

ワイドギャップ半導体における不純物ドーピング伝導制御からの脱却

	研究代表者	名城大学・理工学部・教授 竹内 哲也 (たけうち てつや)	研究者番号:10583817
	研究課題情報	課題番号: 23H05460 キーワード: 分極ドーピング、トンネル接合、ワイドギャップ半導体、光デバイス	研究期間: 2023年度~2027年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか (研究の背景・目的)

●研究の全体像

4eV以上のワイドギャップ窒化物半導体には、コロナウイルス不活化用深紫外LEDなど、省エネルギーかつ安心・安全な社会活動に必要な様々なデバイス実現の期待が寄せられる。しかし、誘電体・絶縁体的性質が顕著になり、もはや従来の「不純物ドーピング」による電気伝導制御が不可能である (図1)。本研究では、不純物のイオン化エネルギーに依存しない「分極ドーピング」と「トンネル接合」による新規伝導制御手法を体系化する。本質であるキャリア (正孔) 実測を伴う原理検証と逆符号分極電荷による弊害対策を遂行する。一方、研究代表者独自のGaNトンネル接合の低抵抗化の要因を明らかにし、混晶を含む様々なトンネル接合に展開する。最終的に、「分極ドーピング」と「トンネル接合」の**新規手法を統合して、様々な次世代ワイドギャップ光デバイスを実証し、不純物ドーピングに代わるワイドギャップ半導体における電気伝導制御の新たなスタンダードを構築する** (図2)。

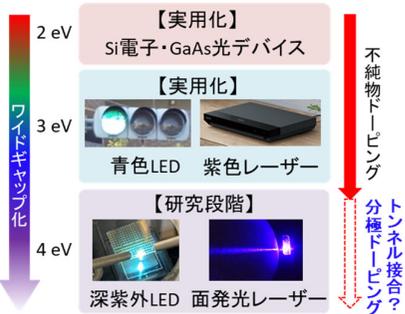


図1 半導体デバイスと伝導制御手法

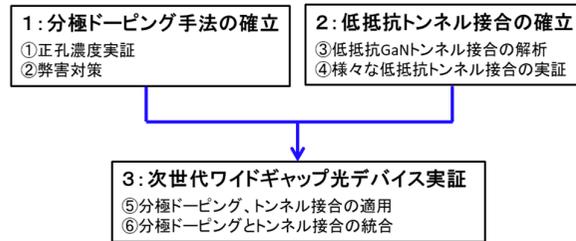


図2 本研究の構成

●分極ドーピング

分極ドーピングとは、誘電体の特徴である、表面 (ヘテロ界面) に誘起する分極電荷に逆符号キャリアを蓄積させるキャリア生成手法であり、不純物ドーピングのような元素のイオン化を必要としない (図3)。一方で、分極ドーピングを最も必要とする高AlNモル分率AlGaInでは、分極ドーピングによる正孔生成の直接的な実証例がほとんどない。

**根本的な課題**: 理論通り、分極 (負) 電荷濃度と等しい濃度のキャリア (正孔) は本当に生成するのだろうか。

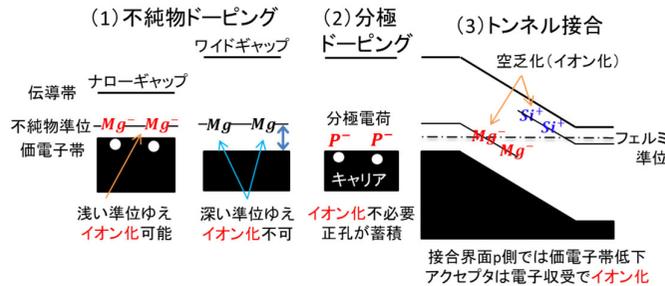


図3 各伝導制御手法の原理概念図

●トンネル接合

トンネル接合では、不純物ドーピングを用いるが、いわゆるpn接合における空乏化により、イオン化エネルギーに左右されないイオン化が生じる (図3)。このトンネル接合により、高抵抗p層の大部分を低抵抗n層に置き換えられる。一方、トンネル接合にはナローギャップ、急峻なアクセプタ・ドナー界面が必要だと教科書に記載されているが、窒化物半導体ではワイドギャップかつ緩やかなアクセプタ・ドナー界面で低抵抗トンネル接合が実証されている。

**根本的な課題**: 従来の常識を覆す低抵抗化の本質は何だろうか。

●ワイドギャップ光デバイス

ウイルス不活化用深紫外LED (AlGaIn > 4 eV)、超低消費電力メカネ型ディスプレイ用面発光レーザー (AlInN ~ 4 eV) などの次世代ワイドギャップ光デバイスの実用化が期待され、すでに分極ドーピングとトンネル接合は、いくつかのデバイスに研究段階として用いられている。一方で、多くの場合、従来の不純物ドーピングによる窒化物半導体デバイスを凌駕する性能には至っていない。

**根本的な課題**: 分極ドーピングやトンネル接合はデバイス構造において本当に有効利用できるのだろうか。

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●分極ドーピング手法の確立

- ①正孔濃度実証: 研究代表者ら独自のp側AlGaInコンタクト層を用いたAlGaIn組成傾斜ホール素子により、正孔濃度のAlNモル分率差と膜厚依存性を実証し、理論値との整合性を検証する。
- ②弊害 (逆符号分極電荷) 対策: 発光層側p層端に発生する逆符号分極電荷の弊害、具体的には電子の漏れによる効率低下の抑制に向けて、「不純物ドーピング組成傾斜層」や「発光層隣接構造」を活用する。

●低抵抗トンネル接合の確立

- ③低抵抗トンネル接合の解析: トンネル電流への寄与が推察される中間準位の存在を明らかにすべく、接合界面に対して光熱偏向分光法を試み、光学的特性と電気的特性との相関関係を明らかにする。
- ④様々な低抵抗トンネル接合の実証: 上記③での知見を踏まえて、様々な窒化物半導体トンネル接合の低抵抗化に展開し、従来の延長線上にない手法として確立する。

●次世代ワイドギャップ光デバイス実証

- ⑤分極ドーピング・トンネル接合の適用: ①②で体系化した分極ドーピング、あるいは③④で低抵抗化したトンネル接合の利用を最優先した素子設計・形成を進める。深紫外レーザーや量子殻レーザーの室温連続動作への寄与が期待される (図5)。
- ⑥分極ドーピング・トンネル接合の統合: 逆積層pnトンネル接合上に逆積層光デバイス構造を形成することで、分極ドーピングの弊害も抜本的に回避しながら、従来のバンドギャップエンジニアリングも両立する究極の光デバイスを実証する (図4)。深紫外LED、GaN面発光レーザー、青色端面レーザーなどの大幅な高性能化への寄与が期待される (図5)。

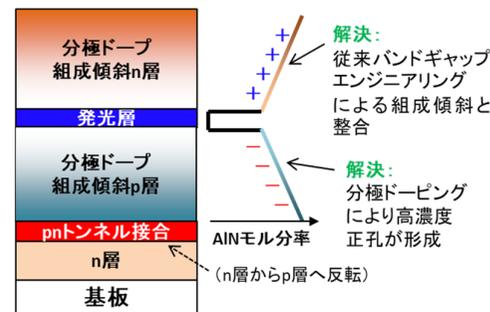


図4 分極ドーピング・トンネル接合の統合

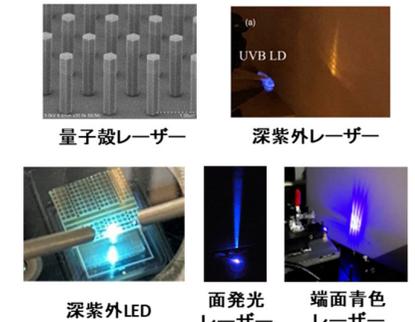


図5 分極ドーピングやトンネル接合を用いる次世代ワイドギャップ光デバイス