

高速・室温動作型励起子トランジスタのための新規 酸窒化物半導体材料に関する研究

成重, 棕太

<https://hdl.handle.net/2324/7329551>

出版情報 : Kyushu University, 2024, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :

権利関係 : Public access to the fulltext file is restricted for unavoidable reason (3)



氏 名	成重 棕太			
論 文 名	高速・室温動作型励起子トランジスタのための新規酸窒化物半導体材料に関する研究			
論文調査委員	主 査	九州大学	教授	白谷 正治
	副 査	九州大学	教授	原 隆
	副 査	九州大学	教授	廣川 真男
	副 査	九州大学	教授	板垣 奈穂

論 文 審 査 の 結 果 の 要 旨

チップ内伝送の光化が注目されている。電気配線から光配線への置き換えで、伝送の 2 桁の高速化と 2 桁の低消費電力化が実現すると言われているが、そこでの電子デバイスと光デバイスをつなぐ電気-光信号変換として期待されているのが励起子トランジスタ (exciton transistor: EXOT) である。EXOT のキャリアとなる励起子 (電子-正孔ペア) には、i 室温安定、ii 高移動度、iii 長寿命、iv (ドレイン領域での) 高い再結合確率、という 4 つの相反する性質が要求される。本論文は、EXOT 実用化の鍵となる上記 4 つの特長を併せ持つ励起子を、オリジナル材料 $(\text{ZnO})_x(\text{InN})_{1-x}$ (以下 ZION) からなる歪量子井戸により実現することを目指したものである。ZION は 30-60 meV の励起子束縛エネルギーを有し、高すぎず、低すぎないその絶妙な値は、ZION を高移動度と室温安定性を同時に実現する数少ない材料系にしている。ZION は強い圧電性も有し、歪量子井戸内には MV/cm 級のピエゾ電界が発生する。これにより井戸内で電子と正孔の波動関数は空間的に分離され、マイクロ秒超の長寿命化が可能となる。ドレイン領域に逆バイアスを印加することで高い再結合確率も実現可能である。申請者は本論文において、これら機能の発現の場となるデバイスグレードの ZION 結晶ならびに急峻ヘテロ界面を実現しており、その成果は以下の点で評価できる。

第一に、ZION 膜の高品質ヘテロエピタキシーを実現する基板の表面モフォロジーを明らかにし、原子レベルで平坦な単結晶 ZION 膜の作製に成功している。ZION 結晶成長におけるボトルネックの 1 つがバルクのホモ基板が存在しないことである。申請者は ZION 膜の性能指数を新たに定義し、複数のヘテロ基板についてそれら物性や表面モフォロジーが膜の結晶品質に与える影響を定量的に調べた結果、基板との格子不整合率に加えて、基板の表面モフォロジーが ZION 膜品質を決定すること、またそのモフォロジー評価において、通常用いられる二乗平均 (RMS) 粗さ (=分布の標準偏差) ではなく、表面高さ分布の「歪度」が重要な指標となることを突き止めた。これにより原子レベルで平坦な単結晶 ZION 膜の作製に成功している。

第二に、基板の面極性が結晶成長に与える影響を明らかにし、世界初となる原子レベルで急峻な ZION/ZnO ヘテロ界面の形成に成功している。ZION 膜成長の難しさには上述の基板の問題に加え、成長温度が In-N の分解温度 (550°C) 以下に限定されるという点がある。この限られた条件の中、申請者は特に質量数の大きいカチオン (In, Zn) に着目、基板表面上でのそれら吸着原子のマイグレーションを最大化することを目的に、O 極性 ZnO 基板上への結晶成長を行った。O 極性基板には (O 層が最表面に来た時の) ダングリングボンド数が Zn 極性のその約 1/3 という利点があるためである。この結果、原子レベルで急峻な ZION/ZnO ヘテロ界面の形成に成功している。この時 ZION 膜は ZnO に対してシュードモルフィックに成長しており、歪量子井戸が形成可能であることも示し

た.

第三に、 ZION 膜形成時における 2 次核形成の影響を明らかにし、既報告の ZION 膜の中で最も面外配向性に優れた ZION 膜を作製することに成功している. 上述のように In-N の分解温度は低く、In 凝集に起因した 2 次核形成の抑制のためには基板温度を下げる必要があるが、一方で低い基板温度は吸着原子のマイグレーションにおいて不利である. そこで、第一、第二の成果を元に、申請者は高いマイグレーションを担保しながら基板温度を精緻に制御、2 次核形成のみを抑制することで、ZION 膜の更なる高品質化に成功している. 具体的には基板温度 300°C にて、(0002)面 x 線ロックアップカーブ半値幅が 0.04°, RMS ラフネスが 0.22 nm の ZION 膜を得た.

第四に、絶縁性基板である ScAlMgO₄ 上への ZION ヘテロエピタキシーを成功させ、過去報告された最も低いキャリア濃度をさらに 1 桁下回る残留キャリア濃度を実現させている. 申請者は、ZION エピタキシャル膜の電気的物性を明らかにすることを目的に、第一～第三の成果をベースに、絶縁性基板である ScAlMgO₄ 上へのヘテロエピタキシーを行った. その結果、 $8.4 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ の低い残留キャリア濃度を観測している. これは過去報告された最も低いキャリア濃度をさらに 1 桁下回る値であり、申請者はその理由を、ZION 成膜時における供給原子フラックスの精緻な制御とマイグレーションの最大化が、浅いドナー準位を形成する点欠陥の発生を抑制したためと結論づけている.

第五に、申請者は将来の応用展開を見据え、汎用基板であるサファイア上への高品質エピタキシャル成長を実現させ、これにより基板のコストを二桁低減することに成功している. サファイア上におけるエピタキシャル成長は、膜と基板との 18% 超の格子不整合率が最大のボトルネックとなるが、申請者は逆 Stranski-Krastanov (逆 SK) 法を用いてこれを実現している. 逆 SK 法とは、従来 SK モード成長とは逆に結晶薄膜成長を 3 次元から 2 次元に移行させる手法で、まず歪を緩和するナノ結晶粒を、配向性を揃えた状態で高密度に配置、その表面に原子平坦性をもたせ、これを緩和層とすることで最終的に単結晶膜を得る手法である. この結果、格子整合系基板に匹敵する高い結晶品質をサファイア上で実現することに成功している.

以上のように、本論文は、EXOT 実用化の鍵となるデバイスグレードの ZION 結晶ならびに急峻ヘテロ界面を実現しており、その品質は既報告のものを大きく凌駕する. 本論文で得られた成果は、今後の励起子デバイス開発に貴重な知見を提供すると同時に、申請者が確立した材料設計指針や結晶成長手法は、他の材料系にも応用可能な技術基盤となるものであり、電気電子工学上価値のある業績といえる.

よって、本研究者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める.