

X線検出器

～放射光 X線利用を中心に～

1. はじめに

X線は、原子内の電子遷移によって発生する「特性 X線」と呼ばれる光子や、荷電粒子が原子核と電磁相互作用によって加速度を受けるときに発生する光子のことをいう。一般的には 100 eV から 100 keV 程度のエネルギーを持つ光子のことを指す場合が多い。X線の発見者であるレントゲンの名前を持つ医療用人体撮像で広く知られている。近年では「放射光 X線」を使った研究に関連して、その名前を聞くことが多くなった。放射光は加速器によって作り出される人工の新しい強力な光である。本稿では放射光 X線利用において活躍する X線検出器を中心に解説する。

2. 放射光 X線の利用

2.1. 放射光とその特徴

シンクロトロン電子加速器の偏向電磁石を光源とする放射光の利用は 1970 年代から本格的に始まった。日本でも専用放射光施設として東大・物性研の SOR-RING が建設され、1983 年には高エネルギー物理学研究所（当時）の 2.5GeV の放射光実験施設（Photon Factory、PF）が大学共同利用実験を開始することで X線領域の放射光利用も本格的に始まった。その後、より強力な挿入光源の開発進展、1997 年には大型放射光施設 SPring-8 の利用開始、2012 年には X線自由電子レーザー施設 SACLA の運用が開始されている。

放射光 X線は以下の特徴がある。1) 強度・指向性：ミリサイズ以下の微小な試料にも単色でさえ 1 秒あたり 10^{10-13} 個もの光子を照射できる。2) エネルギー選択性：赤外から X線の広いエネルギー・波長領域に渡って放射されるため、実験に必要なエネルギーの光を自由に選択し、またエネルギーを変化させて測定することができる。3) パルス性：1 マイクロ秒からナノ秒の間隔を持つパルス光源のため、照射の周期性を利用する時間分

解実験が可能である。4) 偏光性：磁気円二色性など偏光方向を変えて試料の反応の差を引き出す測定が可能となる。これらの特徴を使って物質の構造や状態の変化を知ることができる。ここで登場するのが検出器である。試料からの回折 X線による二次元画像を記録し、放出される蛍光 X線のエネルギー分析を行うには X線検出器が必要である。

2.2. X線を利用する放射光実験

タンパク質構造解析を例に放射光 X線を使う実験の様子を説明する。タンパク質を構成する分子が規則正しく並んだ「結晶」を用意する。たとえば 100 μm オーダーの大きさで、その結晶を 360 度回転できる軸の先に取り付ける。特定のエネルギーに X線を単色化し、その X線ビームが結晶にうまく当たるように位置調整を行う。そのうえで試料を回転させながら X線の二次元回折 X線像を二次元 X線検出器によって記録していく(図 1)。X線回折は、試料に入射される X線の波長 λ (Å)、回折を起こす結晶面の間隔 d (Å)、入射ビームの方向からの回折線の角度 θ (°) を使って、よく知られた Bragg の式(1-1)の関係を満たす。

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (1-1)$$

n は整数である。実際には原子の位置を座標で与え X線をベクトルで扱い、測定した回折 X線の強度分布から温度や吸収、偏光などの補正を行う

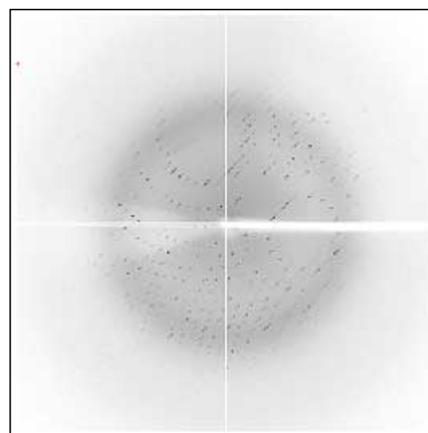


Fig. 1 : タンパク質結晶からの X線回折像の例

ことによって結晶中の電子密度分布が求められる。電子密度の分布は結晶中の原子の配列、すなわち、どの原子がどのような距離と角度で並んでいるか、の情報をもたらす[1]。正確な情報を得るには、二次元 X 線検出器は回折斑点の位置と強度分布を正確、鮮明に記録する必要がある。

放射光 X 線を用いる別の実験として XAFS (X-ray Absorption Fine Structure) と呼ばれる実験手法がある。こちらは試料に入射する X 線のエネルギーを変化させながら計測する。名前にもあるように、試料に X 線を入射した後、試料で吸収され透過する X 線強度を測定して得られる「X 線吸収微細構造」を記録する(図 2)。たとえば試料が酸化銅 CuO の場合、銅の K 吸収端 (8.9 keV) 周辺 (~50 eV 程度) の微細構造は価数や電子状態を反映し金属銅とは異なる。数 100 から 1000 eV 離れた領域の構造は、X 線吸収時に放出される光電子の散乱過程を反映して Cu と O 原子の距離などの局所構造の情報を反映している[2]。ここで X 線検出器は試料に入射する X 線ビームと透過するビームの強度を正確に計測する役割を担って

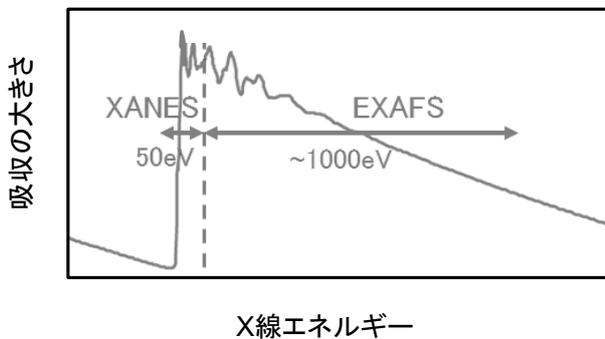


Fig. 2: X 線吸収微細構造の例：XANES は吸収端近傍、EXAFS は吸収端から離れた領域の構造をいう。

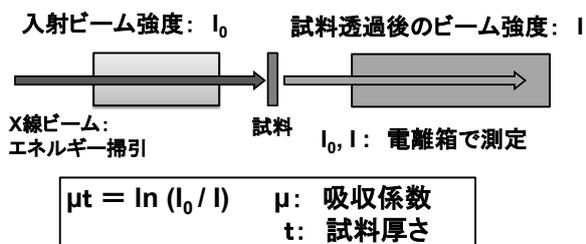


Fig. 3: XAFS 測定 の原理

いる。図 3 に X 線検出器 (電離箱) を使った測定 の原理を示す。

3. 放射光実験で使用される X 線検出器

3.1. 何がどこで使われているか

放射光実験で使われる検出器には試料に放射光が入射した後に発生する電子やイオンを検出する場合もある。X 線検出器としては入射ビームとしての X 線や試料からの回折・散乱・蛍光 X 線を検出することが求められる。そのため、ガス検出器、シンチレーション検出器、半導体検出器などが使われてきた。その目的は「強さ」を測るだけでなく放射線の種類を見分けること、エネルギーを決めること、検出した位置、タイミングを知ることなどである。

X 線回折実験ではタリウム添加ヨウ化ナトリウム結晶 (NaI : Tl) を使ったシンチレーション検出器が放射光 X 線実験が始まったころから X 線パルス計数のために使われ続けている (図 4)。計数率のダイナミックレンジを広く確保したいときにはシリコン・アバランシェフォトダイオード (Si-APD) を使った積層型検出器が四軸 X 線回折計とともに用いられている (図 5)。高純度ゲルマニウム (HP-Ge) 検出器はエネルギー分析が必要な測定で多く使われる。先の XAFS 実験では 19 個のゲルマニウム素子 (100 mm², 厚さ 10mm) を持つ検出器が試料からの蛍光 X 線の強度をエネルギー選別しながら測定するために利用されている (図 6)。



Fig. 4: NaI:Tl シンチレーション検出器 (OKEN SP-10)

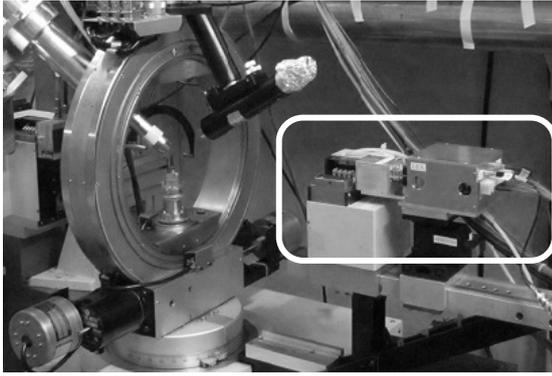


Fig. 5: Si-APD 積層型検出器と四軸 X 線回折計。白枠内が検出器。

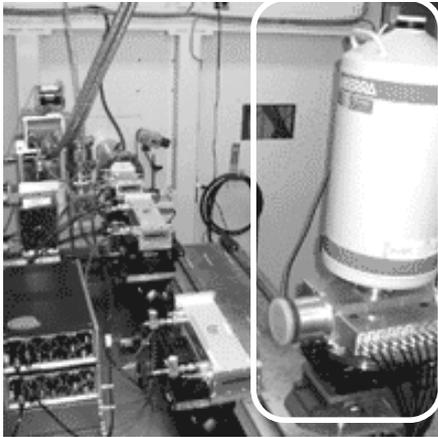


Fig. 6: 19 素子 HP-Ge 検出器。白枠内
が検出器。その左側に電離箱がある。

放射光入射 X 線ビームの強度をモニターするためにはガスフロータイプの電離箱が便利で長い間使われてきた。XAFS 測定の場合だけでなく、入射ビームの時間的な強度変動を記録して実験データの解析に反映させる上で重要な役割を果たしている。最近では、X 線ビームがうすい散乱体を透過するときの散乱線を、複数（4 個）の半導体フォトダイオード（シリコンやダイヤモンド製）を使って測定しビーム位置と強度の変化を記録するシステムも導入されている。

3.2. 放射光源の発展と実験の要求

21 世紀に入り放射光リング型加速器のエミッタンスは nmrad オーダーまで低下している[3]。文献[4]に解説される放射光光源としての挿入光源の開発も一層進んだ。そのため、リング型光源

加速器の X 線ビームラインで得られるビームは 10^{20} (光子数/秒・ $\text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 \cdot 0.1\%$ バンド幅) を超えるような高輝度が得られるようになった。近年では X 線自由電子レーザー施設 SACLA の利用が可能になるなど、ピコ秒以下、フェムト秒オーダーの時間分解実験も可能となっている。また、コヒーレント光の利用は、1 パルスで 10^{11} 個オーダーの光子によって 1 ショットでの構造解析を可能にする。ただし、これらの光源性能を十分に利用するには X 線を検出する検出器の高度化が不可欠である。とくに検出器の性能として重要となっているのは、1) 入力 X 線強度の向上に対応して応答できるダイナミックレンジの広さ、2) イメージング手法の発展に伴って画像（二次元）記録の要求の高まり、3) 撮像の質に関連して空間分解能の向上、4) 迅速な測定と時間変化の記録のために画像読取り速度の向上があげられる。

放射光分野での検出器開発への要求に応じて、スイスのポールシェラー研究所 (PSI) の高エネルギー物理実験分野での開発から生まれたメガピクセル級の大型シリコン・ピクセルアレイ検出器が、コマーシャルベースで製作され世界中の放射光施設に普及することになった[5]。また日本でも SACLA のように先端的大型施設の立上げに伴って、二次元検出器開発チームが数 10 人規模で組織され XFEL 実験のためのシステム開発が本格的に行われている。

4. ピクセルアレイ検出器の開発

X 線検出器のセンサーを mm サイズ以下にピクセル化しピクセルごと独立に信号処理して二次元の空間分解能を持たせることは、放射光分野でもタンパク質構造解析での測定高速化の需要により大きく進んだといえる。読み出し速度や信号電荷量のダイナミックレンジに制約があった CCD 検出器に変わって、同じシリコン製センサーのピクセルアレイ検出器 (PAD) から開発が進められてきた。このタイプの検出器は 1) ハイブリッド型と 2) モノリシック型の二つに分けて考

えられる。1) はセンサーと信号処理回路が別のプロセスで製作されるもの、2) は共通のシリコン基板から製作されるものである。1)はセンサーと電子回路がフリップチップ・バンプボンディングで接合される。センサーと回路の各々は先端的・最適な技術を使って製作できるメリットがある一方、バンプボンディングによるピクセルサイズの制約や静電容量が付加され雑音につながるデメリットがある。逆に2)はバンプボンディングがないことで、より微細なピクセルや低雑音を実現しやすい一方で、製造上の制約やセンサー部の電荷が回路部に影響しやすいなどの問題がある。放射光分野でよく知られる PAD である Dectris 社の PILATUS は 1)のタイプである。KEK では素核研・新井教授のグループを中心に Silicon-on-Insulator(SOI)技術を使った 2)のタイプである PAD チップの開発が取り組まれている[6]。センサーに生じた電荷を積分して読み出すか(積分型)、パルスとして1光子を区別して読み出すか(計数型)は電子回路系に依存する。積分型は、同じタイミングに複数の光子が検出器の同じ場所に入射するような場合に適している。計測時間を長くすると雑音成分も積分され信号/バックグラウンド比が悪化しやすい。計数型は、雑音と信号の区別が比較的容易で時間積分によるダイナミックレンジの向上を行いやすい。表1には代表的な計数型 PAD で採用されるチップについて主な仕様をまとめた。当初のピクセルサイズは、イメージングプレート[7]や CCD 検出器の空間分

解能(半値幅) 100-200 μm に対応できる程度の細かさに留めて、より広い領域を受光できるようにする方向での開発が行われた。PILATUS 検出器はピクセルサイズ: 172 μm \times 172 μm であるが、6M ピクセル、有感面積 424 mm \times 435 mm という大型機種も有する。一方で、より精細な画像記録の要求を満たすために 100 μm 以下のピクセルサイズのチップ開発が行われた。Medipix は 55 μm \times 55 μm サイズを実現している。一定の有感面積を考えるとピクセルサイズを小さくすることは、データ量を増加させることに注意しなければならない。カウンタのビット数も同様で、ビット数が大きければ計数のダイナミックレンジが広がるが、扱うデータ量を増加させる。放射光実験では測定の迅速化や試料構造の時間変化を測定するときに X 線回折の画像読取り速度を速くする要求がある。そのため当初の PAD の読取りは数 10 Hz であったが、最近では面積 77 mm \times 80 mm、1M ピクセル、12 ビットで kHz オーダーの読出し速度が実現されている[5]。X 線エネルギーが 10keV を越えるとシリコンの X 線吸収量が大きく減少する。通常の PAD の厚さ 300 μm のシリコンでは、20 keV の吸収は 25%にとどまる。そのため 20 keV を超える比較的高いエネルギーの X 線を検出したい実験のために、センサーをシリコンから CdTe や GaAs に置き換えたシステムも市販されるようになった[8]。

5. アバランシェ・フォトダイオード検出器

アバランシェフォトダイオード (APD) は固体内で電荷を増幅する機能を有する半導体素子である。実用化がもっとも進んでいるのはシリコン製 APD で電子増幅を利用する。フォトダイオードタイプの通常のセンサーと比べると高速性に優れた X 線検出器になる。以下、少し詳しく説明する[9]。

5.1. APD の構造と原理

PIN フォトダイオード (PIN-PD) から説明する。図 7 の上に PIN-PD の構造を示す[10]。シリ

Table 1: 計数型 PAD チップの仕様

	PILATUS3	EIGER	Medipix3
ピクセル・サイズ (μm)	172 \times 172	75 \times 75	55 \times 55
ピクセル数 (チップあたり)	60 \times 87 (5.2 k)	256 \times 256 (65.5 k)	256 \times 256 (65.5 k)
カウンタービット数	20	12	12 (x2)
プロセス	CMOS 0.25 μm	CMOS 0.25 μm	CMOS 0.13 μm
雑音レベル	0.4 keV	0.4 keV	0.3 keV
最大計数率	15 MHz	4.2 MHz	2.5 MHz

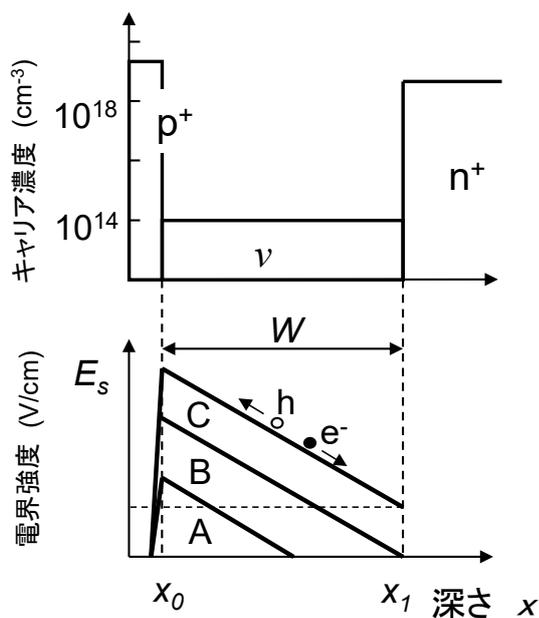


Fig. 7 : PIN-PD の構造と電界強度

コン中に、不純物による p, n 層と真性半導体と呼ばれる不純物濃度の低い領域 ($10^{13-16} \text{ cm}^{-3}$)、i 層が形成されている (p 型低濃度の場合なら π 層、n 型低濃度なら ν 層という)。PIN-PD 内部には、 p^+-i のように不純物濃度に数桁の差がある片側階段型接合が形成される。逆バイアス電圧印加なしの熱平衡状態でも一定の空乏層が形成される(図 7 下の A の状態)。電圧を印加すると、この部分から不純物濃度の低い側に空乏層が伸びる(B)。X 線入射によって空乏層内に電子正孔対が生じると、これらの電荷は電界によって各電極に収集される。電子のドリフト速度は電界強度に比例し、シリコン製 PIN-PD の場合は、ドリフト速度が $\sim 1 \times 10^7 \text{ cm/s}$ の飽和値 (E_s) に達するように電界強度を $\sim 1 \times 10^4 \text{ V/cm}$ より大きく保つように不純物濃度や厚みが設計され空乏層幅が W まで広がる(C)。1 個の光子が入射したときに得られる電荷量は 1 対の電子正孔対が生じる平均エネルギー ϵ から求められ、シリコンの場合 ϵ は常温 300 K で 3.63 eV である[11]。8 keV の X 線 1 個が入射すると最大 $8000/3.63=2.20 \times 10^3$ 個の電子正孔対が生じる。電荷量でいうと $3.53 \times 10^{-16} \text{ C}$ (クーロン) となる。X 線の入射によって空乏層内に生じた電子と正孔が電界によって加速され格子原子と衝

突、価電子を励起して新たな電子正孔対を作る。この現象が電子なだれ (アバランシェ) 増倍である。1 個の電子や正孔が単位距離移動したときに生成する電子正孔対の数はイオン化率と呼ばれ、電子の場合は α 、正孔の場合は β と表される。シリコンではそれらの比 $k=\beta/\alpha$ が 0.02~0.1 となり、他の半導体と比べて小さい。k が小さいとイオン化率が小さいほうの電荷による影響が小さく、ある大きさの増幅度を得る時の電荷量の揺らぎが小さい。シリコンの場合は電子による増幅が主で、 10^4 cm^{-1} 以上の十分大きな電子増幅は電界強度が $3 \times 10^5 \text{ V/cm}$ を超えるあたりから得られる。図 8 に示したリーチスルー型 (空乏層が接合部と反対側まで広がるように設計) のように、APD が PIN-PD と異なるのは $p-n^+$ 階段接合部で大きな電界強度となるように設計され増幅を可能にしていることである。X 線が Si-APD の空乏層内部でエネルギーを失って電子正孔対が生じたあと、印加電圧によって形成される電界によって $p-n^+$ 接合部まで電子を移動させ、 10^5 V/cm を超える高電界によって内部増幅を起こしパルス電流として出力を取り出す。8 keV の X 線 1 光子分、 $3.5 \times 10^{-16} \text{ C}$ の電荷が 10 pF のコンデンサに流入するとき、最大の出力電圧は $3.5 \times 10^{-5} \text{ V}$ となり、100 倍程度のゲインを持つ高周波アンプを通しても 3.5 mV の波高でしかない。もし APD の内部増幅によって 10-100 倍のゲインがアンプ入力より手前で得られるなら、アンプからの出力は 35-

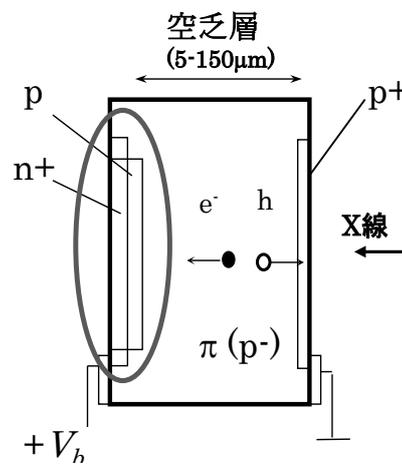


Fig. 8 : APD の構造

350 mV となる。アンプの回路雑音は通常数 mV 一数 10 mV 程度なので APD を使えば信号パルスを雑音から十分に分離できる。

図 7 下のように距離 0 から W の間で電子によってアバランシェ増幅が生じるとき、APD の増幅度 M は式 (5-1) で表される [12]。

$$M = \frac{1}{1 - \int_0^W \alpha e^{-\int_x^W (\alpha - \beta) dx'} dx} \quad (5-1)$$

印加電圧を上げて M が ∞ となると増幅が無限に持続する。その状態はブレイクダウンと呼ばれる。 α, β や W は逆バイアス電圧 V_b の関数であるため、 V_b やブレイクダウンに達する電圧 V_B を使って、増幅度 M は次のような経験式 (5-2) で評価されることも多い。ここで、 n_M は 0.1~0.5 程度の値である。

$$M = \frac{1}{1 - \left| \frac{V_b}{V_B} \right|^{n_M}} \quad (5-2)$$

雑音電流を十分低く保てるのは M が数 10 から 200 倍程度である。実際の APD は素子の内外で電圧降下が生じるため、出力は無量大ではなく一定の電流に制限される。この状態は気体検出器にならってガイガー (Geiger) モードと呼ばれ、ブレイクダウンを起こす電圧 V_B までの領域は比例モードと呼ばれる。ガイガーモード APD は、 10^5 ~ 10^6 の増幅度を活かしてシンチレーション検出器の受光素子として近年広く用いられている [13]。比例モード APD は条件を選べば比例計数管程度のエネルギー分解能が得られる。固体内の増幅では温度依存性が比較的大きく、温度変化の大きい環境下では出力の大きさが変わることには注意する必要がある。固体の格子振動が小さくなれば電界中を電荷が移動するときの平均自由行程は長くなるので、格子原子と衝突して 2 次電荷を生成するときの運動エネルギーは大きくなる。

したがって同じ印可電圧のときに得られる増幅度は温度が低いほど大きくなる。

5.2. X 線検出器としての APD

Si-APD に X 線を直接入射して 1 光子によるナノ秒幅の高速パルスを得ることができる。図 8 のリーチスルー型は深さ方向の電界強度が一様、比較的低い電圧で空乏層が厚く作れるなどの特徴がある。空乏層の全領域で飽和ドリフト速度 10^7 cm/s が達成されていれば、生成電荷は $100 \mu\text{m}$ の空乏層を 1 ns で移動する。浜松ホトニクス社製 8x2 アレイ (ピクセルサイズ: $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 、空乏層厚 $30 \mu\text{m}$) リーチスルー型 Si-APD と電圧ゲイン 100 倍の高周波パルス増幅器 (KEK 素核研との共同開発・ハイブリッド IC タイプ) を使って得た 5.9 keV の X 線 1 光子による出力パルスの例を図 9 に示す。印加電圧は -200 V、半値幅 1 ns、ベースライン上 2 ns 幅の高速パルスである。Si-APD は小さく薄いシリコンでできているため雑音も少なく、ナノ秒幅の高速パルスを使うことで出力計数率のダイナミックレンジは 10^{-2} から 10^8 s^{-1} の 10 桁に達する。高速出力パルスの立下り部分を使えばサブナノ秒タイミングを検出できる。入射 X 線がエネルギーを失う空乏層内厚み方向の位置によって、電子が空乏層内を移動して増幅領域に到達しパルス発生するまでの時間が異なるため、空乏層が薄いほどパルス発生タイミング分布幅である時間分解能が向上する。

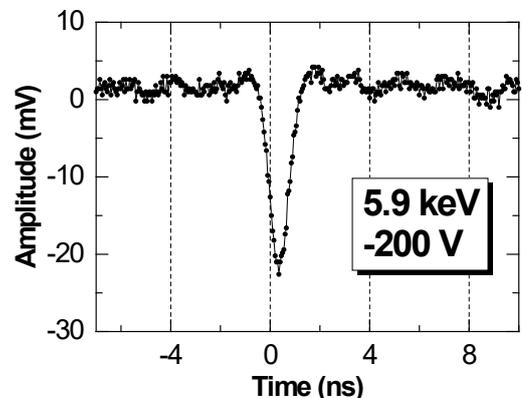


Fig. 9 : リーチスルー型 Si-APD による X 線 (5.9 keV) 出力パルス

5.3. Si-APD ピクセルアレイ検出器

4章のシリコン・ピクセルアレイ検出器のセンサー部に Si-APD を採用すれば、検出器自体の応答速度を 100 倍以上速くすることができる。放射光パルス X 線を使ったナノ秒オーダーの時間分解実験や時間分光実験への応用が期待できる。現在、100 チャンネル規模のリニアアレイシステムが開発されているので紹介したい。

図 10 は Si-APD リニアアレイ（浜松ホトニクス製 S5343-3174(X4)）の顕微鏡写真である。ピクセルサイズ： $H100\ \mu\text{m} \times V400\ \mu\text{m}$ 、128 個のピクセルがピッチ 0.15 mm で H 方向に並ぶ。有効長 19.2 mm、厚さは 10 μm である。BiCMOS プロセスによる高速アンプシェーパーディスクリ (ASD) 回路を搭載する ASIC (4 チャンネル/チップ、4mm 角) を KEK 素核研エレクトロニクス・システムグループの協力を得て製作しフロントエンド基板に搭載、時間幅 ΔT ごとに連続計数するマルチチャンネルスケーラ (MCS) として機能するシステムを開発した。64 チャンネルアレイ用最短 $\Delta T = 1\ \text{ns}$ の MCS システムは文献[14]、 $\Delta T = 0.5\ \text{ns}$ の MCS システムについて文献[15]に報告した。 $\Delta T = 0.5\ \text{ns}$ の MCS システムで測定した KEK PF リングマルチバンチ運転モードにおける X 線パルス時間構造を図 11 に示す。2 ns 間隔の X 線パルス列が時間分解能 (FWHM) 0.5 ns で観測されている。

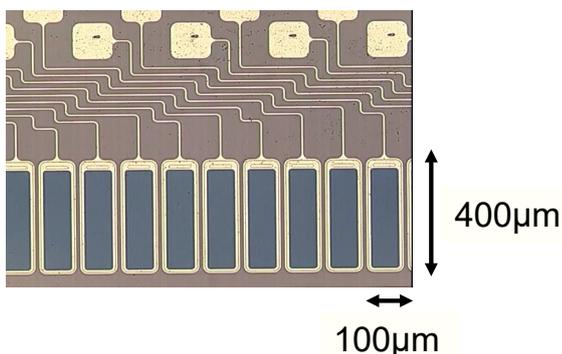


Fig. 10 : Si-APD リニアアレイ（浜松ホトニクス製 S5343-3174(X4)）の顕微鏡写真。ピクセルサイズ： $H100\ \mu\text{m} \times V400\ \mu\text{m}$ 、ピッチ 0.15 mm・128 ピクセル、有効長 19.2 mm、厚さ 10 μm 。

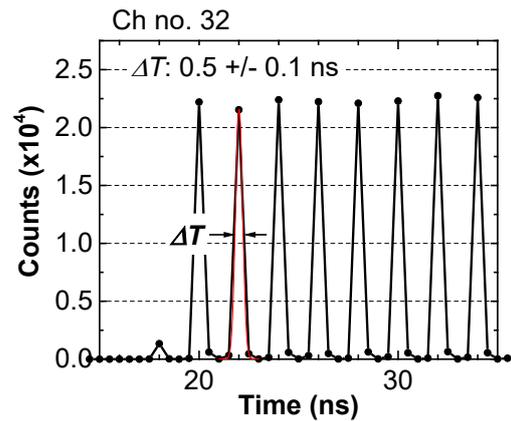


Fig. 11 : $\Delta T = 0.5\ \text{ns}$ の MCS システムで測定した PF リングマルチバンチ運転モード時間構造 (X 線エネルギー：8.0 keV)

6. 今後の放射光実験用 X 線検出器

4章で述べたように、放射光実験用二次元検出器はピクセルサイズを 50 μm 角以下、有感面積は 100 mm \times 100 mm 以上で、読取り速度（フレームレート）は 1 kHz 以上とするような開発が続いている。~400 ピクセルと小規模ながら ADC を搭載してピクセルごとにエネルギー分解能を持たせる二次元検出器システムも開発されている [16]。検出器ピクセルごとにメモリを搭載すれば 10 ナノ秒オーダーで時系列にカウント値を読み出すような機能をもたせることも可能になる。ピクセルの高機能化を制約しているのは微細 CMOS 回路技術とそのコストだろう。微細化は製作コストの大幅な上昇になる。今後、集積回路の微細化がさらに進み、3 次元 IC 技術が実用化されれば、これまでの制約は解消されるかもしれない。ただ、もっとも製造技術が進んでいるシリコン半導体センサーにしても製作コストが数億円規模になっており、研究分野や個別の研究機関を超えた開発の枠組みが必要となっている。

本稿では触れることができなかったが、軟 X 線用検出器についても 4keV 以上の「X 線」利用と同様に高機能を有する二次元検出器が今後必要

とされるだろう。物質・生命研究分野での放射光利用実験で活躍する検出器開発は、光源開発とともに今後も休みなく進めなければならない。

参 考 文 献

- [1] J. Drenth, 竹中ら訳 「タンパク質の X 線結晶解析法」、Springer (1998).
- [2] 宇田川康夫編、「X 線吸収微細構造」、学会出版センター (1993).
- [3] 田中 均、OHO'2013 テキスト、「X 線自由電子レーザー概論」(2013).
- [4] 土屋公央、OHO'93 テキスト、「挿入型光源」(1993).
- [5] Dectris 社 Web サイト:<https://www.dectris.com/>
- [6] Y. Arai *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A**636** (2011) 531.
- [7] J. Miyahara *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A**246** (1986) 572.
- [8] Spectrum 社 Web サイト :
<http://www.x-spectrum.de/products.htm>
- [9] 岸本俊二, 「放射線」, Vol. 29 No.1 (2003) 25.
- [10] 米津宏雄, 「光通信素子工学」、工学図書(1984).
- [11] R. D. Ryan, IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-20 (1973) 473.
- [12] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices" 2nd ed., J. Wiley & Sons, New York, 1981.
- [13] 浜松ホトニクス社 Web サイト :
<http://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/category/3100/4004/index.html>
- [14] S. Kishimoto *et al.*, Rev. of Sci. Instrum. **85** (2014) 113102.
- [15] S. Kishimoto *et al.*, AIP Conf. Proc. **1741** (2016) 040034.
- [16] D. P. Siddon *et al.*, J. of Phys.: Conf. Series **499** (2014) 012001.