

# 博士論文（要約）

高感度化に向けた量子ドット赤外線  
検出器の作製と特性評価に関する研究

平成 31 年 2 月 20 日提出

東京大学 工学研究科 先端学際工学専攻

吉川 弘文

# 高感度化に向けた量子ドット赤外線検出器の作製と 特性評価に関する研究

吉川 弘文

赤外線検出器（赤外センサ）の応用先は、身近な人感センサから、セキュリティ、環境計測、医療、宇宙、軍事技術と幅広い。赤外イメージングにおいては現在、軍事・産業用監視、国土安全保障などの監視アプリケーションが市場を牽引しているが、今後は家電や車載等の民生用途への展開が期待される。そして、民生用途を含むさらなる市場拡大には、赤外線検出器の性能向上および低コスト化が重要となる。

量子ドット赤外線検出（QDIPs: Quantum Dot Infrared Photodetectors）は、既存の赤外線検出器であるボロメータ、水銀カドミウムテルル、量子井戸赤外線検出器（QWIPs: Quantum Well Infrared Photodetectors）と比べて、高感度、高速応答、高温動作、波長選択性、低コスト、大面積といった様々な特徴を有することから、次世代赤外線検出器として期待されている。特に、QDIP は三次元量子閉じ込めのため、垂直入射応答が可能であり、励起電子の寿命が長いという特徴を有することから、類似構造・類似原理である QWIP と比べて高感度・高温動作赤外線検出器として期待されている。実際、QDIP では、QWIP と比較して高感度・高温動作の報告が複数されている。高感度・高温動作を実現している QDIP の特徴としては、GaAs よりも大きなバンドギャップを有する材料を QDIP 構造で使用している点が挙げられる。この材料として AlGaAs は、GaAs よりも大きなバンドギャップを有し、GaAs 基板に対して格子整合系であることから、有力な候補材料となる。高感度化・高温動作化に向けた具体的な QDIP 構造としては、母体材料に AlGaAs を用いる QDIP 構造、片側障壁層構造として AlGaAs を用いる QDIP 構造が挙げられる。

さらに、シリコン基板上で QDIP を作製できれば、低コスト化およびイメージャの大型化が期待できる。GaAs 基板は一般的に 3 インチ（直径 76 mm）である一方、シリコン基板は 8 インチ（直径 200 mm）、12 インチ（直径 300 mm）が広く利用されている。近年は、18 インチ（直径 450 mm）のシリコン基板を開発する動きも報告されている。また、シリコン基板は一般的に、GaAs 基板より十分に低コストである。つまり、大口径のシリコン基板を用いて QDIP を作製できれば、基板コストの削減に加えて、成長時間の大幅な削減による低コス

ト化を実現でき、さらに、大面積で得られるため高解像度イメージセンサの作製が可能となる。一方で、シリコン基板上に直接成長された QDIP の報告は現状、傾斜シリコン基板を用いた QDIP のみである。傾斜シリコン基板上ではなく、無傾斜シリコン基板上で QDIP を作製できれば、QDIP とシリコン読み出し集積回路とのモノリシック集積化が可能となる。つまり、無傾斜シリコン基板上 QDIP の実現により、基板コストの削減だけでなく、従来のシリコンプロセス使用によるプロセスコストの削減に繋がり、QDIP のさらなる低コスト化が期待できる。

以上より、本論文では、GaAs よりも大きなバンドギャップ材料である AlGaAs を導入した QDIP 構造に関して、高感度化・高温動作化に関する指針を得ることを目的とする。特に、高温動作・高感度の報告がある、AlGaAs 母体構造および AlGaAs 片側障壁層構造に着目し、赤外光吸収の特性評価、比検出能の特性評価に取り組んだ。また、民生用途への展開を鑑みた低コスト化を目的に、無傾斜シリコン基板上 QDIP の試作にも取り組んだ。

本論文は、7 章で構成される。

第 1 章では、序論として、研究背景および研究目的を述べる。

第 2 章では、QDIP の基礎について概説する。QDIP では、数ナノ～数十ナノメートルサイズである量子ドットを光電変換層として用いる。量子ドットの形成法としては、分子線エピタキシー装置と、ストランスキー・クラスタノフ成長法を概説する。また、シリコン基板上の GaAs ヘテロエピタキシャル成長について概説する。QDIP は、量子型赤外線検出器の一つであり、赤外線を光電変換により検知するタイプである。QDIP の動作原理、研究の歴史について概説する。

第 3 章では、QDIP の作製および特性評価方法について概説する。本研究で評価した試料の作製方法として、分子線エピタキシー装置を用いた結晶成長法について概説する。また、結晶成長した試料の評価方法として、原子間力顕微鏡、X 線回折装置、フォトルミネッセンスについて概説する。その後、赤外光吸収の特性評価方法を概説し、QDIP の作製方法および赤外線検出器の性能評価方法について概説する。

第 4 章では、QDIP 構造の高感度化・高温動作化に関する指針を得ることを目的として、GaAs または AlGaAs を母体材料に用いた多積層 InAs 量子ドット構造の赤外光吸収特性評価に取り組んだ。試料の結晶成長では、まず始めに AlGaAs 膜の結晶成長評価に取り組み、成長条件の最適化により、GaAs バッファ層と同程度の低い RMS を有する AlGaAs 膜を成長できることを確認した。その後、量子ドットの結晶成長評価に取り組み、GaAs 上の InAs 量子ドットでは、平均高さ~9 nm、面内密度~ $3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ 、Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As 上の InAs 量子ドッ

トでは、平均高さ $\sim 3\text{ nm}$ 、面内密度 $\sim 2 \times 10^{11}\text{ cm}^{-2}$ が得られたことを確認した。次に、量子ドット層あたりの光吸収率を見積もる上で必要となる、高い周期性を有する積層量子ドット構造の結晶成長評価に取り組んだ。具体的には、量子ドットサイズばらつきの抑制、転位の抑制、表面平坦化、局所歪みの抑制を目的に、量子ドット形成後に GaAs 部分キャップ層の低温成長およびインジウムフラッシュを行い、量子ドット層周期を約  $50\text{ nm}$  に設計して成膜することで、高い周期性を有する GaAs 母体および AlGaAs 母体の積層量子ドット構造試料が得られたことを、AFM、PL、XRD の評価により確認した。赤外光吸収の特性評価では、フーリエ変換赤外分光光度計を用いて、多重反射光導波路とした積層量子ドット構造試料の透過光を検出することで評価した。室温赤外光吸収特性の偏光依存性より、低エネルギー領域で  $p$  偏光優位の光吸収ピーク（閉じ込め準位への遷移）、高エネルギー領域でブロードなほぼ無偏光依存の光吸収ピーク（連続準位への遷移）が観察された。閉じ込め準位への遷移に関わる光吸収特性から、量子ドットあたりの光吸収率は、AlGaAs 母体と比べて GaAs 母体の方が大きいことが示唆された。この要因としては、AlGaAs 母体試料における量子ドットの品質低下、ドーピングキャリアの低い活性化率が考えられる。母体連続準位への遷移における量子ドットあたりの光吸収率では、GaAs 母体の方がさらに大きいことが示唆された。この要因を検証する為、Al 組成の異なる AlGaAs 母体材料における InAs 量子ドット構造の伝導帯サブバンド間遷移の吸収計算に取り組んだ。結果、母体試料が GaAs から AlGaAs となることによる伝導帯基底準位と母体連続準位間の行列要素低下が示唆された。以上から、母体連続準位への遷移における量子ドットあたりの赤外光吸収率は、AlGaAs 母体に比べて GaAs 母体の方が大きいことが示唆された。

第5章では、第4章の結果を踏まえて GaAs 母体の量子ドット構造を採用し、片側 AlGaAs 障壁層を導入した QDIP 構造に関して、高感度化・高温動作化に関する指針を得ることを目的に取り組んだ。具体的には、片側障壁層の導入による効果および片側 AlGaAs 障壁層の Al 組成依存性について、デバイスシミュレーションおよびデバイス特性評価の両面で取り組んだ。さらに、温度特性の Al 組成依存性の検討に取り組んだ。まず、デバイスシミュレーションにより、片側障壁層導入による暗電流低下が示された。また、片側 AlGaAs 障壁層の Al 組成を高めることで、さらに低暗電流化できることが示された。本計算から、片側障壁層の導入による比検出能の増大、および片側 AlGaAs 障壁層の高 Al 組成化による比検出能の増大が示唆された。次に、異なる Al 組成の片側 AlGaAs 障壁層を有する試料の結晶成長および QDIP の作製に取り組んだ。結晶成長した試料では、ほぼ同様の発光特性を示し、最表面層はバッファ層と同程度の表面粗さが得られていることから、同様の量子ドット構造が得られていることを確認

した。また、片側 AlGaAs 障壁層の高 Al 組成に伴い、暗電流が低下することを確認した。これは、片側 AlGaAs 障壁層によりコンタクト層と光電変換層間の伝導帯オフセットが大きくなり、活性化エネルギーが増大したことに起因する。また、各試料の光電流スペクトルでは同様に、6  $\mu\text{m}$  付近で検出ピークが確認された。この検出ピークにおける特性評価では、片側障壁層導入による比検出能の増大が示され、片側 AlGaAs 障壁層の Al 組成を高めることで、さらに比検出能を増大できることが示唆された。これは、片側障壁層の導入によるノイズ低減効果と考えられる。温度特性においては、Al 組成 30%の片側 AlGaAs 障壁層において、高温時における受光感度および比検出能の低下を抑制できることが示唆された。この要因の一つとして、片側障壁層の導入により高温化に伴う暗電流増大を抑制でき、量子効率の低下を抑制できていることが考えられる。以上から、高 Al 組成の片側 AlGaAs 障壁層では高温耐性が向上することが示唆される。

第6章では、QDIP の低コスト化およびイメージャの大型化を目的として、無傾斜シリコン基板上の QDIP における実現可能性の見極めに取り組んだ。まず、無傾斜シリコン基板上に InAs/GaAs 量子ドット構造を MBE のみの直接成長により形成し、発光線幅 34 meV を有する明確な発光ピークが得られることを確認した。次に、QDIP を作製し、32K にて 6.2  $\mu\text{m}$  で光電流ピークを検出した。また、ピーク比検出能は  $5.8 \times 10^7 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$  (対応する受光感度は  $\sim 27 \text{ mA/W}$ ) を示した。本結果は、無傾斜シリコン基板上に直接成長された量子ドット構造が、製造コストの低い高性能 QDIP の実現に非常に有望であることを示す成果である。

第7章では、本論文の結論と、QDIP における高感度化、高温動作化、低コスト化に関する今後の展望について述べる。