

報告番号 ^{*} 甲 第 1945 号

主論文の要旨

題名

STUDIES ON III-V COMPOUND SEMICONDUCTORS
ON Si SUBSTRATES GROWN BY MOCVD

(MOCVD法によって成長したSi基板上のIII-V
化合物半導体に関する研究)

氏名 曾我哲夫

主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

曾我 哲夫

現在のSi半導体に関する技術は非常な高度に開発されており、LSIやVLSI等の高密度電子集積回路の作製を可能にしている。しかし、Siには発光デバイスが作れないとか信号処理速度が遅いとかいった本質的な問題がある。一方、GaAsなどの化合物半導体では発光デバイスや高速デバイスを作製することが可能であるので、化合物半導体の研究も盛んに行われるようになってきた。ところが、実際にデバイスとして動作するのは表面の数 μm 程度であるので、もしSi基板上にGaAsなどの化合物半導体を結晶成長させることが出来れば、基板としてのSiの良さとGaAsの特長を組み合わせた全く新しいデバイスが可能となる。

そのデバイスの例として次のものが挙げられる。

- (1) 安価なSi基板上に30%を越える高効率太陽電池。
- (2) Si ICの一部に発光機能を持った光電子集積回路。
- (3) 高速GaAs IC用大面積基板。

本論文はSi基板上にMOCVD法によりGaAs、GaAsPの成長を行い、その発光デバイスへの応用についてまとめたものである。

本論文は6章から成る。第1章は序論であり、本研究

主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

曾我 哲夫

の目的、成長を行うときの問題点、Si基板上への化合物半導体結晶成長の現状について、第2章では歪超格子を中間層に用いてSi上にGaAsの成長を行う最適な成長条件と中間層の構造について、第3章ではSi上に成長したGaAsのフォトルミネセンス(PL)、エレクトロリフレクタンス、深い準位、欠陥、応力などの特性について、第4章ではSi上に成長したAlGaAs/GaAsダブルヘテロ構造DHレーザーについて、第5章ではSi上に成長したGaAsPの特性について述べ、第6章では本研究を総括する。

以下に各章ごとの要約を述べる。

第1章ではSi基板上にGaAsを成長する上での問題点、Si上への化合物半導体結晶成長の現状について総括した。Si上にGaAsを成長できれば様々な新しいデバイスが可能となるが、約4%の格子不整合、約2.5倍の熱膨張係数の差、Siのような無極性半導体の上にGaAsのような有極性半導体を成長させると、いわゆるアンチフェイズドメインと呼ばれる領域が発生するといった問題がある。現在までにSiとGaAsの不整合を緩和するのに中間層としてGe、低温成長したアモルファスのGaAs、超格子、またはMBE法による直接成長法が考案されている。しかし、クラックの発

主論文の要旨

報告番号 ※甲第 号 氏名 曾我哲夫

生、応力、欠陥などの問題が残されている。本研究では Si 基板上に初めて歪超格子を中間層に用いて GaAs の MOCVD 結晶成長を行った。

第 2 章では Si 基板上に MOCVD 法によって歪超格子を中間層に用いて GaAs の成長を行い、最適な成長条件と構造を明らかにした。Si と III-V 化合物半導体の界面の状態はシングルドメイン構造を得るのに重要である。III-V 化合物半導体の中で AlP と GaP は Si とほぼ格子定数が同じなので Si 基板上に AlP または GaP を結晶成長し、その後、AlP や GaP と GaAs の間の格子不整合は歪超格子で緩和した。しかし、Al は酸化されやすいため結晶性は悪く、GaAs の結晶性は良くない。最適な中間層の構造と成長温度は、GaP (900°C)、GaP/GaAs_{0.5}P_{0.5} 歪超格子 (680°C)、GaAs_{0.5}P_{0.5}/GaAs 歪超格子 (680°C) であり、表面 GaAs の最適成長温度は 650°C である。一つの歪超格子は 10 層であり、層厚は 20 nm である。室温の PL 強度は GaAs 上の GaAs とほぼ同じである。しかし、4.2 K の PL 強度は約 1 桁小さい。成長前の基板サセプタのベイキング (空焼き) と成長直前の基板の H₂+PH₃ 中でのアニール、及び (100)2° off 基板の使用がシングルドメイン構造を得るのに必要である。

主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

曾我哲夫

第3章ではSi上に成長したGaAsの特性について詳しく述べた。Si基板のオフ角度の方向を $[011]$ 、 $[011]+15^\circ$ 、 $[011]+45^\circ$ と変えたところ、 $[011]+45^\circ$ の場合はアンチフェイズドメイン構造となったが、それ以外の基板を用いたときはシングルドメインになった。Si上GaAsのPLピーク波長は熱膨張係数の違いによって低エネルギー側へシフトしている。4.2Kでフォトルミネセンスを測定したところGaAs上のGaAsからはエキシトン、ドナー-アクセプタ遷移、そのLOフォノンレプリカからの発光が観測されたが、Si上のGaAsからはそれらの発光の他に応力によって引き起こされる価電子帯のスプリットによる発光が観測された。GaAsの厚さが $8\mu\text{m}$ を越えても通常の方法で観測されるようなクラックの発生はみられない。GaAsの厚さが $2\mu\text{m}$ より減少すると、

- (1) エッチピット密度は増加する。
- (2) 曲率半径から計算される応力は減少する。
- (3) 縦方向の格子定数はGaAs基板の値に近づく。
- (4) 禁制帯幅はGaAs基板の値に近づく。

これらの結果より応力は界面付近の数多くの欠陥によって緩和されており、成長を続けるとGaAs中の欠陥密度は

主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

曾我哲夫

減少し、結晶性は良くなることが分かる。GaAs層にかかっている応力は $9.2 \times 10^8 \text{ dyn/cm}^2$ であり、この値は計算される熱応力の約半分である。

C-V法から測定したキャリア濃度はGaAsの厚さと共に減少し、 $2 \mu\text{m}$ 程度で $2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ に飽和する。DLTSを測定したところ、GaAs上に成長したGaAsからは伝導帯から 0.73 eV の電子トラップ(EL2)しか観測されなかったが、Si上のGaAsからは 0.73 eV の準位の他に 0.44 eV の準位も検出された。二つのトラップ濃度はGaAsの厚さと共に減少し、 $8 \mu\text{m}$ 程度成長するとGaAs上のトラップ濃度とほぼ同じになる。 0.44 eV の準位は 0.44 eV を中心に分布したSiと欠陥の複合体による準位である。

Si上に形成したp-n接合のn-GaAs中の正孔の拡散長はGaAs上の値と同程度であるが、p-GaAs中の電子の拡散長は約半分である。ダイオードの逆方向飽和電流はGaAs上の値より2桁大きい。

第4章ではSi上に成長したAlGaAs/GaAsダブルヘテロ構造レーザについて述べた。SiはGaAsより熱伝導率が約3倍大きいので基板がヒートシンクの役割を果たす。測定はp側アップの状態で行った。Si上に中間層を成長した後、

主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

曾我哲夫

n-GaAs(2.1 μm)、n-Al_{0.3}Ga_{0.7}As(1.5 μm)、undoped GaAs(0.12 μm)、p-Al_{0.3}Ga_{0.7}As(1.5 μm)、p-GaAs(0.4 μm) を順次成長してダブルヘテロ構造とした。16.5°Cにおける電極ストライプ型レーザの最小閾値電流と特性温度はパルス状態でそれぞれ450mA(電流密度に換算すると4.9kA/cm²)と179Kである。この閾値電流の値はGaAs上のレーザの値の約6倍であり特性温度は50-60K大きい。閾値電流密度の増大はGaAs中に存在する欠陥と応力によるものだと考えられる。発振波長は熱膨張係数の違いにより5-15nm長波長側にシフトしている。Si上のダブルヘテロ構造にZnを拡散してTJSレーザを作製したところ閾値電流は379mAに減少した。

第5章ではSi上に同様な方法でGaAs_{1-x}P_x(x=0-1)を成長した。中間層の構造は燐の組成に依存し、x=0~0.4の時はGaP/(GaP/GaAsP)歪超格子/(GaAsP/GaAs)歪超格子であり、x=0.4~0.75の時はGaP/(GaP/GaAsP)歪超格子であり、x=0.75~1の時はGaPだけである。x=0.2~0.4の範囲での室温フォトルミネセンス半値幅は45~58meVであり、強度はGaAs上にVPE法によって成長したGaAs_{0.6}P_{0.4}の40%である。燐の組成を増加していくと4.2KのPLスペクトル

主論文の要旨

報告番号

※甲第

号

氏名

曾我哲夫

は $x=0.56$ で大きく変わる。これは遷移型が直接型から間接型に変わるためである。表面には通常のGaAsP基板にみられるようなクロスハッチ（網目縞）はみられない。赤色で波長655nmで発光するGaAs_{0.6}P_{0.4}LEDがSi上に作製することができた。この可視LEDの発光スペクトル半値幅は24nmである。電流－光出力特性からまだ多くの非発光中心が存在することが分かった。

第6章では本研究の重要な結果をまとめた。今後はより一層のSi上GaAs結晶の欠陥密度の低減化とGaAs層にかかる応力の低減化が望まれる。