

	りゅう えいくん
氏 名	柳 永 勳
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) 材料物性学専攻
学 位 論 文 題 目	GaAs 分子層成長静電誘導型障壁の電気伝導機構
指 導 教 官	東北大学教授 須藤 建
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 須藤 建 東北大学教授 八田有尹 東北大学教授 本間基文

第一章は序論で、本研究の背景と研究目的などを述べた。GaAs 中の電子移動度がシリコン中のそれよりも遥かに大きいと言うことが注目され、かなり早い時期から多数キャリア (電子) のみを利用する電子デバイスの研究開発が行われ、すでに高速通信、衛星放送の増幅器や局所発振器に実用化されている。その通信容量を更に拡大するためには、電波と光の中間領域であるテラヘルツ帯での発振・増幅が可能である半導体素子が必要となる。このような要求に対応する一つの素子として、理想型静電誘導トランジスタ (Ideal Static Induction Transistor : ISIT) が西澤によって提案され、分子層エピタキシー (Molecular Layer Epitaxy : MLE) 法で作製された。この素子構造は電子の平均自由行程を下回っているため、従来の素子構造での電子挙動についての知見がそのまま当てはまるとは限らない。それで、本研究では、ISIT の基本構造となる静電誘導型障壁における電気伝導機構を明らかにし、単分子層精度の素子設計基礎を確立することを目的とした。

第二章では、設計パラメータの異なる4種類のプレーナ・ドーパ・バリア ($n^+ - i - p^+ - i - n^+$ Planar-Doped Barrier : PDB) 構造の C-V 測定、インピーダンス測定、電流-電圧特性の温度依存性などの実験結果を述べた。PDB 構造の板状にドーピングした p^+ 層厚が極めて薄く、1~2分子層厚に相当することと、上述の実験結果に基づいて、静電誘導型三角障壁モデルを立て、PDB における熱電子放出電流の理論計算を行った。最後に、その理論計算結果と実験結果を定量的に比較することによって電気伝導機構を明らかにした。主な結論は次の通りである。① 高抵抗層幅 (i 層) の設計値が 460~1000 Å である3種類の PDB 構造において、真のゲート電位は、ソース・ドレイン電圧の静電誘導効果によって制御される。② この3種類の PDB 構造を流れる電流は、室温以上の温度領域で熱電子放出機構に

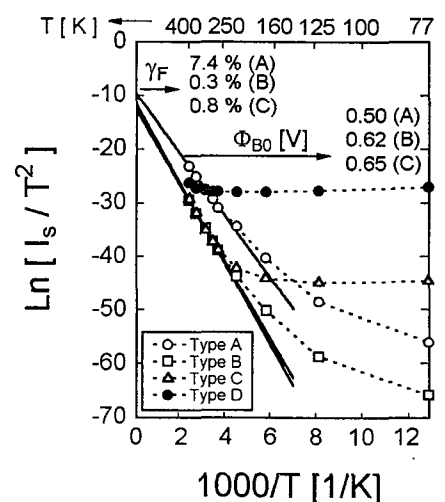


図 1. 順方向の場合におけるリチャードソン・チャート

よって支配される。③ 無衝突（バリスティック）注入係数（ballistic injection factor : γ_F ）は図 1 に示すように 10 % 以下である。この結果は、縮退（電子分布）、バンド構造（有効質量）、散乱（電子飛来立体角）などの要因より定性的に解釈できる。④ 高抵抗層幅が 110 Å である PDB 構造を流れる電流は、トンネル機構によって支配されると考えられる。図 1 から分かるように、電流の活性化エネルギーの温度依存性が非常に弱い。⑤ 熱電子放出機構によって動作する ISIT 構造の電流-電圧特性のシミュレーション、構造パラメータの設計が可能である。

第三章では、主に PDB 構造におけるトンネル機構について述べた。静電誘導型三角障壁モデルを用いて、PDB 構造における電子のトンネル確率を WKB 近似で求め、トンネル電流の理論計算を行った。最後に、その理論計算結果と低温（77 K）での実験結果を定量的に比較することによって PDB の低温電気伝導機構を明らかにした。主な結論は次の通りである。① 高抵抗層幅の設計値が 460~1000 Å である 3 種類の PDB 構造において、図 2 に示すように、トンネル電流の理論計算結果と 77 K での実験結果がよく一致する。② 中間温度（77 K ~ 室温）領域における電流は、熱エネルギーに伴うトンネル機構によって支配されると考えられる。③ 低温領域において、静電誘導ポテンシャル制御が成り立つ。④ 高抵抗層幅の設計値 110 Å である PDB 構造において、設計パラメータを用いたトンネル電流の理論計算結果と室温以下の実測電流がオーダ的に一致する。三角障壁モデルは適応できない。⑤ 室温トンネル素子の高抵抗層幅は、110 Å 以下に設計すべきである。

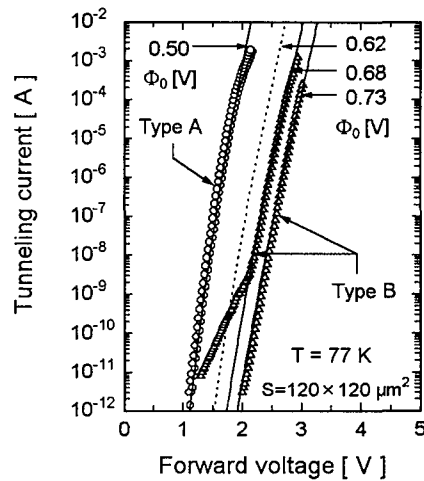


図 2. 1000 Å PDB におけるトンネル電流の理論計算結果(実線、点線)と実測電流(O、△)との比較

第四章では、主に高抵抗層幅 1000 Å の PDB 構造における受光特性、衝突イオン化現象について述べた。主な結論は次の通りである。① 入射光波長が短いほど、光電流の増幅が大きい。この特徴は、紫外線センサとして応用可能である。② 量子効率短波長領域で極めて高く、 $\sim 10^6$ (electron/photon) である。③ 電流の急増現象が起こる電圧（閾値電圧） V_{impact} は、室温で 2.7 V, 77 K で 3.1 V である。実測閾値電圧の温度依存性が負性であることから雪崩現象ではないと判断できる。電流急増現象は、バリスティック伝導に起因する。つまり、ソース側から注入された電子の中で、無衝突で空乏層を走行する電子の加速距離が一番長いから、運

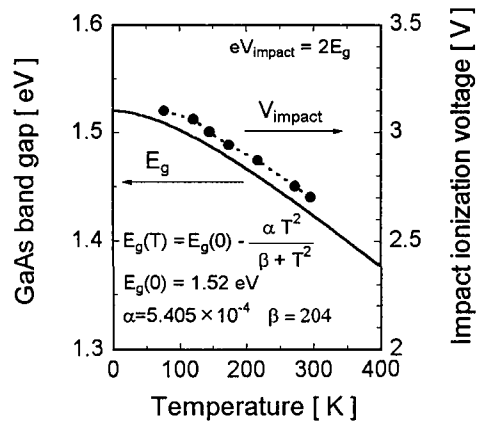


図 3. 1000 Å PDB 構造における衝突イオン化の閾値電圧と GaAs 禁制帯の温度依存性

動エネルギーも一番高い。それがドレイン側結晶格子に一回のみ衝突して、電子・正孔対を生成する。この過程で生じた正孔がポテンシャル山を引き下げ、ついには、そのポテンシャル山を無くす働きをする。従って、この現象は無衝突バリスティック伝導（ballistic transport）の証拠であるとも言える。④ 図3に示すように、衝突イオン化の閾値電圧と GaAs の禁制帯幅の温度依存性がほぼ一致、 $V_{\text{impact}}/E_g \approx 2$ である。⑤ 障壁高さの低い試料では、衝突イオン化に必要な電界になる前に障壁山がなくなるので、電流急増現象は観測されない。

第五章では、主に室温トンネル素子における電流－電圧特性の解析と素子設計について述べた。主な結論は次の通りである。① 図4に示すように、高抵抗層の無い p^{++} 層厚が僅か 45 \AA の超薄膜（ $n^{++}\text{-}p^{++}\text{-}n^{++}$ Ultra Thin Barrier : UTB）構造におけるトンネル電流－電圧特性の理論計算結果と全温度領域の実験結果がよく一致する。② この超薄膜構造において、有効トンネル幅は $\sim 97 \text{ \AA}$ で、C-V 測定より求めた空乏層幅 190 \AA より短い。理想的な階段状空乏層近似は、高抵抗層幅が数百 \AA の場合はよい近似となるが、百 \AA 以下の超薄膜構造ではそのズレが大きく、使えない。③ UTB をエミッタとする伝導帯電子注入型タンネット・ダイオードの電流－電圧特性の設計結果と実験結果がオーダ的、傾向的にはほぼ一致する。④ 以上の理論計算と実験結果がよく一致することから、MLE での不純物分布と膜厚は非常によく制御されているのが分かる。⑤ 小さい印加電圧（3 V 以下）で、発振に必要なトンネル電流密度（ $\sim 5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ ）を得るためには、ドリフト層の幅を 100 \AA 以下に設計する必要がある。

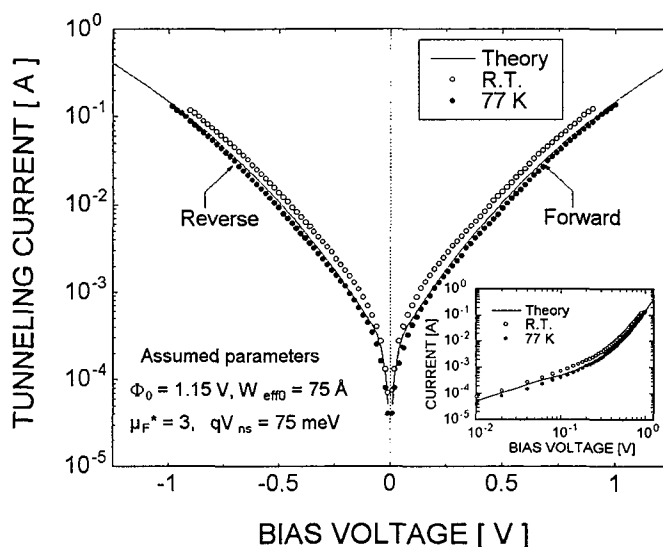


図4. p^{++} 層厚 45 \AA の超薄膜構造におけるトンネル電流の三角障壁モデルによる計算結果と実験結果との比較

第六章では、総括した。本研究では、障壁幅を数十 \AA から 1000 \AA までとするシリーズの GaAs 極薄静電誘導型障壁構造を MLE 法で作製し、静電誘導ポテンシャル制御を基本とする熱電子放出理論とトンネル理論で実験結果を定量的に評価し、電気伝導機構を明らかにした。また、本研究での理論解析結果を用いて伝導帯電子注入型タンネット・ダイオードの設計を行い、実際に MLE 法で作製した結果、その実験と理論設計結果がほぼ一致した。このことから、本研究の解析結果は単分子層精度の素子設計に応用できると判断した。今後、本研究で得られた解析結果を用い、理想型静電誘導トランジスタと伝導帯電子注入型タンネット・ダイオードの構造を最適化することによって、超高速動作とテラヘルツ帯での発振が期待される。

審査結果の要旨

分子層エピタキシ (MLE) 法により単分子層精度で、かつ不純物量を精密に制御した GaAs 薄膜を形成することができるようになり、理想型静電誘導トランジスタ (ISIT) やタンネットダイオードなど、電子が無衝突で走行する、バリスティック超高速デバイスの研究が進展している。著者は MLE 法により GaAs の静電誘導型障壁を形成し、その電気伝導機構を実験と理論の両面から分析し、極めて薄い静電誘導型障壁の設計指針を明らかにした。本論文は、この研究成果についてまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は序論であり、本研究の背景と目的を述べている。

第2章では、本研究で用いた $n^+ \cdot i \cdot p^+ \cdot i \cdot n^+$ 構造を有する GaAs のプレーナ・ドープ・バリア (PDB) の容量-電圧 (C-V) 特性、インピーダンス特性、電流-電圧 (I-V) 特性の温度依存性を低温 (77K) から室温以上まで測定した。その結果を説明するために、静電誘導型三角障壁モデルを立て、熱電子放出電流の理論計算を行い、 i 層幅が 46—100nm の場合、室温以上の温度では、熱電子放出機構が主であることを明らかにした。

第3章では、PDB 構造におけるトンネル電流を静電誘導型三角障壁モデルで計算し、 i 層幅が 46-100nm の場合、低温 (77K) での測定結果とよく一致することを見いだした。また、さらに薄い 11nm においては室温でもトンネル電流の計算結果が実験結果とよく一致することを見いだした。このことから、室温トンネル注入型デバイスの設計においては障壁幅を約 11nm 以下にするべきであると結論した。

第4章では、PDB 構造の受光特性と衝突イオン化現象について述べた。測定した PDB 構造の受光感度は極めて高く量子効率 10^6 (電子/光子) に達し、特に紫外線領域で高いことを見いだした。また、電流の急増現象が起きる電圧から、これが、無衝突で空乏層を走行する電子によって生じることを明らかにし、無衝突 (バリスティック) 伝導の確証を得た。

第5章では、室温トンネル素子の障壁設計について述べている。特に障壁幅を極限的に狭くした、幅 4.5nm の $n^{++} \cdot p^{++} \cdot n^{++}$ (UTB) 構造のトンネル電流を計算し、測定結果と室温、低温ともに良く一致することを示した。また、UTB をエミッタとするタンネットダイオードの電圧電流特性を設計し、実験と良い一致を得た。

第6章は結論である。

以上、要するに本論文は、分子層エピタキシ (MLE) 法により単分子層精度で、かつ不純物量を精密に制御した GaAs の障壁構造の電気伝導機構を実験と理論計算により明らかにし、極めて薄い障壁構造の設計法を確立したものであり、電子材料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。