

論文の内容の要旨

論文題目 電荷敏感型赤外光検出器の開発

氏名 上田 剛 慈

本研究では諸現象の豊かなスペクトル帯である波長 $5\mu\text{m}$ から $50\mu\text{m}$ 領域に対応する赤外単一光子検出器の開拓を行った。この波長領域には天文分野を主とした長い研究開発の歴史があり、現在既に高感度の検出器が多数存在する[1]。近年ではアレー化した撮像素子の開発が盛んである。しかし、単一光子検出が可能なほどの超高感度検出器は未だ存在しない。また、現状では撮像素子と読み出し回路との一体化はバンプ接合などの難度・コスト共に高い技術を要しており[1]、将来的な広範な普及と画素数の増大を考えると読み出し回路とモノリシック化できる素子の出現が望まれる。これらの点に超高感度な、かつアレー化が容易な新しい素子の開拓意義がある。

一方、超高感度化に関しては、本研究の目的波長よりも長い $200\mu\text{m}$ 帯では量子ドット検出器によって単一光子検出が実現されている[2]。このブレークスルーは電荷敏感機構（ドットに光電荷を保持し、その静電場の影響下にある電導チャンネルの電流変調を読み取ることで大きな信号増幅を可能にする）によってもたらされており、感度の点ではこれ以上望めないレベルに達している。ところが、量子ドット検出器はSET（Single electron transistor）を使用しているために希釈冷凍機等で 1K 以下に保つ点や、多数のゲートバイアスの微調整が必要という点において、残念ながら広汎な応用を考えるためには実用性に乏しい。また現状では $80\mu\text{m}$ 以上の波長にのみ対応しているが、それは励起機構（サイクロトロン共鳴、プラズマ振動）による制約であり、より広い波長範囲に拡張するのはたやすくはない。従って、その連続的解良で超高感度かつアレー化容易な素子を開拓することはできない。

上述した背景の中で、最近、電荷敏感機構を利用しつつも構造を大きく変えることによって、超高感度性ととも、アレー化や使い勝手の利点がある程度ともに満たす素子が検討され、実現された[3-8]。本論文はこの一連の研究のまとめである。開拓した素子（CSIP: charge-sensitive infrared phototransistor）の概要を図1に示す。

図1(a)に示すように、CSIPはFET(Field effect transistor)であり、ゲートの電位が光子で変わる

ようにすることでコンダクタンスの変化を検出する。5-50 μm に対応する遷移機構として量子井戸(QW)のサブバンド間遷移を用いる(図1(b))。GaAs/AlGaAsの組成を工夫することで同図(c)の非対称二重量子井戸になる伝導帯が実現されており、フローティングゲート(FG)である上の井戸の励起電子はトンネルバリアを抜けて下の井戸(チャンネル)に至り電荷分離が達成される。素子は結晶のメサエッチングで形成され、図1(a)には示されていないがFGは表面メタルゲートの負バイアスによって電氣的に切断して形成される(図2(a), (b))。FGにはフォトホールがライフタイムの間蓄積されてチャンネルの電流を増大させる。ライフタイム τ は一般に長い(4.2Kで $\tau > 1\text{s}$)ので図1(d)に示すようにフォトンフラックスに比例した勾配でホールの蓄積による電流の経時変化がおり、この傾きが信号となる。勾配後の平坦部はFG内に溜めうる電荷量に制限があるために起こる素子感度の飽和であるが、光量に応じた周期的なリセットを実行し常に線形部を取り出すことができる(図1(d))。

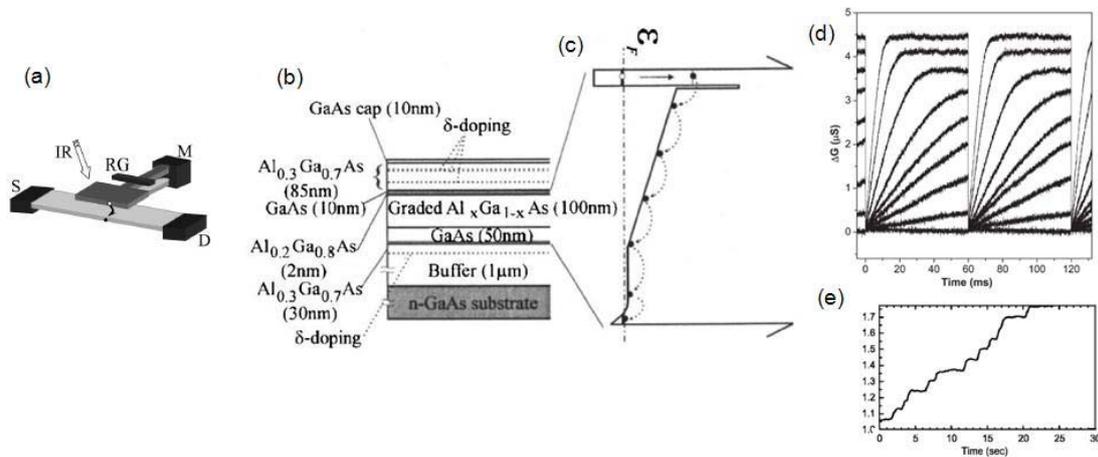


図1 CSIPの概要 (a)素子の概念図[6] (b)結晶構造[3] (c)伝導帯と電荷分離 (d)光信号(周期的リセット)[6] (e)単一光子信号[5]

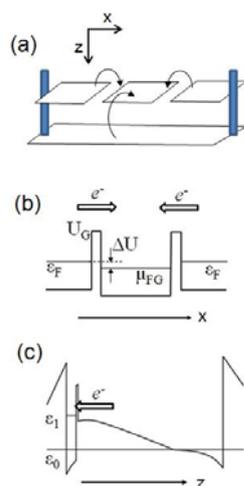


図2 (a)再結合経路 (b)横方向ポテンシャル (c)縦方向ポテンシャル[8]

CSIPは少なくとも4.2Kで動作し、その単純なFET構造からアレー化に適し、将来的な読み出し回路とのモノリシック化も原理的に可能である。さらに微弱光の検出においては図1(e)のように階段状の単一光子信号を得ることができた。

これらの特性はCSIPの有用性を大いに期待させるものであるが、総合的な感度(D^*)はS/N比や量子効率を考慮して初めて決定し、他の素子と比較して優位性を論じることが可能となる。その意味で素子感度の決定は極めて重要であるが、グローバール光源、モノクロメーターおよびライトパイプを用いた通常の実験系では常温部の黒体放射が強すぎて光強度は不明確であり正確な評価は不可能であった。正確な感度評価をするために①迷光の遮断、②定量的光源、③分光機能を併せ持つ実験系を新しく構築した。図3(a)に示すようにこの極低温分光系は常温部からの放射を遮断し、その光源、回折格子、検出器の全てを液体ヘリウムに浸漬する。回折格子は外部から回転可能で、コリメ

ートされた光源からの光を分光して素子に与えることができる。光源は図 3 (b)のように1kΩのチップ抵抗を用いた。チップ抵抗で主に電力が消費されるようにし、その温度を熱電対でモニターする。チップ抵抗はガラスコーティング（波長10-20μmにて放射率~1）が表面に施されているのでほぼ理想的な黒体複写光源として用いることができる。このチップ抵抗を図 3 (a)のようにGaAs窓をもつ真空容器(~10⁻⁴ Pa)に入れて断熱環境で使用した。結果的にこの光源を用いて4.2-250K程度幅で抵抗温度を変えて光量を制御することができた。回折格子もサーマルサイクルに耐えられる材質(素子と同くGaAsにTi/Au蒸着)を用いてリソグラフィ技術で自作した。

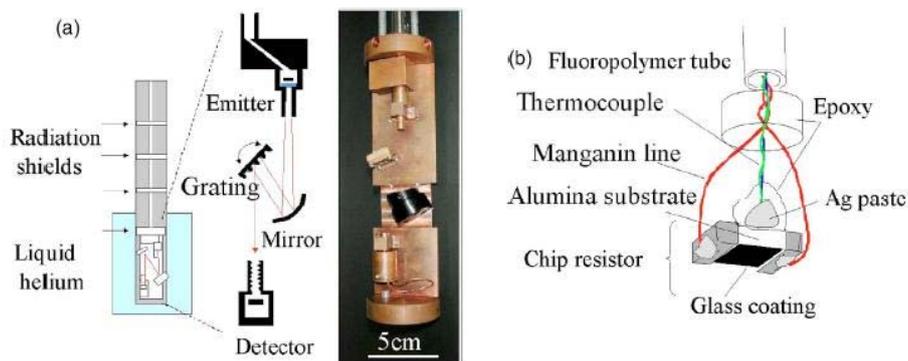


図 3 (a) 極低温分光系の構成 (b) 温度制御可能な黒体輻射光源

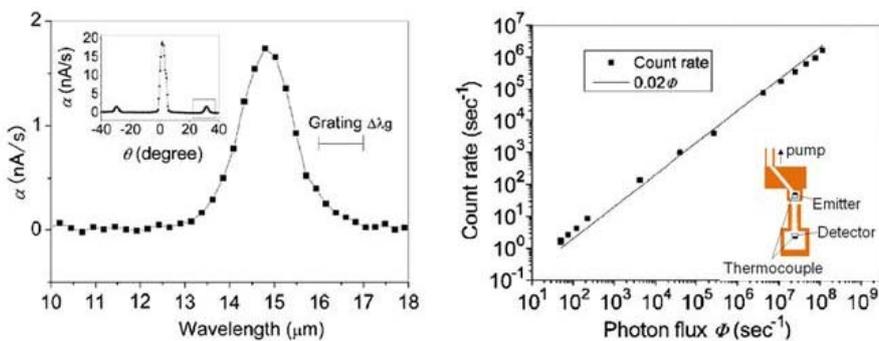


図 4 (a) 受光スペクトル (b) 光量と検出レートの相関（回折格子を使わず直接照射）

図 4 (a)の分光結果から受光波長は $\lambda=14.7\mu\text{m}$ 、ピーク半値幅は回折格子自体のもつ分光精度を考慮して $\Delta\lambda\approx 1\mu\text{m}$ と分かった。受光波長帯が分かったので今度は図 4 (b)の挿図のように光源の正面に素子を置き立体角を明確にして強度依存性を測定した。単位光子信号は微弱光の階段高さや計算から見積もることができ、これより各光源温度での単位時間あたりの光子計数速度を計算できる。単位時間の光子入射数は光源温度と立体角および有効波長帯から計算できる。この結果が図 4 (b)であり、極めて広いダイナミックレンジが確認された（上限は素子でなく光源強度による）。また計数と入射光子数の比として量子効率が $\eta=2\%$ と分かった。暗条件でのダークカウントレートと量子効率から、 $D^*\approx 1.2\times 10^{15}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ と決定できた。これは既存の素子の感度 ($D^*\approx 10^{10}\sim 10^{13}\text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$) を数桁上回るものである。単一井戸での受光ゆえ量子効率が

低く抑えられているが、表面プラズモンを利用した受光機構等で10%以上にする事は可能であろう。（ここでは割愛するがエバネッセント波を用いた受光機構の検討も論文第4章として行っている。）

CSIPの広範な応用を目指すとき、高温化や更なる高感度化は必ず検討されるべきものであり、そのためには温度に依存した現象の深い理解が必要である。素子温度を変えて行った実験結果を図5に示す。

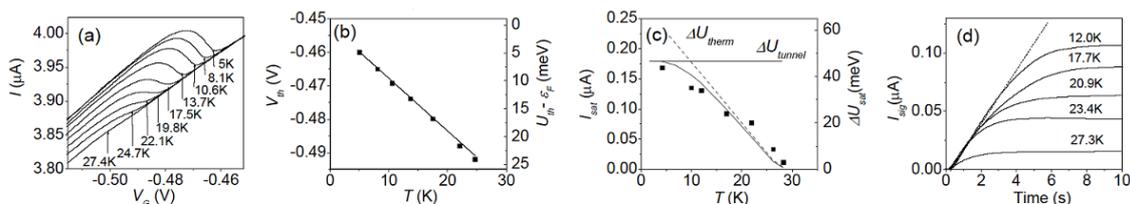


図5 (a)一定光照射下でゲートバイアスを変えたときの信号電流の温度変化 (b)閾ゲートバイアス (c)信号飽和高さ (d)タイムトレースの温度依存性 [8]

図5(a)は光照射下で表面メタルゲートバイアスを負に掃引したときの電流変化の温度依存性である。このとき図2(b)のようなエネルギーバリアが立ち上がりFGは隔離される図2(a)。信号の増大はFGの隔離によって光電荷が溜まることを意味するが、温度が高くなるにつれて再結合が増えるのでより負なバイアスが必要になる。信号の立ち上がり閾値は温度に線形依存する(図5(b))。図5(d)のタイムトレースの飽和高さも図5(a)と同様に温度とともに減少する(図5(c))。これらの傾向は、温度の上昇に伴い高いエネルギーを持つ電子が増えて再結合が促進されるため、それを抑制するにはより大きなバリアが必要とされることを意味している。図5(d)のタイムトレースから、30K近傍で信号は消失するが4.2Kから23K程度まで $D^* \approx 9.6 \times 10^{14} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ という高感度を示すことが示された。

論文中では図2(a)の再結合経路を、①ゲートで調整できる横方向(図2(b))と②結晶構造で決まり調整不能な縦方向(図2(c))の経路に分け、WKB近似に基づいた電子移動解析で図5の閾ゲートバイアスや飽和高さの温度依存性を定量的に説明した。同じ解析から光照射量の影響を含め実験曲線を再現し、ライフタイムの温度依存性、結晶バリア設計の最適値を示した。様々な波長における理想的な D^* の温度依存性の予測も行っている。

以上のように、本研究では

- (1) 新しい実用的な赤外光子検出機構としてCSIPを作成し、
- (2) 極低温分光系を構築してCSIPの量子効率や D^* などの特性を決定・評価し、
- (3) 量子効率向上のための受光機構を検討し、
- (4) 温度依存性を評価するとともに定量的解析によって今後の開拓のガイドラインを与えた。

[1] A. Rogalski and K. Chazanowski, *Opto-Electron. Rev.*, **10**, 111 (2002)
 [2] S. Komiyama, O. Astavief, V. Antonov, T. Kutsuwa and H. Hirai, *Nature (London)* **403**, 405 (2000)
 [3] Z. An, J.-C. Chen, T. Ueda, S. Komiyama, *Appl. Phys. Lett.* **86**, 172106 (2005)
 [4] Z. An, T. Ueda, J. C. Chen, and S. Komiyama, *J. Appl. Phys.* **100**, 044509 (2006)
 [5] Z. An, T. Ueda, S. Komiyama and K. Hirakawa, *Phys. Rev. B* **75**, 085417 (2007)
 [6] Z. An, T. Ueda, K. Hirakawa and S. Komiyama, *IEEE Trans. Electron Devices* **54**, 1776 (2007)
 [7] T. Ueda, Z. An, K. Hirakawa and S. Komiyama, *J. Appl. Phys.* **103**, 093109 (2008)
 [8] T. Ueda, S. Komiyama, Z. An, N. Nagai and K. Hirakawa, to be published in *J. Appl. Phys.* (2009)