

## 光の数を測る— APD 検出器とシンチレーション検出器

岸本俊二 高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所  
E-mail : syunji.kishimoto@kek.jp

### 1. はじめに

本企画の第1回で取り上げた電離箱や第2回のフォトダイオードの場合は、放射光が検出器に入射したときの電流を検出して、ある時間平均の強度を測るというものでした。それに対して光子を一つ一つ検出する方法も、より敏感に、そして正確に強度を測る方式として重要です。検出器がX線のような放射線1個を感じてパルス状の電気信号を出し、それを数えることからパルス計数方式、そのような検出器をパルス検出器と呼びます。検出器を英語で detector といいます。カウンター (counter)、放射線を数えるものと呼ぶことがあります。みなさんは、放射線1個を数えられるパルス検出器の歴史が、1928年に発明されたGM計数管 (Geiger-Müller counter) から始まったことをご存知でしょうか<sup>1)</sup>。ガス検出器のひとつであるGM計数管はいまでも放射線サーベイ用に広く使われています。放射光利用研究でもX線回折実験では回折ピークの強度を調べるためにシンチレーション検出器によるパルス計数が当初から採用されてきました。第3回 (半導体検出器)、第4回 (超伝導ジョセフソン検出器) で説明されたように、エネルギーを調べるためにはX線など1個の放射線が作り出す電気信号の大きさを正確に知る必要があるため、波高が電荷量に比例した電圧パルス信号を出力させます。パルスを数えれば放射線の強度が調べられます。このようにパルスによる放射線検出は広く行われています。

利用できる放射光ビームの強度が上がるとともに、放射光実験で使われるパルス検出器には高い性能が求められています。単位時間 (秒) あたりに検出器が数える光子の数、「計数率」が  $10^7 \text{ s}^{-1}$  を超える領域に到達するシリコン・アバランシェフォトダイオード (Si-APD) が使われるようになってきました。もし検出器にやってきた1個の放射線が数えられるなら、数えた瞬間のタイミングを知ることができます。放射線が入射したタイミングが正確にわかると、その放射線が原子核から放出されたかどうかを区別したり、粒子線なら、その質量や運動量をもとめることができます。今回は、計数することが得意でタイミングがわかるX線領域の検出器の代表として、Si-APDとシンチ

レーション検出器を取り上げます。

### 2. パルスによる放射線検出と増幅作用

上で述べたように検出器の出力方式は、電気信号を電流か電圧パルスで出力するかに分かれます。この違いは、検出器の放射線に対する敏感さや応答の速さと、放射線の強度、つまり単位時間あたりに何個が検出器に入るかによって決まります。検出器が放射線にすばやく応答して変化の速い電気信号を出力し、しかも放射線1個あたりの電気信号が十分大きいなら、パルス検出方式に適していることになります。信号を電気回路で処理するので、電気雑音はつきものです。検出器固有の雑音も無視できないかもしれません。1個の放射線だけで検出器が雑音レベルを超える信号電流を出力できるかが、パルス検出できるかどうかの決め手です。

X線検出器の場合、エネルギーが1 MeVを超えるような $\gamma$ 線と比べるとX線1個で生じる電荷量は十分の一から百分の一とかなり小さいという問題があります。8 keVのX線1個による電荷量は検出器の媒体 (気体、液体、固体) との相互作用によって決まります。半導体のシリコンなら1個の電子・空孔対を作るのに必要な平均エネルギーは3.6 eV (常温) です<sup>2)</sup>。  $8000/3.6 \text{ (eV)} = 2.2 \times 10^3$  個の電子に相当する電荷量、  $3.6 \times 10^{-16} \text{ C}$  (クーロン) が生じます。検出器によって放射線の検出原理が違えば、取り出せる電荷量が変わります。固体シンチレーターでは、放射線のエネルギーが可視光 (波長: 400 nm 前後) に変換されることが多いのですが、よく光るシンチレーターであるNaI(Tl)でも8 keVではシンチレーション光が300個程度、あとで説明するようにそれが電荷量に変換されると  $1 \times 10^{-17} \text{ C}$  程度でしかありません。一般に  $1 \times 10^{-16} \text{ C}$  程度以上の電荷量がないと電気回路での処理が困難です。高感度で雑音レベルの低い回路でないと半導体でもパルス検出は難しく、放射線で生じた電荷を検出器自体が増幅する機能をもっているかが重要です。X線よりも光子1個あたりのエネルギーが小さい軟X線や紫外線などでは検出器が増幅機能を持っていないと1個の光子によるパルス検出はまず不可能ということになります。

### 3. シリコン・アバランシェ フォトダイオード (Si-APD) 検出器

Si-APD を使うと X 線を 1 秒あたり  $10^7$  から  $10^8$  個という高い計数率まで数えられる検出器になります。ゲルマニウム製などの APD も作られました。X 線検出器として実用レベルで使えるのはシリコン製のものです。APD は増幅作用を持っていますので、1 個の X 線によるナノ秒 (ns) 幅の速いパルス出力が得られる特徴があります。この幅の短いパルスを利用して高計数率までの測定やナノ秒以下の時間分解能 (パルスが発生するタイミング分布の幅) を得ることができます。Si-APD 素子は、フォトダイオードと同様に可視光、近赤外光の受光素子として多く生産されています。学術用途で X 線受光素子として使うには窓や受光部の仕様が異なるため、入手できるメーカーは限られていますが、いくつかのメーカーから市販されています (利用情報 1)。

#### 3.1 構造と作動のしくみ

Si-APD は第 2 回で紹介されたシリコン PIN フォトダイオードの延長なので、構造も似ています。Si-APD にもいくつかの型がありますが、ここでは、X 線検出でよく使われるリーチスルー型 APD を取り上げて説明します。印加電圧の増加につれて空乏層が端まで広がって表面に到達する構造をもつという意味でリーチスルーと呼ばれています。

Fig. 1 にリーチスルー型 APD の構造を示します。よく使われる Si-APD の大きさは 3 mm 径のものから 10 mm 角程度です。電圧印加時に空乏層が広がることは PIN フォトダイオードと共通ですが、違いは n 側に p-n+ 接合部が作られていることです。空乏層はここから広がります。n+ のプラス記号は不純物濃度が大きいことを示します。これまで放射光利用実験では、Si-APD の空乏層内で X 線を直接受光する方式の検出器が多く使われてきました。空乏層の厚みは薄いもので  $10\ \mu\text{m}$  から厚いものでも  $150\ \mu\text{m}$

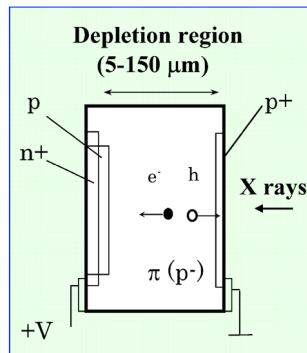


Fig. 1 Si-APD (リーチスルー型) の構造。X 線によって電子・空孔対が生成、電子が接合部に移動して増幅される。 $\pi$  層は p 型不純物濃度の低い領域のこと。

$\mu\text{m}$  程度までです。空乏層を厚くするには印加する電圧が大きくないとだめで、一様に電界を作ることが難しくなるため、空乏化できる厚みには限界があります。また面積の大きな APD を作ることは、均一な不純物層の形成など製造技術上の困難さと、静電容量が大きくなりパルス幅が延びて高速性が失われるという問題があります。X 線が空乏層内に入射するとシリコンを励起して電子と空孔の対を作ります。p+ 電極に対して n+ 側がプラスになるように電圧が印加されて作られた電界によって、電子は空乏層の中を最大  $10^7\ \text{cm/s}$  の速さまで加速され n+ 側へ移動して接合部に達します。ここはもっとも電界強度が強くなるように設計されていて、電子がシリコン原子と衝突するときに 2 次の電子・空孔対がある確率で発生させ、得られる出力電流が増加していきます。これがアバランシェ (なだれ) 増幅です。増幅の大きさは印加する電圧が大きくなるほど、また温度が下がるほど、大きくなる傾向を示します。さらに電圧を上げて、ある値 ( $V_B$ ) を超えて印加されると出力パルスが連続的に発生し電流が急激に増大する領域に達します。気体検出器の作動モードに準じて、印加電圧の上昇につれて増幅度がゆっくり上昇する領域を比例領域、 $V_B$  で生じる出力電流の急な上昇と連続パルス発生をブレイクダウン、それを越えた領域をガイガー領域と呼びます。高速パルス計数に用いる Si-APD は、比例領域で作動させる比例モード APD を使います。一方、空孔も電界中を移動して p+ 側に収集されます。通常のリーチスルー型の場合は空孔が接合部に進まないため増幅はされません。電子・空孔対が発生してから電子が移動して接合部で増幅され電極に収集されるまでの動きが Si-APD の出力パルスの形を決めます。みなさんはもう気づいているかもしれませんが、空乏層のどの場所で電荷を発生させたかによって出力信号発生タイミングが変わることになります。この空乏層の厚さに依存するタイミング差が直接検出方式の場合の時間分解能を決めています。Si-APD の特性、とくにリーチスルー型素子に関する詳しい説明は文献 3) を参考にしてください。

比例モード APD で安定に得られる増幅度は大きくても 100 倍程度ですので、X 線を検出する場合の APD 出力は  $10^{-14}$ – $10^{-13}\ \text{C}$  の電荷量 (Q) です。静電容量  $10\ \text{pF}$  (C) の素子から信号電圧 ( $V_s$ ) を出力させる場合、パルス波高は最大でも  $V_s = Q/C = 10^{-3}$ – $10^{-2}\ \text{V}$  ですので、そのままでは増幅器の雑音より十分大きくできません。そこで APD 出力パルスの速さを保存して高速パルス信号を出力するために高周波パルス増幅器を使います。増幅器の利得 (ゲイン) が 100 程度あれば、後段の電子回路で十分処理できる  $100\ \text{mV}$  から  $1\ \text{V}$  の電圧値が得られます。いくつかの種類が市販されています (利用情報 2)。価格は半導体検出器で使われる電荷感応型前置増幅器 (charge-sensitive preamplifier) と同程度です。Fig. 2 に  $16.5\ \text{keV}$  の X 線 1 個によって Si-APD 検出器で得られた出力波形 (パ

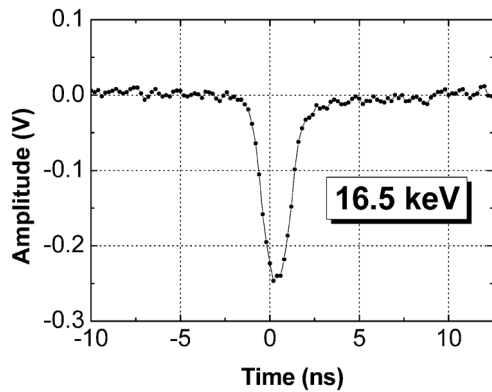


Fig. 2 Si-APD 検出器の出力パルスの例。16.5 keV の X 線 1 個によるもの。

ルス増幅器の出力) を示します。

### 3.2 高計数率測定システム

高速のパルス信号を使って 1 秒あたり  $10^9$  個までの計数率を記録するような X 線計測システムを紹介します<sup>4)</sup>。1 つの素子が 3 mm 径で  $130 \mu\text{m}$  の厚みを持った Si-APD 検出器 (8 チャンネル積層型。PF の BL-14A に設置) のシステムを Fig. 3(a) に示します。Fig. 3(b) は検出器の写真です。各 APD に高周波増幅器が 1 個ずつ取り付けられ、300 MHz のスループット (毎秒あたり処理できるパルス数) で CAMAC 仕様の波高弁別器、スケーラーにより信号が処理されます。パルス・スプリッターは、波高の「窓」(高・低二つの波高閾値ではさまれた領域) を設定して計数するためのものです。最近ではスループットのより大きなスケーラー (NIM 仕様。>500 MHz) が市販されています (利用情報 2)。

この Si-APD 検出器は四軸 X 線回折計に搭載され精密電子密度分布測定に利用されています。BL-14A で測定された計数特性の結果が Fig. 4 です。余分な X 線吸収をさせずに X 線ビームが透過できるように作られた素子を 8 枚積層させることにより、16.5 keV で検出効率  $\epsilon : 76\%$  を確保できます。最初の素子 1 個の計数率 (●) が最大  $9.4 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$  で、8 チャンネル合計の計数率 ( $\Delta$ ) は最大  $7 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$  となりました。パルス計数の特徴である計数のダイナミックレンジを最大限に利用して、 $1 \text{ s}^{-1}$  以下の弱い回折反射から  $10^9 \text{ s}^{-1}$  を超える反射をアブソーバーなしで測定できます。

### 3.3 電子バンチと計数率との関係

放射光は加速器内でひと固まり (バンチ) になって周回する電子によって発生するパルス光です。試料で散乱した X 線やその瞬間に発生した蛍光 X 線なども、パルス光として検出器に入射することになります。パルス幅が 100 ns 以下の高速検出器の場合、計数率の振る舞いを理解するためには、加速器を回る電子の周波数と検出器システムの応

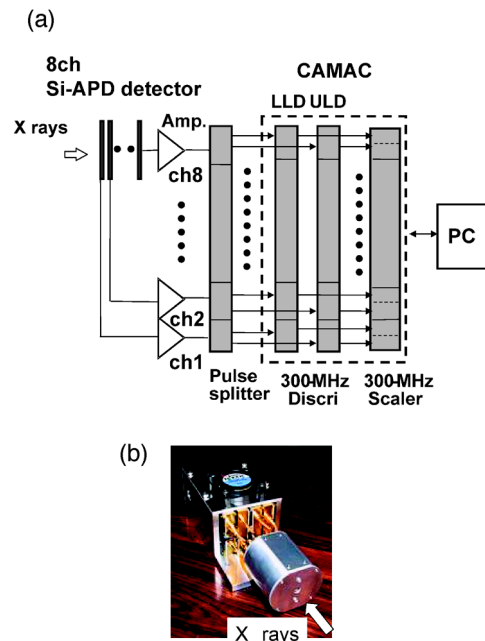


Fig. 3 Si-APD 検出器による X 線高計数率測定システム。(a) 8 チャンネル計測システムの構成: Si-APD, 高周波増幅器, 波高ウィンドウ設定用パルス分割器, 波高弁別器, スケーラーからなる。(b) は検出器の外観。

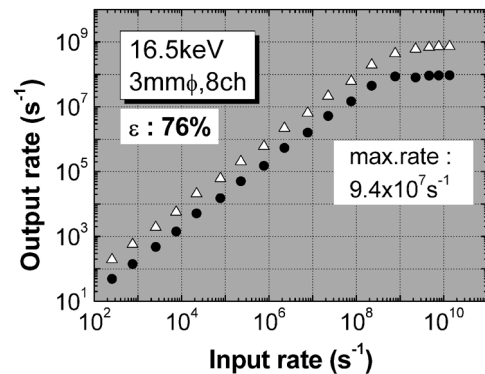
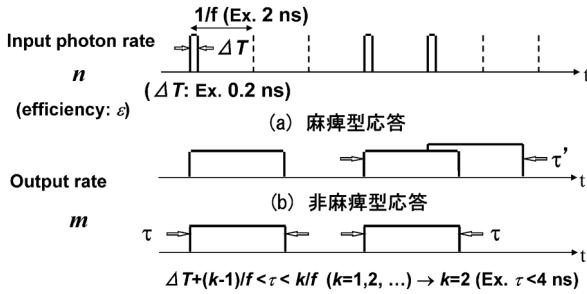


Fig. 4 8 チャンネル積層型 Si-APD 検出器による X 線高計数率測定 (PF BL-14A)。16.5 keV X 線の検出効率  $\epsilon : 76\%$ 。横軸は 1 秒あたりの入力光子数, 縦軸は計数システムの出力計数率。1 個目の計数率が ● (最大  $9.4 \times 10^7 \text{ s}^{-1}$ ), 8 個の合計が  $\Delta$  (最大  $7 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ )。

答時間 (不感時間) との関係を考えることが必要です。第 3 回記事の 6.1 では検出器の出力パルス信号の時間幅が  $1 \mu\text{s}$  程度のゲルマニウム検出器の場合について説明されましたが、今回はマルチバンチ運転での電子バンチ間隔 (2 ns) が問題になるような、より高計数率での測定を考えます。詳しくは文献 5), 6) を参考にしてください。

基本例として Fig. 5 のように、1 秒あたり  $f$  個の電子バンチ (バンチ長:  $\Delta T$ ) が通過し、 $1/f$  秒の等間隔で X 線を発生させて検出器に入射する場合について説明します。検出器に入射する X 線の 1 秒あたりの入射光子数を  $n$ , 検出器の検出効率を  $\epsilon$  とし、検出器によって 1 電子バンチ



**Fig. 5** 高計数率でのパルス計数システムの応答例。一番上は放射光 X 線が電子バンチによって決まる時間間隔で検出器に入射する様子を示す。破線はバンチのタイミング、太線の長方形はそのバンチからの X 線を検出した場合。a) は麻痺型、b) は非麻痺型の計数システムの応答(不感時間:  $\tau$ )。

あたり  $x$  個の X 線が観測される確率を考えます。1 電子バンチ中の電子数が大きいのでこの確率はポアソン統計に従い、 $x$  の平均値を  $\mu$  とすると、 $\mu = \epsilon n / f$  となります。この場合、 $x$  個の X 線が観測される確率  $P_x(\mu)$  は

$$P_x(\mu) = \frac{\mu^x \exp(-\mu)}{x!} \quad (1)$$

で与えられます。あるバンチの電子により発生した X 線が  $1/f$  の時間内に 1 個以上観測される確率は、まったく観測できない確率 (式(1)で  $x=0$  のとき)  $\exp(-\epsilon n / f)$  を 1 から引いたものです。後で説明するように、検出器が 1 個の X 線を検出した後で次の X 線を検出できるようになる最短時間、つまり不感時間  $\tau$  が、バンチ間隔  $1/f$  と比べて何倍の長さ以内かにより計数システムで得られる最大計数率などが異なります。そのため、 $\tau$  を  $\Delta T + (k-1)/f < \tau < k/f$  ( $k$  は正の整数) のように場合分けして考えます。

つぎに、単位時間 (秒) あたりに計数システムが出力するパルス数、出力計数率  $m$  に注目して X 線が計数される条件を検討しましょう。1 個のパルスを出力したあと、不感時間以内に次の X 線が入射して計数システムが信号を出力するとパルスが重なってしまうような応答を麻痺型と呼びます。 $\tau$  の間の各バンチのタイミングで X 線が観測される確率がゼロでないと、**Fig. 5** の (a) のようにパルスが重なってしまい後から来た X 線は計数されません。また、パルスのつながりとは関係なく信号出力が可能になるまで一定時間  $\tau$  が必要なシステム (非麻痺型) では、**Fig. 5** (b) の例のように、時間  $\tau$  のうちに X 線が検出器に入射して検出器が応答しても計数できなかった分と、システムが計数できた分、つまり  $m$  とを合わせると、検出器が応答したすべての X 線の事象数に等しいという関係が成立すると考えられます。これらの関係から、出力計数率  $m$  について二つの出力応答モデル式

$$\text{麻痺型} : m = f \left( 1 - \exp\left(-\frac{\epsilon n}{f}\right) \right) \exp\left(-\frac{(k-1)\epsilon n}{f}\right) \quad (2)$$

$$\text{非麻痺型} : m = \frac{f \left( 1 - \exp\left(-\frac{\epsilon n}{f}\right) \right)}{1 + (k-1) \left( 1 - \exp\left(-\frac{\epsilon n}{f}\right) \right)} \quad (3)$$

が得られます。

高速検出器による計数システムの振る舞いがどうなるか、具体的に考えてみましょう。ここでは、不感時間が検出器の出力パルス幅によって決まる、つまり波高弁別器やスケーラーが検出器より十分速く応答する場合だけを考えます。放射光リングは電子バンチ加速周波数  $f$  が 500 MHz、 $1/f = 2$  ns の等間隔マルチバンチ・モードで運転されているとします。検出器から最大幅 2 ns 以下の高速パルスが取り出されるなら、 $\tau$  の条件式  $\Delta T < \tau < 1/f$  を満たすので、 $k=1$  の場合となります。式(2)、(3)より  $m = f(1 - \exp(-\epsilon n / f))$  となり、この場合は 1 秒あたりの入射光子数  $n$  が大きくなると、どちらのモデルでも  $f$  の値、500 MHz に近づくことがわかります。毎秒あたりの入射光子数がさらに大きくなり  $\epsilon n$  が 500 M 以上の場合は、1 バンチ中で発生した X 線を観測する平均値  $\mu$  が 1 より大きくなりパルスが重なってしまいます。計数システムが計数と同時に、重なったパルスの波高を区別できないなら、出力計数値は 500 MHz で飽和します。一方、検出器の最大パルス幅が 2 ns 以上の場合、2 ns 間隔で X 線が入射して、それに応じて検出器が応答する確率が大きくなると出力パルスが重なってしまいます。重なった出力パルス幅に応じて不感時間が増加していくとき、計数システムは麻痺型応答になることが予想できます。式(2)を  $n$  について微分して 0 となる条件から最大計数率は  $m_{\max} = (f/k)(k-1/k)^{k-1}$  と求められ、 $k=2$  のときは  $1.25 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$  となります。ただし、実際の検出器には増幅器出力の「ベースラインシフト」(入力計数率が増加するにつれて増幅器の信号電圧ゼロレベルが上昇する) が起きて波高弁別器の閾値を越えるパルスが減少、その一方、同じタイミングで入射する X 線が増加、パルスが積み重なって波高が大きくなります。すると、ある電圧レベルを超えるパルス数が維持されて波高弁別器の出力計数率は飽和するような応答を示すと考えられます。パルス波形や波高弁別器の設定値 (例えば、入力パルス波高の  $1/10$  か  $1/2$  か) によっても影響を受けます。3-2で紹介したシステムでは、出力パルス幅は  $k=2$  の場合に相当、主に「ベースラインシフト」により 1 個目の APD の出力計数率  $m$  が  $10^8 \text{ s}^{-1}$  手前付近で飽和する応答になりました。光源加速器の運転モードや計数システムの構成など、実際の条件は複雑ですが、このような考え方でシステムの振る舞いを予想できます。

### 3.4 時間分光測定への応用

Si-APD 検出器のサブナノ秒時間分解能を積極的に利用する測定は核共鳴散乱実験から始まりました。この分野の

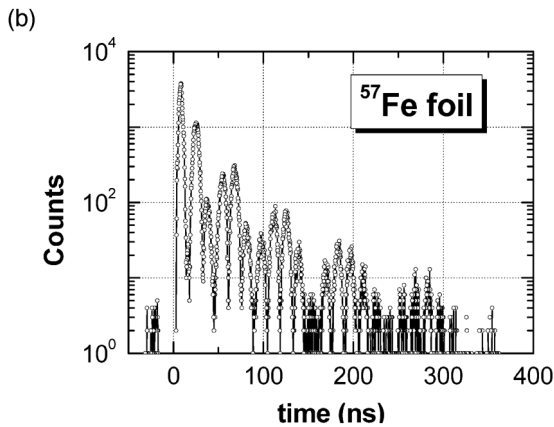
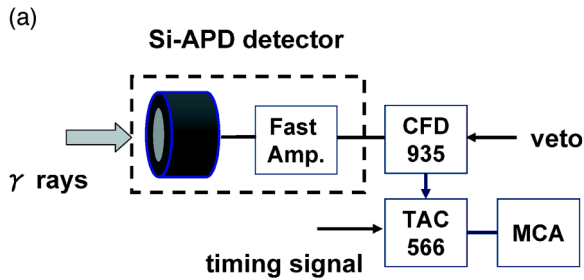


Fig. 6 Si-APD 検出器による核共鳴時間分光測定。(a)時間分光システムの場合：Si-APD 素子の信号を高周波増幅器 (Fast Amp.)、コンスタントフラクシオン波高弁別器 (CFD)、時間-波高変換器 (TAC) で処理。マルチチャンネルアナライザ (MCA) で記録。(b)は Fe-57 (鉄箔) の核共鳴前方散乱時間スペクトル。

最近の Si-APD 利用状況は文献 7) を参考にしてください。核共鳴散乱実験で使われる時間分光システムの例を Fig. 6(a) に示します。波高弁別器 (CFD) によるタイミング信号の取り出し、それを基準信号 (加速器が電子バンチを加速するタイミングと同期させた信号がよく使われます) と比較して時間差を記録していきます。時間差を電圧値に変換して、その波高のパルスを入力するのが時間波高変換器 (TAC) です。TAC はアナログ回路ですが時間分解能が優れ、10 ps 程度の精度があります。

Si-APD 検出器によって測定された核共鳴時間分光スペクトルの例を Fig. 6(b) に示します (SPring-8 BL09XU での測定)<sup>8)</sup>。鉄 57 は 14.4 keV に原子核の励起単位 (寿命: 141 ns) を持ちます。試料の鉄箔に 14.4 keV の X 線を入射し共鳴励起後、入射ビーム方向に放出される 14.4 keV の  $\gamma$  線 (前方散乱) を Si-APD アレイ検出器 (ピクセルサイズ:  $0.5 \times 1 \text{ mm}^2$ , 空乏層厚み  $44 \mu\text{m}$ ) で検出し、Fig. 6(a) のシステムで測定しました。時間 0 ns では原子核の周りの軌道電子による強い散乱が検出器に入射しますが、波高弁別器に veto 信号を入れて電子散乱部分の時間領域は信号を出力しないようにします。電子散乱から時間遅れで観測されるのが原子核からの  $\gamma$  線による「量子ビート」です。原子の内部磁場などによって原子核が微細なエネルギー準位構造をもっており、それぞれの準位から脱励起し

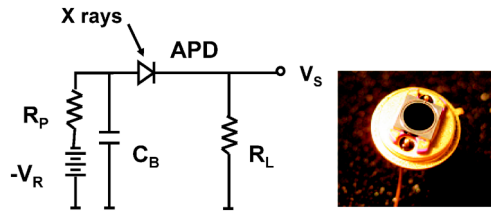


Fig. 7 Si-APD の配線例。右側は Si-APD (浜松ホトニクス社製, 3 mm 径) の写真。

た  $\gamma$  線が干渉して時間スペクトルに独特の構造が観測されます。この測定での時間分解能は 440 ps でした。3-1 で説明したように、APD 空乏層で X 線や  $\gamma$  線を直接検出する方式では、時間分解能は主に電子が増幅領域まで移動する時間によるので、空乏層が薄いほど時間分解能は向上します。空乏層が  $100 \mu\text{m}$  なら半値幅で 1 ns,  $10 \mu\text{m}$  なら 100 ps ということになります。

### 3.5 使い方

いまのところ、高速パルスを入力する Si-APD 検出器をメーカーから入手する方法は実質的に特注のみにとどまっています。もしメーカーに製作をお願いできない場合は、APD 素子から増幅器へ電流を導くところは比較的簡単ですので自分で組み立てて使ってみましょう。ただし、時間幅の短いパルスを取り出すためには工夫と注意が必要です。

Fig. 7 のように配線して使います。「矢印」のような記号はフォトダイオードと同じです。p 側をプラスにすると p から n に向けて電流が流れる (順電流) ことを示します。検出器として使う場合は放射線が入らない状態では電流が流れないように逆バイアス電圧 ( $V_R$ ) を加えなくてはなりません。つまり n+側がプラスになるように電圧をかけます。相対的にそうなればいいので、n+側電極を接地して n+側からマイナス信号を取り出したいときは、p+側にマイナス電圧をかけます。加える電圧は APD の空乏層の厚みで変わります。リーチスルー型 APD では薄いものは低電圧の印加で空乏層が端まで到達します。空乏層が  $30 \mu\text{m}$  までなら 150 V 以下、 $150 \mu\text{m}$  になると 500-600 V 以上の電圧印加が必要になります。素子購入時にメーカーが付けてくれるテストシートに増幅度 50 のときの印加電圧の値などが書かれているので参考にしましょう。最大の増幅度で使いたい場合はブレイクダウン電圧 ( $V_B$ ) の数 V から 10 V 程度手前の値で設定します。 $V_B$  の値もテストシートに記載されています。ただし、増幅度を大きくするほど増幅による出力の揺らぎが大きくなりエネルギー分解能が劣化するので注意が必要です。

Fig. 7 の回路は電圧印加によって負荷抵抗 ( $R_L$ ) に電流が流れ、その部分の電圧 ( $V_S$ ) の変化がパルスとして観測できるようになっています。保護抵抗 ( $R_P$ )、バイパスコンデンサ ( $C_B$ ) も重要です。セラミックコンデンサや

皮膜抵抗など、高周波特性が優れた種類のものを使ってください。 $C_B R_P$  の積が逆バイアス電圧の時定数を与えます。出力パルス幅よりも十分長く、かつ長すぎない時間とすることが必要です。 $R_P=10\text{ k}\Omega$ 、 $C_B=1\text{ nF}$  なら  $C_B R_P=10\text{ }\mu\text{s}$  となります。信号ケーブルを配線するときは浮遊容量を減らすため、APD も含めて電気部品のリード線をできる限り短く接続することが速いパルスを得るためのコツです。信号ケーブルを基板グラウンドのすぐ近くまで持っていき、シールド線も短く配線することが大切ですし、なるべく小さい部品を使ったほうがよいでしょう。印加電圧側の配線は APD 素子や配線用の基板を収める検出器ケースが外部のノイズから遮断されて接地されていれば、それほど気を使わなくても大丈夫です。ただし、信号出力コネクタは、インピーダンス  $50\text{ }\Omega$  となるように注意してください。高速パルス回路はパルス信号の反射が起こらないようにするために入力・出力インピーダンスを  $50\text{ }\Omega$  に統一する約束があります (NIM 規格)。これが守られていないと反射波が何回も重なり合って振動が生じパルスの形が崩れてしまいます。APD の配線がうまくつながっているか、素子が正常かどうかは、ダイオードチェック機能付きのテスターを利用するのが便利です。

あとは X 線を検出器に入射して、増幅器出力の信号をオシロスコープで観察しましょう。高速パルスを観測するときのオシロスコープの周波数帯域は  $500\text{ MHz}$  以上をお勧めします。オシロスコープで信号を観測するときにも入力インピーダンスを  $50\text{ }\Omega$  にセットするのを忘れないようにしましょう。逆バイアス電圧をゆっくり上げていってビーム入射によるパルスが観測できたら OK です。Si-APD の増幅度は温度に依存し、ブレイクダウン電圧  $V_B$  の変化量でマイナス数  $V/^\circ\text{C}$  程度で変化します。温度変化の大きなところで使用する場合は温度制御を行うことがあります。一定の低温で動作させれば同じ電圧での増幅度は増加し熱雑音が低減できるのでエネルギー分解能も向上して一石二鳥かもしれません。

#### 4. シンチレーション検出器

シンチレーション検出器は放射光利用が始まったところから X 線検出器として使用されてきたもののひとつです。沃化ナトリウム (タリウム添加) 単結晶を搭載した NaI (Tl) シンチレーション検出器がもっともよく知られており、今もたいていの X 線ビームラインに備えられています。シンチレーション検出器は  $\gamma$  線や中性子計測でも使われるため、多くの放射線機器メーカーが取り扱っています。国内の放射光施設でよく使われているシンチレーション検出器のメーカーを「利用情報 3」に載せます。

##### 4.1 シンチレーターと光電子増倍管

NaI (Tl) シンチレーション検出器を例に説明します。

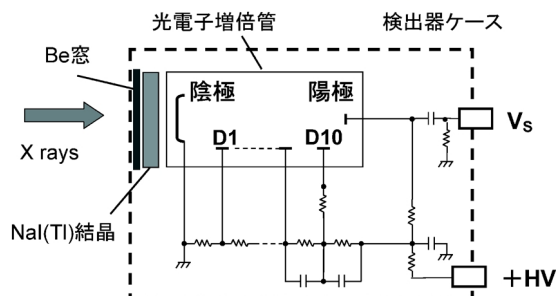


Fig. 8 NaI (Tl) シンチレーション検出器 (陰極接地・増幅器なし) の模式図。D1-D10はダイノード。光電子増倍管 (浜松ホトニクス社製 R980) と Be 窓付き NaI (Tl) シンチレーター (応用光研工業株式会社 SP-10 装着品。手前) の写真も示す。

Fig. 8 は検出器の模式図です。この検出器を分解すると、X 線入射窓 (ベリリウム製) の裏に透明な NaI (Tl) 単結晶 (湿気を吸って溶けるため普通はガラスで封じ切っている) があること、結晶が光学グリースにより光電子増倍管 (Photomultiplier Tube, PMT) のガラス窓部に密着されている様子がわかります (シンチレーター結晶や PMT は Fig. 8 の写真参照)。さらに光電子増倍管に高電圧を印加するためのディバイダ回路が納められ、PMT 電流を電圧信号に変える増幅器が組み込まれているものもあります。NaI (Tl) シンチレーターは原子番号 53 の重い元素である沃素を含む透明な固体で、密度が  $3.67\text{ g/cm}^3$  と比較的大きいものです<sup>9)</sup>。これは光子を吸収するうえで有利で、 $20\text{ keV}$  までの X 線なら  $1.5\text{ mm}$  の厚さの結晶でほぼ  $100\%$  吸収されます。X 線がシンチレーターに吸収されると固体中で電子が伝導帯に励起され、それがタリウムによって形成された発光準位に捕捉されシンチレーション光を出して安定化します。NaI (Tl) の場合は  $415\text{ nm}$  をピーク波長とする光が、入射放射線のエネルギー  $1\text{ MeV}$  あたり  $38000$  個放出されます<sup>9)</sup>。発光量はエネルギーに比例するので  $8\text{ keV}$  の X 線 1 個では約  $300$  個です。光る強さや減衰の具合はシンチレーターの種類や添加される元素によって変わります。NaI (Tl) 結晶はとてよく光るシンチレーターとして知られてきました。

シンチレーション光はシンチレーター表面やシンチレーターを覆う反射材で反射され PMT の受光窓に入ります。PMT のガラス面の内側にはアルカリ金属 (アンチモン、セシウムなど) の薄い膜で作られた光電変換面があって、シンチレーション光が入ると、ここで光電子が放出されますがシンチレーション光 1 個あたり何個の光電子が発生するか (量子効率) が十分に大きい必要があります。通常

は20%ほどです<sup>10)</sup>。PMTの内部は真空中で、光電変換面は陰極(カソード)になっています。発生した光電子は最後の陽極(アノード)に向かって電場にそって加速され8-10段のダイノード電極に次々に衝突して2次電子を発生させ電流増幅が行われます。光電子が最初に発生したときの信号量はけっして大きくないのですが、PMTの電流増幅度が $10^5$ から $10^6$ ととても大きいためX線でも十分な波高を持つ電圧パルス信号が得られるのです。これまでPMTはガラス管製が普通でしたが、最近では金属製で小型、薄型、16あるいは32個の多チャンネルの読み出しができるものも普及してきました<sup>10)</sup>。小型化、高密度の実装が可能です。

#### 4.2 シンチレーターの特性と検出器の性能

シンチレーターは、X線を確実に吸収し、その後でたくさんシンチレーション光を出し、かつ短い時間のうちに発光が終息するほど、パルス計測のうえで有利です。X線や $\gamma$ 線などの光子と相互作用が大きいのは、原子番号の大きな元素でできた密度の大きな物質で、しかもシンチレーション光が外部に抜けやすいもの、透明な結晶がよいということになります。発光の効率は沃化ナトリウムの場合のタリウムのように、わざと不純物を添加して発光しやすいエネルギー状態ができやすいものが使われています。シンチレーション光がたくさん発生して効率よく集められれば、X線吸収で発生したエネルギーを効率よく電気出力に変換できるので統計のばらつきが小さく抑えられ、エネルギー分解能が向上します。発光が短時間で収束すれば、出力パルスの幅を短くしても大部分の光が集められ、高い計数率でもパルスが重なりにくい計測システムを作ることが可能になります。つまり検出効率が大きく、また発光効率が高く発光の減衰時間が短いものほど優れた検出器となります。シンチレーターには固体、液体、無機、有機などさまざまな種類のものが知られています。Table 1にX線計測で使われる代表的なものをまとめました<sup>11)</sup>。最近、NaI(Tl)結晶よりよく光って発光の減衰時間が十分の一という画期的なシンチレーターLaBr<sub>3</sub>:Ceが登場しています<sup>12)</sup>。

#### 4.3 シンチレーターの選択と使用方法について

シンチレーション検出器は扱いやすさが特徴です。放射光実験でよく使われるNaI(Tl)やYAP(Ce)のような固体結晶のシンチレーション検出器の場合は、高電圧をかけること以外はめんどろなことはなく、小型で設置も簡単、性能も安定しています。PMTを必要な増幅度で動作させるために電圧を印加するだけでX線のパルス信号が得られるわけです。ただし、目的に応じて使い分ける必要があります。

NaI(Tl)検出器の場合は発光寿命が230-250 nsと比較的長いため、時間幅の短いパルスを得るのには適していません。でも発光効率が大きな結晶なのでシンチレーション検出器のなかではエネルギー分解能はかなり良いといえます。しかもエネルギーの高いX線についても検出効率が高いので、高エネルギー領域までのエネルギー弁別測定に向いています。検出器ケース内に前置増幅器が組み込まれているものは、そのまま波形整形用の増幅器につなぐか、そうでないものは前置増幅器を介して使用することになります。

発光寿命が25 nsと速いYAP(Ce)のようなシンチレーターの場合はパルス信号を短い時間幅(数十ns以下)で取り出すように設計されます。この場合はSi-APDと同様な高速パルス処理システムが採用され、取り出されるパルスは入出力インピーダンスを50  $\Omega$ とする回路で処理する「約束」を守るようにします。PMTの出力または増幅器からの出力を波高弁別器に入力し、その出力はふつう負極性・波高-0.8 VのFast-NIM信号(NIM規格で定義)になります。それをスケーラーで計数します。高速パルスの波高分布を記録できる回路も市販されています(利用情報3)。

シンチレーション検出器を使う際に注意することとして、高電圧印加があります。エネルギースペクトル測定用の検出器はシンチレーターを扱いやすくするため、PMTの陰極(光電面)側を接地し陽極にプラス電圧を印加するのがふつうです(Fig. 8)。一方、高計数率用検出器はコンデンサを介さずに負極性の速いパルス信号を取り出すためにマイナス電圧を印加します。また、 $10^7 \text{ s}^{-1}$ を越えるような強いX線ビームを検出器に直接入射しないようにすることです。PMTの光電面を傷めたり、大きな増幅度と

Table 1 X線実験で使われるシンチレーターの例<sup>11)</sup>

	NaI(Tl)	YAP(Ce)	CsI(Tl)	BaF <sub>2</sub>	GSO(Ce)
Density (g/cm <sup>3</sup> )	3.67	5.37	4.51	4.89	6.71
Light Output (%NaI(Tl))	100	40	45	20/2	20-25
Wavelength (nm) (Max.emission)	415	370	550	325/220	440
Decay constant (ns)	230-250	25	900	630/0.6	30-60
Photon yield (300 K, ph/MeV)	38000	10000	52000	10000	8000-10000

電流で動作している電極部分や電流回路を損傷することが起こります。また入射するビーム強度によってはシンチレーター結晶そのものの性質を変えてしまうこと（結晶欠陥である色中心の生成など）も起こりえます。シンチレーターと PMT とをそれぞれ別々に交換することができるので PMT とシンチレーターを組み合わせるタイプのものが便利で経済的かもしれません。その場合は、強いビームを入れてしまって大きな暗電流が流れるなどの異常がみつかったら、まず PMT を交換してみるとよいでしょう。

## 5. X 線パルス検出器の今後

今回の記事では、おもに X 線の高計数率測定やタイミング検出に用いられる Si-APD 検出器と、より一般的に X 線の計数実験などに用いられているシンチレーション検出器を紹介しました。これらの検出器は、それぞれの特徴を活かして今後も放射光実験において広く使われるものと考えられます。シンチレーション検出器は「検出効率」の高さを活かす使い方が重要でしょう。高速化、長時間分解能化については今後のシンチレーターの開発研究に期待したいところです。アレイ化は Si-APD の素子 1 個の有効面積が小さいという弱点を補う方法で、1 次元、2 次元配列により応用を広げる上で重要ですが、電子回路系の集積度の向上、しかもナノ秒幅の信号を扱える高感度の高速パルス処理システムの開発が必要になっています。最近、ガイガーモードで作動させる Si-APD を PMT の代わりに使うシンチレーション検出器<sup>13)</sup>が話題になっています。これはガイガーモード作動の Si-APD が PMT 並みの大きな増幅度を有しながら PMT ほどの高電圧が必要でなく磁場にも強いという利点があるからですが、これからはシンチレーターや半導体検出器が融合しながら特徴を伸ばしてパルス検出器の可能性を広げて行くと思えます。放射光利用分野からもそのようなアイデアを生み出していけるように開発を進めたいものです。

### 利用情報

- シリコン・アバランシェフォトダイオード (Si-APD)  
浜松ホトニクス㈱  
([http://jp.hamamatsu.com/products/sensor-ssd/pd078/index\\_ja.html](http://jp.hamamatsu.com/products/sensor-ssd/pd078/index_ja.html))  
Radiation Monitoring Devices, Inc.  
(<http://www.rmdinc.com/products/p006.html>)  
PerkinElmer Optoelectronics  
(<http://optoelectronics.perkinelmer.com/catalog/Category.aspx?CategoryName=Avalanche+Photodiodes>)
- Si-APD 検出器システムで使われる高速信号処理回路

ORTEC (<http://www.ortec-online.com/products.htm>)  
パルス増幅器、波高弁別器など。

Phillips Scientific

(<http://www.phillipsscscientific.com/>) パルス増幅器、波高弁別器など。

キーコム㈱

(<http://www.keycom.co.jp/jmap/xpr.html>) パルス増幅器。

ツジ電子㈱

(<http://www.tsuji-denshi.co.jp/index.html>) 高速スケララーなど。

- シンチレーターおよびシンチレーション検出器：

応用光研工業㈱

([http://www.oken.co.jp/web\\_oken/indexjp.htm](http://www.oken.co.jp/web_oken/indexjp.htm)) シンチレーター、検出器、計測回路(高速パルス波高分布)。

Saint-Gobain

(<http://www.detectors.saint-gobain.com/>) シンチレーター、検出器。

ORTEC

(<http://www.ortec-online.com/detectors/photon/b9.htm>) 検出器。

CANBERRA

(<http://www.canberra.com/products/512.asp>) 検出器。

### 参考文献

- H. Geiger and W. Müller: *Naturwissenschaften* **16**, 617 (1928).
- F. Scholze, H. Henneken, P. Kuschnerus, H. Rabus, M. Richter and G. Ulm: *Nucl. Instr. and Meth.* **A439**, 208 (2000).
- P. P. Webb, R. J. McIntyre and J. Conradi: *RCA Rev.* **35**, 234 (1974).
- S. Kishimoto, N. Ishizawa and T. P. Vaalsta: *Rev. Sci. Instr.* **69**(2), 384 (1998); B. Etschmann, K. Saito, N. Ishizawa and S. Kishimoto: *Photon Factory Activity Report #17*, p. 323 (2000).
- U. W. Arndt: *J. Phys.* **E11**, 671 (1978).
- S. Kishimoto: *Nucl. Instr. and Meth.* **A397**, 343 (1997).
- A. Q. Baron, S. Kishimoto, J. Morse and J-M Rigal: *J. Synchrotron Rad.* **13**, 131 (2006).
- S. Kishimoto, Y. Yoda, M. Seto, Y. Kobayashi, S. Kitao, R. Haruki and T. Harami: *Nucl. Instr. and Meth.* **A513**, 193 (2003).
- <http://www.detectors.saint-gobain.com/home.asp>; NaI(Tl) Product Data Sheet
- 浜松ホトニクス㈱カタログ「光電増倍管と関連製品」。
- S. Baccaro, K. Blažek, F. de Notaristefani, P. Maly, J. A. Mares, R. Pani, R. Pellegrini and A. Soluri: *Nucl. Instr. and Meth.* **A361**, 209 (1995).
- E. V. D. van Loef, P. Dorenbos, C. W. E. van Eijik, K. Kramer and H. U. Güdel: *Appl. Phys. Lett.* **79**, 1573 (2001).
- D. Renker: *Nucl. Instr. and Meth.* **A567**, 48 (2006).