



Title	GaAs/AlGaAs resonant tunneling diodes with (411) A super-flat interfaces grown by molecular beam epitaxy
Author(s)	篠原, 啓介
Citation	大阪大学, 1998, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/40650
rights	
Note	著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、 ＜a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed >大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

氏 名	篠 原 啓 介
博士の専攻分野の名称	博 士 (工 学)
学 位 記 番 号	第 1 3 9 4 2 号
学 位 授 与 年 月 日	平成10年 3 月 25 日
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第4条第1項該当 基礎工学研究科物理系専攻
学 位 論 文 名	GaAs/AlGaAs resonant tunneling diodes with (411) A super-flat interfaces grown by molecular beam epitaxy (MBE 成長による (411) A 超平坦ヘテロ界面を有する GaAs/AlGaAs 共鳴トンネルダイオード)
論 文 審 査 委 員	(主査) 教 授 冷水 佐壽 (副査) 教 授 中島 尚男 教 授 川合 知二 助教授 下村 哲

論 文 内 容 の 要 旨

これまで、Ⅲ－Ⅴ族化合物半導体ヘテロ構造の MBE 成長は主に (100) GaAs 基板上に行われてきた。(100) GaAs 基板上に作製した半導体ヘテロ構造においては、 ± 1 分子層 ($2.8\text{\AA}$) 程度のヘテロ界面の凹凸が避けられない。このヘテロ界面の凹凸は、半導体ヘテロ構造を用いたデバイスの特性を大きく左右するにも拘らず、デバイスサイズで原子レベルで平坦なヘテロ界面を作製することは極めて困難であった。1993年、我々の研究室において、(411) A GaAs 基板上に MBE 成長した GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As 量子井戸構造で、そのヘテロ界面がマクロスコピックな領域 ($1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$) にわたって原子レベルで平坦であることが、光学的特性を評価することにより見出された (“(411) A 超平坦ヘテロ界面”)。

本研究では、この (411) A 超平坦ヘテロ界面のデバイスへの応用として、(411) A 超平坦ヘテロ界面をもつ共鳴トンネルダイオードを開発し、その素子特性の向上とヘテロ界面の平坦性の役割を明らかにすることを目的として、以下の研究を行った。特性の良い共鳴トンネルダイオードを作製するにあたって、障壁層となる Al_xGa_{1-x}As の Al 組成を大きくすることは非常に重要である。そこで、(411) A GaAs 基板上の GaAs/AlGaAs 量子井戸構造において、AlGaAs の Al 組成が0.3だけでなく、0.3から1.0まで増加しても超平坦ヘテロ界面が得られる MBE 成長技術を確立した。また、(411) A GaAs 基板上に MBE 成長した Si ドープ GaAs の電気的特性を評価した結果、成長条件によって、その伝導型が n 型から p 型に反転し、補償比の小さい良質の n 型 GaAs を得るためには、より高い V (As₄)/Ⅲ (Ga) 比の下で成長しなければならないことがわかった。そこで (411) A GaAs/AlGaAs ヘテロ界面の平坦性の V/Ⅲ比依存性を調べ、高い V/Ⅲ比では成長表面の平坦性は損なわれるが、そのまま低い V/Ⅲ比に切り替えて成長を行うと、わずか 2 nm の成長後には平坦性が回復することが明らかになった。

これらの結果をもとに、(411) A GaAs 基板上に、初めて GaAs/Al_xGa_{1-x}As ($x=0.3, 1.0$) 二重障壁共鳴トンネルダイオードを作製した。素子特性の一つである P/V 比 (ピーク電流とバレイ電流の比) は (100) GaAs 基板上に同時成長して作製したものにくらべて、20%~60%大きく、これまでに他に報告されているものと比較しても、トップレベルの P/V 比が得られた。また、電流－電圧特性の 2 階微分から見積もった透過確率の半値幅が (100) 上のものに比べて小さく、トンネルする電子の界面の凹凸による散乱に抑えられていることがわかった。さらに、(411) A GaAs 基板上に GaAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As 三重障壁共鳴トンネルダイオードを作製し、これまでに報告されているものの中で、最も大きい P/V 比を達成した。電流－電圧特性の温度、磁場、構造 (井戸幅) 依存性から界面の凹凸に

よる散乱がバレイ電流の増加の要因になっていることを明らかにし、(411)A超平坦ヘテロ界面を用いることにより、素子特性の向上が得られることがわかった。

論文審査の結果の要旨

本論文では、(411)A GaAs 基板上にMBE 成長して実現されるデバイスサイズの、原子レベルで平坦なヘテロ界面（「(411)A超平坦ヘテロ界面」）の量子効果デバイスへの応用として、(411)A超平坦ヘテロ界面をもつ GaAs/AlGaAs 共鳴トンネルダイオードを開発し、優れた素子特性を得ることに成功している。

まず、Al 組成の大きい GaAs/AlGaAs ヘテロ構造においても、(411)A超平坦ヘテロ界面を実現するための研究を行っている。GaAs/Al_{0.7}Ga_{0.3}As 量子井戸構造では、Ga セルを 2 本使用することで、GaAs, Al_{0.7}Ga_{0.3}As の成長速度をそれぞれ 1 μm/h とし、それぞれの層での成長条件（特に V/Ⅲ 比）を最適化して GaAs/Al_{0.7}Ga_{0.3}As 超平坦ヘテロ界面を実現している。また、GaAs/AlAs, GaAs/ (GaAs)₂(AlAs)₂ 量子井戸構造でも、成長条件を最適化することによって、超平坦ヘテロ界面を実現している。

Si は両性不純物であり、(411)A 面上では、成長条件によっては P 型の伝導を示す。そこで、補償比の小さい n 型の GaAs を成長するために、(411)A GaAs 基板上に MBE 成長した Si ドープ GaAs の電気的特性を調べている。(411)A 超平坦ヘテロ界面を実現する V/Ⅲ=10 では、n 型の伝導を示すものの、同時成長した (100) 基板上の Si ドープ GaAs に比べて、およそ 60% の電子濃度しか得られないことがわかった。また、V/Ⅲ をさらに低くすると伝導型は P 型に反転し、V/Ⅲ 比を 15 以上に大きくすると、(100) とほぼ等しい電子濃度が得られ、電子移動度も等しく、良質な n-GaAs 結晶が得られることがわかった。

このように、補償比の小さい良質な n-GaAs は高い V/Ⅲ 比のもとで実現され、超平坦ヘテロ界は低い V/Ⅲ 比の下で実現されるため、共鳴トンネルダイオードを作製するにあたっては、2 重障壁構造と Si ドープ GaAs 層をそれぞれ別々の V/Ⅲ 比で成長しなければならない。そこで、高い V/Ⅲ 比の下で成長した GaAs/AlGaAs ヘテロ界面の平坦性がどのように劣化するか、またその劣化した界面は引き続いて V/Ⅲ 比を低くして成長すればどのくらいで回復するのか、ということについて研究を行っている。その結果、高い V/Ⅲ 比の下で成長した GaAs/AlGaAs ヘテロ界面は成長した膜厚が大きくなるにつれて劣化し、その劣化した界面は (311)A 面と (511)A 面からなるステップがランダムに存在するモデルで説明されている。また、この劣化した界面は引き続いて V/Ⅲ 比を低くして成長すれば平坦性を回復し、およそ 2 nm の AlGaAs を成長した後、完全に回復することが明らかにされている。

以上の研究結果を基礎に、(411)A 超平坦ヘテロ界面を有する GaAs/Al_{0.3}Ga_{0.7}As, GaAs/AlAs 2 重障壁共鳴トンネルダイオード (RTD) を初めて作製している。GaAs/AlAs RTD の P/V 比（ピーク電流とバレイ電流の比）は 77 K において 11.8 で、(100) GaAs 基板上に同時成長したもの (7.5) よりも約 60% 大きな値を示している。また、10 K における電流-電圧特性の 2 階微分から透過確率を導出し、その半値幅 (8.6 meV) は (100) 基板上の RTD (10.5 meV) に比べて 20% 小さくなっていることから、(411)A の良好な特性が界面の平坦性によるものであることがわかる。さらに、(411)A 超平坦ヘテロ界面を有する GaAs/Al_{0.4}Ga_{0.6}As 3 重障壁 RTD を作製し、これまでに報告されているものの中で最も大きな P/V 比を達成している。電流-電圧特性の井戸幅依存性、温度依存性、磁場依存性から界面の凹凸による散乱がバレイ電流の増加の要因になっていることをはじめて明らかにし、(411)A 超平坦ヘテロ界面を用いることにより、素子特性の向上が得られることを実証している。

以上のように、(411)A GaAs 基板上の GaAs/AlGaAs ヘテロ界面の平坦性や (411)A 基板上の Si ドープ GaAs の電気的特性についての新しい知見が得られるとともに、(411)A 超平坦ヘテロ界面を有する共鳴トンネルダイオードの作製技術を開発して、優れた特性を示す共鳴トンネルダイオードが実現されており、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認められる。