

## 実験技術

サブナノ秒時間分解能を持つ  
アバランシェ型フォトダイオード  
X線検出器の開発

岸本 俊二

高エネルギー物理学研究所 放射光実験施設

Development of an avalanche photodiode X-ray  
detector with subnanosecond time resolution

Shunji Kishimoto

Photon Factory, National Laboratory for High Energy Physics

An avalanche photodiode (APD) detector has been developed for X-ray timing measurements. The performance of the APD detector was investigated with synchrotron X-ray beams in multi- and single-bunch runs at the Photon Factory Ring. A time resolution of 0.23 ns (FWHM) and a peak-to-background ratio of more than  $10^7$  were obtained from 14.4keV X-rays in a time spectrum. The intrinsic efficiency and the counting-rate capability were also measured. As an application with a high time resolution, time spectra of quantum beats in nuclear resonance of  $^{57}\text{Fe}$  were observed.

## 1. はじめに

放射光にはいくつかの特徴があるが、その一つがパルス特性である。すでに解説<sup>1)</sup>がなされているように、PFリングではシングルバンチモード運転時、ビーム電流30mAで、半値幅 (FWHM) が200ピコ秒以下のパルス光が得られる。パルスレーザーが利用できる領域を除けば、このようなサブナノ秒の時間幅を持った強い光を得る手段は放射光以外にない。PFリングでは最近、シングルバンチモードが共同利用実験に提供されるようになって

て、放射光パルスを利用した真空紫外・可視光領域での時間分解実験が積極的に進められている。X線領域においても、核共鳴散乱線による“量子うなり”の観測など放射光のパルス特性を活かした研究が行われつつある。

研究の進展にとって重要なのは、優れた時間分解能を持つ検出器である。紫外・可視光領域ではマイクロチャンネルプレート (MCP) 内蔵型光電子増倍管を使えば数十ピコ秒の分解能を得ることが可能<sup>2)</sup>で、実験にしばしば用いられている。しか

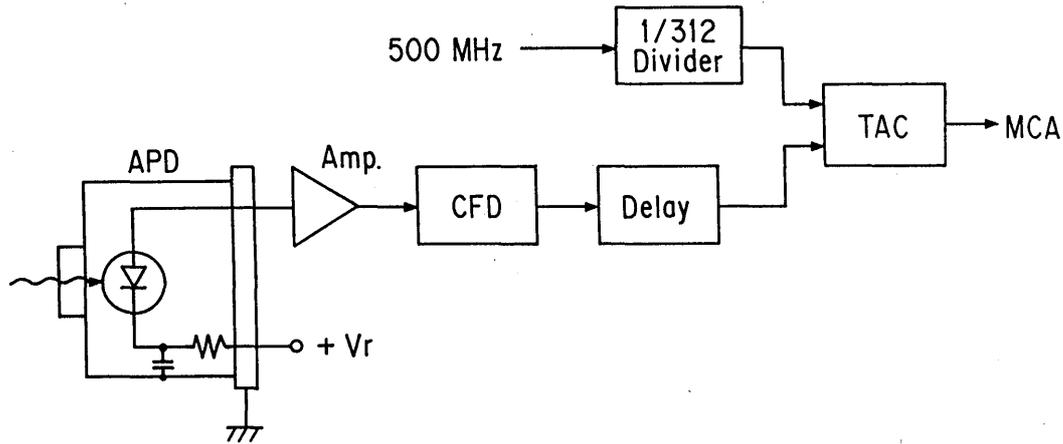


Fig. 1 The electronic system for timing measurements with the avalanche photodiode detector.

しエネルギーが10keVとか、それ以上のX線領域では検出効率が不足して実用的ではない。X・ $\gamma$ 線領域ではプラスチックシンチレーターを取り付けたシンチレーション検出器が使われてきたが、14.4keVのX線に対しては1-2ナノ秒程度の分解能である<sup>3)</sup>。X線をシンチレーション光に変換する方法では、光電子を増幅して電気信号を取り出す過程に加えてシンチレーション光の発光や光電子生成過程の統計的性質によるタイミング検出時のゆらぎ(ジッター)が生じ、また発光効率や減衰時間による制約がある。さらに電子増倍管からのノイズの問題もあり実験からの要求を十分に満たすものではなかった。

結局、X線をより直接的に電気信号として取り出す方が有利というわけである。X線に対し感度があり、かつ高速の電気信号が取り出せるような素子としてフォトダイオードがある。放射光の入射によって半導体内部に電子-正孔対が作られる過程はピコ秒オーダーであり、逆バイアス電圧の印加によって作られる高電界中での電子のドリフト速度は $10^7$ cm/sにおよぶのでナノ秒以下の幅のパルス信号を取り出し得る。これまでもシリコン製のPINフォトダイオードはよく知られており、光子を直接入射する方法ではレーザー光パルスの検出や放射光の分野でもビーム強度モニターとして電流モードで使われてきた。アバランシェ型フ

ォトダイオード(APD)はナノ秒の出力応答を示すとともに内部増幅作用を持つため、一個の光子を検出してパルスとして信号を取り出しタイミング検出器として使うことも試みられてきた<sup>4)</sup>。ただし波長の短い側が軟X線領域までの光に限られ、連続放電を起こす(ブレイクダウン)値を上回るような逆バイアス電圧を印可し外部回路でクエンチングして取り出す方法(ガイガーモード)のものである。一方、X線を直接入射すれば1光子あたりのエネルギーが大きいので、ブレイクダウン電圧以下の逆バイアス電圧でも後段の増幅回路によっては十分な波高をもつナノ秒の単一光子パルスが取り出せるはずである。そこでAPDを検出素子として用いたX線時間検出器を作製しテストを行ってきた。今回、予想通り、APDと増幅度200、立ち上がり時間1ナノ秒以下の高速アンプを組み合わせることで時間検出に適した1個のX線光子による速いパルスを取り出すことができた。このAPD検出器についてまとめる。

## 2. アバランシェ型フォトダイオード(APD)検出器

図1にはAPD検出器とその時間スペクトル測定システムを示す。

APD素子は市販のもので浜松ホトニクス社製S2384を用いた。このAPDの有効領域は直径3ミ

りの円形で、厚さ方向の構造はX線の入射側から、 $n^+ - p - \pi - p^+$ となっている(図2)。ただし標準品は赤外線検出用に作られているため、表面での反射防止膜として $\text{SiO}_2$ 薄膜が光子の入射側にコートされている。 $n^+ - p$ 接合部および不純物濃度の低い $\pi$ 層はシリコンウエハ上にエピタキシャル成長法で約30ミクロンの厚さで形成され、全体の厚みは約400ミクロンである。光子の入射によって電子が励起され電荷キャリアとなる空乏層は逆バイアス電圧を十分に印可した時には $n^+ - p$ 接合部から $\pi$ 層全域にまで及ぶ。電子は電界によって $n^+$ へとドリフトし接合部で電子増幅を起こす。

APD検出器はこのAPD素子と逆バイアス電圧を安定に印加するための簡単な回路からなり、遮光のため真空容器をかねたステンレス容器に納められている。X線はベリリウム窓をとおしてAPDに直接入射される。高速アンプの出力はコンスタントフラクション・ディスクリミネータ(CFD)を通してタイミング信号に変換され、時間-波高変換器(TAC)のスタートに入力される。ストップにはリングRFからの500MHz信号を312分の1に分周したものを用いた。

図3に高速アンプによって取りだしたAPD検出

器の14.4keV-X線による出力信号を示す。APDは常温で作動、ブレークダウン電圧147Vにたいし130Vの逆バイアス電圧を印可した。この時APDの増幅度は約20倍であった。出力波形は2ギガサンプル/秒のデジタルサンプリングオシロスコープで記録し、立下がり時間は1.7ナノ秒、パルス幅(FWHM)は2.4ナノ秒であった。

### 3. 放射光ビームによるAPD検出器特性

#### A. 時間特性の測定

図4(a)にBL-14Aで測定したシングルバンチ運転('91/6/10)での14.4keV-X線の時間スペクトルを示す。メインバンチによるピーク( $t=0$ )は斜線部を除けば、ガウス分布によるフィッティングでよく近似され、その半値幅は0.28ナノ秒である。陽電子ビームのバンチ幅(半値幅)そのものは、ストリーク・カメラによって可視光を観測した結果<sup>5)</sup>からRF電圧、ビーム電流に対応する値を求めた。この値0.16ナノ秒をガウス分布を仮定して差し引くと、検出器および回路系による時間分解能は0.23ナノ秒という結果を得た。さらに、図4(b)は(a)の縦軸を対数表示に変えたものだが、メインピークに続く斜線部の「すそ」が存在する

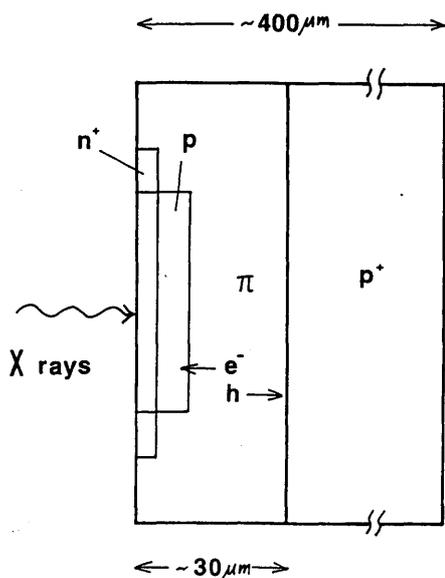


Fig. 2 Structure of an avalanche photodiode (APD) device (Hamamatsu S2384).

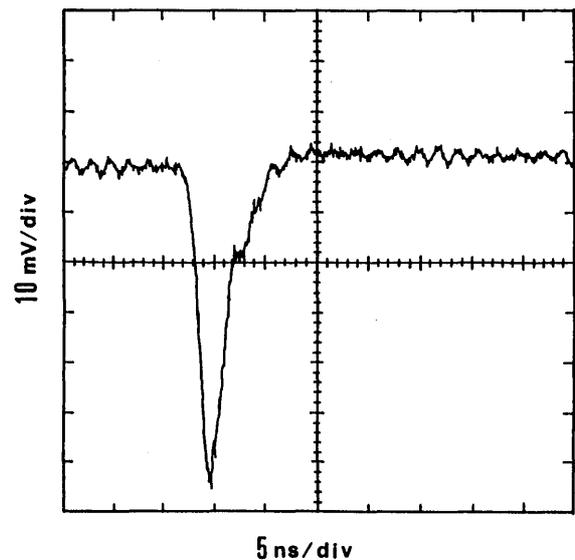


Fig. 3 Waveform of the APD detector output from the fast amplifier. The energy of the incident X-rays was 14.4keV and the applied reverse bias voltage was 130V.

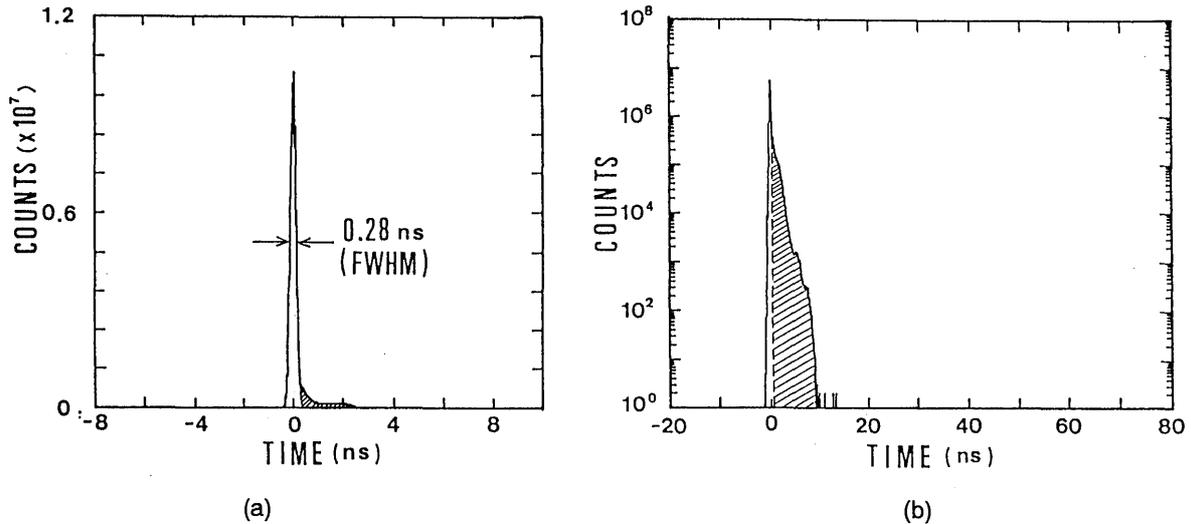


Fig. 4 Time spectra of 14.4-keV X-ray beams at a single bunch run of the Photon Factory Ring, given by (a) a linear scale and (b) a logarithmic scale, in the vertical axis of the figure. The broken curve is the peak at a main RF bucket, fitted by the Gaussian distribution. The width (FWHM) was 0.28 ns and the detector resolution subtracted the bunch width was 0.23 ns. The shaded area indicates a tail part after the peak.

ものの、バックグラウンドのほとんどない「きれいな」スペクトルが得られていることがわかる。APD検出器は時間スペクトル測定上、ノイズとなるアフター・パルス等を生じないため、「すそ」部分を無視すれば $10^7$ ものピーク/バックグラウンド比が実現されている。

なお、この運転時にはRFKOとスクレーパーを用いる方法<sup>6)</sup>によってバンチの純化を行った結果、メインピークの前および10ナノ秒以上後ろでは、その強度の $10^{-6}$ を越えるサテライトピークは観測されなかった。またメインバンチの直後でもサテライトピーク強度は $10^{-4}$ 以下になっていたことを他の測定<sup>7)</sup>により確認しているので、斜線で示される「すそ」は、検出器固有のスペクトル波形(応答関数)の一部で、APDの構造によるものと考えられる。すなわち空乏層よりも後ろ側のp<sup>+</sup>層(電界強度ゼロの領域)でエネルギーを失ったX線によって励起された電子が、数はわずかだが拡散して空乏層内に入り遅れた信号として検出されることによる。

## B. 計数特性の測定

検出効率と計数率の直線性についても調べてみた。この場合、同じバンチから来る光子の時間的重なりを避け、できるかぎり強いビームを得るためマルチバンチモードで測定を行った。測定系もCFDをリーディングエッジ型のディスクリミネータに変え、その出力パルスを100MHzスケラーに入力した。入射X線のエネルギーは8.0, 14.4 keVとし、スリットにより入射ビームの大きさを1mm×1mm、金属箔(Cu, Mo)をフィルターにしてビーム強度を変えながら行った。入射ビームの強度は一枚ごとに求めた金属箔の透過率と、NaIシンチレーション検出器で測定した減衰後のビーム強度を検出器入射窓での減衰等を考慮し補正して求めた。

検出効率、正確にいうと検出器の有感面積の大きさに依存しない固有効率についての結果は、8.0keVに対し56%, 14.4keVに対し7.5%であった。後者の値はシリコン30 $\mu$ mの吸収に相当し空乏層の厚みと対応している。後者は50 $\mu$ m以上の吸収に相当し大きすぎる値だが、入射ビーム強度を求める際の検出器窓材など補正方法の問題と考

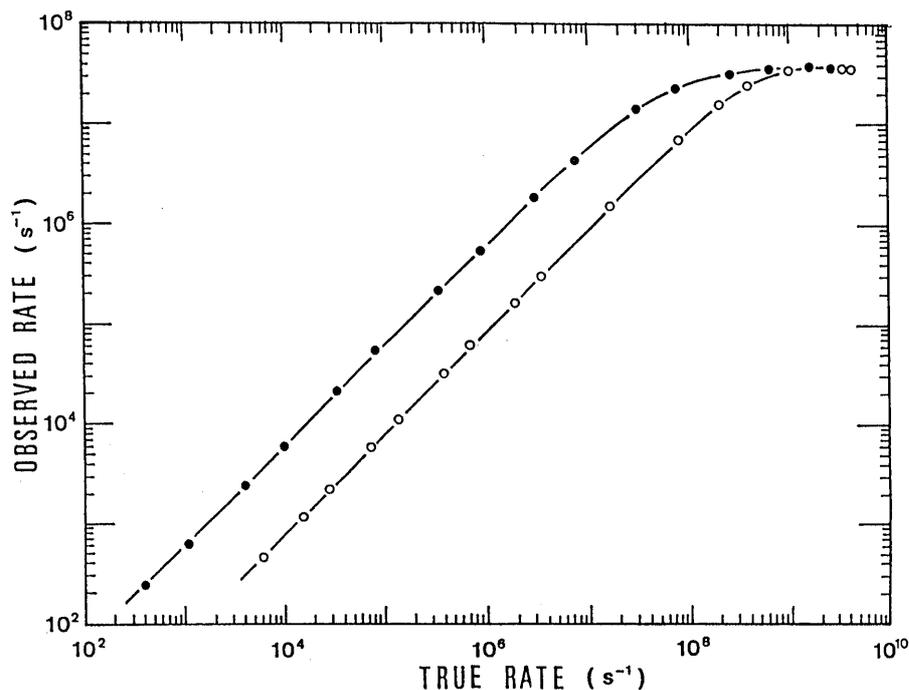


Fig. 5 Variation of the observed rates with the APD detector as a function of the true rates obtained from the data with a NaI (TI) counter and filters: the closed circles are for 8.0keV and the open circles are for 14.4keV.

えている。

図5は入射ビーム計数率に対するAPD検出器出力の計数率をプロットしたものである。黒丸は8.0keVでの結果を示し、白丸は14.4keVでの結果を示す。どちらの場合も観測された最大計数率は $3.8 \times 10^7$  cpsであった。 $10^7$  cpsまでは直線性がほぼ保たれていることがわかる。入射ビーム強度をさらに増やすと検出器出力の計数率が下降したことから、麻痺型の応答特性と考えられ、次のようなモデルで表せる<sup>9)</sup>。

$$m = n \cdot \exp(-n\tau),$$

ここで、 $m$ は検出器出力の計数率、 $n$ は入射ビームの計数率、 $\tau$ は検出器の不感時間である。この式から $m$ の最大値は $1/\tau e$ で表されるので、実際に観測された値から $\tau$ の値を求めると9.7ナノ秒となる。この値は採用した回路系の性能に依存しておりさらに $\tau$ を小さくすることが可能と考えている。

APD検出器のエネルギー分解能についてはまだ十分調べていないが、常温で14.4keVのX線に対し11% (FWHM) と比例計数管程度のデータが得られている。高速計数用として市販されているシンチレーション検出器の不感時間が37ナノ秒<sup>9)</sup>であることを考えると、APD検出器はノイズも少ないのでダイナミックレンジのより広い高速カウンターとしての可能性があることがわかる。

#### 4. 核共鳴ブラッグ散乱実験への応用

APD検出器は「量子うなり」の高時間分解能測定などに応用され成果をあげている。

<sup>57</sup>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ( $\alpha$ -ヘマタイト) の777反射による量子うなりの観測に、東京大学の菊田教授のグループがBL-16AのビームとAPD検出器を用いてPFリングでは初めて成功した<sup>10)</sup>。それまでプラスチックシンチレーターを取り付けたシンチレーション検出器を使って観測しようとしていたが、入射ビーム強度が弱くノイズに信号が埋もれてしまう状態であった。それに対し、APD検出器は時間分

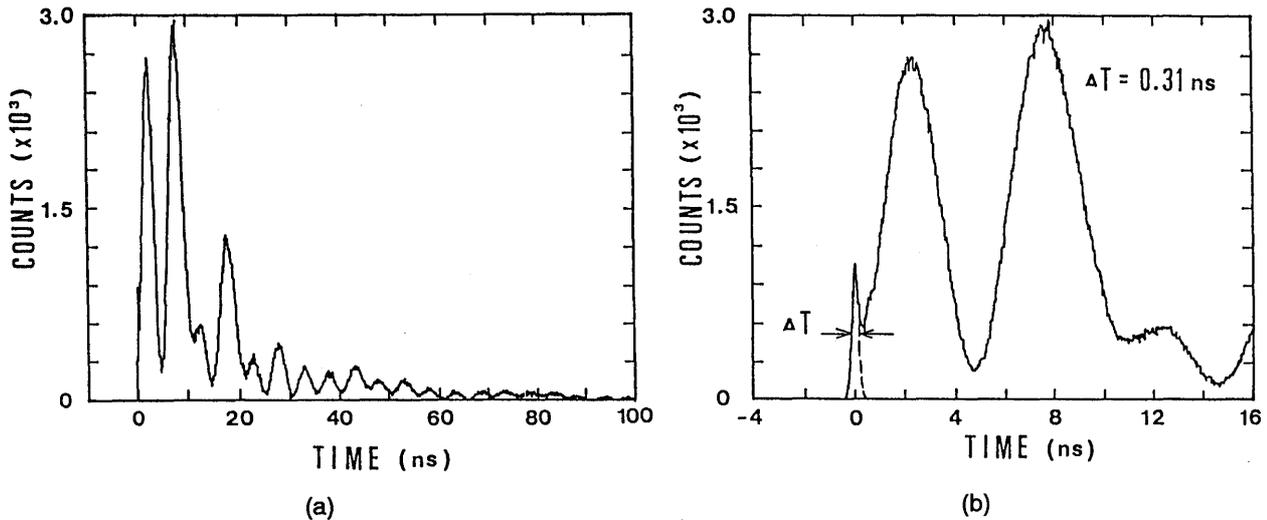


Fig. 6 Time spectra of quantum beats in 14.4-keV nuclear resonance of  $^{57}\text{Fe}_2\text{O}_3$  (777) reflection measured with the APD detector: (a) the range of 100ns after the prompt peak and (b) the first 16 ns. The broken curve is the peak of non-nuclear components, fitted by the Gaussian distribution.

解能が5倍ほど優れ、バックグラウンドとなるノイズを生じないために、検出効率は約3%であったにもかかわらず、うなりのスペクトルが得られ、しかも時間0秒の非共鳴線と2ナノ秒後に現れる、うなりの第1ピークとをきれいに分離することができた。

その後、アンジュレータ・ビームライン AR-NE3が立ち上がり、 $10^4$  cpsを越える強度の核共鳴線ビームが得られるようになった。そのビームを使ってAPD検出器によって得た量子うなりのスペクトルを図6に示す。

## 5. まとめ

以上のようにAPD検出器は、X線領域でサブナノ秒時間分解能を実現できる優れた時間検出器である。さらに光電子増倍管を使うときによく現れるバックグラウンドがほとんどないという利点ももっている。ただし現状で入手可能なAPD素子は、もともと赤外線検出用に設計されたもので、ウエハの厚みは数百ミクロンあっても有感層の厚みはその十分の一程度で薄く、効率(検出器の固有効率)があまり大きくない。また時間スペクト

ル測定時のピーク波形にすそが現れることなど、APDの構造に依存した問題点がある。

APDの構造上、空乏層を厚くするとキャリアの収集時間が長くなるため時間分解能は悪くなる可能性が高い。ただ、これがどの程度になるのかは実際に作ってやってみる必要がある。サブナノ秒分解能を保ったままどこまで効率が上げられるかなど、新しい構造のAPD素子を開発することや他の材質のAPDの特性評価など今後さらに取り組みたいと考えている。また検出器の効率が改善されれば高計数率に対応する高速カウンターとしての特性も活かされるので、その観点からの発展も検討している。

最後に、量子うなりの測定に参加させていただいた東京大学の菊田教授はじめ研究グループの方々に感謝いたします。また測定時にお世話になったPF測定器系のスタッフ、シングルバンチ運転で努力していただいている光源系スタッフの方々に深く感謝いたします。

## 文献

- 1) 田中 健一郎, 「放射光」 Vol. 4, p. 29 (1991).
- 2) H. Kume, K. Nakagawa, S. Suzuki and D. Fatlowitz, *Applied Optics* **27**, 1170 (1988).
- 3) J. Metge, R. Ruffer and E. Gerdau, *Nucl. Instr. and Meth.* **A292**, 187 (1990).
- 4) S. Cova, A. Lacaita, M. Ghioni, G. Ripamonti and T. A. Louis, *Rev. Sci. Instr.* **60**, 1104 (1989).
- 5) N. Nakamura, S. Sakanaka, K. Haga, M. Izawa and T. Katsura, *Proceedings of the 1991 IEEE Particle Accelerator Conference*, May 6-9, 1991, San Francisco, in press.
- 6) T. Mitsuhashi, *Photon Factory Activity Report* (1990) p. R-6.
- 7) T. Obina, T. Takeo, M. Tobiyama and T. Kasuga, in *Proceedings of the 8th Symp. on Accelerator Science and Technology*, Nov. 25-27, 1991, Saitama, p. 298.
- 8) G. F. Knoll, in *Radiation Detection and Measurement*, second edition (John Wiley & Sons, New York, 1989), p. 120.
- 9) J. L. Radtke, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **NS-37**, 129 (1990).
- 10) S. Kikuta, Y. Yoda, K. Izumi, T. Ishikawa, C. K. Suzuki, H. Ohno, H. Takei, K. Nakayama, X.W. Zhang, T. Matsushita, S. Kishimoto and M. Ando, *J. J. A. P.* **30**, L1686 (1991).



## バックナンバー紹介 (1)

日本放射光学会第1回講習会予稿集 (1988年11月)

## 放射光を利用した回折格子分光器……その現状と将来

主催 日本放射光学会 共催 日本分光学会

協賛 高エネルギー物理学研究所, 加速器科学研究奨励会

体裁 B5判, 76頁 定価 2,000円 (送料込)

内容	1. SR用分光器概論 .....	波岡 武 (東北大)
	2. 直入射回折格子分光器 .....	森岡弓男 (筑波大)
	3. 斜入射回折格子分光器 .....	宮原恒晃 (高工研)
	4. 光線追跡 .....	村松康司 (NTT)
	5. アンジュレーター, MPW用分光器の開発 .....	前沢秀樹 (高工研)
	6. 新しい回折格子分光系	
	— 不等間隔格子溝平面回折格子を用いた軟X線分光器 .....	原田達男 (日立中研)

申込方法 次頁の購入申込用紙に必要事項をご記入の上, 郵送またはFAXにてお申込み下さい。