

# 高感度マルチピクセル光センサの開発

浜松ホトニクス株式会社 電子管設計第1グループ

須山 本比呂

suyama@etd.hpk.co.jp

2004年8月5日

## 1. はじめに

荷電粒子は、その通過に伴ってシンチレーションやチェレンコフ輻射などの光子を発生する。素粒子物理実験ではこれら光子を計測することで荷電粒子の検出・特定する手法が広く用いられている。したがって、光子を検出する光センサが重要な役割を担っており、1個の光子に至る感度、1ns以下の高速応答特性に加え、磁場中動作、マルチピクセル化などの、多くの高い性能が要求されるようになってきている。これらに応える光センサを目指して、電子打ち込み増倍型光センサ(ここでは電子打ち込み electron-bombarded を略して EB 光センサと称するが、hybrid photo-detector, HPD とも言われている)を開発した [1],[2]。本稿では、EB 光センサの動作原理を解説し、開発したマルチピクセル型センサで得られた諸特性を報告する。

## 2. 動作原理

電子を加速して半導体素子に照射すると、半導体素子中で多数の電子-正孔対を生成することが、1960年代初頭より知られていた。光の入射に応じて光電面より放出した電子を加速し、このように半導体素子中で高いゲインを得る光センサ(電子打ち込み増倍型光センサ、EB 光センサ)は、1965年に最初の報告がある [3]。ところが、当時の未熟な半導体技術ではダイオードのリーク電流が大きかったため、微弱光計測には向かなかった。

EB 光センサを素粒子物理実験用に開発しようという提案が改めてなされたのは、半導体技術が十分に進展した1987年であり [4]、実用的な EB 光センサが最初に報告されたのは1991年である [5]。筆者が EB 光センサの開発に関わり始めた1992年は、ちょうどその頃であった。

EB 光センサは、図1に示されるように、真空中に封じられた光電面と半導体素子よりなる。負の高電圧(たとえば -10kV)が印加された光電面に光が入射し光電子が放出されると、接地電位に置かれた半導体素子との間に形成された電界によって加速されて半導体素子に照射される。電子は、

半導体素子中でエネルギーを失いながら多数の電子-正孔対を生成するので、これがゲインとなる。このゲインは入射する電子のエネルギーに依存し数千倍に達するので、ゲインのゆらぎは原理的に数%と非常に小さい。これが EB 光センサの特長のひとつである。現在も広く利用されている光電子増倍管(PMT)は、ダイノードと呼ばれる電極群で加速と増倍を繰り返しながら  $10^6$  程度の高いゲインを有するものの、初段の増倍率は10程度と小さく、また、ダイノードの入射位置に依存する増倍率のムラが加算されるため、その増倍ゆらぎは50%を超える。

EB 光センサの総合ゲインは、電子照射ゲインのみでは、PMT に比べて3桁も小さいのだが、アバランシェダイオード(AD)を採用して、さらに50~100倍のゲインを付加し、総合ゲインを  $10^5$  以上とすることが可能である。AD は濃度の高い *p* 領域と *n* 領域を接合し、そこでアバランシェ増倍に十分な高い電界を形成する半導体素子である。

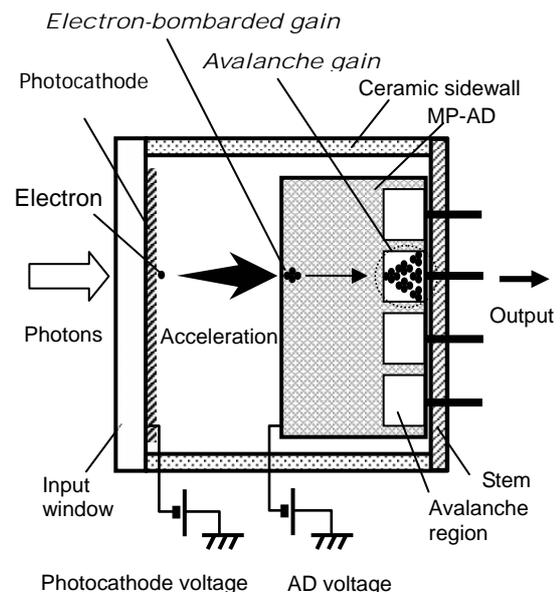


図1 開発したマルチピクセル EB 光センサの動作を示す模式図 光電面より放出された電子が加速されて半導体素子に照射されて増倍される。それは、さらにアバランシェ増倍されて出力される。

EB 光センサに用いる半導体素子は、用途に合わせて、ダイオード、AD に加え CCD[6]などを用いることが可能である。以下では、今回開発したマルチピクセル型 AD を内蔵した EB 光センサに絞って議論を進める。

### 3. 設計と製作

1 個の光子を高い S/N で検出できるように、開発した EB 光センサには AD を採用した。AD は容易にピクセル化が可能だが、電子線照射による劣化（暗電流の増加）という EB 光センサ特有の課題があるので、図 2 に示す裏面照射型を採用した。これは、 $pn$  接合のない裏面（高濃度  $p$  層）より電子を照射するタイプなので、電子照射による暗電流の増加がなく長期間安定に動作する。ただし、裏面照射型 AD は一般的には使用されておらず、電子線を照射した実績もなかったため、予備実験によって動作を確認するところから開発を始めた。

AD の有効面積は、光電面の有効面積に内接するように  $16 \times 16 \text{mm}^2$  とし、 $2 \times 2 \text{mm}^2$  のピクセルを  $8 \times 8$  配置した。図 3 に開発した AD の写真を示す。

光電面と AD は、9kV の電圧を印加するように、2.5mm の間隔を保って平行平板状に配置した。このような構造のおかげで、センサの軸に平行な磁場中での動作が可能となる。光電面と AD にかかる電圧は、円筒状のセラミック製側壁によって絶縁される。

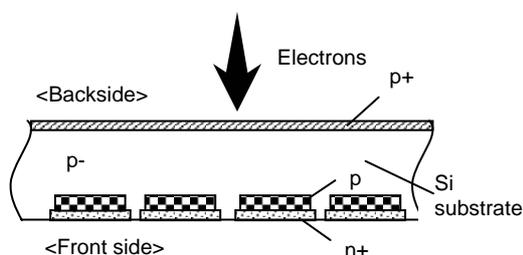


図2 EB 光センサに採用した AD の断面図  
電子は  $pn$  接合のない裏面より照射される。

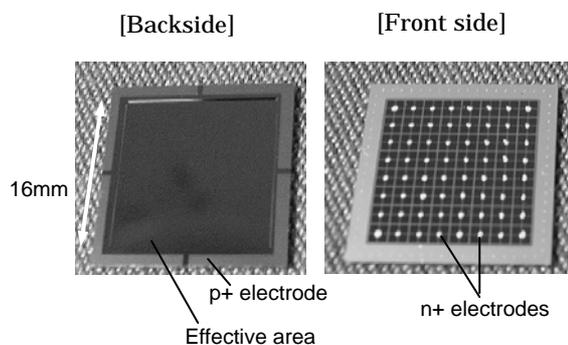


図3 開発した  $8 \times 8$  ピクセル AD  
電子は裏面より照射され、各ピクセルからの出力は表面側より取り出される。

EB 光センサは以下の順序で組み立てられる。

バンプボンディングを利用して、AD をセラミック製ステム上に組み立てる。図 4 が AD をステム上に組み立てた様子を示している。

ステム外周部にロー付けされた金属フランジと、円筒状側壁の端部に設けられた金属フランジを突き合わせて気密が確保されるように溶接する。

この部材と入力ガラス窓を共に真空装置に導入し、昇温して材料のガス出しを行う。

AD が対面する側の入力ガラス窓に、下地となる  $Sb$  を堆積し、その後、アルカリ金属である  $Na$ 、 $K$ 、 $Cs$  を順に反応させてマルチアルカリ光電面を作製する。

真空中で入力ガラス窓を移動して側壁に接合させる。気密は、側壁の端部に溜められたインジウムによってなされる。

以上のようにして組み立てられた EB 光センサは、真空装置より取り出され評価される。組み立ての終了したセンサの写真を図 5 に示す。

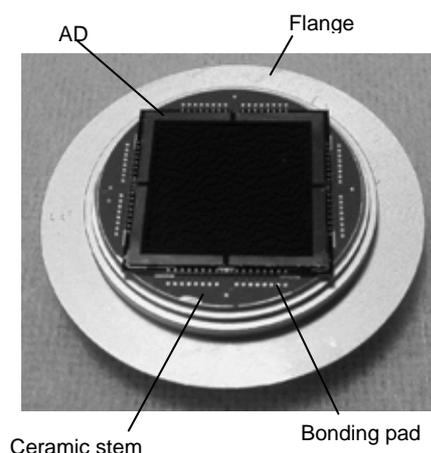


図4 セラミックステム上に組み立てられた AD

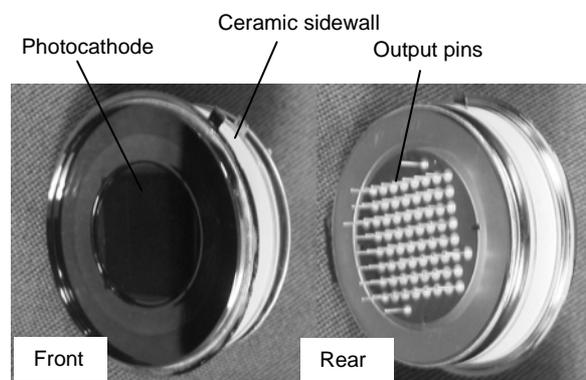


図5 試作したマルチピクセル EB 光センサ  
ここで示したセンサの入力窓はガラスだが、評価したセンサは FOP（本文参照）を採用している。

なお、入力ガラス窓として fiber optic plate (FOP) を採用した。FOP は光ファイバーを束ねて融着した後、輪切りにし、プレート状にしたものである。入射イメージの位置を保ったまま出射側に伝えるので、シンチレーションファイバーからの信号を光電面に導く際に有効である。

## 4. 諸特性

開発した EB 光センサの諸特性を以下に示す。特性の詳細については、既報[1],[2],[7]を参照されたい。

### 4.1. ゲイン特性

開発した EB 光センサの総合ゲインは、電子照射ゲインとアバランシェゲインの積として与えられる。図 6 に、光電面電圧を横軸として電子照射ゲインを示す。これより、AD の電子入射面に形成された不感層に対応する閾値があるが、それを超えるとほぼ  $3.6\text{eV}$  で 1 個の電子-正孔対を生成するという傾き [8] でゲインが上昇するという特性がわかった。二つの結果は、不感層（高濃度  $p$  層）の厚かった初期型（ ）と薄くすべく改良を行った高ゲイン型（ ）に対応する。これより、不感層は電子入射面に形成される高濃度  $p$  層の厚さに依存することがわかった。各々の実験値に対応する実線、破線は、不感層の厚さをパラメータとして、PENELOPE[9]を用いてゲインのシミュレーションを行った結果である。高ゲイン型、初期型の不感層を各々  $80\text{nm}$ 、 $210\text{nm}$  としたとき、実験値とのよい一致が見られた。

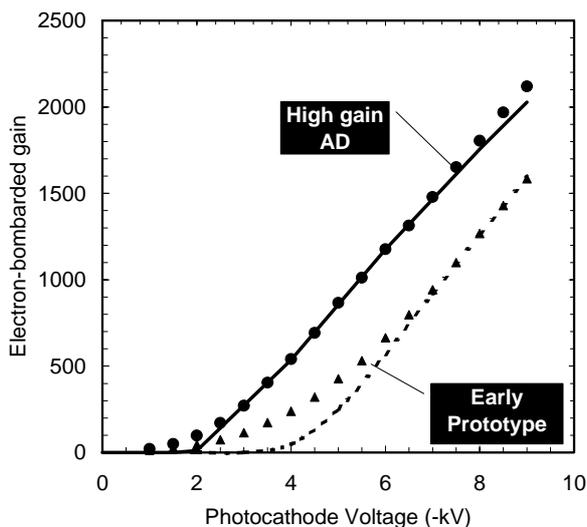


図 6 電子照射ゲイン特性

電子入射面に存在する不感層（高濃度  $p$  層）の厚い初期型と、高ゲイン型の特性を示す。実線、および破線は、不感層の厚さをパラメータとしてゲインをシミュレートした結果であり、各々  $80\text{nm}$ 、 $210\text{nm}$  に対応する。

一方、アバランシェゲインは、 $250\text{V}$  のバイアス電圧を印加したときに 22 であった。総合ゲインは、光電面電圧  $-9\text{kV}$  における電子照射ゲイン 2100 との積として、 $4.6 \times 10^4$  となる。アバランシェゲインは、もっとも耐圧の低いピクセルのブレイクダウン電圧で制限されており、プロセスなどの改善により 100 までの向上が見込まれる。

### 4.2. フォトンカウンティング特性

平均して 3 光電子程度が放出されるパルス光を光電面に繰り返し入射し、出力の波高分布を測定した。高ゲイン型 AD、あるいは、初期型 AD を内蔵したセンサで得られた結果を図 7 に黒、および、灰色で示す。高ゲイン型 AD を内蔵した EB 光センサでは、10 光電子までを弁別して検出可能なことがわかった。これは、ゆらぎの少ない電子打ち込み増倍のおかげであり、PMT では実現し得ない特性である。

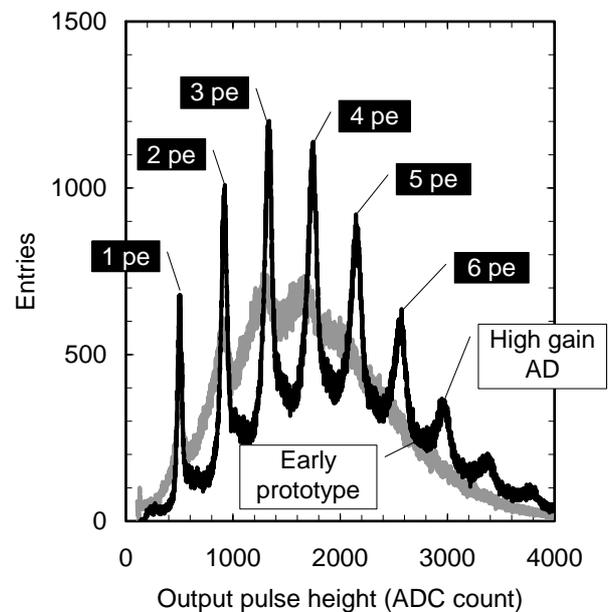


図 7 マルチフォトン入射に対応する出力波高分布  
黒は高ゲイン AD を内蔵したセンサ、灰色は初期型で得られた結果を示している。黒の各ピークは、光電面より放出した光電子数に対応している。

図 7 より、初期型に比べて高ゲイン型 AD を内蔵したセンサで分解能が格段に改善していることもわかる。これは、電子入射面の不感層が薄くなることで、そこで損失する電子エネルギーのゆらぎが小さくなり、有効層で吸収されるエネルギー、即ち信号（増幅度）のばらつきが減るためと考えられる。

### 4. 3. 応答時間特性

パルス幅約 50ps の短パルス光を入射して、EB 光センサの応答時間特性を評価したところ、ライズタイム 1.1ns、フォールタイム 1.7ns と、高速 PMT と同等の高速応答性を示すことがわかった。その後、毎回 1 個以下のフォトンが入射する状態に光量を下げ、time to amplitude converter (TAC) を用いてタイミング分解能を測定したところ、図 8 に示すように半値幅で 180ps であることがわかった。

EB 光センサで時間応答特性を決める要因のうち、光電面・真空中の電子走行時間広がりには共に 1ps のオーダーなので、時間応答特性を制限する主要な要因は AD といえる。AD の応答特性は、CR 時定数、および、半導体基板中の電子走行時間によって決まる。それらを実験したところ、前者が 0.6ns、後者が 1.3ns であり、半導体基板中の電子走行時間がセンサの応答時間特性を制限していることがわかった。これを改善するためには、CR 時定数で応答特性が制限されない範囲で基板を薄くすればよい。

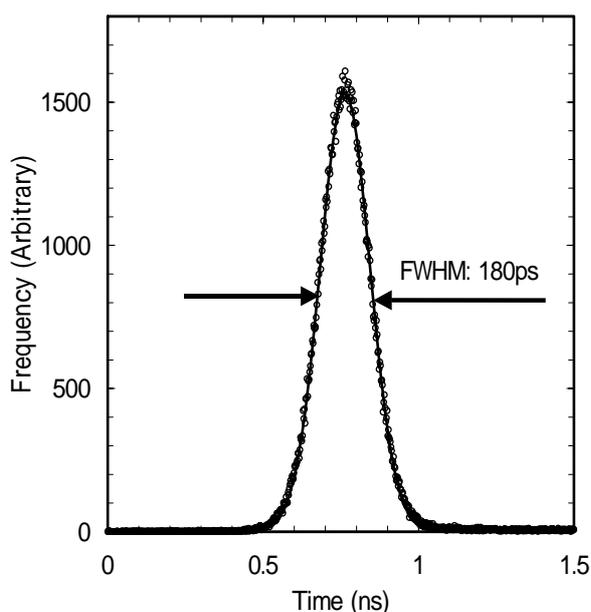


図 8 毎回 1 個以下のフォトンが入射する状態で測定したタイミング分解能

### 4. 4. ユニフォミティ、クロストーク

$\phi 1\text{mm}$  のスポット光を各ピクセルの中央に集光して、感度のユニフォミティを測定した。結果を図 9 に示す。感度の不均一性は標準偏差で 6% と、単一フォトンに感度のあるセンサとしては極めて良好であった。なお、ユニフォミティを制限している要因には、光電面感度、電子照射ゲイン、アバランシェゲインなどの不均一性がありうるが、このうちアバランシェゲインによるものが支配的であることがわかっている。

次に、 $\phi 1\text{mm}$  のスポット光をピクセルの中央付近に固定し、隣のピクセルに現れる信号量（クロストーク）を測定した。その結果、最近接ピクセルに約 1.5% の信号が漏れ出ることがわかった。主な原因は、入力面として採用した FOP 内での光の散乱と、後述する反射電子であることがわかった。

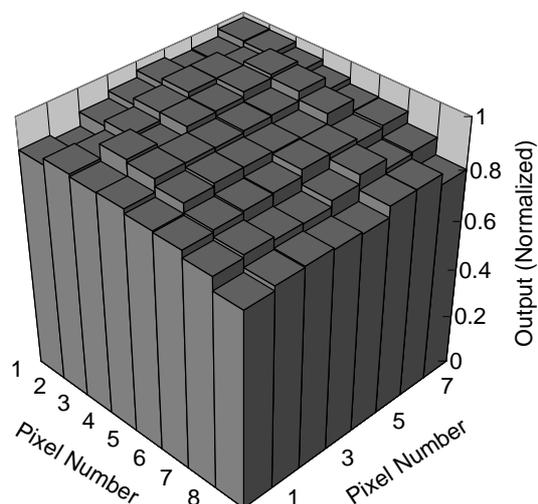


図 9 ユニフォミティの測定結果  
各ピクセルの中央に  $\phi 1\text{mm}$  のスポット光を集光して測定した出力分布であり、標準偏差は 6% である。

### 4. 5. 磁場特性

EB 光センサをその軸と平行な磁場中に置き、磁場強度に対する出力の変動を測定した。図 10 に結果を示すように、試験装置の最大定格磁場 1.5T まで磁場のないときと同様の出力が得られた。

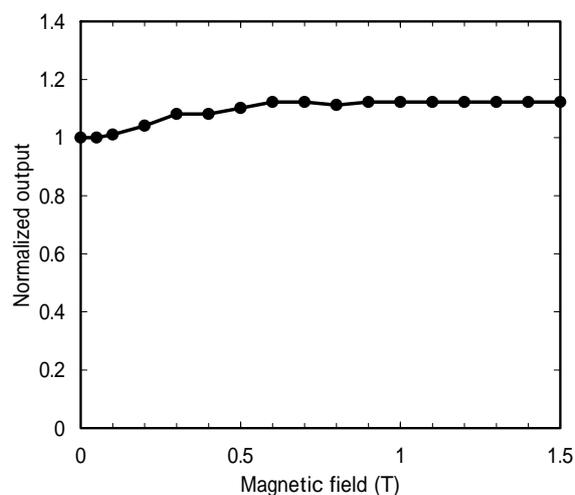


図 10 磁場特性 センサと平行な向きに発生させた磁場強度を変え、出力の変化を測定した結果を示す。

ただ、厳密には、0.5Tまで徐々に出力が増加し、初期値の約10%増となっている。このとき、隣のピクセルにクロストークする信号量が減少していることから、これは、磁場の効果で正しいピクセルに戻り、そこで信号に寄与しているためと考えている。

## 5. まとめと今後の展開

素粒子物理実験で望まれる1個のフォトンの感度、磁場中での動作、高速応答特性、マルチピクセル動作のすべてを満足する光センサの候補としてEB光センサを開発し、その特性がすべての項目で実用可能なレベルに達していることを確認した。

EB光センサは、本研究で開発した技術を元に、さらなる高性能化の可能性を秘めている。これは、ADピクセルサイズの微細化による多ピクセル化、センサ周辺の不感領域低減による最密配置の実現、高感度光電面との組み合わせ[2]による高S/N化などである。また、本研究で開発したマルチピクセルADを縮小型電子レンズと組み合わせることにより、10インチ程度の大きな有効面積を有するマルチピクセル光センサへ展開できると考えている。現在、このような光センサは実在しない。

## 6. 謝辞

本研究は主に、2000年から3年間、総合研究大学院大学素粒子原子核専攻に在籍中、幅淳二教授をはじめとする多くの先生方のご指導のもとになされたものです。この場を借りて感謝の意を表します。

### 参考文献

- [1] M. Suyama *et al.*,  
Nucl. Instr. and Meth., **A523** (2004) 147
- [2] M. Suyama *et al.*,  
IEEE Trans. Nucl. Sci., **51** (2004) 1056
- [3] R. Kalibjian, IEEE Trans. Nucl. Sci., **12** (1965) 367
- [4] R. DeSalvo,  
CLNS, Cornell Univ., Ithaca NY 14853, (1987) 87
- [5] L. K. van Greest and K. W. J. Stoop,  
Nucl. Instr. and Meth. **A310** (1991) 261
- [6] T. Maruno *et al.*, Proc. of SPIE Vol. 3965 (2000) 223
- [7] M. Suyama, KEK Report 2002-16 (2003)
- [8] J. R. Fiebiger and R. S. Muller,  
J. Appl. Phys. **43** (1972) 3202
- [9] F. Salvat *et al.*, NEA/NSC/DOC 19 (2001)