

平成21年 5月29日現在

研究種目:基盤研究(A)

研究期間:2005~2008年度

課題番号:17204020

研究課題名(和文) 新世代超高感度光センサーの開発

研究課題名(英文) Development of new generation photon detectors with an utmost sensitivity

研究代表者

幅 淳二 (HABA JUNJI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号:60180923

研究成果の概要:

単一のフォトン(光子)の検出ができる超高感度の光センサー(電子打ち込み型のハイブリッド光センサー(HPD))について、その可能性を探るためさまざまなタイプのセンサーを試作しその性能を検証した。試作されたセンサーは、2次元多チャンネルアレイ・シングルフォトン解析装置、大口径微弱光撮像システムそして超高速光センサーの三種類である。

交付額

(金額単位:円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	12,000,000	3,600,000	15,600,000
2006年度	10,400,000	3,120,000	13,520,000
2007年度	7,800,000	2,340,000	10,140,000
2008年度	6,400,000	1,920,000	8,320,000
年度			
総計	36,600,000	10,980,000	47,580,000

研究分野:数物系科学

科研費の分科・細目:物理学・素粒子原子核宇宙線宇宙物理

キーワード:光センサー、フォトンカウンティング、HPD、電子打ち込み、超高感度カメラ、超高速光センサー

1. 研究開始当初の背景

フォトンの検出は、科学の広範な分野で重要な研究手段である。フォトンセンサーの性能がその研究の成果を大きく左右する事もそれほど珍しい事ではない。したがって高い性能のフォトンセンサーに対する待望は常に高く、それを開発・改良していく事は、極めて重要である。

近年になって、半導体素子を光電管中に入れて $10^3 \sim 10^6$ 倍のゲインを得るという新しいタイプのセンサ(電子打ち込み増倍型

フォトンセンサ:EB型センサ)が提案され、開発研究が行われている。図1にその構造を示す。光電面に8-10kV程度の負電位を印加し、グラウンド電位に半導体素子を配置すると、光電子は電界によって加速され大きな運動エネルギーを得て、半導体素子に照射される。ここで電子は、そのエネルギーにほぼ比例した数の電子-正孔対を生成する。この過程が大きな初段増幅を与える事になり、揺らぎが少なくノイズの小さな光電子測定が可能であることが実証されてきた。

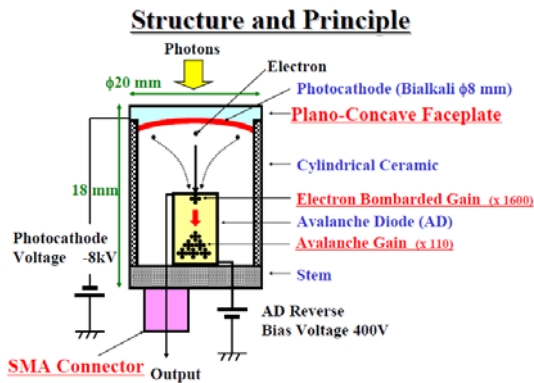


図1：電子打ち込み（EB）型光センサーの構造

本研究のベースとなる平成13-16年基盤研究（B）（2）（課題番号13554008）では、本研究の基本アイデアでもある電子打ち込み方式による増幅（EB）と分割化されたAPD（アバランシェ・フォト・ダイオード）の組み合わせが、世界で初めて試された。APDはそれを分割化する事、電子打ち込みによる半導体の損傷を最小限にする事、また電子照射面の不感層の厚みを最小にする事等の要請から、裏面照射型の構造を採用した。また磁場中での使用を考慮して、近接型（光電面とAPDの間隔を小さくする）の構成とした。その比較的低い打ち込み電圧にも関わらず、分割型APDによる電子入射面の薄い不感層と低ノイズのおかげで、既成の高性能PMTでは到底達成できなかった極めて良好なフォトンカウンティング能力が得られた。

近接型構造のメリットとしては、良好な時間特性や耐磁場性能が期待されるが、レーザーダイオードを参照光とした時間揺らぎの評価で、シングルフォトンに対して80ピコ秒という高性能PMTと遜色ない特性が得られた。また耐磁場特性については検出器軸に平行な磁場に対しては1.5テスラまでの出力減少がない事が示された。

マルチピクセルの検出器においては、各ピクセル間の一様性も重要な項目だが、この研究では最大 $8 \times 8 = 64$ ピクセルのAPDを内蔵したものが試作され、スポット光の走査による測定で、出力のばらつきは8%と通常のマルチアノードPMTに比べても数倍優れたものであった。

以上のようにこの研究において、EB型センサーは現在広く使用されている半導体光検出器やPMTに対して本質的な優位性、大きな可能性を持っている事が明らかにされた。

このような優れたフォトン弁別能力、時間特性、磁場中での良好な動作、電子収束による大面積化の可能性などから、世界中でさま

ざまな応用に向けた多くの開発研究が始まった。それらは、少数のフォトンで粒子弁別を行うリングイメージチェレンコフ検出器用光センサー、あるいは大口径で高い時間特性の必要なカミオカンデ型の水チェレンコフ検出器の光電子増倍管のアップグレード、あるいは微弱光でイメージを捕らえるイメージンテンシファイアをさらに高感度にした撮像管としての応用などである。

2. 研究の目的

このEB型センサーの限界性能を追求し、そのユニークな特性を最大限に活かすさまざまな応用を切り開き、EB型新世代光センサー技術を確立する事が本研究の目的である。具体的には、

- 1) 2次元の多チャンネルアレイで高速、高分解能なシングルフォトン解析のできる装置の試作、
- 2) 電子収束系を活かした超感度大口径撮像システムの試作、
- 3) 優れた時間分解能を最大限まで引き出すことで実現するシングルフォトンピコ秒精度で測定できる光センサーについて試作・評価をし、あわせてその応用を検討する。

3. 研究の方法

本研究におけるEB型センサーの新たな展開によって様々な分野で活用される次のようなデバイスの開発を考える。

- 1) 2次元多チャンネルアレイ・シングルフォトン解析装置の開発

比較的大きな（2ミリ角）APDのマルチチャンネルアレイとGaAsP光電面を組み合わせることで、空間分解能、シングルフォトン弁別できるエネルギー分解能、耐磁場能力、そして高い光電変換効率などのすぐれた特性をもつセンサーを構成し、高エネルギー物理実験装置におけるチェレンコフリング検出器やファイバトラッカー／ファイバカロリメータのフォトンセンサーとしての実用性を検討する。このためには、マルチチャンネルをパルスとして処理できるエレクトロニクス開発が必要となる。

- 2) 大口径微弱光撮像システムの開発

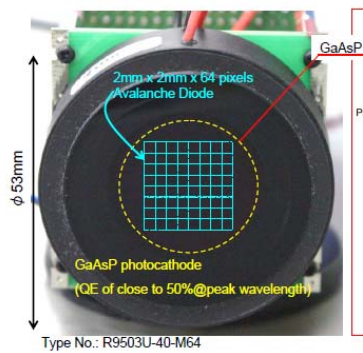
光電子の収束系を管内に配置し、大面積の光電面と微細ピクセルセンサー（たとえばCCD）を組み合わせることで、超高感度大口径微弱光撮像装置を実現する。

- 3) 超高速光センサーの開発

同様に電子レンズ系にて、より小型の超高速半導体素子に光電子を収束する事で、例えば $\phi 5$ mm程度の有効エリアをもちながら帯域10GHzを達成することで、光通信用の超高感度センサーが実現する。

4. 研究成果

1) 2次元多チャネルアレイ・シングルフォトン解析装置



2 ミリ角・8 x 8チャンネルの二次元アレイセンサーとその信号処理を行うシ

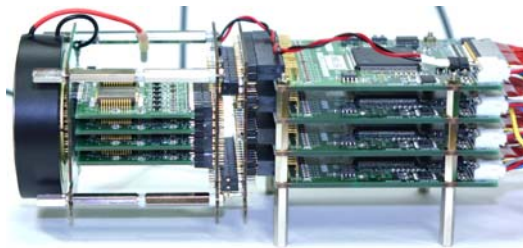


図2：8 x 8 2次元アレイHPDシステム。上は受光面を正面から見たもの。

ステム開発し、画像情報を取り出すことを試みた。完成したシステムの概観を図2に示す。システムは、今回専用に開発したASICによる前置増幅エレクトロニクス、信号の計数とUSB接続によるPCへのデータを転送を行う装置からなっており、試作を超えてさまざまな実用を意識した完成度の高いシステムとなっている。

センサーの微弱光を高速で補足できる特性を活かす応用可能性として、X線の高速画像装置としての

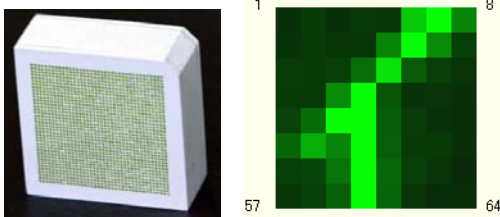


図3 LuAG シンチレータ単結晶ファイバー束 (左) と X線によるイメージング (右)

性能を評価した。通常X線の検出はCsIのようなシンチレータの薄膜を使って光に変換し、CCDなどでその光を検出することによって実現されるが、そのシンチレータの厚みから硬X線への感度はほとんど期待できない。そこで今回、シンチレータとして放射長のより短くしかも時間特性に優れたLuAG結晶を採用、さらに二次元の位置情報を得るため単結晶ファイバー(0.437mm径)を束ねたプレートを開発し(LuAG単結晶ファイバープレート)それをX線の光変換に用いた。予備的な実験としてファイバープレート前面に、

『イ』の字状にスリットをあけた1mm厚のステンレス製マスクを置いて10keVのX線のイメージングの実証を行うことができた。(図3)

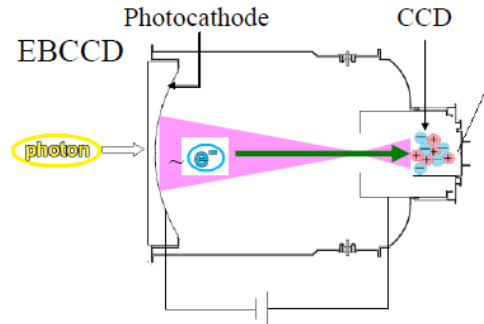


図4：大口径電子打ち込みCCD (EBCCD) システムの構造

2) 大口径微弱光撮像システムの開発

大口径光電面、電子収束・打ち込みとCCDを組み合わせると(図4)大口径の微弱光撮像装置を実証する装置として、10cmの口径を持つシステムを試作した。(図5)

この装置の解像度は可視光とテストチャートの組み合わせで、2 lp/mmとの評価された。これは電子収束系の縮小率を考慮したCCDの解像度とほぼ一致しており、収束系での歪み・ボケが問題にならないレベルであることを示している。

シングルフォトンレベルの撮像を狙うこのシステムにおいて、増幅度はシステムの性能を左右する最も重要なポイントである。内部ゲインを持たないCCDとの組み合わせでは、電子打ち込みによる増幅のみが有効である。このため最大印加電圧が重要な性能因子となる。今回の試作品では、12kVを確保することができ、最大増幅度として2400が得られ、シングルフォトンレベルの超微弱光撮像が実現可能となった。

応用可能性として、低レベル照射量での医療用X線撮像がある。そこでこの撮像装置に



図5：大口径電子打ち込みCCD (EBCCD) システムの構造

X線撮影用増感紙（粉末CWOシンチレータを塗布された0.5ミリ厚のフィルム）を貼り付けて、低強度の放射性同位元素からのX線によるイメージを試みた。（図6）X線発生装置によらない微弱な校正用チェックソースによって良好なX線イメージ

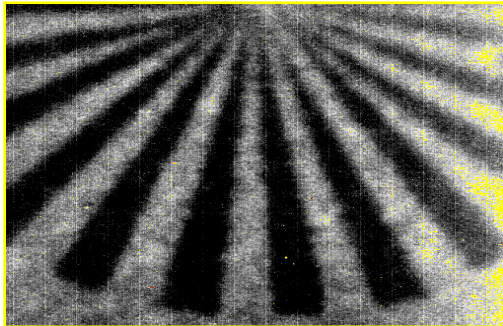


図6 ^{241}Am 線源からのX線による50ミクロン厚の銅箔パターンのイメージング。0.25mmのギャップが弁別できている。

ングが可能であること、この比較的簡単なセットアップで2 lp/mm相当の分解能をもつことを確認することができた。

3) 超高速光センサーの開発

時間応答特性が最適化された小口径のAPDと比較的大きな有効径の光電面を電子収束系でつないだシステムにより、8ミリ径の有感領域を持つ超高速光センサーを試作した。図7に試作品の外観を示す。

電子収束系の最適化はシミュレーションに基づいて行われた。有効径内の感度・増幅度の一様性は図8に示すようにきわめて良好であり、電子収束光学の設計が適切であることを示している。

シングルフォトンレベルの入力光に対する出力信号は図9に示すように、入射フォトン数を忠実に反映した波高をしめしており、電子打ち込みデバイスらしい優れたフォトン計数能力が確認できた。そのパルスの立ち上がり、立下りはそれぞれ360, 340 psec程度



図7 試作された超高速光センサー

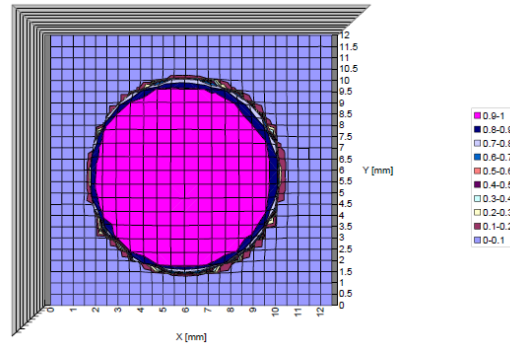


図8 有効径内の感度・増幅度の一様性

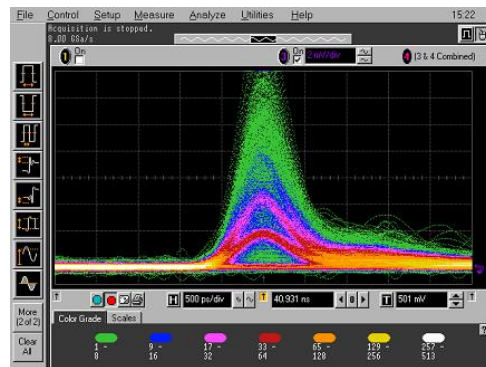


図9 シングルフォトンレベルの入力光に対する出力波形。フォトン数に対応するトレースが判別できる。

度となり、容量の小さい小径APDを使用したことによる高速性が実現されている。

試作された超高速デバイスにとってパルス立ち上がり・立下りの高速性ととも重要な性能は入力光に対するタイミングジッターである。そこでレーザーダイオード光源を用いてそのトリガー信号とセンサー出力のジッターをシングルフォトンレベルで測定した。シミュレーションによると中心から5mm以内の領域では電子収束の軌道によるジッターは3 psec程度（図10黄色のライン）

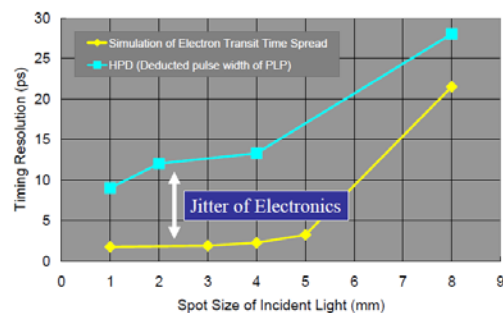


図10 シングルフォトンレベルの入力光に対する出力タイミングの揺らぎ(jitter)。フォトン数に対応するトレースが判別できる。

で、センサー自身とエレクトロニクスによる寄与に比べて十分に小さいと思われる。ストリークカメラの測定から光源自身が 30 psec 程度の光出力パルス幅を持っていることが分かっており、その寄与を実測のジッターから差引いた結果が図 10 の青線で示されている。これは有効径の中央では、シングルフォトンのタイミング計測において 10 psec 程度の精度で測定ができることを示している。この結果は、従来微弱光測定において最も時間精度が良いとされるマルチチャンネルプレート (MCP) を凌駕して世界最高精度の時間測定性能を達成したことを意味する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 3 件)

Junji Haba.
Status and perspectives of Pixelated Photon Detector (PPD)
Nucl. Instrum. Meth. A595:154-160, 2008.

Fukasawa, K., Haba, J., Kageyama, A., Nakazawa, H. & Suyama, M.
High Speed HPD for Photon Counting. IEEE Trans. Nucl. Sci. 55, 758 (2008).

MOTOHIRO SUYAMA AND MARIDEL LARES
Hybrid detector combines PMT and semiconductor diode technologies
Laser Focus World, March 80 (2008)

[学会発表] (計 9 件)

中澤秀介、須山 本比呂、幅 淳二
超高感度光センサーの開発
日本物理学会第 6 1 回年次大会
2006 年 3 月 27 ~ 30 日 @ 松山大学

Hirohito Fukaaswa, Motohiro Suyama, Junji Haba et al.
High speed HPD for Photon Counting, presented in the 2006 IEEE Nuclear Science Symposium, held in San Diego, USA on 10. 29-11. 4, 2006.

須山本比呂、
高速型 HPD の開発
第二回次世代光センサーに関するワークショップ、浜松名鉄ホテル、2006 年 12 月 7 ~ 8 日

Motohiro Suyama,
Latest status of PMTs and related sensors, presented in the 1st International Workshop on new photon-detectors, held in Kobe on 27-29 June 2007.

鈴木 州、須山 本比呂、幅 淳二
大口径 EBCCD の開発、
日本物理学会第 6 2 回年次大会
2007 年 9 月 21 ~ 24 日 @ 北海道大学

Junji Haba,
Status and perspective of solid state photon detectors for single photon detection, presented in the 6th International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Counters, held in Trieste, Italy on 15-20 October 2007.

Atsumu Suzuki, Motohiro Suyama, Junji Haba et al.
Development of the Large Aperture EBCCD, presented in the 5th International Conference on New Developments in Photodetection 2008 held in Palais des Congres, Aix-les-Bains, France, on 15-20 June 2008.

Yoshihiko Kawai, Motohiro Suyama, Junji Haba et al.
R&D status of 64-channel Photon-counting Imaging Module, presented in the 1st International conference on Technologies and Instrumentations in Particle Physics, held in Tsukuba, Japan on 12-17 March 2009.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]
○出願状況 (計 0 件)
特になし

○取得状況 (計 0 件)
特になし

[その他]
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

幅 淳二 (HABA JUNJI)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核
研究所・教授

研究者番号：60180923

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

田中真伸 (TANAKA MANOBU)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核
研究所・准教授

研究者番号：00222117

須山本比呂 (SUYAMA MOTOHIRO)

浜松ホトニクス・電子管事業部・研究員

河合克彦 (KAWAI YOSHIHIKO)

浜松ホトニクス・電子管事業部・研究員

作田 誠 (SAKUDA MAKOTO)

岡山大学・理学部・教授

研究者番号：40178596

青木茂樹 (AOKI SHIGEKI)

神戸大学大学院・人間発達環境学研究科・准
教授

研究者番号：80211689

中澤秀介 (NAKAZAWA HIDEYUKI)

National Central University (Taiwan)・研
究員