

氏 名 須 山 本比呂

学位（専攻分野） 博士(理学)

学 位 記 番 号 総研大甲第652号

学位授与の日付 平成15年3月24日

学位授与の要件 数物科学研究科 素粒子原子核専攻

学位規則第4条第1項該当

学 位 論 文 題 目 Development of a multi-pixel photon sensor with
single photon sensitivity

論 文 審 査 委 員 主 査 教授 高崎 史彦
教授 岩田 正義
教授 堺井 義秀
教授 高田 耕治
助教授 幅 淳二
教授 住吉 孝行（東京都立大学）

論文内容の要旨

In particle physics experiments, photon sensors play key roles in detecting and measuring particle's kinetic parameters. Photons produced by a particle in a detector possess essential information on the particle's properties. They are utilized for particle identification in Cherenkov counters and TOF counters, for particle tracking in scintillating fiber detectors and for energy measurement in calorimeters. An interesting and attractive photon sensor is a hybrid photo-detector (HPD) equipped with a multi-pixel avalanche diode. An HPD can be realized based on vacuum-tube technology and the rapidly evolving semiconductor technology. The latter is the key element for multi-pixel readout with single-photon sensitivity.

We have investigated various types of avalanche diodes (AD) appropriate for electron multiplication, and have successfully developed an HPD equipped with the most practical AD. The developed HPD has an effective area of $16 \times 16 \text{ mm}^2$ with 8×8 pixels of $2 \times 2 \text{ mm}^2$ each. The gain is 5×10^4 , sufficiently high to detect single photons with a timing resolution better than 100 ps. Photoelectrons from 1 to 5 can be clearly identified in a pulse-height spectrum as distinct peaks, thanks to the low noise characteristics of the HPD. In addition, it has been proved that the HPD can be operated with good performance in a magnetic field of up to 1.5 T. A superb feature of this HPD as a particle tracker has been demonstrated by a measurement of muon tracks in cosmic-rays with a detector system consisting of a bundle of scintillating fibers and an HPD.

In this way, the developed HPD has successfully functioned as a multi-pixel photon sensor. This is the first HPD having all desirable features, such as high granularity, single-photon sensitivity, fast timing capability and operability under high magnetic fields, which are essential requirements in applications for high-energy physics experiments.

論文の審査結果の要旨

高感度の光検出器は、現代の高エネルギー実験の検出器にシステムにおいて欠くことのできないコンポーネントである。実験の高度化が進むにつれ、光検出器に対する要求も多岐にわたって、よりいっそうの高性能化が求められている。一方でより高感度・高分解能、すなわち一光子レベルに感度を持ちフォトンカウンティングができる能力を、他方でサブナノ秒の高速・高時間分解能が、さらにはイメージングを可能にするピクセル化なども項目としてあがっている。そのうえ多くのアプリケーションにおいて高磁場中での動作なども要求される。須山氏の今回の研究は、これらすべての要求を同時に満足する、画期的な光検出デバイスを開発することをめざしたものである。

同氏はこれまでも、様々な光関連デバイスの開発に携わってきた。ストリークカメラの開発を通じて、ピコ秒領域で動作する超高速検出器の領域ですでに大きな実績をあげており、またフォトカソードと半導体検出器を組み合わせたハイブリッド検出器 (HPD) においても、初期の段階からその開発に取り組み、通常の光電子増倍管では得られない高精度のフォトンカウンティングが可能なデバイスを実現してきた。

本研究において須山氏は、先にあげたさまざまな要求を同時に満たすべく、HPDの一層の高性能化に取り組んだ。その方法として彼が取ったのは、

- 1) 高精度のフォトンカウンティングのために半導体としてアバランシェ・フォトダイオード (APD) を用いること、
- 2) イメージングのため半導体をピクセル化する事、
- 3) 高速応答性、高磁場中での動作を考慮した近接構造、

などのアプローチである。HPD中で用いることになるAPDは、加速された光電子に感度を持つものでなくてはならないが、一般的なAPDはもっぱら光に感度を持つ構造となっておりそのまま適用することは不可である。またピクセル化されたAPDも各地でようやく試作が始まった段階であり、そのまま応用可能なモデルは存在しない。

そこで同氏は過去に前例のない、ピクセル化された背面照射形のAPDの開発を行った。そこにおいては光電子に対する感度はもちろんのこと、電子照射に対する耐性、ゲインの一様性、ピクセル間のクロストーク、不感領域、ノイズ特性などが仔細に検討され、最終的には $2 \times 2 \text{mm}^2$ のピクセルからなる 8×8 マルチピクセルAPDが完成した。これを 25mm Φ の口径をもつ光電管に納め、AD-HPDができあがった。

これに対して、詳細な性能評価が行われ、

- 1) 5光子まで弁別可能な極めて良好なフォトンカウンティング性能、

- 2) 100 ピコ秒を下回る高い時間分解能、
- 3) ピクセル間の良好なゲイン一様性、
- 4) 高磁場中での動作

などが確認された。

本研究においてなされた開発はきわめて独創的であり、最終試作品にいたるアプローチとその詳細な評価・考察は優れたレベルにある。よって審査委員会は全員一致で本論文を学位論文（理学）としてふさわしいものと判定した。