

ピコ秒レーザー照射を用いた p 型窒化ガリウムへの オーミック電極の作製

徳島大学 富田卓朗

1.背景

近年、半導体デバイスへの応用と研究が進んでいる窒化ガリウム(GaN)は、シリコンに比べてバンドギャップが広く、パワーデバイスや高周波デバイスへの応用が注目されている。しかし、実用化のためには、低キャリア濃度の制御や高品質基板の作製など解決すべき課題が多く残っている。これらの課題のなかでも窒化ガリウム基板と金属電極のオーミック接触の実現は窒化ガリウムデバイスの実用化のための重要な課題である。

これまで、窒化ガリウムへのオーミック電極作製には、熱アニールの手法が行われてきた。この手法により、n型の窒化ガリウムに対しては良好なオーミック接触が得られたものの、p型の窒化ガリウム(p-GaN)には良好なオーミック電極を得るに至っていない。また、良好なオーミック電極の作製には急熱急冷のプロセスが優れているとされているが、熱アニールの手法では限界がある。低抵抗なオーミック電極を作製することはデバイスの寿命、性能の向上につながり、実用化のために非常に重要である。p-GaN 上電極をオーミック化させるためには、高温アニールなど様々な方法が発明されており、p型窒化ガリウム(p-GaN)上に低接触抵抗オーミック電極をレーザー照射により作製する方法はいくつか報告されている[3]。

一方で、近年、10兆分の1秒という非常に短い時間に強力な光を発することのできるフェムト秒レーザーが注目を集めている。フェムト秒レーザーは非熱加工や内部加工など他のレーザーでは不可能な加工法を可能にする光源として今後活発に活用されていくものと期待されている。我々は、フェムト秒レーザー光の波長(800 nm、1.5 eV)がワイドバンドギャップ半導体のバンドギャップエネルギーよりも小さいことに着目し、ワイドバンドギャップ側から金属電極にフェムト秒レーザー照射を行うことを着想した。そこで、我々はシリコンカーバイドを対象とし、金属電極にフェムト秒レーザー照射を行うことで、100°C低いアニール温度でオーミック電極の作製に成功している[4]。一方、窒化ガリウムにおいても同様にフェムト秒レーザー光照射を用いた金属電極作製に取り組んでいるが、実用化の目処は立っていない[5]。ところが、我々は、最近フェムト秒レーザー照射の代わりにピコ秒レーザー照射を行うことで金属電極のニッケル(Ni)原子が特定のフルエンス領域で非常によく GaN 基板内部に拡散することを見出した。

なかでもピコ秒レーザーを用いた手法は、局所的処理が可能で空間選択性に優れた加工ができ、低接触抵抗率を達成する上で有用である。しかし、超短パルスレーザー照射を用いた電気特性改善の詳しいパラメータは分かっていない。そこで、本研究では、蒸着した金属電極に窒化ガリウム側からピコ秒レーザー照射を行い、p-GaN/金属界面に相互作用を起こして電気特性を改質させるため、パルス幅とフルエンス依存性を調査した。

2.実験方法

本研究では、(0001)サファイア基板の上にエピタキシャル成長させた p-GaN 試料を用いた。GaN 基板はサファイア基板の上に undoped-GaN を 2.1 μm 、p-GaN を 1.0 μm 成長させている。p-GaN 膜には Mg をドープしたものを使用している。電極を作製し、I-V 特性を調査するため、フォトレジストにより試料上にパターンを形成したのち、Ni/Au を 50nm ずつ蒸着した。続いて、ピコ秒オーダーでパルス時間幅が可変な超短パルスレー

レーザーを用いて走査照射した。レーザー照射時、p-GaN膜と金属界面に焦点をあてて照射している。レーザー照射に用いた光源の波長は1030 nm、繰り返し周波数100 kHz、走査速度1.5 mm/s、パルス時間幅0.3 ps及び10psであり、照射フルエンスを 0.08 J/cm^2 から 0.40 J/cm^2 の範囲内で 0.04 J/cm^2 刻みで変化させながら照射した。図1に試料及びレーザー照射の断面模式図を示す。

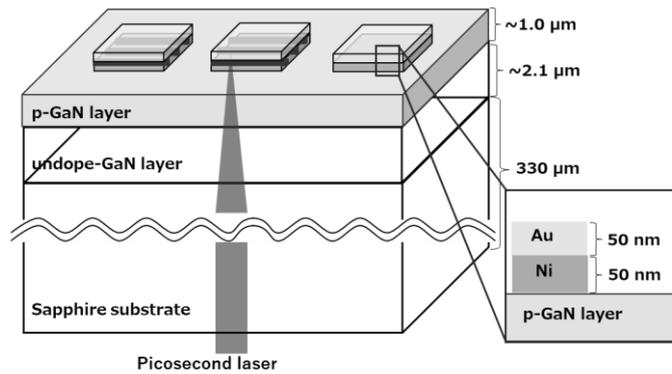


図1 試料及びレーザー照射の断面模式図

評価方法のうちI-V測定には2点プローブ法を用い、電極間距離は $100 \mu\text{m}$ にて測定を行った。測定条件は電圧を $-5 \sim +5 \text{ V}$ 間で 0.5 V ずつ変化させた時の電流値を測定している。I-V測定に加えて、集束イオンビーム(Focused Ion Beam: FIB)を用いて薄片を作製し、透過型電子顕微鏡(Transmission Electron Microscope: TEM)にて断面観察及びエネルギー分散X線分光法(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: EDS)分析を行うことでp-GaN膜と金属の結晶状態を評価した。

3.実験結果

3.1 レーザー未照射電極

図2にレーザー未照射電極のI-V特性とTEM像、EDSマッピング図を示す。TEM像及びEDSマッピング図では、Ni/Auがp-GaN膜の上に蒸着されており、GaN/金属界面

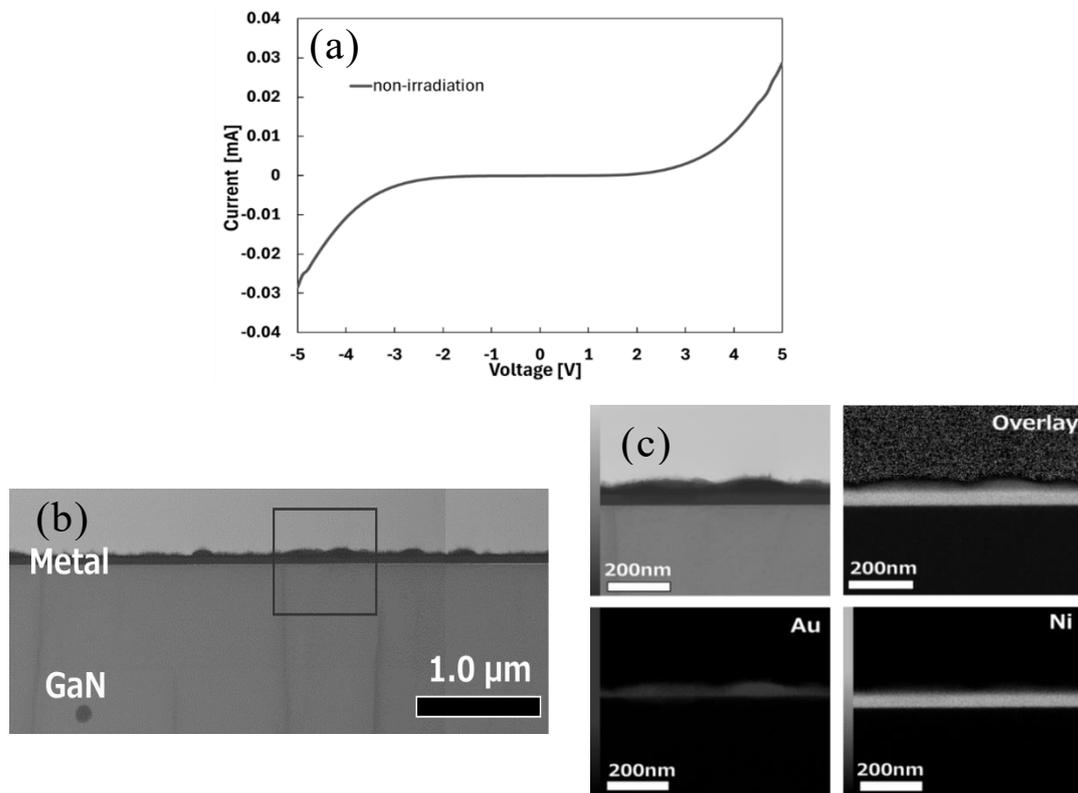


図2 レーザー未照射電極のI-V特性(a)とレーザー未照射電極の断面図(b): STEM-BF像、(c): TEM像枠内のEDSマッピング図

に変化は見られない。また、I-V 測定の結果から、電圧値が 3 V まで電流はほとんど流れず、ショットキー特性であることが確認できた。

3.2 パルス時間幅 0.3ps のレーザー照射による影響

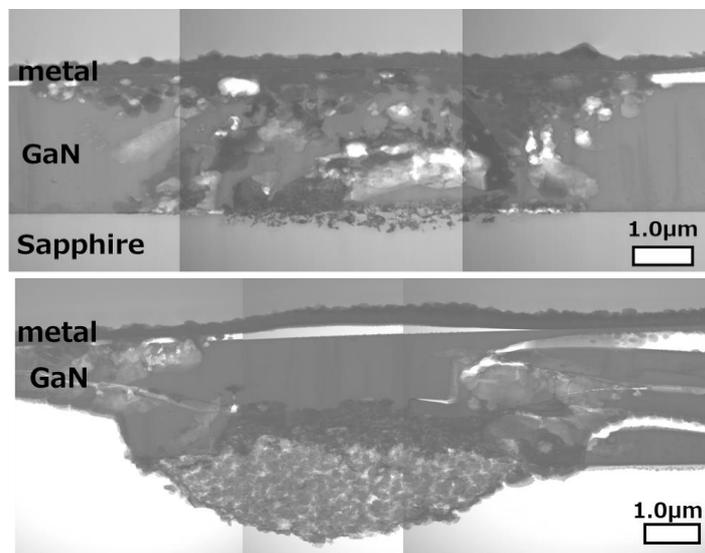


図 3 パルス幅 0.3ps の p-GaN/NiAu 界面における TEM 断面像
(上 : 0.12 J/cm²、下 : 0.24 J/cm²)

図 3 にパルス時間幅 0.3ps の p-GaN/金属界面における断面像を示す。0.12、0.24 J/cm² ともに GaN 膜にボイドや亀裂が発生している様子が確認できた。また、0.24 J/cm² の TEM 像ではサファイア層が GaN 膜との界面で分離しており、金属膜が p-GaN から浮いていることから物理的な衝撃を受けていると考えられる。

図 4 にパルス時間幅 0.3ps のときの I-V 特性を示す。レーザー照射によってショットキー特性から線形に変化したことが分かる。照射フルエンスが大きくなるにつれて電流値が増加していることが確認できた。しかし、図 3 の TEM 像にて、GaN 膜にボイドや亀裂が発生したことで壊れていることを考慮すると、電気伝導の経路には p-GaN 膜を通らず、その下にある undoped-GaN を伝導していた可能性が考えられる。

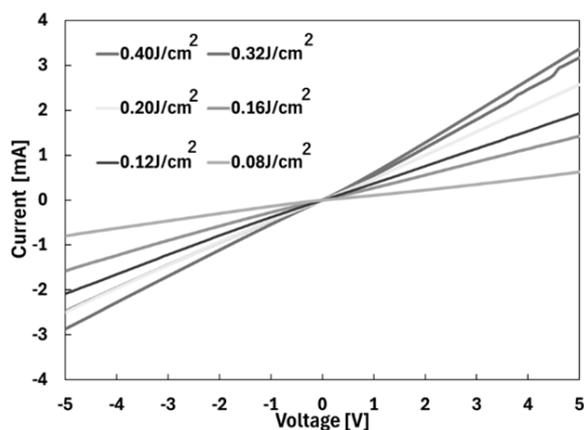


図 4 パルス幅 0.3ps の I-V 特性

3.3 パルス幅 10 ps のレーザー照射影響

図 6 にパルス幅 10 ps の p-GaN/金属界面における TEM 断面像を示す。図 3 で示したパルス幅 0.3ps の TEM 像と比べて、ボイドが発生しているが照射による GaN 膜の結晶

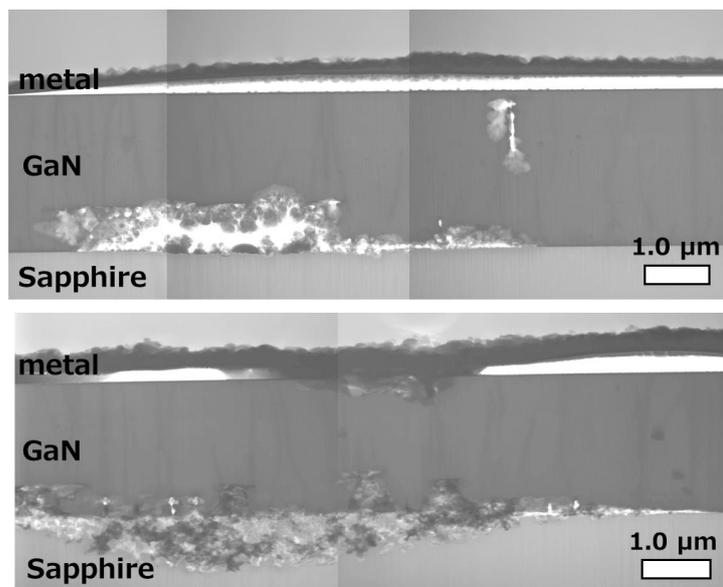


図6 パルス幅 10 ps の p-GaN/金属界面における断面 TEM 像
(上 : 0.12 J/cm²、下 : 0.24 J/cm²)

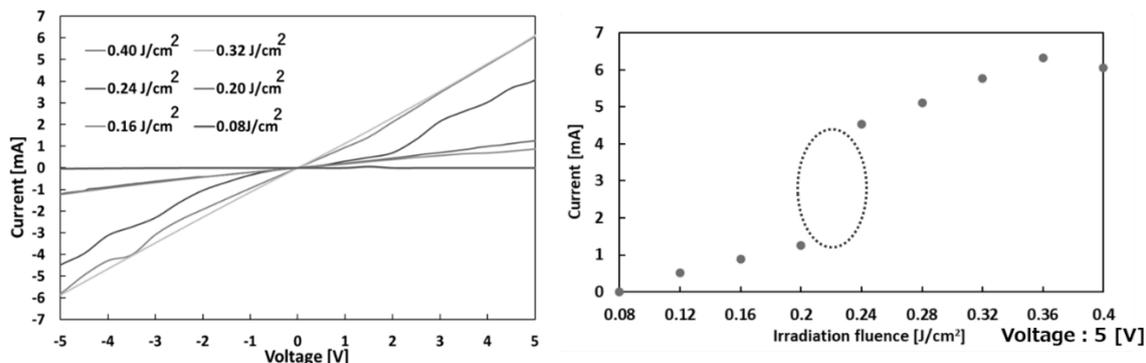


図7 パルス幅 10 ps の I-V 特性
(左 : 各フルエンスの I-V 特性、右 : 電流値のフルエンス比較)

構造の変化は小さく、Ga_N 膜を貫通するほどの影響は発生していないことが分かる。図7の左図にパルス幅 10 ps の各フルエンスにおける I-V 特性、右図に電圧 5 V 時の電流値を照射フルエンスで比較したものを示す。パルス幅 0.3 ps の I-V 特性と同様に、レーザー照射電極では線形性の向上が確認できた。しかし、パルス幅 0.3 ps に比べ、電流値にリニアな増加は見られなかった。右図において、0.20-0.24 J/cm²の間では他の電流間に比べ、電流値に大きな差があることが分かった。したがって、TEM 像において、パルス幅 0.3 ps に比べて 10 ps は Ga_N 層へのダメージが小さく、特定のフルエンスに超短パルスレーザー特有の改質が発生した可能性を考慮すると、0.3 ps よりパルス幅が長い 10 ps に優位性があり、p-Ga_N 膜の結晶性を保ったまま電流電圧特性を向上できる可能性があると考えられる。

3.4 高フルエンスのレーザー照射影響

図8に本実験における最大フルエンス 0.40 J/cm² の TEM 断面像と EDS マッピング図を示す。TEM 像をみると、他の TEM 像と同様にサファイア基板と Ga_N 層界面にてレーザー改質が発生し、照射フルエンス 0.40 J/cm² ではさらに大きく破壊されている様子が確認できた。また、EDS マッピングにおいて、本来ならばガリウムと窒素が検出される位置にアルミニウムと酸素が検出されており、サファイアが Ga_N 層に到達している。

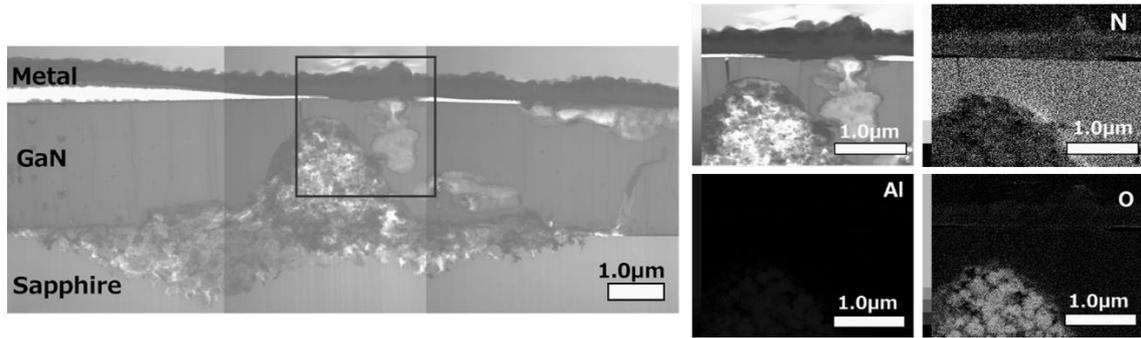


図 8 パルス幅 10ps、照射フルエンス 0.40 J/cm²
左：TEM 断面像、右：赤枠内の EDS マッピング図

これらことから、レーザー照射によって試料が破壊された原因は、サファイア/GaN 界面の欠陥が多く存在する箇所レーザー光が集光したことで多光子吸収が発生し、多光子吸収により超短パルスレーザー改質が起こり、サファイア/GaN 界面が破壊されたと考えられる。

3.5 p-GaN 膜への金属原子拡散

図 9 に、図 6 と同様の TEM 像を EDS マッピング図とともに示す。P-GaN 膜、金属を含む EDS マッピングでは、p-GaN 膜上に蒸着したニッケルが入り込んだ様子が確認できた。したがって、照射パラメータを適切に調整できれば、p-GaN 上オーミック電極を目的としたピコ秒レーザー照射を用いた金属/半導体界面での中間層形成の可能性は十分にあると考えられる。

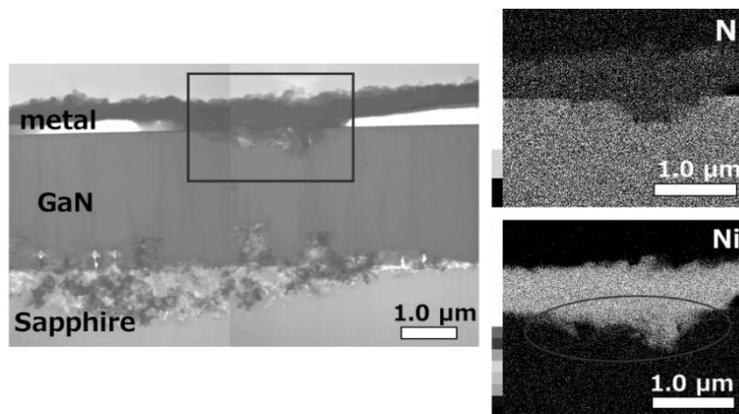


図 9 パルス幅 10ps、照射フルエンス 0.24 J/cm²
左：TEM 断面像、右：赤枠内の EDS マッピング図

4. まとめ

本研究では、p-GaN 上電極に対しピコ秒レーザー照射を行い、その影響を複数の方法にて評価を行った。(0001)サファイア基板に成長させた p-GaN 膜上に Ni/Au を電極として蒸着し、p-GaN/金属界面にピコ秒レーザー照射を行った。I-V 測定の結果、照射フルエンスの増加につれて電流量も増加したが、断面観察ではサファイア基板や GaN 膜の結晶構造ダメージ及び範囲も増加した。パルス幅 0.3 ps では、10 ps に比べて低いフルエンスから GaN 膜への結晶ダメージが大きい様子が確認できた。またパルス幅 0.3ps、照射フルエンス 0.24 J/cm²において Ni が p-GaN 膜に拡散している様子が確認できた。照

射パラメータの適切な調整により、p-GaN 上オーミック電極を目的としたピコ秒レーザー照射を用いた金属/半導体界面での中間層形成の可能性が示唆された。

謝辞

本研究は、天野工業技術研究所の支援を受けて行われた。ここに深く感謝申し上げる。

参考文献

- [1] M.-S. Oh, D.-K. Hwang, J.-H. Lim, C.-G. Kang, S.-J. Park: Appl. Phys. Lett. 89, 042107 (2006).
- [2] B.-S. Zheng, C.-L. Ho, K.-Y. Cheng, C.-L. Liao, M.-C. Wu, K.-C. Hsieh: J. Appl. Phys. 118, 085706 (2015).
- [3] X. Wang, X. Wei, N. Zhang, G. Han, J. Zhao, C. Wang: Materials Science in Semiconductor Processing. 140, 106371 (2022).
- [4] H. Kawakami, Y. Naoi and T. Tomita: AIP Advances 8, 065204 (2018).
- [5] T. Okada, T. Tomita, H. Katayama, Y. Fuchikami, T. Ueki, H. Hisazawa and Y. Tanaka: Applied Physics. A, Materials Science & Processing 125, 690 (2019).