

## 論文審査の結果の要旨

論文提出者氏名 上田 剛慈

可視・近赤外光領域の長波長側に広がるテラヘルツの電磁波領域（30THz~0.3THz程度、波長 $\approx$ 10~1000  $\mu$ m）は、あらゆる分子の振動・回転、巨大分子の変形、固体の格子振動・不純物準位・超伝導体のエネルギーギャップ・半導体微細構造中の電子の量子化準位、等々、物質の多くの重要なエネルギースペクトルに対応する。そのため、分子分光学・赤外/電波天文学・物性物理学等の基礎的分野で大きな重要性を有するが、技術的には、光学とエレクトロニクスという現代の2大技術がそのままでは適用できず、比較的未開拓な分野にとどまってきた。最近では新たな計測手段が開発され、医療や安全を含めた広範な分野への計測手段としての応用の可能性が盛んに議論されるようになって来た。しかしそれでも、使い勝手の良い高感度検出器の不在や簡便で強力な光源の不在等により、真に幅広い応用展開を可能とするためには、さらなる技術的発展が強く望まれている。

本論文執筆者は、上記背景の中で、従来検出器にくらべて圧倒的に感度が優れ、かつアレー化に適する等使い勝手も格段に優れた新たな検出器を開発することに成功した。本論文はその研究のまとめである。従来、100  $\mu$ m以上の長波長領域では超高感度の半導体量子ドット検出器が実現されていたが、動作温度として0.4K以下の超低温を必要とし、かつ素子を稼動するために多数のゲートバイアスを微調整する必要がある等、使用上の簡便さに欠けていた。また構造上アレー化が極めて困難であり、かつ励起機構の制約から検出波長範囲が80  $\mu$ m以上の波長に限られる等、応用範囲には制限があった。本研究では、従来の超高感度半導体量子ドット検出器の検出機構の基本的枠組みを踏襲しつつ、現実の物理的構造を大きく変えることによって、超高感度性ととともに、アレー化や使い勝手の利点を同時に満たす素子を開発することに成功した。

従来のテラヘルツ領域の光伝導検出器は、光子1個の吸収で1個の光電子を励起して光電流として検出するため、感度に限界があった。本研究では、半導体の微小領域をテラヘルツ光で励起して電子を1個追い出し、孤立領域が電子を失って正に帯電することを、近傍に電荷敏感素子を置くことによって検知する、電荷敏感型赤外トランジスタ（Charge Sensitive Infrared Phototransistor: CSIP）の機構を採用している。CSIPは光子1個の吸収で膨大な数の電子（光伝導利得 $\gg$ 1）による電流を信号として得ることができるため桁違いの感度を実現でき、本研究以前に、半導体量子ドットと単電子トランジスタを利用して半導体量子ドット検出器が実現していた。本研究はCSIPの基本的枠組みを踏襲しつつも、(i)半導体の孤立領域をGaAs/AlGaAs結晶の量子井戸（QW）から作り、(ii)電荷敏感素子として2次元電子系による電界効果トランジスタ（FET）を採用し、(iii)励起機構として量子井戸中の2次元サブバンド間遷移を利用した。そのことによって、単一光子検出という圧倒的な高感度を持ちながら、4.2K以上の温度で動作する単純なFET構造によって、今ま

でにないきわめて使い勝手の良い検出器を開発することに成功した。検出波長は現在、14ミクロン近傍だがそれは使用したGaAs/AlGaAs結晶の量子井戸の幅が10nmであることで決まっているためであり、井戸幅を8nmから20nmに変化させることにより、波長=7-50 $\mu$ mの領域をカバーすることが期待される。また、単純な素子構造と操作性の単純さからアレー化に適し、将来的には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。本研究はテラヘルツ領域の研究全般に対して、高感度検出技術の面から重要なブレイクスルーを行い、大きな寄与を与えたと認められる。

論文は6章とまとめ、および付録（検出器感度に関する用語解説）からなっている。第1章は序論で、テラヘルツ領域における高感度検出器の必要性を述べ、検出素子の現状を紹介したのち、本研究で採用する電荷敏感型検出機構の解説を行っている。最後に、使い勝手が良くかつ圧倒的な感度を持つ、汎用の目的に適する検出器を開発する、という本研究の目的を記している。第2章から第5章が本研究の内容の記述に充てられている。第2章は検出器の原理と素子構造を説明したのち基本特性を記述している。素子はGaAs/AlGaAsの2重量子井戸構造結晶から作られ、負のバイアス電圧を金属クロスゲートに印加して表面側量子井戸を一部孤立させて受光領域とする。光が受光領域に入射すると、孤立した量子井戸中の電子が光を吸収し、励起電子が量子井戸からトンネル過程で脱出して深い方の2次元電子系チャンネルに移動する。そのことで2次元電子系チャンネルの伝導度が増大して光信号電流を生ずる。このように、孤立した量子井戸を光に敏感なフローティングゲートとする、電界効果トランジスタ (FET) とみなすことができることが解説される。つづいて4.2Kで行われた基本特性の実験結果として、信号電流のゲートバイアス依存性、検出波長のスペクトル計測、検出感度の飽和を防ぐためのリセット構造の導入とその成功の結果が記述される。第3章は、検出器の特性の定量的評価方法と結果が記述される。従来検出器に比して桁違いの感度を有するため、通常の測定系では常温からの輻射が混入して信頼できる結果が得られない。そこで、本研究では発光源や回折格子の部品を自作し、それらを組み込んだ分光系を液体ヘリウムに浸して計測する方法を開発して評価した。まず自作光学部品の評価結果と計測方法を解説したのち結果を記述している。測定結果から量子効率  $\eta=2\%$ 、検出能  $D^* \approx 1.2 \times 10^{15} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$  と決定され、この値は既存素子の感度 ( $D^* \approx 10^{10} \sim 10^{13} \text{cmHz}^{1/2}/\text{W}$ ) を数桁上回るものだった。受光波長は  $\lambda=14.7 \mu\text{m}$  をピークとして半値幅全幅  $\Delta\lambda \approx 1 \mu\text{m}$  を持っており、用いた量子井戸に予想される波長値に一致した。さらに入射光の  $10^6$  以上にわたる極めて広い強度範囲にわたって信号が線形応答を示すというすぐれた特性も明らかにされた。第4章は量子効率の向上によってさらに検出器を改良する試みを記述している。本研究の検出器は量子井戸中の2次元サブバンド間遷移を励起機構とするため、量子井戸面に垂直な振動電場を必要とする。一方、入射光は量子井戸に平行な振動電場しか持たないので、入射光電場を変換する機構（量子井戸への結合器またはアンテナ）を量子井戸の孤立領域（光吸収の起こる領域）の直上にリソグラフィ加工により作成する必要がある、その変換効率が、量子効率  $\eta$  と感度  $D^*$  を決めることになる。従来はマイクロストリップアンテナと呼ばれる構造が採用されていたが、本研究ではエバネセントモードの金属2次元アレーを試し、アレーの周期や間隔を変えて量子効率の向上を図った。数値的には従来通り  $\eta=2\%$  程度の値が得られたにとどまったが、より以上の改善に向けた有益な知見をえている。第5

章は検出器特性の温度依存性および光照射量依存性に関する測定結果と解析結果が示される。まず、30K近傍で信号は消失するが23K程度までは $D \approx 9.6 \times 10^{14} \text{ cmHz}^{1/2}/\text{W}$ という4.2Kに比してそんな高感度を示すという応用上重要な結果が示される。次に、信号が生ずるゲートバイアス電圧のしきい値、信号の飽和強度、および信号電流が時間とともに増大する曲線の温度依存性が測定される。それらの温度依存性が、温度上昇に伴って高いエネルギーを持つ電子が増え、孤立した量子井戸を形成するポテンシャルバリアを乗り越えて熱電子が孤立領域に侵入するため、光信号の寿命時間が温度上昇によって短縮するためであることが定量的に示される。ポテンシャルバリアとして、バイアスされたゲート電極が作るポテンシャルバリアと、結晶構造のバンドの設計で決まるポテンシャルバリアの効果がそれぞれ考慮され、WKB近似に基づいた電子移動の解析が行われている。さらに光照射量の影響が同様に解析される。これらの解析がもたらす検出の物理的機構のより深い理解をもとに、異なる波長域に拡大する際の検出器のための結晶構造の提案を行っている。第6章は検出器に用いる2重量子井戸結晶の設計と成長の実際に関して、注意点を記している。最後に本論文をまとめ、付録で検出器感度に関する用語の解説を行っている。

## 結び

なお、本論文の第2章から5章は、平川氏・Zhengha An氏・J.C. Chen氏・長井氏・小宮山との共同研究だが、論文の提出者が主体となって測定法の開発に当たりかつ実験を行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、本審査委員会は博士（学術）の学位を授与するにふさわしいものと認定する。