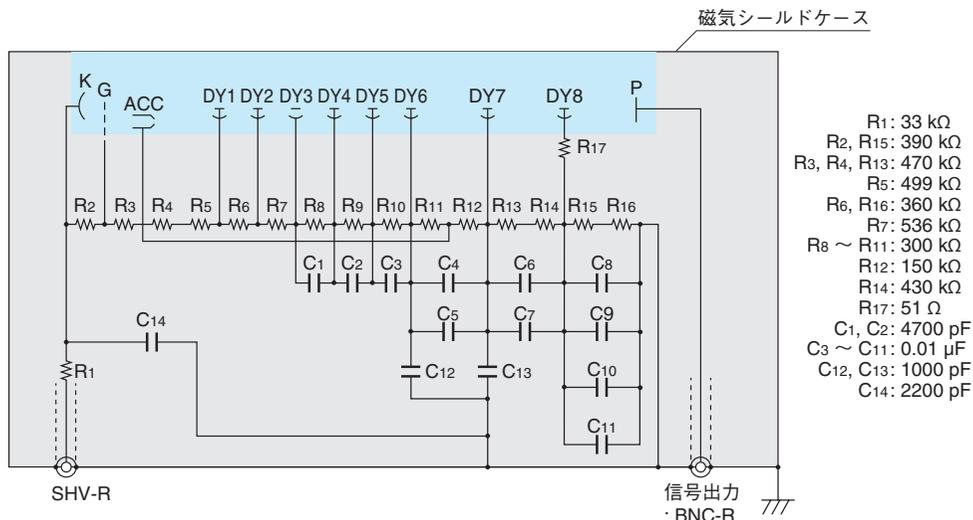


図 5-29 ダンピング抵抗による出力波形への効果

### 5.1.6 実際の高速応答デバイダ回路例

5.1.5の説明に基づいて設計した実際の高速応答デバイダ回路の一例として、浜松ホトニクス製光電子増倍管アッセンブリH2431-50の回路を図5-30に示します。



\* 図中SHV-R、BNC-R部への内部配線の点線部分は、シールド (接地) していることを示す。

図 5-30 H2431-50 のデバイダ回路

THBV4\_0530JA

このデバイダ回路を見ると、高速応答用として以下のような対処をしていることが分かります。

- ①R<sub>1</sub>とC<sub>14</sub>で構成される高圧入力用ローパスフィルタによる外来ノイズの低減
- ②R<sub>17</sub>のダンピング抵抗による出力波形のリングング抑制
- ③C<sub>1</sub>からC<sub>13</sub>のデカップリングコンデンサによるパルス信号応答性の向上
- ④信号出力にはBNC (同軸) コネクタの使用と、シールドされた配線での陽極との結合によるノイズ抑制
- ⑤磁気シールドケースでデバイダ回路系全体を覆い、接地 (GND接続) することでの外部ノイズからの影響抑制

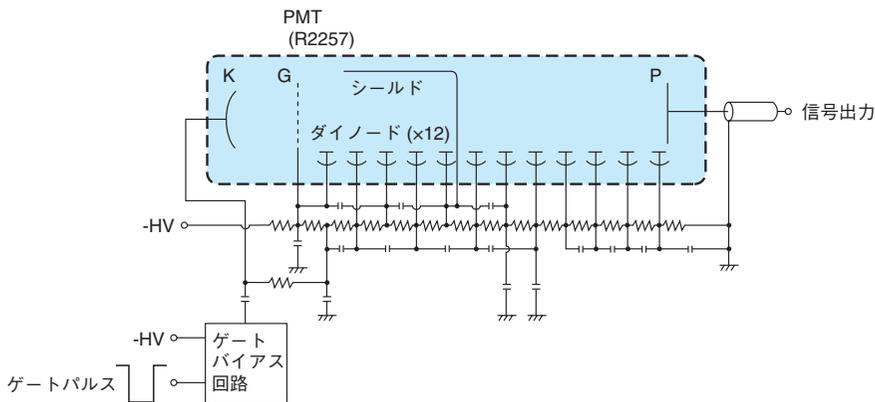


図 5-31 H2431-50 の外観

### 5.1.7 ゲート回路

次にデバイダ回路の応用として、ゲート回路を紹介します。

一般的に時間分解蛍光測定、LIDAR（レーザーレーダ）などは、励起光などの一次光レベルに比較して、実際に測定の対象となる信号光が非常に微弱なものとなります。このため検出系の感度は極めて高く設定してあり、一次光の一部と言えども迷光となって検出系に入射した場合には過大入力となり、光電子増倍管や後続の回路を飽和させ、それらの特性を劣化させるなどの悪影響を及ぼします。これに対してメカニカルシャッタなどを使った対応が考えられますが、マイクロ秒レベル以下の高速なシャッタ動作ができないことや、機械的な寿命など問題があります。このため電氣的に光電子増倍管をオン/オフして、不必要な時間の出力を遮断する「ゲート回路」が採用されています。



THBV4\_0532JA

図 5-32 ゲート型デバイダ回路例

図5-32にゲート型デバイダ回路の構成を示します。この回路は光電子増倍管の出力を定常時オフにしておき、ゲート信号入力時にオンにします。また、反対の動作となる定常時オン、ゲート時オフのタイプとすることもできます。

ここで定常時オフとなる回路の動作として、ゲートパルス入力を0 Vとし、光電子増倍管をオフにさせている状態をみると、陰極には集束電極と第1ダイノードに対して10 V前後の逆向きバイアスが供給されており、陰極から光電子が放出されても電子増倍部（ダイノード）には達せず、結果として信号出力しません。ここでゲート入力端子に負のパルスが加えられると、コンデンサを介して陰極にこれまで掛かっていたものと反対向きのバイアスを与え、ゲートパルス幅とコンデンサ結合回路の時定数により決定される時間中、光電子増倍管をオンにします。この回路でのスイッチングレシオ（消光比）は $10^4$ 以上です。なお、前段（陰極側）から中段にかけて接続されている多数のコンデンサは、このような回路で問題となるスイッチングノイズを吸収するためのものです。ゲート回路の機能については、第8章 8.5でも詳しく述べます。

### 5.1.8 ゲイン調整回路

光電子増倍管のゲイン調整は主に、供給電圧を変えることにより行いますが、1台の高圧電源で複数の光電子増倍管を動作させるものや、高圧電源の出力電圧の可変幅が限定される場合には、デバイダ回路内にゲイン調整回路を設けることがあります。ここでは代表的な3つのゲイン調整方法について説明します。

まず始めに陰極電圧調整方式を図5-33(1)に示します。

陽極接地型デバイダ回路において、陰極 (K) から高圧電源との間に直列に可変抵抗 (ポテンショメータ、トリマあるいはVR) を取り付けることによりここで電圧降下させて、実質的な光電子増倍管に加わる供給電圧を変えるものです。この方法では、ゲインを1桁程度変化させることも可能です。ただし、デバイダ抵抗値が大きくなるとこの可変抵抗の抵抗値も大きくなり、高抵抗で定格電圧の高いものが入手しにくくなります。一方デバイダ抵抗値が小さいと流れる電流は大きくなり、焼損などを避けるために高い電力容量のものが必要となります。

また負高圧の場合には、可変抵抗は高電位で浮いた状態 (フローティング電位) となるため、通常GND電位となる筐体などに対し十分考慮した設計をします。実際に通電しながらゲイン調整をする場合には、感電防止のため直接素手で部品に触れないことはもちろん、絶縁型のドライバなどの器具を使うことが肝要です。これは次に説明する (2) 中間ダイノード電位可変方式でも同様です。

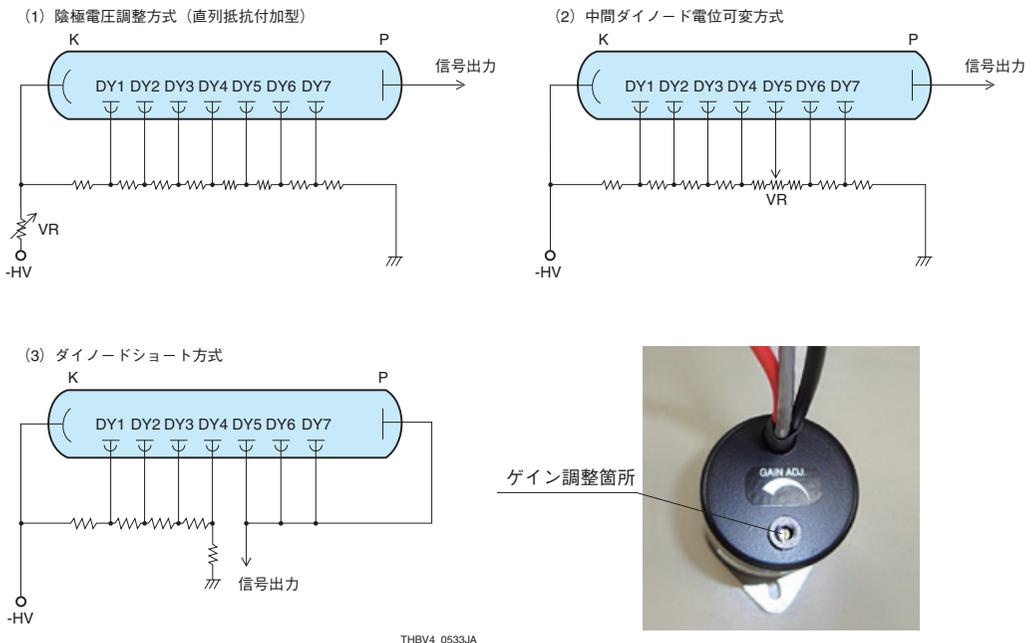


図 5-33 陽極感度調整回路



図 5-34 外部からゲイン調整用の可変抵抗を備えた DA 型ソケットアセンブリ

2つ目の方法は図5-33(2)中間ダイノード電位可変方式です。

こちらは、ある中段のダイノードの電位を可変するものです。ダイノードの電位を変えることにより二次電子が減少したり、ダイノード間の収集効率が低下することを利用してあります。ダイノードの電位の与え方は図のように中間のダイノードの前後のダイノード間に可変抵抗を用いる方法がとられます。比較的容易な方法ですが、大きく電位を変化させるとSN比が悪くなる欠点があります。図5-35はダイノードの電位を変えた時のゲイン変化とエネルギー分解能の様子を測定したものです。相対ゲインが50%以下に低下するあたりからエネルギー分解能も悪化することがわかります。さらにこの特性は光電子増倍管によって一様でなく、ゲインの可変範囲も大きくはとれません。

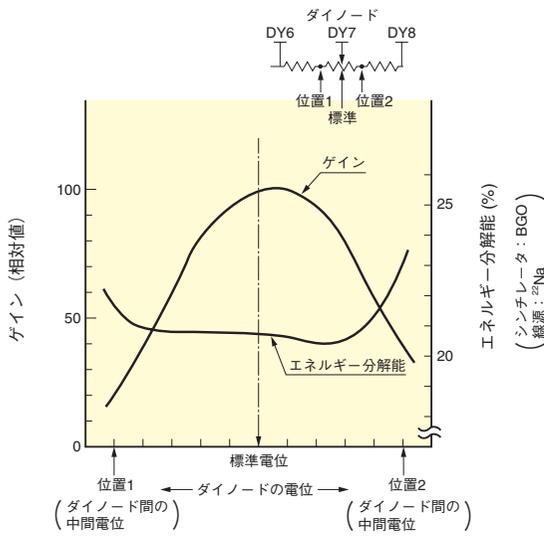


図 5-35 ダイノード電位変化によるゲイン変化とエネルギー分解能の変化

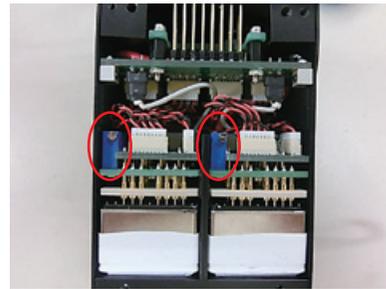


図 5-36 ダイノード電位変化によるゲイン調整機能を用いたPMTモジュール (丸印部がゲイン調整用可変抵抗)

3つ目の方法は図5-33(3)のダイノードショート方式です。

この方式は入射光量が大きく、光電子増倍管の飽和を避けるため供給電圧を大幅に下げる必要がある場合にのみ用いられるものです。ダイノード後段と陽極をショート(短絡)し、中間ダイノードから信号を取り出します。光電子増倍管のゲインが高いため供給電圧を下げて使用すると、ダイノード段間の電圧が低くなり収集効率や二次電子放出比を悪化させます。図のようにダイノード後段をショートし、実質的にダイノードの段数を減らせば段間電圧は高くなりSN比の改善が期待されます。

ただし、ダイノードから出力をとっているためリニアリティ特性は悪くなる場合もあります。さらに全体のダイノード段数が変わることから供給電圧に対するゲイン特性が変わり、この特性は光電子増倍管ごとによらつきがあるため配慮が必要です。

### 5.1.9 デバイダ回路製作上の注意点

次に実際にデバイダ回路を製作する上での注意点を述べます。

#### (1) デバイダ回路に使用する部品の選択

デバイダ回路は光電子増倍管の動作に直接影響を与えるため、慎重な部品の選択が必要です。

##### デバイダ用抵抗

光電子増倍管のゲインは供給電圧および段間電圧の変化に対し敏感に反応するため、できるだけ抵抗温度係数(TCR)の小さな金属皮膜抵抗などを使用します。また、消費電力を抑えるため高い抵抗値を選択する場合やテーパーデバイダなどで耐電圧(定格電圧)の高い抵抗を選択する場合には、メタルグレーズ抵抗などが適しています。すべて同じ種類の抵抗を使用することが望ましいですが、難しい場合は温度係数の近い抵抗を選択します。対して、精度についてはそれほど厳しくする必要はなく、 $\pm 5\%$ 程度のもので十分です。これは光電子増倍管のゲインにばらつきがあること、数V程度の電圧差で電子軌道が大きく変化することはないためです。また電力定格は耐圧不良や損傷を防ぐため実際に必要な値の1.7倍以上、定格電圧としては、1.5倍以上の余裕をもたせることが理想的です。消費電力や抵抗の自己発熱を考慮した場合、現実的な1段当たりの抵抗値の目安としては、 $100\text{ k}\Omega \sim 1\text{ M}\Omega$ となります。

また生産性を考慮して、表面実装型抵抗(チップ抵抗)を用いることが多くなっています。こちらを用いる場合でも上記と同様の配慮が必要となります。なお、チップ抵抗には大きく分けて厚膜抵抗タイプと薄膜抵抗タイプがあります。薄膜抵抗タイプは抵抗値精度や温度係数がよい反面、デバイダ抵抗としての電力に満たないものが多いため、厚膜抵抗タイプを使用の方が適当です。

ゲイン調整に用いる可変抵抗についてもデバイダ抵抗と同じように耐電圧、定格電力、温度特性に対する配慮が必要です。可変抵抗の種類としてサーメット型と呼ばれるセラミック基材に金属を焼成したものは、信頼性や温度特性の点で優れているとされており多くに用いられています。

図5-33(1)で取り上げた可変抵抗の使い方の場合、抵抗値を大きくすると抵抗両端に掛かる電圧は高くなり、逆に小さくすると抵抗を流れる電流が増えることになります。このように可変抵抗の調整加減が必要となる耐電圧や電力容量に幅ができるため、使用条件をよく確認した上で定格に余裕のある部品選定をします。

さらに、調整精度を高くしたい場合には可変抵抗自体の精度や安定度にも目を向けますが、細かく調整できる多回転型とすることが好ましいです。また、可変抵抗の内部には摺動子(ワイパ)と呼ばれる接点部品を持ち、ここに流せる電流にも制限があります。さらに部品によっては接点ノイズを発することもあるため注意します。

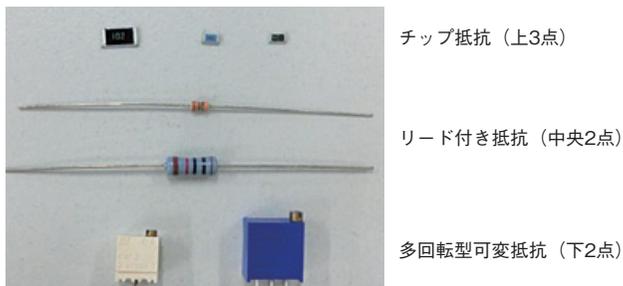


図 5-37 抵抗およびポテンシオメータ

### 負荷抵抗およびダンピング抵抗

高周波用の無誘導型抵抗を使用します。巻線タイプの抵抗はパルス信号に応じてコイル（インダクタ、またはL）の働きをして、雑音源となる場合がありますので注意が必要です。

負荷抵抗としてチップ抵抗を選択の場合には、精度が良い点で薄膜抵抗タイプが適していますが、信号のピーク電流・パルス幅から見て定格電力が十分余裕のあるものを選択することが必要です。薄膜抵抗で定格電力に余裕があるものが見つからない場合には、厚膜抵抗でも抵抗値精度が良いものがあり、測定精度に応じた選択をすれば使用することができます。

### デカップリングコンデンサおよびカップリングコンデンサ

特に高速の光電子増倍管で出力の上昇時間が10 ns以下のパルスを扱う場合、ダイノード間に接続するデカップリングコンデンサには、高周波域でのインピーダンスが十分に低く、定格電圧がダイノード間にかかる最大電圧の1.5倍以上の余裕を持ったセラミックコンデンサを推奨します。また、静電容量値が大きいものが必要な場合には、フィルムコンデンサを用いることもあります。

高電圧入力に接続する電源雑音除去（ローパスフィルタ）用バイパスコンデンサにも高周波域でのインピーダンスが低く、十分な定格電圧を持ったセラミックコンデンサを使用します。

陰極接地・陽極正高圧供給型デバイダ回路で高電圧と信号を分離するカップリングコンデンサにも、雑音源となる漏洩電流が極力少なく、周波数特性に優れ、十分な耐電圧を持ったセラミックコンデンサがよく用いられます。セラミックコンデンサは特徴から、低誘電率系と高誘電率系に分類されます。低誘電率系は比較的に温度特性がよいですが、誘電率が低いいため静電容量が大きいものは望めません。これに対し、高誘電率系は誘電率が高いので静電容量を大きくできます。半面、温度による容量変化が大きくなります。デカップリングコンデンサとしては一般的に数nF程度以上のものが必要になりますので、高誘電率系から選択することが多くなります。さらに、高誘電率系のセラミックコンデンサにはDCバイアス特性があり、DC電圧を供給した場合に静電容量が大きく低下する特性をもっているため、あらかじめ容量低下を見越した容量値選択することが重要です。これに対しフィルムコンデンサであれば、DCバイアスによる容量低下の現象は一般的に起こらず安定してよいのですが、比較的に部品寸法が大きくなるため、デバイダ回路の小型化は難しくなります。

コンデンサに関しても抵抗同様、表面実装型コンデンサ（チップコンデンサ）を用いる場合が増えていますが、電気的特性の選択基準はリード付きのものと同じです。

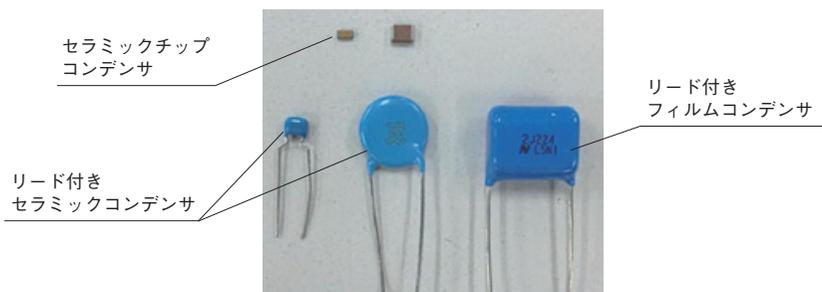


図 5-38 セラミックコンデンサおよびフィルムコンデンサ

## プリント基板 (PCB)

光電子増倍管のソケット上に直接抵抗類を配置するのではなく、プリント基板にデバイダ回路を組む場合、基板にはガラスエポキシ (ガラエポ) 製などの高絶縁性で漏洩電流が少なく、さらに高周波特性のよいものを使用します。また、両面基板を使用する場合には絶縁性と機械的強度を考慮した十分な厚さを持つ物を選択します。一般的にはFR-4 (難燃性による基板の分類名称でガラスエポキシを基材としたもの) で、1.6 mm厚程度のものがよく使用されています。

ガラスエポキシ基板以外にもポリイミド製やテフロン製の基板材料があり、特に漏洩 (リーク) 電流が影響する場合や温度環境など周囲環境が特殊な場合に用いられることがあります。高価なため必要に応じて選択します。

また必要に応じ、パターン配線保護と半田付けの作業性向上、パターン絶縁保護の点でレジストなどの基板表面コートを施すことがあります。陽極配線部と高電圧供給部などの電位差のある箇所については、吸湿してしまった場合などにはかえって漏洩電流による雑音増加を招くこともあり、注意が必要です。

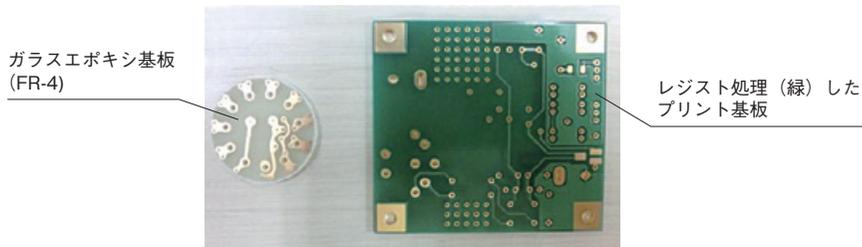


図 5-39 プリント基板

## リード線およびコネクタ

高電圧回路用にはテフロン線、シリコン線などの定格電圧の高いリード線 (電線)、あるいは同様に定格電圧を満足する規格の同軸ケーブル (例としてRG-59B/Uの場合、定格電圧2.3 kV) を使用します。いずれの場合にも線材の絶縁性には十分な注意が必要です。

信号用には取り扱い性や部品の流通性といった点からみると、RG-174/Uや3D-2Vといった規格の同軸ケーブルが適しています。特に高速応答の回路では測定機器の入力インピーダンスとマッチング (整合) を取るため、50 Ω系同軸ケーブルを使用することが求められます。取り扱う信号電流が数  $\mu$  A 以上で、リード線の長さが20 cm程度までであれば、雑音源が近くにない限り単線のリード線でも実用上問題はありません。

接地用には低圧回路に用いるリード線も使用できますが、高電位となる部品またはソケットピンと接触する可能性がある場合には、定格電圧の高いものを選択する必要があるため、高圧線と同様なものや定格電圧を満たす架橋ポリエチレン線などを用います。

なお同軸ケーブルについては、RG-174/UなどはMIL規格、3D-2VなどはJIS規格で仕様が定められています。

信号用に同軸ケーブルを使用する場合には、ノイズ対策やインピーダンスマッチングの点で同軸コネクタを使用することが多くなります。また、高電圧配線についてもノイズ対策や高電圧に対する安全性確保のため同軸コネクタを使用することがあります。

信号用として多く用いられているのは50 Ω系のBNCコネクタです。オシロスコープなど一般的な信号処理機器に多く用いられており、高周波特性もよく小型で脱着などの取り扱いが容易なコネクタです。BNCコネクタは、同じ形状で特性インピーダンスが75 Ω系のものも流通しており、測定系に適したコネクタを選択する必要があります。

BNCコネクタよりも小型で高周波特性に優れたSMAコネクタもあります。小型軽量化を求める用途や高速応答用途で用いられています。この他にも小型、高周波用コネクタとしてSMBやMCXといったものがあり、接続する機器に合わせて選択が可能です。

同軸ケーブルに適合する高電圧用コネクタとしては、主に安全性を配慮してSHVコネクタが用いられます。高電圧コネクタのためやや大きな形状になりますが、取扱いはBNCコネクタと同様で脱着などが容易なコネクタです。

いずれのコネクタも、必要となる特性インピーダンスや極性（プラグとレセプタクル）の把握をして選択します。実用上では、コネクタ取付け時の加工が不適切であった場合にはインピーダンスの不整合や耐電圧不良を引き起こす恐れがあるので、注意して作業します。

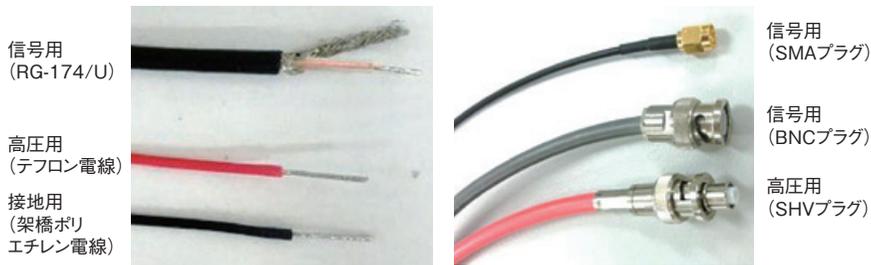


図 5-40 リード線、信号ケーブル、各種コネクタ

### コーティング材およびポッティング材

高電圧が供給されるデバイダ回路は、絶縁性向上や部品の固定のためコーティングやポッティングを行うことがあります。いずれも、事前に実装部品や光電子増倍管に対して互いに影響のない（腐食や硬化不良を起こさない）ことを確認することが必要です。

さらに、電気的特性として絶縁耐圧が高く、体積抵抗及び表面抵抗が大きいものが求められます。高周波特性を考慮すると、誘電率が低いものが必要になります。ポッティング材でデバイダ回路全体あるいは光電子増倍管部分を覆う場合には、これらに加えて、膨張係数や熱伝導率への考慮も必要になります。代表的な材料としてはシリコン樹脂が用いられますが、用途に応じてウレタン樹脂やエポキシ樹脂も採用されます。

いずれのポッティング材でも配慮することですが、特にエポキシ樹脂では硬化後の硬度が高く（硬く）なることが多いため、周囲温度の変化によるポッティング材の膨張や収縮による回路部品や光電子増倍管の破損を引き起こすことがありますので注意します。また吸水性もポッティング剤ごとに異なり、使用環境によっては吸水による絶縁性の低下も危惧されるため、あらかじめ材料の特性をよく確認した上で選択します。

また、光電子増倍管自体の遮光を兼ねる場合には、密着性も加味するとともに、光の透過が無く不要な反射などが起こりにくい、黒色系のシリコン樹脂などをある程度の厚みをもたせて使用します。

なおポッティングについては、原材料、硬化型の精査、作業環境の充実など準備する項目が多く、取り扱いなどによる不具合を起こすことが多いので、経験を積んだ上で作業することが大事です。

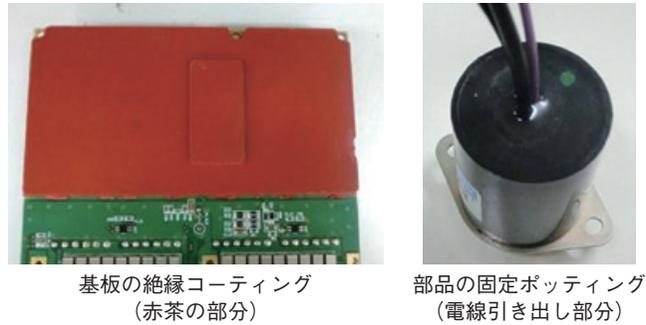


図 5-41 コーティング・ポッティング

## (2) 部品実装上の留意点

デバイダ回路上に配置する部品の役割を、図5-30などを例として把握した上で作業することが重要です。

### 全般

高電圧を供給する部品を扱うため、部品表面が汚れていたり、吸湿していたりする場合にはリーク電流が問題になることがあるので、清浄な手で作業することや、部品を清浄に保ち、必要に応じて事前に脱脂や乾燥をさせます。

また半田付けをする場合には、光電子増倍管や適合ソケットに許容以上の熱を掛けてしまうと外観を損なうばかりか、特性にまで悪影響をおよぼすことがありますので注意します。

### 抵抗実装

デバイダ用抵抗は、接続されるダイノードなどによって異なる電位を持つため、互いを接触しないようにします。また部品の放熱を考慮して、抵抗間は適切な間隔を設けます。また特に抵抗値の低いものを使用する場合や、温度上昇による暗電流の増加が問題となるような極微弱光測定の場合には、デバイダ回路で発生するジュール熱（主に抵抗による熱損失）が直接光電子増倍管に伝達されないように、光電子増倍管のピンやソケットにデバイダ抵抗を直近に接続することは避け、ある程度の距離を置くことが必要です。その半面、光電子増倍管に接続するまでに距離を長くすることは、リードインダクタンス（L成分）を増やし、リングングの発生や周波数特性を落としたり雑音を発生させたりする場合があるため、最適化することも必要です。

負荷抵抗とダンピング抵抗についても、配線長が長くなるとその影響は大きく、より短い配線とする必要があります。

また、リード付抵抗を取り付ける際には、本体とリード線の付け根部分は一般的に機械的強度が低いため、破損させないよう注意が必要です。チップ抵抗でも電極部分は本体であるセラミックとの接合点があり、やはり機械的に弱い部分であるため注意が必要です。こちらについては、コンデンサや他の部品についても同様です。

### コンデンサ実装

前述のように、高速パルス動作用デバイダ回路に使用されているデカップリングコンデンサのリード線は、L成分が周波数特性やリングングに影響するため、極力短くします。リード線のないチップコンデンサを使用した場合でも、基板上のパターン配線を最短化することが必要です。また発熱などの問題からデバイダ用抵抗を光電子増倍管から離して実装する場合にも、デカップリングコンデンサだけは光電子増倍管のピンやソケットのできるだけ近くに取り付ける必要があります。なお、デカップリングコンデンサの熱損失は軽微なため、このような処置が可能となっています。

チップコンデンサを使用する際には、表面がリード付部品のような外装用の絶縁体で覆われていないため、基板実装後に表面リーク電流への対処として、絶縁コーティングを施すこともあります。

### プリント基板実装

プリント基板のパターン設計に関しては、必要なパターン間の沿面距離は放電を配慮して、できるだけ大きく取ることを推奨します。最低でも電位差1 kV当たり1 mm以上とすることが望ましいです。

また、パターン配線を不必要に引き回すことは、回路のL成分を大きくし、高速応答を求める場合には影響を及ぼすため、絶縁に配慮しながらも最短での配線をすることが重要です。

さらに沿面距離の配慮と合わせて、部品配置についても実際の部品が取付けられた場合に生じる空間での距離についての検討も必要です。特にディスクリット部品でのむき出しのままのリード線や、チップ抵抗など端子が大きく露出した部品に対しては、実使用で発生する電位差で空間放電が起きないようにしておくことが重要です。

また部品取付け前には、プリント基板に含まれる水分の除去（ベーキング処理）、半田付けするランドやパッドの酸化膜除去の脱脂なども必要に応じて実施します。

### リード線およびコネクタ実装

リード線の加工は切断などの作業があり、部品を傷つけてしまう恐れがあるので慎重な作業が求められます。

リード線の被覆から導体（芯線）部をむき出す際は、導体部に傷を付けたり、多芯の場合には芯線数を減らしてしまう可能性があり、断線および放電や不要な熱損失を引き起こす要因となるため避けなければいけません。また同軸ケーブルにおいても、芯線を覆うインシュレータ（絶縁体）を傷つけた場合、シールド線との間で絶縁不良を起こし、ショートなどの問題が発生するので注意が必要です。

さらにリード線、特にテフロン線や同軸ケーブルでは、その構造上から比較的硬く仕上がっているため無理に曲げたりすると破損や特性劣化する恐れがあります。測定系への配線上で折り曲げをする際には、ケーブルの曲げ半径規格などを守るようにします。

リード線をプリント基板などに半田付けする際には、ケーブル被覆やインシュレータの絶縁体が軟化する温度があり、溶けて劣化する恐れがあります。RG-174/Uなどで使用されているPVC（ポリ塩化ビニル）では65℃程度から軟化が始まるため、熱を掛けすぎないようにしなければなりません。

信号線として単線を使用する場合は、信号線と信号用のGND線をツイストさせると同相ノイズが軽減できることがありますので、必要に応じて処理します。

コネクタを取付ける際には、ケーブルの加工は前述の注意点を守るとともに、それぞれの仕様書や加工図面に基づいた正確な寸法での処理と適合した工具の使用が必要です。精度が伴わない場合や誤った工具で加工した場合には組立できないことや、仮に組立できたとしても内部短絡や反対の導通不良を引き起こすことがあります。

不適合の例としては、信号コネクタではインピーダンスマッチング不良の要因となり、特に高い周波数での信号に乱れが生じる可能性もあります。高圧コネクタとして見た場合には内部放電することもあり、不適切な加工のままでの使用は危険であるため絶対に避けなければなりません。コネクタを使用した際に信号出力や電圧供給に問題がある場合には、光電子増倍管やデバイダ回路の不具合も心配ですが、配線箇所や内部加工に誤りがある場合があるため、コネクタが正常に取付けられているか確認することも重要です。

### 信号出力系の実装

抵抗実装でも述べましたが、負荷抵抗を含む信号出力系は配線長を極力短くします。さらに高圧線や高電圧の供給されている部品から離して配線します。基板上で陽極と高電圧部が近づく場合には、絶縁を確保した上で陽極周りをGND電位で囲ったり、基板に切れ込みを入れたりするなど、高電圧部からのリーク電流が直接流れ込まないよう配慮します。

特に高速パルス信号を扱う場合には、必要に応じて信号系と電源系の一点接地を行い、GNDループによる不要なノイズ発生を抑制します。また、信号ラインと別の信号ライン、あるいは制御パルスのラインなどを並走させた場合には、互いの信号が誘導ノイズとして重畳してしまう場合があるため、避けるようにします。さらに、微小出力電流を扱う場合には信号経路のシールド処理やリーク電流の防止にも配慮しなくてはなりません。

### コーティングおよびポッティング

不要な部分へのコーティング材やポッティング材の付着がないように注意します。異物の混入は硬化不良や放電の要因となるため注意します。またポッティングした箇所の内部に空気が残りボイドが生じた場合、絶縁性の低下が懸念されるため、必要に応じて脱泡などの処置もします。硬化条件として温度や湿度、放置時間などがありますので、あらかじめよく確認した上で作業します。二液混合型などのタイプでは、配合比を誤ると硬化しないことや期待する特性が得られないことがあるので十分注意します。

## 5.2 高圧電源の選択

高圧電源の形態としては主に、プリント基板上などに実装可能なモジュール型と汎用のペンチトップ型があります。モジュール型は低電圧入力タイプで、ペンチトップ型はAC電源入力タイプです。

高圧電源はその特性が光電子増倍管の信号出力に直接影響するため、ドリフト、リップル/ノイズ、温度変動、入力変動、負荷変動などの特性を合わせた総合的な高い安定度が求められます。ここでは、高圧電源の方式と特性について述べます。

これまで高圧電源としては、シリーズレギュレータ方式のものが低ノイズ化しやすいこともあり広く使われてきましたが、その反面、電力効率に課題があり発熱の問題や小型化に向かない傾向があるため、最近ではスイッチングレギュレータ方式のものが主流となっています。スイッチングレギュレータ方式は小型でも高出力電圧や高出力電流の得られるものが多く製品化されており、光電子増倍管用としての利用も増えています。ただし、品種によっては高電圧出力にスイッチングノイズが重畳するものや、スイッチングノイズを周囲に放射するものもあり、特に微弱光測定やフォトンカウンティングなどを行う場合、また応答速度の速い信号処理を必要とする場合には、より慎重な高圧電源の選定が必要となります。このため、以下に高圧電源を選択する際の性能の目安を示します。

項目	内容・値
①入力変動率	±0.1%以下
②負荷変動率	±0.2%以下
③リップル/ノイズ	0.01%以下
④温度係数	±0.05%/°C以下

表 5-1 高圧電源への要求特性

- ①例えば入力電圧が±10%の変化に対し、出力電圧が最大時において出力が変動する割合(%)を示します。
- ②電圧出力させている際、出力電流を変化させた場合の電圧出力値の変動が負荷変動です。また負荷変動率は、出力電圧を最大とし、出力電流を0から最大値まで変化させた時に生じる出力電圧値の差を、元の出力電圧から見た割合(%)です。
- ③リップルとは高電圧発生回路の発振周波数に同期した出力のゆらぎ(ピーク値)を示します。特性値はリップルだけでなく、発振周波数以外のゆらぎ成分(ノイズ)も含めています。品種によっては、前者のリップル成分のみの表記の製品もあるため、実使用においては注意が必要です。
- ④動作周囲温度範囲内の規定された出力条件(多くは最大出力時)での出力変化率(%/°C)を示します。

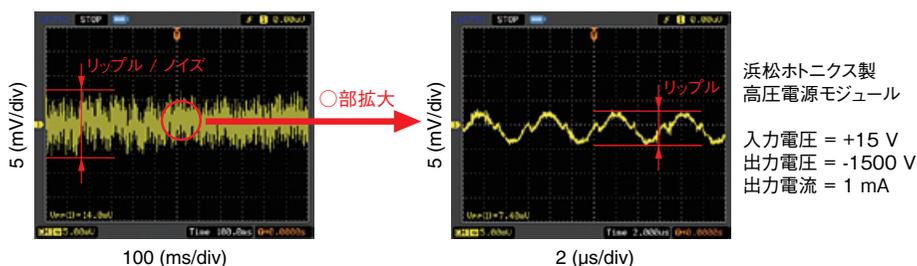


図 5-42 リップル/ノイズの例

続いて、具体的な選択方法や配慮点について述べます。

- ・高電圧を発生させる製品であるため、感電などしないよう十分に注意し、取扱説明書に沿った扱いをします。
- ・高圧電源の電気的特性（入力変動率、負荷変動率、温度係数、リップル/ノイズなど）は、光電子増倍管に要求される安定度より、1桁以上優れたものを使用します。また、経時変化（ドリフト）特性にも配慮します。特にリップル/ノイズについては、100 mV<sub>p-p</sub>以下のものが望ましいです。また、ベース電源となる入力側の低圧電源の安定度やノイズ特性も高電圧出力に影響するため、低圧電源についても、できるだけ特性の良いものを用います。
- ・高圧電源の電流容量は余裕をみて、使用するデバイダ回路に流れるデバイダ電流の1.5倍以上の電流を出力できるものをお勧めします。出力電流に余裕がない場合、高電圧出力が低下する恐れがあります。また、複数本の光電子増倍管を1台の高圧電源で動作させる場合には、全てのデバイダ回路の合成抵抗値から必要な電流容量を算定して、最大出力電流の大きな高出力型の高圧電源を選択します。この場合でも、可能な範囲で電流容量に余裕を持たせます。
- ・陰極接地（+HV）で使用する場合は、陽極に高電圧が抵抗を介してバイアスされており、さらにカップリンコンデンサで結合されているため、高圧電源からのノイズが信号出力に伝播しやすいのでリップル/ノイズ特性に気を配ります。
- ・高電圧の入力ラインにローパスフィルタ回路を挿入することで、リップル/ノイズは改善されることがあります。この際、高圧電源のオン時に発生する過渡的な電圧などにも配慮して、サージ耐性に優れた部品選択します。また、ローパスフィルタ回路を付加した場合には、付加した回路の時定数に応じた高電圧の応答となり、何も付けない場合と比較して高電圧の上昇時間は長くなります。
- ・高圧電源の出力電圧の上昇・下降時間は品種によって異なりますが、一般的に下降時間は上昇時間に対して遅くなります。これは電圧を下降させる際に、電源内部回路のコンデンサが放電する時間が必要なためです。よって、高電圧を急峻に変化させる用途では配慮が必要です。
- ・高圧電源にも電力損失があるため、できるだけ入力電力に対する出力電力の効率が高い電源を選択することをお勧めします。効率が低いと周囲温度の上昇を招く場合もあります。また、装置内に設置するなど高圧電源の周囲を覆ってしまうような際には、高圧電源の周囲温度が大きく上昇する恐れがありますが、定格の動作周囲温度を超えないよう注意します。
- ・高圧電源には出力電圧がオーバーシュート（設定値を超過する現象）するものがあり、光電子増倍管およびデバイダ回路が破損する恐れがあります。光電子増倍管用に設計されたオーバーシュートのないものが肝要です。
- ・一般的な高圧電源は入力側と高電圧出力側の接地が共通（コモンアース）となっているため、乾電池のように高圧電源の直列接続はできません。直列接続する電源が必要な場合には、フローティングされた絶縁型の高圧電源を採用しますが、電源のベース電位が高電圧側に浮いた状態になるので、取り扱いには十分注意します。

- ・モジュールタイプの高圧電源の多くはアナログ電圧で制御しますが、RS-485などのインターフェースを介してデジタル（PC）制御できるものもあり、遠隔操作や自動制御する用途に向いています。



型名：C10940-03-R2  
(RS-485 インターフェースタイプ)

寸法 (W×H×D)：15 mm×18 mm×15 mm  
入力電圧：+5 V  
最大出力電圧：-1200 V  
最大出力電流：0.6 mA

図 5-43 小型高圧電源モジュール

- ・ベンチトップ型高圧電源ではほとんどの場合、コネクタ付きの高圧ケーブルを接続して使用します。この際、適切な定格電圧をもったケーブルの選択をすることが必要です。コネクタ形状は同じでも、ケーブル自体の耐電圧が異なる場合がありますので、電源に適合したものを使用します。



型名：C9525-02

入力電圧：AC 100 V  
最大出力電圧：-2000 V  
最大出力電流：1.8 mA

図 5-44 ベンチトップ型高圧電源

- ・1つの高圧電源で複数の光電子増倍管を動作させる場合には、接続されるデバイダ電流を合計し、必要に応じた電流容量の大きなタイプを選択します。

このような複数に高圧電源を接続した場合の留意点ですが、高圧電源には短絡保護機能を有するものがあり、接続した光電子増倍管あるいはデバイダ回路のどれか一部でも短絡モードで故障した場合には保護機能が働き、安全のため高電圧供給をストップさせることがあります。これにより正常な光電子増倍管に対しても高圧供給ができなくなる恐れがあります。このような場合には電源をオフし短絡の要因を排除するのが好ましいですが、全ての光電子増倍管の動作を止めてしまうのが望ましくない場合には、光電子増倍管ごとに短絡時の遮断回路などを設けておきます。



型名：C11784-12

寸法 (W×H×D)：62 mm×15 mm×45 mm  
入力電圧：+24 V  
最大出力電圧：-2000 V  
最大出力電流：5 mA

図 5-45 高出力型高圧電源モジュール

- ・医療機器などでは高圧電源に対し、製品安全規格であるUL規格の認証を得ていることが求められる場合があります。



型名：C10673

寸法 (W×H×D)：46 mm×24 mm×12 mm

入力電圧：+15 V

最大出力電圧：-1250 V

最大出力電流：0.6 mA

図 5-46 UL 認証高圧電源モジュール

- ・第13章13.1.2で述べていますが、一般的な光電子増倍管より動作周囲温度が格段に高い製品もあります。このような高温用の光電子増倍管用に、高温環境下でも動作する高圧電源もあります。



型名：C12733-01

寸法：φ 22.2 mm×85.4 mm (端子およびケーブル部除く)

入力電圧：+15 V

出力電圧：-1000 V ~ -1800 V

最大出力電流：0.09 mA

動作周囲温度：-40 °C ~ +175 °C

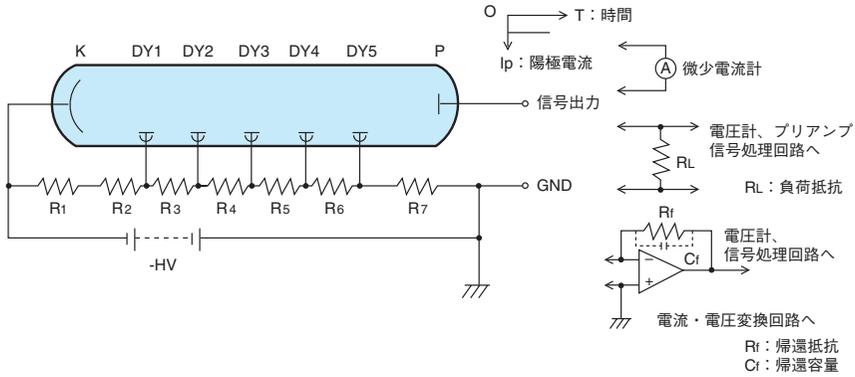
図 5-47 高温用高圧電源モジュール

## 5.3 外部回路との接続

### 5.3.1 出力信号の計測法

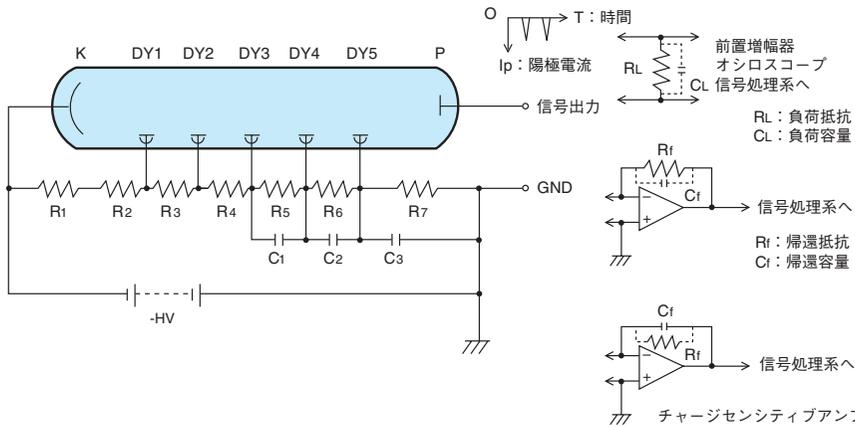
光電子増倍管の出力信号を計測する方法は図5-48、5-49、5-50に示すように、それぞれの動作状態に応じて異なります。

本章5.1.2 項で述べたようにデバイダ回路には陽極側接地と陰極側接地の二つがあり、陽極側接地では図5-48、5-49のように直流出力モードとパルス出力モードの両方が可能です。一方、陰極側接地では図5-50のように陽極が高電圧となるため、一般のアンプ回路や計測機器などと接続するにはカップリングコンデンサが必要となり、直流信号がカットされたパルス信号だけが出力されます。この場合、直流出力は得られませんが、直流成分である背景光などの不要な信号の影響を減らすことができる利点もあります。



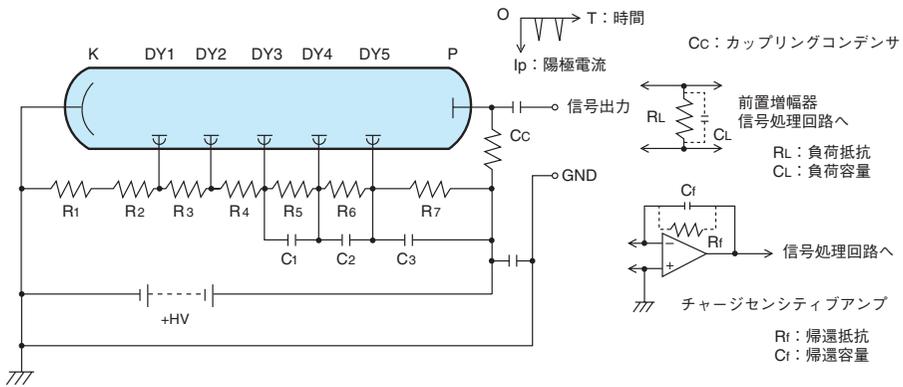
THBV4\_0548JA

図 5-48 陽極側接地・直流出力モード



THBV4\_0549JA

図 5-49 陽極側接地・パルス出力モード



THBV4\_0550JA

図 5-50 陰極側接地・パルス出力モード

後続する増幅回路など信号処理系に接続して使用する際は、あらかじめ信号処理系に接続させた後に、高圧電源をオンにして光電子増倍管を動作させることが大切です。デバイダ回路に高電圧がかかると光電子増倍管は動作し、たとえ光を入射していない場合でも暗電流により陽極に電荷が蓄積されます。この状態で増幅回路に接続すると、この電荷が瞬時に接続した信号処理系に流れ込み回路を破損することがあります。特に後続する回路系の応答速度が速いものほど壊れやすいので注意が必要です。このため、陽極出力には終端抵抗を用い、電荷が不要に蓄積しないように対処しておくことも重要です。

### 5.3.2 カップリングコンデンサの影響

前述のように陰極接地法では一般的にカップリングコンデンサが必要となりますが、陽極接地でもパルス出力モードの場合、陽極電流の直流分を除去するためにカップリングコンデンサを用いることがあります。ここではカップリングコンデンサを使用した回路を使う上での留意点を述べます。

#### 出力波形

図5-51の陽極出力への接続回路において、陽極出力のパルス幅 $P_w$ が回路の時定数 $CR$ ( $R$ は $R_a \cdot R_L$ の並列抵抗)より非常に短い時、カップリングコンデンサのインピーダンスは無視できるため信号パルス電流は $R_L \cdot R_a$ に分流されます。この場合、出力波形はカップリングコンデンサの容量によらず、入力波形は歪むことなく出力されますが、 $P_w$ が $CR$ に近いかそれより長くなると出力は微分波形となっていきます。このカップリングコンデンサは単に増幅回路との結合素子回路として使われているので、信号の入力波形が歪むことなく出力波形となるためには $P_w$ と比べ $CR$ を数十倍以上長くしなければなりません。高速応答性を得るために $R_a$ に $50 \Omega$ を用いる場合は、時定数 $CR$ が小さくなるため注意が必要です。

また低周波の場合、カップリングコンデンサのインピーダンスが無視できなくなり、そのインピーダンス $Z_c$ は $Z_c = \frac{1}{2\pi fC}$ となるため、周波数が $f = \frac{1}{2\pi CR_L}$ の時、信号は3 dB下がります(波高値が約0.7倍)。

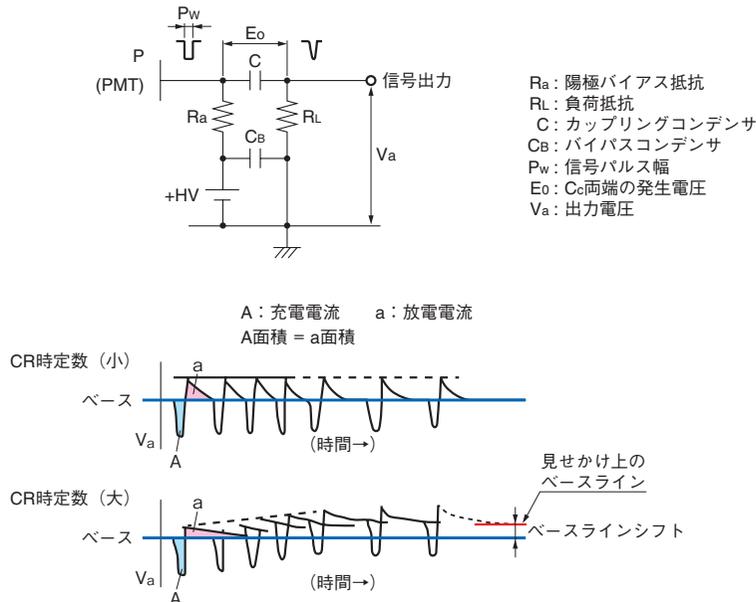


図 5-51 ベースラインシフト現象

### ベースラインシフト

前述のように、カップリングコンデンサを通った信号は、その電荷量がコンデンサに充電されます。充電され電荷 $Q$ によりコンデンサの両端には信号とは逆向きで $E_0=Q/C$ の電圧が発生し、この電圧 $E$ はコンデンサの容量 $C$ と $R_a \cdot R_L$ の並列抵抗 $R$ で決まる時定数 $CR$ により

$$V = E_0 e^{-t/CR}$$

のように減衰します。コンデンサの両端に発生した電圧は $R_L$ と $R_a$ で分圧され、出力電圧 $V_a$ は次式(5-6)で表されます。

$$V_a = E_0 e^{-t/CR} \times \frac{R_a}{R_a + R_L} \dots\dots\dots (式 5-6)$$

ここで信号パルスの頻度が高くなると図5-51（下図）のようにベースラインは元に戻らず、真のゼロレベルよりずれたところに見かけ上のゼロレベルを形成します。これがベースラインシフトです。 $CR$ の時定数を小さくすればこの影響は軽減できます。ここでコンデンサの容量を小さくすると信号電圧 $E_0$ は高くなる利点がありますが充電時間は短くなり、前述のように信号波形が微分される可能性が高くなります。また、一般的には必要に応じて負荷抵抗 $R_L$ を大きくして処理しやすい信号電圧にしますが、ベースラインシフトの発生を避けるために抵抗値を小さくすると、信号電圧が低くなり、SN比に影響する場合があります。また $R_a$ が大きく陽極出力が大きい場合には、 $R_a$ 両端に電圧が発生し陽極の電位を押し下げ、光電子増倍管のゲインに影響がでるため注意が必要です。

図5-51で示すように、コンデンサに充電した信号電荷量（図5-51のA部分）をどのような時間で放電（図5-51のa部分）するかということであり、放電の時定数に関係なく図中のAの面積は $a$ と等しくなります。信号のパルス幅に比べ回路の時定数 $CR$ を大きく設定すれば、この放電による信号の波高値への影響は少なくなります。しかし信号パルスの頻度が高い時や、精密な出力波高値情報が必要な時、この影響は無視できなくなります。ベースラインシフトが起きると信号は見かけ上低く計測されるため、回路設計にあたっては信号パルスの頻度を増やしても波高値の変動のない最適なコンデンサ容量値と抵抗値を決める必要があります。

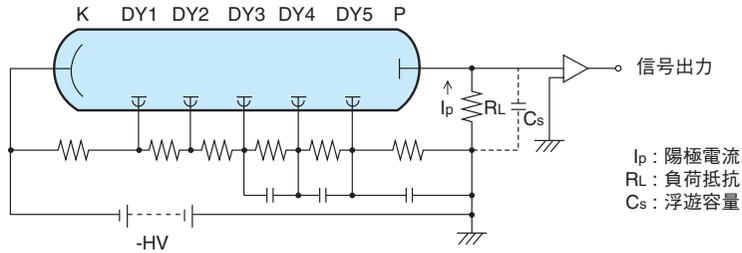
また増幅器を含めた測定系の分解時間内に複数のパルスが入った場合、それらが加算されて一つの大きなパルスとなる（いわゆるパイルアップ）問題も生じるので、特に波高弁別器などを使用して出力パルス一つ一つの高さが重要な場合には、測定系の時間分解能にも考慮する必要があります。

### 5.3.3 光電子増倍管出力の電流・電圧変換

光電子増倍管の出力は電流(電荷)であり、一方後続の信号処理系は通常、電圧信号を対象としているため、微小電流計で出力電流を直接観測する以外には、何らかの方法で電流を電圧に変換する必要があります。以下、電流・電圧変換の方法とその留意点について述べます。

#### (1) 負荷抵抗による電流・電圧変換

光電子増倍管の電流出力を電圧に変換する方法としては、まず負荷抵抗の使用が考えられます。光電子増倍管は出力電流の小さい領域では非常に高い出力インピーダンスを持つ理想的な電流源と考えられ、理論上では負荷抵抗に相当大きな値を用いることが可能です。したがって、出力電圧 $V_o$ としては陽極電流 $I_p$ ×負荷抵抗 $R_L$ の値が得られます。しかし実際には、負荷抵抗の値は次に述べるように、求める周波数特性やリニアリティ特性から制限を受けません。



THBV4\_0552JA

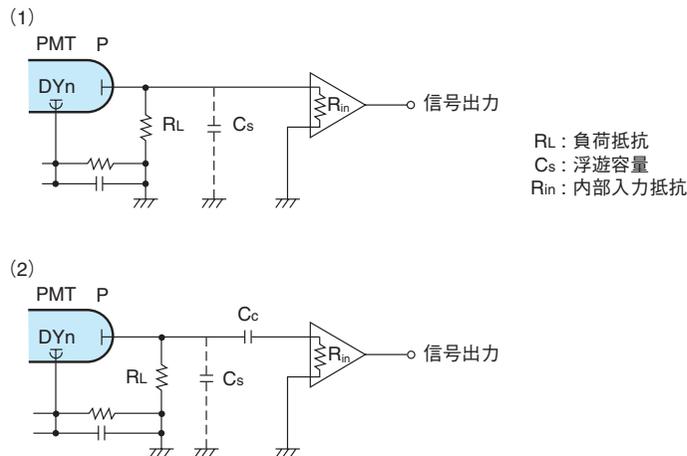
図 5-52 光電子増倍管と出力回路

図5-52において、負荷抵抗を $R_L$ 、光電子増倍管の陽極と他の電極間の静電容量および配線などによる浮遊容量の総和を $C_s$ とすれば、高域遮断周波数 $f_c$ は次式(5-7)で表されます。

$$f_c = \frac{1}{2\pi C_s R_L} \text{ (Hz)} \dots\dots\dots \text{ (式 5-7)}$$

光電子増倍管と接続するオシロスコープなど計測機器が高速であっても、光電子増倍管の信号出力回路で高域遮断周波数が決定されてしまいます。

また、 $R_L$ をあまり大きくするとそれに比例して陽極電位で $I_p \times R_L$ による電圧降下が増大し、最終ダイノードー陽極間電圧を低下させ、空間電荷の影響によるリニアリティ特性の劣化の原因となります。従って一般的には出力電圧を最終ダイノードー陽極間電圧の数パーセント以下（1 V程度以下）となるようにします。



THBV4\_0553JA

図 5-53 増幅器の内部入力抵抗の影響

負荷抵抗の値を決めるには、接続された増幅器の内部入力抵抗（入力インピーダンス）の影響も考慮しなければなりません。図5-53に等価の回路図を示します。この図から負荷抵抗を $R_L$ 、増幅器の内部入力抵抗を $R_{in}$ とすれば、両者の並列合成抵抗 $R_o$ は次式(5-8)から計算されます。

$$R_o = \frac{R_{in} \cdot R_L}{R_{in} + R_L} \dots\dots\dots \text{ (式 5-8)}$$

実質的な負荷抵抗は、 $R_L$ より小さい $R_o$ となります。 $R_{in} = \infty \Omega$ とし、理想的に陽極電流が全て負荷抵抗 $R_L$ で消費された場合の出力電圧 $V_o$ と、実際の増幅器の $R_{in}$ の影響を受けた時の出力電圧 $V_o'$ との関係は、次式(5-9)で表されます。

$$V_o' = V_o \times \frac{R_{in}}{R_{in} + R_L} \dots\dots\dots (式 5-9)$$

$R_{in} = R_L$  の場合には  $V_o'$  は  $V_o$  の半分となります。このことから負荷抵抗の実質的な上限値は  $R_{in}$  程度となり、それ以上に大きくしても、あまり効果はありません。

ここまで負荷抵抗および増幅器の内部入力抵抗は、純抵抗として考えてきましたが、実際にはこれに浮遊容量や浮遊インダクタンスなど位相に関する項が付加されるため、測定周波数が高い時にはそれらを考慮したインピーダンスとして考えなければなりません。

図5-53(2)のように、光電子増倍管と増幅器の間にカップリングコンデンサ  $C_c$  を挿入し、直流信号をカットしてパルス成分だけを取り出す場合には、負荷抵抗  $R_L$  を過大に設定すると浮遊容量  $C_s$  の影響を受けることもあり、信号の周波数特性や波高値に対して障害となるため注意が必要です。

## (2) オペアンプによる電流・電圧変換

オペアンプ（演算増幅器）を使用した電流電圧変換回路と電圧計を用いれば、微小電流計が無くても精度の良い光電子増倍管の陽極出力測定を行うことができます。

また、この方法を用いれば、負荷抵抗による陽極電流の電流・電圧変換した場合の最終ダイノード-陽極間電圧の低下による陽極出力への影響を避けながら、良いリニアリティ特性を得ることも可能になります。

オペアンプを使用した基本的な電流・電圧変換を図5-54で説明します。

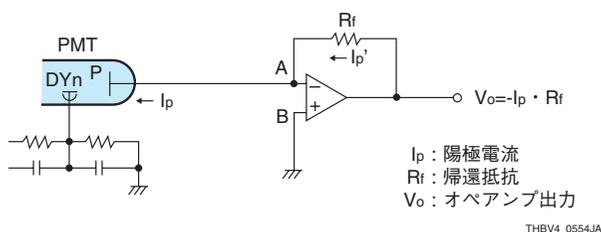


図 5-54 オペアンプによる電流・電圧変換回路



図 5-55 アンプ回路の例

この場合の出力電圧  $V_o$  は次式(5-10)で表されます。

$$V_o = -I_p \cdot R_f \dots\dots\dots (式 5-10)$$

これは以下のように考えると理解しやすくなります。

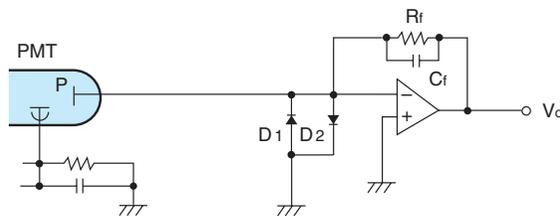
オペアンプの入力インピーダンスは非常に高いため、光電子増倍管の出力電流は、図5-54のA点、すなわちオペアンプの反転入力端子(-)に流れ込むことはできません。従って、その大部分は帰還抵抗  $R_f$  に流れ、 $R_f$  の両端に  $I_p' \times R_f$  の電圧が発生します(このため  $I_p$  と  $I_p'$  は等価とみなせます)。一方、オペアンプの増幅率(オープンループゲイン)は、おおよそ  $10^5$  (100 dB) と非常に高く、反転入力端子の電位を常にB点の非反転入力端子(+)の電位(接地電位)と同じに保つように働きます(これをイマジナルショート、または仮想接地と呼びます)。そのためオペアンプは  $R_f$  両端に発生する電圧と同じ電圧  $V_o$  を出力し、理論的にはオープンループゲインの逆数程度の高精度で電流を電圧に変換します。

オペアンプを使用した場合、最小測定電流を決定する要因としては、オペアンプの入力オフセット電流( $I_{os}$ )、帰還抵抗( $R_f$ )の品質、使用する絶縁物の品質、配線方法などが挙げられます。

実際にpA( $10^{-12}$  A)レベルの微小電流を測定するためには、次の点も留意する必要があります。

- ・信号出力ケーブルには絶縁性の十分高い低雑音型同軸ケーブルを使用します。
- ・コネクタを使用する場合、本体絶縁部はテフロン製など絶縁性の十分に高いものを選びます。また、同軸コネクタなどを用いる場合には、周波数特性の良いものを選択します。
- ・光電子増倍管の陽極とオペアンプの信号入力ピンとの接続は、基板のパターンは使用せず、テフロン絶縁型の導通端子などを用い漏れ電流に注意します。
- ・オペアンプの出力オフセット電圧 ( $V_{os}$ ) の調整と発振防止の位相補償は十分にします。
- ・実際の出力は、 $V_o = -(I_p + I_{os}) \cdot R_f + V_{os}$ であり、特に $R_f$ が大きな場合にオフセット電流 ( $I_{os}$ ) が問題となります。そのためオペアンプは、入力インピーダンスの高いFET入力型などを用い、オフセット電流は0.1 pA以下で、入力換算雑音と温度ドリフトの極力小さなタイプを選びます。また、非反転入力端子に帰還抵抗と同一の抵抗を介して接地すれば入力バイアスのバランスが取れ、入力端子間のオフセット電流を減らすことができます。
- ・帰還抵抗には、温度係数および誤差の小さな金属皮膜抵抗などを用い、漏洩電流の影響を減らすため、表面に汚れが付かないよう注意します。また、抵抗値が1 G $\Omega$  ( $10^9 \Omega$ ) 以上の場合には、漏洩電流の小さなガラス封入抵抗を用いるなど配慮します。抵抗の種類によっては雑音を発するものがあるので選択に注意します。
- ・プリント基板にはガラスエポキシ製、またはそれ以上の絶縁性 ( $10^{14} \Omega$ 程度) の材質を用います。
- ・オペアンプの最大出力電圧は一般的に、供給電圧より1 V~2 V程度低い値となっているので、測定レンジの上限には配慮します。

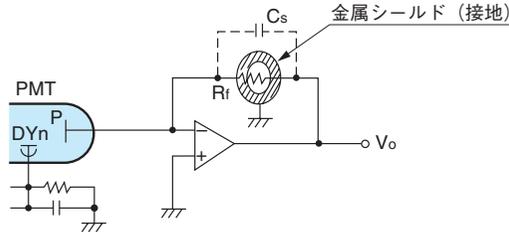
また光電子増倍管は高電圧で動作させるため、何らかの故障で陽極から高電圧が出力された場合を考慮して、オペアンプの保護を目的として図5-56のような抵抗( $R_p$ )とダイオード( $D_1$ )および( $D_2$ )で構成される保護回路を設けておく必要があります。この場合、ダイオードは漏洩電流および接合容量の極力小さなものとし、小信号増幅用トランジスタのB-EジャンクションやFETが用いられることもあります。



THBV4\_0556JA

図 5-56 オペアンプの入力保護回路

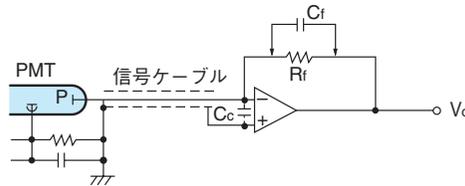
電流電圧変換係数を非常に大きく取るため、帰還抵抗 $R_f$ を1 G $\Omega$ 程度の高抵抗を使用する場合、図5-57のように $R_f$ に寄生する浮遊容量 $C_s$ があると、回路は $C_s \times R_f$ の時定数を持ち、帯域は制限されるため用途によっては不都合を生じます。この対策として、図に示したように中央に穴を開けた接地電位の金属製シールド板に $R_f$ を通せば、この $C_s$ が軽減されて応答特性を向上させることができます。



THBV4\_0557JA

図 5-57 アンプ帰還抵抗に対する浮遊容量のキャンセル

一方、図5-58のように、光電子増倍管の信号出力が静電容量をもつ同軸線などで、ケーブルが長く、その等価容量が $C_c$ である場合には、 $C_c \times R_f$ によりオペアンプ回路の帰還ループ内に位相遅れが生じ、発振の原因となる恐れがあります。この場合には $R_f$ と並列にコンデンサ $C_f$ を入れて位相補償をすれば発振は収まりますが、応答速度の低下は避けられません。



THBV4\_0558JA

図 5-58 信号ケーブル容量のキャンセル

### (3) オペアンプを使用した電荷増幅器

図5-59(1)はオペアンプを使用したチャージセンシティブアンプ(電荷増幅器)の基本回路です。 $C_f$ に光電子増倍管の出力電荷 $Q_p$ が蓄積され、出力電圧 $V_0$ は次式(5-11)で表されます。

$$V_0 = Q_p / C_f \quad \dots \dots \dots \text{ (式 5-11)}$$

ここで光電子増倍管の出力電流を $I_p$ として、次式(5-12)で表されます。

$$V_0 = -\frac{1}{C_f} \int_0^t I_p dt \quad \dots \dots \dots \text{ (式 5-12)}$$

電荷の蓄積を続けると最終的に $V_0$ は図5-59(2)(3)に示すように、オペアンプの供給電圧付近まで上昇します。

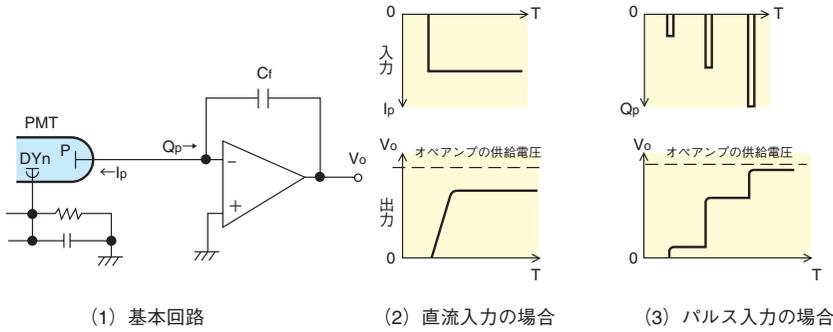


図 5-59 チャージセンシティブアンプ回路と動作

THBV4\_0559JA

図5-59(1)で $C_f$ と並列にFETによるスイッチを接続して $C_f$ に蓄積した電荷を必要に応じて放電できるような回路を追加すれば、光電子増倍管の出力が直流・パルスによらず、必要期間において出力電荷を積分する回路となります。

一方シンチレーションカウンティングにおいては、光電子増倍管の出力パルス1つ1つの電荷量を対応する電圧パルスに変換する必要性から、図5-60のように $C_f$ と並列に $R_f$ を接続し、一定時間ごとに電荷のチャージをリセットさせるために放電時定数 $\tau = C_f \cdot R_f$ を設けた回路を使用します。

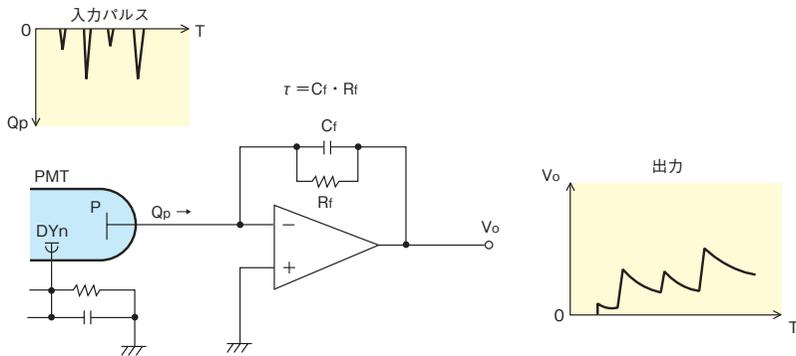


図 5-60 パルス入力型チャージセンシティブアンプ

THBV4\_0560JA

時定数 $\tau$ を小さくすると $V_0$ は入力電流パルス波高値への依存度が高くなり、逆に大きくすると入力パルス電荷量への依存度が高くなり、最終的には $-Q_p/C_f$ に近づきます。シンチレーションカウンティングの場合、回路系の時定数 $\tau = CR$ とシンチレータの蛍光減衰定数 $\tau_s$ との関係より出力パルス電圧波形 $V(t)$ は次の式となります<sup>3)</sup>。

$$V(t) = \frac{Q \cdot \tau}{\tau - \tau_s} (e^{-t/\tau} - e^{-t/\tau_s}) \dots\dots\dots \text{(式 5-13)}$$

$\tau \gg \tau_s$ の時

$$V(t) \approx \frac{Q}{C} (e^{-t/\tau} - e^{-t/\tau_s}) \dots\dots\dots \text{(式 5-14)}$$

一方  $\tau \ll \tau_s$ の時

$$V(t) \approx \frac{Q}{C} \cdot \frac{\tau}{\tau_s} (e^{-t/\tau_s} - e^{-t/\tau}) \dots\dots\dots \text{(式 5-15)}$$

回路系の時定数  $\tau$  がシンチレータの減衰定数  $\tau_s$  より大きい場合出力波形の上昇は  $\tau_s$  に、また下降は  $\tau$  に依存し、その最大波高値は  $Q/C$  となります。逆に回路系の時定数  $\tau$  が  $\tau_s$  より小さい場合出力波形の上昇は  $\tau$  に、下降は  $\tau_s$  に依存し、その最大波高値は  $Q/C \cdot \tau / \tau_s$  となります。一般的に高いエネルギー分解能が期待できることから  $\tau \gg \tau_s$  で使われることがほとんどですが、これはチャージセンシティブアンプ出力の波高値が入力信号の揺らぎに影響されにくくなるためです。しかし  $\tau$  が大きいためパルス幅が長くなり、繰り返しが多いとパイルの重なりを起こしやすくなります。高計数率測定が必要なときは  $\tau$  を小さくすればシンチレータの減衰時間と同程度の出力波形を作ることができますが、エネルギー分解能は犠牲になります。

高計数率性とエネルギー分解能のどちらを重要視するか、その用途により時定数  $\tau$  を設定することになります。時定数を変える時は、一般的に負荷容量は問題のない範囲で小さい値をとり、抵抗の値を決定します。NaI(Tl)シンチレータを使用する場合には、通常数  $\mu\text{s}$  から数十  $\mu\text{s}$  の時定数を選びます。

シンチレーションカウンティングにおいて、チャージセンシティブアンプ回路に発生する雑音はエネルギー分解能の劣化を招きます。雑音としては増幅器をはじめとする回路構成要素自体から生ずるもの以外に、図5-61で示す入力ケーブルなどの分布容量  $C_s$  に注意する必要があります。光電子増倍管からの出力電荷は  $C_f$  と  $C_s$  に分配して蓄積され、それが雑音の原因となります。そのためSN比を向上させるためには  $A \cdot C_f / C_s$  を大きくする必要があります。しかし実際には  $A \cdot C_f$  は種々の制約により一定値以上には大きくできず、 $C_s$  を可能な限り小さくしてこの問題に対処する方法を採用しています。

シンチレーション測定では前置増幅器を光電子増倍管の近傍に置きケーブルによる容量の影響を少なくします。

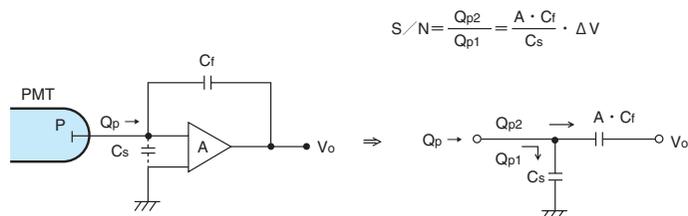


図 5-61 入力分布容量の影響

THBV4\_0561JA

### 5.3.4 高速光電子増倍管の出力回路

高速のパルス光の検出には、光電子増倍管と後続回路を通常  $50 \Omega$  の特性インピーダンスを持つ同軸ケーブルで接続します。

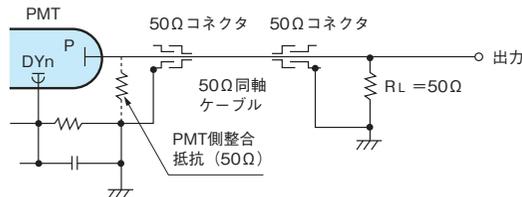
このとき、信号出力波形を忠実に伝送するためには、図5-62のように、少なくとも出力端を同軸ケーブルの特性インピーダンスと同一の純抵抗で終端することが必要になります。それにより、光電子増倍管から見たインピーダンスはケーブルの長さとは無関係に一定となり、観測波形のリングングを軽減することができます。ただしMCP内蔵型光電子増倍管などを使用して、信号の立ち上がりが  $1 \text{ ns}$  以下となるような超高速の現象を観測する場合は、ケーブルを長くしすぎると、同軸ケーブル自体の損失により信号波形が歪むため注意が必要です。出力端においてインピーダンスの不整合があると光電子増倍管から見たインピーダンスが周波数によって異なり、さらにその値が同軸ケーブルの長さによっても影響されるため、出力にリングングを生ずることがあります。この不整合は同軸ケーブルと終端抵抗のみならず、使用するコネクタ自体、あるいは同軸ケー

ブルの端末処理によって生ずる場合もあるため、コネクタの選択、同軸ケーブルの光電子増倍管やコネクタとの接続にもインピーダンスの不連続点ができないように十分な注意が必要です。

同軸ケーブル終端部にインピーダンスの不整合があると、出力信号のエネルギーが出力端で100%消費されず、一部が反射されて光電子増倍管側に戻ってくるようになります。さらに光電子増倍管側に整合抵抗がない場合には、光電子増倍管の陽極は開放端であるため、その信号は陽極で反射されて再び出力端に向かい、主パルス後に同軸ケーブル内の往復時間分遅れたパルスとして計測されます。さらに信号はその全てのエネルギーが消費されるまで往復を繰り返すため、結果として出力端にリングングを生じます。ここでインピーダンス整合が取れていない信号源と受信部での高速信号の反射に関して、特性インピーダンス50Ωで静電容量が100 nF/kmの同軸ケーブルを長さ1 mで接続した場合で考えてみると、計算上では約10 nsごとに、反射した信号が減衰しながらも受信部に戻ってきてしてしまうことになります。この現象に対してある程度の効果が期待できる対策としては、出力端のみならず、光電子増倍管側においても整合をとることでありますが、この場合には出力端のみの整合の場合と比較して、出力電圧は半分になります。高速応答を求めない用途で光電子増倍管を使用する場合や、同軸ケーブルが短い場合には、光電子増倍管側の整合抵抗は必ずしも必要としないため、これを取り付けるかどうかは実験によって決定します。なお、光電子増倍管の種類によっては出力インピーダンスが50Ωに整合されているものもあり、その場合には光電子増倍管側の整合抵抗は不要となります。

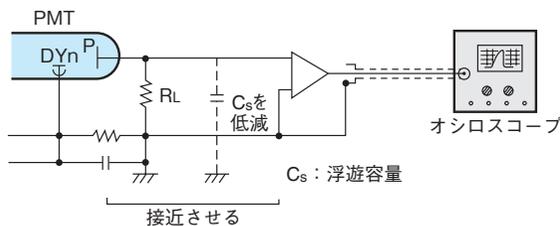
オシロスコープを使用して高速パルス波形を計測する場合は次のとおりです。

整合抵抗で終端した同軸ケーブルは、ある程度まではその長さが特性に影響を与えないという利点がありますが、一般的に整合抵抗の値は50Ω～100Ωと低く、出力電圧もそれに従って非常に低いものとなるため、場合によってはゲインの大きな広帯域増幅器を使用する必要が生じます。しかし、そのような増幅器は雑音も大きく、入力信号が微弱な場合は測定が困難になることがあります。このような場合はむしろ図5-63のように、光電子増倍管と増幅器をできるだけ接近させて浮遊容量を減少させ、その上で周波数特性に影響のない範囲で大きな負荷抵抗 $R_L$ を使用し、希望の出力電圧を得るようにした方が有利となります。



THBV4\_0562JA

図 5-62 出力回路のインピーダンス整合方法



THBV4\_0563JA

図 5-63 増幅器の使用

高速・広帯域増幅器はビデオ用、またはパルス用ICを用いて比較的簡単に製作することができます。しかしICはその便利さと引き換えに、雑音を始めとするさまざまな問題を生じやすく、使用に際してはその特性を十分に把握して対処する必要があります。

本章5.3.2で詳しく述べたように、パルスの繰り返し周波数が高くなった場合の注意点として「ベースラインシフト」と呼ばれる現象があります。これは信号回路の一部でカップリングコンデンサを使用して直流分を遮断した時に生じるもので、観測されるゼロレベルが本来の接地レベルではなく、出力パルスを平均したレベルに移動することです。また増幅器を含めた観測系の分解時間内に複数のパルスが入った場合、それらが加算されて一つの大きなパルスとなる、いわゆるパイルが重なる問題も生じるので、特に波高弁別器などを使用して出力パルス一つ一つの高さを問題にする場合には注意する必要があります。

### 5.3.5 光電子増倍管測定におけるアンプの選択

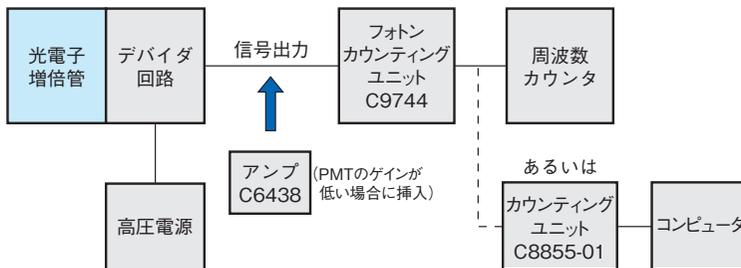
接続するアンプは具体的にどのようなものを選択すればよいか、また回路構成について浜松ホトニクス製を例に説明します。加えて、取扱い上の配慮についても述べます。

計測する光が極微弱光であれば、シングルフォトンカウンティングでの計測がSN比の点で有利です。シングルフォトンカウンティングの領域より光量が大きければ、アナログでの計測となります。

#### (1) シングルフォトンカウンティングの場合（第6章フォトンカウンティング法参照）

図5-64のようなシステムを構成し、基本的に光電子増倍管のゲインを $3 \times 10^6$ 程度となるように設定します。信号出力にフォトンカウンティングユニットC9744、その後ろに周波数カウンタをつなげて計測します。

コンピュータ（パソコン、PC）へのデータ転送を行う場合は、周波数カウンタの代わりにインターフェースをもったカウンティングユニットC8855-01などをつなげます。光電子増倍管のゲインが $3 \times 10^6$ より低い場合には、光電子増倍管とC9744の間にC6438などの広帯域アンプ（周波数特性の高いアンプ）を接続します。



THBV4\_0564JA

図 5-64 シングルフォトンカウンティング測定のための構成例

## (2) アナログ計測の場合

計測する光量・必要な周波数帯域（信号の速さ）・出力の大きさ（出力電圧値）・極性を考慮して、アンプを選択する必要があります。必要な周波数帯域より少し高い周波数特性のアンプを選び、予想される陽極出力電流にアンプの電流電圧変換係数を掛けてアンプ出力として取り出す電圧値を算出し、それが必要な出力電圧範囲となるようにします。

ここで必要な周波数帯域は、陽極出力の上昇時間より、以下の式で求められます。

$$\text{周波数 (MHz)} = 350/\text{上昇時間 (ns)} \dots\dots\dots \text{(式 5-16)}$$

例えば、3.5 nsの立ち上がり時間を計測したいのであれば100 MHz以上、35 nsであれば10 MHz以上の周波数特性をもったアンプが必要となります。なお、ここで算出した周波数帯域は一般的に用いられている定義で、アンプゲインが3 dB低下するまでの値です。これに対して最大周波数までアンプゲインを低減させることなく保ちたい場合には、さらに1.4倍程度余裕をもった周波数帯域とします。

アンプの周波数特性については、必要以上に高い周波数特性のアンプを使用すると、雑音が大きくなる可能性がありますので、適正な周波数範囲とすることが重要です。

なお、アナログ計測に対してA/D（アナログ/デジタル）変換して使用する時は、サンプリングの定理によりアンプの周波数特性の少なくとも2倍以上の周波数でのサンプリングが必要となります。

高速信号を測定するためのタイミング信号を増幅する用途などには高速のアンプ（C5594シリーズ等）が必要になります。高速アンプでは、内部でACカップリングされることが多いため直流を含む低い周波数成分はカットされます。また、カットオフ周波数付近の信号成分を入力すると増幅が十分に行われず、波形も歪みますので注意が必要です。

## (3) アンプの取り扱い留意点

アンプには過大入力に対する保護回路が入っているものもありますが、過渡的なピーク電流の高い雑音が入力された場合には、アンプを破損してしまうことがあります。また、アンプ回路には信号の入力側と出力側や電源入力に対する正負の極性があり、誤った接続をした際にも故障の原因となります。このため、次のことに注意して使用します。

- ・光電子増倍管に高電圧を供給したままの状態、陽極出力（信号線）のアンプへの取付け取外しを行うことは絶対に避け、測定系の配線を全て行った上でアンプの電源を入れ、その後に光電子増倍管に高電圧を供給します。また、終端されていない陽極出力（信号線、特に同軸線）には電荷が溜まっていることがありますので、陽極出力はGNDに短絡させて、帯電電荷を除去した後にアンプに接続します。
- ・アンプへの電源供給に関して、極性を正しく接続していることを確認します。また、定電圧電源を用いて定格電圧を守るようにします。
- ・あらかじめ光電子増倍管の最大出力電流の見極めをして、入力する信号レベルはアンプの定格を超えないように調整しておきますが、実際の使用で定格を超えてしまう場合には、入射光量の調整や光電子増倍管のゲインを下げるなどして、アンプの出力が適正な範囲となるようにします。
- ・測定を終了する場合には、まず光電子増倍管の高電圧を徐々に下げてから高圧電源をオフにした後、アンプの電源をオフとする手順を踏みます。

周波数特性、電流電圧変換係数などさまざまなものがあり、目的にあったアンプを選択できます。形状としては、主な製品は卓上で使用できるユニット型となりますが、基板実装に適したM7279、M8879などのモジュール型もあります。

型名	周波数帯域 (-3 dB)	電流電圧変換係数	出力極性	
C7319	DC ~ 20 kHz DC ~ 200 kHz (切替)	0.1 V/ $\mu$ A, 1 V/ $\mu$ A, 10 V/ $\mu$ A (切替)	反転出力	
C12419	DC ~ 1 MHz	1 V/ $\mu$ A	反転出力	
C9999	DC ~ 10 MHz	50 mV/ $\mu$ A	非反転出力	
C9999-01		10 mV/ $\mu$ A	反転・非反転出力(スイッチ切替)	
C6438		DC ~ 50 MHz	0.5 mV/ $\mu$ A	非反転出力
C6438-01			25 mV/ $\mu$ A	非反転出力
C6438-02	5 mV/ $\mu$ A		反転・非反転出力(スイッチ切替)	
C9663	DC ~ 150 MHz	4 mV/ $\mu$ A	非反転出力	
C11184	DC ~ 300 MHz	1.25 mV/ $\mu$ A	非反転出力	
C5594	50 kHz ~ 1.5 GHz	3.15 mV/ $\mu$ A	非反転出力	
M7279	DC ~ 10 MHz	10 mV/ $\mu$ A	非反転出力	
M8879	DC ~ 150 MHz	4 mV/ $\mu$ A	非反転出力	

表 5-2 浜松ホトニクス製アンプ



図 5-65 浜松ホトニクス製アンプユニット

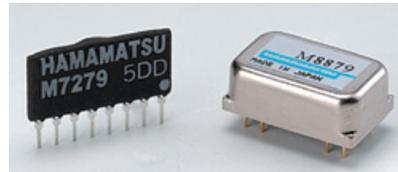
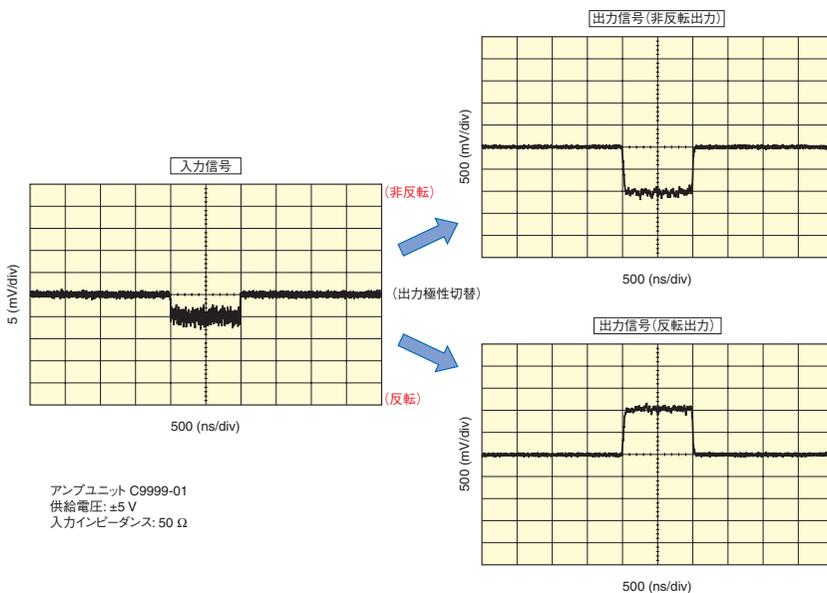
図 5-66 浜松ホトニクス製アンプモジュール  
左：M7279, 右：M8879

図 5-67 アンプユニット C9999-01 の出力例

## 5.4 ハウジング

ハウジングは光電子増倍管を収納するケースで、役割は次のとおりです。

- ・ 不必要な光の遮蔽
- ・ 外部電界の影響の除去
- ・ 外部磁界の影響の軽減

以下、これらの点について説明します。

### 5.4.1 光の遮蔽

光電子増倍管は非常に感度の高い光検出器であり、漏れ光はノイズ源となるため、不必要な光の遮蔽には特に配慮する必要があります。例えばハウジングにコネクタを介して信号の入出力を行う場合は、コネクタ自体、さらにはその取付け穴やビス穴からの光漏れも考えられます。また、ハウジング構成部品のはめ合いやフタの構造などについても同様の注意が必要です。

この対策として、コネクタやその他の部品をハウジングに取付ける場合には、光漏れの可能性のある箇所に黒色シリコンゴムなどを使用して目止めをする必要があります。加えてハウジング構成部品についても、はめ合い部に黒色の緩衝性のあるソフトテープやOリングなどで隙間を埋め、内部も光の乱反射を防ぐために黒色のつや消し塗装を施しておくことが必要です。

### 5.4.2 電界の遮蔽（シールド）

ハウジングは耐久性や加工性の点でアルミニウムなどの金属で作られるものが多く、電気的には導通を取ることができることから、接地電位に保っておけば外部電界をシールドハウジング内部へのその影響を軽減できます。ただし、一般的にアルミニウムの表面にはアルマイトなどの酸化被膜処理が施されており、この被膜の上からでは電気的な導通は取りづらくなっているため、必要に応じて酸化膜の除去を行って使用します。また、ハウジング内部は乱反射を防ぐ目的で黒色塗装を施すことが多いため、こちらの場合でも必要に応じて塗料の除去を行い、接地線との接続部が接触不良とならないようにします。なお、接地電位が光電子増倍管の側管に近付くと雑音が増大する原因となるので、ハウジングの内部寸法は光電子増倍管に対して余裕を持たせる必要があります。

### 5.4.3 磁界の遮蔽（シールド）

第13章にて述べますが、光電子増倍管は磁界に非常に敏感で、地磁気程度（東京付近で約0.045 mT：ミリテスラ）でも特性に悪影響を受けます<sup>4)</sup>。そのため精密測光、および強磁界中での測光には磁気シールドを使用します。しかし、電界の場合と違って磁界を完全に遮断することは不可能です。このため高透磁率の金属で周りを囲んで、外部磁界の影響を「軽減する」しか方法はありませんが、遮蔽は完璧ではないので、磁界の強度や周波数などで適宜シールド材および方法を変える工夫を要します。

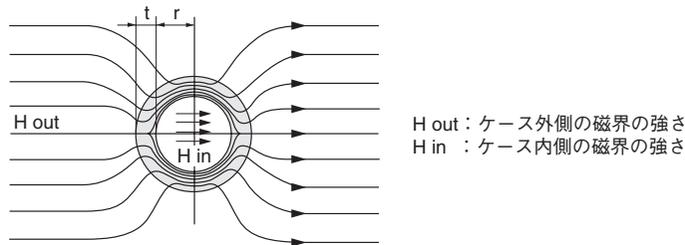
なお一般的な用途では高透磁率材料を筒形にしてその中に光電子増倍管を収めれば対策できます。シールド材としてはパーマロイ（鉄ニッケル軟質磁性材料）が優れています。パーマロイの中でも、高透磁率で低保磁力なPC材がよく使用されます。（PCとはJIS規格で定められているパーマロイの種類であり、比較的ニッケルを多く含む材料です。また鉄の含有量が多いPBもあります。）これらを磁気シールドケースと称し、以下にその特性を述べます。



図 5-68 磁気シールドケース E989 シリーズ

### (1) 磁気シールドケースの遮蔽度と磁界の方向性

光電子増倍管は外部磁界の影響を受けやすく、特にヘッドオン型は顕著です。そのため磁気の影響をなくす場合や磁界中で動作させる場合には磁気シールドを施す必要があります。透磁率の高い物体中では磁界が弱くなるという性質を利用して、希望するシールド効果を上げることができます（第13章参照）。ここでは、図5-69を使ってシールド材による磁気シールド効果を示す基準(遮蔽度)を式で表します。



THEV4\_0569JA

図 5-69 磁気シールドケースの遮蔽

実際の光電子増倍管用の磁気シールドケースはパーマロイなどの高透磁率材料で作られており、その遮蔽度は次式のようにケースの外側と内側の磁界の比で表されます。

$$S = \frac{H_{out}}{H_{in}} = \frac{3t\mu}{4r} \dots\dots\dots (式 5-17)$$

ここでSは遮蔽度、 $H_{out}$ 、 $H_{in}$ はそれぞれ外側、内側の磁界の強さ、tは磁気シールドケースの厚さ、rはその内半径、 $\mu$ は透磁率です。径の異なる二つ以上の磁気シールドケースを併用する場合の合成遮蔽度S'は次式のように各々のSの積となり、大きな遮蔽度を得ることができます。

$$\begin{aligned}
 S' &= S_1 \times S_2 \times S_3 \dots S_n \\
 &= \frac{3t_1\mu_1}{4r_1} \times \frac{3t_2\mu_2}{4r_2} \times \frac{3t_3\mu_3}{4r_3} \times \dots \times \frac{3t_n\mu_n}{4r_n} \dots\dots\dots (式 5-18)
 \end{aligned}$$

磁気シールドを施すとケース内部にある光電子増倍管にかかる磁界 $H_{in}$ は、 $H_{out}/S$ に減少するため、シールドのなかった時と比べ遮蔽度倍された磁界まで耐磁気特性が向上することになります。例えば磁気シールドの遮蔽度10、外部磁界3 mTの場合、0.3 mTの磁界中に置かれているのと同じ状態となります。実際には後述する端末効果などで完全に遮蔽度倍された磁界まで特性が向上するというわけではありませんが基本的な考え方としては正しいです。

図5-70は $\phi 25.4$  mm径ヘッドオン型光電子増倍管に0.6 mm厚のPC材 (Ni-Fe-Mo-Cu)で作られた磁気シールドを施したものの磁気特性ですが、X、Y軸ともに磁気シールドの効果が現れています。これらの軸では磁気シールドの遮蔽度は同じはずで、シールドのない時の磁気特性がX軸よりY軸の方が優れているため、シールドをした時の特性もY軸の方が良くなっています。また磁気シールドの管軸方向であるZ軸では磁気シールドを施した方がむしろ悪くなっています。これは端末効果の項でも述べていますが、シールドの端面近くで磁界の方向が曲げられているためと考えられます。

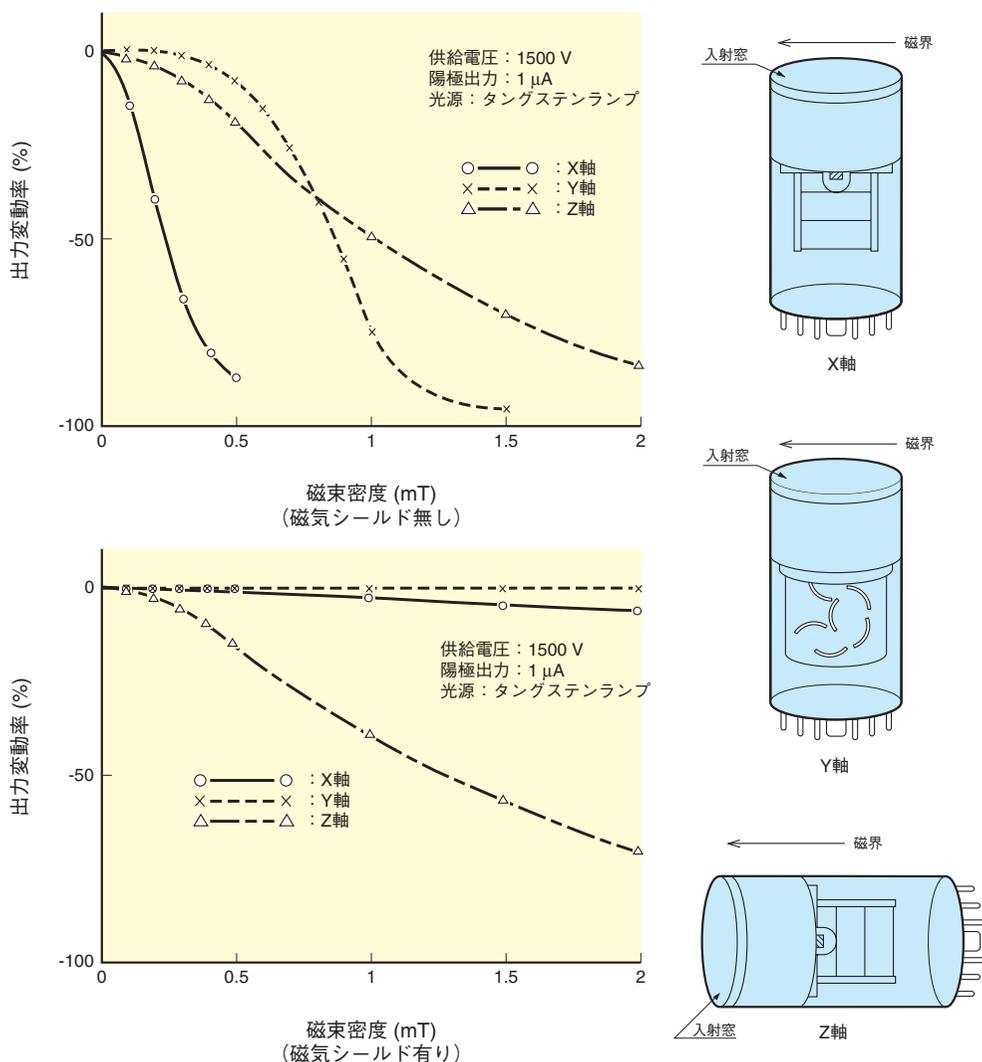


図 5-70 光電子増倍管の磁気特性

## (2) 飽和特性

外部磁界 $H$ と磁性体内部の磁束密度 $B$ との関係( $B$ - $H$ 曲線)をとると、図5-71のような飽和特性を示します。

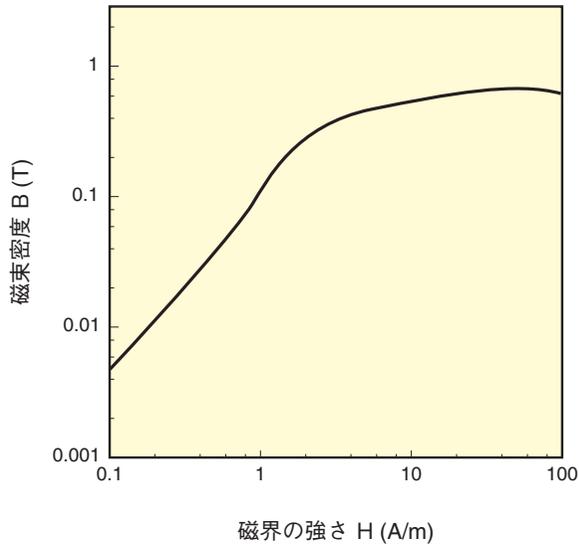


図5-71 直流磁化曲線 (B-H曲線)

THBV4\_0571JA

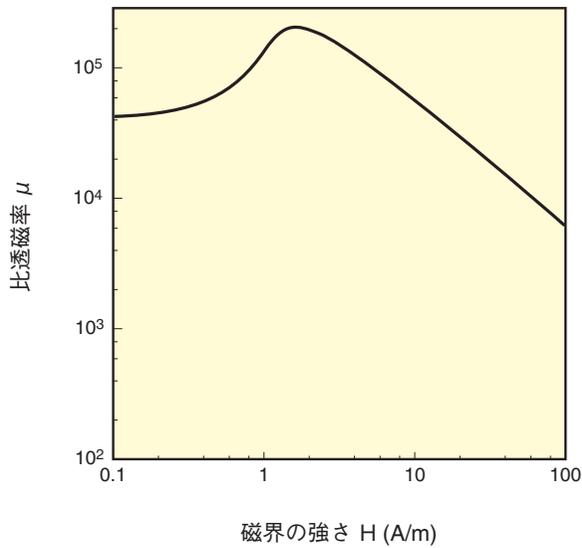


図 5-72 外部磁界と透磁率

THBV4\_0572JA

磁性体の比透磁率 $\mu$ は $B/H$ で与えられるため、外部磁界と比透磁率の関係は図5-72のように極大値を持ち、ある磁界強度以上では急激に透磁率と遮蔽度が低下していきます。これらの図は浜松ホトニクス製磁気シールドケースE989-05 (0.8 mm厚)で管軸に直角な方向から磁界をかけた時の特性です。

磁気シールドケースにはニッケルの含有量の多いPC材が使われているため、透磁率は非常に高いものの飽和磁束密度は高くありません。地磁気程度の磁界に対しての遮蔽度はおよそ $10^3$ と非常に高く、地磁気のシールドには特に効果があります。ニッケルの含有量の少ないPB材 (Ni-Fe) はPC材と比べ透磁率は低いものの、飽和磁束密度は高くなります。図5-73、-74はPC材とPB材を使った時の光電子増倍管の磁気特性を示しています。磁界が高くなるとPC材は急激に出力が落ちますが、PB材は出力の下がり方が緩やかです。特に強い磁界中では飽和磁束密度の高い3 mm ~ 10 mm程度の厚手のPB材や軟鉄などの磁気シールド材を併用する必要があります。

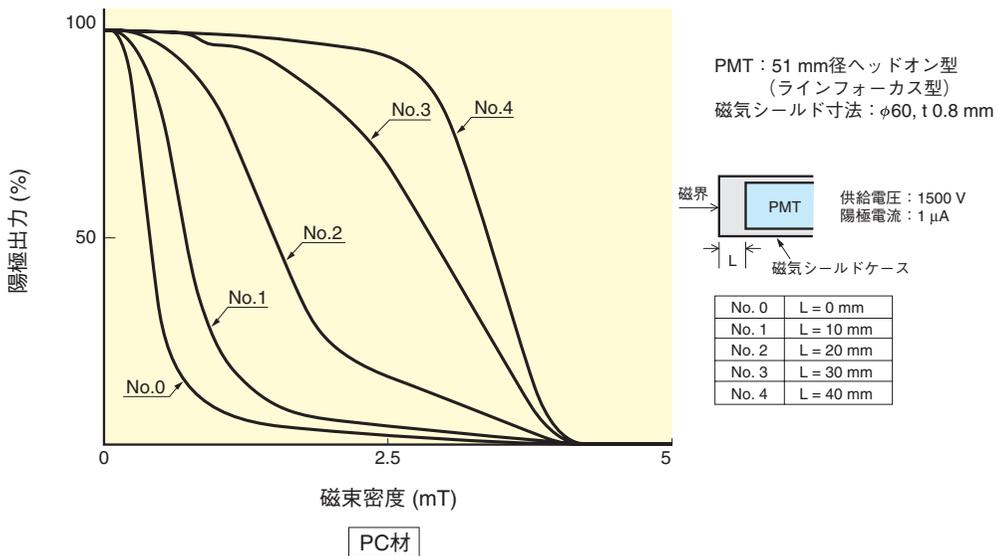


図 5-73 シールドケース (PC 材) で遮蔽された光電子増倍管の磁気特性

THBV4\_0573JA

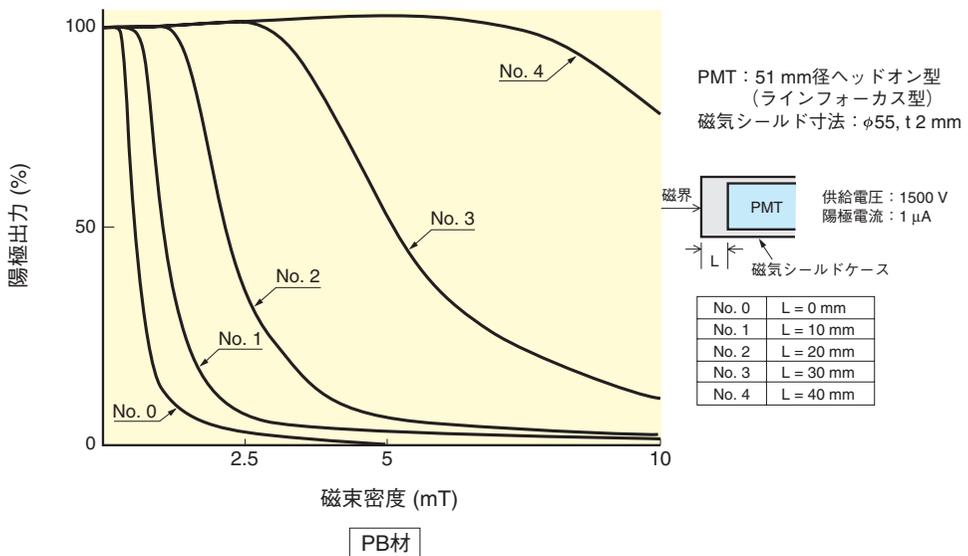


図 5-74 シールドケース (PB 材) で遮蔽された光電子増倍管の磁気特性

THBV4\_0574JA

### (3) 周波数特性

以上の磁気シールドケースの特性はすべて直流磁界中で示されています。それに対して交流磁界中では、図5-75に示すように周波数が高くなるに従い遮蔽度が低下します。特に肉厚の厚いもの程遮蔽度の劣化が大きいいため、1 kHz ~ 10 kHzといった高周波磁界中ではむしろ0.05 mm ~ 0.1 mm程度の薄い磁気シールド材を使用する方が望ましいです。すなわち磁気シールドケースの厚さは飽和磁束密度と周波数特性との兼ね合いで決定する必要があります。

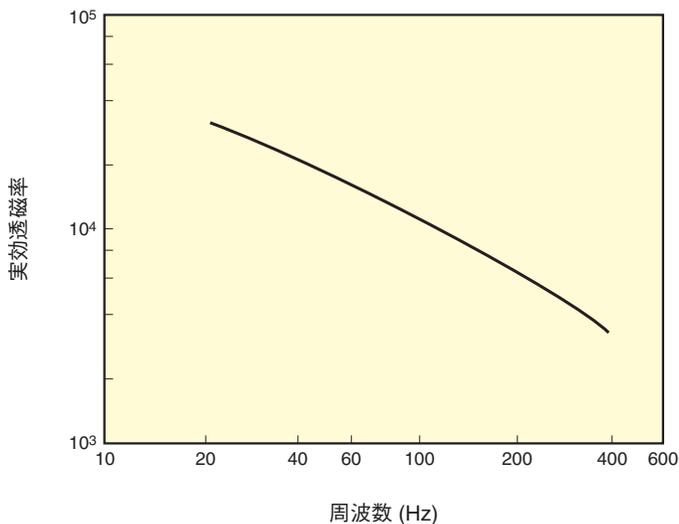


図 5-75 磁気シールドケース周波数特性

THBV4\_0575JA

### (4) 端末効果

前述の式5-17 ( $3t\mu/4r$ ) で与えられる遮蔽度は、光電子増倍管の全長に対して磁気シールドケースが十分に長い場合でのことです。測定光からの距離や光学系との接続を考えた場合、シールドケースの長さは光電子増倍管より数mmから数cm長くするのが現実的であり、その両端では図5-76のように遮蔽度が低下します。磁界の影響を受けやすいのは特に陰極—第1ダイノード間であるため、磁気特性を重視する用途では、この付近の磁気シールドには特に配慮が必要です。このためヘッドオン型光電子増倍管の場合、光電面を磁気シールドケースの端より半径ないし直径分程度まで潜り込ませる必要があります。

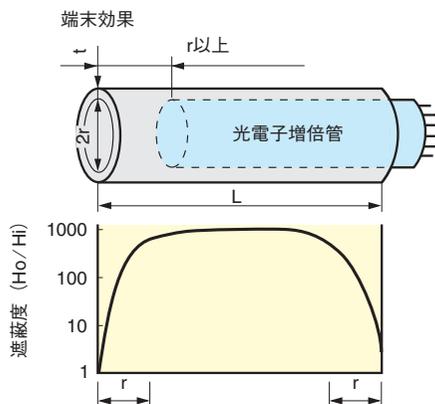


図 5-76 端末効果

THBV4\_0576JA

## (5) 光電子増倍管の磁気特性とシールド効果

各種光電子増倍管の磁気特性(磁界と陽極出力の関係)、および磁気シールドケース(浜松ホトニクス製E989シリーズ)を使用した場合の遮蔽効果を示します。数mT程度の磁束密度では、磁気シールドケースを使用した場合、磁界の影響は大幅に軽減されることがわかります。

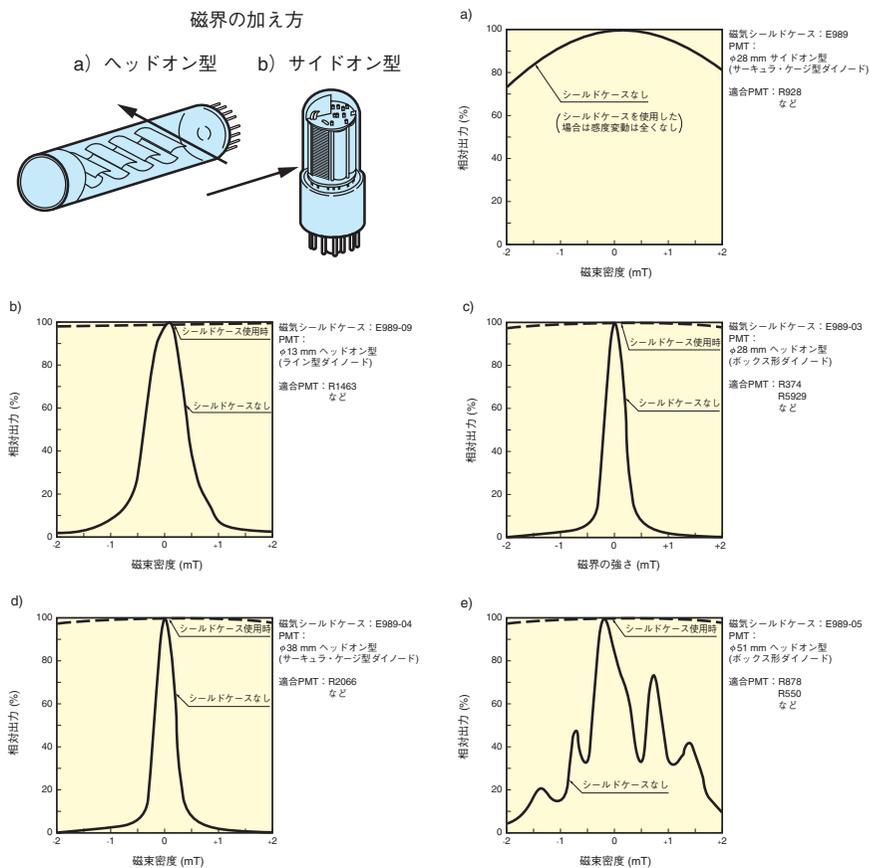


図 5-77 磁気シールドケースの効果

## (6) 磁気シールドケースの取り扱い

PC材などの磁気シールドケースは機械的衝撃や変形で容易にその特性が劣化し、一旦劣化すると特殊な焼鈍(焼きなまし)を施さないと回復しません。このため穴あけや研削などの加工は特別な技術が必要で、取り扱いには細心の注意をしなければなりません。

陽極接地とした場合の光電子増倍管では、入射窓部や側管は負高圧に帯電しているため、接地電位がこれらの部位に接近すると雑音が大幅に増加します。このため磁気シールドケースは光電子増倍管の直径に比べて大きめのものを使用しますが、光電子増倍管をその中心部になるように取り付けないと電気的な問題が起こります。そこで、光電子増倍管にソフトテープなどの緩衝材を巻き、磁気シールドケースとの隙間が均一となるような方法が採られます。この場合、光電子増倍管には高電圧が供給されるため、使用する材料は絶縁性に優れたものを選択する必要があります。

HA処理を施した光電子増倍管(第13章13.8.2参照)を使用するときや、陰極接地・正高圧供給方式の場合以外には、磁気シールドケースを5 M $\Omega$  ~ 10 M $\Omega$ の抵抗を介して陰極電位に接続すれば雑音の影響を受けにくくなります。ただし、感電防止などの安全確保のために磁気シールドケースの絶縁に配慮しておきます。

磁気シールドケースの組み込み例として、浜松ホトニクス製のハウジングとフランジの構造を図5-78、-79に示します。これらは、光電子増倍管およびソケットアッセンブリ(デバイダ回路)、磁気シールドケースを容易に一体化できる構造となっています。さらに装置などへの取付けができるようフランジが設けられています。

### ハウジング ヘッドオン型光電子増倍管用

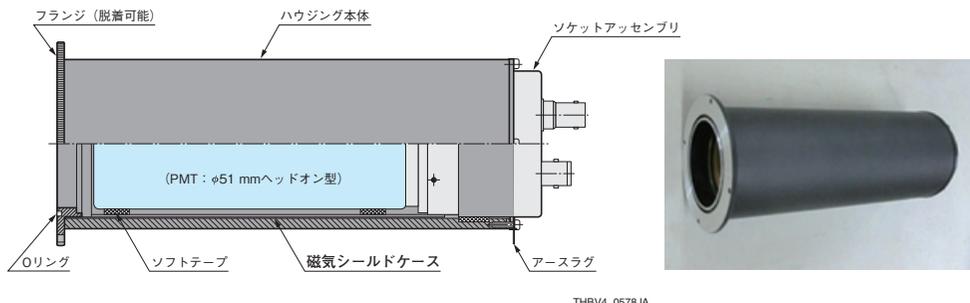
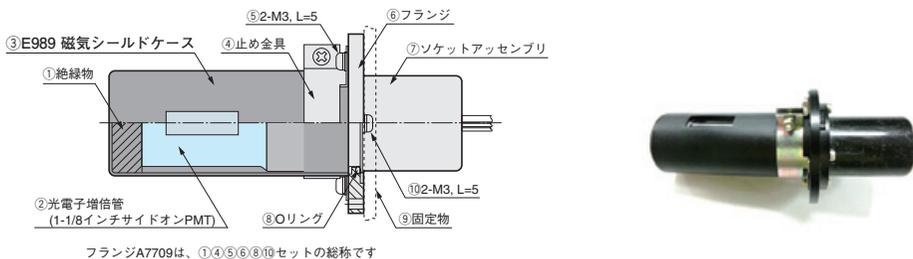


図 5-78 ハウジング E1341-01

### フランジ サイドオン型光電子増倍管用



フランジA7709は、①④⑤⑥⑧⑩セットの総称です

図 5-79 フランジ A7709

## 5.5 冷却

光電子増倍管の暗電流の一因として熱電子放出があることは第4章で述べましたが、一般的な使用電圧の範囲では、とりわけ光電面からの熱電子放出によるものが支配的になっています。そのため光電陰極を冷却すれば暗電流や雑音パルスを減らすことができ、SN比や検出限界を向上させることができます。測定条件によりますが、標準的な光電子増倍管では光電陰極の温度として0℃以下とすることがSN比向上のひとつの目安となります。さらに-30℃程度まで冷却できれば、大幅に熱電子放出の影響を低減できます。

一般的な冷却手段としては空冷、水冷、電子冷却などの方式があります。単純にヒートシンクなどだけを用いた空冷方式は構造が簡易である半面、冷却効果として周囲温度以下とすることは望めません。これに対し、水冷方式や電子冷却方式は周囲温度よりも温度を下げるためより効果的です。しかし、水冷方式、電子冷却方式のいずれも構造が大掛かりであったり、複雑となってしまいます。

浜松ホトニクスには、光電陰極を直接的に冷却し、室温時と比べ暗電流を低減させてSN比を1桁以上向上させることができる冷却サイドオン型光電子増倍管 R9182-01などがあります。これらの光電子増倍管は、光電陰極に直結して熱伝達できる金属天板によって効率良く冷却できます。

R9182-01、電子冷却素子、高効率の高圧電源を一体化し、約3分間で暗電流が室温時の1/50に低減できる小型の電子冷却素子内蔵型光センサモジュールH7844もあります。



図 5-80 冷却サイドオン型光電子増倍管 R9182-01



図 5-81 電子冷却素子内蔵型 光センサモジュール H7844

先に光電陰極を直接冷却できる製品について述べましたが、このように理想的に光電陰極を直接冷却できるものは限られており、実用として光電子増倍管全体を冷却します（光電子増倍管により使用できる温度が異なります）。

ここからは、光電子増倍管全体を冷却する方式の冷却器について説明をします。

図5-82に電子式冷却器と内部構造のイメージ図を示します。

冷却器C10372は51 mm径あるいは38 mm径ヘッドオン型光電子増倍管用、C10373はマイクロチャンネルプレート内蔵光電子増倍管（MCP-PMT）用、C9143とC9144は28 mm径サイドオン型光電子増倍管用です。冷却方式はC9144が空冷方式で、それ以外は水冷方式を採用しています。

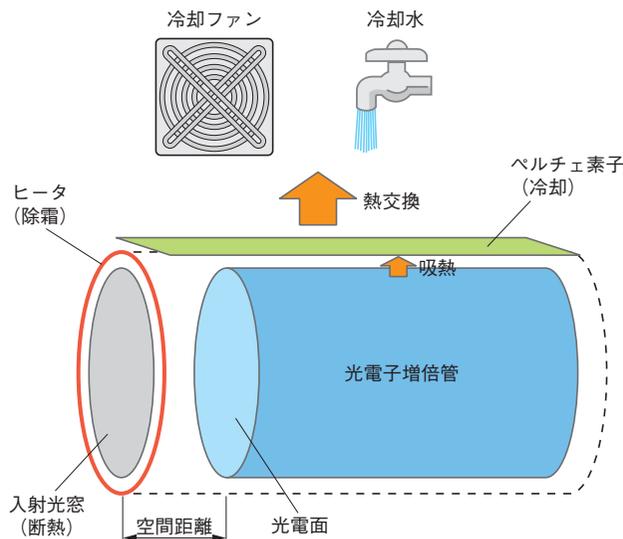
これらの冷却器では、冷却素子としてペルチェ素子を用いています。ペルチェ素子は、電流制御により冷却・加熱の温度制御を自由に行える半導体素子です。可動部分がないため、振動・騒音がなく信頼性が高いので、光電子増倍管の冷却に適しています。

冷却器にはペルチェ素子のほか、冷却により発生した熱を外部に排出するための熱交換器（ヒートシンク、冷却ファンや水冷循環器など）が含まれています。また、これらの冷却器では冷却温度が0℃以下まで及ぶことから、冷却器の入射光窓には外気との断熱をするため真空封止された石英ガラスを採用し、さらに結露を防ぐために入射光窓周辺にヒータを配置しています。冷却を開始し最大冷却温度に到達するまでの時間は、C9143では約60分です（周囲温度20℃、冷却温度-30℃の場合）。

高感度測定に適したこれらの冷却器ですが、図5-82の内部構造にあるように入射光窓と光電面の間に空間があり、光を光電子増倍管に直接入射させることができません。光の強度は距離の影響を受けることがあるため、冷却器を使用する際は入射光窓と光電子増倍管の光電陰極（あるいは光電面）までの距離を考慮する必要があります。

これら距離による減衰を回避するには、レンズ等を用いた光学系で集光させるのが一般的です。

また、冷却能力は、周囲温度や水冷の場合は冷却水温度に左右されますので、周囲環境にも注意が必要です。さらに、ファンなどの熱交換器や水冷用配管の目詰まりなどは、著しく冷却能力を低下させる恐れがありますので、取扱説明書に沿ったメンテナンスが必要です。



THBV4\_0582JA

図 5-82 冷却器のイメージ図

冷却時に使用するソケットアッセンブリ（デバイダ回路を含む）にも特別な対策が必要です。断熱、放熱、結露、光電子増倍管への機械的熱ストレスなどの種々の問題を考慮する必要があり、対策を施さないソケットアッセンブリを使用した場合には、冷却能力が低下するだけでなく、光電子増倍管が結露して正常な測定ができなくなったり、結露による絶縁劣化が起こればデバイダ回路などを破損してしまうこともあります。浜松ホトニクス製の冷却器にはそれらの対策が施された専用のソケットアッセンブリ<sup>5)</sup>が用意されております。



ヘッドオン型光電子増倍管用冷却器  
C10372/C10373 シリーズ



サイドオン型光電子増倍管用冷却器  
C9143/C9144 シリーズ（アクセサリ含む）

図 5-83 冷却器の紹介（C10372/C10373、C9143/C9144）

## 第5章 参考文献

- 1) 浜松ホトニクス(株)：光電子増倍管と関連製品 (2015)  
PHOTOMULTIPLIER TUBES AND RELATED PRODUCTS
- 2) 宇田新太郎：新版 無線工学 I 伝送編. 丸善(株)
- 3) 浜松ホトニクス(株)：シンチレーション・カウンティング用光電子増倍管の使い方
- 4) 五十嵐 均他：ガンマカメラ均一性におよぼす磁場の影響  
EFFECT OF THE MAGNETIC FIELD TO THE UNIFORMITY OF A GAMMA CAMERA, 核医学 28巻, 2号(1991)  
Ref. to IMPROVEMENT OF 20-INCH DIAMETER PHOTOMULTIPLIER TUBES  
PUBLISHED BY A.SUZUKI (KEK,Tsukuba) AND OTHERS
- 5) 浜松ホトニクス(株)：光電子増倍管と関連製品  
PHOTOMULTIPLIER TUBES AND RELATED PRODUCTS

## 第 6 章

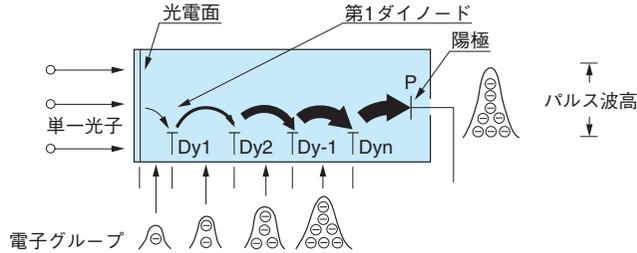
# フォトンカウンティング法<sup>1) 2) 4) ~ 12)</sup>

ここでは、蛍光分析、化学(生物)発光などのように光の絶対量が少なく極微弱な光の測定に使用されているフォトンカウンティング法の原理、使用法、特性、利点および代表的な光電子増倍管 (PMT) の特性について記述します。

## 6.1 アナログ方式とデジタル(フォトンカウンティング)方式

光電子増倍管に入射する光の強さと、出力処理回路の構成、帯域によって処理の方法がアナログ方式とデジタル方式に分けて考えることができます。

図6-1に示すように、光電子増倍管に光が入射すると光電面から光電子が放出され、その電子は電子増倍部で段階的に増幅(通常 $10^6$ 倍～ $10^7$ 倍)され陽極に達し、出力処理回路に接続されます。

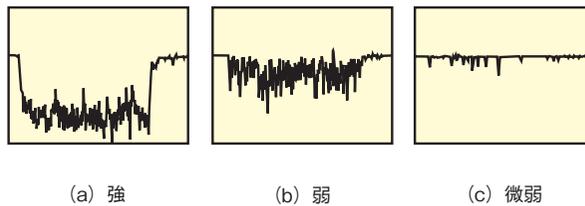


THBV4\_0601JA

図 6-1 フォトンカウンティング法における光電子増倍管の動作

ここで入射する光の強さを変えて光電子増倍管の出力信号をオシロスコープで観測すると(図6-2)、光が強い領域では、光電子増倍管出力信号のパルス間隔が狭いためおのおの重なり合ったアナログ波形となります(図6-2(a),(b))。しかし、光が弱くなると交流分(ゆらぎ)の割合が増え、最終的にはおのおのが離散したパルス状となります(図6-2(c))。このパルス状になったものを二値化して計数する方法をデジタル方式、通常フォトンカウンティング法と呼ばれています。

アナログ計測では、図6-2(a)の交流成分を含んだ平均値が信号になるのに対し、フォトンカウンティング法では図6-2(c)における各パルスの数が信号になります。後者は波高弁別器(ディスクリミネータ)により、ノイズ成分の分離がしやすく、安定性が高いこと、アナログ法に比べ高SN比で測定を行えるという利点があり、微弱光領域で非常に有効な計測方法です。



THBV4\_0602JA

図 6-2 異なる光強度レベルにおける光電子増倍管からの出力波形

## 6.2 フォトンカウンティング法の原理

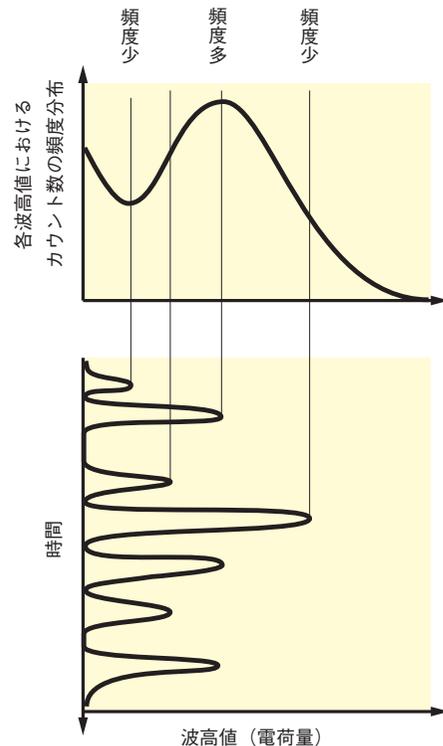
光量が微弱になると光電子増倍管の時間分解能(パルス幅)内に、2個以上の光電子がほとんど存在しない状態になります。これを単一光電子領域といい、フォトンカウンティング法はこの領域で行なわれます。フォトンカウンティング法で重要となる量子効率、一個の光子が光電面に入射したときの光電子の発生確率を意味します。単一光電子領域では、1光子あたりの放出電子数は1または0しかないため、単位時間当りの光電面からの放出電子数と光電面への入射光子数との比が量子効率と考えることができます。光電面より放射された光電子(一次電子)のうち、第1ダイノードに入射し増倍に寄与する光電子の確率を収集効率と呼んでいます。光電子には一部第1ダイノードに収集されないなど、正規の軌道をとらず増倍に寄与しないものもあります。また、フォトンカウンティング法において計数值(出力パルス数)の入射光子数に対する割合をフォトンカウンティング領域における光電子増倍管の検出効率または計数効率といい、次式で表わされます。

$$\text{フォトンカウンティング領域における検出効率(計数効率)} = (N_d / N_p) = \eta \cdot \alpha \quad \dots \text{(式 6-1)}$$

ここで  $N_d$  は計数值、 $N_p$  は入射光子数、 $\eta$  は光電面の量子効率、 $\alpha$  は電子増倍部の収集効率です。検出効率は二値化する際のしきい値にも大きく依存します。

第1ダイノードにおける二次電子の個数は光電面からの一次電子一個に対して数個程度の離散量になるため広がりをもち、簡易的にはポアソン分布とみなされ、その平均電子数が二次電子放出比  $\delta$  となります。

同様のことが、第2ダイノード以降のダイノードについてもいえ、最終の電子グループが光電面からの光電子に対応して陽極へ出力として現われます。n段のダイノードを持つ光電子増倍管では、光電面からの光電子は、 $\delta^n$  倍に増倍された一つの電子群となり陽極からパルス出力されます。このとき、陽極での各出力パルスは、各ダイノードでの二次電子増倍比のゆらぎ(増倍による統計的ゆらぎ)や、ダイノードの場所による増倍率の不均一性や、本来の増倍過程を通らない電子などにより波高値に分布をもちます。陽極からのパルスを時間的に積算し、波高値を横軸に取ったヒストグラムを図6-3に示します。これをパルス波高分布(Pulse Height Distribution)といいます。図6-3には時系列でみた光電子増倍管出力パルスとの関係も示します。パルス波高分布は放射線計測に用いられるマルチチャンネル波高分析器(Multi Channel Pulse Height Analyzer: MCA)などで得ることができます。

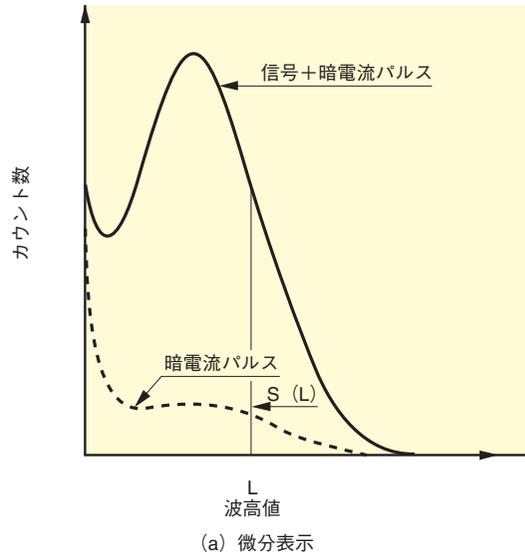


THBV4\_0603JA

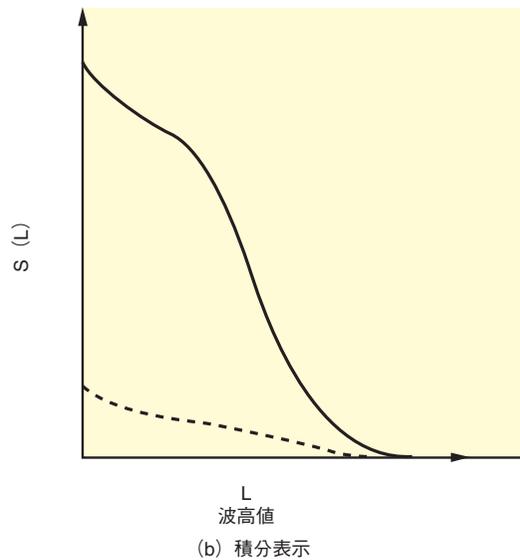
図 6-3 光電子増倍管の出力とパルス波高分布

図6-4(a)にあるパルス波高分布の例を示します。光電子増倍管は光が入射していない時でもいくらかの出力(暗電流パルス)を生じています。図の破線は光電子増倍管の暗電流パルスを示したもので、やや低波高部(左側)に偏ったものになります。これは光電面からの熱電子放出の他にダイノードからの熱電子放出があるためです。ダイノードからの熱電子は、光電面からの電子に比べ増倍回数が少ないため、低波高となります。

図6-4(b)は、しきい値 $L$ より大きな波高値をもつパルス全部の計数値 $S(L)$ をプロットしたもので、(a)と(b)は微分と積分の関係にあり(b)は積分曲線です。通常のフォトンカウンティング装置ではこの積分曲線が得られます。



THBV4\_0604JAa



THBV4\_0604JAb

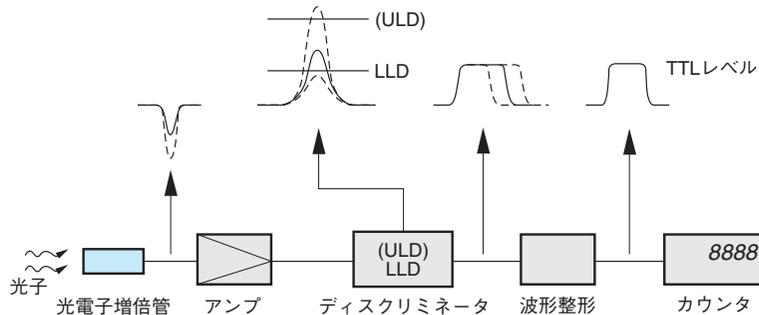
図 6-4 パルス波高分布の微分表示と積分表示

## 6.3 フォトンカウンティング法の動作法と特性

ここでは、フォトンカウンティングを行う場合の具体的な回路構成、フォトンカウンティング法による計測上の基本的特性を述べます。

### (1) 具体的な回路構成

図6-5にフォトンカウンティング法の回路構成と各回路系におけるパルス波形を示します。



THBV4\_0605JA

図 6-5 具体的な回路構成

光電子増倍管からの電流出力パルスは広帯域のアンプで電圧変換、増幅され、波高弁別器(ディスクリミネータ)、波形整形回路を経てカウンタで計数されます。ディスクリミネータでは、あらかじめ設定された基準電圧(しきい値)と比較して、波高値がそれに満たないものは排除されます。一般的には低波高側に基準電圧を設定した LLD (Lower Level Discriminator) を設定します。また、高波高側にも ULD (Upper Level Discriminator) を設けて高波高ノイズを除去する場合があります。カウンタにはゲート回路が設けられ、任意の計数時間が設定できます。

### (2) フォトンカウンティング法における基本的特性

#### a) パルス波高分布とプラトー特性

マルチチャンネル波高分析器があれば、波高分布から適当な位置にしきい値を設定することができます。図6-6にパルス波高分布の具体例を示します。各々のプロットはノイズによるものと信号によるものを示します。通常は、暗電流パルスの波高分布は低波高域に偏っているので、しきい値を波高分布の谷(バレー)( $L_1$ )付近に設定することにより検出効率をほとんど犠牲にすることなくノイズを除去することができます。しかし、実際には波高分析器は一般的ではなく、図6-5の回路構成でプラトー特性を求めるのが一般的です。ある電圧にしきい値を設定し、それ以上のパルス波高の総数を計数し、光電子増倍管の供給電圧を変えて計数の変化を求めると図6-7のような特性が得られます。これをプラトー特性といいます。プラトー領域においては、供給電圧に対するカウント数の変化は小さくなります。これは、アナログ法においては光電子増倍管のゲイン変化がそのまま出力波高値の変化となるのに対して、フォトンカウンティングでは2値化によりパルス数のみを計数するためです。

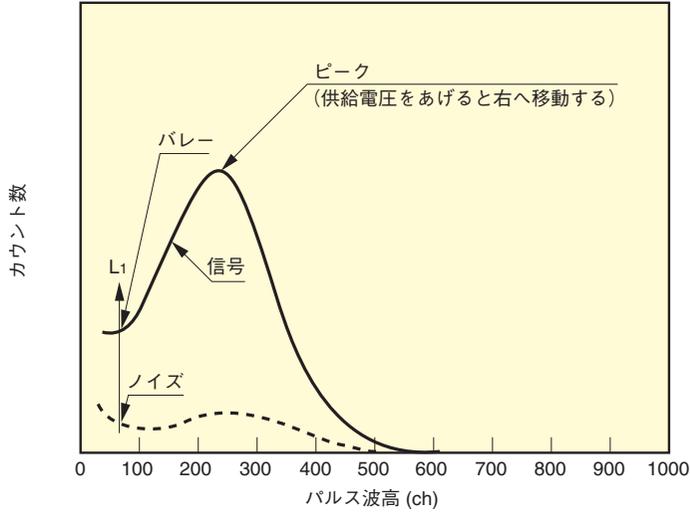


図 6-6 パルス波高分布特性

THBV4\_0606JA

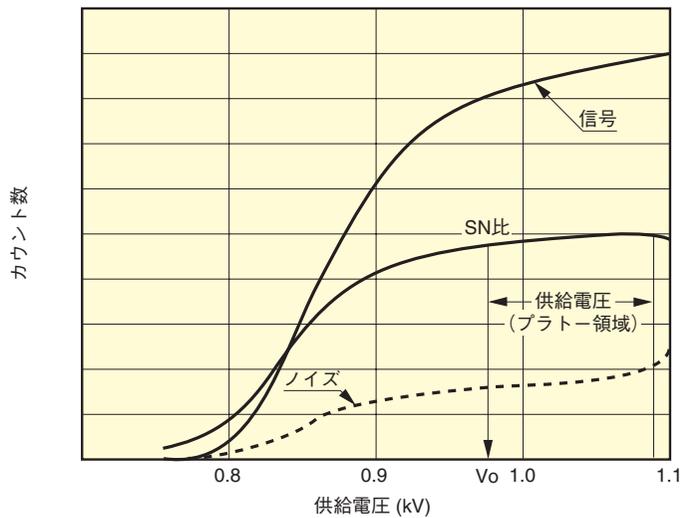


図 6-7 プラトー特性

THBV4\_0607JA

### b) 光電子増倍管の供給電圧の設定

計測上の観点からSN比は重要な要素になります。ここでは、SN比を信号計数率の平均と、信号およびノイズの計数値のゆらぎ(標準偏差または r.m.s. (root mean square)で表す)の比と定義します。図6-7に示すSN比のカーブは、プラトー特性を求めたのと同様に、供給電圧を変えた時のSN比の変化を求めた結果です。図から供給電圧は、プラトー領域が始まる電圧( $V_0$ )から使用する光電子増倍管の最大供給電圧の間で設定します。

## c) カウントリニアリティ

## パルスペア分解能

フォトンカウンティング法は広範囲で良好なりニアリティを有しています。測定系のカウントリニアリティの下限は、暗電流パルス数によって制限され、上限は、最大計数率で制限されます。最大計数率は、パルスペア分解能と呼ばれる特性で決まります。パルスペア分解能とは、パルスを分離できる最小の時間間隔のことです。

パルスペア分解能には、光電子増倍管自体の応答速度で決まるものと、先述のアンプ、ディスクリミネータ、波形整形の信号処理回路で決まるものがあり、一般的には光電子増倍管自体の応答速度の方が速いため、信号処理回路のパルスペア分解能で計数時のパルスペア分解能が決まります。

下図に光電子増倍管の出力パルス間隔と信号処理回路の出力パルスの関係を示します。

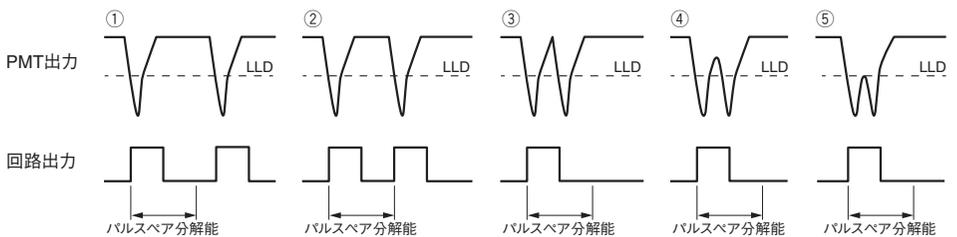


図 6-8 パルスペア分解能

光電子増倍管の出力パルス間隔が回路のパルスペア分解能よりも広い場合 (①, ②) は、光電子増倍管の出力パルス数と同数のパルスが回路から出力されますが、光電子増倍管の出力パルス間隔が回路のパルスペア分解能よりも狭くなる (③, ④) と、たとえ光電子増倍管の出力パルスが分離していたとしても、回路から出力されるパルス数は少なくなり、計数損失が生じることになります。さらに光電子増倍管の出力パルス間隔が短くなる (⑤) と、光電子増倍管の出力パルス自体が分離できない状態となります。

## リニアリティ

フォトンカウンティング法のカウントリニアリティを左右する要因には「麻痺型」、「非麻痺型」の2種類があり、「麻痺型」はパルスが連続的に重なった時に出力が得られない場合、「非麻痺型」はパルスが重なった場合でもパルスペア分解能の間隔で出力が得られる場合です。

光電子増倍管の出力においては、パルスが重なり合うと一つ一つのパルスが分離できないため、「麻痺型」の動作となります。ここで、真の計数率を  $N$  ( $s^{-1}$ )、パルスペア分解能を  $t$  ( $s^{-1}$ ) とすると、麻痺型の場合、計測された計数率  $M$  ( $s^{-1}$ ) は、以下の式であらわされます。

$$M = N \cdot \exp(-N \cdot t) \quad \dots \dots \dots \text{(式 6-2)}$$

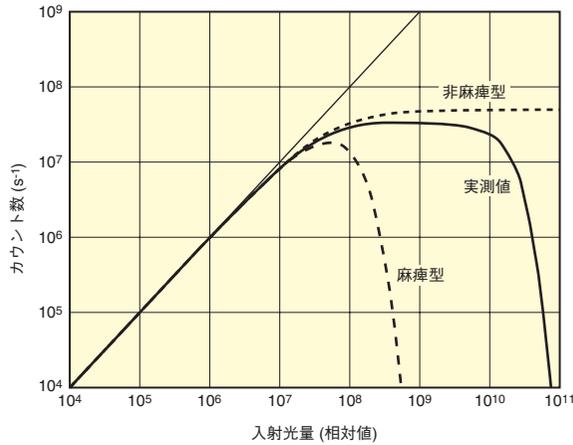
一方、「非麻痺型」の動作では、計数率のロス  $N - M$  である一方、パルスオーバーラップによる不感時間は  $M \cdot t$  で表されるので、計数率のロス  $N \cdot M \cdot t$  とも表すことができます。したがって、

$$N - M = N \cdot M \cdot t \quad \text{より、}$$

$$M = \frac{N}{N \cdot t + 1} \quad \dots \dots \dots \text{(式 6-3)}$$

となります。

パルスペア分解能20 nsの場合のカウントリニアリティを、これらの式を用いて算出した結果と、実際にフォトンカウンティングを行った実測値との比較を図6-9に示します。これにより、直線性が大きく損なわれていない領域では、非麻痺型の動作とほぼ同じであること、さらに光量が多くなると麻痺型の動作と同様に出力カウント数が大きく低下することがわかります。これは、光電子増倍管の出力パルスのオーバーラップ以外にも、アノードコンデンサ結合によるベースラインシフト、平均電流の増加による直流リニアリティの変化（光電子増倍管ゲインの変化）も影響します。



THEV4\_0609JA

図 6-9 フォトンカウンティング法のカウントリニアリティ

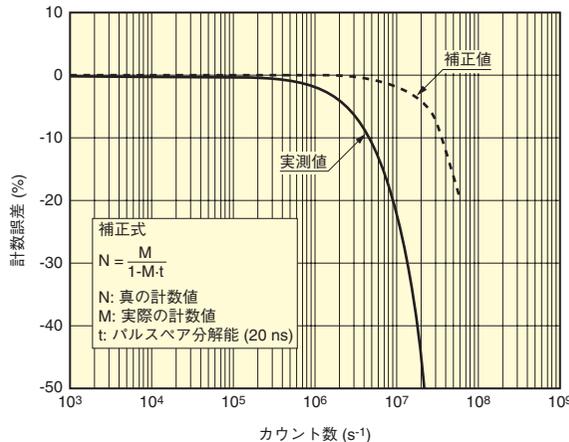
計数率の補正

上記のように、カウントリニアリティが大きく損なわれていない領域では、非麻痺型の動作とほぼ同じであるため、非麻痺型の式を変形した

$$N = \frac{M}{1-M \cdot t} \dots\dots\dots (式 6-4)$$

で真の計数率Nを求めることができ、この式を用いて補正が可能です。

図6-10にパルスペア分解能 20 ns をもつシステムの実測値と補正值の例を示します。この例では、補正後は 10<sup>7</sup> s<sup>-1</sup>の計数率においても計数誤差2 %程度の精度が得られています。



THEV4\_0610JA

図 6-10 カウント数の補正

#### d) フォトンカウンティング法の利点

フォトンカウンティング法には、アナログ法に比べていくつかの利点があります。ここでは、安定性、SN比について述べます。

##### (I) 安定性

利点の一つに、安定性が良いことがあげられます。これは、電圧変動や、光電子増倍管のゲインの変動による影響を受けにくいことを意味します。フォトンカウンティング法では設定電圧がプラトー領域にあれば、多少電圧が変動しても出力計数にはあまり影響しませんが、アナログ法では大きく出力電流が変動してしまいます。また、供給電圧の変動に対して安定であるということは、ゲインの変動にも安定であると考えられます。一般的にフォトンカウンティング法は、アナログ法に比べゲイン変動に対して非常に安定しています。(図6-11参照)

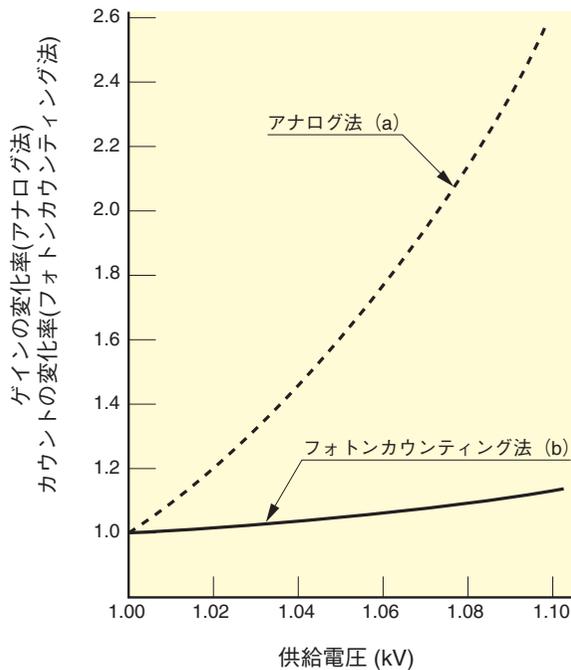


図 6-11 供給電圧の変動に対する安定性

THBV4\_0611JA

この安定性が良いことは長期的な使用により光電子増倍管の出力が低下しても、計数値の低下が少ないことを意味しています。図6-12に、長期にわたる経時変化の一例を示します。フォトンカウンティング法では光電子増倍管の出力電流値が低く（ $\sim 1 \mu\text{A}$ ）、光電子増倍管の経時変化が少ない上に、ゲインの変動においても安定なため、アナログ法よりも長期にわたり安定して使用することができます。

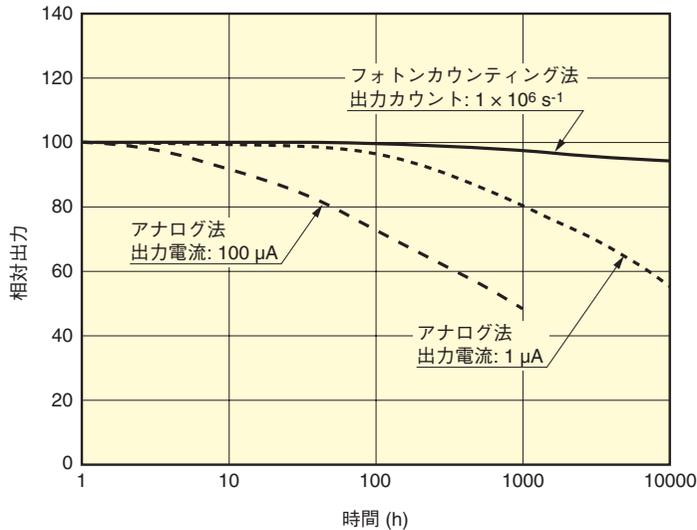


図 6-12 フォトンカウンティング法の経時変化

THBV4\_0612JA

## (II) SN比

信号光が光電子増倍管の光電面に入射すると、光電子が発生しますが、単位時間内の光電子数、ダイノードでの二次電子数はポアソン分布で表される統計的確率事象であるため、ゆらぎ(交流分)をもちます。なお、SN比については、第4章 4.3.7でも述べられています。信号に重畳した交流成分の雑音を原因別に分類すると、次のようになります。

- ①信号光によるショットノイズ
- ②背景光によるショットノイズ
- ③暗電流によるショットノイズ

これらを盛り込んだ光電子増倍管の出力のSN比<sup>2)~9), 11)</sup>はアナログ法

$$\text{SN比(電流)} = \frac{I_{ph}}{\sqrt{2eNFB\{I_{ph} + 2(I_b + I_d)\}}} \quad \dots\dots\dots \text{(式 6-5)}$$

$I_{ph}$ : 入射光による信号電流 (A)

$e$ : 電子の電荷 (c)

NF: 光電子増倍管の雑音指数 [NF: Noise Figure]

$I_b$ : 背景光による陰極電流 (A)

$I_d$ : 暗電流による陰極電流 (A)

B: 測定系の帯域幅 (Hz)

ここで真の信号電流  $I_{ph}$  は全出力電流から( $I_b + I_d$ )を減算することで求めることとします。ただし、後段の増幅器からの雑音は一般的に光電子増倍管のゲイン  $\mu$  が十分大きいため無視できるものとします。

フォトンカウンティング法におけるSN比は以下の式で与えられます。

$$\text{SN比} = \frac{N_s \sqrt{T}}{\sqrt{N_s + 2(N_b + N_d)}} \dots\dots\dots \text{(式 6-6)}$$

$N_s$ : 毎秒あたりの入射光による計数

$N_b$ : 毎秒あたりの背景光による計数

$N_d$ : 毎秒あたりの暗電流による計数

$T$ : 計測時間 (s)

ここでも同様に真の信号計数  $N_s$  は全計数から( $N_b + N_d$ )を減算することで求めます。

今、一般的な時間と周波数の等価関係 ( $T = 1/2B$ ) から

$B=1$  (Hz)、 $T=0.5$  (s)とすると

アナログ法

$$\text{SN比(電流)} = \frac{I_{ph}}{\sqrt{2eNF\{I_{ph} + 2(I_b + I_d)\}}} \dots\dots\dots \text{(式 6-7)}$$

フォトンカウンティング法

$$\text{SN比} = \frac{N_s}{\sqrt{N_s + 2(N_b + N_d)}} \dots\dots\dots \text{(式 6-8)}$$

となり、フォトンカウンティング法の方が、雑音指数NFに関する分だけSN比が良くなることがわかります。また先述のように、暗電流は光電面からの熱電子のほかにも各ダイノードからの熱電子も含まれるため、暗電流のパルス波高分布はやや低波高側に偏ったものになります。ここで波高弁別器により信号成分を保ちつつ効果的に暗電流成分を除去できるため、実際にはさらにSN比の向上が期待できます。また交流的なパルスのみを計測するため直流的なリーク電流の影響も受けません。

## 第6章 参考文献

- 1) IEC PUBLICATION 306-4(1971)
- 2) 浅井, 稲葉: 画像技術 7月号 . 15(1971)
- 3) 林 達郎: 分光研究 . 22, 4, 233(1973)
- 4) 稲場文男: オプトエレクトロニクス技術 '89(1989)
- 5) R.Foord, R.Jones, C.J.Oliver, E.R.Pike: Appl.Opt.1975, 8(1969)
- 6) J.K.Nakamura and S.E.Schmarz: Appl.Opt.1073, 7, 6(1073)
- 7) 市村 勉, 稲場文男: 応用物理 39. 9(1970)
- 8) 吉村武晃, 吉川 淳, 鈴木範人: 分光研究 . 21, 4(1972)
- 9) 清水慶昭, 稲場文男: 分光研究 . 22, 4(1973)
- 10) 松本 元, 桜井健二郎: 計測と制御 . 15, 6(1976)
- 11) 浜松ホトニクス(株): フォトンカウンティング(2001)
- 12) 神谷昭文, 中村公嗣, 新垣 実: 分光研究 . 52, 4, 249(2003)

## 第7章

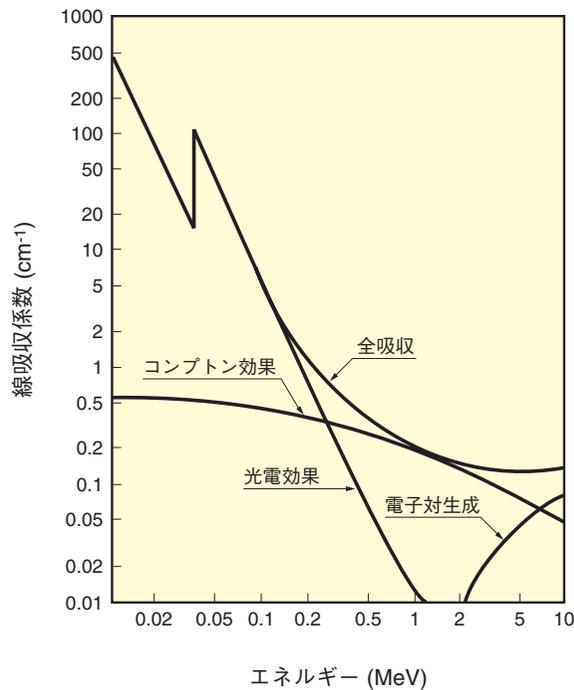
# シンチレーションカウンティング法

各種放射線は、医学応用、工学的応用、材料分析などの分野での非破壊検査、診断用として広く用いられており、放射線検出器の果たす役割も重要です。放射線の検出方法<sup>1)2)3)4)</sup>は、気体または固体の電離作用を利用した比例計数管、半導体検出器、物理化学的变化を用いたフィルム、霧箱、シンチレーションカウンティング法を用いた方法などが代表的なものです。

シンチレーションカウンティング法では、シンチレータと光電子増倍管の組合せが一般的で実用上よく用いられています<sup>5)6)</sup>。シンチレーションカウンティング法の利点としては、シンチレータの材質の選択が自由なこと、光電子増倍管の特長を生かした高速応答性、高検出効率、大口径化が可能なことにあります。ここでは光電子増倍管をシンチレーションカウンティング法で用いる時の特性の定義、測定方法、代表的な数値例などについて解説します。

## 7.1 シンチレータと光電子増倍管

シンチレータに放射線が入射するとシンチレータは短い減衰時間をもった蛍光を発生し、これをシンチレーションといいます。 $\gamma$ 線の場合、次の3つの相互作用によりシンチレータ内に自由電子が発生し、この電子がシンチレータの束縛電子を励起することによって蛍光を発生します。3つの相互作用とは光電効果、コンプトン効果および電子対生成です。これらの作用の起こる確率はシンチレータの種類と $\gamma$ 線のエネルギーにより異なります。図7-1にNaI(Tl)シンチレータでの $\gamma$ 線エネルギーに対するこれらの作用の割合を示します。



THBV4\_0701JA

図7-1 NaI(Tl)シンチレータでの $\gamma$ 線の吸収特性

図7-1より $\gamma$ 線の低エネルギー域では光電効果が主ですが、エネルギーが高くなると電子対生成が増えてくることが分かります。上の3つの相互作用のうち、光電効果は $\gamma$ 線の全エネルギーを軌道電子に与えるためこの効果で発生した蛍光量は $\gamma$ 線のエネルギーに比例します。また光電子増倍管はこの光量に比例した電荷を出力するので、結果的には光電子増倍管の出力パルス波高は放射線のエネルギーに比例します。従ってシンチレータと光電子増倍管を組み合わせ、その出力パルスの波高値と計数率を測定することによって放射線のエネルギー分布とその線量を知ることができます。エネルギー分析の測定方法は光電子増倍管の電流出力を積分型前置増幅器で電圧パルスに変換しMCA (Multi Channel Pulse Height Analyzer)で波高分析<sup>2)</sup>します。この時の様子を図7-2に示します。

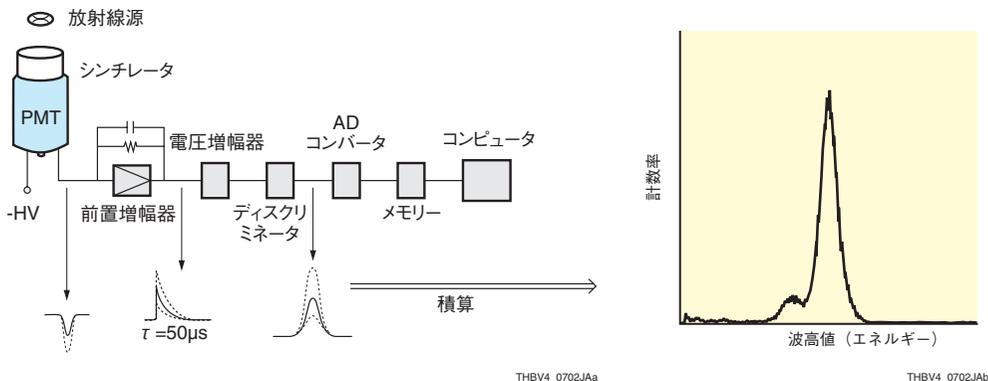


図7-2 シンチレーションカウンティング法の測定ブロック図と波高分布例

シンチレータの種類は、無機シンチレータと有機シンチレータに大別できます。

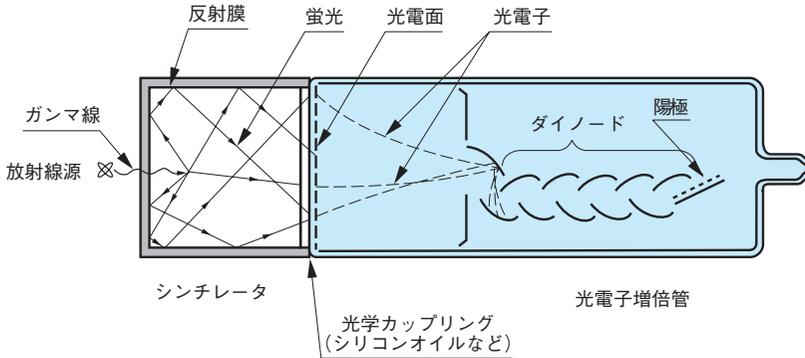
無機シンチレータにはハロゲン化合物が多く、NaI(Tl), BGO, BaF<sub>2</sub>, CsI(Tl), ZnS などがあり、代表的なものがNaI(Tl)です。一般的に有機シンチレータと比べ発光効率、吸収係数が高く、光電効果の割合が大きいなどの利点があります。一方、潮解性を持ったり衝撃に弱いなど取り扱いにくい面もあります。最近では、NaI(Tl)シンチレータの代わりとして潮解性が無く密度が高いYAP:CeやPET (Positron Emission Tomography)用として密度が高く減衰時間の短いLSO:CeやGSO:Ce等が実用化されています。

有機シンチレータには、プラスチックシンチレータ、液体シンチレータ、有機結晶であるアントラセンなどがあります。一般的に減衰時間が短く潮解性はありません。プラスチックシンチレータは加工が容易なので、特殊な形状や大きなサイズを製作可能であり、取り扱いも簡単です。しかしγ線に対しては、吸収係数が低く光電効果の割合が低いためエネルギー分析には向きません。表7-1に現状開発されているシンチレータの代表的な特性および用途を示します。

	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	相対発光 強度 (NaI (Tl)を100)	発光時間 (ns)	発光ピーク 波長 (nm)	用途
NaI(Tl)	3.67	100	230	410	サーベイメータ、エリアモニタ、ガンマカメラ
BGO	7.13	15	300	480	PET
CsI(Tl)	4.51	45~50	1000	530	サーベイメータ、エリアモニタ
Pure CsI	4.51	<10	10	310	高エネルギー物理学実験
BaF <sub>2</sub>	4.88	20	0.9/630	220/325	TOF PET、高エネルギー物理学実験
GSO:Ce	6.71	20	30	310/430	エリアモニタ、PET
プラスチック	1.03	25	2	400	エリアモニタ、中性子検出
LaBr <sub>3</sub> :Ce	5.29	130	25	380	TOF PET、サーベイメータ
LSO:Ce	7.35	70	40	420	PET
YAP:Ce	5.55	40	30	380	サーベイメータ、小型カメラ
LYSO	7.3	85~90	41	420	TOF PET
PWO	8.28	0.7	15	470	高エネルギー物理学実験
ZnS(Ag)	4.09	130	110	450	α線検出

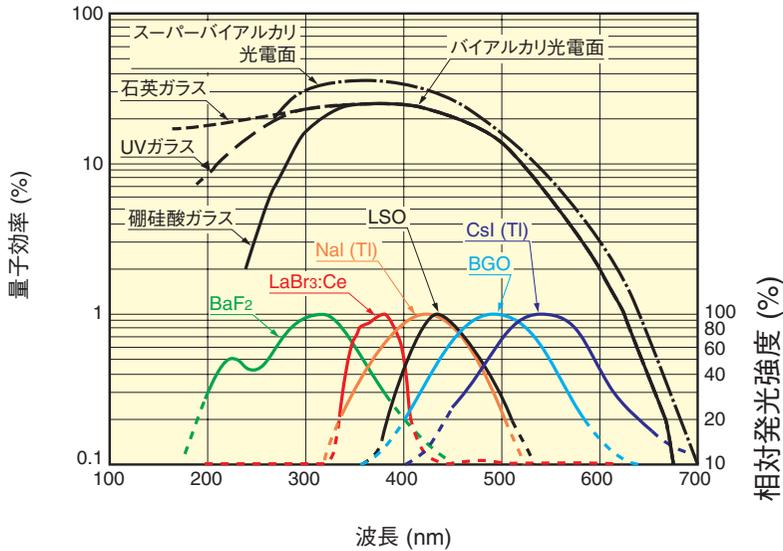
表7-1 シンチレータの代表的な特性および用途

またシンチレータはカップリング剤を使って光電子増倍管に密着させます。この様子を図7-3に示します。これにはシンチレータと光電面窓材間の光の損失を防ぐため、空気層の代わりにガラスと屈折率の近いシリコンオイルなどが使われますが、発光波長域で透過率の良いものを選択します。図7-4に代表的なシンチレータの発光スペクトラムと、光電子増倍管の光電面の分光感度特性を示します。



THBV4\_0703JA

図7-3 NaI(Tl)のガンマ線での発光



THBV4\_0704JA

図7-4 光電面の量子効率とシンチレータの発光波長分布

## 7.2 諸特性

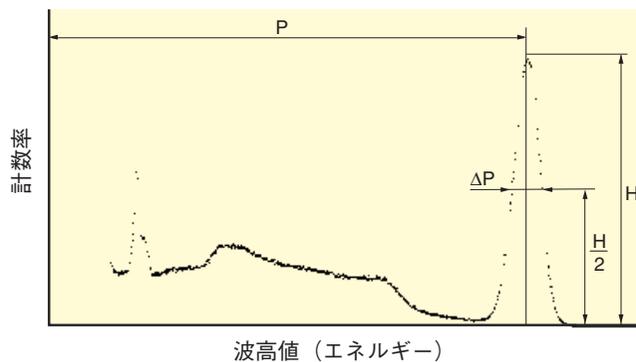
### (1) エネルギー分解能

シンチレーションカウンティング法では、波高分析器を使用してエネルギースペクトルを計測するスペクトル法と、波高分析器を用いないカウンティング法（後述）があります。スペクトル法では各種放射線による光電ピーク波高を弁別することが大切です。この特性はエネルギー分解能として評価されます。エネルギー分解能は、Pulse Height Resolution (P.H.R.)とも呼ばれます。

エネルギー分解能の定義を下式と図7-5に示します。エネルギー分解能は、パーセントで表示されるのが一般的です。

$$R = \frac{\Delta P}{P} \dots\dots\dots \text{(式 7-1)}$$

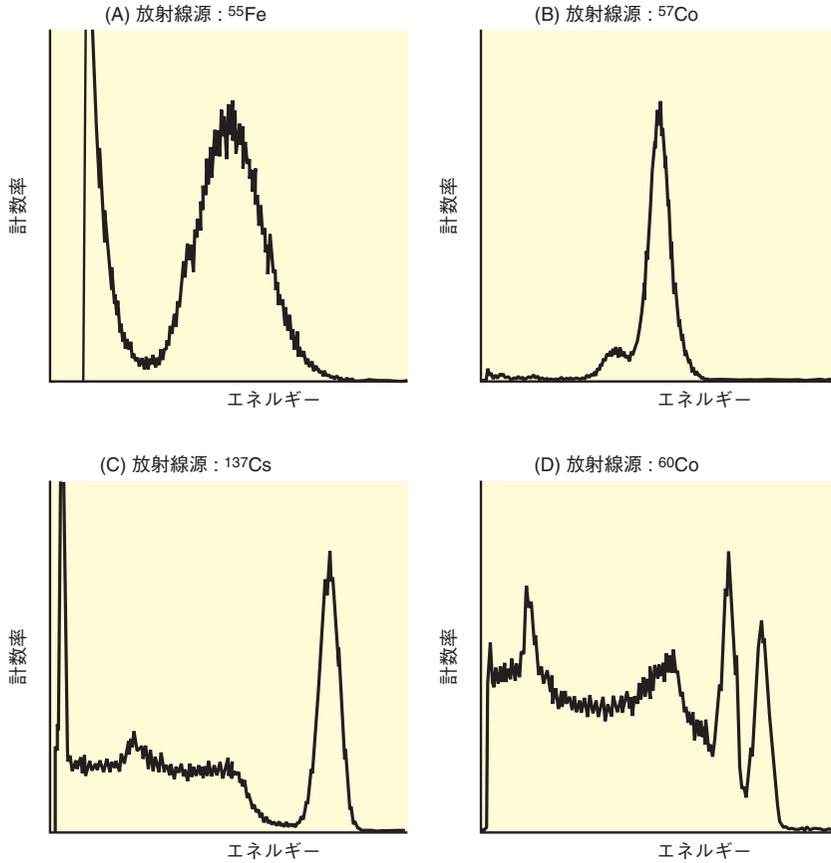
R : エネルギー分解能  
 P : ピーク値  
 $\Delta P$  : 半値幅 (ピーク値の高さ(H)の半分(H/2)のときの幅)



THBV4\_0705JA

図7-5 エネルギー分解能の定義

図7-6に、 $^{55}\text{Fe}$ の特性X線および種々の $\gamma$ 線( $^{57}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ )と、NaI(Tl)シンチレータによる発光を光電子増倍管で検出した場合の代表的な波高分布を示します(測定方法は図7-2による)。



THBV4\_0706JA

図7-6 波高分布の代表例

エネルギー分解能に影響する因子をまとめると、次のようになります。

- (1) シンチレータの発光効率
- (2) シンチレータの固有分解能
- (3) 光電子増倍管光電面への光の収集
- (4) 光電子増倍管光電面の量子効率( $\eta$ )
- (5) 第1ダイノードへの収集効率( $\alpha$ )
- (6) 光電子増倍管の増倍ゆらぎ

一般的にエネルギー分解能は次式で示されます。

$$R^2(E) = R_s^2(E) + R_p^2(E) \quad \dots\dots\dots \text{(式 7-2)}$$

ここで、

$$R_p^2(E) = \frac{5.56}{N\eta\alpha} \left( \frac{\delta}{\delta-1} \right) \quad \dots\dots\dots \text{(式 7-3)}$$

式中、N は単位崩壊あたり光電面に入射する光子数の平均値、 $\eta$  は量子効率、 $\alpha$  は収集効率、 $\delta$  は各々のダイノードの二次電子増倍率です(ここでは、各段等しい値としています)。

$R_s(E)$  はシンチレータに起因する成分、 $R_p(E)$  は光電子増倍管に起因する成分を示し、両者とも入射ガンマ線エネルギー (E) に依存します。(  $R_p^2(E)$  は E に逆比例します。)

R,  $R_s$ ,  $R_p$  の値は 51 mm 径 × 51 mm 厚の NaI(Tl) シンチレータと、51 mm 径光電子増倍管(浜松ホトニクス製: R6231)を用いた時、おおよそ以下の値になります。

E = 122 keV ( $^{57}\text{Co}$ ) で、R = 8.5 %、 $R_s$  = 6 %、 $R_p$  = 6 %

E = 662 keV ( $^{137}\text{Cs}$ ) で、R = 6.5 %、 $R_s$  = 5.5 %、 $R_p$  = 3.4 %

高いエネルギー分解能を得るために光電子増倍管に要求される特性としては、量子効率が高いこと、収集効率が良いことが上げられます。また、発光効率が高くて固有分解能の優れたシンチレータを用いることと同時に、光電子増倍管とシンチレータの結合損失を少なくすることも重要です。このため、通常シンチレータと光電子増倍管の結合面を屈折率が窓材にほぼ等しいシリコンオイル・シリコングリスなどでカップリングします。

シンチレータが充分厚い場合、シンチレータの発光強度分布は放射線の入射位置によらずに光電面上で一定になるので、光電子増倍管のユニフォミティはエネルギー分解能にあまり影響を与えません。しかし、シンチレータが薄い場合、シンチレータの発光強度分布は放射線の入射位置によって変化するので、光電子増倍管のユニフォミティ特性によってはエネルギー分解能に影響を与えます。これを避けるため、シンチレータと光電子増倍管の間にライトガイドを挿入してシンチレータからの光を拡散し、光電子増倍管の光電面全体にわたって入射させる方法もあります。

$\gamma$ 線源	エネルギー (keV)	NaI(Tl)+光電子増倍管	BGO+光電子増倍管
$^{55}\text{Fe}$	5.9	40 % ~ 50 %	—
$^{241}\text{Am}$	59.5	12 % ~ 15 %	70 % ~ 150 %
$^{57}\text{Co}$	122	8.5 % ~ 10 %	35 % ~ 50 %
$^{22}\text{Na}$	511	7.5 % ~ 9.0 %	13 % ~ 25 %
$^{137}\text{Cs}$	662	6.5 % ~ 8.5 %	11 % ~ 20 %
$^{60}\text{Co}$	1,170	5 % ~ 6.5 %	8.5 % ~ 11 %
	1,330	4.5 % ~ 5.5 %	8.0 % ~ 9.5 %

表7-2 代表的なガンマ線に対するNaI(Tl)とBGOでのエネルギー分解能

エネルギー分解能は、ガンマカメラやスペクトロメータなどの放射線計測でもっとも重要な特性の一つであります。表7-2に代表的なガンマ線に対する「NaI(Tl)+光電子増倍管」と「BGO+光電子増倍管」の組み合わせによるエネルギー分解能の値を示します。表に示すように、エネルギー分解能の値は幅をもっていますが、これはシンチレータの形状と大きさおよび光電子増倍管の光電面サイズ、さらにはそれらの個々の性能のばらつきによるものであり、必要であれば特別な仕様を設定して選別することも可能です。

## (2) 相対パルス波高値

シンチレーションカウンティングにおいて、光電子増倍管への供給電圧および計測回路系の増幅率を一定にした時に、いくつかの光電子増倍管を用いて得られる光電ピーク波高値を、相対パルス波高値(RPH: Relative Pulse Height)と呼び、通常はチャンネル数で表されます。これはユーザーの測定と良い相関を示すことが多いため、光電子増倍管のゲイン範囲を選択する際に用いられます。NaI(Tl)を用いる場合、その発光波長がコーニングCS 5-58フィルタの透過波長（第4章 4.1.4 (3) 参照）と類似しているため、RPH は陽極青感度指数と強い相関があります。

## (3) リニアリティ

シンチレーションの発光量に対する光電子増倍管の出力パルス波高値との直線性（リニアリティ）は、重要な特性の一つです。一般的な光電子増倍管のリニアリティについては、すでに前節で述べたので、ここではシンチレーションカウンティング法におけるリニアリティの測定方法を述べます。図7-7にNaI(Tl)と $^{226}\text{Ra}$ による波高分布の測定例および、図7-8に各ピークチャンネルとガンマ線のエネルギーとの関係を示します。 $^{226}\text{Ra}$ は10.8 keV～2.2 MeVの範囲で多種類の放射線を出していることから、広いエネルギー域でのリニアリティの測定に用いられています。

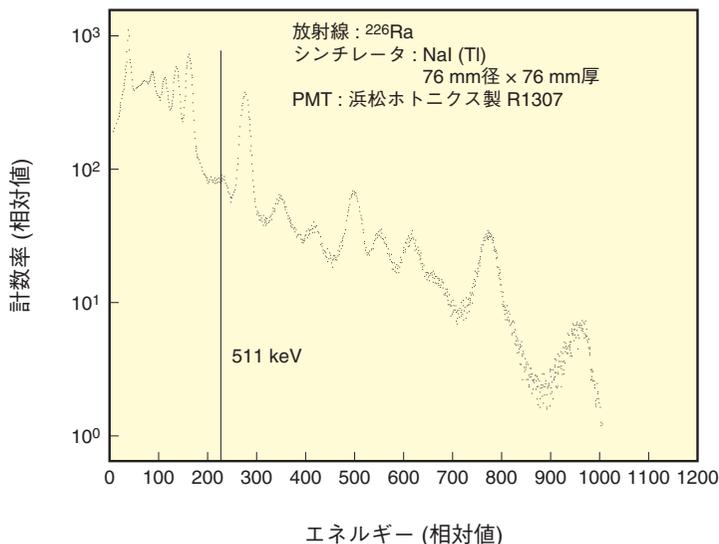
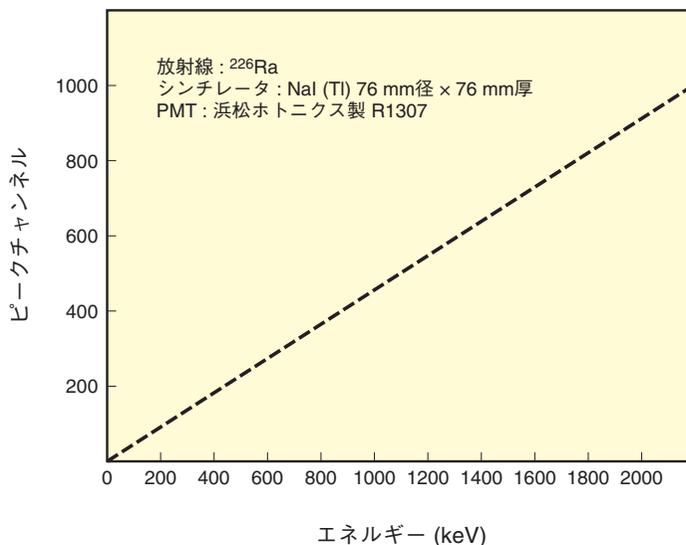


図7-7  $^{226}\text{Ra}$ とNaI(Tl)による波高分布



THBV4\_0708JA

図7-8 ピークチャンネルとガンマ線エネルギーの関係

NaI(Tl)からの発光量は、およそガンマ線エネルギー 1 keVあたり光子数で30前後なので、 $^{137}\text{Cs}$ の場合の光子数は662 keV  $\times$  30で約20 000 個、 $^{60}\text{Co}$  の1330 keVの場合は約40 000 個発生します。NaI(Tl)と $^{60}\text{Co}$ の組合せで得られる光電子増倍管の出力ピーク電流値( $I_p$ )は、以下のように求められます。(ただし、光電子増倍管の動作ゲインは $10^6$ 、NaI(Tl)の減衰時間( $\tau_s$ )は230 nsとします。)

$$\begin{aligned}
 I_p &= \frac{N \times \eta \times \mu \times e}{\tau_s} \dots\dots\dots \text{(式 7-4)} \\
 &= \frac{4 \times 10^4 \times 0.25 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19}}{230 \times 10^{-9}} \\
 &= 7 \times 10^{-3} \text{ (A)}
 \end{aligned}$$

N : シンチレータからの1 イベントあたりの発光量  
 $\eta$  : 光電面の量子効率 (25 %と仮定)  
 $\mu$  : 光電子増倍管のゲイン  
 $e$  : 電子の電荷  
 $\tau_s$  : NaI(Tl)の減衰時間

したがって光電子増倍管はこの時7 mA以上のパルスリニアリティがなくてはならないことになります。特に高エネルギーの放射線については発光量が多くなるため注意が必要です。

#### (4) ユニフォミティ

シンチレーションカウンティング法を利用したSPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) のような位置検出装置において、光電子増倍管のユニフォミティの特性は装置の性能に影響を与えます。光電子増倍管のユニフォミティとは、通常、光電面にスポット状の光を入れた場合の位置による出力電流の変化として定義されます。

#### (5) 安定性

シンチレーションカウンティング法で使われる用語にロングタームスタビリティ (Long Term Stability) とショートタームスタビリティ (Short Term Stability) があります。いずれも放射線源に<sup>137</sup>Cs、シンチレータにNaI(Tl)が使われ、マルチチャンネル波高分析器 (MCA) により光電ピーク波高値の変化を測定するものです。先述の一般的なスタビリティ (安定性) (第4章 4.3.4参照) とは、やや測定方法が異なります。

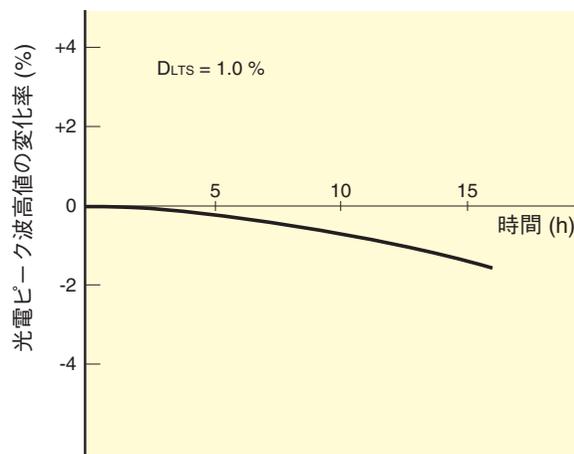
##### a) ロングタームスタビリティ (Long Term Stability)

フォトピークドリフト (Photopeak Drift) とも呼ばれ、光電ピークの計数率を1000 s<sup>-1</sup>にした状態で1時間ウォーミングアップした後、16時間の光電ピーク波高値(チャンネル)の変動率を測定するものです。

測定は図7-2による方法で、光電ピークを与えるチャンネルの時間的な変動を求めます。式7-5に変化率 (D<sub>LTS</sub>) の計算方法を、図7-9に代表的な特性例を示します。

$$D_{LTS} = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - \bar{P}|}{n} \cdot \frac{100}{\bar{P}} (\%) \dots\dots\dots (式 7-5)$$

$\bar{P}$  : 光電ピーク波高値(チャンネル)の平均値  
 $P_i$  : i番目に測定したピーク波高値  
 $n$  : 16時間中に測定した回数



THBV4\_0709JA

図7-9 代表的な光電子増倍管のロングタームスタビリティ

光電子増倍管の種類によって16時間の時点では、やや増加傾向に転ずるものもありますが、ほとんどは減少値を示し、変化率は多くが±数%以内に収まります。これは先述のドリフト特性と類似したのですが、シンチレーション応用分野において、より実用的な測定法です。数値的に式7-5で定義されますが、これらは平均ピーク波高値に対してピーク波高値の平均偏差をパーセントで表したものです。この値はおよそ1%～2%となります。この特性で出力が変化する主な原因としては、ダイノード（特に後段）の二次電子増倍率の時間的な変化があげられます。

#### b) ショートタームスタビリティ (Short Term Stability)

ショートタームスタビリティは、カウントレートスタビリティ (Count rate Stability) すなわち計数率依存性とも呼ばれ、光電ピークの計数率を $10\,000\text{ s}^{-1}$  から $1000\text{ s}^{-1}$  に変えた時の光電ピーク波高値の変化率を測定するものです。すなわち計数率 $10\,000\text{ s}^{-1}$  時のピーク波高値(チャンネル)をA、 $1000\text{ s}^{-1}$  の時をB とすると、変化率 ( $D_{\text{STS}}$ ) は式7-6で与えられます。一般的にはこの値は±1パーセント前後となります。

$$D_{\text{STS}} = \left(1 - \frac{B}{A}\right) \times 100 (\%) \quad \dots\dots\dots \text{(式 7-6)}$$

この特性で出力が変化する主な原因としては、光電子増倍管の電子増倍部で起こる電子軌道の変化と考えられます。また、計数率が高いために出力電流値が大きくなり、デバイダ電流に余裕の無い場合、後段ダイノード電圧が変動する場合があります。(第5章 5.1.3参照) この場合、ゲインの電圧依存性（電圧-ゲイン曲線の傾き）の小さい光電子増倍管ほど影響を受けにくいことになります。その他に光電子増倍管自身のヒステリシス特性（第4章 4.3.5参照）とも深い関係があります。

### (6) 雑音

シンチレーションカウンティング法における信号パルスは、一般的には同時に複数個の光電子によって生じるパルスであるので、ディスクリミネータを使用して、暗電流パルスの大部分を占める低波高パルスを除去することが広く行われています。したがって、シンチレーション計測では信号パルスと誤認されるような高波高雑音パルスが特に問題になる場合があります。

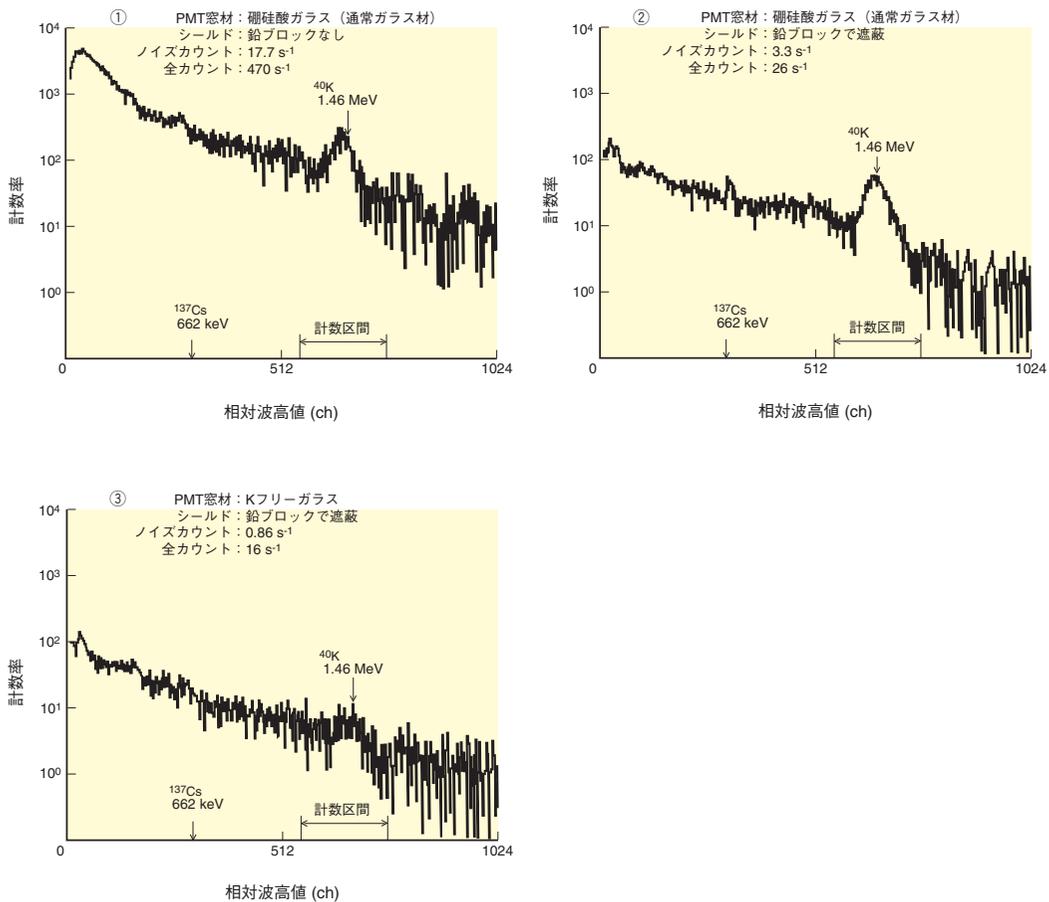
このような高波高雑音パルスの原因として、建築物や大気中の天然放射性核種による放射線放出に起因する雑音があり、低レベル放射線計測において問題となることがあります。建築物のコンクリート中にはRa、Thや $^{40}\text{K}$ などが、鉄にはU、Thや $^{60}\text{Co}$ などが含まれています。大気中には放射性浮遊塵やRn、Thガスなどが、またシンチレータ中にも微量の $^{40}\text{K}$ や $^{208}\text{Tl}$ などが存在します。さらに光電子増倍管に使われる硼硅酸ガラス中にはカリウムが入っており、1.46 MeVの $\gamma$ 線を放つ $^{40}\text{K}$ はカリウム中の0.118重量パーセントを占めますので、これも高波高雑音パルスの原因になります。

図7-10は、浜松ホトニクス製 $\phi 127\text{ mm}$ 光電子増倍管とNaI(Tl) (127 mm径 × 51 mm長)を使いバックグラウンドノイズを測定したデータ例です。図中の①は通常の測定、②は下部および側部に100 mm厚、上部に50 mm厚の鉛ブロックでシールドした時、③はさらに光電子増倍管の面板および側管にカリウムの含有量の少ない、いわゆるKフリー（低カリウム）ガラスを使った浜松ホトニクス製 $\phi 127\text{ mm}$ 光電子増倍管を用いた時のデータです。

$^{137}\text{Cs}$  (662 keV)のピークが300チャンネルになるように設定したため、およそ数keV～2.2 MeVのエネルギー範囲を測定していることとなります。このエネルギー範囲で通常の測定では $470\text{ s}^{-1}$ 程あった出力カウントが鉛でシールドすることによって約 $1/20$ の $26\text{ s}^{-1}$ に減少しました。これにより、バックグラウンドノイズはほとんどが環境放射線に起因していることがわかります。さらにKフリーガラス(第4章 4.1.2参照)の光電子増倍管を使うとノイズが $16\text{ s}^{-1}$ と減少しますが、特に $^{40}\text{K}$ (1.46 MeV)に起因する計数区間(1.2 MeV～1.6 MeVのエネルギー範囲)では硼硅酸ガラスの光電子増倍管でノイズが $3.3\text{ s}^{-1}$ だったものがKフリーガラスの光電子増倍管では $0.9\text{ s}^{-1}$ と $1/3$ 以下に減少します。

最近では、高エネルギー物理学実験等において、放射性不純物を極低レベルしか含まない材料を用いた光電子増倍管の要求があります。これらの測定は地中深く、天然の放射性不純物を取り除かれた環境下で行われるため、使用される光電子増倍管への要求が厳しくなります。このような光電子増倍管に使用されるガラスを含めた材料では $^{40}\text{K}$ のみならず、U系列とTh系列の放射性不純物の含有量が吟味されます。

また、シンチレータなど光電子増倍管の外部はグランド电位となっている場合が多いため、低レベル放射線計測では陰極側を接地し、陽極に高電圧を供給する陰極側接地法が用いられます。(第5章 5.1.2参照)

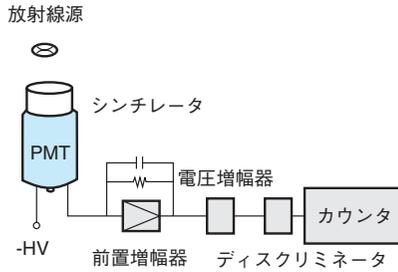


THBV4\_0710JA

図7-10 127 mm径光電子増倍管+NaI(Tl)によるバックグラウンドノイズ

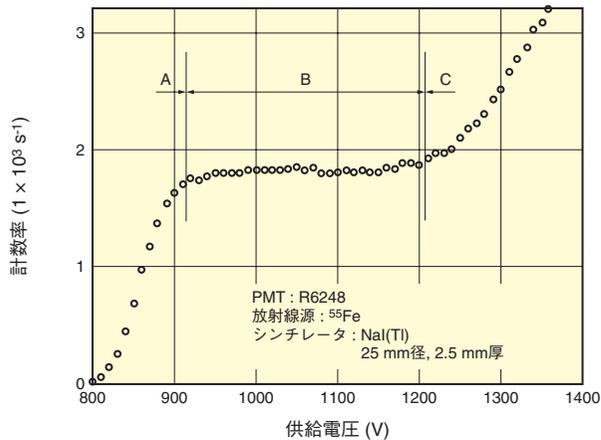
## (7) プラトー特性

シンチレーションカウンティング法では、今まで述べてきた波高分析器を使用するスペクトル法と、これから説明する波高分析器を用いないカウンティング法があります。カウンティング法ではプラトー特性が重要になります。プラトー特性は、ディスクリレベルを一定にして、光電子増倍管への供給電圧を徐々に上げながら、ディスクリレベル以上のパルス数を計測して得られます。図7-11(a)にプラトー特性の測定ブロック図、図7-11(b)と(c)に、 $^{55}\text{Fe}$ とNaI(Tl)の組合せでのプラトー特性と波高分布を示します。



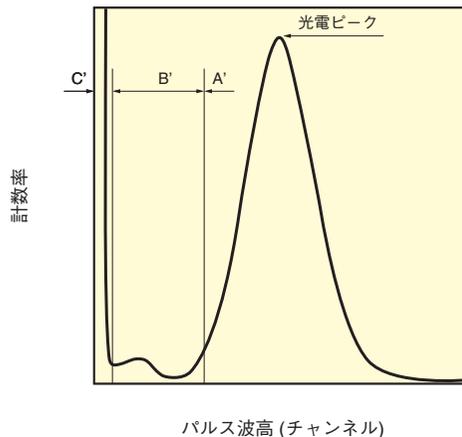
THBV4\_0711JAa

図7-11(a) プラトー特性の測定ブロック図



THBV4\_0711JAb

図7-11(b) プラトー特性の一例



THBV4\_0711JAc

図7-11(c) 波高分布 ( $^{55}\text{Fe}$ とNaI(Tl)との組み合わせ)

供給電圧に対し、計数率をプロットすると図7-11(b)のような特性が得られます。このデータをA、B、Cの領域に分けた場合、Bの領域をプラトーと呼びます。図(c)の波高分布ではB'の谷部にあたります。通常この範囲内に動作電圧を設定しますが、仮に供給電圧が多少変動してもカウント数の変化は小さいものとなります。これは、アナログ法においては光電子増倍管のゲイン変化がそのまま出力波高値の変化となるのに対して、フォトンカウンティングでは2値化によりパルス数のみを計数するためです。

カウンティング法の応用例として石油探層が挙げられます。(第14章 14.7参照) この場合、地層からの散乱線、あるいは自然放射線の数を検出して解析することにより、地層の種類や密度が測定されます。石油探層用光電子増倍管(高温用光電子増倍管)の評価には $^{137}\text{Cs}$ とNaI(Tl)の組合せが用いられるのが一般的です。この時のプラトー特性を図7-12に示します。

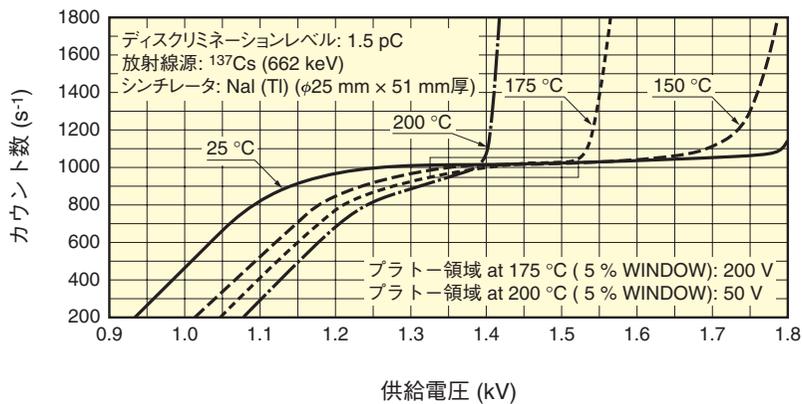


図7-12 高温用光電子増倍管のプラトー特性

THBV4\_0712JA

この測定例では25℃の時の特性とともに150℃、175℃、200℃の時の特性も示されています。温度が高くなると光電子増倍管のゲインが下がるため信号の現れる供給電圧が高くなり(7-11(b)のA領域に相当する部分)、一方暗電流は増加するため低電圧で立ち上がる(図7-11(b)のC領域に相当)ようになります。そのためプラトー領域(電圧幅)は高温(150℃、175℃、200℃)の時には常温(25℃)と比べ狭くなります。

## 第7章 参考文献

- 1) Glenn. F. Knoll: "RADIATION DETECTION and MEASUREMENT (Third Edition)" John Wiley & Sons, Inc. (1999). 木村, 阪井 共訳: 放射線計測ハンドブック(第3版). 日刊工業新聞社(2001)
- 2) 山崎文男: 放射線. 共立出版(1981)
- 3) 河田 燕: 放射線計測技術. 東京大学出版会(1978)
- 4) 岡村勉夫: 放射線測定回路とシステム. 日刊工業新聞社(1978)
- 5) H. Kume, T. Watanabe, M. Iida, T. Matsushita and S. Suzuki: IEEE Trans. Nucl. Sci, NS- 33[ 1], 364(1986)
- 6) 久米英浩: 放射線. 16, 11(1989)

メ 毛

## 第 8 章

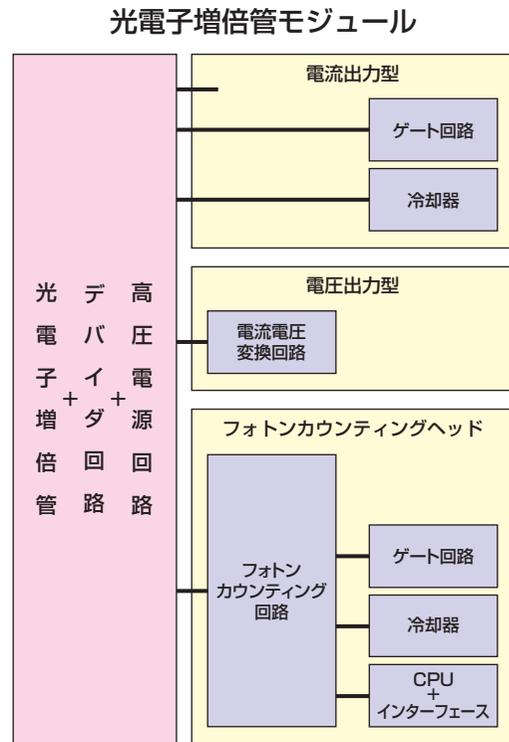
# 光電子増倍管モジュール

光電子増倍管と電圧分割回路（デバイダ回路）、高圧電源回路などをひとつのケースに納めた光電子増倍管モジュールの構成、使い方、特性について説明します。

## 8.1 光電子増倍管モジュールとは

光電子増倍管モジュールは、光電子増倍管と高圧電源回路、各電極に電圧を配分する電圧分割回路（デバイダ回路）が一体化され、ケースに納められたものが基本となっています。その基本構成に、電流電圧変換回路(アンプ回路)やフォトンカウンティング回路、インターフェース、冷却などの機能が追加されたものも製品化されています。光電子増倍管モジュールは、面倒な高電圧の配線がなく、低電圧を入力すれば動作するため取り扱いが容易です。

大きく分けて、電流出力型、電圧出力型、フォトンカウンティングヘッドの3つに分類できます。図8-1に光電子増倍管モジュールの機能を表します。



THBV4\_0801.JA

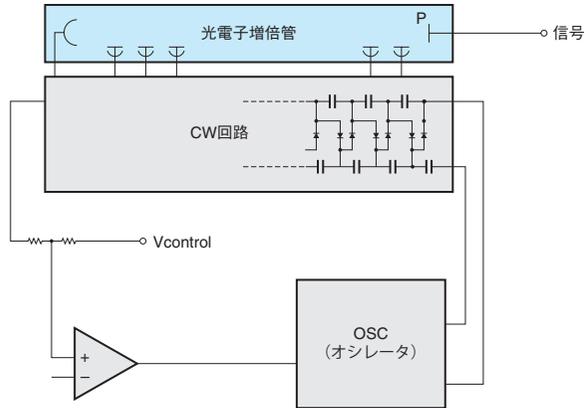
図8-1 光電子増倍管モジュールの機能

## 8.2 電源回路

### (1) 高圧電源回路

光電子増倍管モジュールに内蔵されている高圧電源回路は、主に2種類あります。コッククロフト・ウォルトン(CW)回路（第5章 5.1.3 (1)④ 参照）と、コッククロフト・ウォルトン回路とアクティブ型デバイダ回路（第5章 5.1.3 (1)② 参照）を組み合わせた回路です。

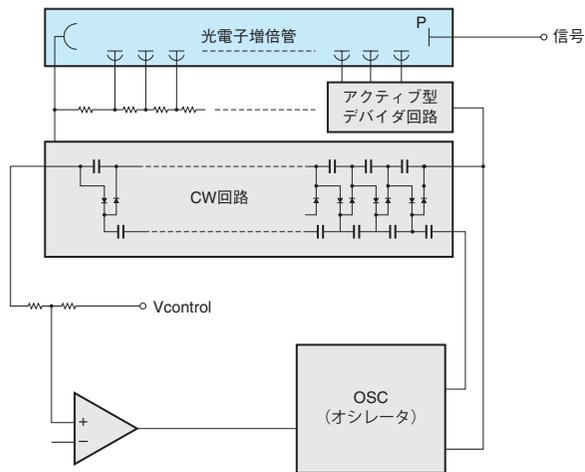
コッククロフト・ウォルトン回路は、図8-2のようにダイオードを直列に接続し、その接続点にコンデンサを1つおきに配置した倍電圧回路で、基準電圧に対して1倍、2倍、3倍と整数倍で昇圧された電位が各電極に与えられます。この回路は、低消費電力で、かつ直流及びパルスに対する良好なりニアリティ特性が得られ、回路をコンパクトにできるという特長を持ちます。



THBV4\_0802,JA

図8-2 コッククロフト・ウォルトン(CW)電源回路

コッククロフト・ウォルトン回路／アクティブ型デバイダ回路併用電源回路は、光電子増倍管全体に供給する電圧をコッククロフト・ウォルトン回路で作成し、アクティブ型デバイダ回路にて各電極へ配分する方法です。アクティブ型デバイダ回路は、ダイノード終段付近の分割抵抗数個をトランジスタに置き換えています。これにより、ダイノード間電圧は光電子増倍管の信号電流の影響を受けないため、デバイダ回路電流の60%～70%程度まで良好なリアリティ特性が得られます。また、コッククロフト・ウォルトン回路だけの回路と比べて、セトリングタイムが短いという特長を持ちます。



THBV4\_0803,JA

図8-3 コッククロフト・ウォルトン(CW)回路 アクティブ型デバイダ回路併用電源回路

## (2) 入力電圧

光電子増倍管モジュールは、ケース内部に高圧電源回路とデバイダ回路を内蔵していますので、外部から高電圧を供給する必要はありません。一般的な光電子増倍管モジュールの場合、電流・電圧出力型は低電圧入力とコントロール電圧入力、フォトンカウンティングヘッドは低電圧入力のみで動作させることができます。

低電圧入力はカタログに記載されている電圧範囲内であれば、低圧電源の出力が変動し入力電圧が変わっても、光電子増倍管モジュールの高圧電源回路で光電子増倍管へ供給される高電圧は安定化されますので、出力信号には影響しません。一方、コントロール電圧入力の変動は出力に大きく影響しますので、安定性の高い低圧電源が必要です。

## (3) 出力と消費電流

光電子増倍管は入射光に比例して出力が変動します。出力が増えると消費電流も増えていきます。光電子増倍管モジュールの出力電流に対する消費電流の一例を示します。

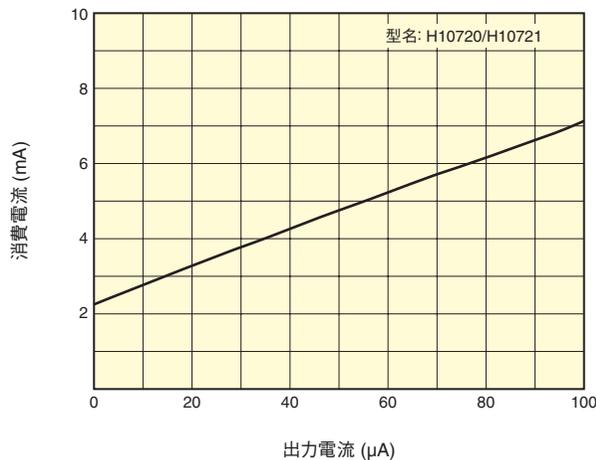


図 8-4 消費電流

THBV4\_0804JA

## 8.3 電流出力型と電圧出力型

### (1) ゲイン調整方法

光電子増倍管モジュールのゲインは、コントロール電圧を変えることで調整が可能です。コントロール電圧の変換方法には2通りあります。図8-5、8-6に例を示します。

図8-5のように電圧を直接入力する場合、コントロール電圧は必ず最大定格を超えない電圧を入力します。基準電圧出力は、端子を無接続の状態にしておき、グラウンドに接触することがないように注意が必要です。

図8-6は可変抵抗器を使ってゲイン調整を行う方法で、可変抵抗器をコントロール電圧と基準電圧出力の間に接続します。コントロール電圧が最大定格を超えないように電圧値をモニタしながら、可変抵抗器でコントロール電圧の値を調整します。

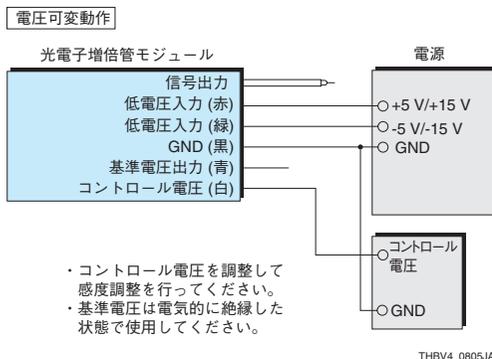


図8-5 電圧可変動作によるゲイン調整方法

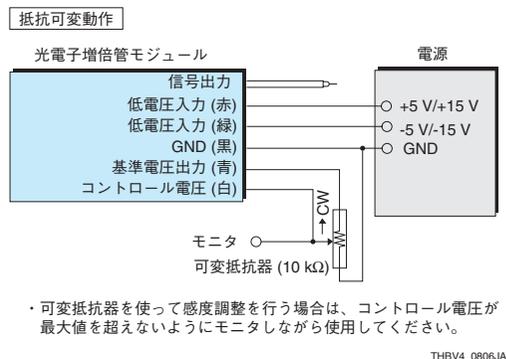


図8-6 抵抗可変動作によるゲイン調整方法

## (2) リップルノイズ

内蔵の高圧電源回路は発振回路を使用しているため、発振によるノイズが信号出力に誘導されます。この誘導ノイズをリップルノイズと呼びます。光電子増倍管モジュールの信号ケーブルをオシロスコープに接続し、入射光がない状態で電圧レンジを下げてベースラインを観測すると、負荷抵抗1 MΩで負荷容量22 pF、同軸ケーブル長45 cmの条件において、100  $\mu$ V ~ 1 mV程度で周波数帯域が約200 kHz ~ 300 kHzの出力が見えます。光電子増倍管モジュールはリップルノイズを極力減少するように設計されていますが、全てをなくすことはできません。リップルノイズの影響をさらに減らすには、以下の方法があります。

- ① ローパスフィルタを信号出力の後に入れる。
- ② コントロール電圧を上げて光電子増倍管のゲインを上げ、アンプゲインを下げる。

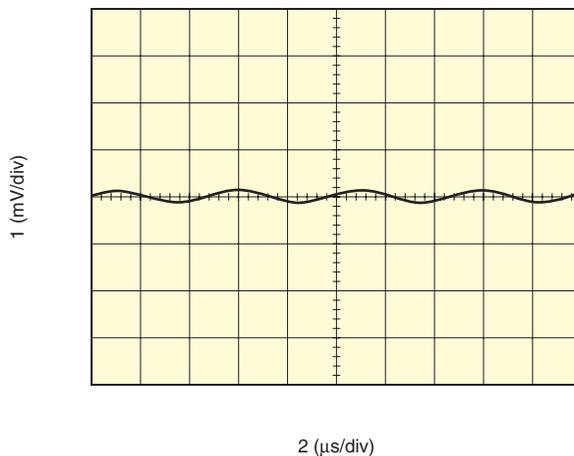
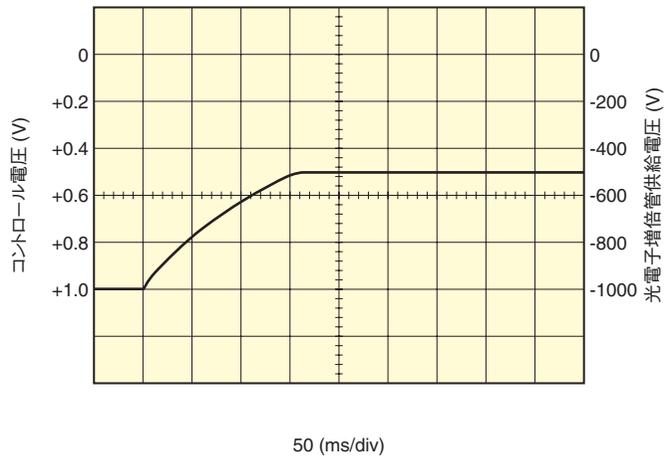


図 8-7 リップルノイズ

THBV4\_0807JA

### (3) セトリングタイム

光電子増倍管モジュールのコントロール電圧を変化させたとき、光電子増倍管に供給される高電圧はコントロール電圧に対して応答が遅れを生じます。高電圧が設定した電圧に到達するまでの時間をセトリングタイムと呼び、浜松ホトニクス製のほとんどのモジュールはコントロール電圧を+1.0 Vから+0.5 Vに変化させたときの時間で定義しています。内蔵している高圧電源回路でセトリングタイムは異なり、例えば図8-3に示したコッククロフト・ウォルトン(CW)回路／アクティブ型デバイダ回路併用電源回路は速いセトリングタイムを有します。図8-8に陰極に供給される高電圧の様子を示します。



THBV4\_0808JA

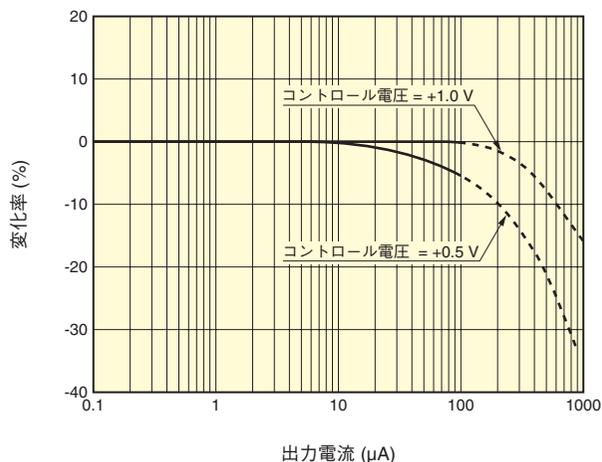
図8-8 CW回路／アクティブ型デバイダ回路併用電源回路内蔵モジュールセトリングタイム

## 8.3.1 電流出力型モジュール

電流出力型光電子増倍管モジュールは、光電子増倍管の陽極が直接モジュールの出力（電流）となっていて、接続する機器の負荷によって出力電圧が変わります。接続する信号処理機器は通常電圧信号を対象としているため、電流計を除けば、何らかの方法で出力電流を電圧信号に変換する処理が必要であり、変換には用途や計測の目的によって適切な方法を選択します。

### (1) リニアリティ特性 (直流出力モード)

光電子増倍管モジュールは、リニアリティ特性に優れたコッククロフト・ウォルトン回路やアクティブ型デバイダ回路を内蔵しているため、コントロール電圧が高いほど内蔵光電子増倍管の最大平均出力電流までリニアリティ特性を持った出力が得られます。



THBV4\_0809JA

図 8-9 リニアリティ特性 (直流出力モード)

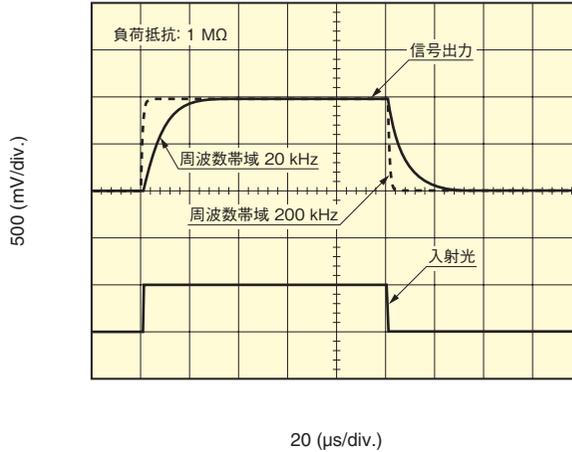
### 8.3.2 電圧出力型モジュール

電圧出力型光電子増倍管モジュールは、光電子増倍管の陽極に近接してオペアンプを取り付け、電流を電圧へ変換して出力されます。光電子増倍管の電流出力をケーブル等で取り出す場合と比較して、外来ノイズに強くなります。測定周波数帯域が数十kHzから数MHzの範囲では、外来ノイズの影響が顕著になるためアンプを内蔵することは効果的です。10 MHz以上の帯域ではアンプの消費電力が大きくなることが多いので、電流出力型モジュールに外付けのアンプを使用の方が適当です。

電圧出力型光電子増倍管モジュールは、電流電圧変換のためのオペアンプが内蔵されていますが、アンプの帰還抵抗とコンデンサがチャージアンプとしても機能しますので、シンチレーションカウンティングのようなパルス計測も可能です。

### (1) 周波数特性

内蔵しているアンプ回路の周波数特性が異なると、同じ現象を測定してもオシロスコープに出力される信号波形が異なります。周波数特性が遅いアンプ回路内蔵のモジュールで速い現象を測定しても、現象の時間変化を正確にとらえることはできません。測定する光現象の速さを考慮して周波数特性を選択する必要があります。



THBV4\_0810JA

図8-10 周波数特性

### (2) オフセット電圧

電圧出力型光電子増倍管モジュールは、コントロール電圧が0 Vで光電子増倍管が動作していない状態でもわずかな出力があり、この出力をオフセット電圧と呼びます。オフセット電圧が発生するのは内蔵オペアンプの特性のバラツキによるもので、同じ型名のモジュールでも、プラスに出るものもあれば、マイナスに出るものもあります。

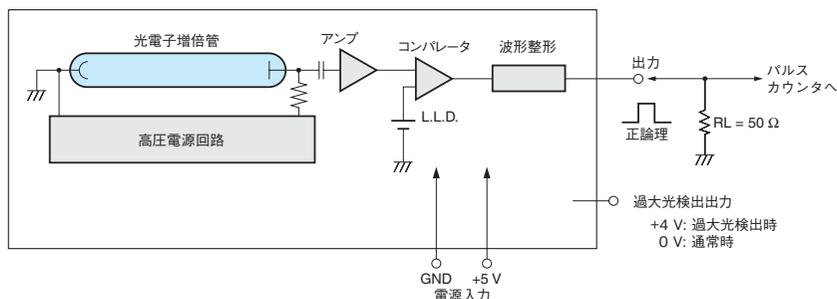
光電子増倍管モジュールを暗中で動作させたときは、「光電子増倍管の暗電流による電圧出力」と「オフセット電圧」の合計が出力されます。

### (3) 出力信号電圧

電圧出力型光電子増倍管モジュールの出力電圧は入力電圧によって制限されます。出力できる電圧は入力電圧より少し低い値までです。従って電流電圧変換係数が大きいモジュールでは、光電子増倍管からの出力電流が小さくても出力電圧が飽和して、正しい値を得られないことがありますので注意が必要です。入射光量を減らしたり、ゲインを下げたりして、飽和していない状態にして測定します。

## 8.4 フォトンカウンティングヘッド

フォトンカウンティングヘッドは、光電子増倍管と高圧電源回路、フォトンカウンティング回路が一体化されたモジュールです。光電子増倍管からの電流パルスを増幅した後、設定されたしきい値以上のパルスのみ選択し、波形整形器を通してパルス出力されます。フォトンカウンティングヘッドは、あらかじめプラトー領域内の高電圧が光電子増倍管へ供給されるよう調整されているため、外部から低電圧を入力するだけで動作させることができます。



THBV4\_0811JA

図8-11 フォトンカウンティングヘッド 構成図

### (1) 出力特性

内蔵の光電子増倍管の時間特性やパルス波形の違いにより、フォトンカウンティング回路の設計が異なります。このため、出力形式は正論理のロジック信号ですが、そのパルス電圧やパルス幅は個々のフォトンカウンティングヘッドで異なります。

高速の信号を取り扱うため、フォトンカウンティングヘッドの出力インピーダンスは50 Ωで設計されています。このため、フォトンカウンティングヘッドと機器をケーブルで接続する場合、50 Ωのインピーダンスのケーブルを使い、機器の入力インピーダンスも50 Ωにすることが適当です。外部回路の入力インピーダンスが50 Ωより大きくはずれインピーダンスに不整合を起こした状態でケーブルを延長すると、外部回路の入力端で反射したパルスがフォトンカウンティングヘッドに戻り、さらに反射してパルスを誤ってカウントすることがあります。

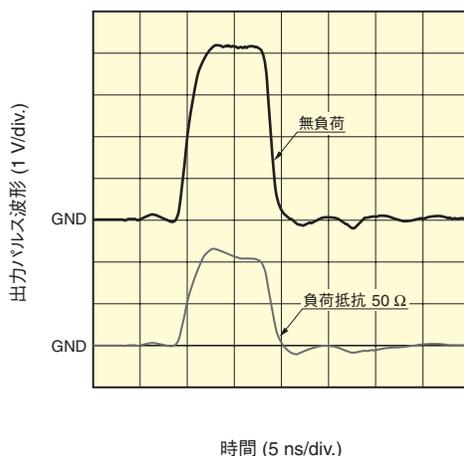


図 8-12 出力特性

THBV4\_0812JA

## (2) 計数感度

計数感度は、ある波長において1 pWの入射光に対する1秒間当たりの出力カウント数 ( $s^{-1} \cdot pW^{-1}$ )で表しています。計数感度は光電子増倍管の量子効率と収集効率が直接関わっています。

## (3) ダークカウント

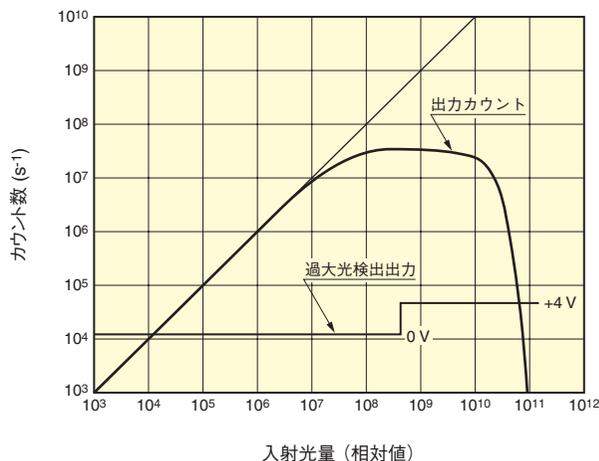
光電子増倍管は光入射がない状態でもいくらかの暗電流パルスを生じます。暗電流パルスはアンプで増幅された後、設定されたしきい値以上のパルスのみが選択されて波形整形器を通してパルス出力されます。この出力を1秒間当たりのカウント数( $s^{-1}$ )で表したものをダークカウントと呼びます。フォトンカウンティングヘッドの出力は、信号とダークカウントの合計となりますので、ダークカウントは信号検出限界レベルの目安となります。

## (4) パルスペア分解能

前後のパルスを分離判別できる最小時間間隔のことです。パルスペア分解能より短い時間間隔で入射したフォトン、何個入っても1個としか計数されません。(第6章 6.3 (2)C 参照)

## (5) カウントリニアリティ

フォトン1つ1つがフォトンカウンティングヘッドのパルスペア分解能と同じ時間間隔で周期的に入射した場合、理論上パルスペア分解能の逆数まで計測できることとなります。通常、フォトンカウンティング計測は化学発光や生物発光などの微弱光計測に用いられ、入射光はランダムな事象です。この場合、光量を増やしていくと、あるところからパルスの重なりが発生しカウント値が光量に比例しくなくなります。カウントリニアリティは理論値に比べてカウント値がどれほど損失しているのかを表した特性で、10%損失のところまで規定しています。フォトンカウンティングヘッドのカウントリニアリティ特性は、内蔵されている回路のパルスペア分解能で決定されますが、高計数率になると回路のみならず光電子増倍管の時間特性も重要な要因となってきます。図8-13はパルスペア分解能20 nsのフォトンカウンティングヘッドのカウントリニアリティ特性で、10%損失のところまで  $5 \times 10^6 s^{-1}$  となっています。



THBV4\_0813JA

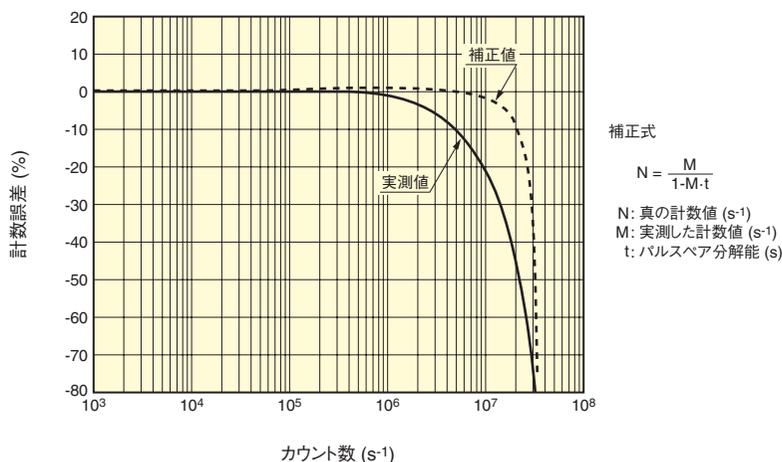
図8-13 カウントリニアリティ特性

## (6) カウントリニアリティの改善

フォトンカウンティングで計測されるカウント数が $10^6 \text{ s}^{-1}$ 以上になるとパルスの重なりによる計数誤差が発生します。カウントリニアリティを上げるためには、

- ①回路のパルスペア分解能を上げる
- ②プリスケアラを使って分周する
- ③補正式を用いて近似する

が挙げられます。ここでは、補正式を用いて近似した場合のカウントリニアリティ特性の改善を示します。



THBV4\_0614JA

図8-14 補正式によるカウントリニアリティ特性

## (7) 過大光検出出力

パルスの重なるの発生頻度が増えていくと、出力パルス数はだんだん頭打ちとなり、やがて減少に転じ、最後は0となります。従って、例えば、出力カウント数 $1 \times 10^6 (\text{s}^{-1})$ は、カウントリニアリティが保たれた光量と過大光量の2つの状態で現れることとなります。過大光検出出力は、過大光量が入射したときに電圧が出力するようになっていますので、この出力をモニタすることで、どちらの状態の光量かを判別することができます。また、この出力を用いれば、入射光量を減らすためにシャッタを制御することや、フォトンカウンティングヘッドの入力電圧を0 Vにして動作を停止することも可能です。

過大光検出出力を持たないフォトンカウンティングヘッドで入射光量の状態を知るためには、例えば、入力面の前に透過率10%の減光フィルタを置き、出力カウント数が1/10になればカウントリニアリティが保たれた光量、1/10にならなかったときは過大光量だと分かります。

## 8.5 ゲート機能

レーザやキセノンフラッシュランプなどの励起光が光電子増倍管に入射することにより、信号処理系を飽和させ、測定に影響を与えることがあります。メカニカルシャッタで過大光を遮断する方法がありますが、高速にシャッタを動作させることができないほか、製品寿命などの問題があります。これに対して、電子シャッタ（ゲート）は光電子増倍管の電極の電位を変化させることにより、過大光を遮断することができます。電子的な遮断であることから、高速でかつ高い消光比が得られます。

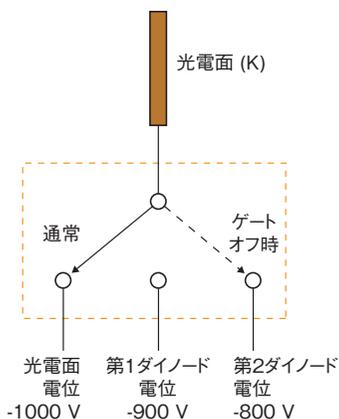
ゲート機能付光電子増倍管モジュールは、電極の電位を制御するゲート回路を内蔵したモジュールです。

### 8.5.1 ゲート動作

#### (1) 動作原理

ゲート動作は、光電子増倍管内の光電子や二次電子が後段の電極に到達したり、到達しないようしたり、電極の電位を制御して行います。信号出力時の電位状態は入力から出力に向かって電位が高くなっていきますが、ゲート動作がオフにする時は、ある電極の電位を、その電極より1つ後段の電極より高い電位に変化させます。その結果、1つ後段の電極の方が低電位となり、マイナス電荷の光電子や二次電子は後段電極に到達できなくなり、信号がここで途切れ出力されなくなります。

図8-15に光電面の電位を制御した場合を示します。ゲートをオフにしたい時間だけ光電面の電位を第1ダイノードより高電位の第2ダイノードと同電位にすることによって、ゲート動作させることができます。



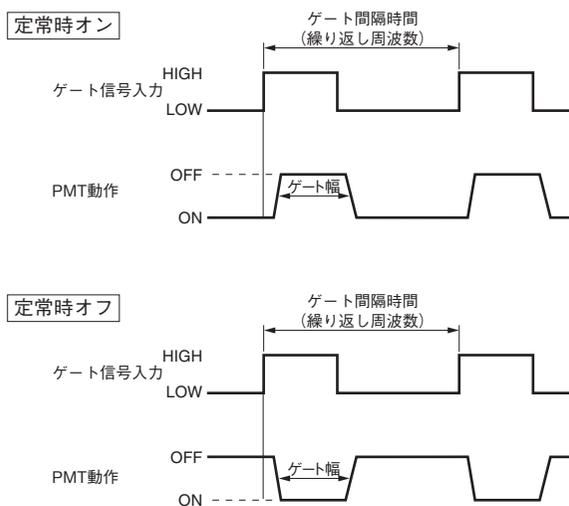
THEBV4\_0815JA

図8-15 ゲート回路 原理

1つの電極の電位を変えるだけでもゲート動作は可能ですが、2つ以上の電極の電位を制御することによって、より高い消光比が得られます。

## (2) 動作方式

動作方式には、光電子増倍管の動作が定常時オンの状態でゲート信号を入力すると動作停止する方法（定常時オン）と、逆に定常時オフの状態でゲート信号を入力すると動作する方法（定常時オフ）の2通りがあります。光電子増倍管をゲート時間内だけ停止させたいのか動作させたいのか、遮断したい光の種類や用途に応じて選択します。



THBV4\_0816JA

図8-16 動作方式

## (3) 動作方法

光電子増倍管の各電極間には数十Vから200V程度の電圧がかかっていますが、この電圧の電位を外部から直接高速に変えることは容易ではありません。ゲート機能付光電子増倍管モジュールは、電極の電位を高速に制御できるゲート回路を内蔵しているため、低電圧のパルス信号を外部から入力すれば電極の電位が変化し、ゲート動作ができるようになっています。

## 8.5.2 ゲート特性

### (1) 時間特性

ゲート機能付光電子増倍管モジュールには、ゲート時間や繰り返し周波数、上昇時間、下降時間、遅延時間などいくつかの時間特性があります。用途に応じてゲート時間と繰り返し周波数で選択します。

## (2) スイッチングノイズ

高速でゲート動作を行う場合、高速のゲート信号を入力する必要があります。ゲート信号が入力されると、光電子増倍管の電極間に存在する静電容量を通して図8-17のように誘導ノイズが陽極信号に誘起されます。これがスイッチングノイズです。このノイズを減少させるには、ゲート信号電圧を小さくしたり、ノイズキャンセルなどの方法を用いますが、完全に取り除くことは難しいです。

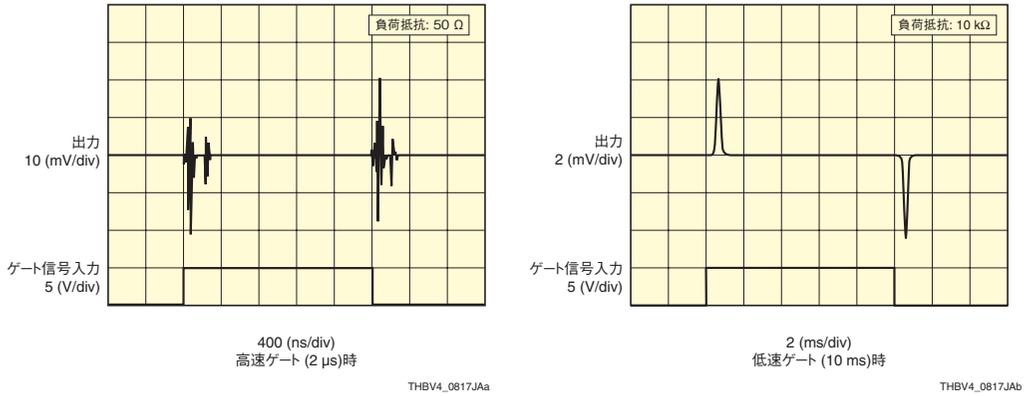


図8-17 スイッチングノイズ

## (3) 消光比

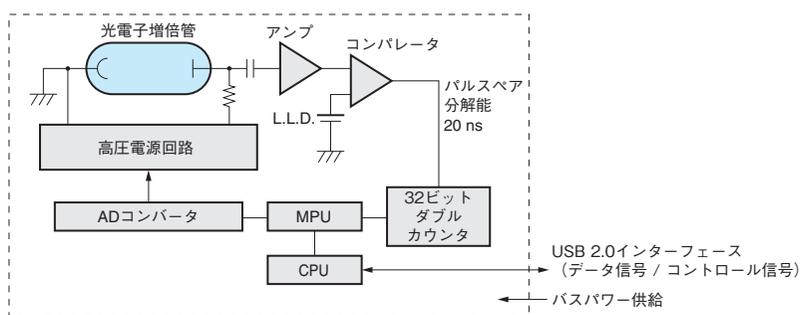
光電子増倍管の陽極電流が最大定格値を超えたり、外部の回路が飽和したりする強い光が入射していても、ゲート動作させることで陽極電流値を低く抑えることが可能です。消光比は、ある一定の光量を光電子増倍管に入射してゲート動作でオン・オフさせたときの出力の比を表しています。例えば、ゲートオフ時の出力が1 nA、オン時の出力が10 μAの場合、消光比は1 nA : 10 μA = 1 : 10<sup>4</sup>と表されます。複数の電極の電位を制御している製品は、より高い消光比が得られます。

ゲート動作によって電流を抑制している状態でも消光比の比率分の電流が陽極に流れます。ゲート動作中であっても、陽極電流が光電子増倍管の最大定格を超えないように注意が必要です。また、レーザーのようなエネルギーの強い光が光電子増倍管へ入射された場合は、ゲート動作を行っても光電面の組成自体が破壊されることもありますので、強い光が光電子増倍管へ入射しないような工夫が必要です。

## 8.6 CPU+ インターフェース内蔵型

光電子増倍管の電流出力を、電流電圧変換アンプで電圧へ変換し、さらにADコンバータで波高値をデジタル化したり、フォトンカウンティングの場合は出力パルスのある時間内でカウントしたりします。デジタルデータは外部の処理系へ容易に転送することができ、一方外部からコマンドを送ることで光電子増倍管を制御することも可能です。このように信号処理回路と制御用のCPUならびにデータ転送用のインターフェースを一体化したものが、CPU+インターフェース内蔵型光電子増倍管モジュールです。

図8-18にフォトンカウンティングタイプの回路構成図を示します。フォトンカウンティング回路の後に32ビットのカウンタで電圧パルスをカウントし、USBインターフェース経由でパソコンなどに取り込みます。



THBV4\_0818JA

図8-18 CPU+インターフェース内蔵型 構成図

## 8.7 故障

ここでは光電子増倍管モジュールの故障原因や注意事項を述べます。特に初めてお使いになる方は、使用前に目を通していただくと、製品を正しく長く使用することができます。

### 8.7.1 原因

光電子増倍管はガラス製品です。落とせば割れて破損します。光電子増倍管モジュールではケース内部に光電子増倍管があるため、落としても外観上では分からず、破損に気づかないことがあります。わずかなひび割れでも光電子増倍管は性能劣化、破損します。また、回路部の破損や、ケースに磁気シールドケースを使用している場合にはその磁気特性が変わってしまうことがあります。

以下に、光電子増倍管モジュールの取扱いにあたって、主な注意点と故障原因を記します。

- 動作していない状態でも光電面を直射日光等の過大光にさらさない → ノイズ増加、感度劣化
- 入力面には素手でさわらない、汚さない → 光の透過率低下
- 落下または、強い振動や衝撃を与えない → 性能劣化、破損
- 水ぬれ、高温多湿環境で使用しない → 性能劣化、破損
- 定格以上の電圧を入力しない → 回路部破損
- 電流出力型モジュールの場合、動作状態で信号出力線の断続は行わない → 後続回路破損

## 8.7.2 トラブルシューティング

よく問い合わせのある件について記しています。

### (1) 信号が出ない

規定の入力電圧が供給されていないときやコントロール電圧が0Vの場合、信号は出力されませんので、正しく接続され、規定の電圧が入力されているか確認してください。

また、接続する機器の入力負荷を確認します。例えば、1  $\mu$ Aの電流信号の場合、入力負荷50  $\Omega$ のオシロスコープ等に入力しても最大50  $\mu$ Vの出力のため、信号を認識できていない可能性があります。入力負荷を大きくする、信号増幅用のアンプを使うなどしてください。

### (2) ゲインコントロールできない

正しく接続され、規定の入力電圧、コントロール電圧が供給されているにもかかわらず、ゲインコントロールで出力信号が変わらない場合、過大入射光が原因で飽和している可能性があります。減光フィルタ等を使って入射光を減らし、出力信号が変化するかを確認してください。

### (3) 出力信号波形が現象と異なる

速い現象の場合は、接続するアンプやモジュール内蔵アンプの周波数帯域の影響が考えられます。電流信号を直接オシロスコープ等に入力する場合には、現象の速さを捉えられるように入力負荷抵抗を適切な値にしてください。

### (4) フォトンカウンティングヘッドの出力パルス数が0

フォトンカウンティングヘッドへの入射光を増やしていくと、あるレベルから出力パルス数はだんだん頭打ちとなり、やがて減少に転じ、最後は0となります。過大入射光が原因で0となっている可能性がありますので、減光フィルタ等を使って入射光を減らし、パルス数が増えるか確認してください。

### (5) 暗電流が変動する

内蔵光電子増倍管の劣化や過大入射光の影響が考えられます。過大入射光による影響は、暗中に1時間程度放置すれば軽減されることがあります。

また、外乱交の影響も考えられるので、遮光にも十分注意してください。

## 8.8 関連光学製品

実際にモジュールを使用するにあたっては、入力光学系や出力信号処理系が必要になります。特に入力光学系は設計を必要とすることも多く手間がかかりますので、すぐに簡単に使用できる製品が望まれます。光電子増倍管モジュールをさらに使いやすくした入力光学系製品であるオプティカルブロックがあります。

オプティカルブロックは、バンドパスフィルタやレンズ、ダイクロイックミラーなどの光学部品を内蔵可能なブロックで微弱光計測を考慮して設計されています。光学部品を高精度に配置でき、遮光性に優れ、手で脱着できるため、各ブロックを簡単、自由に組み合わせ、組み換えが可能です。さらに、レーザなどの光源や顕微鏡対物レンズを組み合わせることで、共焦点光学系や蛍光顕微鏡系を組み上げることも可能です。



図8-19 オプティカルブロック

下記にバンドパスフィルタを用いたファイバ入力1波長検出、バンドパスフィルタとダイクロイックミラーを用いたファイバ入力2波長検出の組み合わせ例を示します。

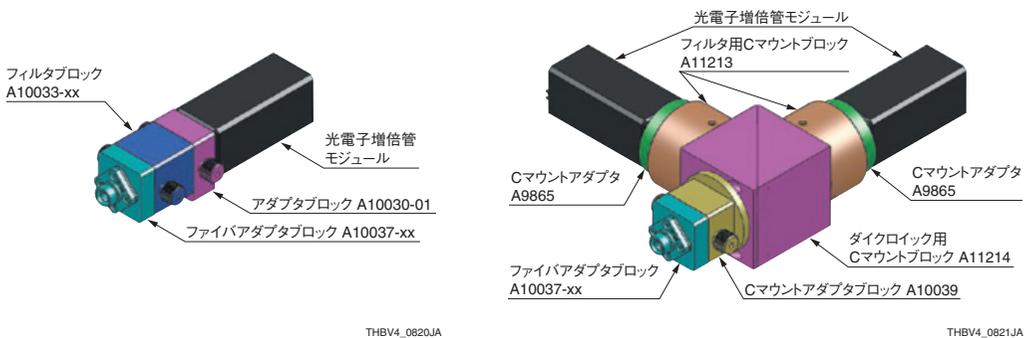


図8-20 1波長検出の組み合わせ例

図8-21 2波長検出の組み合わせ例

メ 毛

## 第 9 章

### マルチアノード型および位置検出型光電子増倍管

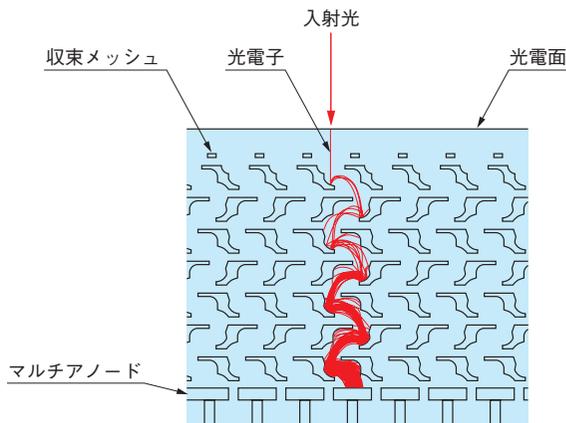
この章では、マルチアノードおよび位置検出機能を有する光電子増倍管について紹介します。電子増倍部には、メタルチャンネル型ダイノードを用いています。

電子増倍部からの二次電子群を読み出す方法には、独立した複数の陽極(アノード)から電荷を読み出すマルチアノード型光電子増倍管と、二次電子の分布の重心位置をクロスプレートアノードで検出する位置検出型光電子増倍管があります。

## 9.1 マルチアノード型光電子増倍管

図9-1にメタルチャンネル型ダイノードの電極構造及び電子軌道図を示します。メタルチャンネル型ダイノードは、多数の微細なダイノードチャンネル（光電子ならびに二次電子の通り道）を有した構造をしており、光電面から放出された光電子が収束メッシュにより第1ダイノードに入射した後は、第2ダイノード → 第3ダイノード → … → 最終ダイノード → 陽極に至るまで、二次電子が隣接するダイノードチャンネルへ拡散する度合いが小さいという特長があります。このように、二次電子が拡散しにくい電子増倍部と、分割された複数の陽極（マルチアノード）を組み合わせることで、光の入射位置を精密に検出することが可能になります。

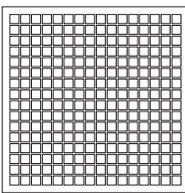
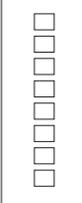
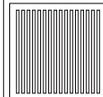
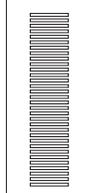
またメタルチャンネル型ダイノードは、電子増倍部が薄型であると同時に、各ダイノードの間隔も非常に狭く設計されているため、全長が短くコンパクトな形状になります。



THBV4\_0901JA

図 9-1 電極構造及び電子軌道図

マルチアノード光電子増倍管としては大別してマトリックスタイプとリニアタイプの2種類に分類されます（図9-2）。

タイプ	マルチアノード型光電子増倍管						
	マトリックス				リニア		
	M4	M16	M64	M256	L8	L16	L32
アノード形状							
アノード数	4	16	64	256	8	16	32

THBV4\_0902JA

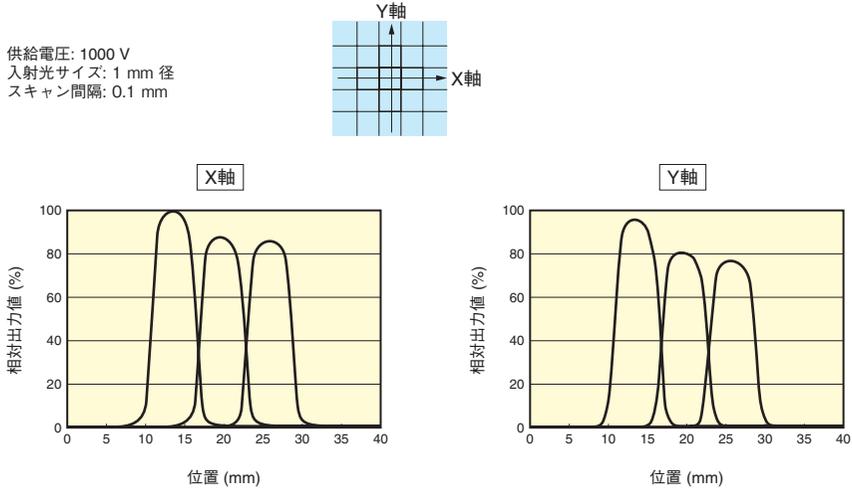
図 9-2 マルチアノード型光電子増倍管の陽極パターン

### 9.1.1 マトリックスタイプマルチアノード型光電子増倍管

マトリックスタイプマルチアノード型光電子増倍管には、外形サイズが26 mm角のメタルパッケージ型と、51 mm角のフラットパネル型があります。陽極チャンネル数は4 (2 × 2)から256 (16 × 16)までラインアップされており、それぞれチャンネルサイズが異なりますので、用途や目的に応じてこれらの中から選ぶことができます。

マトリックスタイプマルチアノード型光電子増倍管の基本的な特性として、64チャンネルのフラットパネル型光電子増倍管を例に「空間分解能」、「クロストーク特性」、「磁気特性」、「ユニフォミティ特性」について紹介します。

空間分解能の測定結果を図9-3に示します。これはタングステンランプから青色フィルタを介した1 mm径の平行光を光電面中央付近で走査させた時の、光電子増倍管の空間分解能(各陽極の出力分布特性)を測定したものです。

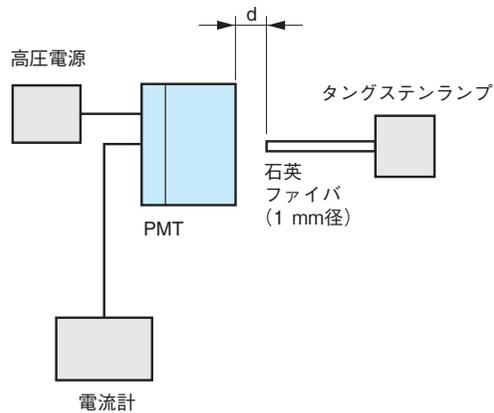


THBV4\_0903JA

図 9-3 光電面中央部付近の陽極の空間分解能

クロストークとは、あるひとつのチャンネル上にもみ光が入射したにもかかわらず、それ以外のチャンネルからも応答がある現象のことです。これは光電子が第1ダイノードへ入射する過程で広がりを持つところに主な原因があります。また、入射窓内部での光の広がりも要因のひとつと考えられています。

図9-4にクロストーク特性の測定方法を、図9-5にクロストーク特性例を示します。



THBV4\_0904JA

図 9-4 クロストーク特性測定方法

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	
P1	100	2.0	—	—	—	—	—	—	P8
P9	0.9	0.1	—	—	—	—	—	—	P16
P17	—	—	0.0	0.5	0.1	—	—	—	P24
P25	—	—	0.5	100	0.6	—	0.1	0.7	P32
P33	—	—	0.1	0.7	0.1	—	0.5	100	P40
P41	—	—	—	—	—	—	0.1	0.6	P48
P49	—	—	0.2	1.0	0.2	—	—	—	P56
P57	—	—	2.1	100	1.9	—	—	—	P64
	P57	P58	P59	P60	P61	P62	P63	P64	

THBV4\_0905JA

図 9-5 1 mm 径のファイバを用いた時のクロストーク特性例 (d = 0 mm)

図9-5はスポット光が入射したひとつのチャンネルの陽極出力を100 %として、他の隣接するチャンネルからの陽極出力を相対値で表したものです。直径1 mmのファイバを入射窓に密着させて測定した時(d = 0 mm)のクロストーク特性は、光の入射位置により「0.1 % ~ 2.1 %」を示しています。なお、縦方向と横方向に隣接するチャンネルよりも、斜め方向に隣接するチャンネルの方がクロストークはより小さくなります。このようにファイバを用いて光を入射させる場合、ファイバを入射窓から離してしまうとクロストークは大きくなりますので注意が必要です。これはファイバ光の広がりによるため、シンチレーティングファイバや光ファイバを用いた計測を行う場合には、なるべくファイバと入射窓を密着させて使用します。

また図9-6は、光電面中央部付近の1つのチャンネルの中央に5 mm角の光を入射させたとき(チャンネル間隔は6 mm)、のクロストークを示したものです。光電面中央部のチャンネルで2 % ~ 3 %程度のクロストークがあります。

	—	—	—	—	—	
	—	0.2	1.8	0.2	—	
	—	1.5	100	2.7	—	
	—	0.2	2.6	0.3	—	
	—	—	—	—	—	

供給電圧: 1000 V  
光源: タングステンランプ  
入射光サイズ: 5 mm角

THBV4\_0906JA

図 9-6 5 mm 角の光に対する、中央部チャンネルのクロストーク特性例

またフラットパネル型マルチアノード光電子増倍管は、有効領域を広くとるために、光電面の周辺部から放出される光電子を収束して第1ダイノードに入射させています。そのため、特に光電面コーナー部のチャンネルにおいてクロストークが大きくなる傾向(3%~6%)があります。(図9-7)

100	5.5	—	
3.5	0.5	—	
—	—	—	

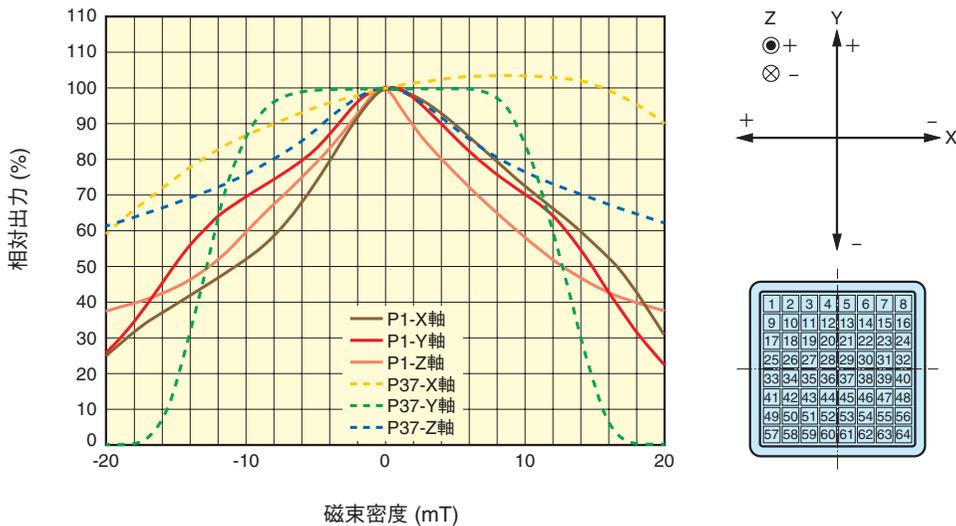
供給電圧: 1000 V  
 光源: タングステンランプ  
 入射光サイズ: 5 mm角

THBV4\_0907JA

図9-7 5 mm角の光に対する、コーナー部チャンネルのクロストーク特性例

次に磁気特性について紹介します。マトリックスタイプマルチアノード型光電子増倍管は比較的外部磁界の影響を受けにくい光電子増倍管です。これは入射窓部以外が金属パッケージ内に収められていることや、光電面と第1ダイノードの間の距離が近接した構造になっていることが主な要因です。以下に64チャンネルのフラットパネル型光電子増倍管の磁気特性を紹介します。

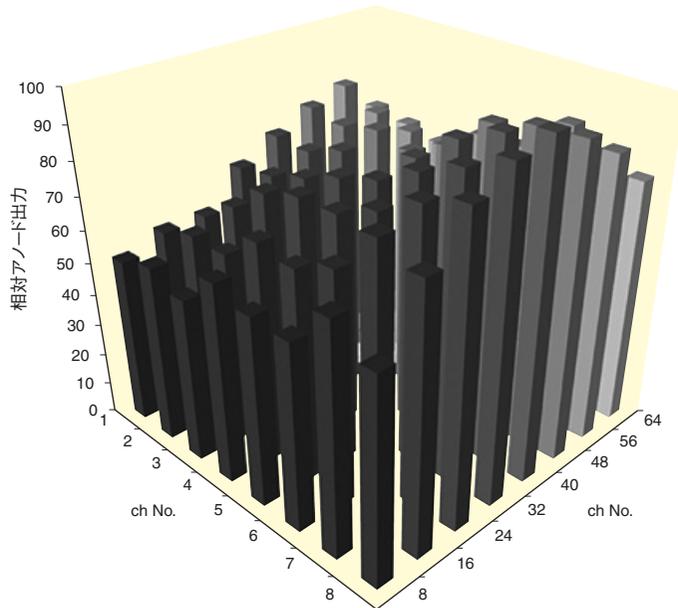
図9-8は、3軸(X, Y, Z)に沿って外部から磁界を加えた場合の、No.1のチャンネル(光電面コーナー部)とNo.37のチャンネル(同中央部)の各陽極出力への影響を示したもので、磁界を全く加えなかった場合の出力を100%として測定した相対出力値で示しています。チャンネル位置によって、その磁気特性が異なっていることが分かります。



THBV4\_0908JA

図9-8 外部磁界が陽極出力に及ぼす影響 (No. 1 と No.37 のチャンネル)

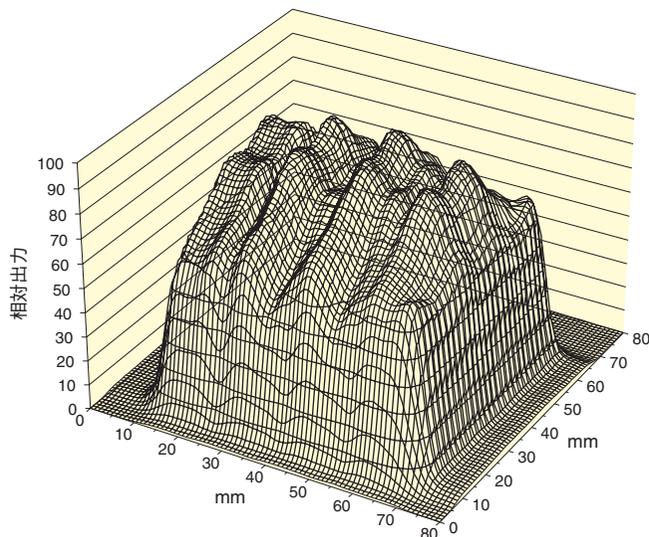
次にユニフォミティ特性(出力感度の均一性)を紹介します。図9-9に陽極出力のユニフォミティ特性(代表例)を示していますが、これは各チャンネルに6 mm角の光を入射させた時の陽極出力を測定したものです。光電面のユニフォミティはほぼ均一であるため、このようなバラツキは電子増倍部におけるゲインの不均一性に起因しています。図9-9における陽極出力の不均一性はおおむね「1:2」です。



THBV4\_0908JA

図 9-9 各チャンネルの陽極出力のユニフォミティ特性(代表例)

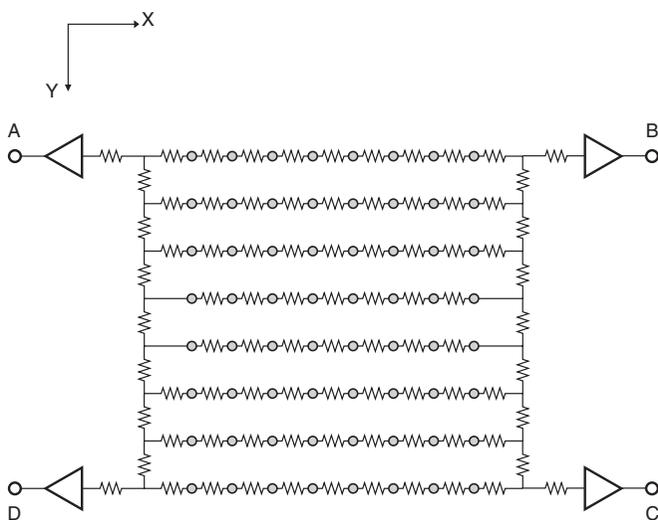
図9-10に単一チャンネル内における陽極出力のユニフォミティの代表例を示します。6 mm角の大きさのチャンネルに対して直径50  $\mu\text{m}$ の微弱な光を入射し、これを0.1 mmずつ移動させた時の特性です。



THBV4\_0910JA

図 9-10 1チャンネル内の陽極出力のユニフォミティ特性(代表例)

マトリックスタイプマルチアノード型光電子増倍管にシンチレータを光学結合することで、ガンマ線などの放射線の2次元分布を計測することができます。図9-11に64チャンネルのマルチアノード光電子増倍管の2次元放射線計測の結線図例を、図9-12には、64チャンネルのフラットパネル型マルチアノード光電子増倍管によるガンマ線に対するモザイク状シンチレータのシンチレーションイメージ例を示します。図9-11のように各陽極チャンネルを抵抗チェーン回路で結線し、64チャンネルの出力をA、B、C、Dの4つに集約した上で読み込み、それぞれをアンガー方式で計算(式9-1)することで、シンチレーション光に伴う二次電子のX方向とY方向の重心位置が求められます(64チャンネルの出力を独立に読み込んで、位置計算させる方法もあります)。



THBV4\_0911JA

図 9-11 64チャンネルによる抵抗チェーン回路の結線図例

$$X = (B+C)/(A+B+C+D)$$

$$Y = (C+D)/(A+B+C+D) \dots\dots\dots (式 9-1)$$

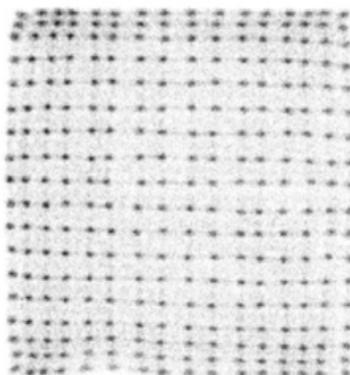


図 9-12 ガンマ線照射によるモザイク状シンチレータを使用した測定例

(シンチレータ：LYSO、アレイサイズ数：16(横)×18(縦)、

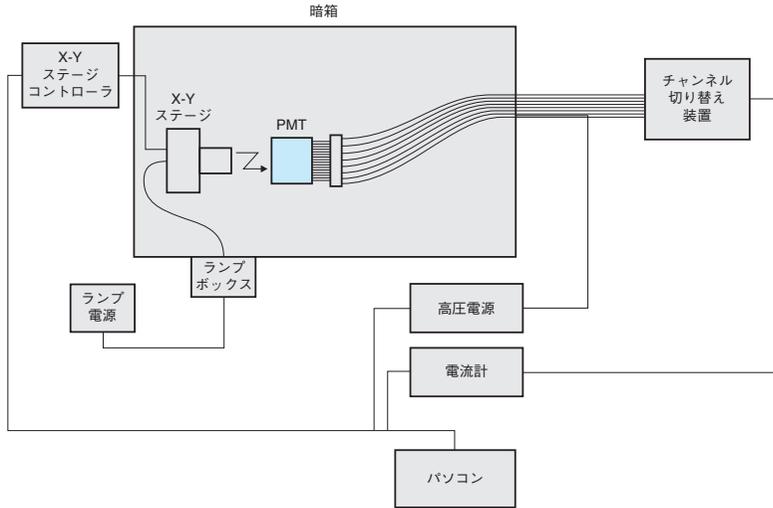
素子サイズ：2.9 mm × 2.9 mm × 20 mm、ガンマ線源： $^{22}\text{Na}$  (エネルギー：511 keV))

### 9.1.2 リニアタイプマルチアノード型光電子増倍管

リニアタイプマルチアノード型光電子増倍管の基本的な特性として、「クロストーク特性」と「ユニフォミティ特性」について説明します。

図9-13に16チャンネルのクロストーク特性の測定方法を示し、図9-14に代表的な特性例を示します。

X-Yステージ上のアパーチャから照射される100 μm径のスポット光を光電面上に走査させた時、16チャンネルリニアタイプのクロストークは約3 %です。



THBV4\_0913JA

図 9-13 クロストーク特性の測定方法

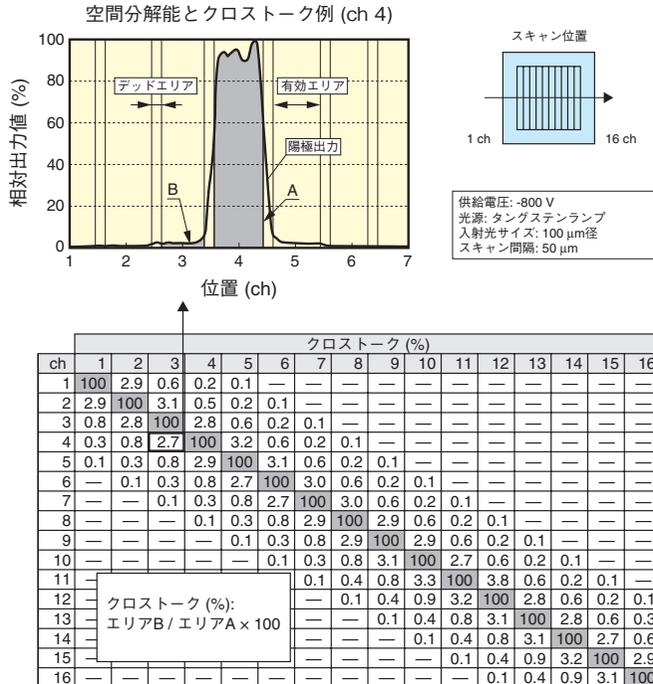
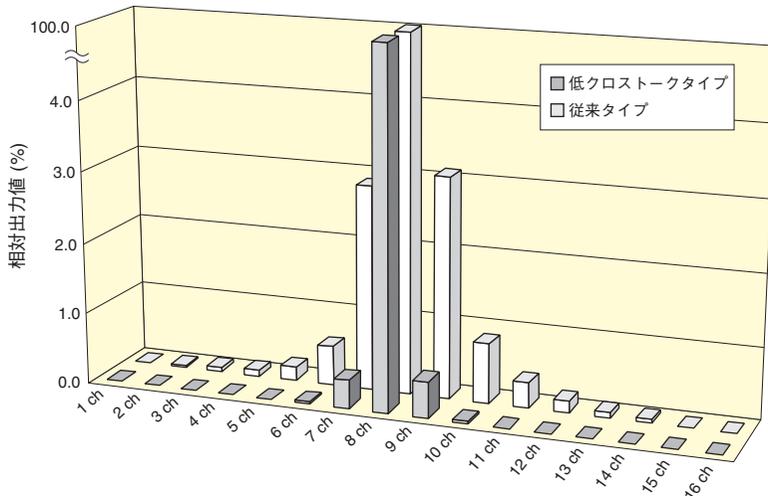


図 9-14 16チャンネルリニアタイプのクロストーク例

THBV4\_0914JA

また、16チャンネルや32チャンネルのリニアタイプマルチアノード型光電子増倍管では黑色ガラスの仕切りが入った入射窓や各チャンネルの陽極間に遮蔽壁を設けた電極構造を採用した低クロストークタイプがあります。図9-15に8 chの陽極出力を100%とした時の低クロストークタイプのクロストーク特性例を示します。従来タイプでは、隣接チャンネルのクロストークは約3%ですが、低クロストークタイプでは1%未満にまで改善されていることが分かります。

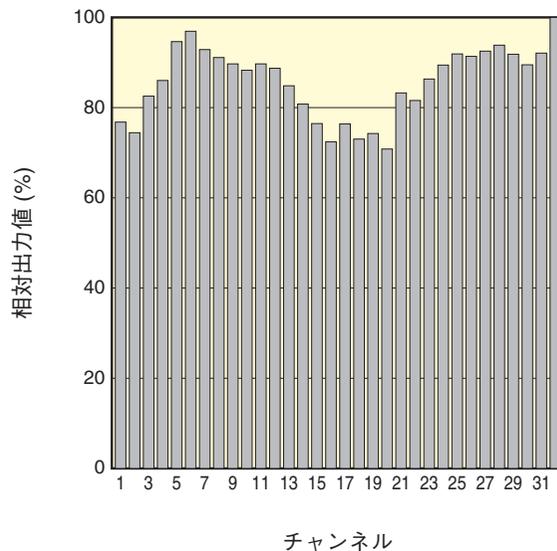


THBV4\_0915JA

図 9-15 16チャンネル低クロストークタイプのクロストーク特性例

次に、ユニフォミティ特性を紹介します。図9-16に陽極でのユニフォミティ特性の代表例を示します。これは32チャンネルリニアタイプの光電面全体に均一な光を照射し、その時の陽極出力を測定したものです。マトリックスタイプと同様に、陽極出力のばらつきは主に電子増倍部のゲインのばらつきに起因しており、各陽極出力間のばらつきは平均で「1：1.7」程度です。

各チャンネルのゲインコントロールをすることで、ユニフォミティ特性を補正し、陽極出力をそろえたモジュールもあります。



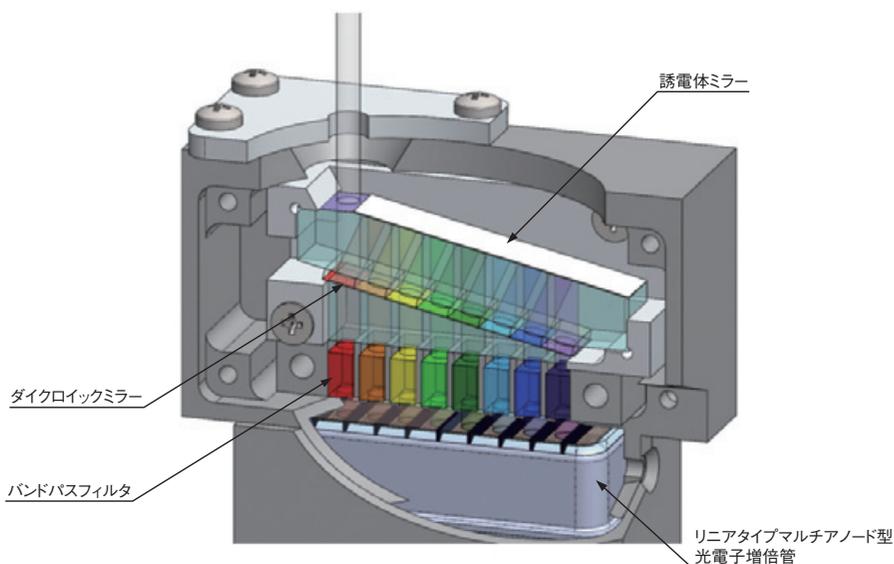
THBV4\_0916JA

図 9-16 32チャンネルリニアタイプの陽極出力のユニフォミティ特性例

### 9.1.2.1 小型分光器内蔵タイプ

リニアタイプマルチアノード光電子増倍管は一次元アレイのため、主にマルチチャンネル分光の検出器として用いられます。分光した光を検出する場合には、複数の波長信号を同時に取得する必要があります。シングルチャンネルの光電子増倍管を複数個並べて使用すると大きな光学系となってしまいますが、リニアタイプマルチアノード型光電子増倍管を用いることにより、コンパクトな光学系と検出器に上げることが可能になります。特に32チャンネルリニアタイプマルチアノード型光電子増倍管は、その形状からグレーティングやプリズムと組み合わせて使われる場合が多く、最近ではレーザー走査型顕微鏡等に使われています。

その他の分光方法にダイクロミックミラーとバンドパスフィルタを用いたフィルタ分光方式もあります。図9-17は一つの例です。この分光方式は、誘電体ミラーと特性の異なる複数のダイクロミックミラーの間を光が多重反射することで分光されます。このフィルタ分光方式は、必要な波長域の光のみを検出することができ、光のロスが小さいため高効率に検出することができます。



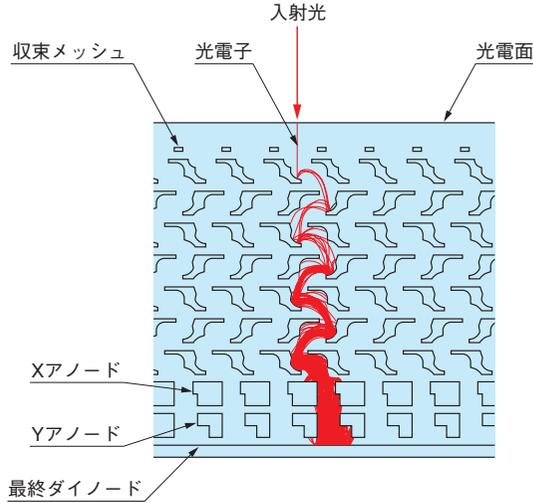
THBV4\_0917JA

図 9-17 リニアタイプマルチアノード型光電子増倍管を用いた分光器例の模式図

## 9.2 重心位置検出型光電子増倍管

図9-18にメタルチャンネル型ダイノードとクロスプレートアノードを利用した重心位置検出型光電子増倍管の電極構造及び電子の軌道図を示します。

光電面からの光電子は電子増倍部で増倍され、最終ダイノードからの反射二次電子は二層の直交したプレート型の陽極(クロスプレートアノード)で読み出されます。



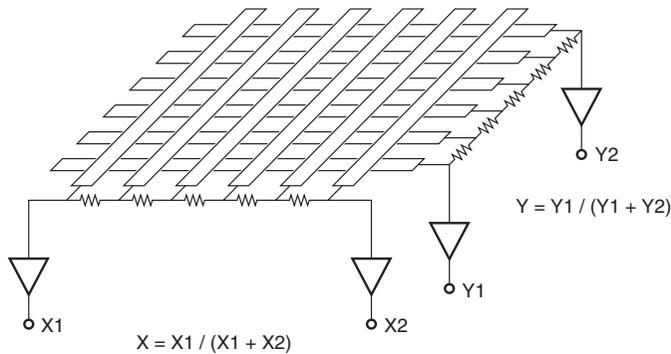
THBV4\_0918JA

図 9-18 電極構造

図9-19に重心位置検出型光電子増倍管による、陽極上の二次電子群の重心位置検出方法について示します。

X方向ならびにY方向にリニアに配列されたプレート型アノード間を抵抗チェーンで結線することにより、最終ダイノードから放出された二次電子群は、入射した陽極位置と抵抗チェーンの抵抗比に応じてX1、X2、Y1、Y2方向に分流されます。これらに対して(式9-2)の足し算と割り算を行うことによって、二次電子のXとY方向の重心位置が求められます。

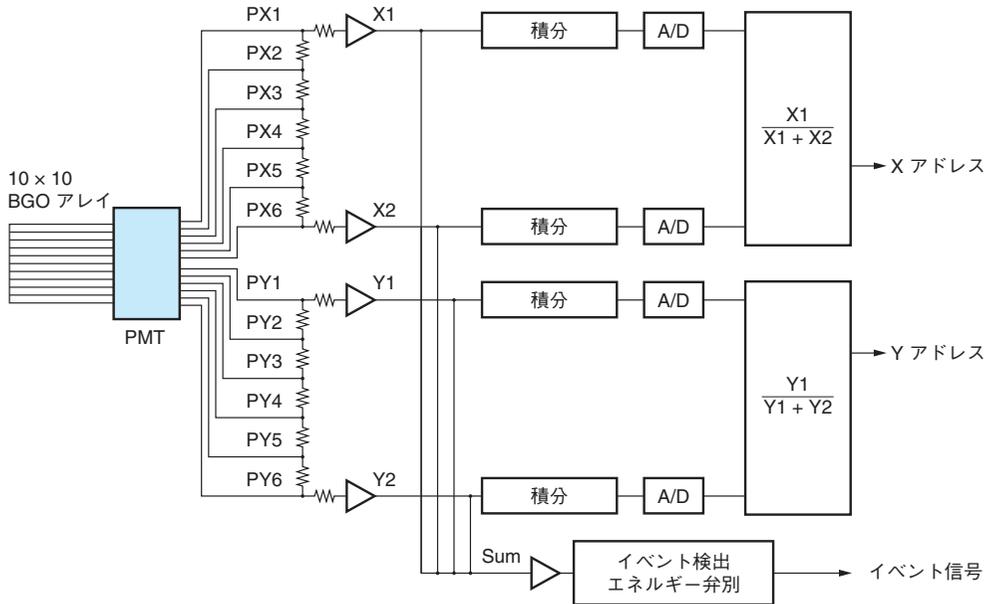
$$\begin{aligned}
 X &= X1 / (X1 + X2) \\
 Y &= Y1 / (Y1 + Y2) \dots\dots\dots (式 9-2)
 \end{aligned}$$



THBV4\_0919JA

図 9-19 抵抗チェーンによる重心位置検出方法

図9-20に6(X)+6(Y)のクロスプレートアノード光電子増倍管にモザイク状シンチレータを組み合わせた時の測定系例を、図9-21に2.2 mm × 2.2 mm × 15 mmのBGOシンチレータを10 × 10 = 100個配列したモザイク状シンチレータに662 keVのガンマ線を照射した時の測定例を示します。



THBV4\_0920JA

図 9-20 モザイク状シンチレータ (BGO) へのガンマ線照射による測定系

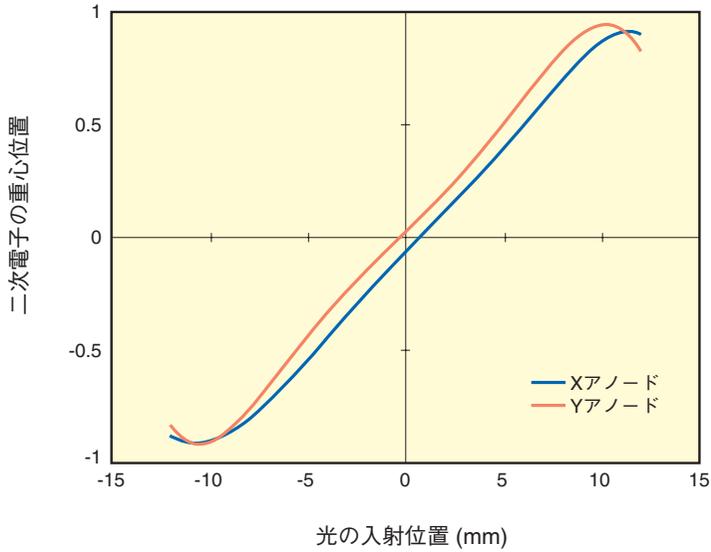


図 9-21 図 9-20 による測定例

(シンチレータ : BGO、アレイサイズ : 10 (横) × 10 (縦)、素子サイズ : 2.2 mm × 2.2 mm × 15 mm)、  
ガンマ線源 :  $^{137}\text{Cs}$  (エネルギー : 662 keV))

クロスプレートアノード光電子増倍管が100個のモザイク状シンチレータおのおののシンチレーション光を明確に弁別していることがわかります。

なお光電面周辺部では、陽極の数に限りがあることから、二次電子の重心位置に多少の歪みが見られます。図9-22は、1 mm径のスポット光を光電面上に走査させた時の、光の入射位置（横軸）と、得られた二次電子の重心位置（縦軸）の間の関係を示した空間リニアリティ特性です。光電面の周辺部において、光の入射位置と二次電子の重心位置の関係が線形でない領域があることが分かります。これが光電面周辺部における歪みの原因ですが、この歪みはロックアップテーブルなどの手法によって補正することが可能です。



THBV4\_0922JA

図 9-22 重心位置検出型光電子増倍管の空間リニアリティ

# 第 10 章

## マイクロ PMT

マイクロPMTは半導体製造技術であるMEMS技術を応用することで開発された、世界最小・最軽量の光電子増倍管です。

マイクロPMTはMEMS技術、半導体製造技術と、従来の光電子増倍管で培われた電子軌道設計技術、真空気密パッケージ技術、真空プロセス技術を総合的に利用することで、光電子増倍管としての高い性能を保ったまま、指先に載るサイズまで小型化された光電子増倍管です。

## 10.1 マイクロPMTの概要

マイクロPMTは、シリコン基板を2枚のガラス基板で挟んだ3層構造をしています。シリコン基板を半導体製造技術であるMEMS(Micro Electro-Mechanical System)技術<sup>1)</sup>を用いて、深堀りエッチング加工 (900  $\mu\text{m}$ ) することで電子増倍部を作製しています。同じくMEMS 技術の陽極接合を用いてシリコン基板とガラス基板を強固に貼り合わせています。最終的に基板サイズ (図10-1) から個片化したチップは縦・横が10 mm程度、厚さ2 mm、重さ約0.5 gと指先に載るサイズを実現しています (図10-2)。このように、光電子増倍管を基板サイズで加工及び製造することで大量生産が可能となり、シンプルな構造であるため通常の光電子増倍管に比べ高い耐衝撃性を有しています。

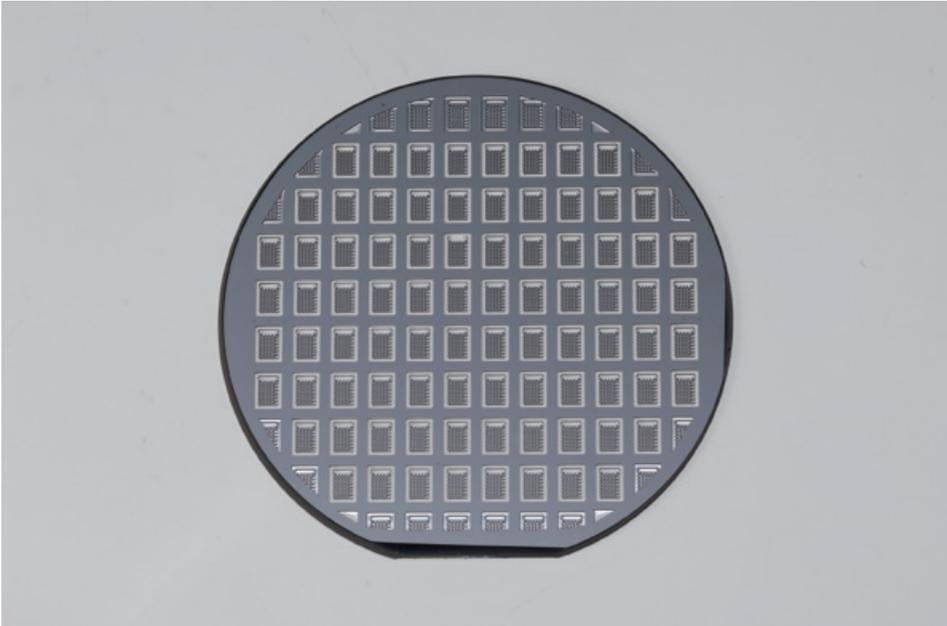


図 10-1 150 mm (6 インチ) 基板サイズで作製されたマイクロPMT

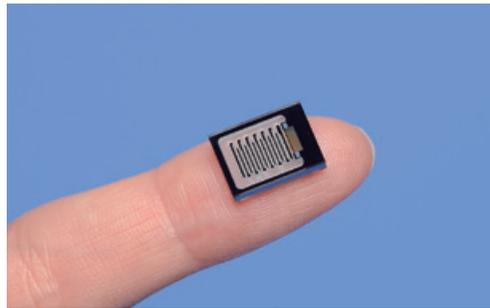
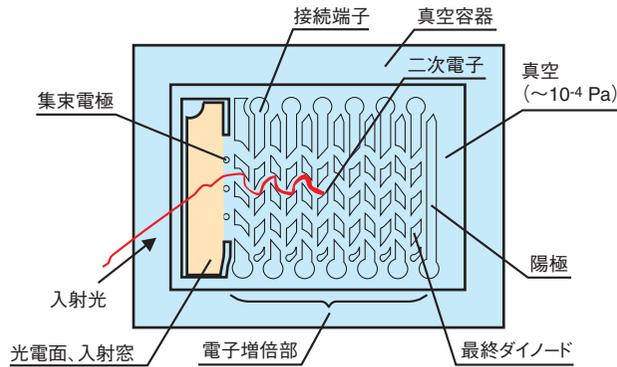


図 10-2 指先に載ったマイクロPMT

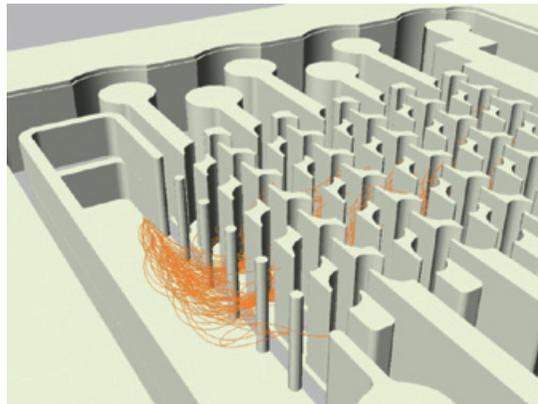
## 10.2 マイクロ PMT の動作原理

基本的な動作原理は従来の光電子増倍管と同様で、入射窓を通して入射した光は光電面で光電子に変換されます。光電子は、電界により光電面の垂直方向から90度電子軌道を曲げられ、電子増倍部に導かれます。電界により加速された電子は、電子増倍部に形成した二次電子面に衝突し、加速電圧に伴った二次電子を発生させます。これを電極の段数分繰り返して、最終的に100万倍程度に増幅され、陽極から電流として出力されます (図10-3、10-4、10-5)。



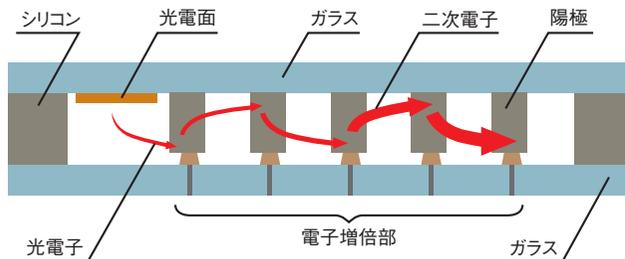
THBV4\_1003JA

図 10-3 マイクロ PMT の構造図



1004

図 10-4 マイクロ PMT の電子軌道 (オレンジの線)



THBV4\_1005JA

図 10-5 マイクロ PMT の断面図と電子増倍の模式図

## 10.3 主な特長

### 1. 高い量産性とカスタマイズ性

半導体製造技術を用いた製造方法により、これまでの光電子増倍管では難しかった数量での量産対応が可能になり、また使用状況や使用環境に合わせたカスタマイズ性も向上しています。

### 2. 小型で衝撃に強い

小型、軽量で衝撃に強いいため、ポケットに入るようなサイズの、高性能な携帯型分析機器などの開発に最適です。

### 3. 機器に組み込みやすいアッセンブリタイプと高圧電源内蔵のモジュールタイプ

マイクロPMTにデバイダ回路を組み合わせたアッセンブリタイプと、デバイダ回路と高圧電源を内蔵したモジュールタイプ、さらにフォトンカウンティング回路を内蔵したフォトンカウンティングヘッドも製品化されており、マイクロPMTを簡便にご使用いただけます。

## 10.4 諸特性

### (1) 分光感度特性

マイクロPMTの感度波長領域はバイアルカリ光電面が300 nm～650 nmで、波長350 nmでの量子効率の代表値は約26 %です。マルチアルカリ光電面の感度波長領域は300 nm～850 nmです (図10-6)。

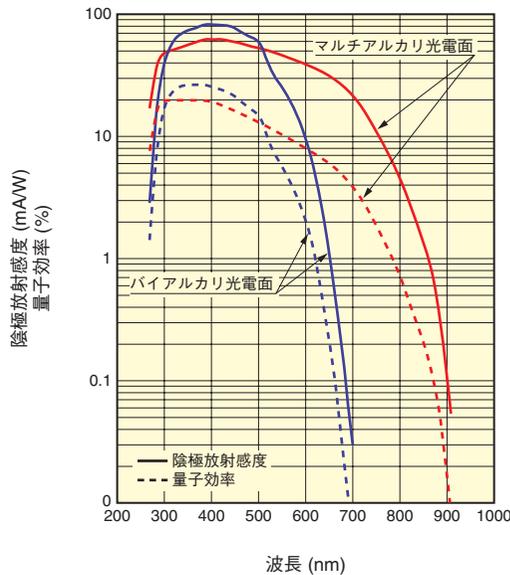
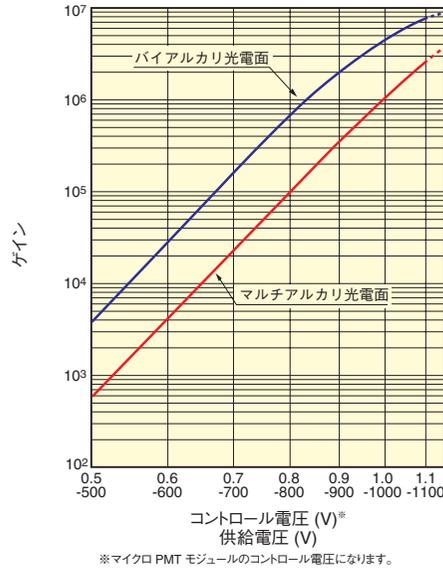


図 10-6 分光感度特性

## (2) ゲイン特性

ゲイン特性は、光電面の種類で若干異なりますがバイアルカリ光電面において、900 Vの供給電圧でおおよそ200万倍が得られます (図10-7)。モジュールタイプの場合は、+0.5 V ~ +1.0 Vのコントロール電圧を可変させることで、供給電圧を調整でき、ゲイン調整を行うことができます。

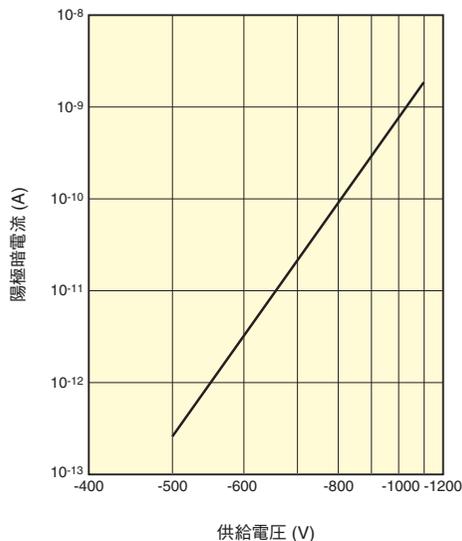


THEBV4\_1007JA

図 10-7 代表的なゲイン特性

## (3) 暗電流特性

マイクロPMTは完全な暗中にはあるときでも微弱な電流を出力します。供給電圧に対する代表的な暗電流値を図10-8に示します。供給電圧を上げるとゲインが上昇し、暗電流も増加します。TO-8タイプPMTの暗電流1.0 nA (定格1000 V時、ゲイン  $2 \times 10^6$ ) に対して、マイクロPMTの暗電流は0.3 nA (定格900 V時、ゲイン  $2 \times 10^6$ ) と低くなっています。これは、光電面サイズの差によるものです。



THEBV4\_1008JA

図 10-8 代表的な陽極暗電流

## (4) 時間特性

パルス光（パルス幅：70 ps）に対する、マイクロPMTの出力波形を図10-9に示します。供給電圧が-900 Vの時の出力パルスの上昇時間は1.2 ns、下降時間は1.7 nsです。

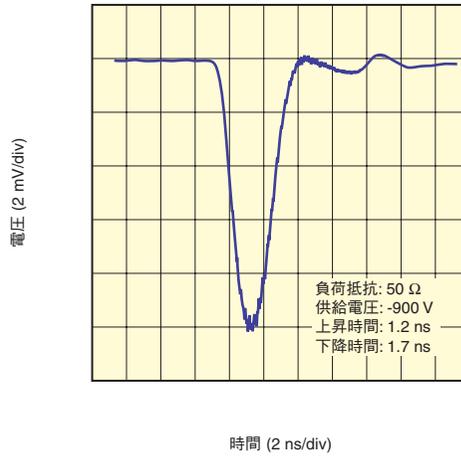


図 10-9 出力波形

THBV4\_1009JA

マイクロPMTの標準的なT.T.S. (Transit Time Spread) はおよそ1.3 nsです (図10-10)。

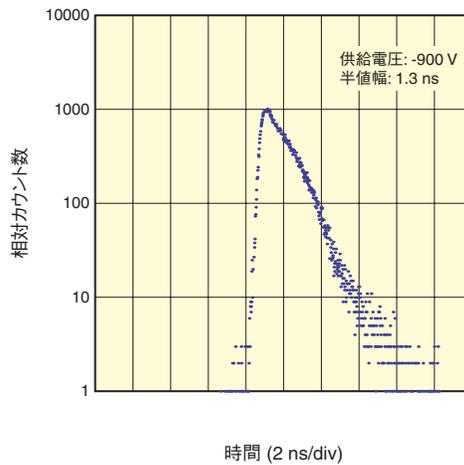


図 10-10 T.T.S. 波形

THBV4\_1010JA

### (5) ユニフォミティ特性

図10-11は波長400 nm、直径1 mmのスポット光をマイクロPMTの光電面上でX軸並びにY軸方向に0.1 mmの間隔で走査した時の陽極出力を示した例で、おおむね均一な出力が得られています。

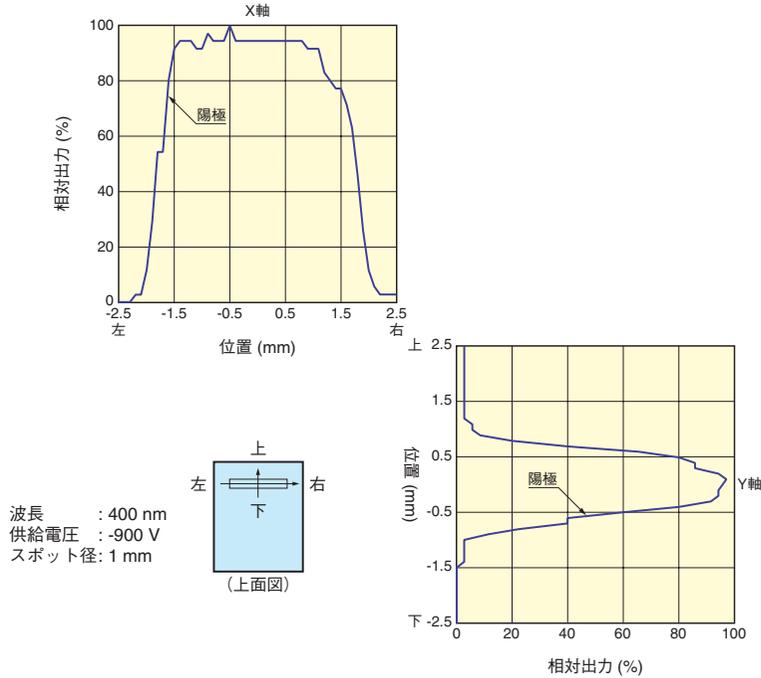


図 10-11 ユニフォミティ特性

THBV4\_1011JA

### (6) 磁気特性

マイクロPMTは磁場の強さ、方向により出力が変化し、Z方向の磁場に最も影響を受けます (図10-12)。地磁気は0.1 mT未満であるため、地磁気による影響は±1 %以下と影響はほとんどありませんが、モータなど磁場を発生する装置の近くで使用する場合は、磁場による影響を受けるため、磁気シールド等を使用して影響を軽減する必要があります。

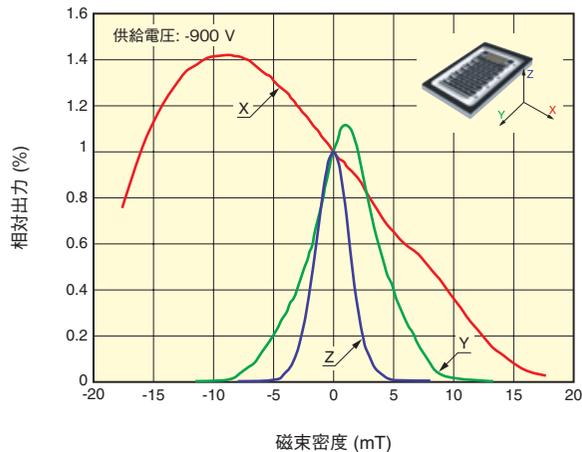


図 10-12 磁気特性

THBV4\_1012JA

## 第10章 参考文献

- 1) 情報技術協会：MEMSデバイスの加工・実装・評価技術(2007)

## 第 11 章

# MCP 内蔵型光電子増倍管

マイクロチャンネルプレート<sup>1)</sup>(Micro-Channel Plate以後MCP)により、フォトンカウンティング動作下でのピコ秒領域までの高帯域計測が可能となっています。ここでは、MCPを内蔵した高感度かつ超高速光検出器であるMCP内蔵型光電子増倍管（以後MCP-PMT<sup>2)</sup>）について紹介します。

## 11.1 構造

### 11.1.1 MCP の構造

図11-1(a)にMCPの構造の一部を示します。MCPは内壁を抵抗体および二次電子放出体とした内径 $6\mu\text{m}\sim 25\mu\text{m}$ のガラスキャピラリ（チャンネル）を多数束ねた板状構造をもち、それぞれのチャンネルは図11-1(b)にその断面を示すような、独立した二次電子増倍器を形成しています。入射した一次電子により壁から放出された二次電子は、MCPの両端に供給された電圧 $V_D$ による電界で加速され、再び壁に衝突し二次電子を放出します。この過程がチャンネル内で繰り返される結果、増倍された多数の電子が出力端より放出されます。

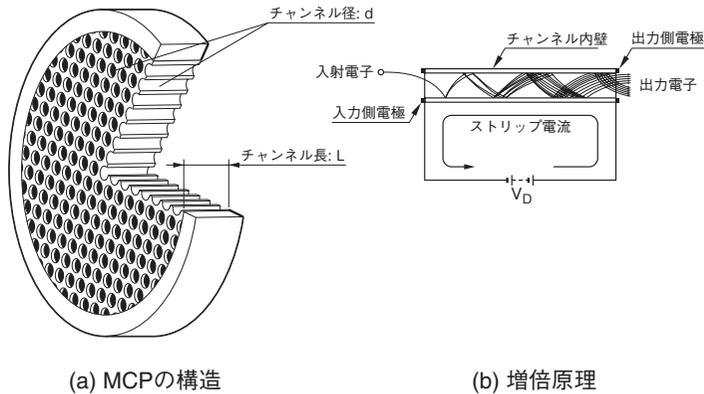


図 11-1 MCP の構造と増倍原理

THBV4\_1101JA

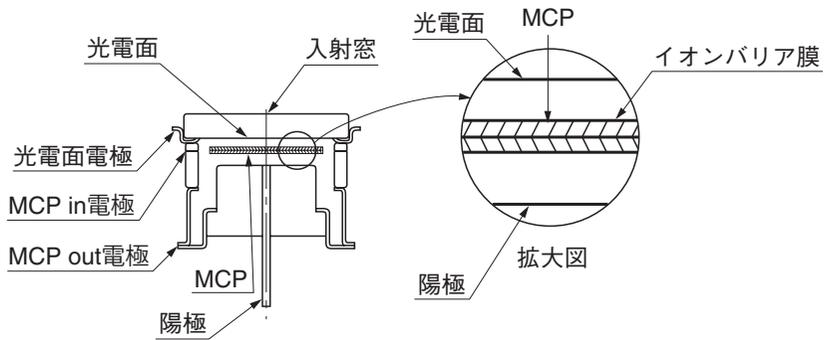
MCPはその材質、構造そして動作原理に基づき、通常の多段形ダイノードとは異なった次のような特長を持っています。

- ① 小型、軽量
- ② 高速応答
- ③ 二次元、高空間解像度
- ④ 高磁場中で動作可能
- ⑤ 荷電粒子、紫外線、真空紫外線、X線、 $\gamma$ 線、中性子にも感度を持つ
- ⑥ 低消費電力

これらの特長を応用した検出器として、高速応答特性を利用したMCP内蔵型光電子増倍管(MCP-PMT)をはじめ、二次元高感度検出器であるイメージインテンシファイア(I.I.)、超高速測光ストリーク管などがあります。

### 11.1.2 MCP-PMT の構造

図11-2に代表的なMCP-PMTの断面図を示します。MCP-PMTは入射窓、光電面、MCPおよび陽極から構成されています。光電面より放出された光電子は、MCPの各チャンネル内に入射し、その内壁に衝突して増倍を繰り返し、陽極から取り出されます。光電面とMCPの間隔は約2mmの近接構造をしています。十分なゲインを得るため、MCPを単数または複数使用します。図11-3に実際のMCP-PMTの写真を示します。また、光電子が入射するMCP入力側には、MCP内部等で発生したイオンが光電面に戻るのを防ぐために、イオンバリア膜と呼ばれる薄膜が形成されています。



THBV4\_1102JA

図 11-2 MCP-PMT の構造図



R3809Uシリーズ



R5916Uシリーズ（ゲート付）

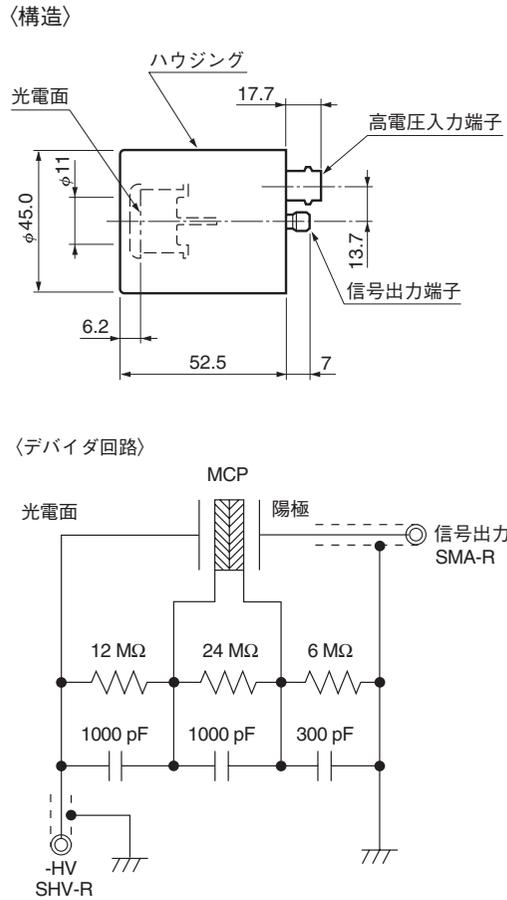
図 11-3 MCP-PMT の外観写真

### 11.1.3 デバイダ回路とハウジング構造

MCP-PMTの動作のためには、光電子増倍管と同様に各部品に電圧を供給する必要があり、抵抗によるデバイダ回路が用いられます。

図11-4にデバイダ回路の基本的構成(MCP2枚入り)およびMCP-PMT用デバイダ回路を内蔵したハウジングの構造を示します。

光電面に負の電圧を供給し、光電面、MCPin、MCPoutそして陽極の間を抵抗で分割し、高電圧を分圧して、それぞれの部品に電圧を供給します。また、超高速信号波形検出用としてリングング対策を十分考慮した構造、回路設計になっており、出力波形の歪みは最小限に抑えられています。



THBV4\_1104JA

図 11-4 MCP-PMT のハウジング構造と動作回路図 (代表例)

## 11.2 MCP-PMT の基本特性

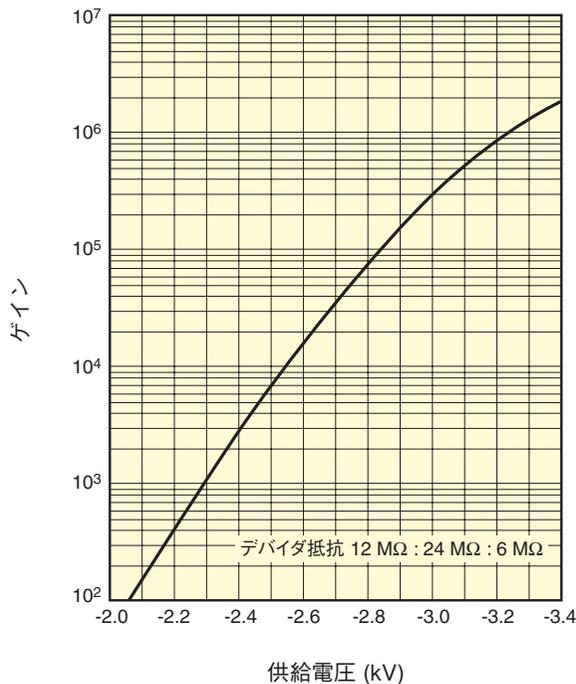
### 11.2.1 ゲイン特性<sup>1)</sup>

MCP-PMTのゲインは、内蔵されているMCPの枚数によって決まります。図11-5にMCP-PMTの平均的なゲイン特性を示します。

MCPのゲイン特性<sup>1)</sup> ( $\mu$ )は、チャンネル長 (L)とチャンネル径 (d) (図11-2参照) の比で定義される  $\alpha=L/d$ を用いて、近似的に

$$\mu = \exp(G \cdot \alpha)$$

で与えられます。Gはゲイン係数と呼ばれるチャンネル壁の二次電子放出特性です。このゲイン係数Gは、チャンネル材料固有の特性で、チャンネルの電界強度の関数となります。



THBV4\_1105JA

図 11-5 MCP-PMT ゲイン例 (MCP は 6 $\mu$ m タイプを 2 枚内蔵)

一般的に  $\alpha$  を大きくすればゲインの立ち上がりは高電圧側に移りますが、高いゲインが得られるようになります。一方、ゲインが10<sup>4</sup>を超えるとイオンフィードバックによるノイズが増大し、問題となるため、通常MCP1枚では供給電圧1 kVで10<sup>4</sup>程度のゲインになるように  $\alpha=40$ 前後に設計されています。

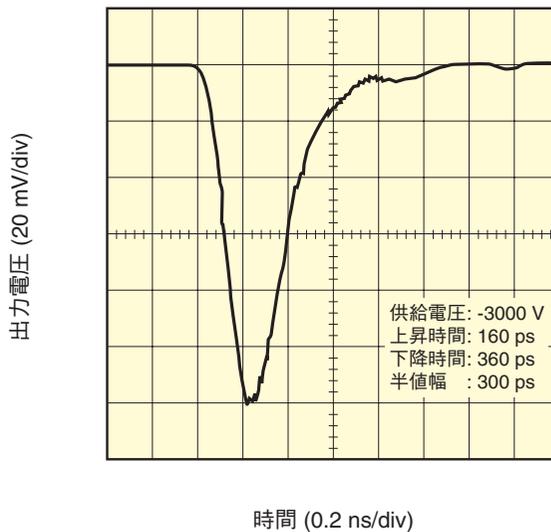
MCP-PMTでは、MCPを2枚重ねて図11-5のようにさらに高いゲインが得られています。この高いゲインにより、フォトンカウンティングによる計測が可能となっています。

## 11.2.2 時間特性<sup>2)</sup>

一般的な光電子増倍管では光電子および二次電子のもつ放出角分布、初速度分布ならびに収束レンズ系の影響により、光電面から陽極に至る増倍過程で信号パルスに時間的広がりを生じやすくなります。MCP-PMTは、光電面-MCP in間、MCP out-陽極間にほぼ平行に強い電界がかかっているため光電子の放出角分布や初速度分布もほとんど無視できる程度となります。さらに、MCPをダイノードとして用いるので、二次電子の増倍過程における走行距離が短縮され、走行時間の広がりも飛躍的に短縮されます。したがって、MCP-PMTは光電子増倍管の中で最も優れた時間応答特性を持っています。

### (1) 上昇時間／下降時間

MCP-PMTの応答時間と比較して十分短いパルス光を入射した時の出力波形の上昇時間(Rise Time)、下降時間(Fall Time)のことです。この特性は、超短パルス光の波形観測などの場合に重要な特性です。測定方法は第4章 4.3.1の時間特性の項を参照してください。図11-6に実際の波形を示します。



THBV4\_1106JA

図 11-6 MCP-PMT(R3809U-50) のパルス応答波形 (一例)

### (2) 電子走行時間 (Transit Time)

パルス光がMCP-PMTに入射してから、出力パルスが発生するまでの時間のことです。測定方法は、第4章 4.3.1の時間特性の項を参照してください。

### (3) T.T.S. (Transit Time Spread)及びI.R.F. (Instrument Response Function)

光子1個がMCP-PMTに入射し、光電変換、電子増倍された後の電子群の走行時間は各光子毎にわずかに異なります。この走行時間のゆらぎを電子走行時間拡がり(Transit Time Spread: T.T.S.)といいます。特にT.T.S.は、時間相関単一光子計数法<sup>3)</sup>(Time Correlated Single Photon Counting)などのようなタイミングを重視する応用では重要な値です。測定方法は、第4章 4.3.1の時間特性の項を参照してください。

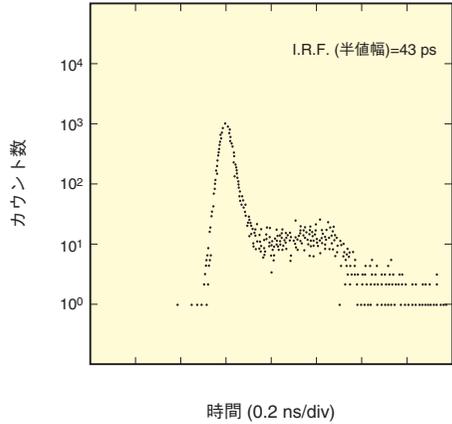
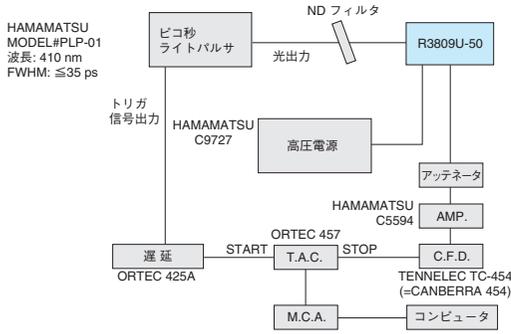
浜松ホトニクスでは、図11-7の測定系で電子走行時間拡がりの測定を行っています。この測定系では、MCP-PMTを含む測定系全体の時間特性として装置応答関数(I.R.F.)の値が得られます。

これは測定系において、レーザーのパルス幅が約35 psとMCP-PMTのT.T.S.特性と同等のゆらぎ成分を有しているためです。T.T.S.とI.R.F.の関係は次式で表わされます。

$$(I.R.F.)^2 = (T.T.S.)^2 + T_w^2 + T_j^2$$

T<sub>w</sub>:レーザーのパルス幅

T<sub>j</sub>:その他の測定系のゆらぎ

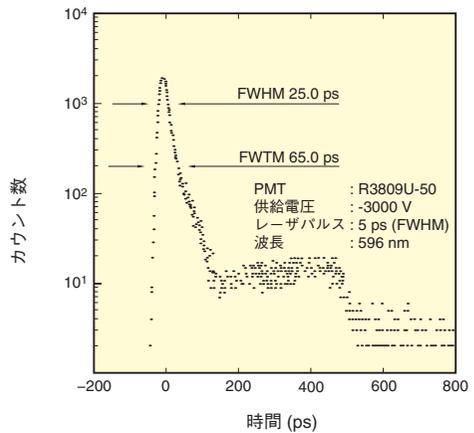
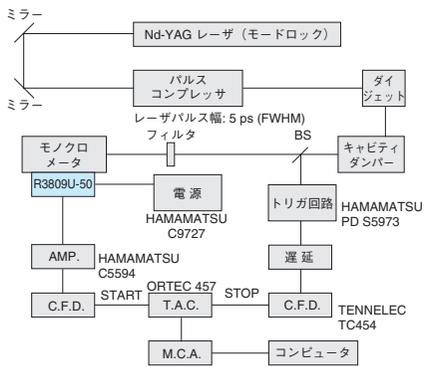


THBV4\_1107JAa

THBV4\_1107JAb

図 11-7 MCP-PMT(R3809U-50)の装置応答関数 (I.R.F.) 測定

また、MCP-PMTのT.T.S.は図11-8の測定系により25.0 psの値が得られています。この測定系ではレーザーのパルス幅が5 psと、MCP-PMTのT.T.S.特性より短い時間であることから、より精密なデータが得られています。



THBV4\_1108JAa

THBV4\_1108JAb

図 11-8 MCP-PMT(R3809U-50)の電子走行時間拡がり (T.T.S.) 測定

## (4) MCP-PMTの時間特性

時間特性一覧表を表11-1に示します。結晶光電面（GaAs、GaAsP）は、光電面内部での時間広がりのため、T.T.S.が大きくなります。ゲート付タイプの時間特性は他と比べわずかに劣りますが、陰極近傍とゲートメッシュ電極の電界が弱いいため、光電子の放出角や初速度分布の影響を多少受けやすくなるためです。

MCP-PMT型名	光電面	MCP	上昇時間	下降時間	T.T.S.	I.R.F. (半値幅)
R3809U-50	マルチアルカリ	2枚	160 ps	360 ps	550 ps	45 ps
R3809U-61	GaAs	2枚	200 ps	500 ps	550 ps	150 ps
R3809U-63	赤外延長型GaAsP	2枚	180 ps	400 ps	550 ps	80 ps
R3809U-64	GaAsP	2枚	180 ps	400 ps	550 ps	80 ps
R5916U-50	マルチアルカリ	2枚	180 ps	700 ps	1 ns	95 ps

注) バイアルカリ光電面も対応できます。

注) 表中の測定値はいずれも標準値で、光源および回路系の全てのジッターを含む値です。

またI.R.F.測定には半値幅(FWHM)が35 ps以下のピコ秒レーザを使用しています。

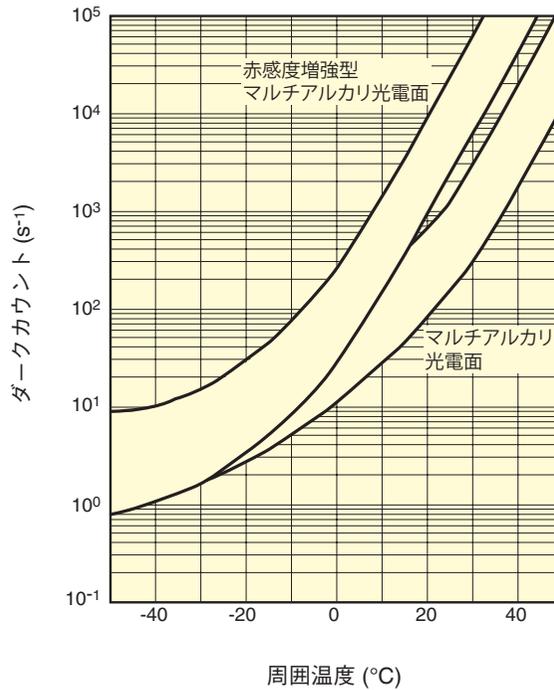
R5916U-50はゲート付タイプです。

表 11-1 MCP-PMT 時間特性一覧表

### 11.2.3 温度特性および冷却器について

MCP-PMTの暗電流およびダークカウントは光電面の種類および使用温度によって通常の光電子増倍管と同様に大きく影響を受けます。

赤感度増強型マルチアルカリ光電面は室温では暗電流およびダークカウントが比較的大きいので、冷却が必要になる場合があります。



THEV4\_1109JA

図 11-9 周囲温度 v.s. ダークカウント

浜松ホトニクスではMCP-PMT専用の電子冷却器およびホルダをオプションにて用意しています。この冷却器およびホルダを使用すれば容易にMCP-PMTを冷却（約-30℃）できます。

## 11.2.4 飽和特性

一般的に、光検出器の飽和は入射する光強度に対し出力信号量が比例しない現象として定義されます。MCP-PMTでは、通常の光電子増倍管の多段ダイノードの代わりにMCPを用いているため、通常の光電子増倍管とは異なります。不感時間によりMCPからの出力電流が制限および空間電荷の影響による飽和特性があり、使用中は前者の飽和が起こらないような注意が必要となります。以下にMCP-PMTの飽和特性の詳細を示します。

### (1) 不感時間 (Dead Time)<sup>1)</sup>

MCPをパルス電子流で照射した場合、放出された電子流に対応して、MCP出力端には正の電荷が帯電し、電位分布が変形し電界強度が弱くなるため、後続の電子増倍が抑制されます。この電荷は、チャンネル壁を流れるストリップ電流により中和されますが、このストリップ電流はMCPが高抵抗であるため小さく、中和するのに長い時間がかかります。この間に入射した信号のゲインは小さくなります。通常この中和に要する時間を不感時間(Dead Time)、あるいは回復時間(Recovery Time)と呼んでいます。チャンネル一本当りの出力電荷量を $Q_{out}$ 、チャンネル一本当りのストリップ電流を $I_s$ とすると、不感時間 $\tau_d$ は次式で与えられます。

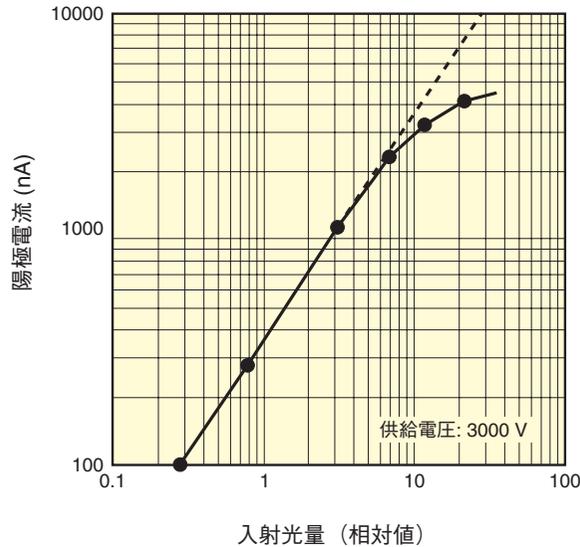
$$\tau_d = Q_{out} / I_s$$

この不感時間内に次の電子が入射する状態でMCP-PMTを動作させると、以下で述べる種々の飽和が起こります。MCP-PMTが飽和している状態ではMCP-PMTの性能が十分発揮できないだけでなく、光電面感度やMCPゲインの劣化が引き起こされますので、十分な注意が必要です。

## (2) DC光による飽和

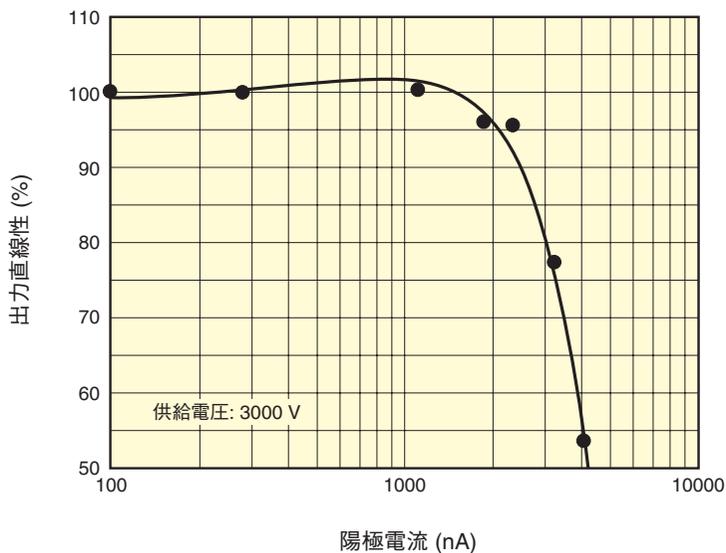
MCPは数十から数百MΩという抵抗値をもち取り出すことができる出力電流を制限します。そのために図11-10(a)や(b)に示すように入力電流が増加すると出力電流の飽和を生じます。これは、MCPから取り出された大量の二次電子の放出により帯電が生じ出力端における電位分布が変化し、電界強度の低下によって起こります。

この電界強度の低下は、MCPのチャンネル壁を流れるストリップ電流で中和されます。出力電流がストリップ電流の約7%以上になると、直流動作における飽和が起こるため注意が必要です。



THBV4\_1110JAa

図 11-10(a) MCP-PMT (有効径  $\phi 11$  mm / チャンネル径  $6 \mu\text{m}$ ) の直流動作時における飽和特性 (1)

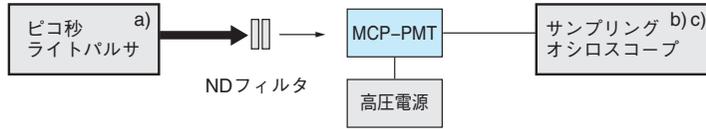


THBV4\_1110JAb

図 11-10(b) MCP-PMT (有効径  $\phi 11$  mm / チャンネル径  $6 \mu\text{m}$ ) の直流動作時における飽和特性 (2)

### (3) パルス光による飽和

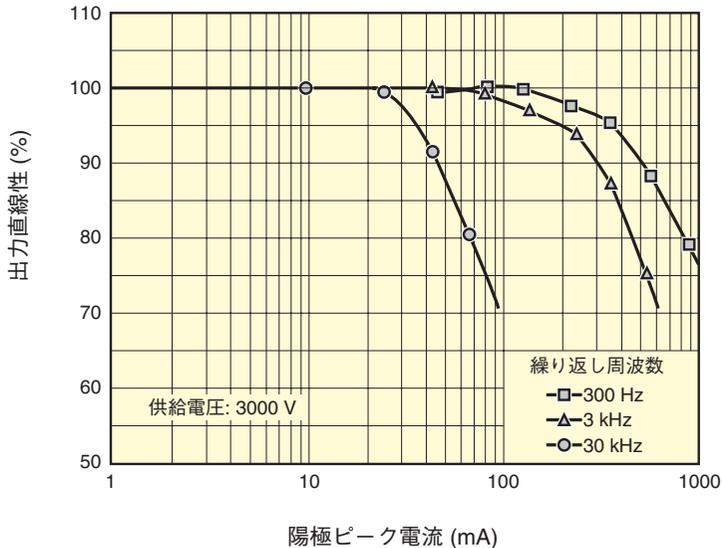
MCP-PMTにパルス光をデッドタイムの影響を受けない時間間隔で入射した場合には、MCP-PMTのリニアリティは保たれます。パルス光入射時におけるパルスリニアリティのデータを図11-11に示します。



- a) ピコ秒ライトパルサ PLP-01 (浜松ホトニクス製)  
波長: 780 nm 半値幅: 50 ps  
b) サンプリングオシロスコープ 11802 (テクトロニクス製)  
周波数帯域: 20 GHz  
c) サンプリングヘッド SD-26

THBV4\_1111Jaa

図 11-11(a) MCP-PMT パルスリニアリティの測定方法



THBV4\_1111JAb

図 11-11(b) MCP-PMT (有効径  $\phi 11$  mm / チャンネル径  $6 \mu\text{m}$ ) パルスリニアリティ

図11-11(a)はパルスリニアリティの測定ブロック図です。パルス特性の評価用光源として、ピコ秒ライトパルサを使用し、そのパルス光(半値幅50 ps)を光電子増倍管に入射し、その入射強度をNDフィルタによって調節します。図11-11(b)はMCP-PMTの繰り返し周波数300 Hz ~ 30 kHzでのパルスリニアリティの測定結果を示します。繰り返しが300 Hz以下ではピーク値で約350 mAまでのパルス電流を取り出すことができます。

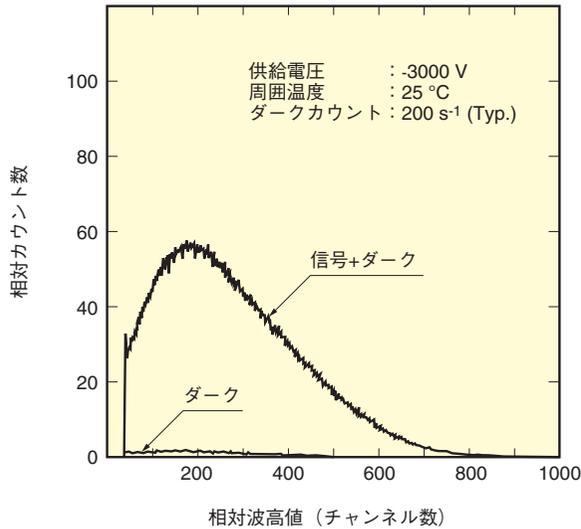
繰り返し周波数が低い場合の最大パルス電流は、空間電荷効果により制限されている1本のチャンネルから放出できる電子数とチャンネルの本数の積によって決まります。一方、繰り返し周波数が高い場合の最大パルス電流は、パルス当りの電荷量と繰り返しの積で決まる総電荷量に対するストリップ電流の比によって決まります。

繰り返し周波数が高い場合では、不感時間(11.2.4(1))の間に次のパルスが入射してしまい、MCPのゲインが低下することにより飽和が起こります。

#### (4) フォトンカウンティング法における飽和ゲイン特性 (波高分布)

図11-12にMCP-PMTにおける、フォトンカウンティング法における光電子信号の波高分布、および暗電流パルスの波高分布の例を示します。

一般的な光電子増倍管によるシングルフォトン波高分布の形成と異なり、シングルフォトン1個によりMCPのチャンネル内で空間電荷効果による飽和が生じ、パルス波高分布にピークが形成されます。

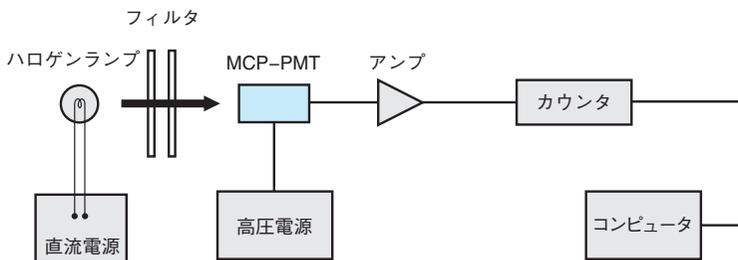


THBV4\_1112JA

図 11-12 シングルフォトンカウンティングにおける波高分布特性

#### (5) フォトンカウンティング法によるカウントリニアリティ

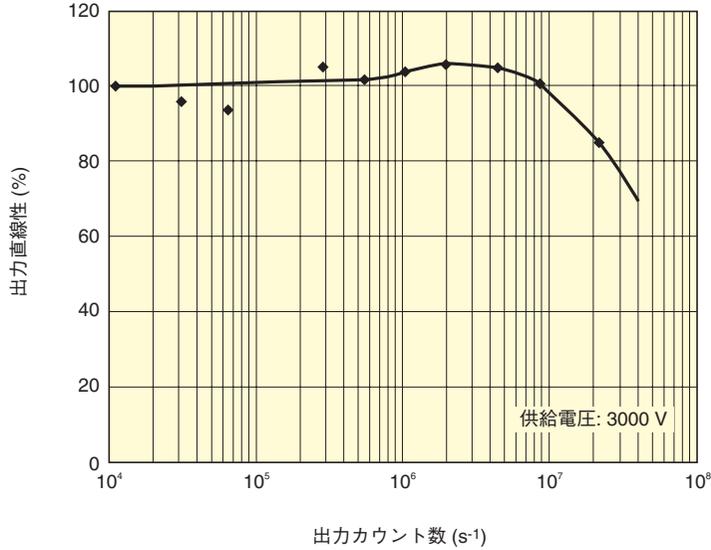
図11-13にフォトンカウンティング法におけるカウントリニアリティの測定方法を示します。光源の強度をNDフィルタで可変し、MCP-PMTおよび接続するカウンタにて、単一光電子パルスを計数し、入射光子数を変えたときの計数率特性を求めます。



THBV4\_1113JA

図 11-13 フォトンカウンティング法におけるカウントリニアリティの測定方法

図11-14にMCP-PMTのフォトンカウンティング法におけるカウントリニアリティを示します。10<sup>7</sup> s<sup>-1</sup>まではリニアリティが保たれています。



THBV4\_1114JA

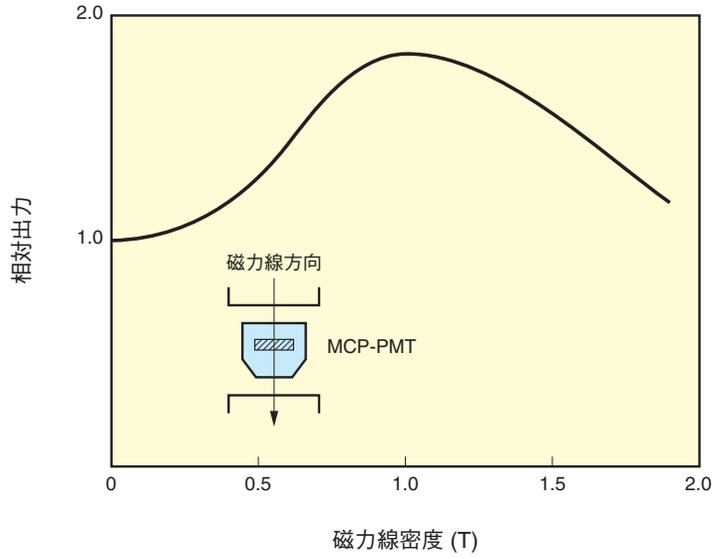
図 11-14 MCP-PMT (有効径  $\phi 11$  mm / チャンネル径  $6 \mu\text{m}$ ) のフォトンカウンティング法におけるカウントリニアリティ

### 11.2.5 磁気特性<sup>2)</sup>

磁気特性を良くするためには次のことが必要です。

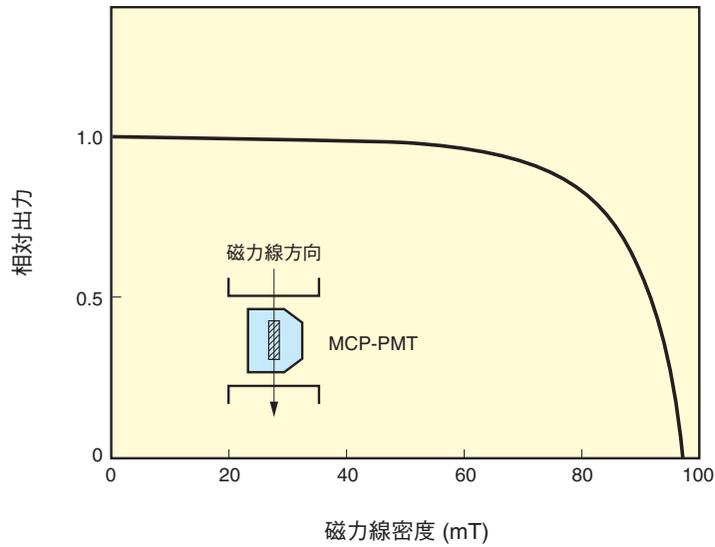
- (1) 光電面-ダイノード間-陽極間を短くし、電子の走行距離を減らす。
- (2) 電極の電子軌道は収束型でなく光電面に平行電界をかけ管軸に平行に二次電子が走行するようにする。
- (3) 電界強度を上げる。

MCP-PMTは上記の全ての特性をそなえているため優れた磁気特性を有します。図11-15にMCP-PMTの磁気特性を示します。影響の程度はMCPの軸に対する磁場の方向によって異なります。管軸に平行な磁場の中では2.0 T以上でも動作可能です。しかし管軸に垂直な磁場中では70 mTを超えると出力の低下が顕著に現れます。



THBV4\_1115JAa

(a) 磁気特性 (磁力線が管軸に対して平行)



THBV4\_1115JAb

(b) 磁気特性 (磁力線が管軸に対して垂直)

図 11-15 MCP-PMT の磁気特性

### 11.3 ゲート付 MCP-PMT<sup>2)</sup>

蛍光寿命、レーザラマン、レーザレーダなどの応用分野では、種々の理由から光検出器にゲート機能をもたせたい要求があります。ここで要求される機能としては、

- (1) ゲートの上昇時間、下降時間になるべく速いこと。
  - (2) 消光比(ゲートオン/ゲートオフ)の大きいこと。
  - (3) スイッチングノイズの少ないこと。
- などが求められます。

図11-16にゲート付MCP-PMT(R5916U-50)の構造を示します。基本的な構成としては光電面、ゲートメッシュ、MCP、陽極からなります。ゲート機能は図11-16に示すように光電面と近接したゲートメッシュの制御によって行われます。光電面の電位に対しゲートメッシュに逆電位を加えることによってオフモードにし、順電位を加えることによってオンモードとしてゲート動作(スイッチング)させることができます。

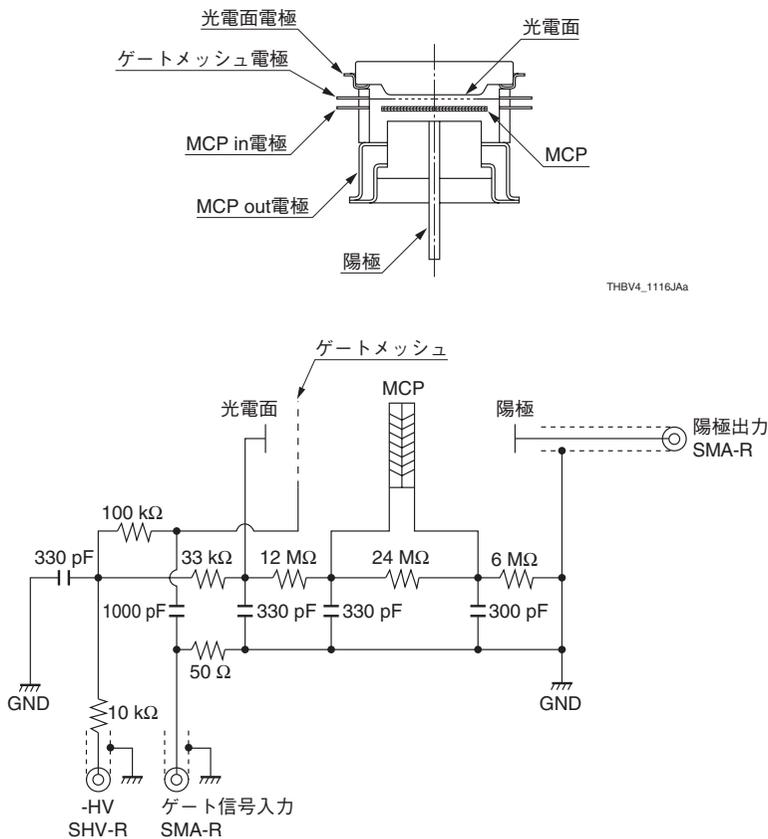
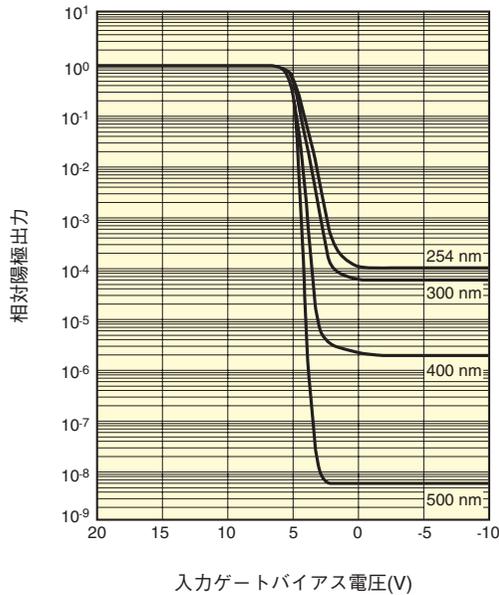


図 11-16 ゲートメッシュ付き MCP-PMT の構造と動作回路図 (ゲートオフモード代表例)

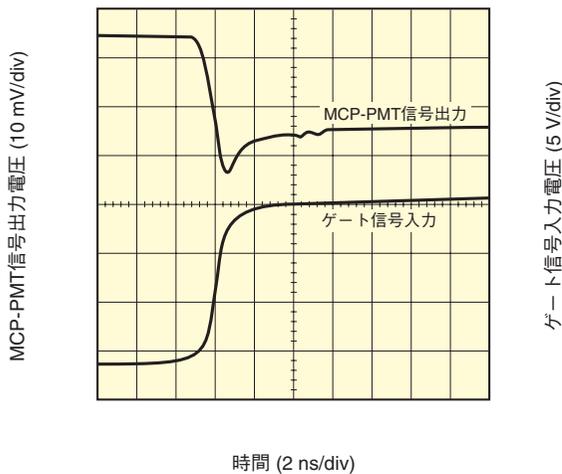
図11-17に基本的な特性である静的動作下での消光比について測定した結果を示します。光電面の電位を基準とした時に、ゲートメッシュに供給される電圧（入力ゲートバイアス電圧）と出力の関係です。この結果より消光比が $10^8$ 以上(500 nmの入射光)であることがわかります。



THBV4\_1117JA

図 11-17 静的動作時の消光比特性

図11-18に光電子増倍管に連続的な入射光を入れながらゲートパルスを加え、動的なゲート特性を求めた結果を示します。MCP-PMTの信号は約1 nsで立ち上がります。



THBV4\_1118JA

図 11-18 動的ゲート特性

以上のようにゲート付MCP-PMTでは一般的な光電子増倍管に比べ高速ゲート特性、消光比という点で優れた特性を持っています。

## 第 11 章 参考文献

- 1) 浜松ホトニクス(株) : MCPアッセンブリ技術資料, NO.TMCP9001J01
- 2) 浜松ホトニクス(株) : Ultrafast MCP-PMT R3809U(FEB.1992)  
浜松ホトニクス(株):Microchannel Plate Photomultiplier Tubes (MCP-PMT), NO. t-112-02 (FEB. 1990)  
H.Kume 他:Ultrafast Microchannel Plate Photomultiplier Tubes, Applied Optics Vol. No.27 (Mar. 15, 1988)
- 3) 浜松ホトニクス(株) : Application of MCP-PMTs to Time Correlated Single Photon Counting and Related Procedures, NO.ET-03(FEB. 1991)  
D.V.O' Connor, D.Phillips(平山 鋭, 原 清明訳) : ナノ.ピコ秒の蛍光測定と解析法(時間相関光子計数法). 学会出版センター (1988出版)

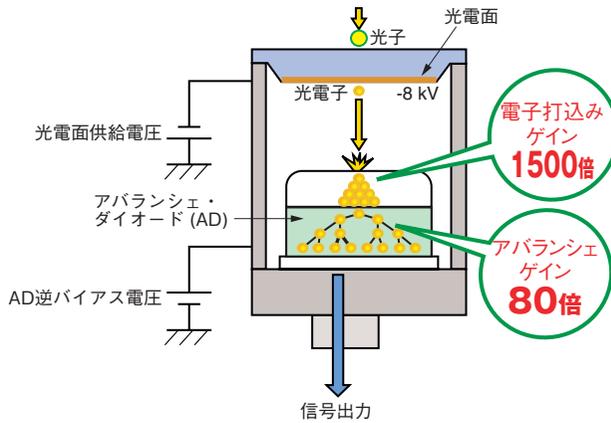
## 第 12 章

### HPD (Hybrid Photo-Detector)

HPD(Hybrid Photo-Detector)<sup>1)2)3)</sup>は、電子管に半導体素子(アバランシェ・ダイオード：AD)を内蔵した光電子増倍管で、光電面から放出した光電子を高電圧で加速し半導体素子に直接打込むことで二次電子を増倍しています。電子増倍ゆらぎが非常に少なく、単一光電子分解能や安定性、時間特性に優れている等の特長があります。これらの特長を活かし、レーザ顕微鏡、蛍光寿命測定(FLIM)、蛍光相関分光法(FCS)、LIDAR(Light Detection and Ranging)や高エネルギー物理学実験<sup>4)5)6)</sup>など、幅広い用途で使用されています。

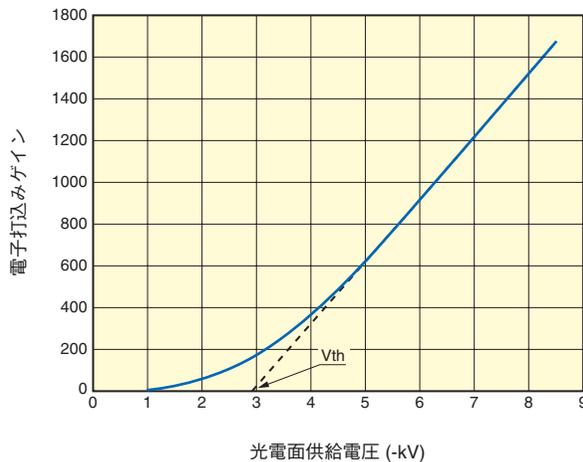
## 12.1 動作原理

HPDの原理図を図12-1に示します。HPDは、真空容器内に光を変換する光電面と、電子打込み用に設計された半導体素子(アバランシェ・ダイオード：AD)から構成されています。HPDは、光電面に光が入射すると、入射光量に応じた光電子が光電面から放出します。この光電子は、光電面に供給されたマイナス数kVからマイナス10 kV程度の電圧で加速され、アバランシェ・ダイオードに打込まれます。するとアバランシェ・ダイオードでは、これら光電子の入射エネルギーに応じた電子正孔対を生成します。これを電子打込みゲインと呼びます。光電面供給電圧と、この電子打込みゲインの関係を図12-2に示します。原理的には光電面供給電圧に対して、電子打込みゲインは比例します(点線)。しかしながら、実際には半導体素子の表面不感層による打込み電子のエネルギーロスがあるため、低電圧側で比例関係が崩れます。図中の点線と電圧軸との切片の電圧をスレッシュホールド電圧  $[V_{th}]$  と呼びます。



THBV4\_1201JA

図 12-1 HPD の原理図



THBV4\_1202JA

図 12-2 電子打込みゲイン特性

HPDに内蔵されているアバランシェ・ダイオードは、およそ3.6 eVの入射電子エネルギーにつき、1対の電子正孔対を発生します。そのため電子打込みゲイン $G_b$ は、光電面とアバランシェ・ダイオードとの電位差(光電面供給電圧) $V_{pc}[V]$ 及び、アバランシェ・ダイオードで決まるスレッシュホールド電圧 $V_{th}[V]$ を用いて、式12-1と表すことができます。図12-2では、 $V_{th}$ は約3 kVとなっています。

$$G_b = (V_{pc} - V_{th}) / 3.6 \quad \dots\dots\dots \text{(式 12-1)}$$

この電子打込みで得られた二次電子群は、さらにアバランシェ・ダイオード内部でアバランシェ・増倍されます。アバランシェゲインは、アバランシェ・ダイオードに供給される逆バイアス電圧に応じて増減します。ここで、アバランシェゲインを $G_t$ とすれば、HPD全体のゲイン $G$ は式12-2で示せます。

$$G = G_b \times G_t \quad \dots\dots\dots \text{(式 12-2)}$$

浜松ホトニクス製HPDは、光電面供給電圧が-8 kVの時、電子打込みゲイン $G_b$ は約1500倍となります。またアバランシェ・ダイオードに400 V程度の逆バイアス電圧を供給した場合、アバランシェゲイン $G_t$ は約80倍が得られます。従って、トータルゲイン $G$ は約12万倍となります。

## 12.2 HPDの特長

微弱光計測には、光電子増倍管やSPAD<sup>7)</sup>(シングルフォトンアバランシェ・ダイオード)などの検出器が広く利用されています。HPDはその動作原理によりこれらの検出器と比較して次の優位性があります。

HPDの電子打込みゲインは、一般的な光電子増倍管の第1(初段)ダイノードのゲインに相当します。前述のように、HPDは光電面供給電圧が-8 kVの時に約1500倍の電子打込みゲインが得られ、一般的な光電子増倍管の第1ダイノードに比べゲインが非常に高いです。そのため、増倍ゆらぎが非常に小さくなります。

一般的な微弱光検出器でパルス計測を行う場合、入射信号に対応する出力パルスの後に疑似パルス(アフターパルス)が観測されます。HPDはアフターパルスが非常に少ない特長があります<sup>8)</sup>。(第12章 12.3.6 参照)

HPDの光電面から放出した電子は、全てアバランシェ・ダイオードに入射するように軌道設計されています。そのため、収集効率が高く良好なユニフォミティ特性となっています。

光電面は一般的な光電子増倍管と同様、入射光の波長に応じて最も量子効率の良い物を選択することが可能です。またHPDの有効面積は数mm以上あり、有効面積が100  $\mu\text{m}$ 程度のSPADなどの半導体検出器に比べ大きい優位性があります。さらに大口径化や位置検出器型<sup>9)10)11)12)13)</sup>への応用も可能です。

## 12.3 HPD の諸特性

### 12.3.1 波高分解能

HPDは、一般的な光電子増倍管の第1(初段)ダイノードのゲインに相当する電子打込みゲインが非常に高いため、電子増倍ゆらぎの小さい理想的な信号増幅が可能です。例えば、平均3光電子程度が光電面から放出するように光量を調整したパルス光を、繰り返しHPDに入射してその波高分布をとります。すると、図12-3に示すように、1光電子～5光電子に相当する分布のピークを検出することが可能です。この複数の信号ピークを検出できる理由は、電子増倍ゆらぎが非常に小さいためで、HPDの大きな特長となっています。

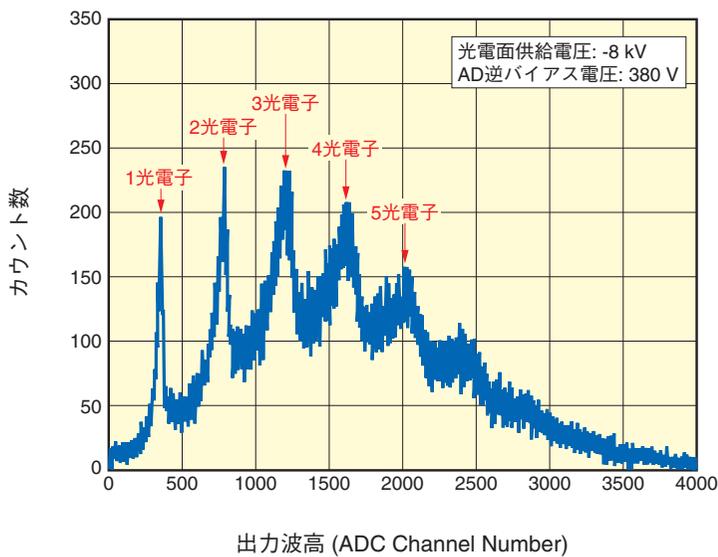
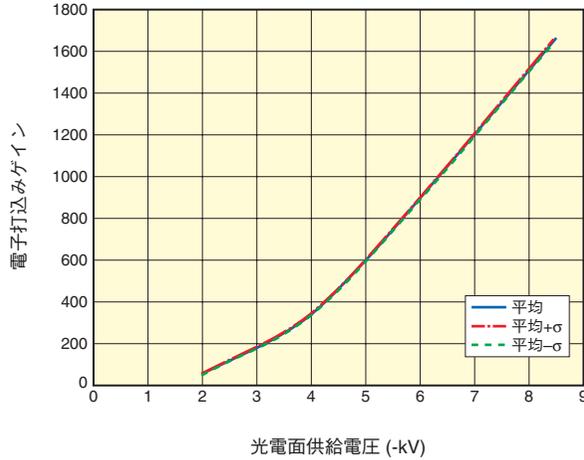


図 12-3 マルチフォトエレクトロン時の出力波高分布

THEV4\_1203JA

### 12.3.2 ゲイン特性・電子打込みゲインの均一性

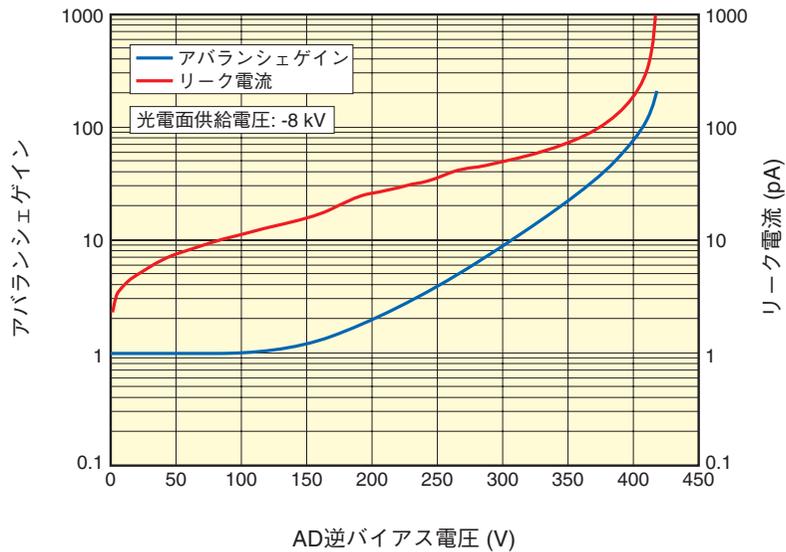
動作原理で説明したように、HPDのゲインは電子打込みゲイン $G_b$ とアバランシェゲイン $G_a$ の積で表されます(式12-2参照)。図12-2で示すように、電子打込みゲインは式12-1に従い、ある閾値を越えると、光電面供給電圧に比例して増加します。電子打込みゲインは、電子の加速電圧及びアバランシェ・ダイオードの電子入射面の構造に依存します。ただ、一般的にアバランシェ・ダイオードの電子入射面は均質なため、同じ光電面供給電圧における個々の電子打込みゲインの個体差は非常に小さくなっています。図12-4に電子打込みゲイン特性の個体差を示します。



THBV4\_1204JA

図 12-4 電子打込みゲインの個体差

図12-5にアバランシェ・ダイオードのゲインおよびリーク電流特性を示します。アバランシェゲインは、アバランシェ・ダイオードに供給する電圧(AD逆バイアス電圧)が一定値を越えたあたりから徐々に増加し、ブレイクダウン電圧付近で急激に増加する特性があります。浜松ホトニクス製HPDでは、リーク電流が $1\ \mu\text{A}$ に到達する電圧をブレイクダウン電圧にしています。ブレイクダウン電圧付近ではゲインが急激に変化するため、HPDを安定動作させることが難しくなります。したがって、最大AD逆バイアス電圧は、ブレイクダウン電圧から10 V下げた電圧としています。アバランシェゲインは、アバランシェ・ダイオードのロットによって多少異なります。また、アバランシェゲインは、温度特性を有します。温度特性に関しては後述の12.3.5 温度特性を参照ください。



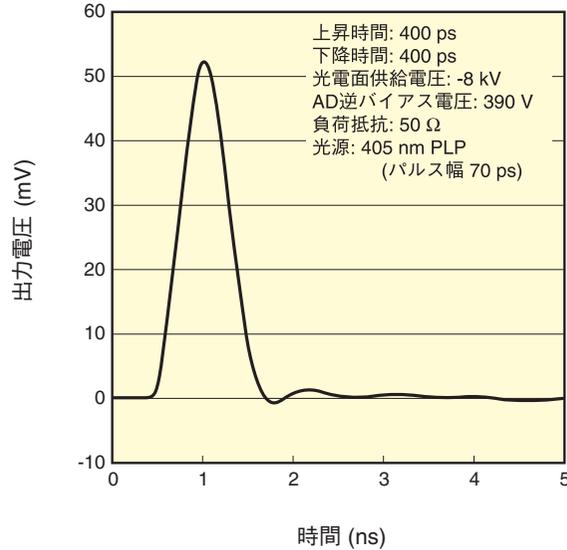
THBV4\_1205JA

図 12-5 アバランシェゲインおよびリーク電流特性

### 12.3.3 時間特性

#### 12.3.3.1 上昇時間・下降時間・電子走行時間

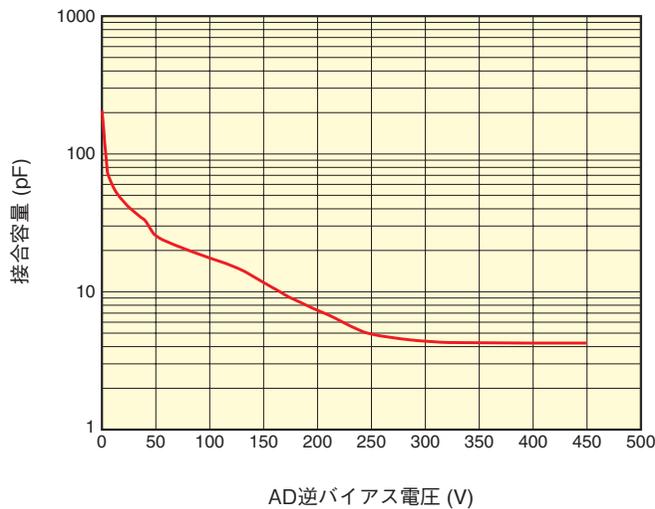
図12-6に浜松ホトニクス製高速HPDの出力波形を示します。測定には半導体パルスレーザ(半値幅約70 ps、波長405 nm)を使用しています。HPDの応答特性は、内蔵したアバランシェ・ダイオードの接合容量で決まります。上昇時間と下降時間は、アバランシェ・ダイオードが全空乏化する電圧以上の領域では、電圧を変えても大きく変化しません。



THEV4\_1206JA

図 12-6 時間応答特性

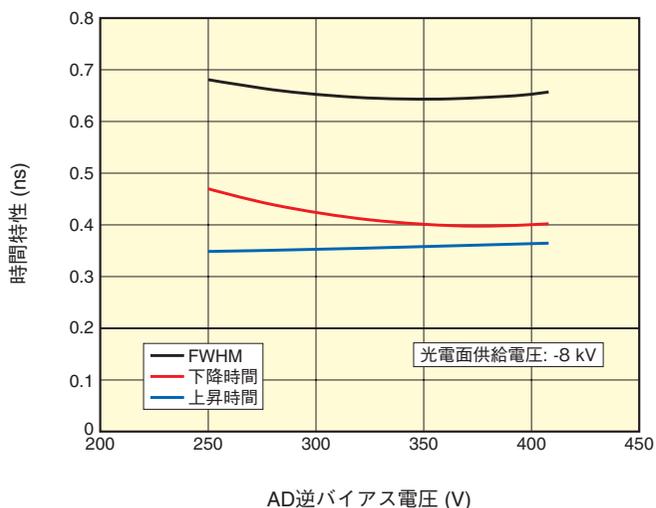
図12-7に高速HPDのAD逆バイアス電圧と接合容量を示します。このグラフより、約300 V以上のAD逆バイアス電圧を加えた際に、全空乏化していることが分かります。



THEV4\_1207JA

図 12-7 AD 逆バイアス電圧と接合容量の関係

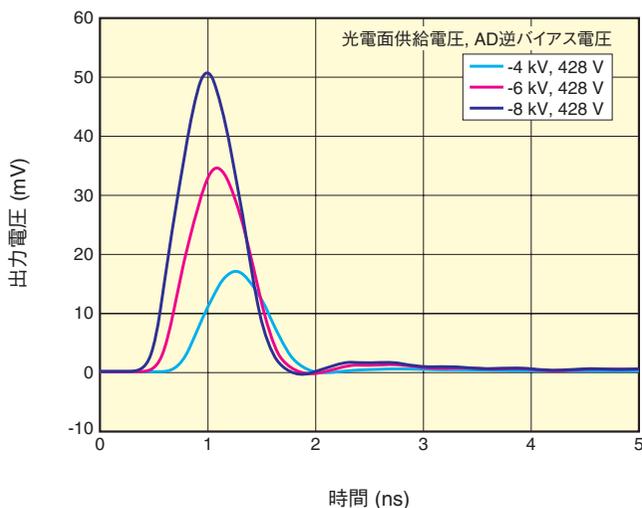
図12-8に光電面供給電圧が一定でAD逆バイアス電圧を変えた時の時間応答特性を示します。グラフが示すように、逆バイアス電圧が全空乏層化する300 V以上では、上昇時間及び下降時間が大きく変化しないことが分かります。



THBV4\_1208JA

図 12-8 AD 逆バイアス電圧を変化させた際の時間応答特性

一方、AD逆バイアス電圧を一定にして光電面供給電圧を変化させると、上昇時間・下降時間は変わりませんが、電子走行時間が変わります。これは、光電面から出た光電子のアバランシェ・ダイオードの表面までの移動時間が光電面供給電圧により変化するためです。図12-9に光電面供給電圧を変化させた際の電子走行時間の差を示します。図のとおり、光電面供給電圧が高い場合ほど電子走行時間が短いことが分かります。



THBV4\_1209JA

図 12-9 光電面供給電圧を変化させた際の電子走行時間の差

### 12.3.3.2 T.T.S. (Transit Time Spread)

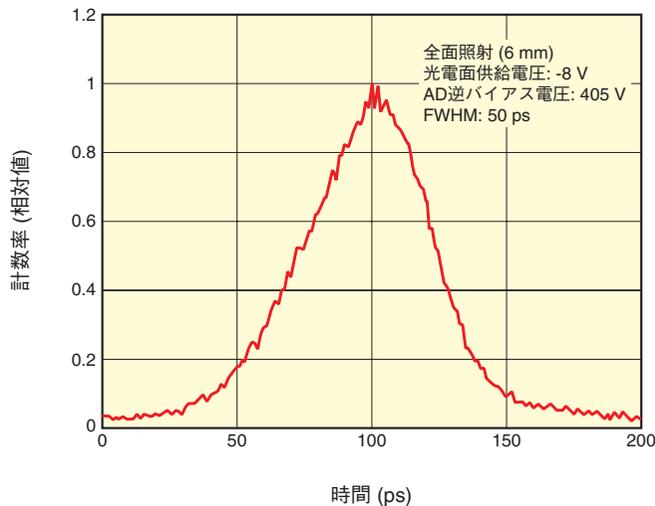
入射光を光電面に全面照射したときの単一光電子パルスの走行時間のゆらぎを、T.T.S.（第4章 4.3.1(2)項参照）と呼びます。HPDのT.T.S.は主に3つの要素が関係しています。

1つ目は、光電面内部の走行時間です。光電面内部で光が光電子に変換され、その光電子は真空中に向かって光電面内部を移動します。この光電面層が厚い場合、光電子に変換される位置（深さ方向）にバラツキが発生するため、光電面内部の走行時間のゆらぎも大きくなります。一般的に、アルカリ金属で構成された光電面に比べて、GaAsP(Cs)やGaAs(Cs)の結晶光電面の光電面層は厚いため、走行時間のゆらぎは大きくなります。

2つ目は、光電子が光電面とアバランシェ・ダイオード間の真空中を光電子が走行する時間のバラツキです。光電面の入射位置により、アバランシェ・ダイオードまでの距離が異なるため、走行時間にゆらぎが発生します。一部の浜松ホトニクス製高速HPDのアルカリ金属光電面は、光電面の入射位置からアバランシェ・ダイオードまでの距離を一定にするために、入射窓に曲率を持っています。

3つ目は、アバランシェ・ダイオード内部の電子走行時間です。ただし、アバランシェ・ダイオード内部では電子打込みゲインにより大量の電子が発生し走行するため、その内部での走行時間差は無視できるレベルです。

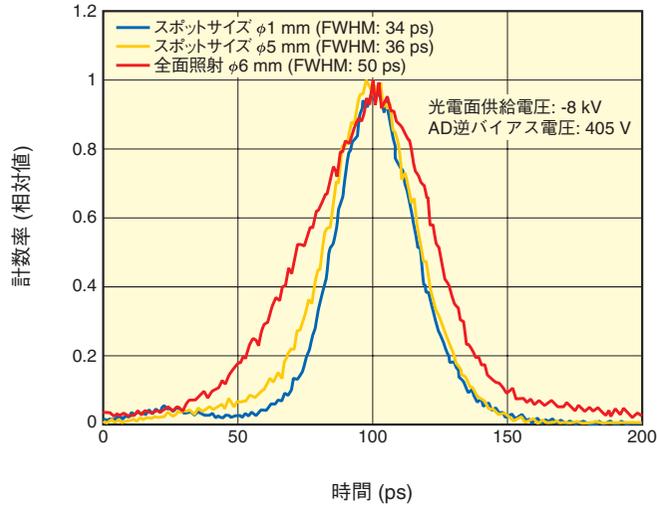
図12-10に全面照射によるバイアルカリ光電面の高速HPDのT.T.S.を示します。T.T.S.は、50 psを達成しています。この値には、測定系のゆらぎも含んでいます。



THBV4\_1210JA

図 12-10 高速 HPD の T.T.S.

前述したとおり、光電面の入射位置により走行時間が異なるため、T.T.S.が変わります。図12-11には、入射光のサイズを変えた際のT.T.S.を示します。



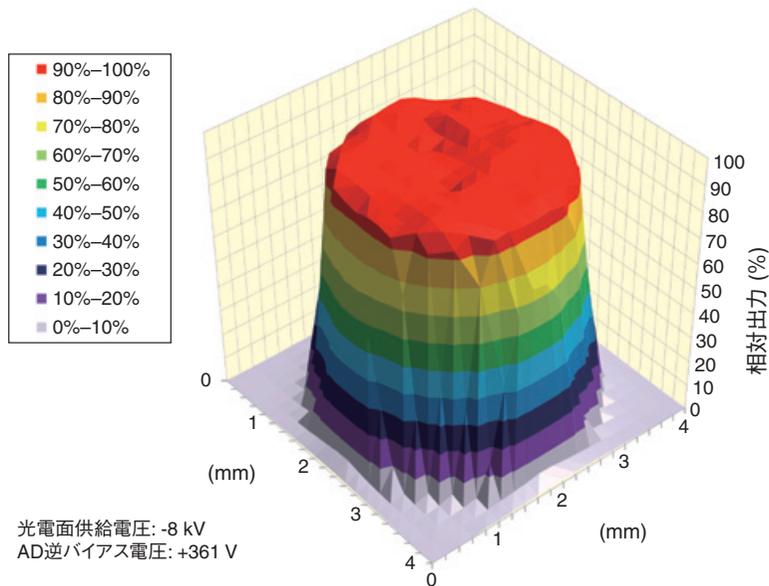
THBV4\_1211JA

図 12-11 入射光サイズに対する T.T.S. 測定結果

入射光のサイズが小さくなるにつれて、光電面から放出する光電子の位置が限定され走行時間のバラツキが抑えられるため、同じ検出器でも T.T.S. が改善します。

### 12.3.4 ユニフォミティ特性

ユニフォミティとは、光電面の場所の違いによる出力感度の均一性のことです。HPDの陽極ユニフォミティは、光電面とアバランシェ・ダイオードの特性によって決定されます。図12-12に陽極ユニフォミティ特性を示します。HPDの光電面から放出した電子は、全てアバランシェ・ダイオードに入射するように軌道設計されているため、感度が非常に均一になっています。



THBV4\_1212JA

図 12-12 HPD の陽極ユニフォミティ特性

## 12.3.5 温度特性

HPDは電子増倍部にアバランシェ・ダイオードを内蔵しているため、一般的なアバランシェ・フォトダイオード同様に温度依存性があります。HPDの温度依存性は大きく二種類に分けられます。

### 12.3.5.1 リーク電流とブレイクダウン電圧の温度依存性

前述しましたが、AD逆バイアス電圧を上げていくと、途中からリーク電流が急激に上昇します。浜松ホトニクス製HPDでは、リーク電流が $1\ \mu\text{A}$ に到達する電圧をブレイクダウン電圧としています。リーク電流とブレイクダウン電圧は、周囲温度が下がるにつれて下がる傾向があります。図12-13にリーク電流の温度依存性を、図12-14にブレイクダウン電圧の温度依存性を示します。

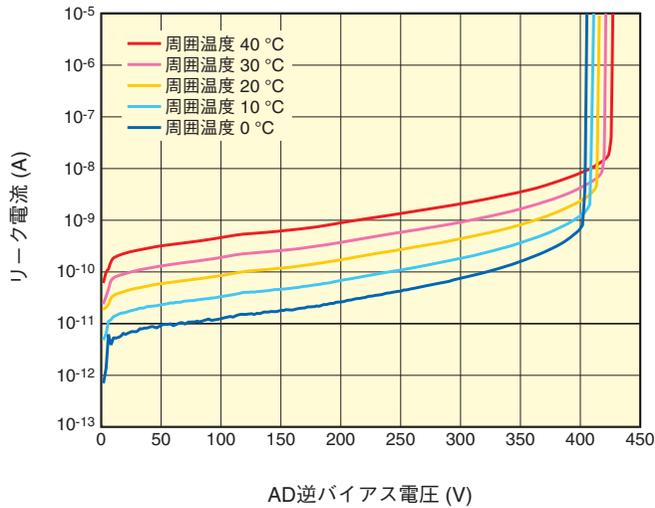


図 12-13 リーク電流の温度依存性

THBV4\_1213JA

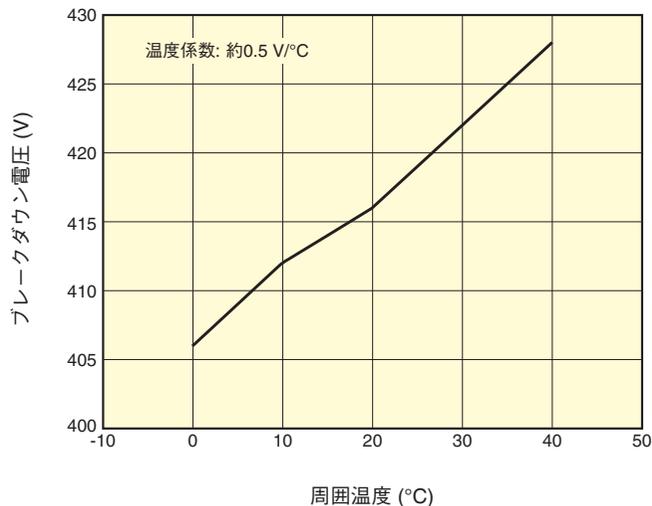
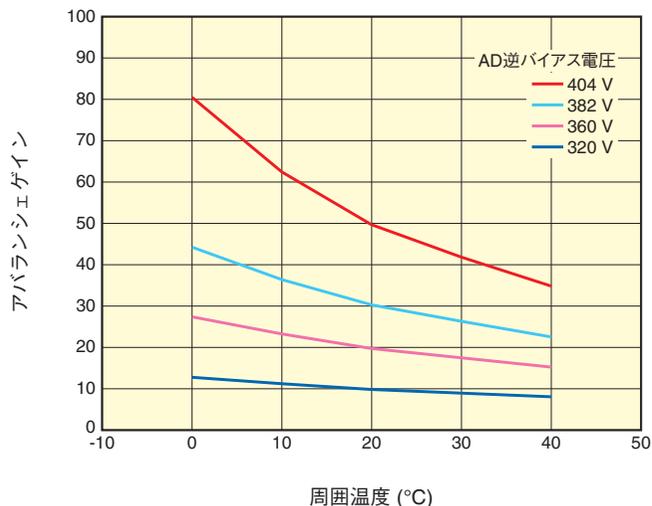


図 12-14 ブレイクダウン電圧の温度依存性

THBV4\_1214JA

### 12.3.5.2 アバランシェゲインの温度依存性

アバランシェゲインは、周囲温度の上昇に伴って減少する傾向があります。図12-15にアバランシェゲインの温度依存性を示します。



THBV4\_1215JA

図 12-15 アバランシェゲインの温度依存性

アバランシェゲインの温度依存性は、AD逆バイアス電圧によっても変化します。図12-15のように、AD逆バイアス電圧が高い場合は、温度によるアバランシェゲインの変動は大きくなります。一方で、逆バイアス電圧が低い時は、変動が少なくなることが分かります。したがって、HPDを高いアバランシェゲインで安定動作させるためには、周囲温度の制御が必要になります。また、AD逆バイアス電圧が高い領域では温度が下がることによって、ゲインが極端に上昇するため、素子を破壊しないように注意が必要です。一般的に、光電面を冷却することで暗電流を下げることはできますが、HPDを冷却する場合はゲインの変動やブレイクダウン電圧の変化などの要因も考慮する必要があります。

### 12.3.6 アフターパルス

パルス計測を行う場合、入射信号に対応する出力パルスの後に疑似パルスが観測される場合があります。このような出力パルスをアフターパルスと呼びます(4.3.8項参照)。アフターパルスの種類は各種ありますが、遅い成分のアフターパルスは、検出器内部の残留ガスが電子と衝突することでイオン化され、このうち正イオンが光電面に戻る(イオンフィードバック)ことにより、多数の光電子を発生させるために起こります。しかしながら、HPDは光電子増倍管に比べて内部構造がシンプルであるため、残留ガスが少ない高真空状態を保っているため、イオンフィードバックの発生頻度が光電子増倍管に比べて非常に低いと考えられます。図12-16にHPDと光電子増倍管のアフターパルスを示します。このデータは、単一光電子を入射した際のアフターパルスの発生確率の度合いを表しています。測定は、信号パルス発生後100 ns以降を計測しています。比較に用いた光電子増倍管では、100 ns ~ 1  $\mu$ sにかけて多数のアフターパルスが発生しているのに対し、HPDではほとんど発生していないことが分かります。そのため、蛍光寿命測定や蛍光相関分光法(FCS)、レーザーレーダ(LIDAR)などの高速現象を測定する分野で使用されています。

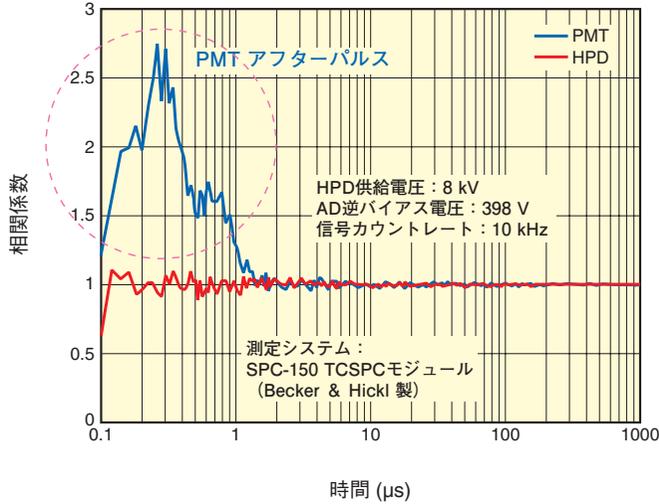


図 12-16 HPD と PMT のアフターパルス

### 12.3.7 X線フィードバックによる影響

加速された光電子がアバランシェ・ダイオードに打込まれると、ある一定確率でアバランシェ・ダイオードからX線が発生します。この発生するX線は、制動X線(Bremsstrahlung X-ray)と特性X線(Characteristic X-ray)です。これらのX線が光電面に入ると、光電面から大量の光電子が放出されます。この現象をX線フィードバックと呼びます。X線フィードバックは、浜松ホトニクス製高速HPDでは信号出力に対して約500 ps後に発生します。そのため、信号との弁別が難しくなります。X線フィードバックにより発生する光電子数や光電子の発生確率は光電面により異なりますが、一般的に光電面層が薄いアルカリ金属光電面の方が結晶光電面よりも少ない傾向があります。浜松ホトニクス製結晶光電面型高速HPDのX線フィードバックによるノイズパルスの発生確率は、単一光電子あたり約1万分の1と極めて小さい値ですが、入射光強度の増大に伴い光電子数が増えることで、X線の発生頻度も比例して増加します。そのため、強い入射光を測定する際は、このX線フィードバックが問題になることがあるため、注意が必要です。一方、単一光電子を扱うフォトンカウンティング計測では、発生頻度が低いためほとんど問題になりません。

### 12.3.8 ドリフト特性

ドリフトは主に数時間程度の短時間の出力経時変化をいいます。光電子増倍管の場合、ドリフトは各ダイオードの二次電子放出比の変化が主な原因になりますが、HPDはダイオードを持たないため、良好なドリフト特性を示します。

### 12.3.9 ライフ（寿命）特性

HPDのライフを決定する要因として、大きく分けて2つが挙げられます。1つが電子打込みゲインの劣化、もう1つが光電面の劣化です。特に光電面の劣化は、光電面の種類やサイズで大きく異なります。

一般的に光電面の種類が同じ場合、同光電流では光電面サイズが大きいHPDのライフは長くなります。図12-17にHPDのライフ特性と光電面サイズの関係を示します。図には同じ光電面(GaAsP(Cs))で有効面積が異なる( $\phi 3$  mm、 $\phi 5$  mm、 $\phi 18$  mm) 3種類のライフデータが示されています。入射光は各HPDに全面照射されていて、最大光電面平均電流が200 pAになるように光量が調整されています。このグラフから、有効面積が大きくなるにつれて、ライフが長くなることが分かります。これは、光電面平均電流を一定にしたことにより、面積が大きくなることで単位面積当たりの入射光量が下がり、光電面に与えるダメージが低下するためです。一方で、光電面サイズが異なるHPDに同じ入射光サイズのスポット光を照射した場合は、単位面積当たりの入射光量が同じになるため、検出器のライフ特性は同じになります。したがって、入射光サイズを可能な範囲で大きくすることを推奨します。

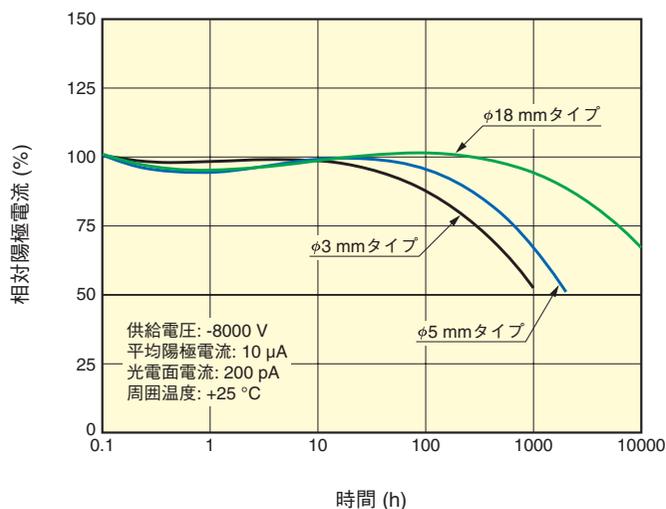


図 12-17 ライフ特性と光電面サイズの関係

THBV4\_1217JA

また光電面の種類によってもライフ特性は異なり、GaAsP(Cs)やGaAs(Cs)の結晶光電面よりもアルカリ金属光電面の方が長くなります。例えば、 $\phi 6$  mmのバイアルカリ光電面では、ほとんど光電面は劣化しません。これは結晶光電面の劣化の原因の1つがイオンフィードバックであり、正イオンが光電面にダメージを与えるためです。

## 12.4 HPD の使用上の注意事項

HPDを安全に使用するために、下記の点に注意してください。

- ・ 電圧供給状態で、HPD及び電源ケーブルに触れないようにしてください。感電の恐れがあります。
- ・ HPDに電圧を供給する前に、全ての回路が確実に接続されていて、しっかりと接地が行われていることを確認してください。また、HPDが暗状態にあることを確認してください。
- ・ HPDに電圧を供給する場合は、最初にアバランシェ・ダイオードにAD逆バイアス電圧を供給してください。その後光電面に電圧を供給してください。
- ・ 後続回路の脱着などは、必ずすべての電源を切り、HPDがチャージアップしていない状態で行ってください。感電及び後続回路を破損する恐れがあります。
- ・ 高電圧供給に伴うHPDのリーク電流や放電を避けるため、湿度の高い場所での使用は避けてください。
- ・ HPDは最大平均光電面電流を設けています。それ以上の電流値を流れるような過大光を入れないでください。
- ・ 最大AD逆バイアス電圧を超えない範囲で使用してください。また、周囲温度に応じてブレイクダウン電圧（リーク電流が $1\ \mu\text{A}$ になるAD逆バイアス電圧）が異なります。常にAD逆バイアス電圧は、ブレイクダウン電圧より10 V以上低い電圧になるようにしてください。

## 第 12 章 参考文献

- 1) M. Suyama et al. : A Compact Hybrid Photodetector, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-44, No.3, pp.985-989, 1997
- 2) A.Fukasawa et al : High Speed HPD for Photon Counting, IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 55, No.2, April 2008 pp.758-762
- 3) Atsuhito Fukasawa (Editor:Krzysztof Iniewski) : Semiconductor Radiation Detection Systems - Chapter7 Hybrid Photodetectors(HPDs) for Single-Photon Detection, CRC Press(2010)
- 4) M. Hayashida et al., :Development of HPDs with an 18-mm-diameter GaAsP photo cathode for the MAGIC-II, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 567 (2006) 180-183
- 5) A. Fukasawa, K. Arisaka, H. Wang, M. Suyama: QUPID, a single photon sensor for extremely low radioactivity, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 623 (2010) 270-272, Proceedings of the 1st International Conference on Technology and Instrumentation in Particle Physics, Tsukuba, Japan, March 12-17, 2009
- 6) H. Nakayama et al.: Development of a 13-in Hybrid Photo-Detector (HAPD) for a next generation water Cherenkov detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 567 (2006) 172-175
- 7) S. Cova et al., "Avalanche photodiodes and quenching circuits for single-photon detection," APPLIED OPTICS Vol.35 No.12 (1996) 1956-1976
- 8) X. Michalet et. al.: Proc. SPIE 6862, in press, 2008
- 9) S. Nishida et al.: Development of an HAPD with 144 channels for the aerogel RICH of the Belle upgrade, Nucl. Instrum. Meth. A595, pp.150-153, 2008
- 10) M. Suyama et al.: Development of a multi-pixel photon sensor with single-photon sensitivity," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 523 (2004) 147-157
- 11) M. Suyama et al.: Development of a Multipixel Hybrid Photodetector with High Quantum Efficiency and Gain, IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 51, No.3, pp. 1056-1059, June 2004
- 12) A.Fukasawa et al., "Multichannel HPD for high-speed single photon counting " , Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 812, 11 March 2016, Pages 81-85
- 13) 深澤宏仁 光産業創成大学院大学学位論文 「バイオ蛍光顕微鏡用ハイブリッドフォトディテクタ (HPD) の開発とプロモーション」 2016年5月

メ 毛

## 第 13 章

### 環境性と信頼性

光電子増倍管は、周囲温度・湿度・磁界など周囲環境により、感度・暗電流などの特性が影響されます。そのため、光電子増倍管の性能を十分に発揮させるためには、周囲環境が光電子増倍管に及ぼす影響を知り対応する必要があります。また、安定に使用させるために、経時変化特性などの信頼性についても述べます。

## 13.1 周囲温度の影響

### 13.1.1 温度特性

光電子増倍管は、通常の電子部品(抵抗、コンデンサなど)に比べて周囲温度の影響を受けやすいため、高精度の計測をする場合には温度コントロールを行い、周囲温度の影響を低減して使用する必要があります。また、温度制御時においては、光電子増倍管内部は真空のため管内への熱伝導が悪く、周囲温度と同一になり特性が安定するまでには1時間以上の時間が必要です。

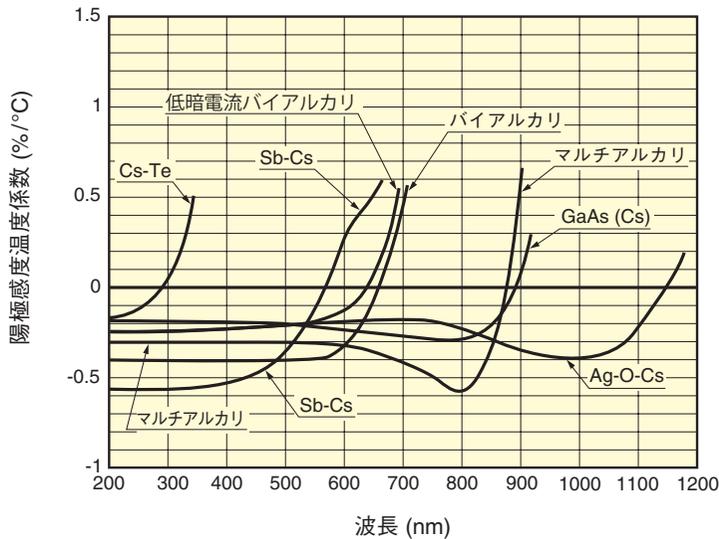
#### (1) 感度

陽極感度の温度特性は、陰極感度(光電面)とゲイン(ダイノード)に分けられます。

陰極感度の温度特性は、波長依存性があり光電面の種類によっても異なりますが、一般的に長波長側の限界波長付近で温度係数がマイナスからプラスに変化し大きな値になります。

また、ゲインの温度特性はマイナスの傾向を示しますが、陰極感度(光電面)とは違い、波長依存性はほとんどありません。さらに、電圧依存性もほとんどありません。

図13-1に代表的な光電面を持つ光電子増倍管の陽極での波長対温度係数を示します。

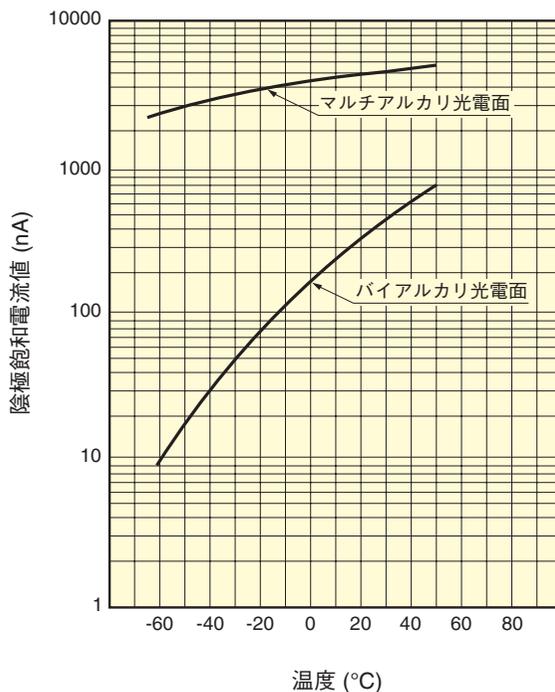


THBV4\_1301JA

図 13-1 光電面の種類による温度係数

透過型光電面の光電子増倍管を低温で使用する場合には、光電面の面抵抗の増加により陰極電流の飽和現象が起こり入射光量に対するリニアリティ特性が悪くなります。この現象は光電面の種類により差がありますが、一部のバイアルカリ光電面で特に顕著に現れますので注意が必要です（第4章 4.3.2 参照）。

図13-2に透過型光電面におけるバイアルカリとマルチアルカリの温度対陰極飽和電流の測定例を示します。

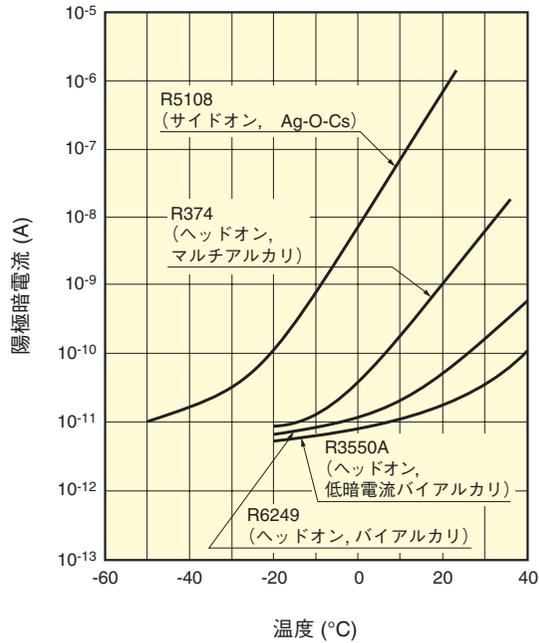


THBV4\_1302JA

図 13-2 透過型光電面の温度と陰極飽和電流の測定例

## (2) 暗電流

光電面は、光電子が放出されやすいようにエネルギーギャップと電子親和力の小さな物質からできているために、暗電流は周囲温度に非常に敏感です。このため、微弱光計測では、特に注意が必要です。また、赤感度の高い光電子増倍管は冷却して暗電流を下げることでSN比を改善します。一方、高温で使用するとSN比が悪くなることから、低暗電流バイアルカリ光電面(Sb-Na-K)などの使用を考える必要もあります。図13-3に代表的な光電面の温度対暗電流特性を示します。また、暗電流については第4章 4.3.6を参照してください。



THBV4\_1303JA

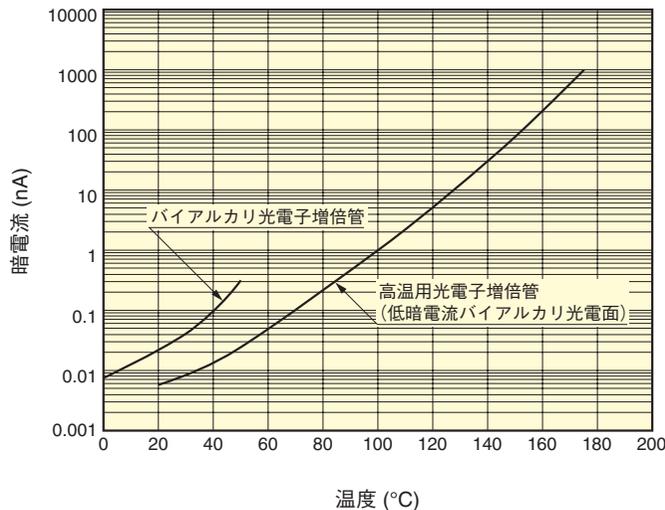
図 13-3 光電面種類による暗電流の温度特性

### 13.1.2 高温用光電子増倍管

一般的な光電子増倍管は動作保証温度の上限は50℃ですが、200℃までの高温に耐えることができる光電子増倍管もあります。

光電面には低暗電流バイアルカリが用いられ、電子増倍部には銅ベリリウム (CuBe) ダイノードを用い、高温中での動作を考慮した設計がされています。

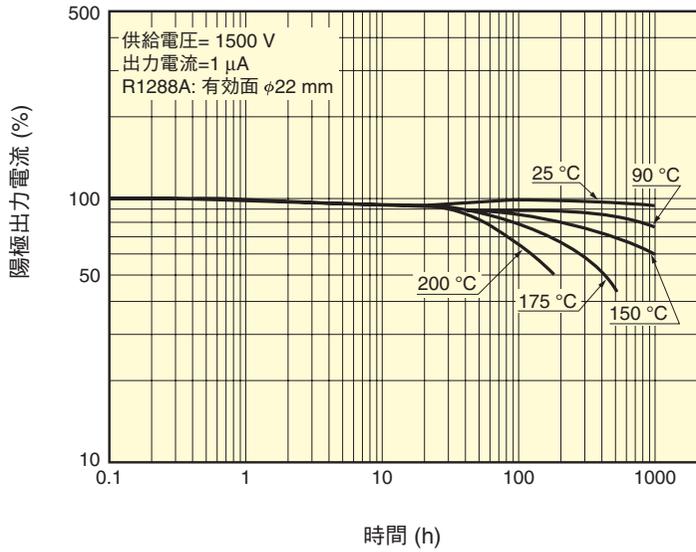
特性例として図13-4に暗電流の温度特性、図13-5に各温度での陽極電流及び、相対パルス波高の経時変化特性、放射線源を用いた特性として図13-6に温度に対する相対波高値およびエネルギー分解能 (Pulse Height Resolution: P.H.R.)特性、図13-7に温度に対するプラトー特性の変化の例を示します。



THBV4\_1304JA

図 13-4 暗電流の温度特性

代表的な高温用光電子増倍管



200 °C対応 高温用光電増倍管

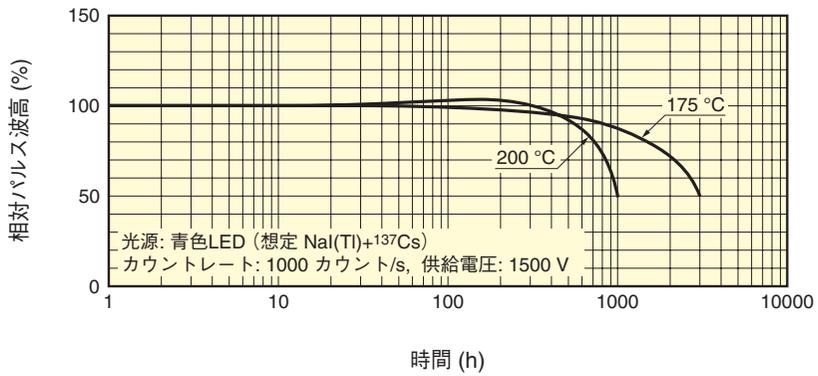
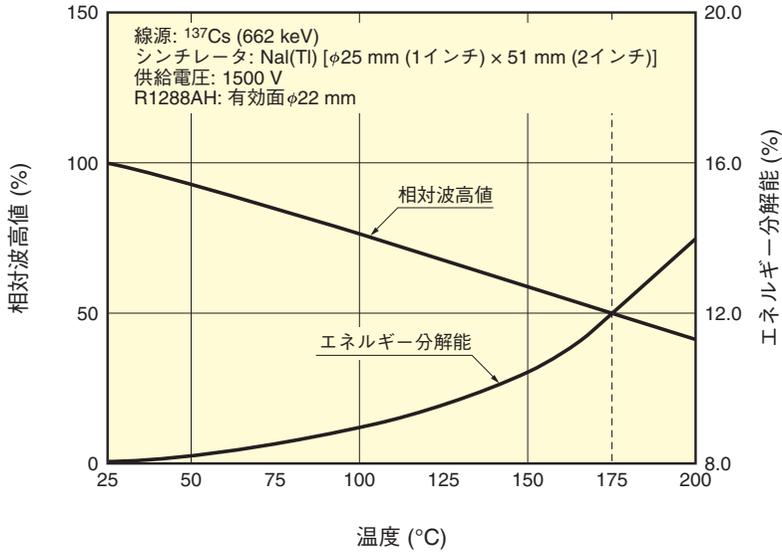
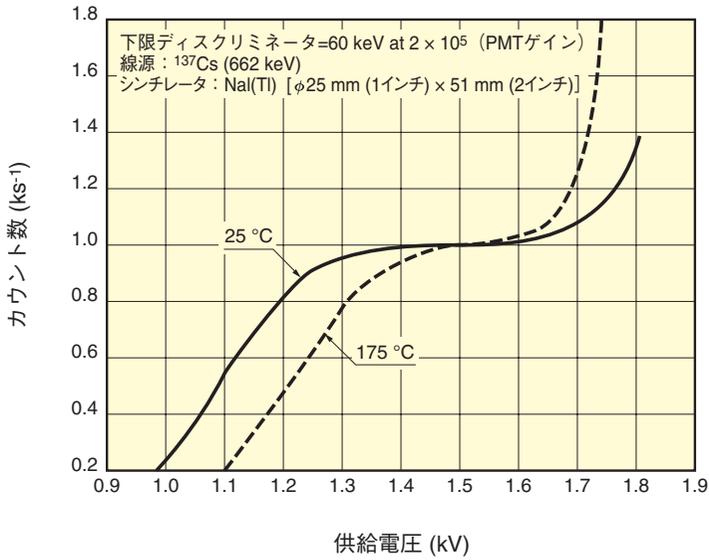


図 13-5 各温度での陽極電流の経時変化特性



THBV4\_1306JA

図 13-6 温度に対する相対波高値およびエネルギー分解能特性



THBV4\_1307JA

図 13-7 温度に対するプラトー特性の変化

### 13.1.3 保存温度および冷却時の注意

光電子増倍管の感度は室温中で放置しても多少変化します。これは光電面やダイノード面を活性化しているアルカリ金属の移動によるものと考えられます。そのために高温状態で放置すると感度変化が加速されるため、保管中は高温にならないような場所での保存をお勧めします。

13.1.1(2)暗電流の項で説明したように、赤感度の高いマルチアルカリ、GaAs(Cs)、InGaAs、Ag-O-Csの光電面の光電子増倍管では冷却して使用することが多いです。この場合、ガラスやベース、接着剤(エポキシ樹脂)の熱膨張率の違いによりガラス部分が破損する場合がありますため以下の注意が必要です。

- ・ -30℃以下に冷却する場合はプラスチックベースタイプは使用しないでください。
- ・ 光電子増倍管のピンに無理な力が加わらないようにするため、基板などにデバイダ回路を組み、なるべく細く柔らかい線でソケットに接続してください。
- ・ 急激な温度変化を避けてください。

## 13.2 湿度の影響

### 13.2.1 動作時湿度

高電圧でしかもpAから $\mu$ Aオーダの微小電流を扱うために、ピン間のリーク電流が問題になることがあります。このリーク電流の変化は湿度により数桁も増加することがあるため、おおむね60%以下の湿度で使用することをお勧めします。

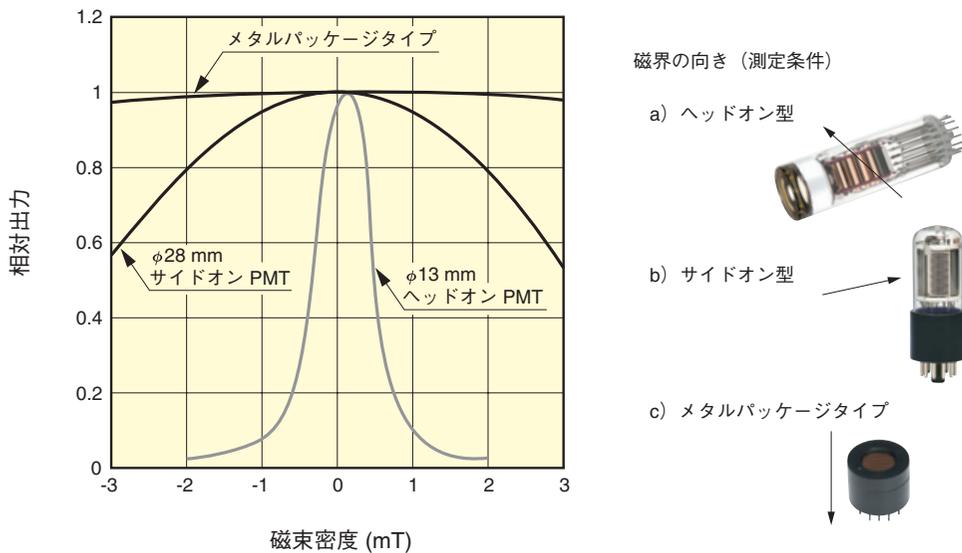
### 13.2.2 保存時湿度

高湿度のもとに長時間放置すると、ステムガラス表面のリーク電流の増加、ピン表面に錆が発生することによる接触不良、UV透過ガラスでは失透による透過率の低下などが生じることがあるため、乾燥した場所に保存する必要があります。また、表面の汚れがリーク電流の増加や錆の発生の原因となりますので、ガラスステム部、ピンやプラスチックベースの陽極ピン回りは、手や指などで直接触れないでください。万一汚れた場合には、無水アルコールなどを使用して洗浄する必要があります。一般的に85%以下(結露なきこと)の湿度で保存することをお勧めします。

## 13.3 周囲磁界の影響

### 13.3.1 磁気特性

光電子増倍管は真空中を電子が走行するため、地磁気程度の磁界でも電子軌道に影響を与え陽極感度が変化することがあります。感度変化の一番の原因は磁界により電子軌道が影響を受けるためです。特に光電面と第1ダイノード間の距離が長いもの、光電面に対し第1ダイノードの開口部の小さなものほど磁界の影響を受けやすい構造といえます。一般的に大口径になるほど光電面と第1ダイノード間の距離が長くなります。ヘッドオン型光電子増倍管では一部を除いて陽極感度が50%に落ちるのは磁束密度がおおよそ数十分の一mT～数mTであり、磁界の方向では光電面に水平な方向(X軸)が最も影響を受けやすくなります。一方サイドオン型光電子増倍管では光電面と第1ダイノードの距離が短いため影響を受けにくく、感度が50%落ちになるのは $\phi 28\text{ mm}$  (1-1/8インチ)型で約3.5 mT程度です。メタルパッケージタイプ光電子増倍管R9880シリーズは光電面と第1ダイノード間の距離が短く、金属ケースによる磁気シールド効果も加わり、磁界に対し優れた特性を有しています。代表的な製品の特性を図13-8に示します。また供給電圧が高い方が磁界の影響を受けにくくなります。



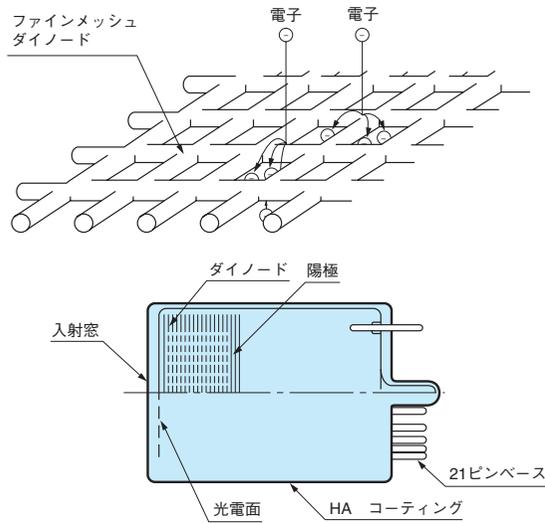
THBV4\_1308JA

図 13-8 光電子増倍管の磁気特性

光電子増倍管は磁界の存在しない環境で使用することが望ましく、特に電源トランスや磁石などの近くで使用するのは避けるべきです。磁界が避けられない時は光電子増倍管に磁気シールドを施す必要がありますが、シールド効果および磁気シールドケースの使用方法については、第5章 5.4に具体的例を上げて記述してありますので参照してください。

### 13.3.2 高磁界用光電子増倍管

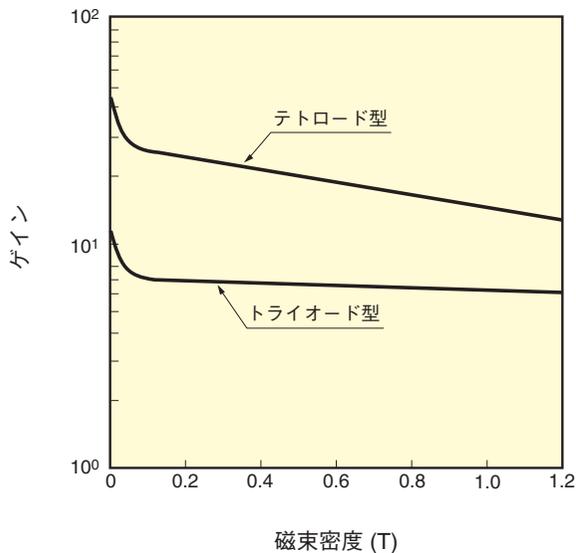
先述の一般的な光電子増倍管では10 mTの磁界中で少なくとも1桁以上感度が低下します。しかし高エネルギー物理学の分野では1 T以上の磁場中で動作可能な光電子増倍管が求められています。そのために開発されたものとしてファインメッシュダイノード構造の製品があります。それらにはダイノードの段数が1段(トライオード)、2段(テトロード)のものと、高増倍率特性を有する多段の光電子増倍管があります<sup>1)</sup>。これらの構造を図13-9に示します。また図13-10にトライオード型とテトロード型光電子増倍管の垂直方向(管軸方向)の磁界に対するゲイン特性と、19段型光電子増倍管の磁界角度とゲイン特性を示します。



THEV4\_1309JA

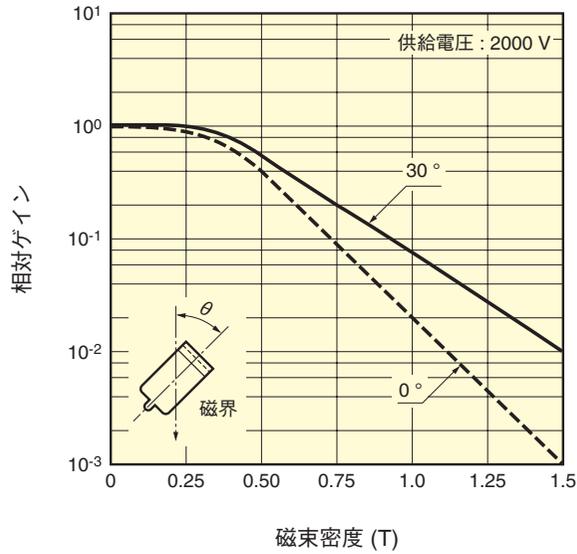
図 13-9 高磁界用光電子増倍管の構造

トライオード型、テトロード型光電子増倍管の磁気特性 (管軸)



THEV4\_1310JAa

図 13-10 高磁界用光電子増倍管の磁気特性 (1)



THBV4\_1310JAB

図 13-10 高磁界用光電子増倍管の磁気特性 (2)

### 13.3.3 磁化

ダイノードは磁性体であるニッケルで作られている製品もあり、リード線、電極などにも磁性体の金属が使われています。地磁気程度の低磁場では問題はありませんが、磁界が強くなり初透磁率範囲を越えると、磁場がなくなっても磁化されたままの状態（残留磁化）になります。そのため磁界が加わる前後でゲインが変化します。磁化された時には、光電子増倍管に交流磁界を加え、これをゆっくりと減衰させることで磁気を取り除くことができます。

高磁界で使用される場合や磁化を嫌う用途では、非磁性材料を用いた光電子増倍管が必要となります。高磁界用光電子増倍管は、ダイノードに非磁性体材料を使うことによって、高磁界動作が可能であることに加えて、磁化を最小限に抑えています。

## 13.4 振動・衝撃

耐振性、耐衝撃性をいう場合、2つの状態が考えられます。第1は輸送途中など非動作状態に対するもの、第2は実際の装置に組込まれた動作状態での場合です。

### 13.4.1 非動作時の耐振・耐衝撃性

光電子増倍管は一般的に数十 $m/s^2$ の振動や750  $m/s^2$  ~ 1000  $m/s^2$ の衝撃に耐えることが出来るように設計されています。しかし、過度の振動・衝撃が加わると特性の変化やガラス容器の破損を引き起こすことがあります。

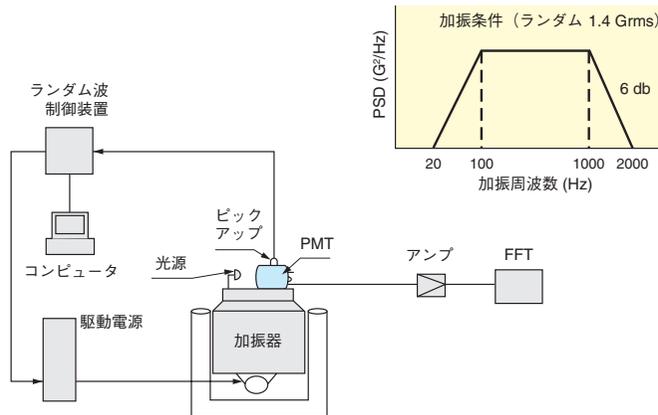
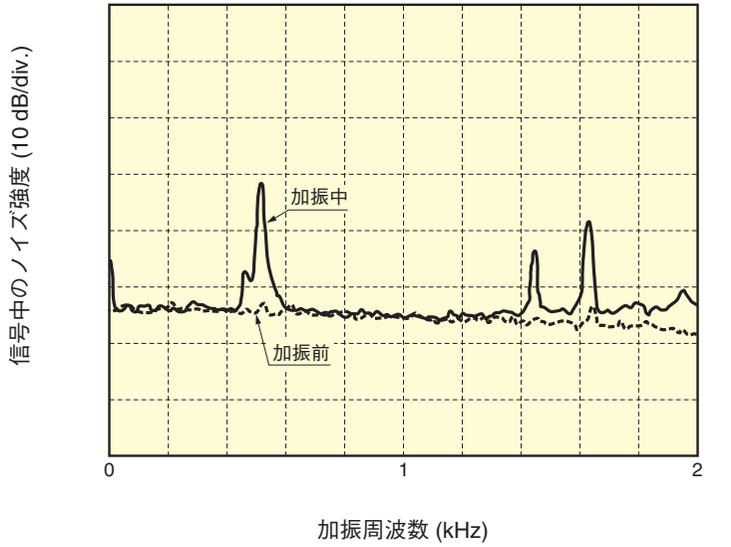
一般的に形状の小さいもの、重量が軽いもの、全長が短いものは振動・衝撃に対して強いと言えますが、取り扱いには十分ご注意ください。下記に、大きさによる一般的な製品の非動作時の耐振動性および耐衝撃性の最大値を示します。

種類		耐振動 ( $m/s^2$ )	耐衝撃 ( $m/s^2$ )
サイドオン型	φ 13 mm (1/2インチ)	100 (10 Hz ~ 2000 Hz)	1000 (6 ms)
	φ 28 mm (1-1/8インチ)	100 (10 Hz ~ 500 Hz)	1000 (11 ms)
ヘッドオン型	メタルパッケージTO-8	100 (10 Hz ~ 500 Hz)	1000 (11 ms)
	φ 13 mm (1/2インチ)	100 (10 Hz ~ 500 Hz)	1000 (11 ms)
	φ 28 mm (1-1/8インチ)	50 (10 Hz ~ 500 Hz)	1000 (11 ms)
	φ 51 mm (2インチ)	50 (10 Hz ~ 500 Hz)	750 (11 ms)
	φ 76 mm (3インチ)	50 (10 Hz ~ 500 Hz)	750 (11 ms)

光電子増倍管はガラス容器でできているので、直接の衝撃には弱く、特に石英窓を持つものは、段つなぎがなされている側管部が衝撃に特に弱く割れやすいため、取り扱いには十分注意する必要があります。また液体シンチレーションカウンティング用によく使われるものの中には面板が約0.5 mm厚と非常に薄く、わずかな衝撃でも破損しやすいものもあります。またガラス容器が破損するとき、爆発したときのように破片が飛び散る（爆縮）ことがありますので、特にφ 204 mm (8インチ) 以上の大口径の光電子増倍管を取り扱うときは注意が必要です。

### 13.4.2 動作状態での耐振動・耐衝撃性（共振）

光電子増倍管は特別なものを除いて、動作中に振動や衝撃がかかることを前提として作られていません。動作中に振動・衝撃を受けると、信号の変動、マイクロフォニックノイズの増加などの問題が発生することがあるため、光電子増倍管の固定方法や配置には注意が必要です。また、ある周波数で共振点を持つことがあり、その周波数は製品および光電子増倍管ごとに異なります。この共振点で加振されると上記の不具合現象が増大され、破損しやすくなります。図13-11に振動を加えたときの信号出力の周波数スペクトラムの変化とその測定方法の一例を示します。



THBV4\_1311JA

図 13-11 振動を加えた時の信号出力の共振ノイズ

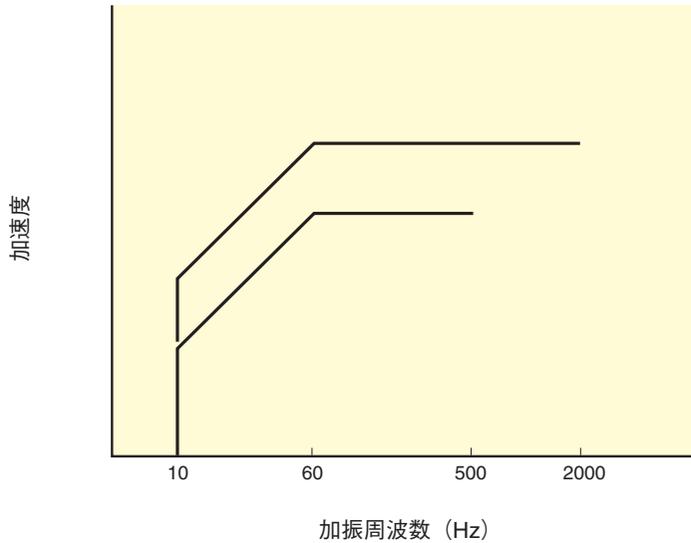
この実験では20 Hz～2 kHzのランダム振動(1.4 Grms)を加え、出力信号をFFT (FFT: Fast Fourier Transform)で周波数分析したものです。図13-11では周波数0.5 kHz, 1.45 kHz, 1.6 kHz付近でノイズが増大しているのがわかります。

また非常に微弱光を扱う時は装置を載せている機のわずかな振動もノイズ源となる場合があるため、この場合は装置の固定やプリアンプまでのケーブルの長さ・固定などに注意する必要があります。

### 13.4.3 試験方法・条件

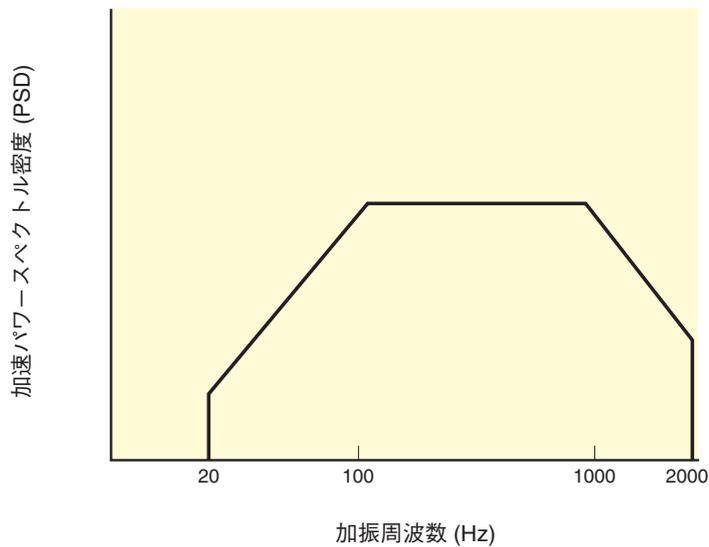
振動試験方法<sup>2)</sup>には正弦波形とランダム波形を加える方法があります。正弦波形は周波数範囲、変位(振幅)、加速度、加振時間、掃引時間などの条件によって決まります。周波数の掃引方法は対数掃引が一般的です。ランダム波形の場合は加振の加速度パワースペクトル密度( $G^2/Hz$ )と加振時間で決まり、その加速度は実効値 (rms値) で表され、実際の使用条件に近い試験が可能です。図13-12(A), (B)に正弦波とランダムの振動パターンの一例を示します。

(A) 正弦波振動パターン



THBV4\_1312JAa

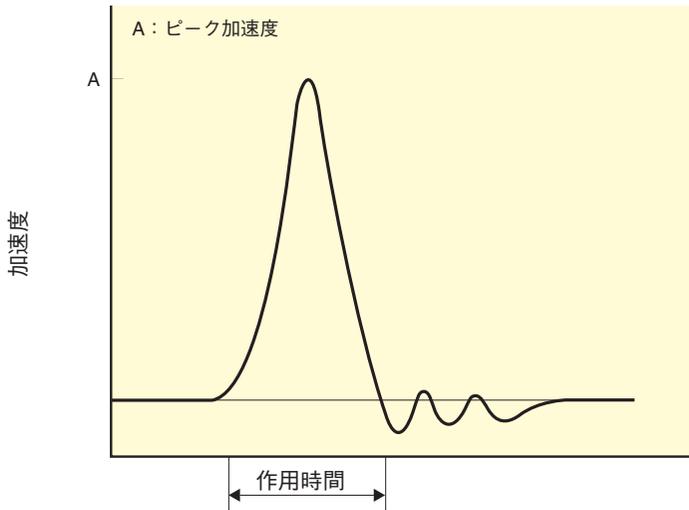
(B) ランダム振動パターン



THBV4\_1312JAb

図 13-12 振動パターン曲線

衝撃波形（正弦半波曲線）



THEV4\_1313JA

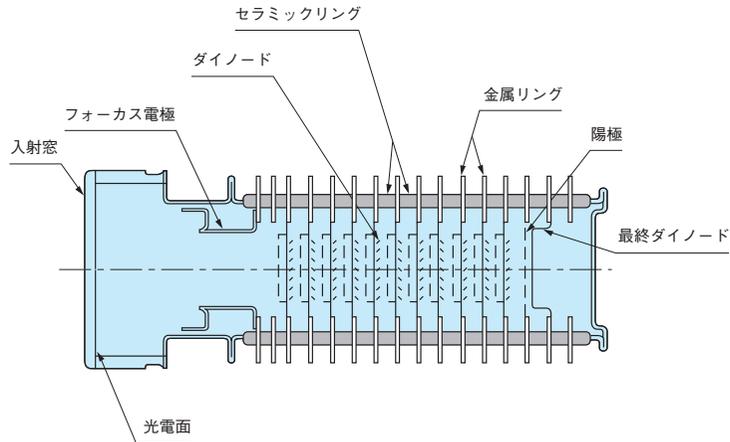
図 13-13 衝撃曲線

衝撃試験には正弦半波、のこぎり波、台形波の各パルスによる方法がありますが、浜松ホトニクスでは一般的に正弦半波パルスで行なっています。試験条件は、ピーク加速度、衝撃作用時間、回数で決まります。図13-13に衝撃波形を示します。

振動・衝撃試験の公的規格にはIEC 60068、JIS C 60068-2-6(振動)、JIS C 60068-2-27(衝撃)、MIL STD-810G、MIL STD-202G<sup>3)</sup>などがあります。浜松ホトニクスでもそれらの規格に準拠した方法にて試験しています。先に述べた耐振動・衝撃の値もこれらの試験条件で試験が行われたものです。例えば、衝撃試験では衝撃作用時間は11 msで互いに直行する3つの軸の±方向に3回ずつ合計18回衝撃が与えられます。よって1000 m/s<sup>2</sup>の衝撃に耐えると言っても何十回、何百回衝撃を加えても良いということではありません。

#### 13.4.4 耐振用光電子増倍管<sup>4)</sup>

石油探査をはじめとする地質検層や、ロケットに搭載される宇宙探査などの用途では強い耐振動・耐衝撃性が要求<sup>5)</sup>されます。そのため、これらの用途には特別に耐振性を持たせたものが作られており、200 m/s<sup>2</sup>～500 m/s<sup>2</sup>の耐振性、1000 m/s<sup>2</sup>～10000 m/s<sup>2</sup>の耐衝撃性を有しています。形状はφ13 mm～φ51 mm (1/2インチ～2インチ) まで各種があり、使われているダイノードも多種多様です。これらのほとんどは通常品をもとに耐振用に電極保持構造、リード線、ダイノードなどを強化し、耐振性能を向上させたものです。φ51 mm (2インチ) までで、通常品を基本に耐振構造にしたものでは200 m/s<sup>2</sup>～300 m/s<sup>2</sup>までの耐振性を有していますが、それ以上の性能を要求する場合は、ガラス容器の代わりにセラミックを用います。図13-14は、その構造を断面図で示したものです。



THEV4\_1314JA

図 13-14 耐振用光電子増倍管の構造

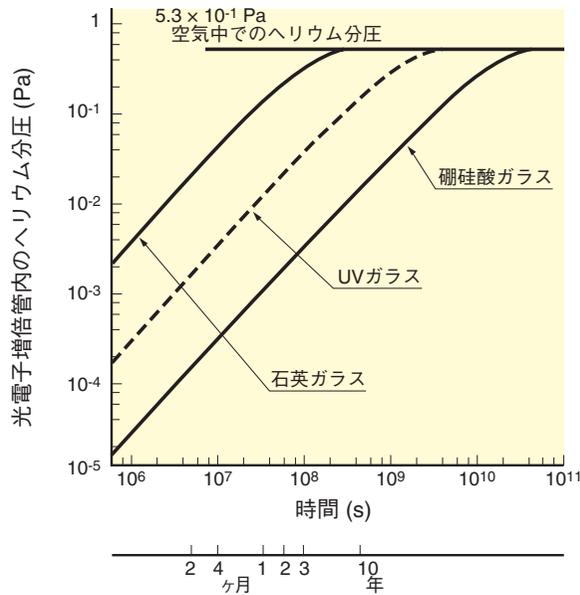
図のように、おのおののダイノード電極はセラミックリングで完全に融着され固定されています。そのため振動によりダイノードの変形・はがれが起りにくく、また、リード線、セラミック基板、陰極コンタクト部が不用で、割れやすいガラスの部分も少ないため振動による断線や接触不良、破損が起りにくくなっています。デバイダ抵抗もこの金属リング部の外側に直接つけることができるため、デバイダ回路を付けた後も同様な耐振性を持たせることができます。以下に、 $\phi 34$  mm (1-3/8インチ)、低暗電流バイアルカリ光電面で12段の電子増倍部をもつ積層セラミック光電子増倍管の耐振性を示します。

耐振動性	500 m/s <sup>2</sup>	(50 Hz～2000 Hz)
耐衝撃性	10000 m/s <sup>2</sup>	(0.5 ms)

## 13.5 ヘリウムガスの影響

ヘリウムガスがガラスを透過<sup>6)</sup>することはよく知られています。ガラスに対する透過率は、ガラスを構成する成分やその組成、さらには温度などにより異なります。紫外域の波長を対象とする光電子増倍管の窓材には石英が使われます。石英ガラスは他の窓材に比べてヘリウムガスを透過しやすいために問題になることがあります。ヘリウムガス中の放置や動作では、管内ガスが増加し、暗電流の増加、耐電圧の劣化へと進行します。最終的には放電を生じ、使用できなくなります。例えば、1気圧のヘリウムガスの中に石英ガラスを用いた光電子増倍管を置いた場合、およそ30分でヘリウムガスの影響によるアフターパルスの急激な増加が見られ使用できなくなりますのでご注意ください。ヘリウムガスの影響を少なくするには、アルゴンガス、窒素ガスなどのヘリウムフリーガス中で保管するのが最善です。

ヘリウムガスは地上では約0.5 Paの分圧で存在しています。またヘリウムガスの石英ガラスの透過率は高く室温で $10^{-19}$  cm<sup>2</sup>/s ( $1.013 \times 10^5$  Pa差の時)です。このことから、石英ガラスの表面積と厚さにより時間差はありますが、光電子増倍管内のヘリウム分圧は徐々に増加して最終的には大気中のヘリウム分圧近くまで増加します。例えば、石英ガラスを用いたサイドオン型光電子増倍管( $\phi 28$  mmタイプ)を大気中に放置すると、1年後には光電子増倍管内のヘリウム分圧はおよそ $9 \times 10^{-2}$  Paになります(図13-15参照)。



THBV4\_1315JA

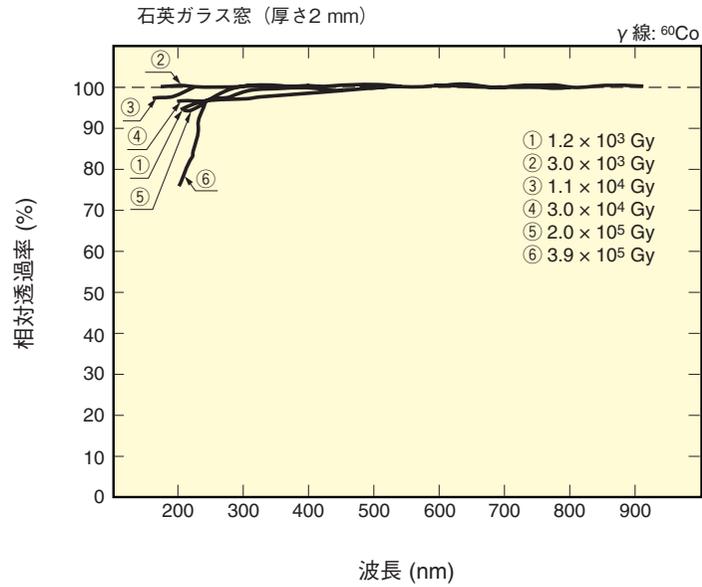
図 13-15 光電子増倍管内のヘリウム分圧の変化

## 13.6 放射線の影響

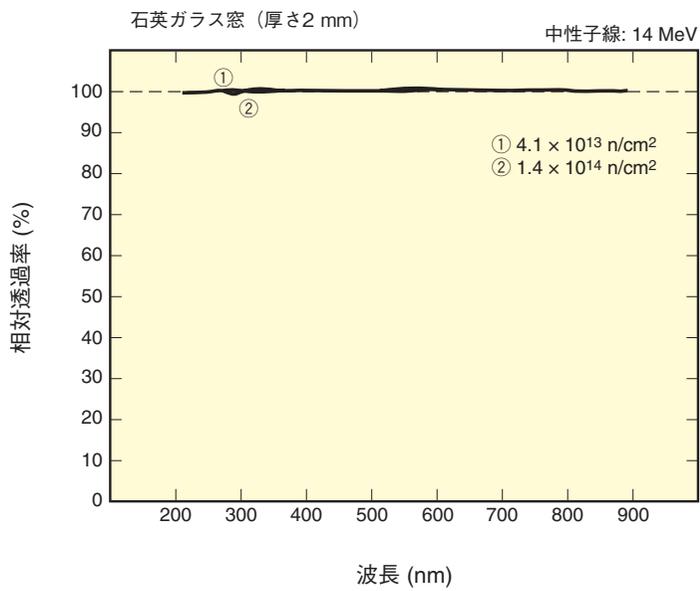
光電子増倍管は、高エネルギー物理学、核医学、X線応用、および宇宙探査など幅広い用途で使用されています。このような用途では放射線(X線、 $\alpha$ 線、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線および中性子線など)にさらされることになり光電子増倍管の特性に少なからず影響を及ぼします<sup>7)</sup>。これらの放射線は、光電子増倍管のバックグラウンドノイズとなる他に、光電子増倍管の窓材であるガラスなどに劣化をもたらす場合があります。

### 13.6.1 窓材透過率の劣化

放射線の照射によって陰極感度や二次電子増倍率が直接大きく変化することはほとんどありませんが、窓材のガラスが着色し透過率の劣化をおこします<sup>8)</sup>。 $^{60}\text{Co}$ による $\gamma$ 線照射および中性子線(14 MeV)照射によりガラス窓の透過率の変化の様子を図13-16~18に示します。(窓厚は2 mm)

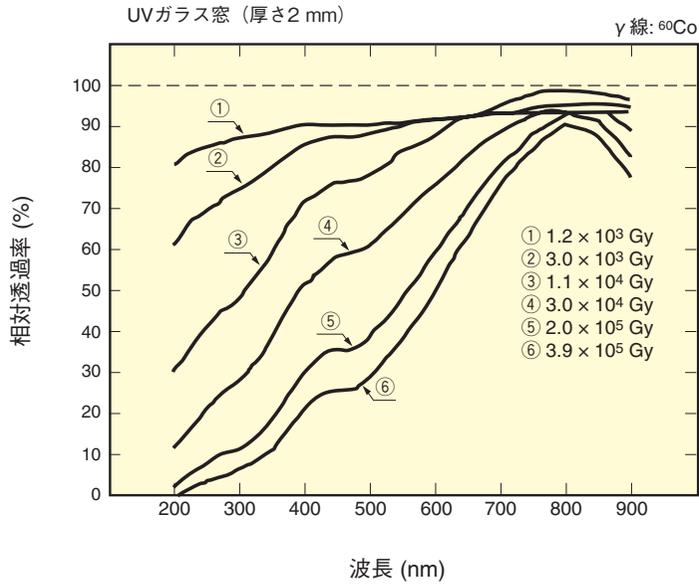


THEBV4\_1316JAa

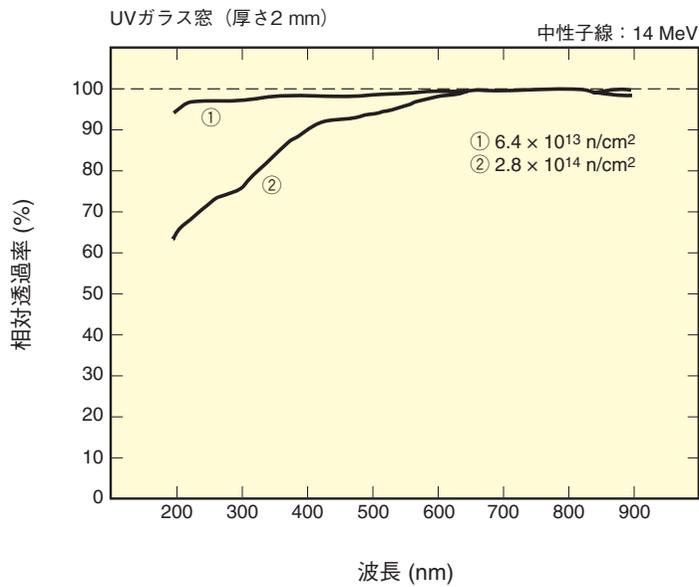


THEBV4\_1316JAb

図 13-16 γ線、中性子線による石英ガラス窓の透過率変化



THBV4\_1317JAa



THBV4\_1317JAb

図 13-17 γ線、中性子線による UV ガラス窓の透過率変化

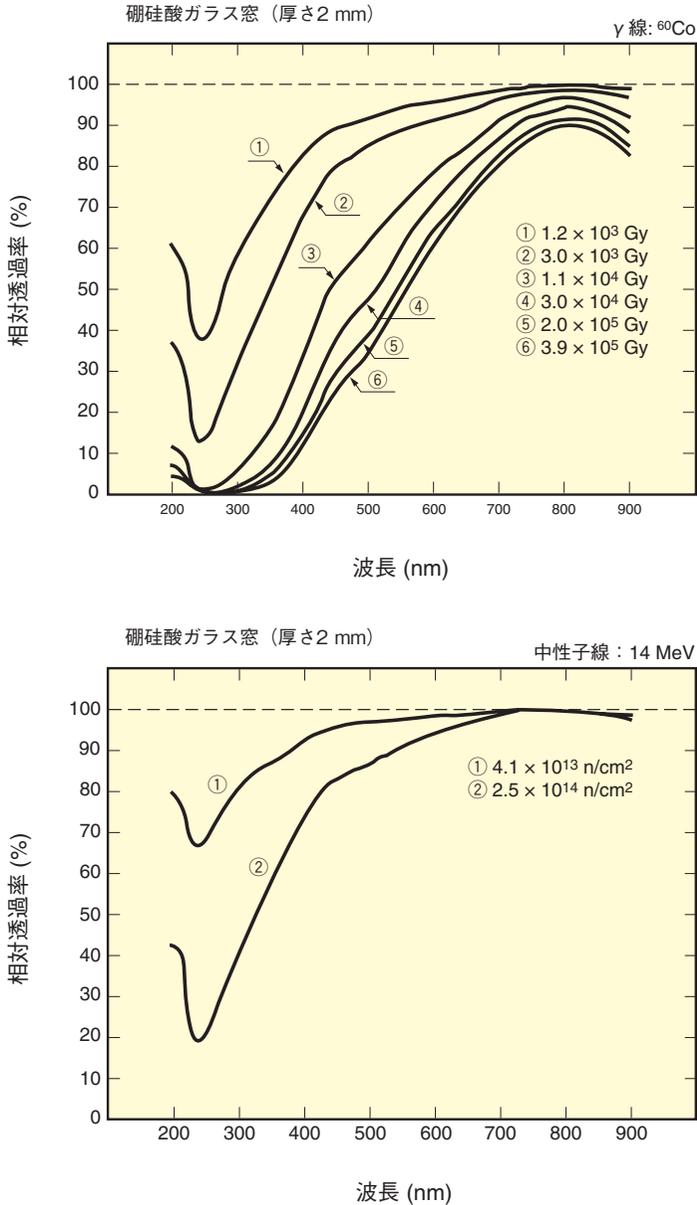


図 13-18 γ線、中性子線による硼硅酸ガラス窓の透過率変化

これらの図から放射線照射により紫外域ほど透過率が劣化しやすいことがわかります。石英ガラスが最も放射線の影響を受け難く、 $2.0 \times 10^5$  Gyのγ線および $1.4 \times 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>の中性子線放射に対してもほとんど変化は認められません。これに対して硼硅酸ガラスでは $1.2 \times 10^3$  Gyでも透過率の劣化が見られますが、硼硅酸ガラスの一種であるUVガラスはこれよりも劣化の度合いが少ないと言えます。しかし同種のガラスでも製法によりその組成が異なるためこの特性は一様ではありません。放射線により透過率が劣化したものでも放置しておくことある程度は回復し、温度が高いほど効果があります。

## 13.6.2 窓材発光

また光電子増倍管は放射線にわずかに感度(雑音)を有しています。これは主として $\beta$ 線・ $\alpha$ 線に対しては入射窓ガラスの発光に、また $\gamma$ 線・中性子線に対しては入射窓ガラスの発光と光電面、電子増倍部からの電子放出によるものです<sup>9)</sup>。このうち入射窓の発光の影響が最も大きいと思われませんが、ガラスの種類により発光量が異なると考えられます。さらにガラスの発光は放射線照射停止後も引き続き蛍光やリン光を発生し続けノイズ源となります。図13-19は $\gamma$ 線照射後の暗電流の変化の様子を示したのですが、定常値に下がるまでに数十分かかることがわかります。また中性子照射では電子増倍部材料などで放射化を引き起こすことが確認されています。

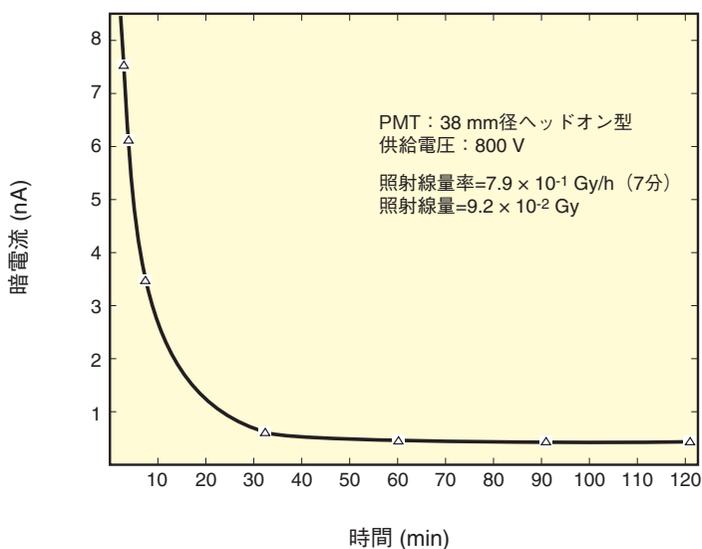


図 13-19  $\gamma$ 線照射後の暗電流変化

## 13.7 気圧の影響

光電子増倍管は $1 \times 10^5$  Pa (1気圧) の環境下での使用以外に、減圧環境、航空機、人工衛星などの低圧環境下で使用されることがあります。

大気圧から宇宙空間の真空までの気圧の変化は、光電子増倍管ベース内部のリード線間に放電を起こす可能性があります。これはパッシェンの法則としてよく知られている現象で、放電を起こす必要な最小電圧は電界が一樣で温度が一定ならば、電極間距離と気体の圧力との積の関数として定められるという法則です。

光電子増倍管のベース、およびソケットのリード線部も1気圧の環境下および高真空下では放電を起こさない電極リード線間隔に設定されています。しかし周囲圧力が100 Pa～1000 Paの気圧で最も放電しやすくなりますので、この領域で使用される場合には、高電圧供給部分の設計、配線には十分な注意が必要となります。(\*133 Pa=1 torr)

実使用における注意点は

- (1)十分に真空度が確保されたことを確認の上、高電圧を加えてください。(低電圧から高電圧へ徐々に)
- (2)プラスチックベースタイプの光電子増倍管の場合、ベース内部まで設定真空度になるためには長時間が必要となるため、プラスチックベースに穴を開ける等の加工が必要となります。
- (3)0.1 Pa～1 Paでも暗電流の増加や信号のゆらぎが見られることがあるため、実装条件には注意が必要です。

また、ニュートリノ実験などの高エネルギー物理実験においては光電子増倍管を水中や海中に沈めて使用されることがあります。この場合大気圧以上の圧力が光電子増倍管にかかります。破壊圧力は光電子増倍管の形状、大きさ、バルブの材質などにより異なります。一般的には小型の方がより高い圧力まで耐えることができます。高エネルギー物理実験で多く使用される $\phi 204$  mm (8インチ) や $\phi 508$  mm (20インチ) の大型の光電子増倍管では、より高い圧力に耐えることができるように球状の形状になっていて、 $\phi 204$  mm (8インチ) で $7 \times 10^5$  Pa、 $\phi 508$  mm (20インチ) で $8 \times 10^5$  Paまでの圧力に耐えることができます。

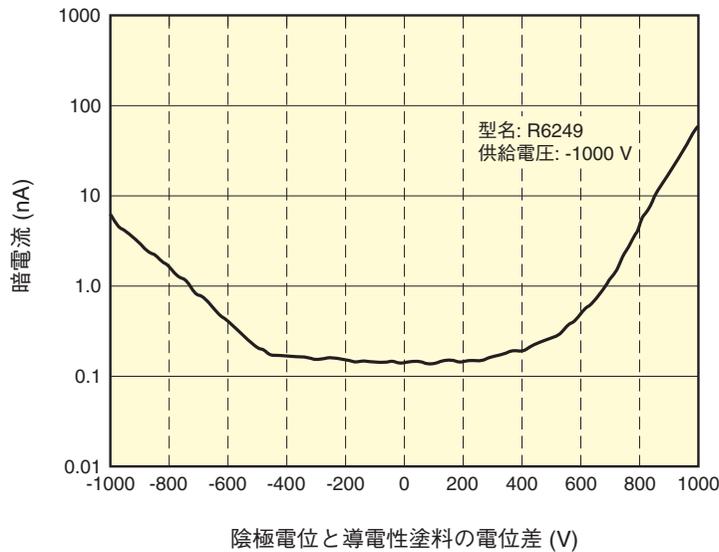
材質の違いにおいては、石英ガラスの製品は段シール部分があるため耐圧力が低くなっています。ヘッドオン型光電子増倍管の入射窓形状には、入射面および光電面が平らなフラット型、入射面が平らで光電面が凸面をしたプラノ・コンケーブ型、入射面、光電面とも凸面をしたコンベックス・コンケーブ型などがあります。フラット型に比べプラノ・コンケーブ型やコンベックス・コンケーブ型の方がより高い圧力に耐えることができます。

## 13.8 周囲電位の影響

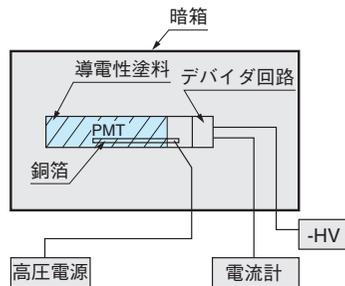
放射線や紫外光でガラスが発光することは第13章 13.6.2で述べましたが、ガラスに強電界が加わっても発光します。このガラスの発光は暗電流を増加させることになります。

### 13.8.1 実験

図13-20は光電子増倍管の側管ガラスに導電性塗料を塗り陽極側接地で動作させ、この導電性塗料の電位を陰極の電位に対し変化させた時の暗電流の様子を示したものです。



THBV4\_1320JAa



TTTBV4\_1320JAb

図 13-20 外部電位と暗電流

陰極電位と導電性塗料の電位差が大きいほど暗電流が増加することがわかります。これはヘッドオン型光電子増倍管の陰極周辺の側管内壁にはアルミが蒸着されていて、これが陰極電位のため側管外壁が陰極に対し電位差が大きいとこの間のガラスが発光します。この発光は主にガラス内部で反射して光電面に入り暗電流を増加させます。

また光電子増倍管のハウジングは一般的に金属製で接地されているため、グラウンド電位の導電性物質が光電子増倍管の周りになることになり、暗電流が増加する場合があります。しかしこのグラウンド電位の導電性物質と光電子増倍管との距離が十分あれば、この影響は少なくなります。図13-21はサイドオン型光電子増倍管とグラウンド電位の距離を変えたときの暗電流の変化を示しますが、この例では4 mm以上離せば暗電流の増加はなくなることがわかります。

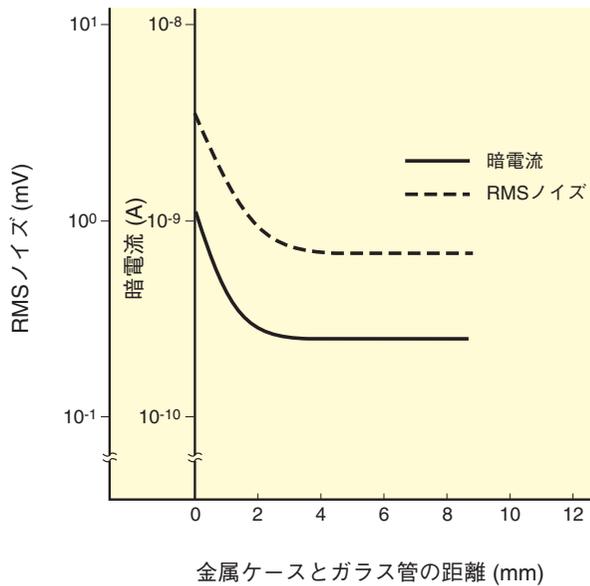
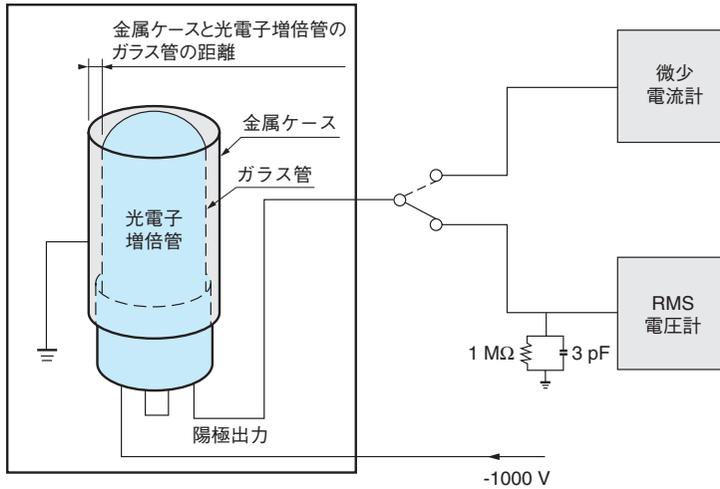
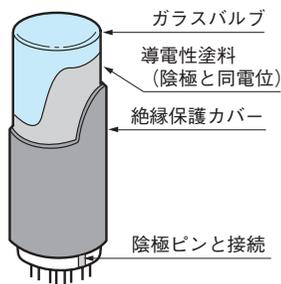


図 13-21 グラウンド電位までの距離と暗電流

## 13.8.2 対策

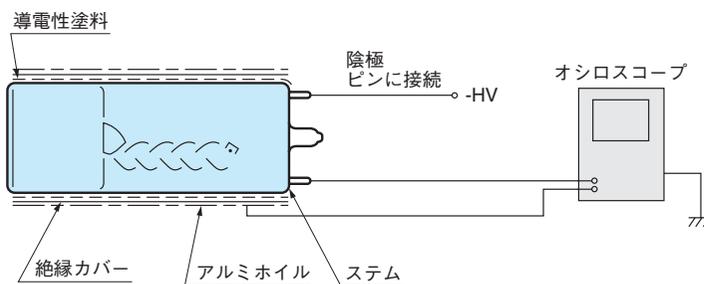
周囲電位の影響は陰極側接地にて使用すれば解消しますが、多くの場合は陽極側接地で使われます。陽極側接地の場合、図13-22のように側管ガラス外壁に導電性塗料を塗り、陰極電位にする方法が良く使われています。



THBV4\_1322JA

図 13-22 HA 処理

これは浜松ホトニクスではHA処理と呼んでいますが、側管外壁が負高圧となるため安全のために外周に絶縁保護カバー（熱収縮チューブ）が施されています。HA処理は、この周囲電位によるノイズ増加を抑えるのに有効です。しかし図13-23のように、HA処理の上にグランド電位の金属を巻いたときなど微小ノイズが発生する場合があります。これは絶縁保護カバーの絶縁破壊による微小放電が起りやすく、それによる発光が光電面に達するためと考えられます。したがって、HA処理タイプであっても陽極側接地で使用する場合はハウジングなどの金属ケースに光電子増倍管が直接接触することは避けてください。



THBV4\_1323JA

図 13-23 HA 処理上の外部電位の影響

上記のように側管の場合はHA処理によって解決できますが、光電面の入射窓ガラス上にグランド電位の導電性物質がある場合は有効な手段はありません。また、入射窓での発光は最も影響が大きく、そのため、たとえ絶縁物でも入射窓に接するのは好ましくありません。どうしても入射窓に接しなくてはならない時はテフロンなど高絶縁性材料を用いる必要があります。また入射窓上にグランド電位の物質があるとノイズの増加だけでなく光電面感度も劣下し、しかも一度劣下すると二度と回復することはありません。そのため光電子増倍管の支持方法については、特に光電面ガラスおよびその周辺は他のものが接触しないようにしてください。

## 13.9 信頼性

### 13.9.1 ライフ（寿命）特性

光電子増倍管のライフ（寿命）特性は、光電陰極の種類および電子増倍部の材質により、変化パターンに傾向がありますが、動作条件（特に出力電流）、製造条件や個々の製品ごとによって異なります。一般的に光電子増倍管の陰極電流はpAオーダの微小電流しか流れないために、光電面感度劣化はほとんど無視することができ、ライフ特性は電子増倍部の特性が重要な要素となります。図13-24に多くの光電子増倍管の最大定格である陽極電流100  $\mu$ Aで動作した時の代表的例を示します。

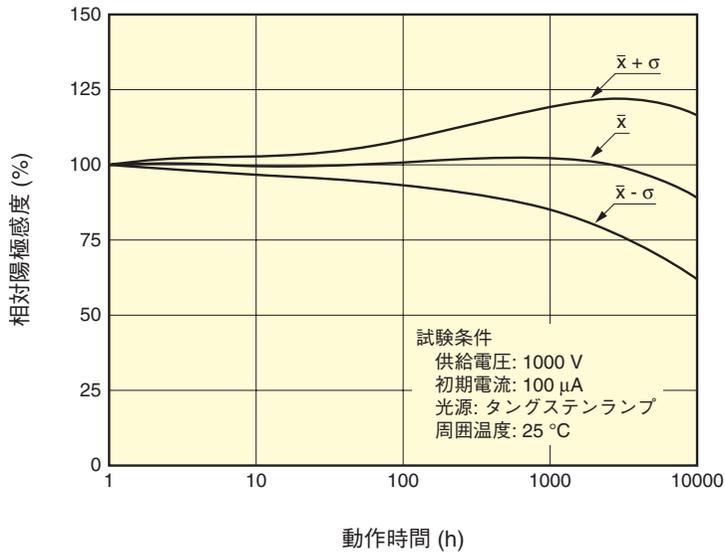
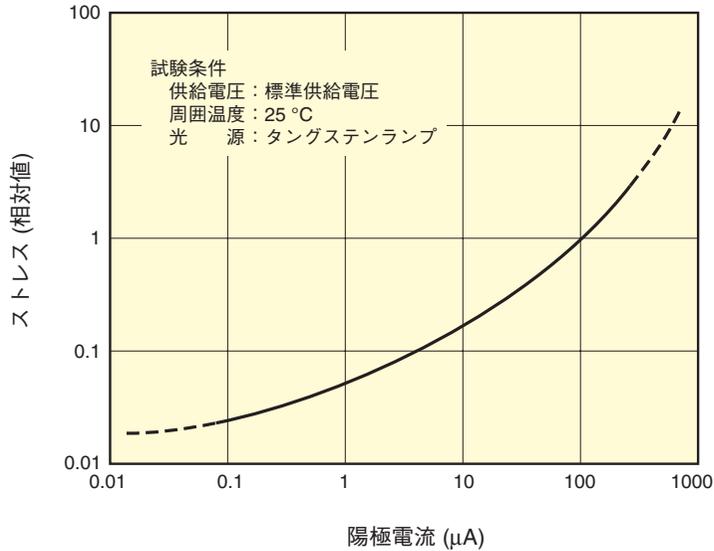


図 13-24 光電子増倍管のライフ特性

THBV4\_1324JA

## 13.9.2 電流ストレスと安定性

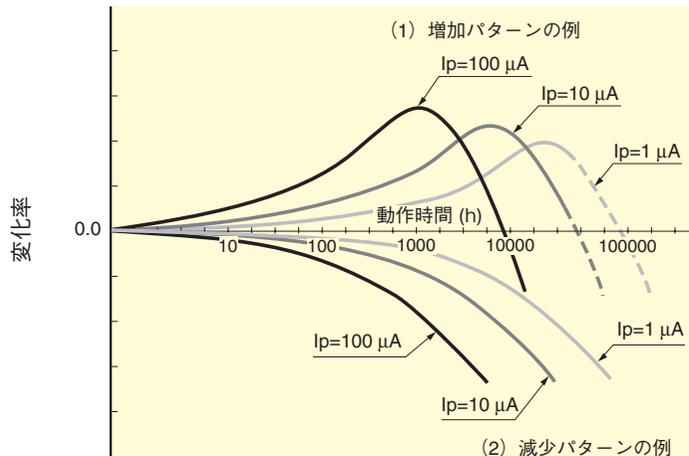
前述のように光電子増倍管は、動作条件によって経時変化特性は異なります。一般的には、陽極電流が大きいと、早くかつ大きな変動をします（高ストレス）。陽極電流に対するストレスを図13-25に示します。



THBV4\_1325JA

図 13-25 光電子増倍管のストレス変化（陽極電流値による差）

図13-26に陽極電流を $1 \mu\text{A}$ 、 $10 \mu\text{A}$ 、 $100 \mu\text{A}$ と変えた場合の増加および減少パターンの経時変化特性の例を示します。



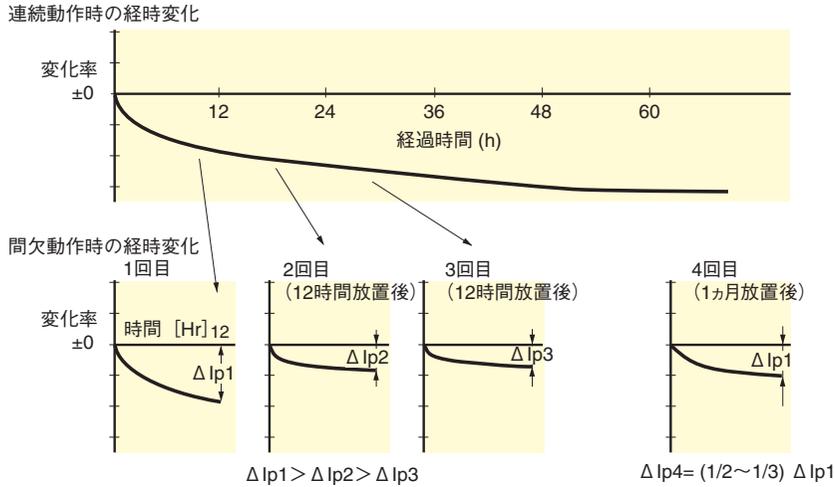
試験条件  
供給電圧：標準供給電圧  
周囲温度：室温  
光源：タングステンランプ

THBV4\_1326JA

図 13-26 光電子増倍管の経時変化（陽極電流値による差）

また光電子増倍管の経時変化特性は、一定の光を入射しエージング（第4章 4.3.4(2) 参照）を行うことにより改善することができます。図13-27に繰り返し動作した時の初期変動の変化を示します。図の例では、最初の変動が大きなものでも、2回目以降は半分程に減少しています。

しかし長時間放置すると元の値に戻っていくため、安定性が特に重要な用途には、使用前にエージングをすることをお勧めします。

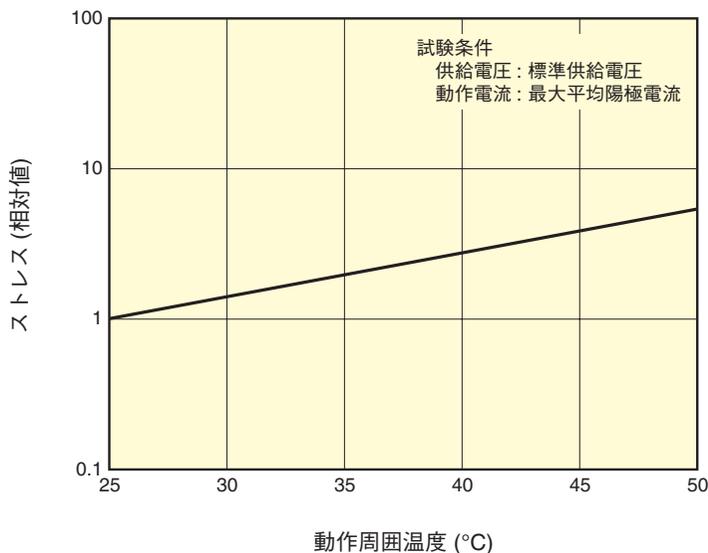


THBV4\_1327JA

図 13-27 光電子増倍管の間欠動作（エージング効果）

### 13.9.3 温度ストレスと安定性

温度ストレスについても光電子増倍管は、動作条件によって経時変化特性は異なります。一般的には、動作周囲温度が上昇すると、早くかつ大きな変動をします。動作周囲温度に対するストレスを図13-28に示します。



THBV4\_1328JA

図 13-28 温度ストレス

## 13.9.4 信頼度

1つのシステムあるいは装置に、光電子増倍管が数十本～数百本、ときには数千本も使われる用途では、特に光電子増倍管の信頼度を予測し、確認することが重要になります。

### (1) 故障モード

光電子増倍管の故障モードは大別して劣化故障と破壊故障に分けられ、主な故障モードは劣化故障にあるといえます。劣化故障は陰極感度劣化、ゲインの劣化、暗電流の増加、耐電圧の低下があります。劣化故障は動作時の過大光の入射、それに伴う低電圧動作、高温・高湿度環境での保管や動作などにより加速されます。破壊故障にはガラス面板、バルブおよびステム部分のクラック、微小クラックによるエアリークなどがあげられます。破壊故障は低温環境下によるガラス破損など使用環境による要因、または落下や強い振動・衝撃、ステムピンへの過度なストレスなど取り扱いによる要因があり、光電子増倍管に致命的なダメージを与え使用不可能になります。

故障モードのほとんどは暗電流の増加とゲインの劣化(変動)によるもので、光電子増倍管がその時点で直ちに使用できなくなるものではありません。

なお、ゲイン劣化については動作電圧を調整することにより、多くの場合、回復が可能です。

### (2) 故障率

故障率<sup>10)11)</sup>は、単位時間内に故障を起こす割合と定義されています。一般的に故障率は主に次の2つの方法によって推定されます。

1. 社内信頼度試験
2. フィールドデータ

このうちフィールドデータから求めた光電子増倍管の実績故障率としては、常温環境、定格動作電圧、陽極出力電流が100 nA程度の動作条件でほぼ $2 \times 10^{-6}$ 故障/時間～ $2 \times 10^{-7}$ 故障/時間の水準にあることが確認されています。また特別にスクリーニングを施したものはおおそ $5 \times 10^{-7}$ 故障/時間以下の故障水準であることが予測されます。

### (3) 平均寿命

一般的にMTBF<sup>10)11)</sup>(Mean Time Between Failure)またはMTTF (Mean Time To Failure)と呼ばれている信頼度の尺度がありますが、これは故障するまでの平均時間ということで、平均故障寿命といわれています。これらの定義や基礎数理は信頼性に関する文献に詳しく述べられていますのでここでは簡単に説明します。故障率( $\lambda$ )と平均故障寿命( $\theta$ )の関係は指数分布に従う故障分布を持っていることを前提として、次のように定義<sup>10)11)</sup>されています。

$$\theta = 1 / \lambda$$

したがって、故障率の逆数が平均故障寿命ということになります。

光電子増倍管の室内環境下で陽極出力電流が100 nA前後の使用条件では、前述の事故率より算出されれば $5 \times 10^5$ 時間～ $5 \times 10^6$ 時間の平均故障寿命を持っていると予測されます。また特別にスクリーニングを実施した光電子増倍管では $2 \times 10^6$ 時間以上の平均寿命を持っています。

## (4) 信頼度

信頼度Rは、信頼性の基礎数理によれば、次のように定義<sup>10)11)</sup>されています。

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad t: \text{時間}$$

したがって光電子増倍管の故障率は $2 \times 10^{-6}$ 故障/時間 $\sim 2 \times 10^{-7}$ 故障/時間であるから、信頼度Rは次のようになります。

使用時間	信頼度 R(t)	
	$\lambda = 2 \times 10^{-6}$ の時	$\lambda = 2 \times 10^{-7}$ の時
1年 (8760時間)	98.3 %	99.8 %
2年 (17520時間)	96.6 %	99.7 %
3年 (26280時間)	94.9 %	99.5 %
4年 (35040時間)	93.2 %	99.3 %
5年 (43800時間)	91.6 %	99.1 %

以上の結果はおおよその光電子増倍管の信頼度の水準を求める参考になります。したがって良好な使用条件での光電子増倍管の信頼度はかなり高い水準にあるといえます。

### 13.9.5 浜松ホトニクスにおける信頼度試験と判定基準

社内信頼度試験では次のような信頼度試験と故障判定基準を設定し、試験を行ない故障率を求めています。

#### 信頼度試験条件

- イ) 環境ストレス条件  
室温(25℃)および高温(55℃)(最大定格+5℃)

- ロ) 試験方法

#### 放置および動作寿命

- ハ) 動作条件(光電子増倍管)  
供給電圧；カタログ標準動作電圧  
1000 V～1250 V  
陽極出力電流；カタログ最大定格  
10  $\mu$ A～100  $\mu$ A

#### 故障判定基準

- イ) 動作寿命時の陽極感度  
±50 %の変化
- ロ) 動作以外(放置)時の陽極感度  
±25 %の変化
- ハ) 陰極感度  
いずれの試験でも放置±10 %の変化、動作±25 %の変化
- ニ) 陽極暗電流(DC)  
10倍以上の変化、耐圧不良
- ホ) 破壊故障  
放電、クラック、陽極漏洩電流など

但しこの判定基準は浜松ホトニクスで評価基準としているもので、この基準からはずれれば使用できなくなるというものではありません。

浜松ホトニクスでは、上記条件により長期にわたって信頼性試験を続けており、光電子増倍管の豊富なデータがあります。その結果、光電子増倍管の最大定格電流を基にした条件での故障率は、 $1 \times 10^{-3}$ 故障/時間～ $1 \times 10^{-4}$ 故障/時間、したがって平均故障寿命では1000時間～10 000時間という結果が求められています。このことから、常温での100 nA程度の陽極出力電流動作時の故障率と、最大定格に基づいた温度・電流(50℃、10  $\mu$ A～100  $\mu$ A)での故障率の比は、約200倍となります。社内の試験条件は、フィールドデータの約200倍の加速係数を持っていることとなります。

## 第 13 章 参考文献

- 1) 浜松ホトニクス(株) : Technical data sheet No. T-101
- 2) 電気学会・振動・衝撃の計測調査専門委員会編 : 電気電子機器と振動・衝撃. コロナ社
- 3) IEC Publication 68-2 Basic environmental testing procedures  
JIS C 60068-2-6 : 環境試験方法(電気・電子)正弦波振動試験方法  
JIS C 60068-2-27 : 環境試験方法(電気・電子)衝撃試験方法  
MIL-STD-810G: Environmental test methods and engineering Guidelines  
MIL-STD-202G: Test methods for electronic and electrical component parts
- 4) 浜松ホトニクス(株) : Ruggedized High Temperature Photonmultiplier Tubes TPMH0001EA
- 5) BICRON CORP.(株) : Ruggedized High-Temperature Detector Technology
- 6) J.R. Incandela, S.P. Ahlen, J. Beatty, A. Ciocio, M. Felcini, D. Levin, D. Ficenc, E. Hazen, A. Marin, J.L. Stone, L.R. Sulac, W. Worstell: Nuc. Instrum. & Methods. Phys. Res. A269, 237-245(1988)  
永井彰一郎 : 新しい工業材料の科学特殊ガラス. 103, 金原出版
- 7) L.W. Howell, H.F. Kennel: Optical Engineering. 25, 4, 545, APR(1986)  
M.M. Brinbaum, R.L. Bunker, J. Roderick, K. Stephenson: AIAA Guidance And Control Conference(1984)
- 8) 作花済生, 境野照雄, 高橋克明 : “ガラスハンドブック” 朝倉書店, 825
- 9) W. Viehamann, A.G. Eubanks, G.F. Pieper, J.H. Bredekamp: Applied Optics. 14, 9, 2104, SEP(1975)
- 10) 真壁 : 信頼性工学入門. 日本規格協会
- 11) 北川賢治 : 信頼性の考え方と技術. コロナ社

# 第 14 章

## 各種応用

光電子増倍管(Photomultiplier Tube: PMT)は、各種計測機器や学術研究用の光検出器として広く用いられています。本章では、計測機器、研究分野における原理および装置、検出方法について解説します。

## 14.1 光分析装置

### 14.1.1 概要

光分析装置とは、光を用いて各種物質の分析を行う装置の総称で、特定の波長の吸収、反射、偏光を利用したものと、試料に外部からエネルギーを与え、その発光および吸光を利用したものに大別されます。光電子増倍管が多くに用いられている分野であり、長い歴史を持っています。

具体的な装置としては、

- 1) 紫外-可視分光分析装置
- 2) 赤外分光分析装置
- 3) 発光分光分析装置
- 4) 蛍光分光光度計
- 5) 原子吸光分光光度計
- 6) 旋光、円二色測定装置
- 7) ラマン分光光度計
- 8) 濃度計、比色計、色彩計

などがあります。

### 14.1.2 応用例

具体的な応用について、光の吸収を利用したタイプと発光を利用したタイプに分け、各々代表的なものについて説明します。

#### (1) 紫外 - 可視分光光度計 (UV-Visible Spectrophotometer)

紫外-可視分光光度計は、溶液試料の吸収を利用した定量分析や光の波長ごとの吸光度をプロットした吸収スペクトルの測定、固体試料では透過スペクトルや反射スペクトルを測定することができます。測定波長範囲は、紫外領域 (200 nm ~ 380 nm) から可視領域 (380 nm ~ 780 nm) になります。

分光光度計は、光源から測定に用いる波長の光をプリズムや回折格子によって分光し単色光を取り出し、試料に入射させます。試料を透過した光または反射した光を光電子増倍管で検出します。入射した光量と透過もしくは反射した光量の比から透過率または反射率を算出します。

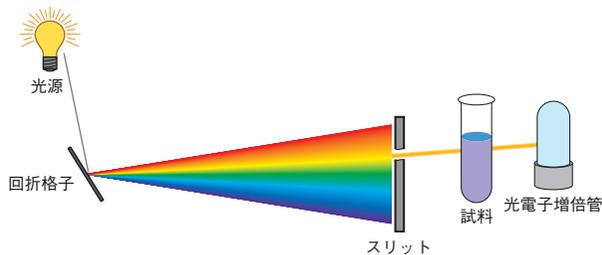
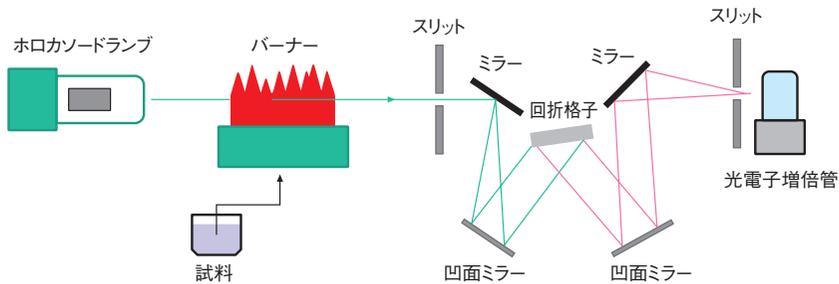


図 14-1 回折格子を用いた分光器<sup>1)</sup>

## (2) 原子吸光分光光度計 (Atomic Absorption Spectrophotometer)

試料溶液を1700℃～2700℃の高温中に噴霧し、分子を構成原子に熱分解します。この原子蒸気に調べたい目的の元素でできたホローカソードランプの光を照射し、試料中に同じ元素が存在するとその元素固有の波長の光が吸収されます。その吸光度を光電子増倍管で測定することにより試料溶液中の元素の濃度を求めることができます。基本的に1本のホローカソードランプは1元素の輝線スペクトルを出射しますので、分析する元素ごとに専用のホローカソードランプを用います。試料中元素の濃度に比例して元素特有波長の光を吸収するので、あらかじめ測定しておいた標準試料と吸収の度合を比較すれば、試料の濃度を求めることができます。

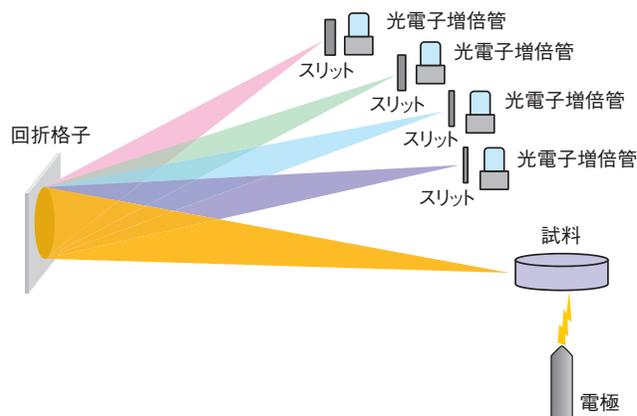


THBV4\_1402JA

図 14-2 原子吸光分光光度計の光学系

## (3) 発光分光分析装置 (Atomic Emission Spectrophotometer)

発光分光分析は、金属試料に外部から電気的エネルギーを与えることにより、励起された原子やイオンから発せられる元素固有の輝線スペクトルを分光器で波長に分け光電子増倍管で測定し元素の定性・定量分析を行う分析法です。励起放電にはスパーク放電、アーク放電、グロー放電があります。広義には誘導結合プラズマ (ICP) も含まれます。



THBV4\_1403JA

図 14-3 発光分光分析装置の光学系

#### (4) 蛍光分光光度計 (Fluorescence Spectrophotometer)

蛍光分光光度計は生物や化学の研究に用いられ、特に分子生物学で多く利用されています。分子に特定の波長の光を照射すると照射された光よりも長波長側の光を発します。この光を蛍光と呼び、光の強度、スペクトルなどを測定して試料の定量、定性分析を行います。低濃度の試料を測定する場合、吸光法より高感度な蛍光法が利用されています。

蛍光分光光度計は、光源、励起側分光器、蛍光側分光器、光検出器から構成されています。光源部には広い範囲に連続したスペクトルを有し輝度の高いキセノンランプが多く使われ、励起側や蛍光側分光器は回折格子やプリズムが用いられています。光検出器には光電子増倍管が使われています。

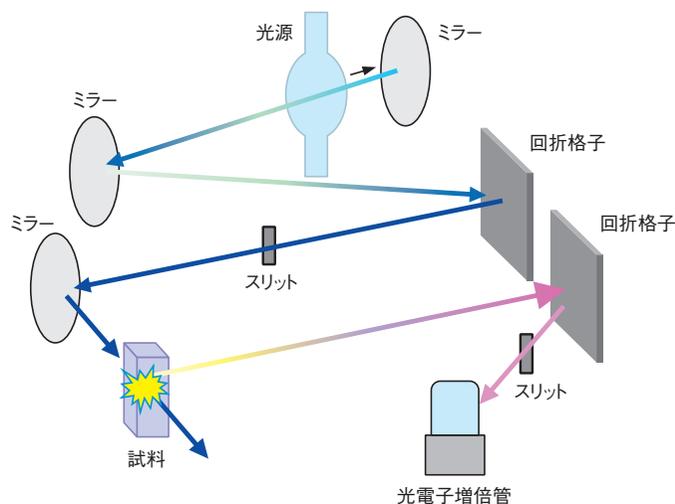


図 14-4 蛍光分光光度計の構成

THBV4\_1404JA

## 14.2 環境測定

### 14.2.1 概要

大気中、液体中の粉じんの測定器、原子力施設での放射線監視など環境計測器の検出器に光電子増倍管が用いられています。ここでは、これらの応用について説明します。

### 14.2.2 応用例

#### (1) 窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )分析計

自動車や各種燃焼機関などの排出ガス中に含まれる大気汚染物質の窒素酸化物( $\text{NO}_x$ )を測定する装置です。大気中窒素酸化物は直接人体に有害（1次汚染物質）で、更には2次汚染物質を生成し、光化学スモッグ発生要因となるため、その測定が必要となっています。

$\text{NO}_x$ は一酸化窒素( $\text{NO}$ )と二酸化窒素( $\text{NO}_2$ )の総称で、これらは大気汚染防止法により、その排出ガス濃度が一定の値を越えてはならないと定められています。

化学発光方式として図14-5に気相化学発光方式の構成例<sup>2)</sup>を示します。 $\text{NO}_x$ はコンバータを介して $\text{NO}$ ガスに変換され、 $\text{NO}$ ガスとオゾン( $\text{O}_3$ )ガスが反応して励起状態の $\text{NO}_2$ が生成され、それが基底状態に戻るときに、放出される化学発光強度を測定することで $\text{NO}$ ガス濃度を知ることができます。この発光強度は $\text{NO}$ ガス濃度と比例関係にあり、赤色フィルタを使用することで、長波長域（波長：590 nm - 2500 nm）での $\text{NO}$ と $\text{O}_3$ の化学発光のみを選択的に測定することができます。

光電子増倍管はこの化学発光に合わせて近赤外まで感度のあるマルチアルカリ光電面が選択されます。また、 $\text{NO}$ 濃度によっては発光が微弱なことから、反応チャンバは50℃前後の高温になる一方、検出部の暗電流は直接、装置性能に影響するため、冷却器が広く採用されています。浜松ホトニクスは、それらを踏まえ直接冷却可能な小型光電子増倍管をラインナップしています。

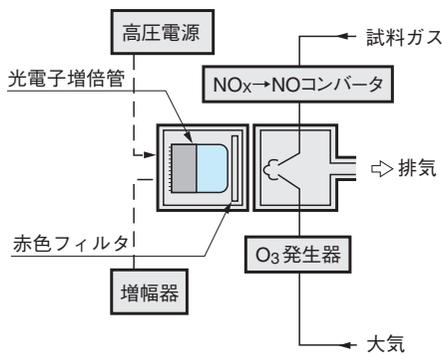


図 14-5 化学発光方式の構成例

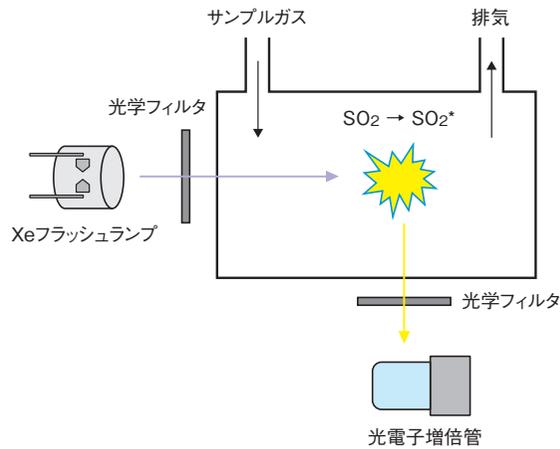


図 14-6 化学発光用光電子増倍管

THBV4\_1405JA

## (2) 硫黄酸化物(SO<sub>2</sub>)分析計

環境用硫黄酸化物分析計は大気中の二酸化硫黄濃度を測定するための装置で、紫外線蛍光方式が広く使用されています。この方式は大気中の二酸化硫黄(SO<sub>2</sub>)に紫外線を照射して励起状態のSO<sub>2</sub>を生じさせ、このSO<sub>2</sub>が発する蛍光の強度を測定して大気中の二酸化硫黄濃度を求めるものです。この方式の構成例を図14-7に示します。

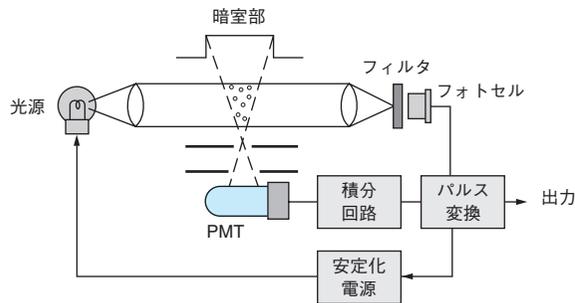


THBV4\_1407JA

図 14-7 紫外線蛍光方式 SO<sub>2</sub> 計の構成例

### (3) ダストカウンタ

ダストカウンタは、大気中や室内などに浮遊している粒子の濃度を測定する装置です。測定方法には、光の散乱、 $\beta$ 線の吸収などを用います<sup>3)</sup>。光の散乱を応用したものは、光の通るところに浮遊粒子があれば、光はその浮遊粒子に当たって散乱します。散乱光は浮遊粒子が多いほど強くなり、浮遊粒子の量に比例します。そこで、この散乱光を光電子増倍管で受光し、その信号を積分した後パルス信号に変換し、その出力を粒子濃度に対応させるのです。この方法は、濃度変化にすぐに追従できるので、連続動作させ経時変化をみるような場合に適しています。



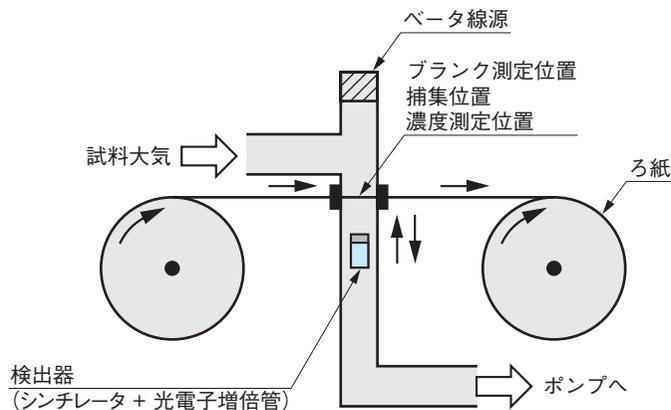
THBV4\_1408JA

図 14-8 光散乱方式によるダストカウンタの構造

しかし、粒子濃度が一定でも、粒子の大きさ、屈折率などで散乱光の量が変わってしまう欠点もあります。 $\beta$ 線の吸収を応用したものは、 $\beta$ 線が、物質を透過するとき、物質の質量に比例して吸収されることを応用して、ろ紙に浮遊粒子を付着させ、浮遊粒子質量を求めます。検出器にはシンチレータと光電子増倍管が使われます。

大気汚染の指標で使われるPM2.5もこの $\beta$ 線の吸収を利用した定量法が一部採用されています。

\*測定原理は第7章シンチレーションカウンティング法参照



ブランク測定位置→吸引→濃度測定→ろ紙移動

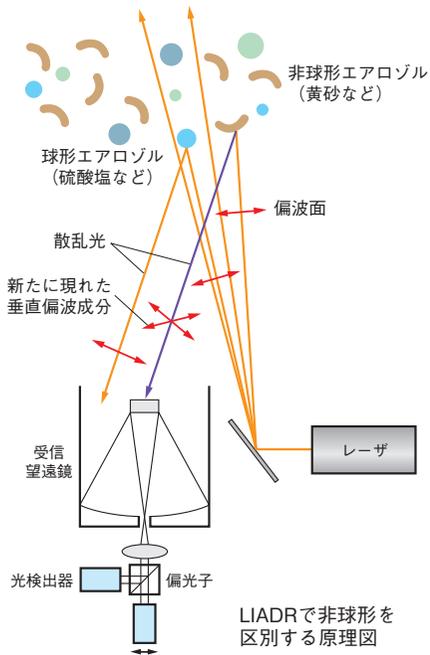
図 14-9  $\beta$ 線吸収方式の構成例<sup>4)</sup>

THBV4\_1409JA

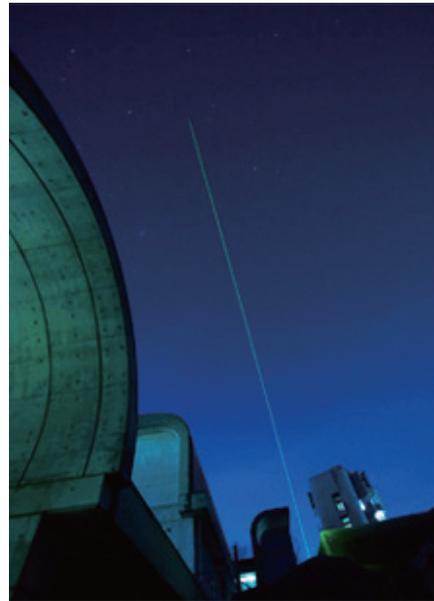
#### (4) レーザレーダ (LIDAR)<sup>5)</sup>

レーザレーダはLIDAR : LIght Detection And Rangingとも呼ばれ、パルスレーザ光を空間へ送出し、大気中の浮遊物（大気分子、エアロゾル、雲など）や飛翔体などからの散乱体からの後方散乱光を受光し、散乱体までの距離やその濃度、形状、速度などの情報を得る原理および装置です。レーザ送光部と受光部は同一場所に置かれ、レーザ送出方向を掃引することにより、3次元空間分布を得ることができます。検出器で電気信号に変換された信号はAD変換され、コンピュータにより処理されます。

空間分布解像度向上には検出器の応答速度が重要で、特に高速性が要求される場合にはMCP-PMTなどの高速な検出器が採用される場合もあります。



THBV4\_1410JA



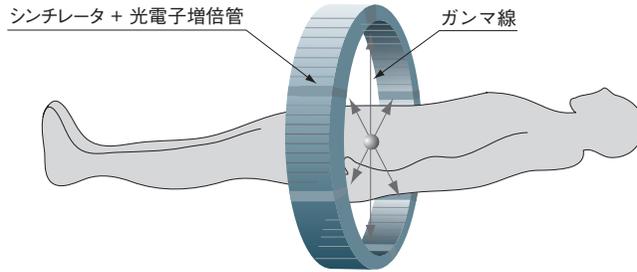
LIADRによる観測の写真<sup>7)</sup>

図 14-10 大気観測用 LIDAR の構成図<sup>6)</sup>

## 14.3 医用装置

### 14.3.1 PET (Positron Emission Tomography) / CT (Computed Tomography)

光電子増倍管を用いた核医学診断装置として、後述のガンマカメラやSPECTに加え、PET (Positron Emission Tomography)があります。ここではPETについて具体例をあげて説明します。図14-11にPET装置の概念図、図14-12にPET装置の外観を示します。



THBV4\_1411JA

図 14-11 PET 装置の概念図



図 14-12 浜松ホトニクス製 PET 装置 SHR-74000 外観 (参考例)

陽電子放出RI (Radioactive Isotope)の放出した陽電子が電子と結合して消滅するときに反対方向に放出される2つの511 keVの $\gamma$ 線を同時計測するPET装置は、陽電子 (ポジトロン) を放出するアイソトープで標識された薬剤を生体内に投与して、病変や腫瘍の早期診断、体内動態を断層イメージとして得ることができる装置です。PET計測で使用される代表的な陽電子放出核種には、 $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ 、 $^{18}\text{F}$ があります。

体内で放出された陽電子は周囲の組織中の電子と結合して消滅する際に、 $180^\circ$ の反対方向に2個のガンマ線を放出するので、体外にリング状に配列された検出器で同時計数法により測定します。得られたデータを角度毎に整理した後、X線CTなどで用いられているのと同様な画像再構成法により断層イメージをつくります。

PETの特長は、生体における代謝や血流、神経伝達といった生理学的・生化学的情報を定量計測できることで、臨床現場において癌の診断・早期発見や認知症などの脳疾患の診断に威力を発揮しています。現在は臨床診断への利用が活発化しています。また、癌等の位置の正確な判定、ガンマ線の患者体内の吸収補正のためにX線CTと組み合わせたPET/CTが広く普及しています。

PETの検出器には、光電子増倍管がシンチレータと組み合わせられて使用されます。体内から放出される高エネルギー（511 keV）のガンマ線を効率良く検出するため、シンチレータにはBGOやLSOなどの高いガンマ線阻止能をもった結晶が用いられます。最近では、ポジトロン消滅により発生するガンマ線対の飛行時間差を測定して得られる消滅位置情報を利用したTOF (Time of Flight) PETも実用化されています。

TOF PETには、高速の光電子増倍管と蛍光消衰時間の短いシンチレータ（LSOやLYSO）が用いられており、TOF情報を利用することでPET画像の画質の向上に貢献しています。また、投与する放射能濃度を低減することが可能となり、被験者の被曝の低減や検査時間の短縮にも有効です。

また、動物用PETの用途としては、人体では実施が困難な研究のための動物実験のほか、薬剤の開発、一般医薬品の薬理効果の判定等に利用されています。対象動物としては、マウス、ラットなどの小型動物からサルなどの大型動物が用いられています。

一般的に動物の臓器は小さいので、PETの特性として高解像度が要求され、SHR-38000の例では、LGSO（シンチレータ）と位置検出型光電子増倍管を組み合わせたシンチレーション検出器が採用されました。1本の光電子増倍管に648個のLGSOを組み合わせるため、1台の装置に合計60本の光電子増倍管と38,880個のLGSOが使用されました。

SHR-38000では、有効視野 $\phi$  330 mm × 108 mm、中心解像力2.3 mmが得られました。

図14-13にSHR-38000のガントリー及び検出器モジュールの写真と検出部の概要を示します。

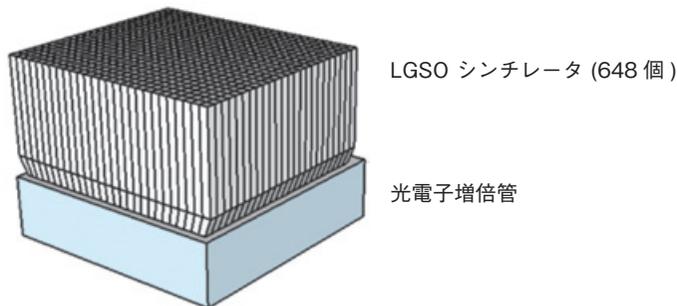


図14-13 浜松ホトニクス製 動物用PET SHR-38000 のガントリー部及び検出器モジュールの外観

図14-14にSHR-38000を用いて観察した脳(サル)の糖代謝活動の画像をMRI画像と共に示します。

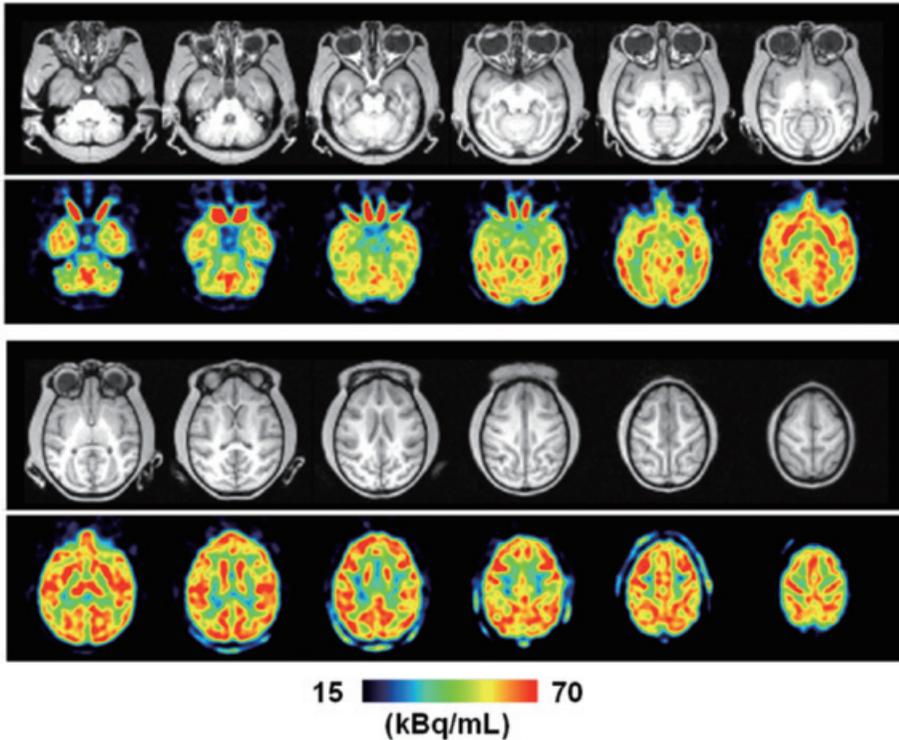


図14-14 脳(サル)の糖代謝活動の画像(下段)とMRI画像(上段)

### 14.3.2 プラナーイメーシング装置

位置検出型光電子増倍管とシンチレータアレイを結合させた放射線位置検出器を対向配置した構造で、ポジトロン放出核種を用いて2次元イメージングを行うのがプラナーイメーシング装置です。ポジトロン放出核種を含むトレーサの2次元イメージ及びその時間的変化を計測することができます。植物、小動物等を生きたままの状態で、その体内の物質の動きを二次元画像として、リアルタイムに近い状態での計測が可能です。また、ポジトロン放出核種である $^{11}\text{C}$ 、 $^{13}\text{N}$ 、 $^{15}\text{O}$ などは生体主要構成元素であり、かつ有機合成の基本物質であるため、多くの標識化合物の利用が可能となります( $^{11}\text{C}\text{O}_2$ 、 $^{11}\text{C}$ -メチオン... $^{15}\text{O}$ -水等)。半減期の短いポジトロン放出核種の $^{11}\text{C}$ (20分)、 $^{13}\text{N}$ (10分)、 $^{15}\text{O}$ (2分)などを用いた場合、同一個体を用いた繰り返し計測が可能のため、日周変化の計測や異なる複数条件での計測を、個体差による誤差を除き実施することが可能です。また、消滅ガンマ線(511 keV)を用いたイメージング手法を用いているため、計測体内部での自己吸収がほとんど無視でき、正確に植物、小動物体内での物質分布計測ができます。画像生成手法がシンプルのため、医療用PET装置と比べた場合、SN比及び空間分解能が良い画像を得ることができます。さらに対象が比較的扁平である場合、PET装置のような断層像でなく(疑似)投影像であるため、視覚的認知性の点で優れています。小動物を対象とした研究用途に用いられていますが、今後癌患者の陽電子治療モニタヘといった臨床応用が期待されています。図14-15にプラナーイメーシング装置の構成と外観を示します。

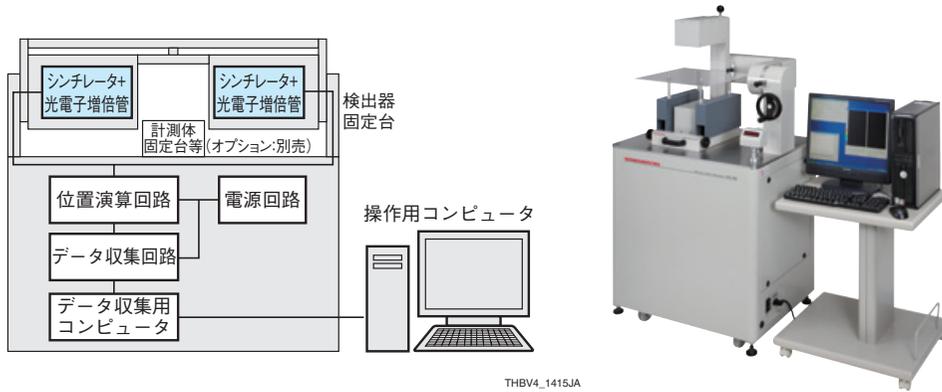


図 14-15 浜松ホトニクス製プラナーイメージング装置 PPIS-4800 の構成と外観

### 14.3.3 ガンマカメラ (Gamma Camera)

歴史的には、放射性同位元素 (RI) のイメージング装置として、シンチスキャナからはじまり、次第に改良され、Anger(米国)によって開発されたガンマカメラへと発展し、その後断層画像の撮像が可能なSPECT (Single Photon Emission Computed Tomography)が開発されました。また、最近ではSPECTとX線CTを組み合わせたSPECT/CTの普及も進んでいます。図14-16にSPECTカメラの外観を示します。検出器部分を患者の周囲を回転させデータ収集を行い画像再構成することで、断層画像が得られます。

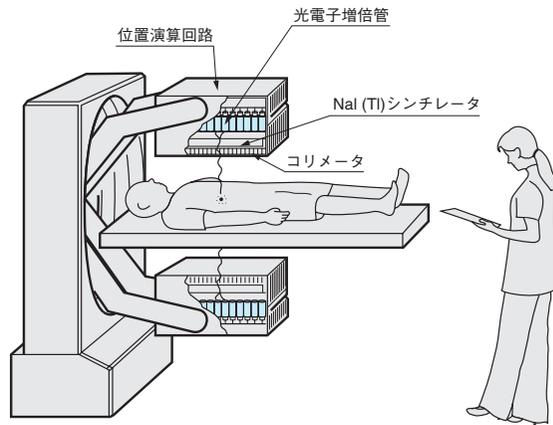
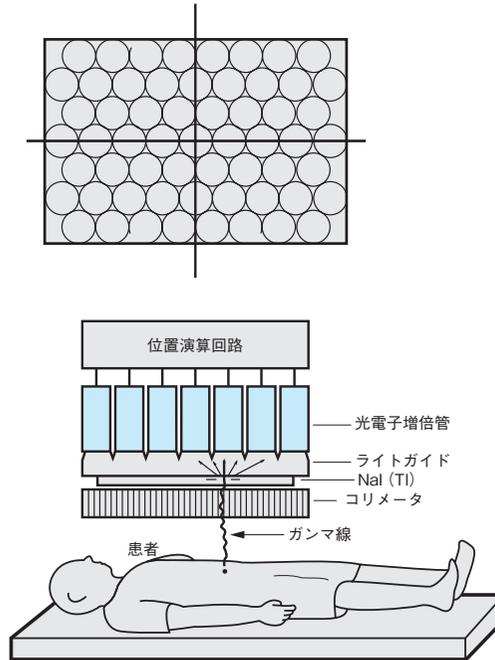


図 14-16 SPECT カメラの外観

THBV4\_1416JA

図14-17にガンマカメラの検出器の断面図を示します。ガンマカメラにおいて光電子増倍管は、大口径のヨウ化ナトリウム(NaI(Tl))シンチレータと組み合わせ、ガンマ線検出器として用いられています。



THBV4\_1417JA

図 14-17 ガンマカメラの検出器の断面図

医用診断に適した $\gamma$ 線核種医薬品が開発され、位置演算回路の改良による分解能の向上ということもあって、広く普及しています。表14-1に主要核種を示します。

核種	$\gamma$ 線エネルギー (keV)	半減期
$^{99m}\text{Tc}$	141( $\beta$ なし)	6.01 h
$^{133}\text{Xe}$	81( $\beta$ : 346)	5.243 d
$^{67}\text{Ga}$	93(37%), 185(20%), 300(17%)	78.3 h
$^{201}\text{Tl}$	70.8(Hg-X), 16.7(11%), 135(2.8%)	72.91 h
$^{131}\text{I}$	364(81%)( $\beta$ :606)	8.04 d
$^{123}\text{I}$	159(83%)	13.2 h
$^{81m}\text{Kr}$	190(67%)	13 s
$^{111}\text{In}$	245(94%), 171(90%)	2.83 d

( ) 内放出率

表 14-1 核医学画像診断に用いられる主要核種

### 14.3.4 X線画像診断装置

医療現場に多く導入されているX線画像診断装置は、以前はフィルムが用いられていましたが、現在ではその多くがフィルムレス化の流れによりイメージングプレート（輝尽性蛍光体）を用いたコンピューテッド・ラジオグラフィ (CR)装置や、シンチレータとTFTセンサを組み合わせたフラットパネルディテクタを用いたデジタル・ラジオグラフィ (DR)装置が主流となっています。

#### (1) コンピューテッド・ラジオグラフィ (CR)

X線画像診断装置には、輝尽性蛍光体という特殊な蛍光プレートを用いたものがあります。この蛍光プレートにX線画像を一時的に蓄積させた後、レーザ光でプレート上を走査（励起）することにより、蓄積されたX線量に対応した可視光を発生します。光電子増倍管はその微弱な可視光を電気信号に変換し、その後、各デジタル信号処理を経て画像を構成します。

従来からあるX線フィルム撮像に比べ、撮影時間の短縮や撮影ミスの削減、画像のデジタル化による画像処理・データ解析や高密度保管・簡易検索などが可能となることから、世界的に普及しています。

このCR装置は一般医療画像以外にも、歯科検査用や、産業用非破壊検査にも用いられています。

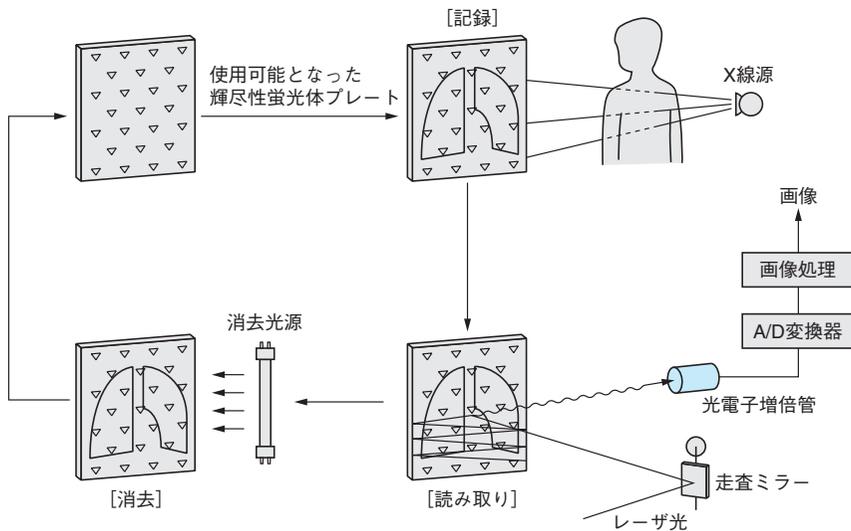


図 14-18 輝尽性蛍光体プレートによる X 線画像の取得

### 14.3.5 検体検査

血液や尿など生体から取り出したサンプルの成分を分析・検査することを検体検査といいます。検体検査は、健康状態の把握、病気の診断、原因の究明、治療薬の効果測定などを目的に使用され、現代医療にとって非常に重要なものとなっています。検体検査は表14-2のように分類されます。この中で免疫学的検査の対象となる腫瘍マーカー、ホルモン、薬剤、ウイルスなどは濃度が極めて低いものが多く、高感度な検査装置が必要となり、光電子増倍管が採用されています。

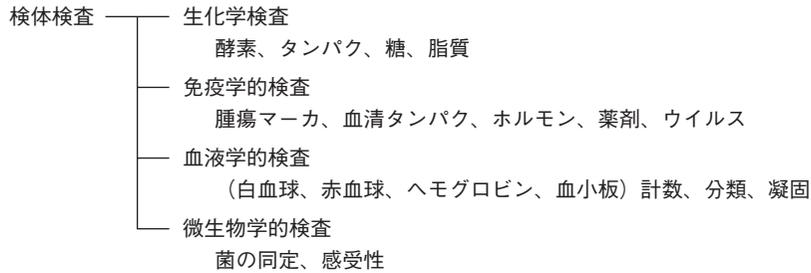


表 14-2 検体検査の分類

免疫学的検査では、抗原抗体反応の特異性を利用した測定法 (イムノアッセイ: Immunoassay) が多く用いられます。イムノアッセイの原理<sup>8)</sup>を図14-19に示します。

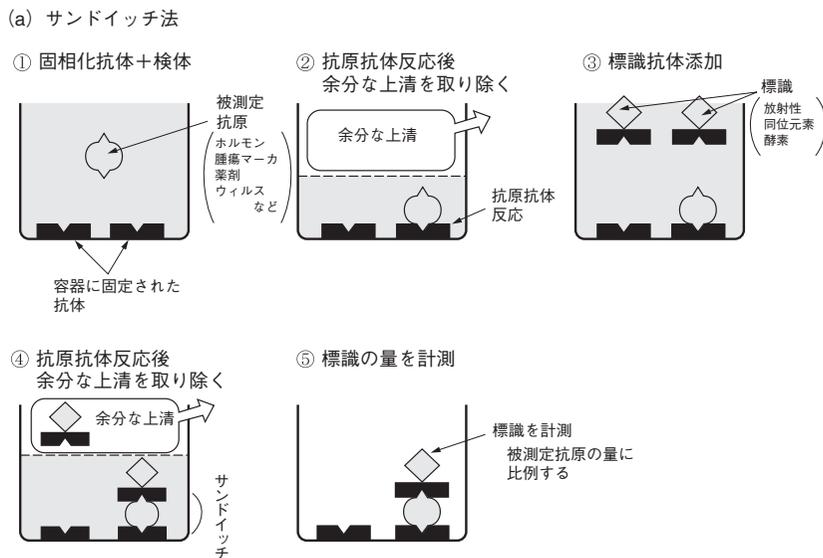
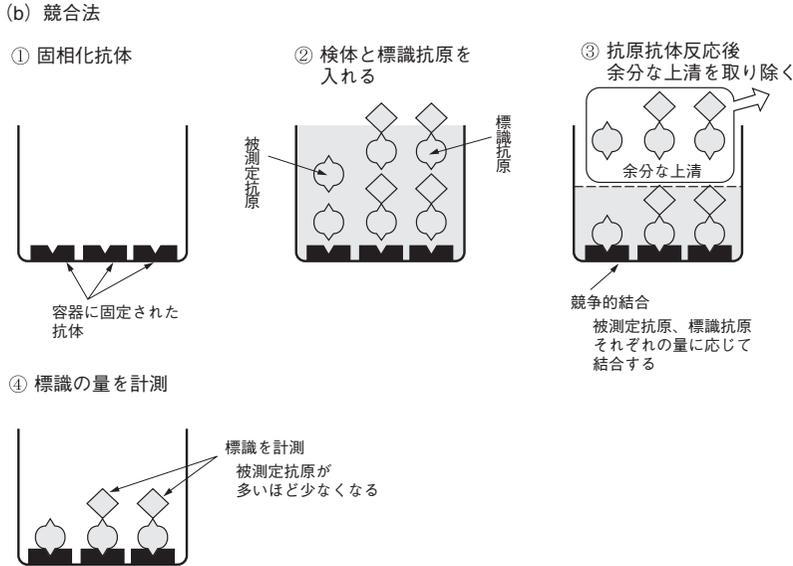


図 14-19(a) イムノアッセイの原理



THBV4\_1419JA

図 14-19(b) イムノアッセイの原理

図14-19(a)は、サンドイッチ法と呼ばれる方法です。

- ①被測定抗原(ホルモン、腫瘍マーカーなど)と対応する抗体が固定されている(固相化抗体)容器内に検体をいれます。
- ②抗原抗体反応が起こり、被測定抗原は固相化抗体と結合します。この反応は非常に特異性が高く、違う抗原が結合してしまうことはめったにありません。抗原抗体反応後、抗原と抗体が結合したものを残し、余分な上澄みを取り除きます。
- ③今度は何らかの標識をされた被測定抗原と結合する抗体(標識抗体)を加えます。
- ④再び抗原抗体反応を起こし、被測定抗原をサンドイッチするように結合します。また、余分な上澄みを取り除きます。
- ⑤標識の量を、光学的方法(蛍光など)を用いて光電子増倍管で測定します。

図14-19(b)は競合法と呼ばれる方法です。

- ①測定抗原と結合する抗体が固定されている容器を用意します。
- ②測定抗原と同じ抗原に何らかの標識をつけたもの(標識抗原)と一緒に検体を加えます。
- ③抗原抗体反応の特長の一つである競合的結合が起こり、含まれる被測定抗原と標識抗原の量に応じて抗体と結合し、平衡状態となります。抗原抗体反応後、余分な上澄みを取り除きます。
- ④標識の量を、光学的方法を用いて光電子増倍管で測定します。

サンドイッチ法では、被測定抗原が多いほど多くの標識が残りますが、競合法では、逆に被測定抗原が多いと残る標識の数は減ります。

ここに用いられる標識に何を使用するかによって手法が分類されています。

- ①標識に放射性同位元素を用いる・・・R.I.A. (Radioimmunoassay)
- ②標識に酵素を用いる・・・E.I.A. (Enzymeimmunoassay)
- ③標識に発光試薬を用いる・・・C.I.A. (Chemiluminescence immunoassay)

## (1) R.I.A. (Radioimmunoassay)

先に説明した標識として放射性同位元素 (RI) を使用し、試料に残ったその標識からの放射線 ( $\gamma$  線または  $\beta$  線) をシンチレータと光電子増倍管の組合せで測定し、被測定抗原の定量を行います。標識としてよく使用される放射性同位元素は、 $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{75}\text{Se}$ ,  $^{125}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$  などがあります(表14-3)<sup>9)</sup>。なかでも標識として多くの有益な特質がある  $^{125}\text{I}$  は、非常によく使用されています。 $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  以外は、 $\gamma$  線を放射するためシンチレータにはガンマ線の変換効率が高いヨウ化ナトリウム結晶を使用します。 $^3\text{H}$ ,  $^{14}\text{C}$  は、放出する放射線が  $\beta$  線であり、その量も非常に微弱であるため、液体シンチレーションカウンタで測定します。

ラジオアイソトープ	半減期	放射線種類	検出方法
$^3\text{H}$	12.26 y	$\beta$	液体シンチレーション法
$^{14}\text{C}$	5730 y	$\beta$	液体シンチレーション法
$^{57}\text{Co}$	270 d	$\gamma$	シンチレーション・クリスタル
$^{75}\text{Se}$	120.4 d	$\gamma$	シンチレーション・クリスタル
$^{125}\text{I}$	60 d	$\gamma$	シンチレーション・クリスタル
$^{131}\text{I}$	8 d	$\beta \cdot \gamma$	シンチレーション・クリスタル

表 14-3 ラジオイノムアッセイにおいて標識として利用されるラジオアイソトープ

放射性同位元素が放つ放射線の光への変換効率を上げるためヨウ化ナトリウムシンチレータに井戸型の穴が開いており、その穴に標識を含む抗原-抗体複合物が入った試験管が次々に自動挿入され、測定されていく自動ウェルシンチレーションカウンタも利用されています(図14-20)。シンチレータ部分を含む検出部は、外来放射線を遮断し、測定精度を上げるため鉛で覆われています。ただし、この手法は特異性が高く高感度ですが、放射性同位元素の取り扱いの制約により、一般的にはその他の検出手法に置き換わっています。

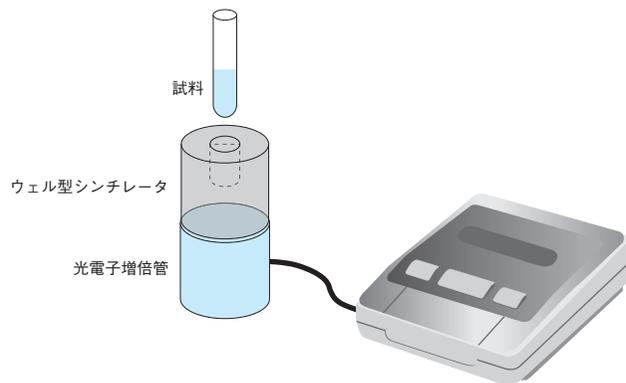
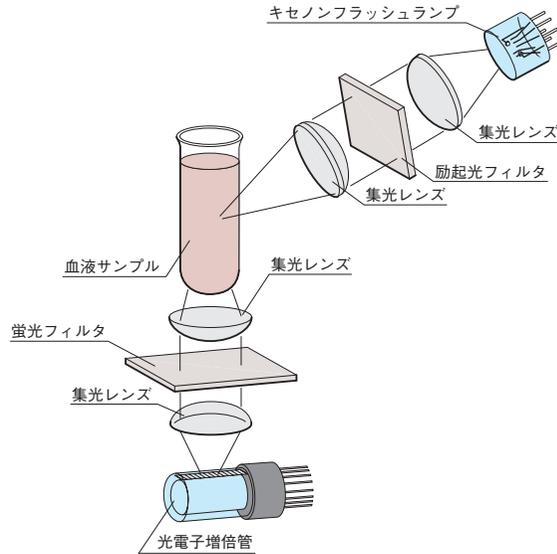


図 14-20 ウェルシンチレーションカウンタの構成例

THBV4\_1420JA

## (2) 蛍光免疫アッセイ

標識に蛍光物質を使用し、最後に残った抗原—抗体複合物に励起光を照射し、それによって起こる蛍光の強度や波長シフト、偏光度などを計測し、標識の量を知る方法です。図14-21に免疫反応測定装置の概要を示します。



THBV4\_1421JA

図 14-21 蛍光免疫反応測定装置の概略図

## (3) 化学発光免疫測定装置

化学発光免疫測定装置は、高感度、速い反応、広いダイナミックレンジ、検出用抗原が不要、ラジオイムノアッセイと比べ特別な設備が不要というメリットがあります。

抗体もしくは抗原に発光試薬が標識され、酵素を加えることで化学反応を起こし、その際発生する発光をフォトンカウンティング用光電子増倍管モジュールまたはフォトンカウンティングヘッドで検出します。

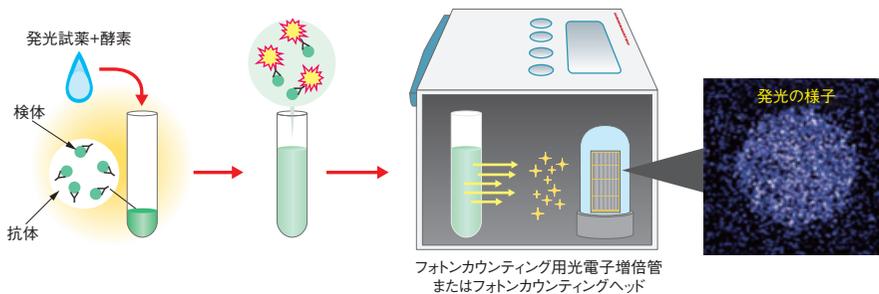


図 14-22 化学発光測定

THBV4\_1422JA

## 14.4 顕微鏡

### 14.4.1 概要

顕微鏡分野において光電子増倍管は、主に蛍光や散乱光検出に用いられています。その主なものに共焦点レーザ顕微鏡、2光子顕微鏡などがあります。

### 14.4.2 応用例

#### (1) 共焦点レーザ走査顕微鏡

レーザ光源から発せられるレーザビームを対物レンズで試料に焦点を結び、励起された試料からの蛍光を同じ対物レンズで集光します。集光された光は反射したレーザー光と蛍光の両方を含んでおり、ダイクロイックミラーと蛍光フィルタを通して蛍光成分のみを得ます。蛍光はピンホールを通り光電子増倍管で検出されます。ピンホールは背景光や焦点箇所以外からの蛍光など不要成分を遮断します。これら構造との組み合わせでノイズの少ない高解像度の画像が得られます。

レーザ光はガルバノスキャナなどによって試料を二次元に走査します。更に、ピエゾスキャナで高さ位置を可変することで三次元像を構築できます。

光電子増倍管はゲインを連続的に数桁可変することができますので、画像の明るさやコントラストの調整に優れています。これまで主として高感度サイドオン型光電子増倍管が一般的でしたが、近年は特に可視域で、光電変換効率の高いGaAsP光電面を有する光電子増倍管を内蔵した光電子増倍管モジュールやHPD (Hybrid Photo-detector)の採用が増えています。

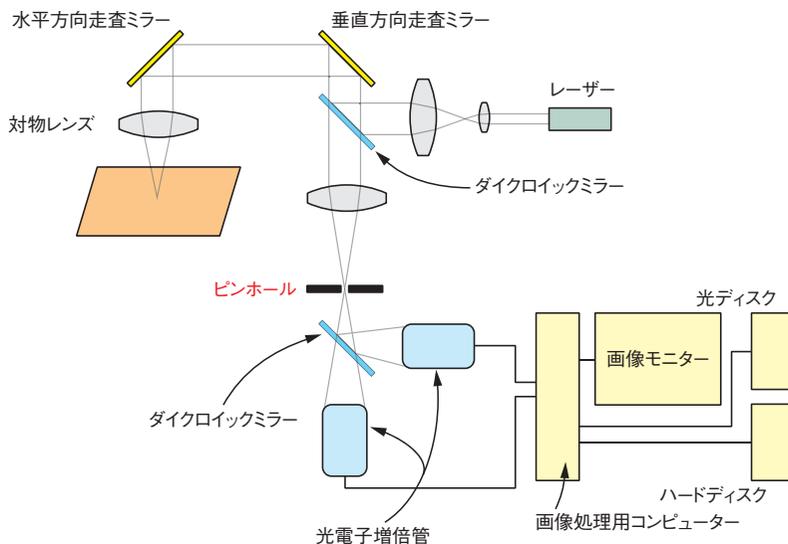


図 14-23 共焦点レーザ顕微鏡システム構成<sup>10)</sup>

## (2) 2光子顕微鏡

2つの光子が空間的・時間的にほぼ同時に蛍光分子に吸収されると半分のエネルギーすなわち2倍波長（近赤外光）での試料励起を可能とします。高出力のフェムト秒レーザー光源と高NAの対物レンズを用いて一点に集光させて光子密度を上げ励起光とし、その集光点から発せられる蛍光を光電子増倍管が検出します。その集光点を走査することで蛍光強度分布画像が得られます。

2光子顕微鏡は、近赤外光を用いるため生体内での光散乱の影響が少なく、試料深くまで観測できるのが特長です。光子密度の高い焦点領域のみ励起されるので、共焦点光学系が不要となり対物レンズの直近に光電子増倍管配置が可能となりました。深さ方向にも高い空間分解能が得られるため3次元像が取得できます。このような特徴から脳や心筋組織など生体組織深部の観察で利用されています。

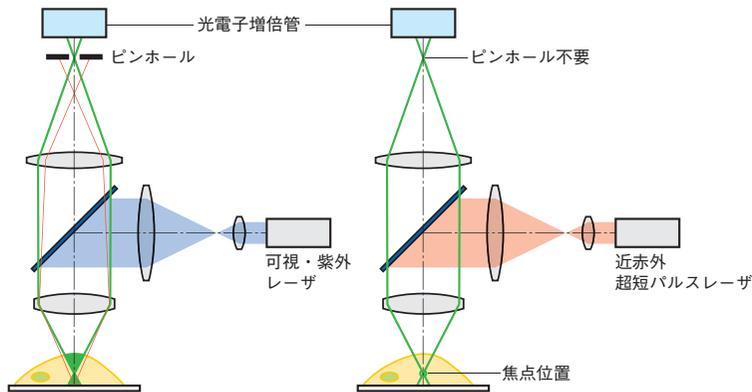


図 14-24 一光子励起（左）と二光子励起顕微鏡（右）の比較<sup>11)</sup>

THBV4\_1424JA

## (3) 蛍光相関分光法<sup>12)</sup>

蛍光相関分光法（FCS）は共焦点レーザー走査顕微鏡や2光子顕微鏡を用いて試料の微小領域を通過する分子の運動を解析します。蛍光標識された分子がレーザー光の焦点領域を通過した時に励起され蛍光を發します。分子からの蛍光は非常に微弱なため光電子増倍管を用いたフォトンカウンティング法で検出します。レーザー光の焦点領域を通過する分子の大きさや数の違いにより蛍光強度が変化します。蛍光強度の揺らぎは時系列のカウントデータで取得された後、自己相関法で解析し「分子の拡散速度」と「分子の数」、「一分子あたりの蛍光強度」を導きます。

さらに2種類の異なる蛍光色素を分子に標識し2つの蛍光チャンネルの相互相関を用いた蛍光相互相関法（FCCS）も行われています。自己相関法が分子の並進拡散時間の違いを見るのに対して、相互相関法は2つの蛍光信号の「同時性」すなわち分子間相互作用を直接解析することができます。

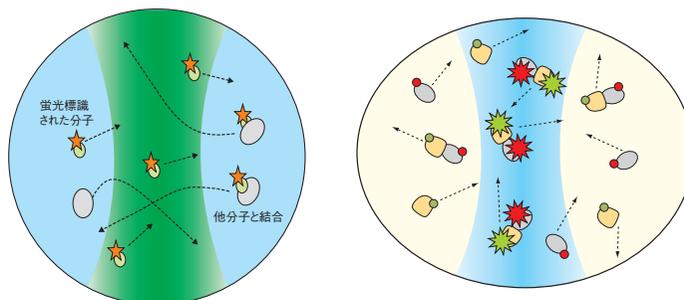


図 14-25 蛍光相関分光法の原理

THBV4\_1425JA

## 14.5 生命科学

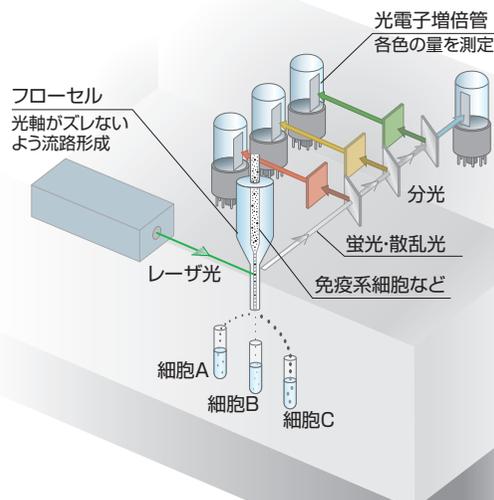
### 14.5.1 概要

生命科学分野において光電子増倍管は、主に蛍光や散乱光検出に用いられています。その主なものにフローサイトメータ、リアルタイムPCR・デジタルPCRなどがあります。

### 14.5.2 応用例

#### (1) フローサイトメータ

高速で流れる細胞や染色体の水溶液に光を照射し、細胞などから放射される蛍光と散乱光を解析し、細胞の性質や構造を解明する学問分野をフローサイトメトリと呼びます。この分野において、主に使用される代表的装置にフローサイトメータがあり、細胞学、免疫学、血液学などの研究用のほか血球分析装置などの検体検査(医療現場)にも一部採用されています。フローサイトメータには、混じり合った細胞の中から蛍光物質によって標識された特定の細胞のみを収集する機能を備えた細胞選別機(セルソータ)もあります。(図14-26)。



THBV4\_1426JA

図 14-26 フローサイトメータ (セルソータ) の主要部分

まず、蛍光プローブと呼ばれる目的に合致した蛍光物質を細胞などに付着させ、ばらばらにして懸濁液にし、細い管の中に流すと、細胞はある程度の間隔でこの管内を移動します。そこでレーザーが強く照射されている微小空間を通った時に発する蛍光量を光電子増倍管で計測します。光電子増倍管は、それぞれの細胞の蛍光分子の数に比例した電気信号を発生します。また、照射レーザーが細胞の通過によって、前方に散乱された光を検出し、細胞の体積に関する情報を得ます。これら2つの信号を処理し、望みの細胞を含んだ部分がちょうど液滴に形成されるときだけ、その液体の流れを帯電させるような電気パルスをつくり、液滴を帯電させます。この特定の帯電した液滴は、偏向電極間を通過するとき落下方向が変えられ、それぞれの容器に分離されます。

装置汎用性を高めるために、検出器には広いダイナミックレンジが求められ、ゲイン可変幅が広い光電子増倍管が採用されています。

## (2) リアルタイム PCR / デジタル PCR

DNA量を測ること（定量）は分子遺伝学、生理学などの研究のほか医療現場、食品検査などさまざまな場面で応用されるようになりました。その定量法のひとつにPCR法があります。

ポリメラーゼ連鎖反応(PCR)により特定DNAを増幅し、その増幅副産物を蛍光で検出・定量する手法です。①変性 ②アニーリング ③伸長のサイクルを複数回繰返し、複製DNA量とサイクル数をあらかじめ用意された検量線と比較し、初期DNA量を導き出します。

定量精度、汚染によるエラーなどの諸問題を改善したリアルタイムPCR法、また統計的な解析が可能なデジタルPCRという方法もあります。

長さの短い特異的配列のDNAの両端に、蛍光物質と蛍光抑制物質を組合せた蛍光標識プローブが使われます。増幅したいサンプルDNAに結合させておき、DNA伸長過程において、サンプルDNAから剥がれる際に蛍光物質と蛍光抑制物質の距離が変わることで、蛍光を発したり発しなかったりするように設計されています。

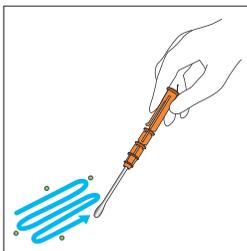
蛍光波長は試薬により異なり、検出器にはその波長範囲に対応できる幅広い分光感度特性をもつ光電子増倍管が採用されています。

### 衛生モニタ用ルミノメータ

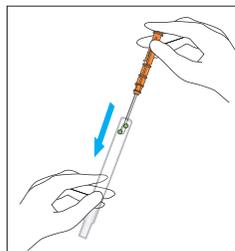
発光計測は、目に見えないレベルの有機的汚染や微生物の存在を検知することにも応用されています。すべての動物、植物、微生物などの生命体中に存在する化学物質：アデノシン三リン酸（ATP）は、ルシフェラーゼ及び酸素により発光する性質があります。これを生物発光と呼んでいます。この原理を利用して食品加工ライン・器具、厨房の器具、手などの汚れ度合いを調べるのが衛生モニタ用ルミノメータです。作業現場での測定を可能とするため可搬性が求められ、搭載検出器には小型、低消費電力のフォトンカウンティング用光電子増倍管モジュールが採用されます。

ATP検査は、生物学的汚染量が短時間で分かる優れた清浄度検査方法です。

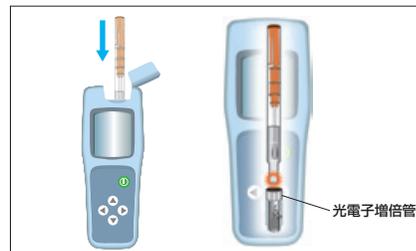
ATP（アデノシン三リン酸）は地球上の全ての生物エネルギー源として存在する化学物質で、微生物・体液・食物残渣などのよごれに必ずあります。



①検査箇所(ATPが存在)を拭き取る



②ATPと試薬が化学反応



③反応による化学発光を測定

THBV4\_1427JA

図 14-27 衛生モニタ用ルミノメータ

## 14.6 高エネルギー物理実験

### 14.6.1 概要

光電子増倍管の応用として高エネルギー物理実験用検出器があります。

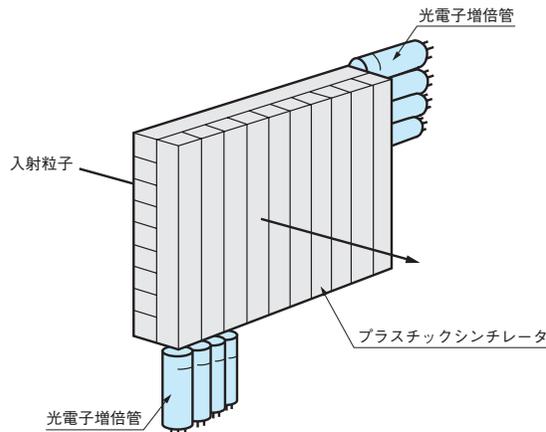
高いエネルギーを持った荷電粒子は、シンチレータなどを通過する際にそのエネルギーの大きさに応じた光を發します。その光を検出することにより荷電粒子のエネルギー、速度、方向を知ることができます。これらの検出技術は、常に新たな発見を目指す高エネルギー物理学の分野には欠かせないものとなっています。

### 14.6.2 衝突型実験装置

衝突型実験装置では、電子や陽子などの一次粒子を、加速器を用いて高いエネルギーに加速します。それらを正面衝突させて二次粒子を發生させ、それらの粒子のエネルギー、速度、運動量などを観察します。光電子増倍管を用いた粒子検出方法には、ホドスコープ、TOFカウンタ、カロリメータやチェレンコフカウンタなどがあります。

#### (1) ホドスコープ

図14-28はホドスコープの概略図<sup>13)</sup>です。図に示すように2層に直交して配列されたプラスチックシンチレータに荷電粒子が通過した時の位置と時間を測定するために光電子増倍管が使用されます。

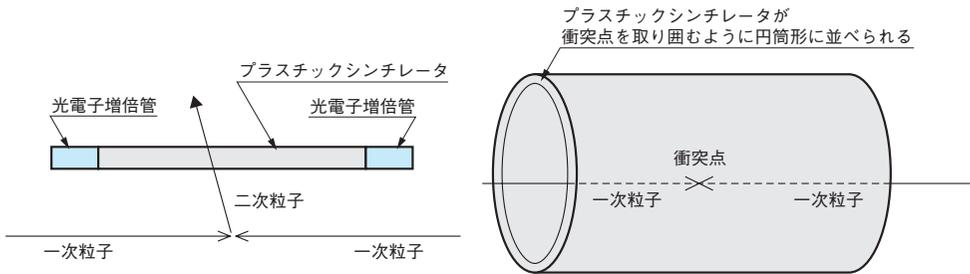


THBV4\_1428JA

図 14-28 ホドスコープの概略図

## (2) TOFカウンタ

TOFカウンタは粒子の飛行時間 (TOF: Time of Flight)を測定し、粒子を識別する検出器です。図14-29に概略図を示します。一次粒子が正面衝突することで二次粒子が生成されます。それら二次粒子が、TOFカウンタを通過するまでの時間を計測し、その粒子の速度を検出します。通常は細長いプラスチックシンチレータの両端に光電子増倍管を配置します。そのプラスチックシンチレータが衝突点を取り囲むように円筒形に並べられます。

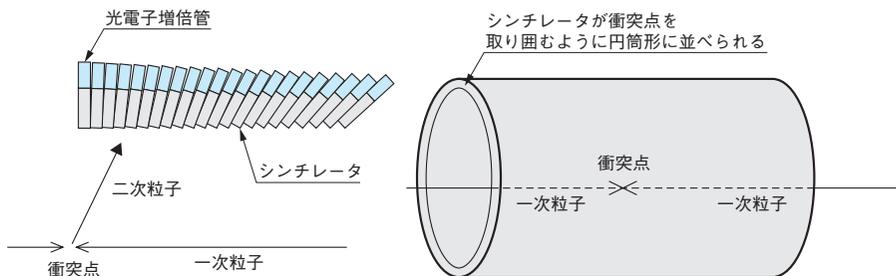


THBV4\_1429JA

図 14-29 TOF カウンタの構成及び全体図

## (3) カロリメータ

カロリメータは、電子、光子やハドロンなどの二次粒子のエネルギーを測定する装置です。構成を図14-30に示します。TOFカウンタと同様に、衝突点を取り囲むように設置されます。カロリメータでは粒子のエネルギーを物質中に放出させ、これを光や電荷量に変換して計測を行います。通常は無機シンチレータや鉛ガラスと光電子増倍管の組み合わせが使用されます。最近では無機シンチレータの代わりに、鉄や鉛などの重い金属とプラスチックシンチレータを何層も積み重ねた構造のサンプリングカロリメータも用いられています。



THBV4\_1430JA

図 14-30 カロリメータの構成及び全体図

#### (4) チェレンコフカウンタ

ある一定レベル以上の高いエネルギーや速度を持った荷電粒子が、ラジエータ（光透過性の良い物質）と呼ばれる物質に入射すると、チェレンコフ光を発生します。チェレンコフ光は一種のショックウェーブ（衝撃波）で、発生した光は進行方向にリング状に広がります。このリングの大きさや明るさから、粒子の種類やエネルギーを識別します。

図14-31にチェレンコフカウンタの一種であるRICH (Ring Image CHerenkov counter)<sup>14)</sup>の一例を示します。この例ではラジエータとしてエアロゲルを用いています。 $\pi$ 中間子やK中間子がラジエータに入射すると円錐状にチェレンコフ光が発生します。この光を設置された光検出器のアレイで検出し、得られたリングイメージの情報から粒子識別を行います。

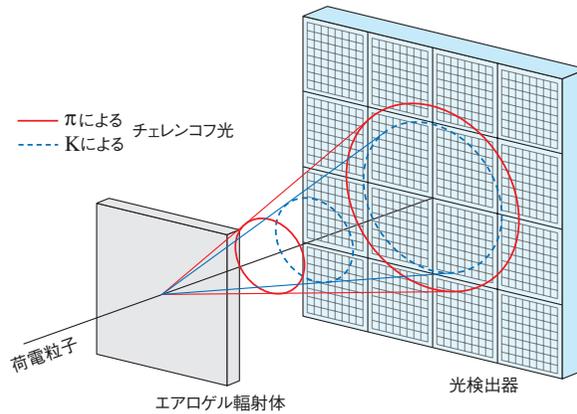


図 14-31 RICH の概要

### 14.6.3 陽子崩壊実験・ニュートリノ観測実験

#### カミオカンデ/スーパーカミオカンデ

カミオカンデ (KAMIOKANDE: KAMIOKA Nucleon Decay Experiment) は、岐阜県吉城郡神岡町 (現在の岐阜県飛騨市) の神岡鉱山の地中に設置された実験施設です。大水槽に世界最大サイズの50 cm(20インチ)径の光電子増倍管1050本を搭載した東京大学理学部の東京大学宇宙線研究所・高エネルギー物理学研究所による陽子崩壊観測を目的とした装置で1983年に稼働を開始しました。その後装置には改良が加えられ、陽子崩壊だけでなく、太陽ニュートリノの観測が行えるようになり、1987年には大マゼラン星雲の一角に現れた超新星1987Aからのニュートリノを世界で初めて観測しました。

その後、近年の大統一理論の主流が陽子の寿命を $10^{34}$ 年と予測していることを受け、カミオカンデの性能を10倍–100倍にスケールアップしたスーパーカミオカンデ実験が計画されました。これにはカミオカンデの約16倍にあたる50 000トンもの超純水で満たされた直径39.2 m、高さ41.4 mの巨大水槽に、改良を加え性能を向上させた50 cm(20インチ)径光電子増倍管11 200本が設置され1996年より観測が開始され、1998年には大気ニュートリノ振動 (ニュートリノに質量が有ること) を発見し、人工ニュートリノによるニュートリノ振動の精密検証が行われ、現在も観測を続けています。

1987年のニュートリノ観測により2002年ノーベル物理学賞を受賞した小柴昌俊東京大学特別栄誉教授が浜松ホトニクスに依頼して開発した、カミオカンデ用の20インチ径光電子増倍管が素粒子ニュートリノ観測に貢献したとして、2014年10月にIEEEマイルストーンに認定されました。また、ニュートリノが質量を持つことを示すニュートリノ振動の発見により、梶田隆章東京大学宇宙線研究所長が2015年ノーベル物理学賞を受賞されました。



図 14-32 IEEE マイルストーン銘板

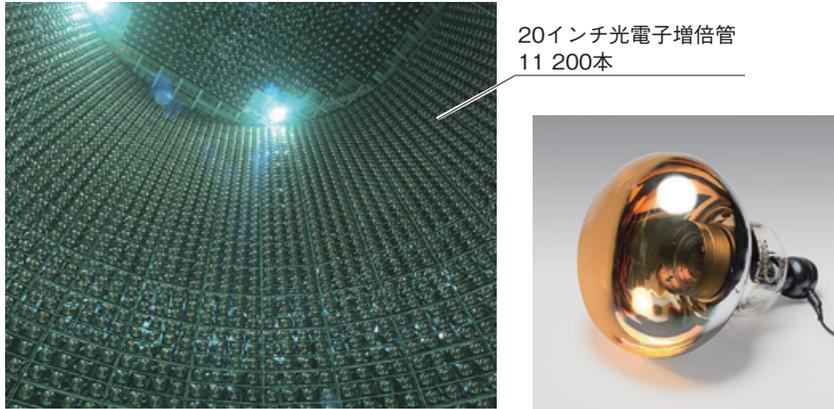


図 14-33 スーパーカミオカンデ内部と 20 インチ光電子増倍管

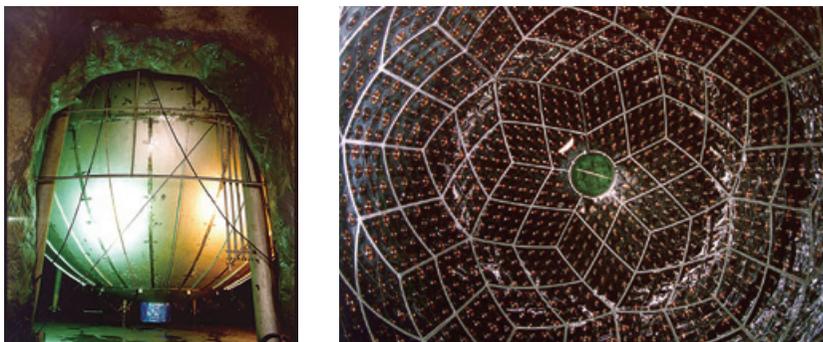
#### カムランド (KamLAND : KAmioka Liquid scintillator Anti-Neutrino Detector)

東北大学ニュートリノ科学研究センターのニュートリノ実験装置「カムランド」が、2002年1月から稼働しています。

カムランド実験装置は、カミオカンデ跡地を利用してさらに高精度のニュートリノ検出器として建設されました。純水の代わりに1000トンの液体シンチレータを使ってニュートリノを捕らえます。液体シンチレータ中でニュートリノによる反応が起きたときの発光は、カミオカンデのチェレンコフ光と比べて桁違いに強いため、さらに低エネルギーのニュートリノの検出を可能とします。この液体シンチレータは透明な特殊フィルムでできた直径約13メートルの丸い風船（バルーンと呼ばれている）の中に入っています。さらにこのバルーンは直径18メートル、体積約3000 m<sup>3</sup>のステンレス製球形タンクに入っています。

タンクの内壁は、スーパーカミオカンデ用を改良した50 cm(20インチ)径(有効面43 cm)光電子増倍管が約1900本使用され、さらにその球形タンク外側は純水のタンクで囲まれており、この部分にも50 cm(20インチ)径光電子増倍管が設置されています。カムランドでは、ニュートリノの反応による2回の発光の時間差と光が発生してから光電子増倍管に届くまでの時間の遅れを測定し、ニュートリノ反応がバルーン内のどこで発生したかを知ることができます。

2002年、原子力発電所からのニュートリノに振動があることを発表し、太陽ニュートリノの謎はニュートリノ振動によるものと決定づけられました。日本はニュートリノ研究で世界をリードしていますが、このような優れた実験装置があることがその理由のひとつといえます。



ステンレス製球形タンク

球形タンクの内壁に取り付けられた光電子増倍管

図 14-34 カムランド<sup>15)</sup>

### 14.6.4 ガンマ線望遠鏡

ガンマ線望遠鏡は、超新星、中性子星、ブラックホールなどの高いエネルギーもつ天体から放出されるガンマ線のエネルギーや方向を観測するために用いられます。

人口衛星に検出器を搭載してガンマ線を直接観測する方式や、ガンマ線と地球大気の相互作用により発生する大気チェレンコフ光を観測する方式があります。

CTA (Cherenkove Telescope Array)<sup>16)</sup>は、大気チェレンコフ光を観測する望遠鏡で、光電子増倍管を一面に配置したカメラが地上に設置され、1クラスターあたり光電子増倍管7本で構成される光検出器モジュールが採用されます。

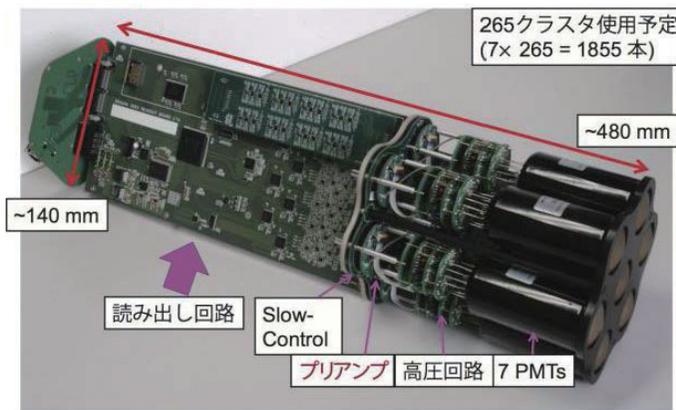
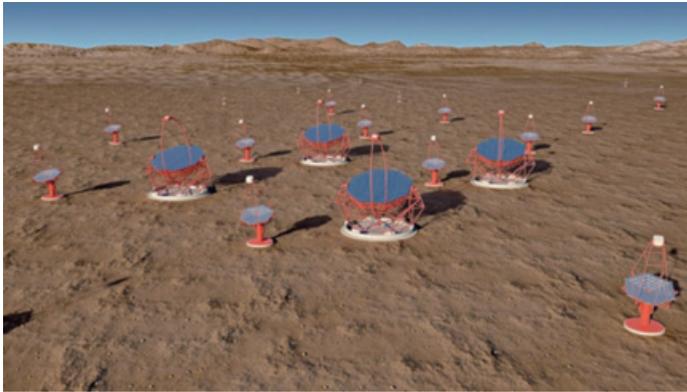


図 14-35 CTA (Cherenkove Telescope Array)

### 14.6.5 ダークマター実験

近年、ダークマターと呼ばれる、これまで観測されていない宇宙を構成する未知の物質の研究が高エネルギー物理学で注目されています。

ダークマターが液体キセノン (Xenon:  $-108\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) や液体アルゴン (Argon:  $-186\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) の原子とまれに衝突し、その際にシンチレーション光として紫外線を放出します。それを光電子増倍管で検出します。ダークマターによる相互作用の発生頻度は非常に稀なため、光電子増倍管に含まれる放射線レベルを極限まで下げ、放射線バックグラウンドを減らすことが必要となります。また低温中に光電子増倍管を設置すると、光電面の抵抗値が増加し、光電面電流が飽和状態になってしまうため、低温化でも飽和しない低抵抗の光電面が必要となります。

岐阜県飛騨市神岡町には、このダークマター観測用に1トンの液体キセノンを満たしたXMASS検出器が設置され、XMASS実験用に開発された低放射線レベル、低抵抗の光電面を有する光電子増倍管が採用されています。

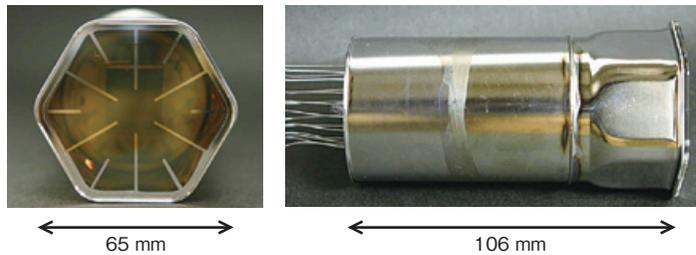


図 14-36 XMASS 実験用光電子増倍管<sup>17)</sup>

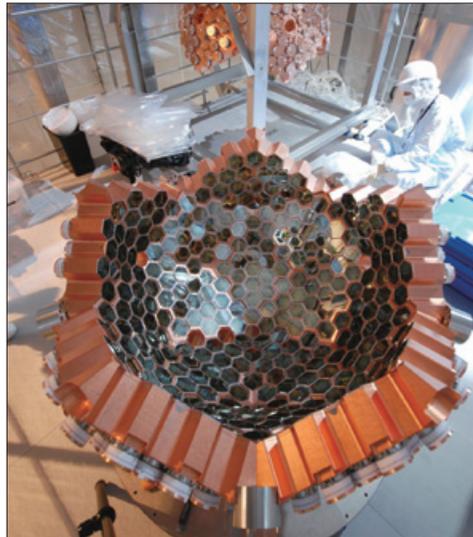
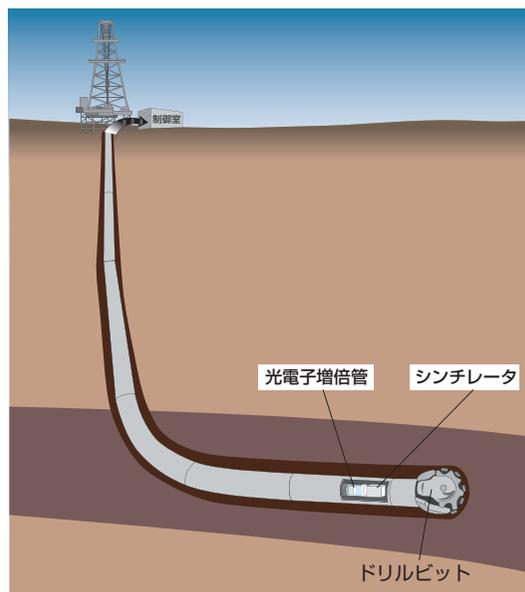


図 14-37 XMASS 検出器<sup>17)</sup>

## 14.7 石油探層

特殊な環境で使用できる光電子増倍管として、耐高温性、耐振動性を高めたものが開発されています。ここでは、これらの光電子増倍管の応用例として石油探査(Oil Well Logging)について説明します。

油田の位置、規模を知る方法として石油井検層という方法が用いられますが、その中で放射線を利用した密度検層、中性子検層、自然ガンマ線スペクトル検層などの検出器として光電子増倍管が利用されています。これらの検層は試掘された坑井に放射線源およびシンチレーションカウンタを内蔵したプローブを降ろし、地層からの散乱線あるいは自然放射能を検出、解析することにより地層の種類、密度などを知るWirelineと呼ばれる手法が広く用いられてきましたが、より複雑な地層や非在来型の油井、ガス田の探査にはより高度な探査システムが要求されます。掘削ドリルの近傍に各種センサを装備し、リアルタイムに方位、傾斜等の物理パラメータを測定するMWD (Measuring While Drilling) と呼ばれる技術が開発され、それに光電子増倍管を含む検層用センサを装備することで、地層情報を計測/解析しながら掘削・検層を進めるLWD (Logging While Drilling)と呼ばれる手法が開発され普及してきています。図14-38に放射線検層の測定方式と地層の断面図を表しています。



THEV4\_1438JA

図 14-38 石油探層

一般的に試掘抗の深さは数千mにもおよび周囲温度は150℃～200℃にもなります。さらに衝撃や振動も加わり使用環境は光電子増倍管にとって非常に厳しいものになります。このような使用環境においても十分性能を発揮できる高温用光電子増倍管と呼ばれる製品が開発されています。これらの光電子増倍管は高温中でも暗電流の増加の少ない特別な光電面を有し、電子増倍部には高温に耐える材料を用い、また、電極構造は熱膨張や振動を考慮した設計がされています。

また、このような高温振動下で動作される光電子増倍管を駆動させるため専用の高圧電源も製品化されています。

## 14.8 放射線監視装置

### 14.8.1 概要

従来は主に原子力発電所や原子力研究機関における放射線監視に使われていましたが、近年核物質の流失が懸念されており、国境や港、空港などでそのような核物質の検査、検出が重要視されています。光電子増倍管は、そのような核物質から放出される各種放射線にあったシンチレータとの組み合わせにより、さまざまな検査装置、監視装置に使われています。

### 14.8.2 応用例

#### (1) 携帯型放射線モニタ (Pager)

携帯型放射線モニタは、税関、沿岸・国境警備等において放射性物質の密輸を監視する目的で使用されています。シンチレータと光電子増倍管を組み合わせた検出器により放射線検出を行います。携帯型であるため光電子増倍管は、小型のメタルパッケージ型が多く使用されています。携帯型放射線モニタの構成図及び写真<sup>18)</sup>を図14-39に示します。

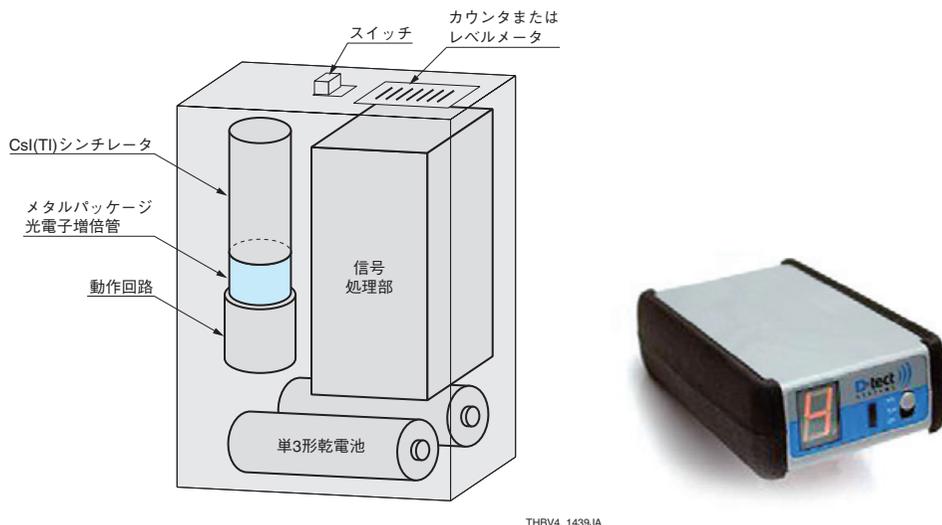
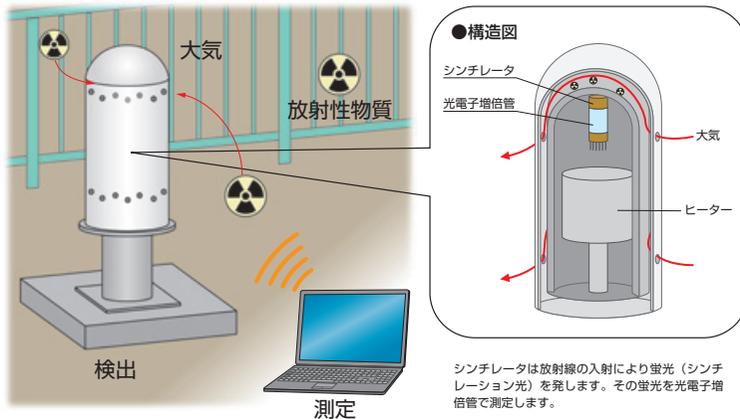


図 14-39 携帯型放射線モニタ構成図

## (2) モニタリングポスト

モニタリングポストは、原子力発電所の敷地内や周辺に設置され、空間放射線量を継続的に測定、監視するための装置です。

検出器としては、シンチレータと光電子増倍管を組み合わせたものや、電離箱検出器が用いられます。空間放射線を平常時から継続してモニタすることで、原子力発電所からの放射能漏れや、原子力災害発生時の住民非難対策などに活用されます。



THBV4\_1440JA

図 14-40 モニタリングポスト構成図

## (3) 光刺激ルミネッセンス（Optically Stimulated Luminescence : OSL）線量計

放射線医療現場、原子力発電所などの核施設、放射線を発生する加速器実験施設などでは、個人被曝量をモニタするために、特定の波長で刺激すると被曝量に比例したエネルギーを蓄積する小型のOSL素子を身につけます。この素子は成型加工したフッ化リチウム、硫酸カルシウムや酸化アルミニウムなどが用いられます。この素子に放射線が入射し相互作用を起こすことで結晶内で電離が起こり、発生した自由電子や正孔が結晶内の不純物によりトラップされます。

このトラップされた自由電子や正孔は、結晶をLEDやレーザーなどの光励起により自由となり基底順位に落ちる際に光を放出します。放出される光の量は素子に蓄積された放射線に比例するため、この光の量を光電子増倍管で測定することで被曝量をモニタします。

従来は素子を加熱した際の発光を捉える熱ルミネッセンス線量計（Thermoluminescent Dosimeter : TLD）が一般的でしたが、後発の光刺激ルミネッセンス線量計は複数回の測定ができ、加熱処理が不要、耐久性が良いなど、熱ルミネッセンス線量計にない特徴があり、普及してきています。

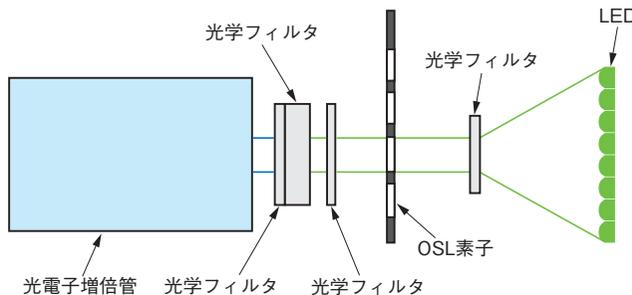


図 14-41 OSL 測定部の構造<sup>19)</sup>

THBV4\_1441JA

## 14.9 工業計測への応用

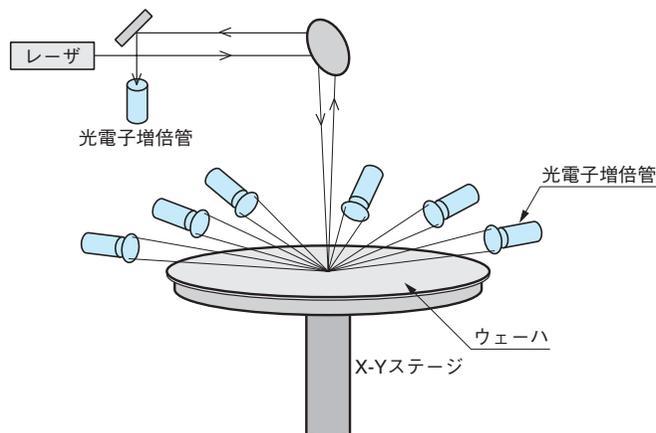
### 14.9.1 概要

製造ラインにおける製品の非接触計測や、高精度、高品質を要求される用途に、厚さ計、レーザスキャナなどが使われており、それらの装置の光検出器として光電子増倍管が多く使用されています。

### 14.9.2 応用例

#### (1) 半導体ウェーハ検査装置

半導体ウェーハの検査装置では、ポリゴンミラーなどでレーザ光をスキャンするものとウェーハ自体をスキャンするものがあり、ゴミ、汚れ、欠陥などによる散乱光を光電子増倍管で検出します(図14-42)。



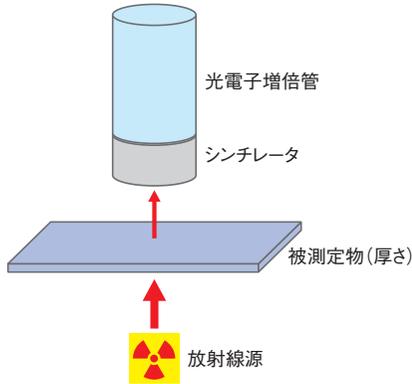
THBV4\_1442JA

図 14-42 半導体ウェーハ検査装置の光学系の構造図

#### (2) 厚さ計

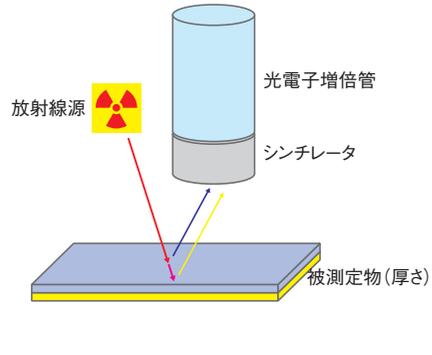
紙、プラスチック、銅板などの製造ラインにおける厚さ計測用として $\beta$ 線、X線、 $\gamma$ 線などの放射線を用いて非接触計測が行われています。

これには大きく分けて2種類あり、 $\beta$ 線、 $\gamma$ 線の透過量を測定する方法(図14-43)と、蛍光X線量を測定する方法(図14-44)があります。



THBV4\_1443JA

図 14-43 透過型厚さ計の原理図



THBV4\_1444JA

図 14-44 蛍光 X 線厚さ計の原理図

強度 $I_0$ の入射放射線に対する透過放射線強度 $I$ は、以下の式のように関係づけられています。

$$I = I_0 e^{-(\mu \rho t)}$$

厚さ :  $t$  (m)  
 密度 :  $\rho$  ( $\text{g}/\text{m}^3$ )  
 質量吸収係数:  $\mu$  ( $\text{m}^2/\text{g}$ )

これは計数率に比例することから計数率の変化で厚み $t$ が算出されます。面密度(厚さ×密度)が小さいゴム、プラスチック、紙などには $\beta$ 線、銅板などの面密度が大きい場合には $\gamma$ 線が主に用いられます。フィルム、プラスチックなどの測定では赤外線を使用する方法もあります。

またメッキ、蒸着膜などの膜厚測定には蛍光X線による方法が使われます。蛍光X線とは、物質に放射線を当てた時の励起によって発生する物質特有のエネルギーを持ったX線で、これをエネルギー弁別することで目的の物質を定量的に測定できます。

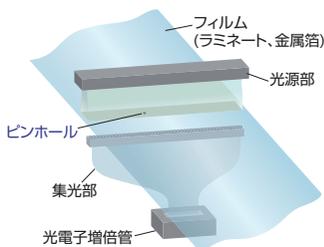
これらの測定には検出器として比例計数管、光電子増倍管、半導体放射線検出器などが用いられ、光電子増倍管はシンチレータと組み合わせて、主に $\gamma$ 線、X線の検出に使われます。

### (3) ピンホール検査

工業用途に用いられる生産部材のピンホール検査には目視、カメラ、エアリーク、電流検知などの方式がありますが、電池の外装材用アルミラミネートフィルムなど付加価値の高い部材や、飲料缶などの品質管理が求められる製品のピンホールの検出には、ワークの透過光を検出する光学式のピンホール検査が行われています。

フィルムのピンホール検査では、数十 $\mu\text{m}$ 程度のピンホール検出の検出にはフォトダイオードなどの固体素子が使われますが、数 $\mu\text{m}$ 程度の微小ピンホールを検出する場合には光電子増倍管が使われます。

光電子増倍管を用いたフィルム用ピンホール検査ユニットの構成図及び写真を図14-45に示します。



THBV4\_1445JA

図 14-45 フィルム用ピンホール検査ユニット構造図



## 14.10 固体表面分析

固体表面分析は、試料に電子線やX線を照射し、入射した電子と試料を構成する原子との相互作用により発生する光電子、二次電子、反射電子、透過電子、オージェ電子、X線などから、試料の表面状態を分析する分析方法です。検出器としては光電子増倍管やマイクロチャンネルプレートが用いられています。

### 14.10.1 固体表面分析装置<sup>20)</sup>

固体表面分析装置は、試料に電子を照射する物と、X線を照射する物の2種類に大別されます。現在、実用的に用いられている固体表面分析装置は、以下の4種類です。

元素分析機能付き走査電子顕微鏡 (SEM) 系分析装置

オージェ電子分光装置(AES)

光電子分光装置 (XPS)

蛍光X線分析装置 (XRF)

これらの4種類で、最も多く用いられている走査電子顕微鏡 (SEM) の構成例<sup>21)</sup>を、図14-46に示します。

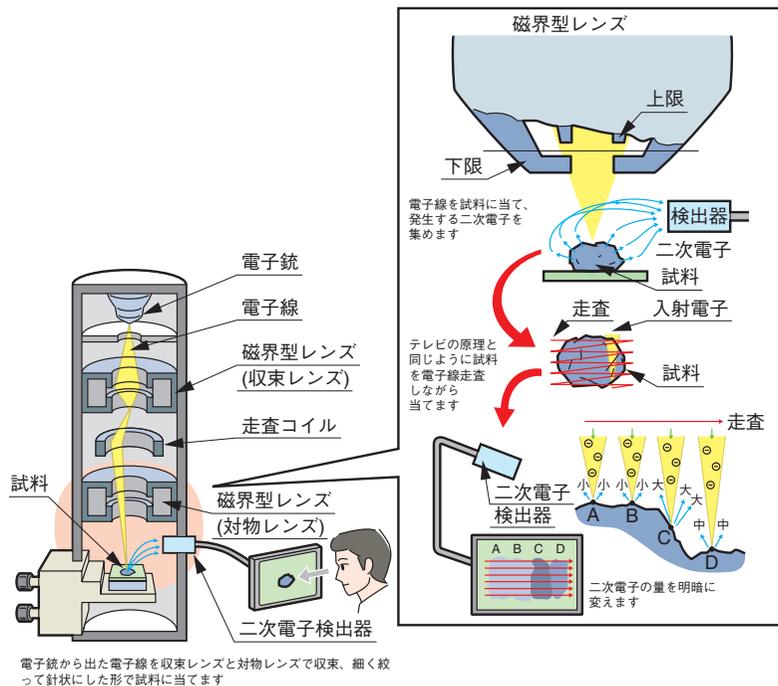
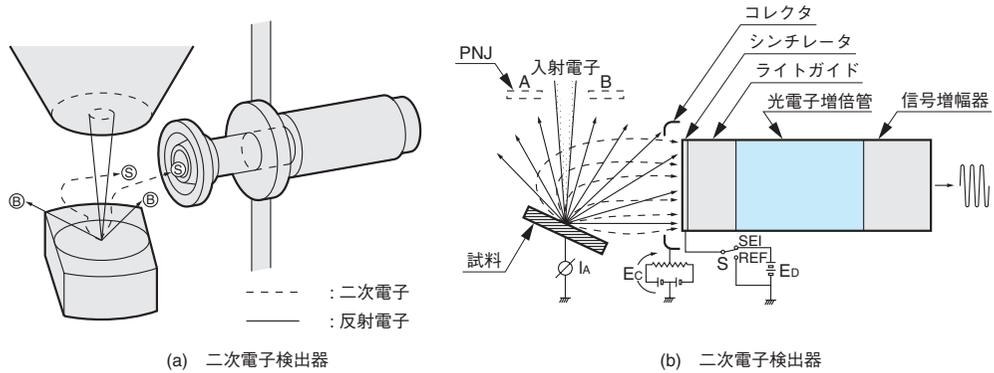


図 14-46 走査型電子顕微鏡のしくみ

電子銃より放出された電子は、0.1 kV ~ 30 kV程度に加速されます。加速された電子は、集束レンズ、対物レンズの電磁レンズ作用により、最終的に3 nm ~ 100 nm径まで細かく絞られた電子線となり、試料表面に照射されます。電子が照射された試料表面からは二次電子が発生し、それを二次電子検出器により検出します。電子線は、電磁レンズによって走査することにより、試料表面上のXとYの二次元方向に、あらかじめ設定された面積を走査できるため、二次電子検出器の信号と同期することにより、画面上に二次電子画像を拡大表示することができます。

試料から発生した二次電子を検出する、二次電子検出器の構造例を、図14-47に示します。



THBV4\_1447JA

図 14-47 二次電子検出器の構造例

二次電子検出器は、コレクタ電極、シンチレータ、ライトガイド、光電子増倍管、信号増幅器で構成されています。コレクタ電極とシンチレータには、電子を加速してシンチレータを効率よく発光させる目的で、電圧が供給されています。試料から発生した二次電子は、そのほとんどがシンチレータに入射し、可視光に変換されます。変換された可視光は、ライトガイドを通り、光電子増倍管で検出されます。

## 第14章 参考文献

- 1) 日本分析機器工業会：分析の原理 01 電磁波で見える世界
- 2) 日本分析機器工業会：分析機器の手引き. 第3版, 179(1986)
- 3) 日本分析機器工業会：分析機器の手引き. 第3版, 228(1986)
- 4) 日本分析機器工業会：分析機器の手引き. 第22版, 180(2016)
- 5) 竹内延夫他:レーザーレーダ、レーザーハンドブック (レーザー単会編) 第27章、オーム社(1982)
- 6) 環境省：黄砂飛来情報
- 7) 国立環境研究所提供
- 8) 遠藤雄一, 宮井潔：蛋白質 核酸 酵素別冊31, 酵素免疫測定法. 13, 共立出版(株)(1987)
- 9) 川島紘一郎：イムノアッセイ入門. 29, 南山堂(1987)
- 10) 東邦大学：心筋細胞内カルシウムイオンの高速イメージング
- 11) 日本顕微鏡工業会：顕微鏡の基礎
- 12) 佐々木章, 金城政孝：蛍光相互相関分光法を駆使した生細胞内の分子状態解析, 生化学 第84巻 第12号(2012)
- 13) T. Hayashi: Photomultiplier Tubes For Use In High Energy Physics(1992)
- 14) 高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所：粒子識別装置エアロゲルRICHカウンター
- 15) 東北大学：カムランド実験装置
- 16) 東京大学宇宙線研究所：チェレンコフ望遠鏡大型アレイ(CTA)計画
- 17) 東京大学宇宙線研究所附属神岡宇宙素粒子研究施設：XMASS (エックスマス) 実験 検出原理
- 18) D-tect Systems, a division of ATK-mission Reserch
- 19) 長瀬ランダウア(株)
- 20) 日本電子：SEMの世界への招待 日本電子株式会社
- 21) (株)日刊工業新聞社：雑誌 解体新書編集部,モノのしくみ/技術のふしぎ編 No.3,42,1996

メ 毛

## 索引

## 【A】

Ag-O-Cs .....	33
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	38
Atomic Absorption Spectrophotometer.....	279

## 【B】

BeO .....	19
BGO .....	157, 286

## 【C】

C.F.D. (Constant Fraction Discriminator).....	53
CR .....	290
C.R.T. (Coincident Resolving Time) .....	55
C.T.T.D (Cathode Transit Time Difference).....	54
Cockcroft-Walton Voltage Multiplier .....	94
Count rate Stability .....	165
CPU+ インターフェース内蔵型モジュール .....	185
Cs-I.....	32
Cs-Te.....	32

## 【D】

DA 型ソケットアッセンブリ .....	27
DAP 型ソケットアッセンブリ.....	27
Dead Time .....	220
DNA .....	298
DP 型ソケットアッセンブリ .....	27
D 型ソケットアッセンブリ .....	27

## 【E】

E.I.A. (Enzymeimmunoassay).....	292
EADCI (Equivalent Anode Dark Current Input)..	73
ENI (Equivalent Noise Input).....	74

## 【F】

Fall Time.....	51, 216
Fluorospectrophotometer .....	269

## 【G】

GaAs(Cs) .....	33
GaAsP(Cs).....	33

## 【H】

HA 処理 .....	269
-------------	-----

## 【I】

Immunoassay.....	291
InGaAs(Cs).....	33
InP/InGaAsP(Cs), InP/InGaAs(Cs).....	33

## 【J】

JEDEC .....	16
JIS-C60068-2-6 (振動) .....	258
JIS-C60068-2-27 (衝撃) .....	258

## 【K】

K フリーガラス.....	38
---------------	----

## 【L】

LLD (Lower Level Discrimination) .....	147
Long Term Stability .....	164
LWD (Logging While Drilling).....	308

## 【M】

MCP (Microchannel Plate).....	46
MCP 内蔵型光電子増倍管 .....	211
MgF <sub>2</sub> .....	38
MIL STD-202G.....	258
MTBF (Mean Time Between Failure).....	273
MTTF (Mean Time To Failure).....	273
Multichannel Analyzer .....	53
MWD (Measuring While Drilling).....	306

## 【N】

NaI(Tl).....	156
NEA (Negative Electron Affinity).....	10
NF (Noise Figure).....	152

## 【O】

Oil Well Logging .....	306
------------------------	-----

## 【P】

PB 材 .....	134
PC 材 .....	285

PET (Positron Emission Tomography).....	270
Photopeak Drift.....	164
Pulse Height Distribution .....	145
Pulse Height Resolution (P.H.R.) .....	159, 248

## **[R]**

R.I.A. (Radioimmunoassay) .....	292, 293
Recovery Time .....	220
Rise Time .....	51
RPH (Relative Pulse Height).....	162

## **[S]**

Sb-Cs.....	32
Sb-K-Cs .....	32
Sb-Na-K .....	32
Sb-Na-K-Cs .....	33
Sb-Rb-Cs.....	32
Short Term Stability .....	165
SN 比 .....	75
SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) ..	288

## **[T]**

T.A.C. (Time-to-Amplitude Converter) .....	53
T.C.P.C. (Time Correlated Photon Counting).....	216
T.O.F. (Time of Flight) 測定.....	55
TOF カウンタ .....	299, 300
T.T.S. (Transit Time Spread).....	52, 192
Transit Time .....	51, 192

## **[U]**

ULD (Upper Level Discrimination).....	147
UV 透過ガラス .....	38

## **[X]**

X 線画像診断装置.....	290
----------------	-----

## 【あ】

青感度指数	43
赤感度比	43
アクセサリ	85
アクティブ型デバイダ回路	92
厚さ計	309
アナログ方式	144
アバランシェゲイン	232
アフターパルス	79
アルカリ光電面	15
アンギュラーレスポンス	64
安定性	65, 164
暗電流	69

## 【い】

硫黄酸化物分析計	282
イオンフィードバック	69
位置検出型光電子増倍管	189
イムノアッセイ	291
医用装置	285
陰極側接地	87
陰極リニアリティ特性	56
陰極ルーマン感度	41

## 【う】

ウェルシンチレーションカウンタ	293
ウォーミングアップ	66
宇宙線	72
ウルトラバイアルカリ	37

## 【え】

エージング	66
液体シンチレーションカウンタ	293
エネルギーギャップ	16
エネルギー分解能	159, 248
演算増幅器	87, 121

## 【お】

オペアンプ	121
温度特性	71, 219, 238, 246

## 【か】

外部回路との接続	116
回復時間	220
外部光電効果	15

カウントリニアリティ	149, 180, 223
カウントレートスタビリティ	165
化学発光方式	281
化学発光免疫測定装置	294
下降時間	51
加速係数	275
カップリングコンデンサ	108, 118
カロリメータ	301
環境性	245
環境測定	281
間欠動作 (エージング効果)	272
ガンマカメラ	288

## 【き】

気圧の影響	266
共焦点レーザ走査顕微鏡	296
共振	255

## 【く】

空間電荷	56
空間分解能	191
クロストーク	191
クロスプレートアノード	200

## 【け】

携帯型放射線モニタ	307
ゲート回路	104
ゲート機能	182
ゲート付 MCP-PMT	226
蛍光イムノアッセイ	294
蛍光寿命測定	52
蛍光分光光度計	280
経時変化特性	65
計数効率	115
計数損失	149
計数率依存性	165
ゲイン	45, 215, 232
原子吸光分光光度計	279
検出効率	48, 145
検体検査	291
ゲイン係数	215

## 【こ】

高圧電源	27, 113
高エネルギー物理実験	299
高温用光電子増倍管	248
高温用光電子増倍管のプラトー特性	168

工業計測への応用.....	309
抗原抗体反応.....	291
高磁界用光電子増倍管.....	253
高速応答性.....	101
高速光電子増倍管.....	125
光電効果.....	10, 14, 156
光電子増倍管の歴史.....	10
光電子増倍管モジュール.....	28, 171
光電子放出.....	15
光電変換.....	15
光電面.....	10, 15, 32
故障判定基準.....	275
故障モード.....	273
故障率.....	273
固体表面分析装置.....	311
コッククロフト・ウォルトン回路.....	94, 172
コパールガラス.....	38
コンピュータッド・ラジオグラフィィー (CR).....	290
コンプトン効果.....	156

## 【さ】

サーキュラケージ型.....	11, 17, 46
サーキュラライン型.....	47
最大計数率.....	149
サイドオン型.....	16, 24
雑音.....	75, 165
雑音指数.....	75, 152
サファイア.....	38
酸化ベリリウム (BeO).....	19

## 【し】

シールド.....	130
磁化.....	254
紫外一可視分光光度計.....	278
磁界の遮蔽.....	130
時間相関フォトンカウンティング法.....	216
時間特性.....	50, 183, 208, 216, 234
しきい値の設定.....	147
磁気シールド.....	130, 252
磁気シールドケース.....	27, 131
磁気特性.....	132, 137, 209, 224, 252
仕事関数.....	15, 70
湿度の影響.....	251
遮断周波数.....	120
周囲温度の影響.....	246
周囲磁界の影響.....	252
周囲電位の影響.....	267
収集効率.....	47

重心位置.....	200
出力波形.....	118
寿命特性.....	65, 241, 270, 273
主要核種.....	289
ショートタームスタビリティ.....	165
衝撃.....	255
消光比.....	184, 226
上昇時間.....	51, 216, 234
衝突型実験装置.....	299
ショットノイズ.....	75
信号出力系.....	112
信号対雑音比.....	75
シンチレーションカウンティング法.....	155
シンチレータ.....	156
振動.....	255
信頼性.....	270
信頼度.....	273
信頼度試験.....	275

## 【す】

スーパーバイアルカリ.....	37
スイッチングノイズ.....	184
スイッチングレシオ.....	104
ストリップ電流.....	220

## 【せ】

正弦波.....	257
石英ガラス.....	38
積層セラミック光電子増倍管.....	259
石油探層.....	308
接続回路.....	29, 118
セトリングタイム.....	176

## 【そ】

ソーラブラインド.....	32
相対パルス波高値.....	162

## 【た】

第1ダイノード.....	17
耐衝撃性.....	255
耐振動.....	255
耐振用光電子増倍管.....	258
ダイノード.....	19, 45
ダストカウンタ.....	283
短波長限界.....	40
ダンピング抵抗.....	107

端末効果 ..... 136

## 【ち】

窒素酸化物分析計 ..... 281  
 チェレンコフカウンタ ..... 299, 301  
 チャージセンシティブアンプ ..... 123  
 チャンネル径 ..... 212  
 チャンネル長 ..... 212  
 長波長限界 ..... 40  
 直線性 ..... 56  
 直流出力モード ..... 56  
 直流出力モードのリニアリティ ..... 91

## 【つ】

ツェナーダイオード ..... 93

## 【て】

テーパーデバイダ ..... 99  
 抵抗 ..... 107  
 デカップリングコンデンサ ..... 97, 108  
 デジタル (フォトンカウンティング) 方式 ..... 144  
 テトロード ..... 253  
 デバイダ回路 ..... 27, 85, 214  
 デバイダ抵抗 ..... 86  
 デバイダ電流 ..... 88  
 電圧出力型光電子増倍管モジュール ..... 177  
 電圧配分 ..... 99  
 電圧ヒステリシス特性 ..... 68  
 低暗電流バイアルカリ ..... 32, 248  
 電圧分割回路 ..... 86, 172  
 電界の遮蔽 ..... 130  
 電界放出 ..... 72  
 電荷増幅器 ..... 123  
 電源回路 ..... 172  
 電子打込み型 ..... 46  
 電子打込みゲイン ..... 232  
 電子軌道 ..... 17, 190, 205  
 電子親和力 ..... 16  
 電子走行時間 ..... 51, 234, 192  
 電子走行時間拡がり ..... 52, 216  
 電子増倍部 ..... 19  
 電子対生成 ..... 156  
 天然放射性核種 ..... 165  
 電流出力型光電子増倍管モジュール ..... 176  
 電流・電圧変換 ..... 119  
 電流ストレス ..... 271

## 【と】

等価暗電流 ..... 73  
 透過型 ..... 32, 37  
 透過率の劣化 ..... 261  
 動作時湿度 ..... 251  
 導電性塗料 ..... 267  
 トライオード ..... 253  
 トランジスタ ..... 92  
 トランジットタイム ..... 51  
 トランジットタイムスプレッド ..... 52  
 ドリフト (経時変化特性) ..... 65, 240

## 【な】

内部光電効果 ..... 15

## 【に】

二次電子 ..... 14  
 二次電子放出材料 ..... 19  
 二次電子放出比 ..... 20  
 二次電子面 ..... 11  
 入射位置によるユニフォームリティ ..... 62  
 入射窓材 ..... 38  
 ニュートリノ観測実験 ..... 302

## 【ね】

熱電子放出 ..... 70

## 【は】

パーマロイ ..... 130  
 バイアルカリ ..... 32  
 ハイリニアリティアクティブ型デバイダ回路 ..... 95  
 バイルアップ ..... 119  
 ハウジング ..... 27, 130, 214  
 波長範囲 ..... 40  
 バックグラウンドノイズ ..... 165  
 発光分光分析装置 ..... 278  
 パルス計数法 ..... 79  
 パルス出力モード ..... 56  
 パルス出力モードのリニアリティ ..... 96  
 パルス波高分布 ..... 145  
 パルスベア分解能 ..... 149, 180  
 パルスリニアリティ ..... 57, 97, 222  
 パルスリニアリティ対策 ..... 99  
 反射型 ..... 32, 36  
 半導体ウェーハ検査装置 ..... 309

## 【ひ】

光の遮蔽	130
光ヒステリシス特性	67
光分析装置	278
光刺激ルミネッセンス線量計	308
飛行時間差	286
非磁性材製光電子増倍管	254
ヒステリシス特性	67

## 【ふ】

ファインメッシュダイノード	253
フォトピークドリフト	164
フォトンカウンティング回路	28, 172
フォトンカウンティング法	127, 143, 223
不感時間	220
フラットパネル型光電子増倍管	191
プラトー特性	147, 167
プラナーイメージング装置	287
フローサイトメータ	297
分光感度特性	39, 206

## 【へ】

ベースラインシフト	119
平均寿命	273
ヘッドオン型	16, 24
ベネシアンブラインド型	46
ヘリウムガスの影響	260
偏光特性	80

## 【ほ】

硼硅酸ガラス	38
放射感度	39
放射線監視装置	307
放射線の影響	261
飽和現象	57, 247
飽和特性	133, 220
ポジトロンCT	53
保存温度	251
保存時湿度	251
ボックス型	46
ボックスライン型	46
ホドスコープ	299

## 【ま】

マイクロチャンネルプレート型	46
----------------	----

マイクロチャンネルプレート内蔵光電子増倍管	211
窓材発光	265
マルチアノード型光電子増倍管	190
マルチアルカリ	33
マルチチャンネル波高分析器	53, 145
マルチフォトエレクトロン	232

## 【む】

無機シンチレータ	157
----------	-----

## 【め】

メッシュ型	46
メタルチャンネル型	46, 190
免疫学的検査	291

## 【ゆ】

有機シンチレータ	157
ユニフォミティ	61, 164, 209, 237

## 【よ】

陽極 (アノード)	20
陽極暗電流	69
陽極側接地	87, 116
陽極感度の温度特性	246
陽極電流	49
陽極リニアリティ特性	56
陽極ルーメン感度	42
陽子崩壊実験	302

## 【ら】

ライフ (寿命) 特性	65, 270
ラインフォーカス型	46
ラジオアイソトープ	293
ランダム振動	256
ランダム波形	257

## 【り】

リード線	109
リアルタイムPCR	298
リップルノイズ	175
リニアリティ特性	56
リニアリティ測定法	58
量子効率	39

**【る】**

ルーメン感度 .....	40
ルミノメータ .....	298

**【れ】**

レーザスキャナ .....	309
レーザレーダ (LIDAR) .....	284
冷却 .....	139, 251
冷却器 .....	140, 219

**【ろ】**

ローパスフィルタ .....	101, 175
漏洩電流 .....	72
ロングタームスタビリティ .....	164

メ 毛

「光電子増倍管」 編集委員会

編集長	松永 延也
編集委員	神谷 昭文
	後藤 幹人
	小玉 剛史
	斉藤 久彰
	小澤 勉
	大石 洋三
	江間 剛
	中谷 崇典
	鈴木 正俊
	長岡 賢一
	永井 正太
	秋山 恵亮
	渡瀬 健吾
	田原 治利
	佐藤 雅之
	松井 永幸
	中村 雅樹
編集事務局	袴田 秀人

光電子増倍管  
—— その基礎と応用 ——

---

平成 5 年 4 月 20 日 初版  
平成 10 年 10 月 20 日 第 2 版  
平成 17 年 8 月 1 日 第 3 版  
平成 19 年 7 月 1 日 第 3a 版 (PDF 版)  
平成 29 年 4 月 1 日 第 4 版

著者 浜松ホトニクス株式会社 編集委員会

編集 有限会社インプロジェクト  
〒435-0046 浜松市東区丸塚町249-1  
電話 (053) 467-0108 FAX (053) 467-0109

発行 浜松ホトニクス株式会社  
電子管営業推進部  
〒438-0193 静岡県磐田市下神増314番地の5  
電話 (0539) 62-5245 FAX (0539) 62-2205

