

短パルスレーザーを用いた高効率深紫外 LED 実現の為の p-AlGaN のドーパント高活性化，並びに低抵抗電極の形成法の開発

豊田工業大学 工学（系）研究科（研究院）

教授 神谷 格

（平成 26 年度一般研究開発助成 AF-2014205）

キーワード：エキシマーレーザー，窒化物半導体，キャリア活性化

1. 研究の目的と背景

GaN や AlGaIn で代表される窒化物半導体において，発光素子に代表される電子デバイスを実現するために通常結晶成長法として有機金属結晶成長法（Metal Organic Chemical Vapor Deposition: MOCVD）を用いる。しかし MOCVD では窒化物半導体の p 型ドーパントとして Mg を用いるが，通常，Mg をいくらドーピングしてもそのままではなかなか活性化されずアクセプターとして働かない。この問題は結晶成長の後，急速加熱（Rapid Thermal Annealing: RTA）法や，熱処理炉での定常加熱法を用いて結晶をアニールし，水素を結晶から追い出すことによって活性化できることが中村らによって見いだされた¹⁾。この結果，容易に p 型窒化物半導体を得られるようになり，現在は発光ダイオード（Light Emitting Diode: LED）などの発光素子をはじめとする種々のデバイスが生まれている。

しかし今まで行われている RTA 法や定常加熱法では大面積結晶成長基板の加熱は可能だが局所加熱は不可能であり，LED 以外の縦型電流狭窄型 FET（Field Effect Transistor: 電界効果型トランジスター）を実現するうえで，必ずしも最適な活性化法ではない。そのような中，我々はエキシマーレーザーを用いた新たな「レーザー誘起局所 p 型活性化（Laser Induced Local Activation: LILA）法」を開発した。本方法は特別な炉を用意する必要がなく大気中，あるいは任意の雰囲気環境の中で容易に局所活性化を行うことができるばかりでなく，エキシマーレーザーが短いパルス（～10ns）で発振するために温度の上昇並びに下降を急峻にでき，そのためドーパントの拡散を抑え横方向並びに深さ方向に対してもシャープな切れの良い不純物

ドーパント分布が期待できる，といった特長を有している。また Mg は熱処理によって動きやすく界面等に蓄積すると考えられているが，温度の急峻な上下の結果そのような蓄積効果もなくすることができると期待される。またこの LILA 法は任意の位置を活性化することができるためコンピュータ制御によるデバイス作製を可能にする。これは Si-LSI（Si 大規模集積回路）の実現が局所不純物注入を可能にしたイオン注入法と良く類似している。すなわち，LILA 法によっても局所不純物活性化が可能になるため縦型電流狭窄型 FET 等，種々の応用が期待される。また LILA 法は非定常状態でのプロセスであるため，非定常結晶成長法である，交互供給結晶成長法を用いた場合のドーピングが高い活性化率を示している²⁾ のと同様にドーピングした Mg の活性化率が非定常法である LILA 法で上がる可能性もあり，新たな活性化法として期待される。

深紫外 LED の高効率化を考えた場合，この LILA 法を用い，高濃度・高移動度 p 型 AlGaIn の実現，低抵抗オーミックコンタクトの実現などが期待される。これらを実現するために本研究では，我々の開発した LILA 法を GaN に適用し，Mg ドープ GaN 窒化物半導体の p 型活性化の可能性を原理実証することを目的とした。

2. 実験方法

実験に用いた試料構造の概念図を図 1 に示す。試料はサファイア基板あるいは Si 基板を用い，その上に低温 GaN バッファー，アンドープ GaN，Mg ドープ GaN を MOCVD 法を用いてエピタキシャル成長し作製した。Mg ドープ GaN の厚みは約 1 μm である。図 1 に示したものはサファイア基板上に作製した試料構造の一例である。

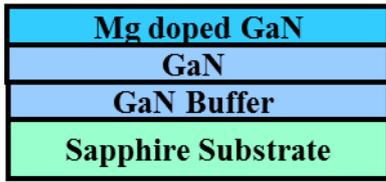


図1 Mg ドープ GaN の試料構造

図2に試料への光照射及びその場観察実験の装置の構成図を示す。照射用レーザーは193nmで発振するArFエキシマーレーザーを用いており、パルス幅は10ns、繰り返しは1~500Hz、レーザー強度は最大10mJである。レンズ系を用い適度な大きさに集光する。X-Y方向に自由に動くステージ上に試料は設置されており、目的に応じて均一照射、あるいは局所照射を行うことが可能である。

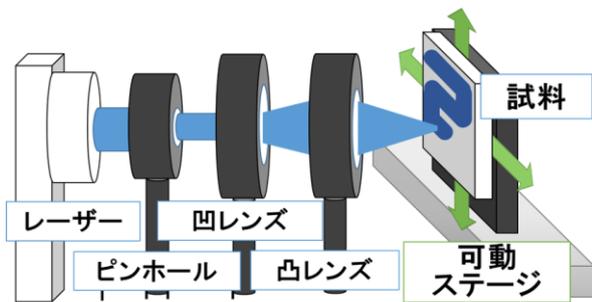


図2 試料照射系並びにその場観測系

レーザー照射を施した試料は事後に van der Pauw のホール効果測定並びに電流電圧特性で評価した。また表面の形状は顕微鏡で観察した。

3. 実験結果

レーザーの局所照射並びに大面積照射を行う場合、レーザーのプロファイルとその重ね合わせによるレーザー強度分布を知る必要がある。我々はスリット法を用いてレーザー光の強度プロファイルを調べた。図3は横方向に関する強度プロファイルの測定結果である。この結果から明らかなおりプロファイルはほぼガウシアンで近似でき、その半値全幅は1200 μm であった。縦方向についても同様の実験を行った。

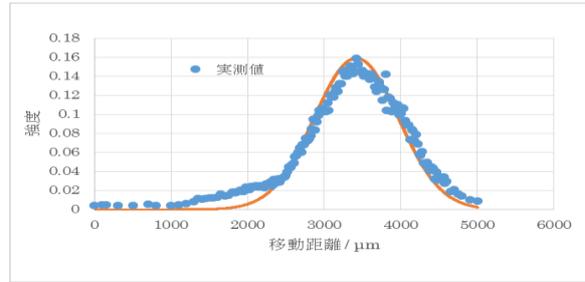


図3 横方向のレーザー強度プロファイル
赤線はガウシアン近似

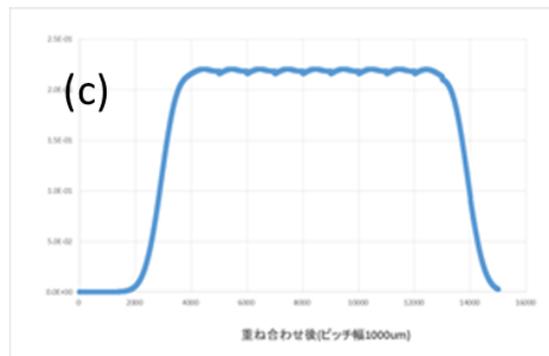
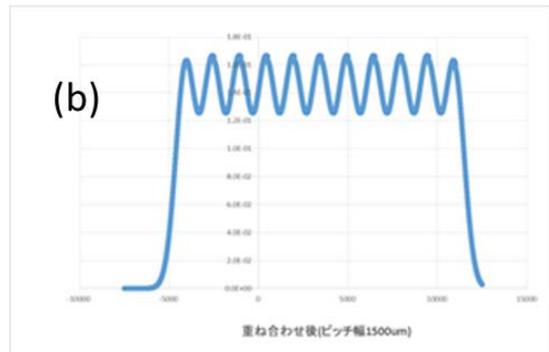
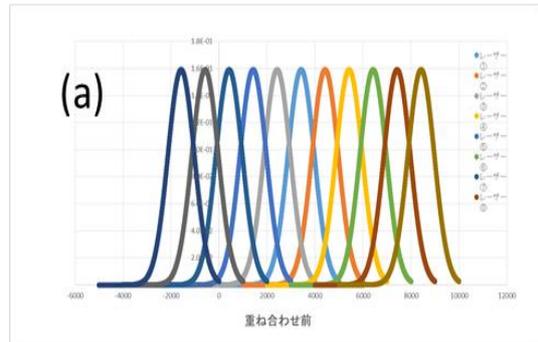


図4 重ね照射による照射プロファイルのシミュレーション

- (a) 重ね合わせ前のレーザー強度プロファイル、
- (b) 重ね方が悪い場合の全体強度プロファイル、
- (c) 重ね方が最適の場合の全体強度プロファイル

図4はエキシマーレーザーを少しずつずらして重ね打

ちし照射した場合の全体の照射プロファイルのシミュレーション結果を示す。前述の強度プロファイリングの結果に基づき、ビームの半値幅は1200 μmとした。シミュレーション結果で確認される通り、ビームの重ね方が悪い場合は照射強度に変動が出るが、重ね方を最適化することによって照射強度を均一にすることができる。

試料はホール効果を測定するために種々のレーザー強度で8mm角の試料を均一照射した。また比較のために熱処理炉での定常加熱法を用いて活性化した結果、並びに未処理の試料での測定結果を比較した。表1はSi基板上に結晶成長したMgドープGaNをLILA法によって照射した場合、定常加熱した場合、並びに熱・光の処理をしない場合の3種の試料のホール効果測定によるキャリア濃度並びに移動度の測定結果例である。

Mg濃度 [cm ⁻³]	処理方法	ホール濃度 [cm ⁻³]	移動度 [cm ² /V・s]
5.2×10 ¹⁹	LILA 1mJ,150Hz,1mm/s	3.3×10 ¹⁶	4.7
	定常加熱 950°C,20min,N ₂	5.5×10 ¹⁶	4.1
	未処理	高抵抗のため、測定不可	

表1 Mgを5.2x10¹⁹/cm³ドープした場合のLILA法と熱処理炉での定常加熱処理、並びに未処理の試料でのそれぞれのホール濃度、移動度の測定結果。³⁾

5.2×10¹⁹ cm⁻³という高い濃度でMg原子によるドーピングがなされていても、熱・光照射等の処理を施さない場合、MgドープGaN試料は絶縁性でホール効果の測定は不可能であった。しかし定常加熱法若しくはLILA法を用いることでp型のキャリアであるホールが形成され、ホール効果の測定も可能となった。LILA法の場合ホール濃度は3.3x10¹⁶/cm³であった。移動度の結果も合わせ、LILA法で得られた結果はほぼ定常加熱法(950°C, 20min, N₂雰囲気)で得られた結果と一致する。このことより定常加熱法

と同様にLILA法でMgドープGaNのキャリアが活性化できることが分かった。

また、照射を施した結晶の表面は鏡面であった。更に照射エリア、照射位置はLILA法では任意に変えられ、今回は8mm角での領域限定均一照射でホール効果測定に成功している。

サファイア基板上のMgドープGaNに関しても照射条件は基板の熱伝導等によって異なってくるが同様にLILA法で活性化できることが解った。

4. 結論

LILA法によりMgドープGaNをp型に局所活性化することができることが実証された。また、本研究によりMgドープAlGaNのLILA法による高活性化、それを用いた高効率深紫外LED作製が可能になる第一歩の原理実証研究ができた。本方法は将来、縦型電流狭窄型FETを実現する有効な手段となると期待される。

謝辞

本研究は公益財団法人天田財団の一般研究開発助成(AF-2014205)によって行われたことを付記するとともに、深く感謝の意を表す。また本研究は本学学生の松本滉大君、下野貴史君、そして岩田直高教授、山田郁彦研究員、黒瀬範子研究員(立命館大学)、青柳克信上席研究員(立命館大学)との共同研究によって行われた。

参考文献

- 1) S. Nakamura, T. Mukai, M. Senoh, and N. Iwasa, Jpn. J. Appl. Phys. **31** (1992) L139.
- 2) Yoshinobu Aoyagi, Misaichi Takeuchi, Sohachi Iwai, and Hideki Hirayama, AIP Advances **2** (2012) 012177.
- 3) 松本滉大, 黒瀬範子, 下野貴史, 岩田直高, 山田郁彦, 神谷格, 青柳克信, 2017年度秋季応用物理学会発表予定.