電界放出微小電子源型高感度光センサの広ダイナミックレンジ化

Photosensitive Field Emitters with Wide Dynamic Range

正会員 澤田 和 明[†], 石 田 誠[†], 正会員 安 藤 隆 男^{††}

Kazuaki Sawada[†], Makoto Ishida[†] and Takao Ando^{††}

Abstract A new photosensitive field emitter called a "photosensitive floating field emitter" is proposed. It was constructed using an n-type Si field emitter tip and an a-Si:H p-i-n photodiode film. A back incidence type photosensitive floating field emitter was fabricated by depositing intrinsic a-Si:H and p-type a-SiC:H film on the back of a non-gated n-type cone-shaped Si emitter array. The emission current was measured as a function of the illumination intensity and found to increase linearly. The quantum efficiency was about 0.7. However, the emission current tended to saturate at high illumination level.

To expand the dynamic range of the photodetector, we also examined a photosensitive field emitter composed of a gated field emitter and p-type a-SiC:H/intrinsic a-Si:H photodiode film. Its dynamic range was about 200 times wider than that of non-gated type photosensitive field emitters.

キーワード：光検出素子，光電子放出面，微小電子源，フィールドエミッタ，光センサ，真空マイクロエレクトロニクス

1. ま え が き

光を吸収すると電子を放出する光電子放出面は様々な分野で用いられており，特に2次電子増倍管やイメージインテンシファイアでは欠かすことができない。しかしながら代表的な可視光に感度を持つ光電子放出面S20(Sb-Na-K-Cs)においても，その量子効率は最大でも30%以下と非常に小さい。したがって，イメージインテンシファイアを用いてその信号を10万倍以上に増幅できても，先に述べたように1次量子効率が低いため，得られる画像のS/N比が悪く，画質の悪いものであった。

近年，半導体の微細加工技術を用いミクロンサイズの電子源（エミッタ）を製作し，まったく新しい電子デバイスを形成する技術，真空マイクロエレクトロニクスへの関心が高まっている。そのなかでも，特に電界放出型微小エミッタがもっとも多く研究されている¹⁾。これは，固

体表面に 10^7V/cm 以上の強電界を印加すると真空障壁が下がり，量子力学的トンネル効果により固体内の電子が真空中に放出される。この機構によるエミッション電流はFowler-Nordheimの式で与えられる²⁾。電界放出を起こすのに必要な強電界を固体表面に印加するためには，エミッタ先端を先鋭化し，先端に電界を集中させる方法が一般的である³⁾。

これまで私たちは，p型シリコンにより製作したエミッタの放出電流がn型のそれと違い飽和することを報告した⁴⁾。その過程において微小エミッタの中にpn接合を設けることで特異なエミッション特性を示すことが予想され，この現象を光電子放出デバイスとして応用することが可能であることを考えついた。そこでn型シリコンエミッタの裏面にアモルファスシリコンpinフォトダイオードを堆積した可視光に感じる光電子放出面の製作を行った⁵⁾。その結果，入射する可視光に対してそれに比例した電子がその素子より放出されることが確認できた。その量子効率は，波長680nmの可視光に対して約70%であり，従来の光電面のそれより，約2倍の大きなものが得られた。さらにフォトダイオードをアバランシェ増倍領域で動作させることで，入射した光子の数の3倍の電子が放出することを確かめた⁵⁾。

以上のように，従来の光電子放出面に比べて感度が高い光検出素子を実現することができた。しかしながら，製作

1997年6月10日，映像情報メディア学会情報センシング研究会で発表
1998年8月4日受付，1998年10月20日再受付，1998年11月9日採録

[†] 豊橋技術科学大学 電気・電子工学系

(〒441-8580 豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1, TEL0532-44-6739)

^{††} 静岡大学 電子工学研究所

(〒432-8011 浜松市城北3-5-1, TEL053-478-1301)

[†] Department of Electrical and Electronic Engineering, Toyohashi University of Technology

(1-1, Hibarigaoka, Tempaku-cho, Toyohashi 441-8580, Japan)

^{††} Research Institute of Electronics, Shizuoka University

(3-5-1, Johoku, Hamamatsu 432, Japan)

図1 電界放出微小電子源型光センサの原理図
Schematic cross-sectional view of a proposed photosensitive floating field emitter.

した光検出素子で検出可能な光の最大光量は約 $20\mu\text{W}/\text{cm}^2$ と低いものであった。今回は、その最大検出光量を高くするために、電界放出部にゲート電極を持つ3極管構造の電界放出微小電子源を用い、その限界を200倍程度増加させることができたので報告を行う。

2. 電界放出微小電子源型光センサの動作原理

電界放出型微小エミッタからのエミッション電流が入射光量に依存することは、1972年にR.N.Thomasらにより報告されている⁹⁾。このとき用いられたエミッタ材料は、p型シリコンである。p型エミッタの場合、光を入射しなくても表面準位を介し発生した電子によりエミッションが起こるため、室温では、暗電流が、非常に大きい。したがって光検出を行うには、素子を液体窒素温度程度まで冷却しなければならない。

これを解決するために、我々は、図1に示すようにエミッタ内にpn接合を内蔵させ、その先端を電氣的にフローティングすることにより、室温でも、光検出ができるエミッタ構造を考えた、この構造では、先端が電氣的にフローティングされることより、このエミッタをフローティングエミッタと呼んでいる。現在のところ、集積回路技術を用いたエミッタ作製技術では、ナノスケールであるエミッタ先端のばらつきを押さえることは難しい。しかしながら、今回提案している光検出素子の放出電流は入射する光の量でコントロールされているため、エミッタ先端のばらつきの影響は受けない。

図2と図3は、それぞれ、暗時のフローティングエミッタの概略図と暗時のエネルギーバンド図である。図中の黒丸は電子を表す。フローティングエミッタに光が照射されていない状態（暗時）で、アノードに大きな電圧を印加すると、図3(a)のように、n領域内に存在する電子が曲げられた真空レベルをトンネルし放出される。その結果、n領域の電位が上昇し、それにより、エミッタ・アノード間の

電圧が減少するので、エミッション電流は減少する。そして、最終的に、放出電流とpn接合内部で熱的に発生する電流とが等しくなって、図3(b)のような平衡状態に達する。このときの暗電流は、Thomasらにより報告されているものとは違い、pn接合領域にできる空乏層内での熱的な発生であるために非常に低いものである。

図4と図5は、それぞれ、光照射時のフローティングエミッタの概略図とそのバンド図である。図中の黒丸、白丸は、それぞれ、電子と正孔を表す。平衡状態に達したフローティングエミッタに光を照射すると、図5(a)のように空乏層内で電子正孔対が発生し、電子はn領域に、正孔は基板側に流れる。その結果、n領域の電位は下がり、平衡状態が崩れる。そして、再び、図5(b)のように真空レベルが深く曲げられ、より多く電子がトンネルするようになる。この光の照射をやめると、フローティングエミッタは電子を放出し、平衡状態に戻る。n領域の電位の下がる量は、光

図2 暗時の電界放出微小電子源型光センサの断面図
Schematic cross-sectional view of a proposed photosensitive floating field emitter at a dark condition.

図3 暗時の電界放出微小電子源型光センサのバンド図
A band diagram of a proposed photosensitive floating field emitter at a dark condition.

図 4 照射時の電界放出微小電子源型光センサの断面図
Schematic cross-sectional view of a proposed photosensitive floating field emitter at an irradiation condition.

図 5 照射時の電界放出微小電子源型光センサのバンド図
A band diagram of a proposed photosensitive floating field emitter at an irradiation condition.

量により変化するので、光量によりエミッタ・アノード間の電圧が変化し、エミッション電流が変化する。

3. ゲートなし電界放出微小電子源型光検出素子の特性

3.1 電界放出微小電子源型光検出素子の製作

微小電子源はn型Si(100)基板上にコーン型で製作した。この製作工程は、まずドライ酸化により、Si基板上に約400nmのSiO₂膜を成長させ、次に、SiO₂膜上に電子ビーム露光用レジストをスピコートし、電子ビーム描画装置を用いて直径4μmの円を描画する。このレジストをマスクにし、SiO₂膜をエッチングする。このSiO₂膜をマスクとして、CF₄とO₂の混合ガスによるプラズマエッチャによりSi基板をエッチングする。このときSiO₂マスクの下にアンダーカットが生じ先端が平坦なエミッタの原型ができ

る。先端を先鋭化するために、酸化を行う。そして、SiO₂を除去してエミッタが完成する。

n型シリコン基板上にコーン型エミッタを製作したのち、エミッタの裏面にプラズマCVDによりa-Si:H pinフォトダイオードを堆積した。エミッタがn型シリコンで製作されているので、実際は、ノンドープ層(i層)を1μm、p型a-SiC:H膜を0.3μm堆積した。次に電極として金をスパッタにより20nm堆積した。金電極は1.5mm角にパターンニングされている。試作した素子の断面構造を図6に示す。

3.2 ゲートなし電界放出微小電子源型光検出素子の特性

図7にゲートなし電界放出微小電子源型光検出素子の特性を示す。アノード電圧を450Vに保ち、入射光量を変えてエミッション電流を測定した結果である。図の中の直線は、それぞれ量子効率1と0.5の理論値を示している。図より入射光量の増加に伴いエミッション電流が直線的に増加していき、さらに光量の大きな領域では、エミッション電流が飽和していることがわかる。入射光量とエミッション電流量が比例する最大光量は約20μW/cm²と低いことがわかる。この結果、このデバイスにおける光検出ができるダイナミックレンジが狭くなってしまふ。

4. 電界放出型光検出素子の広ダイナミックレンジ化

4.1 光検出素子の飽和特性の原因と解決策

この飽和の原因を明らかにするために、図8に光電変換を行うフォトダイオード膜の静特性と電界放出微小電子源の放出電流特性の関係を示した。この図の電界放出型微小電子源の放出電流特性はアモルファスシリコンpinフォトダイオード膜を堆積する以前に、あらかじめ測定を行ったものを使用している。図8に示した特性はアノードに450V

図 6 製作を行った背面入射電界放出微小電子源型光センサの断面図
Schematic cross-sectional view of a fabricated back irradiation type photosensitive floating field emitter.

を印加した時を示している。提案を行っている高感度光検出素子は、フォトダイオード膜の静特性とエミッション電流特性が重なる動作点で動作しているものと考えられる。pin フォトダイオード膜を形成する以前の放出電流特性よりアノード電極に350V印加するとエミッション電流が流れ始める。アノードに450Vを印加した時はエミッタのポテンシャルは、 $(450V - 350V) = 100V$ が最大である。つまりこのときは、アノードに450Vを印加していてもエミッタのポテンシャルが100Vであるために、エミッタ・アノード間には350Vしか印加されていない。これはフォトダイオードに光が照射されていないときに相当する。実際には暗電流分だけエミッタのポテンシャルは下がっている（ダーク電流の特性とエミッション電流（点線）の交点）。光が照射されると光電流がエミッタに流れこむためにエミッタのポテンシャルは下がっていく（したがってエミッタ・アノード間の電圧は大きくなりエミッション電流は増加する）。図8より、光量の少ない領域では、動作点がフォトダイオードの光電流の飽和領域に位置しているが、光量を増加させていくと動作点が光電流の非飽和領域に移動することがわかる。その結果、エミッション電流は光量を増加させても増加しなくなる。

この飽和現象を解決し、最大検出光量を大きくするには図9に示すような2通りの解決方法があると考えられる。第1の方法として、アノード電圧を上げ、電界放出素子の特性を、図の右方向にシフトさせることである。しかしながらこの方法では、光の最大検出限界は増加するが、光が照射されていないときに放出される暗電流成分が増えてしまう。第2の方法として、電界放出微小電子源の相互コンダクタンスを大きくして、少量の電圧変化で、放出電流が大きく変化する素子を電子放出部として用いることが考えられる。図に示すように、この方法は、暗電流も低く押さえられ、第1の方法より最大検出光量も高くできることから、有利な方法と考えられる。微小電子源の相互コンダクタンスを高くするためには、ゲート電極付きの3極管構造

図7 製作を行った光センサからの放出電流の入射光依存性
The dependence of the emission current on the incident light intensity of the non-gated photosensitive device fabricated with a-Si:H p-i-n photodiode film.

図8 製作を行った光センサからの放出電流の入射光依存性
The load line characteristic of the n-type silicon emitter superimposed upon the a-Si:H pin photodiode film characteristic.

にすればよいと考えられる。その理由のFowler-Nordheimの式を用いて示す。

$$J = \frac{AF^2}{\phi} \exp\left(-B \frac{\phi^{3/2}}{F}\right) \quad (1)$$

$$A, B = \text{constant} \quad (2)$$

$$F = \beta Va \quad (3)$$

$$\beta = \frac{2}{r \cdot \ln\left(\frac{2d}{r}\right)} \quad (4)$$

r はエミッタ先端の曲率、 d はエミッタ先端と引き出し電極の距離である。微小電子源の高い相互コンダクタンスとは、小さな引き出し電圧の変化で放出電流 J が大きく変わることである。(3)式を見るとわかるが β が大きければ、 Va のエミッタ先端の電界に及ぼす影響が大きくなり、高い相互コンダクタンスが得られる。エミッタ先端の曲率が同じであれば、 β を大きくするには引き出し電極とエミッタ先端の距離を縮めればよいことがわかる。ゲートを持たない2極管構造の電界放出微小電子源の先端とアノード電極の距離は大きいため β は小さくなる。ゲート付き3極管構造を採用することによりエミッタ先端の電界を、エミッタ先端に隣接するゲートによりコントロールすることができるために β を大きくすることができる。したがって高い相互コンダクタンスが得られる。

4.2 3極管構造をもつ電界放出型光検出素子の製作

電子放出部のコンダクタンスを大きくするために、ゲート電極を持つ電界放出電子源の試作を行った。図10に3極管エミッタの製作プロセスを示す。まず、シリコン基板上に約400nmの酸化膜を成長させ、次に、酸化膜を電子ビーム描画装置を用いて直径4mmの円をパターンニングする(a)。この酸化膜をマスクにして、 $rmCF_4$ と O_2 の混合ガスによるプラズマエッチングによりシリコン基板をエッチングする(b)。このとき、図のようにマスク下にアンダーカットが生じ先端が平坦なエミッタの原型ができる。先端

をさらに先鋭化するためとゲートの絶縁のためにドライ酸化を行う。次に、ゲート電極としてPoly-Siを常圧CVDにより堆積させる(c)。この堆積したPoly-Siを電極の形状にパターニングしたのちに、エミッタ先端を露出させるためにフォトリソistをスピコートする(d)。これを rmO_2 プラズマ(RIE)中にさらすと、図のように、レジストの薄いマスク上部のレジストが先に除去される。このようになったら、RIEでマスク上部のPoly-Siをエッチングする。次に、Buff-HFでマスクのみをエッチングする。そして、RIEで、余分なPoly-Siをエッチングする(e)。最後に、エミッタ先端を出すために、Buff-HFでエッチングし、レジストを除去して完成する(f)。その後、このエミッタの裏面にプラズマCVDによりa-Si:H pin フォトダイオードを堆積した。エミッタがn型シリコンで製作されているので、実際は、ノンドープ層(i層)を $1\mu\text{m}$ 、p型a-SiC:H膜を $0.3\mu\text{m}$ 堆積した(g)。次に電極として金をスパッタにより 20nm 堆積した。金電極は 1.5mm 角にパターニングされている。完成した代表的なゲート構造をもつ電界放出型光検出素子のSEM写真を図11に示す。この写真よりエミッタの先端の曲率半径は約 50nm であることがわかる。さらにゲート・エミッタ間の距離は約 500nm であった。

4.3 ゲート構造をもつ電界放出型光検出素子の特性

まず最初にアモルファスシリコンフォトダイオード膜を堆積する前に(製作プロセス図の(f)に対応)たゲート電極を持つ電界放出微小電子源ゲート構造をもつ電界放出型光検出素子の特性を調べた。

測定は 9×10^{-9} Torrの真空中で行った。アノードとエミッタ間の距離は約 3mm に保った。測定に使用した微小電子源の個数は100個である。図12に、ゲート構造をもつ電界放出型微小電子源のみの放出電流のゲート電圧依存性を示す。電流は約 35V から観察され始め、ゲート電圧 60V で約 $3.5\mu\text{A}$ の電流値が観測できた。2極管構造のものは 50nA の電流を得るのに約 100V の電圧変化が必要であっ

図9 ダイナミックレンジを広くするための解決策
Solutions to expand the dynamic range of the photosensitive field emitter.

図10 3極管構造をもつ電界放出型光検出素子の製作プロセス
A fabrication process of the gated floating field emitter.

図11 製作した3極管構造をもつ電界放出型光検出素子のSEM写真
A SEM photograph of the fabricated device.

たが、3極管構造を採用することで 25V の電圧で約 $3.5\mu\text{A}$ の電流が得られたことになる。このように期待通り、微小電子源の相互コンダクタンスを高くすることができた。

この放出電流のFowler-Nordheim(F-N)プロットを 図13に示した。F-Nプロットは直線になっており、放出電流が典型的な電界放出であることが確認できる。

ゲート電圧を一定に保ち、アノード電圧に対する、エミッタ電流、ゲート電流、アノード電流の依存性を調べた。その結果、アノード電圧がゲート電圧より低い領域では、エミッタ電流とゲート電流がほとんど同じであり、エミッタから放出された電子はアノードには届かず、ゲート電極に流れていることがわかった。アノード電圧を、約 50V 以上にするとエミッタ電流とアノード電流が一致するようになり、エミッタから放出された電子のほとんどがアノード電極に達するようになる。

アノード電圧 0V のときには、エミッタ先端から放出された電子がアノード方向の電界がないため、ゲート方向の電界に引っ張られゲートに電子が流れ込む。そしてアノー

ド電圧を増加させていくと、アノード方向の電界が増加してくるため、アノードに流入する電子が増加する。アノード電圧を十分に大きくすると、ほぼすべての放出電子がアノードに集まる。この状態の分配率はほぼ 100%である。アノード電流が一定値で飽和するということは、放出電子数がゲート電圧により決まると考えられ、アノードによる電界の影響がエミッタ先端にほとんど及んでいないといえる。

以上のように大きな相互コンダクタンスをもつフィールドエミッタが製作できたので、これを光検出素子の電子放出部として使用することにした。そこでこれまで示した特性をもつ微小電子源の裏側にアモルファスシリコン pin 構造をもつフォトダイオードを堆積させた。光吸収層である i 層の膜厚を $1\mu\text{m}$ とし、電子のブロッキング層と光の窓層を兼ねた p-type のアモルファスシリコンカーバイド層を $0.3\mu\text{m}$ 堆積させた。このフォトダイオードの特性をあらかじめ用意されている TEG (Test Element Group) 用

図 12 ゲート構造をもつ電界放出型微小電子源のみの放出電流のゲート電圧依存性
The dependence of the emission current on the gate bias of the fabricated gated emitter.

図 13 放出電流の FN プロット
The FN plot of the emission current of the fabricated gated emitter.

図 14 製作した 3 極管構造微小電子源の光電変換特性
The dependence of the emission currents on the incident light intensity.

の端子で測定してみると、100V 以上の逆バイアスを印加してもブレイクダウンせず、しかも良好な光電変換特性を示すことがわかった。

そこで 3 極管構造をもつ微小電子源と、アモルファスシリコンフォトダイオードを組合せた光センサを測定してみた。そのときの光電変換特性を図 14 に示す。ゲートに印加する電圧は 110V とした。またアノード電圧は 200V 一定にして測定している。図 12 の特性から、ゲート電圧を 110V ほど印加することにより光を照射していないとき、フォトダイオードには $(110\text{V} - 35\text{V}) = 75\text{V}$ の電圧が加わっていると予想できる (微小電子源は 35V のゲート電圧が印加されるまで電子を放出していないことをこの節の最初に述べた)。この電圧においてはフォトダイオードは充分逆バイアスされており飽和領域で動作している。

図 14 に示した光電変換特性から最大検出光量が $20\mu\text{W}/\text{cm}^2$ から $4000\mu\text{W}/\text{cm}^2$ と約 200 倍に増加できたことがわかる。さらにこのときの暗電流も約 10nA と低く押さえることができた。また量子効率も約 70%であった。

このときの負荷曲線を 図 15 に示す。高い相互コンダクタンスを持つフィールドエミッタを電子放出部としたことにより、動作点はフォトダイオードの飽和領域に、光量を増やしても存在することがわかる。

さらに多量の光を照射してみたが、放出電流が $7\mu\text{A}$ を越えたところで微小電子源が破損してしまった。これは多くの電流が微小電子源先端を流れたことで、そのジュール熱で破損したものと予想している。これは微小電子源をさらに多く集積することで解決でき、最大検出光量の増加が期待できる。

5. む す び

これまで報告してきた電界放出微小電子源を用いた光検出素子の最大検出光量は約 $20\mu\text{W}/\text{cm}^2$ と非常に低いものであった。その原因は、電子放出部として用いている電界放出微小電子源のコンダクタンスが小さいことにあつ

図 15 製作した 3 極管構造微小電子源の負荷曲線

The load line characteristic of the gated silicon emitter superimposed upon the a-Si:H pin photodiode film characteristic.

た。微小電子源の小さなコンダクタンスを改善するために、ゲート構造をもうけた 3 極管電界放出微小電子源を試作した。その結果、高い相互コンダクタンスを持つ電子放出源が試作できた。それを用いて、光検出素子を試作したところ、最大検出光量を約 200 倍とすることができた。

本研究は文部省科学研究費の援助により行われた。

〔文 献〕

- 1) 金丸, 伊藤: “極微小真空管”, テレビ誌, **45**, p.612(1991)
- 2) R.H.Fowler, L.H.Nordheim: “Electron Emission in Intense Electric Field”, Proc. Roy. Soc., **A119**, p.173 (1928)
- 3) H.F.Gray, G.J.Czmpisi, R.F.Greene: “A Vacuum Field Effect Transistor using Silicon Field Emission Arrays”, IEDM Tech. Dig. 776(1986)
- 4) K.Sawada, K.Ji, T.Ando: “Characterization of p-type Silicon Field Emitters”, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, p.L1345(1994)
- 5) K.Sawada, N.Matsumura, T.Ando: “Photosensitive Field Emitters Including a-Si:H p-i-n Photodetection Region”, IEEE Trans. Electron Devices, **45**, p.321 (1998)
- 6) R.N.Thomas, H.C.Nathanson: “Transmissive-Mode Silicon Field Emission array Photoemitter”, Appl. Phys. Lett., **21**, p.387 (1972)

さわだ かずあき
澤田 和明 1991 年, 豊橋技術科学大学大学院博士後期課程修了。1991 年, 静岡大学 電子工学研究所助手。1998 年, 豊橋技術科学大学講師。主としてイメージセンサの高感度化に関する研究に従事。工学博士。正会員

いしだ まこと
石田 誠 1979 年, 京都大学大学院博士後期課程修了。1979 年, 豊橋技術科学大学助手。1991 年～1992 年, ベルギー王国 IMEC 客員研究員。1997 年, 豊橋技術科学大学教授。SOI 構造の形成とセンサ・集積回路への応用についての研究に従事。工学博士。

あんどう たかお
安藤 隆男 1967 年, 静岡大学工学部卒業。1967 年, 日本電気(株)中央研究所 入所。1975 年, 静岡大学電子工学研究所 助教授。1981 年, 同大学教授。1998 年, 同大学名誉教授。撮像デバイスの固体化の基礎研究, 撮像デバイスの高機能化, アバランシェ増倍の撮像デバイスへの応用などの研究に従事。工学博士。正会員。