

氏名	おおたにけいた 大谷 啓太
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成11年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程) 電子工学専攻
学位論文題目	InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造の作製とそのデバイス応用に関する研究
指導教官	東北大学教授 大野英男
論文審査委員	主査 東北大学教授 大野英男 東北大学教授 潮田資勝 東北大学教授 伊藤弘昌

論文内容要旨

本研究は InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造のデバイス応用として、量子井戸構造サブバンド間発光素子を作製し、実現することを目的として行ったものである。InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造サブバンド間発光素子は、これまでに InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造の特異なバンドラインアップを用いた素子構造の優れた提案やレーザー構造における閾値電流密度の低減などの理論的予測があるのにもかかわらず、実現されていない。本研究では、発光素子実現のために素子構造に関する理論的検討、良質なヘテロ構造の作製及びその評価を行い、サブバンド間の発光を観測した。

第1章では、本研究に至る背景を述べ、着目した量子井戸構造サブバンド間光学遷移と InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造の現在までの研究経過について説明した。その後、サブバンド間光学遷移における遷移波長と InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造におけるバンドラインアップの自由度を生かした新しい発光素子の実現を本研究の目的とすることについて述べた。

第2章では、InAs/GaSb/AlSb サブバンド間発光素子の理論について述べた。まず発光素子を設計するにあたって、発光波長や偏光などの基礎特性を決める量子井戸構造中の電子状態(サブバンド)を明らかにする必要がある。そこで、第2章の前半では、InAs/GaSb/AlSb 量子井戸構造中のサブバンドについて述べた。量子井戸構造、特に禁制帯の小さい半導体である InAs を井戸層とする InAs/GaSb/AlSb 量子井戸構造中のサブバンドの計算では、バンドのカップリングにより、バンドエッジの有効質量を用いた場合の計算と大きく異なることが予想される。まず、本研究で理論計算に用いた多重バンド $k \cdot p$ 摂動法について説明した。この計算手法は物理的本質を損なうことなしに、比較的容易にバンドのカップリングなどを考慮に入れることができる。次に InAs/AlSb、InAs/GaSb/AlSb 量子井戸構造を例にとり、サブバンドのエネルギー及びサブバンド間光学遷移における双極子モーメントの計算を行った。その結果、バンドのカップリングを考慮した多重バンド $k \cdot p$ 摂動法の計算結果では、バンドエッジの有効質量を用いた計算結果と比較して、サブバンドのエネルギーは大きく異なるが、光学遷移における双極子モーメントや選択則はほとんど変化しないことがわかった。さらに

用いた計算方法の妥当性を検討するために、InAs/AlSb 量子井戸構造を用いてサブバンド間エネルギーの井戸幅依存性を実験的に求め、理論との比較を行った。その結果、実験と多重バンド k^*p 摂動法の空間電荷を考慮に入れた自己無撞着な計算は良い一致を示し、多重バンド k^*p 摂動法により InAs/GaSb/AlSb 量子井戸構造中のサブバンドがよく記述できることが明らかになった。

第 2 章の後半では、InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造サブバンド間発光素子の基礎特性について述べた。発光素子構造として Ohno らによって提案された構造をモデルにとり、レート方程式を用いて動作解析を行った。その結果、高効率なサブバンド間発光素子を実現するためには、サブバンド間緩和時間を長くすること、第 1 サブバンドの寿命を短くすること、注入効率を上げることの 3 つの条件が必要であることがわかった。次にこれらの条件に対する InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造サブバンド間発光素子の利害損失を、GaAs/AlGaAs, GaInAs/AlInAs ヘテロ構造との比較を行いながら検討した。はじめにサブバンド間緩和時間について検討を行い、InAs を井戸層とする InAs/GaSb/AlSb 量子井戸構造では軽い有効質量が原因となって双極子モーメントが増大し、放射性再結合時間は短くなること、また極性光学フォノン散乱が主とした原因である非放射再結合時間では、軽い有効質量により散乱過程の終状態の状態数が減少すること、光学フォノンとの相互作用が小さいこと、及びバンドのカップリングによって長くなることがわかった。次に第 1 サブバンドのキャリアの寿命について検討し、InAs/GaSb ヘテロ構造を用いることで、特別な構造を用いることなしに、第 1 サブバンドの寿命を短くすることができることがわかった。これは InAs 伝導帯と GaSb 価電子帯の間のバンド不連続領域ではキャリアの閉じこめが弱いことに起因する。さらに注入効率について検討を行い、Ohno らによって提案された構造にさらに InAs/AlSb 超格子構造を付け加えることで、第 2 サブバンドからのキャリアの漏れだしを防ぎ、GaInAs/AlInAs, GaAs/AlGaAs と比較しても大幅に注入効率が改善されることがわかった。以上から InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造では、これまでの GaAs/AlGaAs, GaInAs/AlInAs 系と比較して、サブバンド間発光素子に必要な 3 つの条件を良好に満たすことが明らかになった。最後にこれらをもとに、レーザー構造を設計し、閾値電流密度の計算を行ったところ、従来のものよりも 1 桁程度閾値電流密度が小さくなることがわかった。

第 3 章では、分子線エピタキシー法による InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造の作製について述べた。まず分子線エピタキシー法について簡単にふれた後、本研究で用いた分子線エピタキシー装置について説明した。その後、InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造における MBE 成長について述べ、InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造では III 族と V 族の両方が界面で切り替わるために、大きな 2 つの問題点が生じることについて述べた。問題点の一つである As の GaSb, AlSb 層への混入に関しては、解決策として、基板温度に対する As と Sb の付着係数差に着目し、As の付着係数が小さく、Sb の付着係数が大きい領域で成長するという方法を用いた。その結果、As の混入を 0.5%以下に抑えることに成功した。もう一つの問題点である界面ボンドの選択に関しては、特に本研究で重要な光学特性について注目し、界面ボンドの選択が光学特性にどのように影響するかについて検討を行った。その結果、X 線回折による結晶性の評価

とフォトルミネッセンス法による光学特性の評価の間に、相関があり、結晶性及び光学特性の優れた試料における界面ボンドは、バッファ層としてどの材料を用いるかによって異なり、界面ボンドだけでなくヘテロ構造全体を含めた歪みに大きく依存することがわかった。以上の2つの問題点を解決することで、結晶性及び光学特性の優れた高品質なヘテロ構造を作製することに成功した。

第4章では、InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造サブバンド間発光素子の輸送特性について述べた。サブバンド間発光素子ではキャリアの注入及び引き抜きなどの量子構造内におけるキャリア輸送が重要であり、高効率な発光素子実現のためには輸送特性の理解が必要不可欠である。そこで、発光素子の基本構造となる2重障壁バンド間共鳴トンネルダイオードと3重障壁共鳴トンネルダイオードを作製し、輸送特性による検討を行った。まず2重障壁バンド間共鳴トンネルダイオードにおけるバンド間トンネル効果について簡単に説明した後で、2重障壁バンド間共鳴トンネルダイオードの電流-電圧特性の検討を行った。電流-電圧特性の検討の結果、放物線のバンド分散を考慮したバンド間トンネル効果のモデルでは実験結果を説明することができず、トンネル電流がオフする機構として、GaSb 量子井戸中のトンネルパスが GaSb バンドギャップにより閉じるという別の機構が考えられることがわかった。次に3重障壁共鳴トンネルダイオードの電流-電圧特性の検討を行った。電流-電圧特性の検討の結果、GaSb 量子井戸を介して流れるトンネル電流が主として軽い正孔の準位を介して流れる電流が主流であることがわかった。さらに観測された大きなヒステリシスから、InAs 量子井戸の第1サブバンドから GaSb 量子井戸を通るトンネルパスが GaSb バンドギャップによりオフすることを示唆する結果が得られた。以上の輸送特性の結果から、発光素子構造として、GaSb 量子井戸内のトンネルパスが完全になくなる前に、InAs 量子井戸の第2サブバンドにキャリアを注入することが必要である。

第5章では、InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造サブバンド間発光素子の電流注入による発光について述べた。まず、試料構造及び発光デバイスについて説明した。試料構造の設計には第2章及び第4章の結果を、試料の成長には第3章の結果を踏まえて、発光デバイスの作製を行った。次に発光測定に用いた赤外分光器について述べた。黒体輻射の影響を避け、感度を向上させるためにロックインアンプを用いた測定系を採用し、システムを構築することで約100pW程度の微弱赤外光まで検出可能となることがわかった。その後、サブバンド間発光素子の発光特性について説明した。観測された発光スペクトル(図1)のピークエネルギーは多重バンド $k \cdot p$ 摂動法を用いた InAs 量子井戸内のサブバンド間遷移エネルギーの計算結果と一致し、偏光特性もサブバンド間光学遷移における選択則と一致した。このことから、発光が InAs 量子井戸内のサブバンド間光学遷移によるものであることがわかる。またバンド間発光素子の発光スペクトルとの比較を行い(図2)、サブバンド間発光素子ではスペクトルがより対称で半値幅も狭く、全く異なった偏光特性を持っていることがわかった。以上からサブバンド間発光素子の方が、レーザーのゲイン媒体として優れていることがわかる。

第6章では、第2章から第5章までの研究結果をまとめ、結論を述べた。

InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造サブバンド間発光素子は本研究によりはじめて実現された。

InAs/GaSb/AlSb 量子井戸構造サブバンド間発光素子では、InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造の特異なバンドラインアップを利用して、高効率な発光素子に必要な不可欠な量子構造内におけるキャリア輸送の制御を行っている。この結果は、サブバンド間光学遷移の多くの有益な特徴の他に、ヘテロ構造におけるバンドラインアップの自由度という新しい特徴を付け加えたサブバンド間光デバイスの第1歩であり、InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造が広い波長領域で動作する半導体光材料となりうる可能性を示すものであると考えられる。

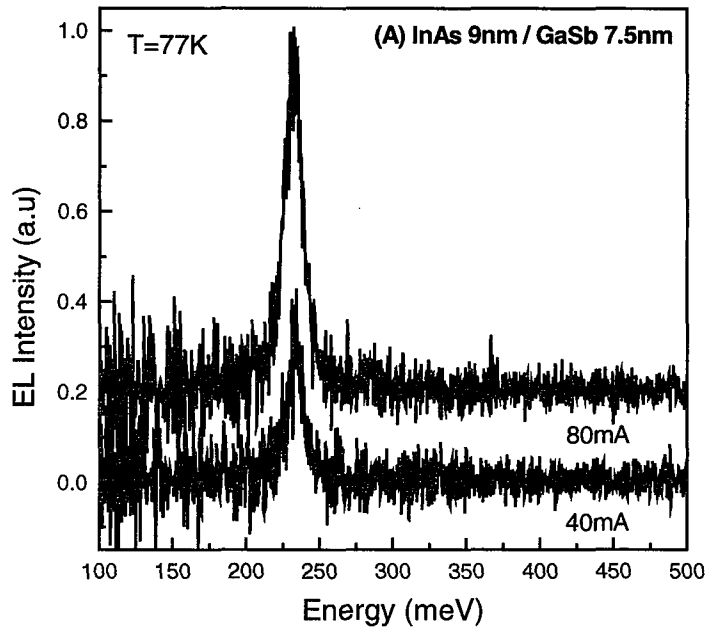


図1 サブバンド間発光スペクトル

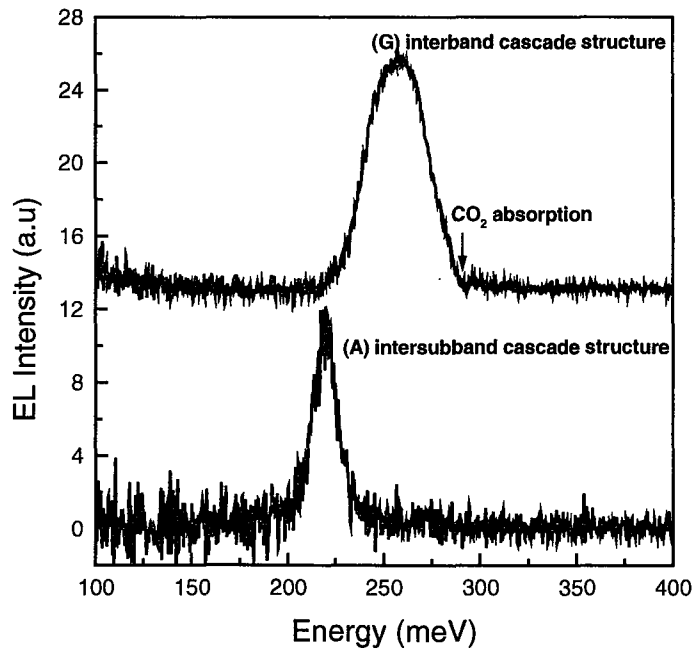


図2 バンド間発光スペクトルとの比較

審査結果の要旨

InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造は、InAs の伝導帯が GaSb の価電子帯よりエネルギー的に低い特異なバンド不連続を有し、かつ AlSb により高いポテンシャル障壁が実現可能であることから、種々の光・電子デバイスに 응용が期待されている。サブバンド間光学遷移は、振動子強度が大きく、構造により遷移波長を広範囲に制御可能なため、近赤外からテラヘルツ帯までの半導体発光素子として注目されている。著者は、InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造を用いたサブバンド間発光素子の性能について理論的解析を行った後、分子線エピタキシー法によって高品質の結晶を成長し、実際に素子を作製して、この系において初めて電流注入サブバンド間発光を実現した。本論文はこの研究成果についてまとめたもので、全編6章よりなる。

第1章は、序論である。

第2章では、InAs/GaSb/AlSb サブバンド間発光素子の理論解析について述べている。量子井戸中の電子状態を明らかにした後、サブバンド間発光素子の電気的・光学的基礎特性について解析し、寄生電流の抑制が本ヘテロ構造の特異なバンド不連続を利用して実現可能であることを示している。これらの解析により、素子設計の指針を与えると共に、本ヘテロ構造が他の材料系と比較して良好な素子特性を実現しうることを明らかにしている。

第3章では、分子線エピタキシー法による InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造の作製について述べている。As と Sb の付着係数差の大きい基板温度で結晶成長を行うことにより As と Sb の混合を 0.5%以下に抑えられることを見出し、また光学特性の優れた構造を得るには、バッファ層と界面ボンドを適切に選択する必要があることを明らかにした。これは高品質のヘテロ構造を作製するために有用な知見である。

第4章では、InAs/GaSb/AlSb サブバンド間発光素子の輸送特性について述べている。基本構造となる共鳴トンネルダイオードを作製、測定し、理論と比較することにより、GaSb バンドギャップによりトンネルパスが閉じる機構が電流をオフすること、GaSb 量子井戸を流れるトンネル電流が主として軽い正孔の準位を介して流れる電流であることなどを明らかにしている。これらは効率の良い発光素子を実現する上で重要な知見である。

第5章では、InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造サブバンド間発光素子の電流注入発光について述べている。構築した測定系が約 100pW 程度の微弱赤外光まで検出可能であることを示した後、素子からのサブバンド間発光を電流注入により確認している。さらに発光のスペクトル、偏光特性等を測定し、理論と良く一致することを明らかにすると共に、バンド間発光素子との比較を行い、サブバンド間発光素子の発光スペクトルがより対称で半値幅も狭いことを示している。これらの結果は、InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造サブバンド間発光素子の有用性を明確に示しており、高く評価できる重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、高品質な InAs/GaSb/AlSb ヘテロ構造の結晶成長からサブバンド間発光素子の実現までを一貫して行い、本ヘテロ構造の特異なバンドラインアップを利用したサブバンド間光学素子の動作を初めて確認することによって、このヘテロ構造が赤外からテラヘルツ領域の発光素子に有望であることを明らかにしたものであり、半導体電子工学及び光デバイス工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。