

新たな光機能や光物性の発現・利活用を基軸とする  
次世代フォトニクスの基盤技術  
平成 28 年度採択研究代表者

H29 年度 実績報告書
-----------------

岩谷 素顕

学校法人名城大学工学部  
准教授

深紫外領域半導体レーザーの実現と超高濃度不純物・分極半導体の研究

## § 1. 研究実施体制

### (1)「名城大学」グループ

- ① 研究代表者:岩谷 素顕 (名城大学工学部、准教授)
- ② 研究項目
  - ・紫外レーザーの作製および評価
  - ・物性評価・シミュレーション
  - ・分極半導体および超高濃度不純物半導体の物理の解析

### (2)「三重大学」グループ

- ① 主たる共同研究者:三宅秀人 (三重大学大学院地域イノベーション学研究科、教授)
- ② 研究項目
  - ・AlGa<sub>N</sub> 系テンプレートの高品質化

## § 2. 研究実施の概要

本研究課題では、未踏波長域である深紫外領域の半導体レーザを実現することを目標に研究を進めている。半導体レーザを実現するためには、①光学利得が得られる材料があること、②光共振器を形成すること、③レーザ発振に必要なキャリアの注入の3つが必要条件である。

本研究課題で取り扱う AlGaIn 系材料は、外部量子効率が 10% を超える紫外 LED が実現されており、物性的なポテンシャルを有している。一方、レーザに向けた検討は、本研究グループをはじめとした日米欧の複数の研究機関から光励起によるレーザ発振が報告されている。また必要な光励起パワー密度の値を見積もると、高性能レーザが実現されている GaInN 系量子井戸活性層を用いた場合の約 2 倍程度であることから AlGaIn 材料は高い光学利得が得られ且つ光閉じ込めが可能かの確認する段階はクリアしている。また、平成 29 年度の検討で 350nm 帯であるが電子線を用いた注入によってもレーザ発振に関しても実現しており、材料的にレーザ発振に必要なポテンシャルは十分に満たしていると考えられる。一方、高 Al 組成の AlGaIn の結晶成長技術およびキャリアの注入においては大きな課題が存在する。これらの問題点を本研究グループでは検討を進め以下のような結果を得た。

### ① 高 Al 組成 AlGaIn の高品質化

窒化物半導体発光デバイスにおいて AlGaIn 結晶の高品質化は極めて重要である。しかしながら、高 Al 組成 AlGaIn においては高品質結晶を得ることが極めて難しいという課題があった。本研究課題では、三重大学で開発されたサファイア基板上に堆積した AlN を高温アニールすることによってサファイア基板上では世界最高品質レベルの AlN 結晶の上に名城大学にて有機金属化合物気相成長法で高 Al 組成 AlGaIn を成長する手法に関して検討した。

結果として、サファイア基板上にスパッタ法によって作製した AlN を Face to face 法でアニールした AlN は転位密度が  $10^8 \text{ cm}^{-2}$  台のサファイア基板上では世界最高レベルの高品質化が可能であったこと、さらにその上に直接 AlGaIn を成長することによって、Al 組成が 0.6 程度で転位密度が  $10^9 \text{ cm}^{-2}$  程度の AlGaIn が得られることが確認された (Junya Hakamata, Yuta Kawase, Lin Dong, Sho Iwayama, Motoaki Iwaya, Tetsuya Takeuchi, Satoshi Kamiyama, Hideto Miyake, Isamu Akasaki, "Growth of High - Quality AlN and AlGaIn Films on Sputtered AlN/Sapphire Templates via High - Temperature Annealing" Phys. Status Solidi B, 1700506 (2018).) 現在、この有効性に関して検討を進めており、レーザ発振に必要な注入キャリア密度を下げるができることが期待される。

### ② 高 Al 組成 AlGaIn におけるキャリア注入の検討

一般的に LED 動作においては、自然放出光を利用するデバイスであることから注入キャリア密度は  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  後半から  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  程度にすることによって高性能デバイスが実現可能である。しかしレーザ発振させるためには、キャリアの反転分布状態を得る必要があるため、LED レベルのキャリア注入では不十分であり、光励起レーザや電子線励起レーザの結果から  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  後半から  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$  程度のキャリアを注入する必要がある。また、光の閉じ込めをするためにも、活性層のバンドギャ

ップよりも大きなバンドギャップを持つ n 型層および p 型層が必要とされる。紫外 LED においては、高い正孔濃度を持つ高 Al 組成 p 型 AlGa<sub>x</sub>N を得られないため、p 型層には GaN が一般的に用いられている。しかし、紫外レーザの場合はクラッド層には高 Al 組成 p 型 AlGa<sub>x</sub>N を用いる必要がある。これらの課題を解決するために、本研究課題では、分極ドーピングの活用、超高濃度不純物半導体の活用、トンネル接合の活用などを検討している。分極ドーピングの活用に関しては、窒化物半導体は大きな分極電荷を有していることから、高い正孔濃度が得られることが平成 28 年度の検討で確認できた。平成 29 年度は、分極ドーピングを用いた構造で光閉じ込めが可能であるかということ光励起によって検討を行い、構造を適切に設計すれば分極ドーピングを用いた構造でも光閉じ込めが可能であることが確認された。また高濃度ドーピングに関しては、新たにアンモニアヒータを用いた MOVPE 装置を導入し、現在結晶成長条件の最適化を進めており、他の研究グループとの共同研究である Mg のその場観察技術を組み合わせることによって最適な方法の検討を進めていく予定である。また、トンネル接合においても成果を残しつつあり、MOVPE 法では世界初となる紫外領域 LED 動作を確認した。一方で、レーザ応用を目指すにはトンネル接合部の抵抗が高いという課題があることから、構造およびトンネル接合部の不純物濃度の最適化を検討している。

学理の構築という観点では、AlGa<sub>x</sub>N 活性層への効率的な電流注入を目的として p 層への(I)高濃度 Mg ドーピングおよび(II)分極ドーピングを検討している。課題(I)の理論検討を推し進めるため、薄膜のステップフロー成長を考慮した運動論的熱力学モデルの構築を行った。新規構築モデルを GaN-MOVPE における不純物混入解析に適用し妥当性の検証を行った。また、第一原理計算を用いて高濃度 Mg 添加 GaN および AlN における反転ドメイン境界の形成エネルギーのフェルミ準位依存性を明らかにした。

また、国際連携に関しても勢力に活動を行った。Konrad Sakowski 博士(ポーランド科学アカデミー高圧物理学研究所)、Liu Xiaotong 博士、Xiaojuan Sun 博士を招聘し、AlN の結晶成長および分極ドーピングの理論解析を精力的に行った。優れた成果としては、Konrad Sakowski 博士の理論計算によって、レーザの閾値を下げる上での設計指針を明らかにするなどの成果があり、今後デバイスへの応用を目指し検討を進める予定である。

平成 30 年度は、マイルストーンとして平成 30 年度末に UV-B 領域の深紫外半導体レーザにおけるパルス発振を達成し、その後平成 33 年度末には連続発振の実現、さらには発振波長域を UV-C 領域まで広げること目標とする。また、博士研究員として Dr. Kim を雇用し研究の中核に参画させることで人材育成もはっている。

これらの研究の進展を社会に発信するための努力も多数行っている。最終的に実用化を目指すうえで重要な知的財産に関しては特許化を重点的に行い、平成 29 年度に出願を完了した特許は国内が 9 件、国際が 1 件であった。また、原著論文が 15 編、招待講演が 27 件、口頭発表が 41 件、ポスター発表が 25 件と多くの対外発表を行った。さらに、研究グループ内のワークショップを名城大・三重大・九大の研究者で計 4 回実施し、さらに名城大学の本 CREST の実施母体である光デバイス研究センターが主催の 100 名規模のシンポジウムを開催するなどのアウトリーチ活動も併せて実施した。