

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 椋太

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

区 分 : 甲

論文内容の要旨

世界の情報通信量は 2030 年には 2022 年の 30 倍以上、2050 年には 4,000 倍に達すると予測されており、これに伴い ICT 機器の電力消費量も急増している。産業のデジタル化・グリーン化が喫緊の課題となる中、情報処理デバイスにはこれまで以上に高速化・低消費電力化が求められている。そこで注目されているのが大規模集積回路 (LSI) 内の光配線化である。微細化と高速化に伴い、今では配線抵抗や配線間容量による RC 遅延や電力消費が LSI の全体性能を支配するまでになったが、光配線には当然 RC 遅延はなく、配線間容量の充放電による電力消費も発生しないためである。電気から光配線への置き換えで、伝送の 2 桁の高速化と低消費電力化が実現すると期待されている。

光配線化におけるボトルネックは、演算・記憶装置を光で接続するための電気-光信号変換 (EO) である。LSI 内 EO には高速性と高集積性の両方が要求されるが、既存デバイスではそれらがトレードオフとなるためである。そこで本研究では「励起子トランジスタ (exciton transistor: EXOT)」からなる新概念 EO に着目した。EXOT は、半導体量子井戸内に生成された励起子 (クーロン相互作用で結合した電子-正孔対) をキャリアとする。光励起により生成した励起子の流れをゲート電圧によりスイッチングし、ドレイン領域で励起子を再結合させることで光信号に変換する。導波路が不要で小型化が可能であり、また励起子と光子のインタラクションは極めて速い時間スケール (<ps) で行われるため、高速化も可能である。しかし EXOT にはそのキャリアとなる励起子に、(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、これが実用化におけるボトルネックとなっている。

本研究は、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す。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。本研究では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有する量子井戸の実現を目的に研究を行った。本論文は、7 章から構成される。

第 1 章では、本研究の背景および EXOT の実用化に向けた課題を述べるとともに、この問題を解決するデバイス構造として、ZION から成る歪量子井戸構造の提案を行った。

第 2 章では、ZION 膜の高品質ヘテロエピタキシーを実現する基板のキーパラメータについて議

論した。結晶成長におけるボトルネックの 1 つが ZION にバルク基板が存在しないことである。本章では 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。その結果、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 膜の作製に成功した。

第 3 章では、基板の面極性が結晶成長に与える影響を議論した。ZION 膜成長の難しさに、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、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 極性のそれの約 1/3 という利点があるためである。結果、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た。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が示された。

第 4 章では、ZION 膜形成時における 2 次核形成の影響について議論した。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 2, 3 章で得られた知見を元に、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た。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 膜の作製に成功した。

第 5 章では、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 2-4 章で得られた知見をベースに、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た。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、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考えられる。

第 6 章で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エピタキシャル成長を行った。18% 超の格子不整合率が最大のボトルネックとなるが、逆 Stranski-Krastanov (逆 SK) 法を用いてこれを実現した。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、4 章で報告した ZnO 上 ZION 膜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た。

第 7 章では、本研究によって得られた結論をまとめ、今後の課題について述べた。