電界放出微小電子源型焦電赤外センサ

非会員 富田勝彦 (豊橋技術科学大学)
正員 澤田和明 (豊橋技術科学大学)
正員 石田 誠 (豊橋技術科学大学)

Field Emitter Type Pyroelectric Infrared Sensors

Katsuhiko Tomita, Non-Member, Kazuaki Sawada, Member, Makoto Ishida, Member
(Dept. Electrical&Electronic Eng., Toyohashi University of Technology)

A field emitter type pyroelectric infrared sensor was newly proposed. The sensor was constructed using field emitter tips, a MOSFET (metal-oxide-semiconductor field effect transistor) and a pyroelectric material. At first, a dependency of the emission current on the infrared incident light intensity was simulated. To simulate the emission current, a measurement of the voltage responsibility on the pyroelectric material was carried out. A principle of the new sensor was confirmed by using an equivalent circuit for the infrared sensor, which is composed of discrete devices that are gated cone-shaped field emitters (n-type Si), an n-ch MOSFET and a sheet PZT. From the experiment results, it was found that the proposed device was sensitive to an infrared light of longer wavelength over $10\mu\text{m}$ and the emission current was proportional to the incident infrared light intensity. The experimental data coincided with simulated ones.

キーワード：赤外線，イメージセンサ，強誘電体，焦電体，微小電子源，MOSFET

1. はじめに

固体赤外センサは当初軍事用途を目的に開発されたが、今では日常の自動ドアや侵入警報器などのセキュリティ分野で確固たる大きな市場を獲得し、安価で高感度かつ簡便な赤外センサとしてこの15年間で身近なものになった。最近では低温熱源の観測の重要性が認識されるに従って省エネや環境対策、そして最近では交通運輸関連等の民生用計測機器として近年注目を集めている。特に高度道路通信システム(ITS)をはじめとする次世代インテリジェントシステムには不可欠な要素技術となりつつある。

これまで研究開発されてきた固体赤外センサを大別すると量子型と熱型に分類される。

半導体のバンド構造を利用した量子型センサは、高感度で応答性が速く、優れた特性を持っている。暗闇でも物体の形状が認識でき、温度分布の測定も可能な赤外画像を得ることができるイメージセンサ応用には、極めて高感度が必要なため、特に量子型が使われてきた。しかし量子型は狭いバンドギャップを持つ半導体を使用するため、低温に冷却する必要性があり、大型で高価な装置となる。さらに感度の波長依存性などの制限があり、民生デバイスとして扱いにくいのが現状である。

これに対して、機能材料の赤外線吸収に伴う温度変化による物性値の変化を検知する熱型赤外センサは、室温で動作させることが可能であり、一般的に取り扱いやすい。しかしながら、量子型のセンサに比べて一

析以上感度が低く、高感度化が課題となっている。

熱型には、焦電型、ボロメータ型、熱電堆型等があり、それぞれ固有の特徴を持っている。特に強誘電体材料を応用する焦電型赤外光検出は、チョッピング機構を必要とするものの、ボロメータ型や熱電堆型の赤外光検出に比べ感度が高く、外乱の熱雑音の影響を受けにくく、さらに熱型特有の室温動作が可能であるという優れた特徴を持っている。

一般に熱型赤外センサの熱容量は感度、応答速度に直結するため、その高感度化には、熱容量の制御が非常に重要となる。特に熱型赤外イメージセンサは2次元配列が不可欠のため、微小な加工技術が必要となる。最近半導体プロセス技術を応用した微細加工技術により、熱型センサの3次元構造体を加工するシリコンマイクロマシニング技術の発展の恩恵を受けて、小型で安価、更に常温動作の赤外イメージセンサが実現できるようになってきた。(1,2,3)

ところで光電子放出面は、光計測、微弱光イメージング等に用いられる。なぜなら光電子放出面から放出された光強度に見合った電子は、2次電子増倍管やマルチチャンネルプレート(MCP)により、極めて低雑音で、増倍が可能であるためである。しかしながら光電放出面には、2つの技術課題を抱えている。その1つは、外部光電効果を利用しているため、その受光可能な波長は原理上、長波長領域まで延ばすことは困難であることにある。近赤外領域で感度を持つ光電子放出面[Al/InP/InGaAs/InP(Sub.)]においても超格子構造を導入することで受光可能な波長領域を $1.7\mu\text{m}$ 程度までのばすことができたことが報告されている。(4)半導体材料による光電面の赤外波長特性は $2\mu\text{m}$ 程度が限界と考えられているが、さらにこの波長に対する十分な量子効率を得るにはなおさら厳しい状況となろう。

もう一つの技術課題は、上述の[Al/InP/InGaAs/InP(Sub.)]光電面を持つPMTにおいても、その量子効率は $1.6\mu\text{m}$ の波長で最大0.1%以下と非常に小さいことである。光電子放出面からの出力電子は、2次電子増倍管やマルチチャンネルプレートを用いて、低雑音で10万倍以上に増幅できる。しかし2次電子増倍管を用いてその信号を10万倍以上に低雑音で増幅できても、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比が悪くなる。

ここで今までの赤外センサを固体型と電子放出型に分類すると、表1に示すようになる。

表1 赤外センサ

Table 1. Infrared sensors

		固体型	電子放出型
		量子型	半導体
		PbSe, InSb, SiPt ⁽⁵⁾	光電材料
		HgCdTe	Al/InP/InGaAs/InP(Sub.)
熱型	焦電型 ボロメータ型 熱電堆型	PZT など強誘電体材料 酸化物材料 Sb-Bi系、Si-Al系等	該当なし

この表から明らかなように今まで熱型センサで電子放出型の高感度センサには現在該当するものがない。

今回の報告では、近年進展著しい電界放出微小電子源^(6,7,8)を用いて、従来の光電子放出面では原理上受光不可能であった $3\mu\text{m}$ 以上の赤外光を受光可能にし、さらに感度の高い赤外イメージセンサの実現を目指した基礎的な実験結果を述べる。

2. 電界放出微小電子源型焦電赤外センサの提案

まず我々は、電界放出微小電子源型焦電赤外センサとして、MOSFETのドレイン領域に三極管構造の電界放出微小電子源を設け、ゲート領域には焦電体を配置するデバイス構造を提案している。

焦電型センサは赤外光の入射によって生じる温度上昇に基づく自発分極値の変化により、焦電体表面の電荷量が変化し、その両端に赤外光の入射光量に依存した電圧が発生する。今回提案している電界放出微小電子源型焦電赤外センサの原理は、その焦電体の発生電圧をMOSFETのゲートに加えてMOSFETのチャネル電流を制御することにある。またシリコン微小電子源からの放出電流を制御、安定化させる方法として、MOSFETのドレインに微小電子源を配して、MOSFETのゲート電極で放出電流を制御する方法が提案されている⁽⁹⁾。この方法はシリコン微小電子源を集積回路技術と融合活用できる手法の一つであると考えられている。そこで赤外エネルギーを受けた焦電体からの信号をMOSFETゲート部で受けて、そのドレイン出力をドレイン領域に設けた微小電子源からのエミッション電流として検知する新しい動作原理の赤外センサを提案している。今回提案のデバイス構成により、焦電体に入射する赤外線光量に依存した焦電

体誘起電荷量に比例した量の電子がドレインにある電界放出型微小電子源から放出可能となる。図1に提案するデバイス概念図を示す。

図1 光センサ型フィールドエミッタ方式ピクセル構造の提案

Fig.1 A pixel structure of a proposed photosensitive field emitter.

3. 本提案デバイスの放出電流値の概算予測

上記提案の新しいデバイス動作原理を確認するため、最初に一般的な焦電型センサの感度を測定し、更に初段入力FETおよびソースフォロア回路から赤外線入射光量に依存するシリコン・フィールドエミッタに流れるドレイン電流及びピクセル構造(図1)での放出されるエミッション電流の概算予測計算を試みる。次に実際に焦電体とMOSFETおよびシリコン・フィールドエミッタの3つの基本的な要素部品だけ機能要素部品でディスクリット回路を作製し、入射赤外線エネルギーに相関すると考えられるエミッション電流を計測する。最後に先の概算予測放出電流値と実測放出電流値を比較検討する。

<3.1> エミッション電流値の概算

市販されているセンサは、初段回路にJFETやMOSFETを使用し、更にソースフォロア回路を介して外部に信号を取り出す構成としている。この市販センサでは、実際には赤外線入射で焦電体の両端で発生した電圧がFETのソースフォロア回路出力として変換されても、初段FETのドレイン電流値そのものは直接計測できない。そこで今回は概算的な計算で動作原理を確認する目的で、理想的なソースフォロア回路

として相互コンダクタンス(g_m)を1と見なし、ソースフォロア回路でFETソース側に接続されている抵抗 $R_s(10\text{K}\Omega)$ に流れる電流をドレイン電流とした。

今回提案しているピクセル構造では、FETに流れるドレイン電流をエミッション電流として計測するものである。(図1, 図5参照) このドレイン電流は、焦電体誘起電荷量に変調されたゲート電圧に比例していると仮定できる。従ってエミッション電流は、焦電体誘起電荷に変調される。以上の仮定により、以下の手法を用いて、エミッション電流を予測した。

焦電型センサでは一般に入射エネルギーを計算できる黒体炉などの光源を使用し、センサ感度の性能指数の1つとして電圧感度(V/W)がよく用いられる。次にこの電圧感度からエミッション電流の計算式を示す。

$$I_{\text{emission}} = I_D = R \times (W_0 \times A) / R_s \quad \text{----- (1)}$$

W_0 : 光源光量 (W/cm^2)

A : 焦電体面積 (cm^2)

R : レスポンシブティ (V/W)

V : FETゲート入力に発生する電位 (V)

R_s : ソースフォロア回路のソース側抵抗 ($10\text{K}\Omega$)

I_D : ソースフォロア回路で抵抗 R_s に流れる電流

I_{emission} : フィールドエミッタから放出される電流量 (A)

今回実験に使用した焦電体(PZTセラミックス)の焦電特性関連の物性値を表2に示す。また最初の予測計算に必要な電圧感度の測定や後のシリコン・フ

素子寸法	受光面積	$2 \times 0.8 [\text{mm}^2]$
	厚み	$0.1 [\text{mm}]$
Cr電極膜厚	受光面	$80 \pm 20 [\text{\AA}]$
	裏面	$1000 [\text{\AA}]$
受光面積		$1.6 \times 10^{-2} [\text{cm}^2]$
キュリー温度(T_c)		$330 [^\circ\text{C}]$
比誘電率 ϵ_r		325
焦電係数		$4 \times 10^{-9} [\text{Coul.}/\text{K}/\text{cm}^2]$

表2 PZTセラミックスの諸特性

Table 2. Properties of PZT ceramics

ィールドエミッタとの組み合わせ実験にも同じ焦電体を使用したのもので、その焦電体の寸法、受光面積なども示す。

焦電型センサは出力信号を得るため、黒体炉の放射

前に赤外線入射を断続するチョッパーが必要であり、チョッピング周波数を5 Hzの条件で統一した。焦電型センサの電圧感度を測定するシステムを図2に示す。

図2 感度測定システム

Fig.2 Schematic diagram of infrared sensor measurement.

予測計算の基本となる焦電型赤外センサの電圧感度を測定した。図3にチョッピング周波数に依存する電圧感度を示す。予測値計算には、5 Hzでの平均的な数値(50 V/W)を採用した。

図3 電圧感度の周波数依存性

Fig.3 Frequency dependence of the voltage responsivities at various pyroelectric elements.

<3.2> 予測計算結果と考察

図4に上記電圧感度の測定結果を使用し、式(1)による入射光量に依存する電子放出による電流値の予測計算結果を示す。約50 μ Wの入射エネルギーにおいて約270 nAの放出電流値となった。

図4 赤外線入射光量に依存する放出電流(予測計算)

Fig.4 Incident infrared light intensity dependence on emission current (calculation).

4. ディスクリート構成による原理確認実験

<4.1> 実験方法

次に3つの基本的な要素部品の組み合わせによる実際の原理動作確認実験を行った。シリコン・フィールドエミッタは、先端の曲率半径が40 nmとなる3極管型シリコン微小電子源(100 tip)であり、0.4 μ mのゲート-エミッタ間距離で 10^{-8} Torr台の真空装置内に配置した。結合した微小電子源は真空装置の外部に配置してあるn-MOSFETのドレイン側に接続されている。MOSFETのゲート部には、赤外光受光部としてPZTの焦電体を配置した。

図5 原理確認用実験装置

Fig.5 Experimental setup.

図5に示すような構成を用いて実験を行った。回路構成はドレインに直列にシリコン・フィールドエミッ

タを接続し、FETソース側は抵抗 ($10\text{ K}\Omega$) を接続したのちに接地している。赤外線の入射により焦電体の誘起電荷量が変調され、MOSFETゲート電圧に比例したエミッション電流を得ることができる。微小電子源のアノード電極、ゲート電極にはそれぞれ、 600 V 、 60 V の直流電圧を印加している。入射赤外光は 5 Hz でチョッピングした。また波長依存性測定では光源側にグレーティングを用いた赤外分光器を用いて測定した。

<4.2> 放出電流測定結果

実際に焦電型赤外センサのFETドレイン部分にシリコン・フィールドエミッタを接続した実験において、赤外入射光量依存性の実測データを図6に示す。横軸には入射光量、縦軸にはエミッション電流 (アノード電流値) を示している。

図6 赤外線入射光量依存性 (実測データ)

Fig.6 Incident light intensity dependence on emission current.

電子放出電流値の実測結果は、約 $20\text{ }\mu\text{W}$ の入射エネルギーにおいては約 65 nA の放出電流値となった。赤外入射エネルギーの約 10 nA 以下の微小電流範囲で放射電流値のバラツキが多く、ノイズレベルと見なしている。

フィールドエミッタから放射するエミッション電流値において、概算予測値と実測値を比較するため、図7にその結果をまとめた。

放射電流の実験及び計算結果 (図5, 6) の比較をすると、同じ入射エネルギー条件でのデータは得られなかったが、エネルギー放射による電子放出は、線形特性であり、オフセット電圧を持っていると考えられる。このオフセット電圧は、実験に使用したMOSトランジスタが、エンハンスモードであることに起因しているためである。デプレッションモードを用いれば、

図7 放射電流の実験及び計算結果の比較

Fig.7 Comparison of emission current between experimental and calculated data.

このオフセットをなくすことが出来る。

従来の光電子放出面では原理上検出不可能であった波長 $3\text{ }\mu\text{m}$ 以上の赤外光に対する感度が、電界放出微小電子源型焦電赤外センサでは、波長 $4\text{ }\mu\text{m}$ から $10\text{ }\mu\text{m}$ の範囲において波長依存性がないことが確認できた。図8に、電界放出微小電子源型焦電型センサの赤外線入射光波長による感度依存性を調べた結果を示す。

図8 放出電流の入射赤外光波長依存性

Fig.8 Incident light wavelength dependencies on emission current.

5. まとめ

シリコン微小電子源、MOSFETおよび焦電型センサを組み合わせた、新しい電界放出微小電子源型焦電赤外センサの提案を行った。まず提案したデバイス動作原理の確認のため、赤外線入射光量に依存するシリコン・フィールドエミッタに流れるドレイン電流値、

及びピクセル構造での放出エミッション電流の概算予測計算を試みた。次に実際に焦電体とMOSFETおよびシリコン・フィールドエミッタの3つの基本的な要素部品からなるディスクリート回路でエミッション電流値を計測した。その結果、当初に電圧感度測定から求めた概算放出電流値と、焦電体と初段MOSFETのドレイン側に直列にシリコン・フィールドエミッタを設けたディスクリート回路において、オフセット電圧はあるが、実測放出電流値は、赤外入射エネルギーに線形応答を示す。更に従来の光電子放出面では原理上検出不可能であった波長 $3\mu\text{m}$ 以上の赤外光に対する感度が電界放出微小電子源型焦電赤外センサでは、 $10\mu\text{m}$ ミクロン帯にまで及ぶことが確かめられた。これら比較検討の結果、本提案デバイスの動作原理が正しいことを確かめることができた。この結果は上記3つの機能を一体化したデバイスは、微小電子源型焦電赤外センサとして実現可能であることを示唆していると考えられる。

今回の基礎実験は、単体の赤外センサでの原理確認の実験で留まっているが、現在2次元赤外センサの実験を進めている。非冷却型である焦電型固体センサから得た赤外2次元情報を微小電子源から2次元電子分布として出力できると、従来の2次元電子増倍管またはマルチチャネルプレート、あるいはマイクロマシン技術の異方性エッチング技術を駆使した超小型のマルチチャネルプレート⁽¹⁰⁾と組み合わせることにより、出力電子を低雑音で増幅できる。赤外エネルギーを電子に放出させる変換効率が低い時には、従来の熱型センサの $10\sim 1000$ 倍の高感度赤外イメージが可能になるものと期待している。

謝辞

本デバイスの試作および評価にあたって、堀場製作所・高田秀次氏、岡本一隆氏、富永浩二氏、豊橋技術科学大学・高室大介氏のご指導、ご協力を頂きました。深く感謝いたします。

(平成12年6月5日受付、同12年10月12日再受付)

文献

- 1) M.H.Unewisse, et al.: Proc.SPIE.2269(1994)43
- 2) H.Beratan, et al.: Proc.SPIE.2274(1994)147
- 3) A.Tanaka, et al.: IEEE Trans. Electron Device ED-43 (1996) 1894
- 4) 新垣実, 廣畑徹, 鈴木智子, 菅博文, 晝馬輝夫:

テレビジョン学会技報, 20 (30), 19(1996)

- 5) 木股雅章, et al.: 日本赤外線学会誌, 5, 1(1995)33-42
- 6) C.A.Spindt, et al.: IEEE Trans. Electron Devices, 36 (1988) 225.
- 7) H.F.Gray, et al.: Technical Digest of IEDM, (1986) 776.
- 8) K.Sawada, et al.: IEEE Trans. Electron Devices, 45[1], 321-325
- 9) K.Koga, S.Kanemaru, T.Matsukawa, J.Itoh: J. Vac. Sci & Tech. B17(2), 588 (1999).
- 10) K.Takahashi, H.Sasaki: Technical Digest of 16th Sensor Symposium, 203 (1998).

富田 勝彦

(非会員) 1962 年立命館大学理工学部化学科卒業。1962 年堀場製作所入社。1999 年豊橋技術科学大学大学院博士後期課程。主として赤外センサ、イオンセンサ等各種のセンサ研究及び応用製品開発に従事。

澤田 和明

(正員) 1991 年豊橋技術科学大学大学院博士後期課程終了。1991 年静岡大学電子工学研究助手。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。

石田 誠

(正員) 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。1991～1992 年ベルギー王国IMEC客員教授、SOI構造の形成とセンサ・集積回路技術への応用についての研究に従事。工学博士。