

解 説

超高速光検出器の現状

久 米 英 浩

浜松ホトニクス(株)電子管事業部 〒438-01 静岡県磐田郡豊岡村下神増 314-5

(1995年3月8日受理)

High Speed Photodetectors

Hidehiro KUME

Electron Tube Division, Hamamatsu Photonics K.K.,
314-5, Shimokanzo, Toyooka-mura, Iwata-gun, Shizuoka 438-01

1. はじめに

近年光による物質、物性のダイナミックな解析、光による情報伝達、光による計測、制御が従来からの手法に代って多用されるようになった。それらの観測手段として種々の高速測光法が開発、実用化されている。より高速な現象の解析、高速な情報処理を達成するために、光パルス源の短パルス化、復調器（光検出器、電子回路）の時間応答の高速化が進められている。本解説においては、光による高速計測法全般にふれた後、光検出器の応答速度をナノ秒、ピコ秒、フェムト秒域に分類し、実用化されている最近の光検出器の現状について紹介する。

2. 高速光計測法¹⁻³⁾

高速現象に伴う光パルス信号を計測するための代表的な手法を表1に示す。アナログサンプリング法は、高速フォトダイオード（photo-diode : PD）、光電子増倍管（photomultiplier tube : PMT）からの信号を、サンプリングオシロスコープ等でその波形を求める方法である。この手法では応答速度光検出器、オシロスコープの応答性から数十psまでの時間分解能が得られている。ストリーク法は、時間分解能（ピコ秒～サブナノ秒）において優れているが、ダイナミックレンジがあり広くない欠点がある。

オートコリレーション法は、1ps以下の時間分解能が達成され、高速性に優れているが、測定原理から光波形そのものを求めることはできない。

時間相関光子計数法（time correlated photon count-

ing : TCPC法）²⁾は、計測時間が長いという欠点はあるが比較的速い時間分解能（数十ps）をもつとともに、微弱光に対して感度が高く、ダイナミックレンジが広い（10⁵～10⁶）などの利点をもつ。

光計測の特徴は、一般に光検出器の応答速度が速いために、高速現象を実時間で追跡することを可能にすることである。短パルスレーザーの実現とともに、光検出器の応答時間性を向上させることは、常に望まれているところである。表2に光検出器の分類と時間応答性を示す。構造の違いから、外部光電効果によるもの、内部光電効果によるものに分けられる。この表に見られるように、検出器の動作機構・原理によって、応答速度は大きく異なる。それらの詳細については後章にゆだねる。

実際の光計測では、応答特性の高速性のみならず、S/Nという観点から光検出器の分光特性、微弱光に対する検出感度も重要な要素となる。現在実用化されている光電面（外部光電効果）、PD（内部光電効果）の分光感度特性は文献4、5)を参照されたい。さらに入射光が弱いときには、光検出器内に増倍機能をもつことが必要となり、特に光子計数モードでは高い増倍率を有することが不可欠となる。

検出器の構成としては、受光面の分光感度の違い、電子増倍器のタイプの組合せによって各種の光検出器が開発、実用化されている。

3. 時間応答特性の評価法・定義

本論に入る前に、光検出器の時間応答特性の評価法・定義について述べる。

表1 種々の高速光計測法

| 測定方法 | 光検出器 | 時間分解能 | 特徴 |
|---------------|--|--------------|--|
| アナログ計測 | | | |
| サンプリング法 | フォトダイオード バイオラーナー光電管 光電子増倍管 MCP 光電子増倍管 | ナノ秒 サブナノ秒 | 長所：取扱いが容易。 比較的高速応答。 |
| ストリーク法 | ストリークカメラ | フェムト秒 | 短所：ダイナミックレンジが狭い。 長所：超高速応答。 短所：ダイナミックレンジが狭い。 |
| オートコリレーション法 | SHG 相関法など | フェムト秒 | 長所：超高速現象の測定。 短所：光波形を直接求められない。 |
| 時間相関光子計数法 | 光電子増倍管 | サブナノ秒 | 長所：高速応答。 ダイナミックレンジが広い。 短所：アナログ法に比べ、計測時間が長くかかる。 |

表2 光検出器の分類と特長

| 検出原理 | 検出器 | 増倍部 | 応答速度 | 波長領域 |
|-----------------|----------|-----|--------------|----------|
| 外部光電効果 | 光電管 | なし | 0.06~10 ns | 真空紫外~近赤外 |
| | 光電子増倍管 | あり | 0.1~20 ns | 〃 |
| | ストリーク管 | あり | 0.5~20 ps | 〃 |
| 内部光電効果 光起電効果 | フォトダイオード | なし | 1 ns~1 μs | 紫外~赤外 |
| | アバランシエ | あり | 1 ns~10 μs | 〃 |
| | フォトダイオード | | | |
| 光導電効果 | 光導電素子 | なし | 10 μs~100 ms | 可視~遠赤外 |

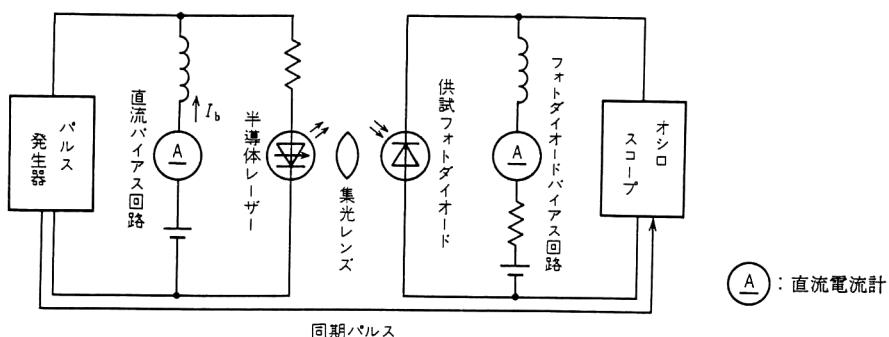


図1 ステップ入力光による立上り、立下り時間の測定回路

3.1 パルス応答

パルス応答は、ステップパルス光またはインパルス光を光検出器に入射しその出力パルス波形から求められる。ステップパルス光に対する立上り時間、立下り時間の測定回路を図1⁶⁾に示す。この回路によって、矩形状に変調された半導体レーザーのパルス光をPDに入射し、その出力パルスをオシロスコープなどで観測する。

他方、矩形パルスに代ってインパルス光入射による応答特性も定義されている。図2にインパルス発光させた半導体レーザーに対するPMTの応答特性の測定回路図

を示す。図3にこの測定によって得られた応答波形例を示す。ピーク波高値に対して10%, 90%のレベルに対する時間を立上り(rise time), 立下り時間(fall time)と定義する。

ここで、原理的にステップ入力、インパルス応答による立上り、立下り時間は同じ結果にならないことに注意を要する。一般的にPDなどはステップ入力、PMTなどの超高速デバイスはインパルス入力による方法がよく用いられる。また図3に示すインパルス光が光検出器に到着した時間と、光検出器から出力される出力パルスの

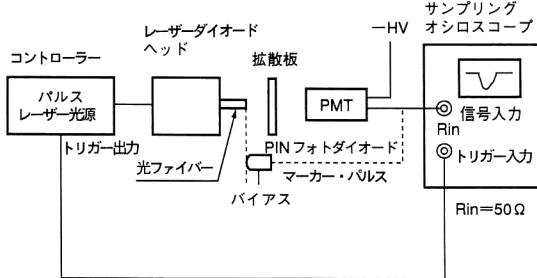


図2 インパルス光による立上り、立下り時間の測定回路

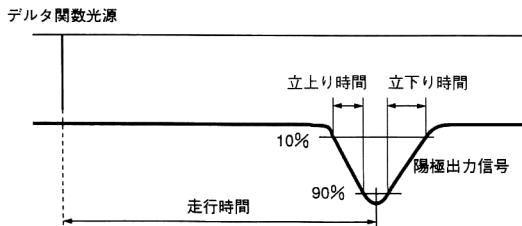


図3 立上り、立下り走行時間の求め方

間の遅延時間を走行時間 (transit time) と定義する。

3.2 周波数応答

周波数特性は、交流的に変調された光入力に対する光検出器の応答特性を求めるものである。交流変調された半導体レーザーとフォトダイオードの周波数特性は、図1のパルス発生器を交流信号源に、オシロスコープをスペクトルアナライザに代えて測定できる⁶⁾。周波数特性は変調周波数に対する光検出器からの出力値の応答性から求められる。

3.3 走行時間広がり

この特性は、单一光子入射時における光検出器からの各々のパルスの走行時間の広がり (transit time spread : TTS) と定義される。特にTTSは前述のTCPC法における時間分解能のめやすとして用いられる^{2,7)}。

図4にTTSの測定回路図を示す。パルスレーザー光源からのトリガー信号を、時間差を波高値に変換するTAC (time-to amplitude converter) のスタート信号入力部に入れ、一方PMト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ー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ーであるCFD (constant fraction discriminator) を通してTACのストップ信号へ入力される。TACはスタート信号からストップ信号までの時間すなわち電子走行時間に比例した波高パルスを発生し、マルチチャンネル波高分析器

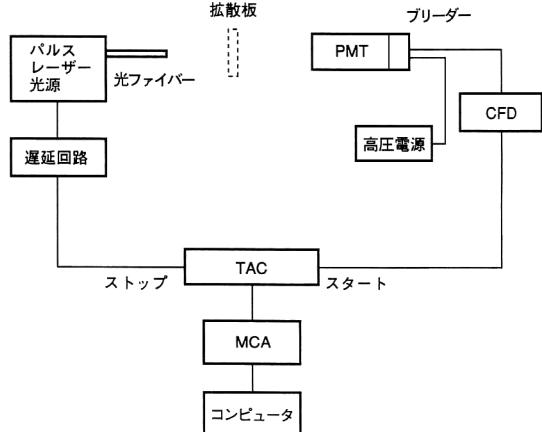


図4 TTSの測定系

(multichannel analyzer : MCA) に入り波高分析される。通常TTSは多数回測定した結果の走行時間の広がりのFWHMで規格化される。

光検出器の時間応答特性は、以上述べたようないくつかの定義がある。検出器の応答速度の速さ、応用される機器の形態などによって定義、測定法が使い分けられている。実際の検出器の性能判断にあたっては、十分に定義、評価法を確認しておくことが必要である。

4. 高速光検出器の動向

本節では、開発、実用化されている高速光検出器の動向について述べる。今回は、それらをナノ秒、ピコ秒、フェムト秒域に応答性をもつものに分類してまとめた。さらに応答速度だけでなく、増倍器の有無についても同時に分類した。なおここで分類したナノ秒、ピコ秒、フェムト秒は各々の検出器の達成できる最も高速なものを基に分類したものであり、それより低速の領域では使用できないということではない。

4.1 ナノ秒光検出器

4.1.1 増倍機能のないもの

内部光電効果を応用した半導体光検出器は計測、制御、分析機器および光通信用に広く用いられ、特に光通信用としては高速応答性が求められる。半導体光検出器は構造の違いから、PIN型PD、ショットキー型PD、APDがあり、分光感度の違いから可視域用Si、赤外域用としてGe、III-V族化合物が実用化されている(前述)。半導体光検出器の応答特性はキャリアが空乏層を走行する時間、CR時定数で決まる遅れ時間、およびAPDではアバランシェ立上り時間が加わって決定される。図5に各種のPIN-PDにおける、受光面サイズと

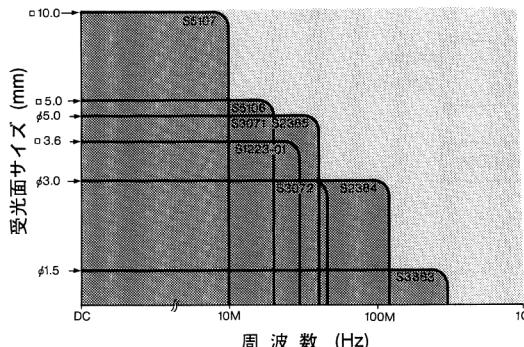


図5 PDの受光面サイズと周波数特性の関係

周波数特性の関係を示す⁸⁾。図に示されるように、受光面サイズと応答速度はほぼ比例関係にある。これは主に半導体センサーの接合容量が面積が大きくなるにつれて、増加するからである。有効サイズが数~10 mm径のPDで10~数百MHz(数十~数ns)の応答性を有する。図中に示すように1.5 mm径サイズで300 MHzまでの応答性のものが実用化されているが、さらに小口径のものでは数GHzまでのものも得られている(後述)。半導体光検出器は、その小型性、広帯域性から高速光伝送システム、広帯域光通信用の受信センサーに多用されている。

4.1.2 増倍機能を有するもの

光の弱い領域では、検出SN比をよくするため光検出器内に増倍機能を内蔵し光電子を増倍する必要がある。特に極微弱な領域では光子計数が不可欠であり、そのため光検出器の増倍器に 10^5 ~ 10^6 の増倍率が求められる⁹⁾。このために各種の電子増倍器(ダイノード)が開発されて、PMTなどの増倍器に用いられている。PMTは一般的に、ダイノードの電子増倍により 10^6 以上の増倍率をもち光子計数が可能である。

PMTの時間応答特性は、光電面から放出される光電子の初速分布、放出角度広がり、ダイノード間での走行時間のばらつきおよびダイノードの構造、印加電圧、収束方式、印加電圧に依存する。図6に代表的なPMTおよびバイプラナー光電管の印加電圧に対する立上り時間の特性を示す。標準的なPMTについて数~10 nsの応答が容易に得られるし、サブナノ秒のものも多く開発、実用化されているが、詳細については後章で述べる。

4.2 ピコ秒光検出器

4.2.1 増倍機能のないもの

半導体光センサーの一部に、ピコ秒域の応答性を有するものが、開発、実用化されている。PIN-PDの応答

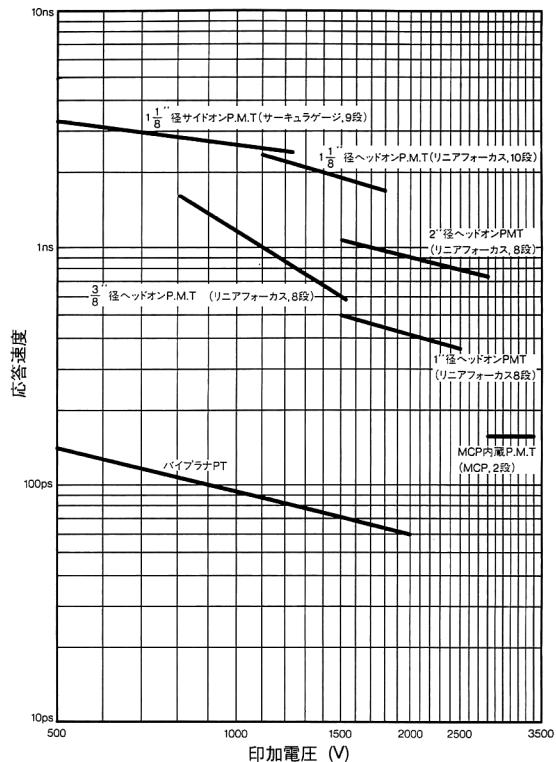


図6 バイプラナー光電管および代表的PMTの印加電圧に対する応答速度

特性は図5に示したように、受光面積により制約をうけるが、小受光面積(0.5 mm以下)のものではGHz(数百ps)の応答性が得られる。さらに有効径が10~20 μmに微小化されたものでは、立上り時間が数十~数psのPIN-PDが開発^{10,11)}、商品化(Fermionics社 高速フォトダイオード HSD 30 C, Ortel社 高速PIN-PDなど)されている。受光面積が極小なので使用上の難点があるが、光ファイバーとの接続を前提とした、高速オシロスコープのO/E変換器(ソニーテクトロニクス O/E変換器ヘッド SD-46型, New Focus Inc Model 100 X)として実用化されている。

バイプラナー型光電管は、光電面および陽極からなる二極管であり、光電面と陽極の距離が接近していることと、信号取出し用の陰極と陽極(グランド電位)とが同軸構造となっているなどにより立上り時間60 psの超高速応答性を有するが、PMTのような電子増倍器がないので微弱光計測には向きである(製品例:浜松ホトニクス(以後HPKと略) R 1328)。バイプラナー光電管は、主にパルスレーザーの波形観測、トリガー用などの応用に用いられる。

表3 APD の製品例(HPK S 6045 シリーズ)

| 型 名 | パッケージ | 受光面サイズ (mm) | 最大感度波長 (nm) | 量子効率(%) | | 遮断周波数(MHz) $M, RL=50\Omega, \lambda=800\text{nm}$ | 増倍率 $\lambda=800\text{nm}$ |
|-----------|-------|----------------|----------------|-----------------------------|--|--|-------------------------------|
| | | | | $M=1, \lambda=800\text{nm}$ | $M, RL=50\Omega, \lambda=800\text{nm}$ | | |
| S 6045-01 | TO-18 | $\phi 0.2$ | 800 | 75 | 〃 | 1,000 | 100 |
| S 6045-02 | | $\phi 0.5$ | 〃 | 〃 | 〃 | 900 | 〃 |
| S 6045-03 | | $\phi 1.0$ | 〃 | 〃 | 〃 | 600 | 〃 |
| S 6045-04 | TO-5 | $\phi 1.5$ | 〃 | 〃 | 〃 | 350 | 〃 |
| S 6045-05 | | $\phi 3.0$ | 〃 | 〃 | 〃 | 80 | 60 |
| S 6045-06 | TO-8 | $\phi 5.0$ | 〃 | 〃 | 〃 | 35 | 40 |

4.2.2 増倍機能を有するもの

1) APD

半導体光センサーの中で APD¹²⁾のみが増倍機能（増倍率 $10^2 \sim 10^3$ ）を有し、中には光子計数のできるものも実用化されている¹³⁾。APD の応答速度は PIN-PD と同じように有効サイズに依存するほか、アバランシェ立上り時間、印加電圧によって決まる。表3 に高速型 Si-APD の製品 (HPK S 6045 シリーズ) の特性例を示す。もっとも高速なもので受光サイズ 0.2 mm 径の Si-APD で、遮断周波数 1 GHz (立上り時間: 数百 ps) のものが商品化されている。文献レベルでは、Si-APD で 150 GHz (有効径 150 μm)¹⁴⁾、光子計数型 APD で 20 ps¹⁵⁾の時間分解能のものも報告されている。

2) PMT

従来型の PMT を高速化させたもので、ピコ秒領域の応答を得るものが実用化されている（図6 参照）。図7 に従来型のライン型ダイノードを用いた PMT の構造を示す。この PMT は集束電極の高速応答化と陽極出力を同軸コネクター化することにより、高周波域における波形歪のない応答特性を達成している。この PMT は、700 ps の立上り、160 ps の時間分解能 (TTS) という特性をもち、10段ダイノードを有するために光子計数も可能となっている。

PMT は各種のダイノードが開発され、高ゲイン、高速応答性からこれまでに広く計測用に用いられてきた⁷⁾。しかし、電子管型検出器は半導体検出器にくらべると大型であり、かつ使いにくさに難点があった。最近、超薄、微細構造をもつメタルチャンネルダイノードを内蔵し、かつ TO 8 型パッケージに封入された超小型光電子増倍管¹⁶⁾が実用化された (HPK R 5600)。図8 にその外観写真を示す。この PMT は内部の電極、ダイノードが微細構造でできているため、内部での電子の走行広がりが小さく、立上り時間 650 ps、TTS 280 ps が得られている。通常の光電子増倍管と同レベルの光電感度と、 10^6 の増倍率が得られることから、光子計数も可

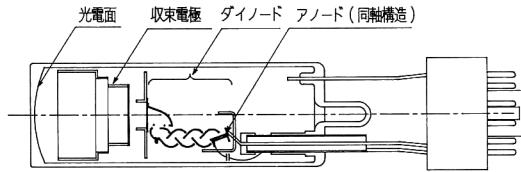


図7 1インチ径高速PMTの構造

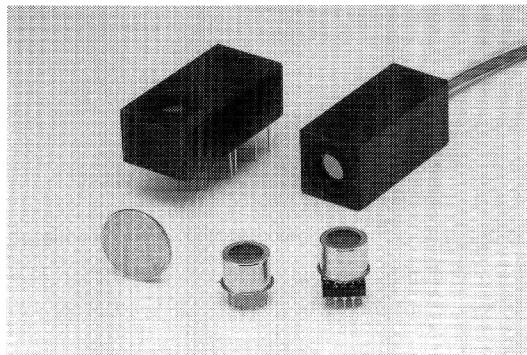


図8 メタルパッケージ型PMTおよび高圧電源内蔵モジュール型の外観図

能である。さらに、高圧電源の内蔵されたモジュール型も開発され、低電圧での駆動、電圧調整が可能となった (HPK H 5783, H 5773)。ピコ秒域での応答をもつとともに、半導体センサーとほぼ同程度の超小型性、低電圧駆動が可能な光電子増倍管が実用化された。

3) マイクロチャンネルプレート内蔵型 PMT

マイクロチャンネルプレート (microchannel plate : MCP) は、その微細構造、多チャンネル性からこれまで主にイメージインテンシファイアーの増倍部、イオン、電子の検出器として使われてきた。

図9 に MCP を内蔵した PMT の構造を示す。基本的に光電面、MCP (2枚内蔵)、および陽極の各要素から構成されている。電流増倍率は MCP 2枚を用いたことにより 10^6 が得られ、光子計数が可能である。特に光電面と MCP 間の距離を近接構造にしたこと、MCP の高応答性から立上り時間 100 ps、TTS 25 ps が得られて

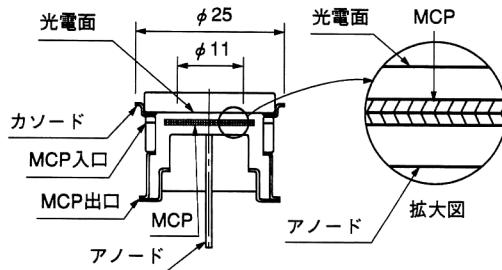


図9 MCP内蔵型 PMT の構造

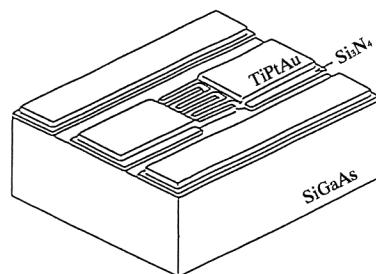


図10 MSM-PD の構造

表4 ストリークカメラの分類

| 時間分解能 | 掃引時間レンジ | 製品名 | 掃引方式 |
|---------|---------------------------|-------------------|--------------|
| <300 fs | 200 ps~500 ps | C 6183(FESCA 200) | 単掃引 |
| <700 fs | 60 ps~1.2 ns | C 3735(FESCA 500) | 単掃引 |
| <2 ps | 200 ps~1 ms | C 5680 | 単掃引/シンクロスキャン |
| <10 ps | 500 ps~1 ms 2 ns~10 ms | C 2830 C 4187 | 単掃引 |
| | 500 ps~2 ns | C 3681 | シンクロスキャン |

いる (HPK R 3809)^{17,18)}.

4.3 フェムト秒光検出器

4.3.1 増倍機能のないもの

最近、超高速半導体光検出器である GaAs metal-semiconductor-metal photo-detector (MSM-PD) が実用化された。図10に実用化された MSM-PD の素子の構造を示す。1×1 mm² の半絶縁性の GaAs 基板上に、Ti/Pt/Au のショットキー接合電極が形成されており、他の部分は Si₃N₄ によって絶縁されている。電極の中央の 0.2×0.2 mm² の部分に、くし形電極（幅、ギャップとも 6 μm）が形成され、ここが受光部になる。この微細構造によって立上り、立下り時間 20 ps の超高速応答性が得られている (HPK G 4176)。文献レベルでは、電極幅 0.2 μm の GaAs-MSM で 1.2 ps¹⁹⁾、電極幅 25 nm、15 nm の GaAs-MSM でそれぞれ 250 fs、160 fs の応答速度²⁰⁾ のものが得られている。

MSM-PD は、増倍機能はないものの微細構造ができるここと、半導体内の拡散速度の速いことなどからフェムト秒域に応答をもつ唯一の半導体センサーである。

4.3.2 増倍機能を有するもの

ストリークカメラとは内部に超高速光検出器であるストリーク管を内蔵させた高速時間分解分光装置で、サブピコ秒（フェムト秒）領域において実時間で動作できる光検出器のなかでは最も高速なものである。ストリーク管は、超高速応答のほか、内部に増倍部 (MCP) が内蔵され、MCP の段数をふやすことによって单一光子検

出も可能である。これまでにストリーク管^{2,21)}、ストリークカメラ^{22,23)}に関しては多くの記述があるので、ここでその原理、構造の記述は省略する。

表4に、現在実用化されているストリークカメラの製品を時間分解能別に分類したものを示す。時間分解能として 300 fs~10 ps、掃引レンジとして 60 ps~10 ms がカバーされ、掃引方式も単掃引方式とシンクロスキャン方式がある。また時間分解能以外に、MCP の枚数を増やすことによって光子計数が可能となり、さらに光電面の選択によって X 線領域から赤外域までの検出も可能である。

表4 中で最高の時間分解能 (300 fs) をもつ HPK FESCA-200 では、動作条件を最適化することによって 180 fs までの分解能を得たという報告もある²⁴⁾。また、LINAC のバンチ幅を FESCA-200 で観測した結果では、電子ビーム励起によって生じたチエレンコフ光をフェムト秒ストリークで検出し、LINAC のバンチ幅を極めて高速度で観測したという報告もある²⁵⁾。

ストリークカメラは、ピコ秒からフェムト秒域における化学反応ダイナミックス、半導体デバイスの緩和過程の研究、レーザー核融合における爆縮の観測などに幅広く用いられている。

5. 結語

最近の高速光検出器の動向および二、三の応用例について述べた。高速光計測の歴史は、パルス光源の短パル

ス化、光検出器の高速化とともに発展してきた。高速光計測を歴史的にみると1970年代のナノ秒、1980年代のピコ秒から近年サブナノ秒領域にふみこみつつある。光による計測の実用面からは、検出器の高速応答性だけでなく、検出波長域の拡大、検出感度の向上なども合わせた総合的な特性の向上が求められる。さらに自然科学、科学計測の分野では未知の現象の解明に向けて、光検出器を含めた光計測系の時間分解能の極限化が常に望まれる。今後のフェムト秒時代に向けた、さらなる新しい原理、考え方、デバイスの発展が期待される。

文 献

- 1) 南 茂夫, 内田照雄: “超高速分光測光とその応用”, 分光研究, **19** (1970) 187-209.
- 2) 久米英治, 木下勝之, 玉井尚登, 山崎 巖: “時間分解分光計測のための超高速光検出器”, 分光研究, **38** (1989) 391-407.
- 3) 森本朗裕, 小林哲郎: “短パルス光計測”, 応用物理, **60** (1991) 598-599.
- 4) 浜松ホトニクス(株)カタログ: 光電子増倍管 (1994)
- 5) 浜松ホトニクス(株)カタログ: フォトダイオード (1994)
- 6) JIS C 5991 (1988).
- 7) 光電子増倍管—その基礎と応用— (浜松ホトニクス出版, 1993).
- 8) 光通信用発光素子, 受光素子, 浜松ホトニクス技術資料 (1993).
- 9) 林 達郎: “光子計数法”, 光学, **14** (1985) 422-431.
- 10) W. Lenth, A. Chu, L. J. Mahoney, R. W. McClelland and R. W. Mountain: “Planar GaAs p-i-n photodiode with picosecond time response,” Appl. Phys. Lett., **46** (1985) 191-193.
- 11) S. Y. Wang: “Ultra high speed photodetectors,” IEDM '84 (1984) pp. 712-715.
- 12) 米津宏雄: 光通信素子光学 (光学図書, 1984).
- 13) 浜松ホトニクス(株)C 4250, EG & G Inc SPCM-100, SPCM-200.
- 14) H. Kanbe, Y. Mizushima, T. Kimura and K. Kajiyama: “High speed silicon avalanche photodiodes with built-in field,” J. Appl. Phys., **47** (1976) 3749-3751.
- 15) M. Ghioni, A. Lacaita, S. Cova and G. Ripamonti: “20-ps resolution single-photon solid-state detector,” OSA Proceedings on Picosecond Electronic and Optoelectronics, **4** (1989) pp. 194-200.
- 16) H. Kyushima, Y. Hasegawa, A. Atsushi, Y. Yokota, M. Matsumura, Y. Watase, M. Ito, J. Takeuchi and K. Oba: “Metal package photomultiplier tube,” IMTC, TUPM 10-4 (1994) p. 242.
- 17) H. Kume, K. Koyama, K. Nakatsugawa, S. Suzuki and D. Fatlowitz: “Ultra fast microchannel plate photomultipliers,” Appl. Opt., **27** (1988) 1170.
- 18) H. Kume: “Compact ultrafast microchannel plate photomultiplier tube,” Proc. SPIE, **1640** (1992) 440.
- 19) Y. Chen, S. L. Williamson and T. Brock: “1.9 picosecond optical temporal analyzer using 1.2 picosecond photodetector and gate,” IEDM '91 (1991) pp. 417-420.
- 20) S. Y. Chou, Y. Liu and P. B. Fischer: “Tera-Hertz GaAs metal-semiconductor-metal photodetectors with nano-scale finger spacing and width,” IEDM '91 (1991) pp. 745-748.
- 21) 木下勝之, 鈴木義二, 松岡正弘: テレビジョン学会全国大会予稿集 (1976) p. 37.
- 22) 土屋 裕, 大塚英治: “ピコ秒ストリークカメラシステムの諸特性”, テレビジョン学会誌, **35** (1981) 208-214.
- 23) 滝口義浩, 土屋 裕, 木下勝之: “フェムト秒ストリークカメラの構造とその動作特性の評価”, 応用物理, **55** (1986) 515-522.
- 24) A. Takahashi, M. Nishizawa, Y. Inagaki, M. Koishi and K. Kinoshita: “New femtosecond streak camera with temporal resolution of 180 fs,” Proc. SPIE, **2116** (1994) 275-284.
- 25) M. Uesaka, T. Kozawa, et al.: “Precise measurement of a subpicosecond electron single bunch by the femtosecond streak camera,” submitted to Nucl. Instrum. Methods A.