



報道機関 各位

2026 年 8 月 18 日

薄い p 型 GaN との低抵抗接触を実現する形成技術を開発 ～多様な電子・光デバイスへの応用に期待～

【本研究のポイント】

- ・厚さ 10 nm 未満の Mg 膜を用いた低ダメージ熱処理(ソフトアニール^{注1)})により、薄い p 型 GaN^{注2)}の表面を平坦なまま保ちながら、表面近傍に高濃度 Mg アクセプター層を形成した。
- ・プラズマ加工の有無にかかわらず、 $(1\sim3)\times10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}^2$ の低い比接触抵抗^{注3)}を実現し、薄膜 p 型 GaN に対する高い汎用性を示した。
- ・従来の厚膜 Mg アニールで報告されている反応生成相は確認されず、材料品質の維持を確認した。
- ・膜厚 50 nm の薄膜 p 型 GaN でも高い正孔移動度を維持し、p-i-n ダイオードで 800 V 超の高耐圧特性と低漏れ電流を維持した。
- ・実用的なプロセスによって、GaN 電子・光デバイスの高性能化と実用化の加速に貢献。

【研究概要】

名古屋大学未来材料・システム研究所の王 海涛 研究員、王 嘉 特任助教、天野 浩 教授らによる ASPIRE 国際共同研究グループ(※)は、キャップ層を設けることなく、厚さ 10 nm 未満の金属マグネシウム(Mg)膜を用いて、600℃で 5 分間のソフトアニール(低ダメージ熱処理)を行うことで、薄い p 型窒化ガリウム膜(薄膜 p-GaN)の平坦な表面を維持しながら、低抵抗なオーミック接触^{注4)}を形成する技術を開発しました。

p-GaN への低抵抗接触を実現するには、表面近傍に超高濃度 Mg を導入した極めて薄いドーピング層を形成する必要があります。しかし、従来の厚い Mg 膜を用いる方法では、熱処理によって表面が粗くなりやすく、薄膜 p-GaN へ適用することが困難でした。

本研究では、Mg の供給量と熱処理量を大幅に抑えることで、p-GaN 表面を粗化させることなく、表面近傍のわずか数 nm に極浅い超高濃度 Mg ドーピング層を形成しました。高分解能透過電子顕微鏡観察では、従来の厚膜 Mg アニールで報告されてきた反応生成結晶相の形成は認められませんでした。

形成された Mg ドーピング層により、金属/p-GaN 界面のバンド曲がり^{注5)}と空乏層幅^{注5)}が制御され、プラズマ加工による表面損傷の有無にかかわらず、ゼロバイアスにおいて $(1\sim3)\times10^{-4} \Omega\cdot\text{cm}^2$ という極めて低い比接触抵抗が得られました。

さらに、膜厚わずか 50 nm の薄い p-GaN 層にソフトアニールを施した試料においても、高い正孔移動度が維持されました。また、同処理を施した p-i-n ダイオードでは、800 V を超える逆方向耐圧と低い逆方向漏れ電流が維持されました。本成果は、薄い p-GaN 層の表面形状、輸送特性および高耐圧特性を損なうことなく適用できる新たな接触形成技術を示すものです。LED^{注6)}、micro-LED^{注7)}、p-GaN ゲート HEMT^{注8)}、HBT^{注9)}、縦型 GaN パワーデバイス^{注10)}など、薄い p-GaN 層を用いる幅広い電子・光デバイスへの応用が期待されます。

本研究成果は、2026 年 8 月 11 日付で国際学術誌「Applied Physics Letters」に掲載されました。

※ASPIRE 国際共同研究グループ:

JST(科学技術振興機構)が実施する「先端国際共同研究推進事業(ASPIRE)」に採択された研究プロジェクトに参加する国内外の研究者チームのこと

【研究背景と内容】

窒化ガリウム(GaN)は、LEDなどの光デバイスに加え、パワーデバイスや高周波デバイスを支える重要な化合物半導体です。これらのデバイスでは、p型GaN(p-GaN)と金属電極との間に低抵抗なオーミック接触を形成することが、動作電圧の低減や高効率化に不可欠です。しかし、p-GaNに添加されるMgアクセプターはイオン化エネルギーが大きく、室温で得られる正孔濃度が限られるため、金属/p-GaN界面には幅の広い空乏層が形成されやすく、正孔が界面を通過しにくいという課題があります。そのため、薄いp-GaNへの低抵抗接触を実現するには、表面近傍に極浅い超高濃度Mgドーピング層を形成し、界面の空乏層幅を狭める必要があります。一方、近年の電子・光デバイスに用いられる薄いp-GaN層は、電極形成前のプラズマ加工による表面損傷の影響を受けやすく、接触抵抗の増加や電気特性の劣化が問題となります。また、表面近傍への高濃度Mg導入に伴う表面粗化や結晶構造の変化を抑える必要があるため、極浅い超高濃度Mgドーピングと、表面平坦性および結晶品質の維持を両立することは困難でした。

研究グループはこれまで、厚い金属Mg膜をGaN上に形成して熱処理することで、MgがGaN層間に入り込むインターカレーション^{注1)}現象と、それに伴う新たな結晶相の形成が、p-GaNの接触抵抗低減に関与することを明らかにしてきました。しかし、この方法では比較的高温かつ長時間の熱処理が必要であり、GaN表面の著しい粗化や結晶構造の変化が生じるため、膜厚が数十nm程度の薄いp-GaN層への適用には課題がありました。

本研究では、図1に示すように、厚さ8~9nmの金属Mg膜をRFスパッタ法により堆積し、キャップ層を設けず、600℃・5分のソフトアニールを行いました。Mgの供給量と熱処理量を大幅に抑えることで、p-GaN表面の平坦性を維持しながら、表面近傍のわずか数nmに極浅い超高濃度Mgドーピング層を形成しました。

低エネルギー二次イオン質量分析法(SIMS^{注2)})では、Mg濃度が表面近傍で約 $1 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ に達し、深さ約10nm以内で急激に低下する極浅い濃度分布が得られました。また、HAADF-STEM/EDS^{注3)}観察では、熱処理前の超薄膜Mgがp-GaN表面上に連続的に形成されていることを確認しました。高分解能透過電子顕微鏡観察では、従来の厚いMg膜を用いたアニールで観察された新たな結晶相は、今回の観察範囲では認められませんでした。

さらに、X線光電子分光法(XPS^{注2)})では、価電子帯上端の位置が2.2 eVから1.3 eVへ移動しました。この結果は、ソフトアニールによってp-GaN表面近傍のバンド曲がりの変化し、金属/p-GaN界面における正孔注入障壁が低下したことを示しています。形成された極浅い超高濃度Mgドーピング層は、表面近傍のバンド曲がりを低減するとともに空乏層幅を狭め、正孔のトンネル輸送を促進すると考えられます。

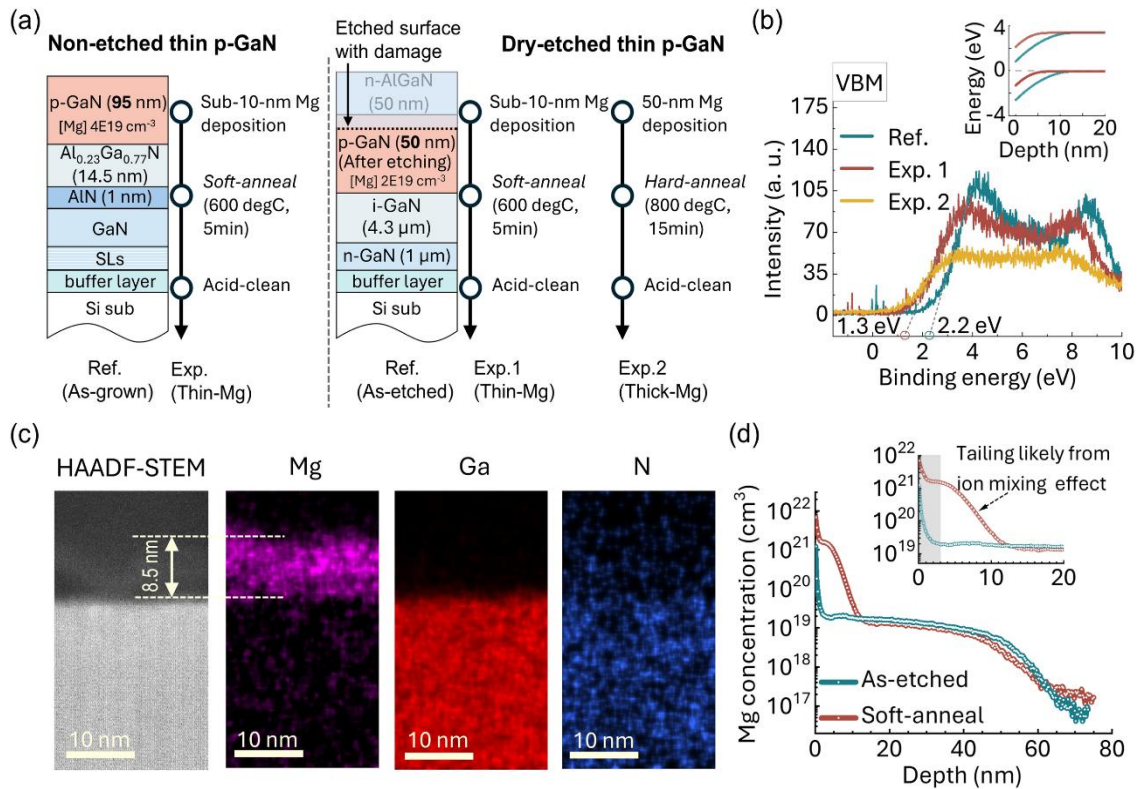


図 1: 超薄膜 Mg アニールによる薄膜 p-GaN 表面改質のプロセスと評価結果。(a) 非エッチング薄膜 p-GaN/AlGaIn ヘテロ構造およびドライエッチング薄膜 p-GaN ホモ接合試料のプロセスフロー。(b) ドライエッチング参照試料(Ref.)および Mg アニール試料[Exp. 1(薄膜 Mg アニール)および Exp. 2(厚膜 Mg アニール)]の XPS 価電子帯スペクトル。挿入図は、Mg アニール前(シアン)および Mg アニール後(赤)の TCAD シミュレーションによる表面近傍のバンドプロファイルを示し、Mg アニールによる表面バンド曲がりの低減を示す。(c) p-GaN 上に堆積した Mg 膜の断面高角度環状暗視野走査透過電子顕微鏡(HAADF-STEM)像およびエネルギー分散型 X 線分光法(EDS)による元素マップ。(d) ソフトアニール試料および as-etched 参照試料の 50 nm 厚 p-GaN 中における Mg 濃度を比較した低エネルギー SIMS プロファイル。挿入図は表面から 20 nm までの拡大図であり、灰色で示した表面近傍約 3 nm の領域では、表面汚染の影響を受けている可能性がある。

図 2 に示す原子間力顕微鏡(AFM)観察では、ドライエッチング後の p-GaN 表面の二乗平均平方根(RMS)粗さが 1.59 nm であったのに対し、超薄膜 Mg によるソフトアニール後も 1.56 nm と、表面平坦性がほぼ維持されました。一方、厚さ 50 nm の Mg 膜を用いた場合には RMS 粗さが 18.22 nm まで増加し、Mg 膜厚の低減が表面粗化の抑制に重要であることが明らかになりました。

図 3 に示すように、プラズマ加工による表面損傷を受けた p-GaN 層と、未加工の p-GaN 層のいずれにおいても、ゼロバイアス近傍で直線的な電流-電圧特性が得られました。ゼロバイアスにおける微分抵抗に基づき、伝送長法(TLM 法)^{注14)}により評価した比接触抵抗は、 $(1 \sim 3) \times 10^{-4} \Omega \cdot \text{cm}^2$ という極めて低い値を示しました。これにより、本接触技術がプラズマ加工損傷の有無にかかわらず適用可能であることが示されました。

さらに、膜厚わずか 50 nm の p-GaN 層に 10 nm 未満の Mg 膜を用いたソフトアニールを施した試料では、図 4 に示すように、高い正孔移動度が維持されました。一方、50 nm 厚の Mg 膜を用いた従来のアニールでは、シート抵抗が 30 倍以上に増加しました。この結果は、厚膜 Mg アニールでは Mg と GaN との反応により p-GaN 層の表面が著しく粗面化するとともに、層の大部分が消費され、電気特性が大きく劣化したことを示唆しています。

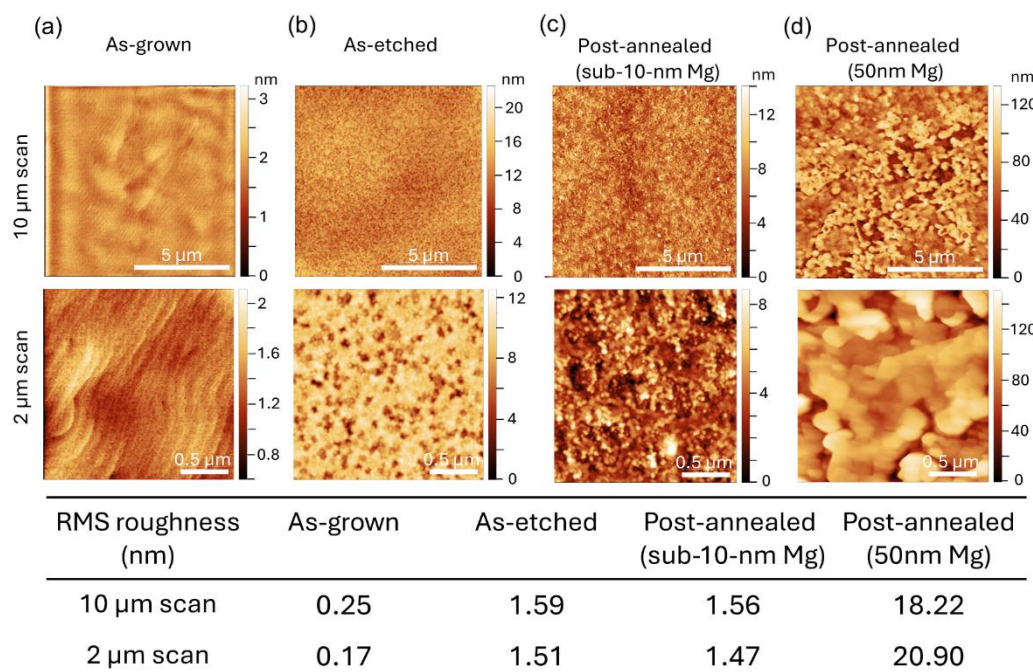


図2 AFMによる表面形態の比較。10 nm 未満の Mg を用いたソフトアニールではエッチング後の粗さがほぼ維持される一方、50 nm Mg 条件では著しい凝集と粗化が生じる。

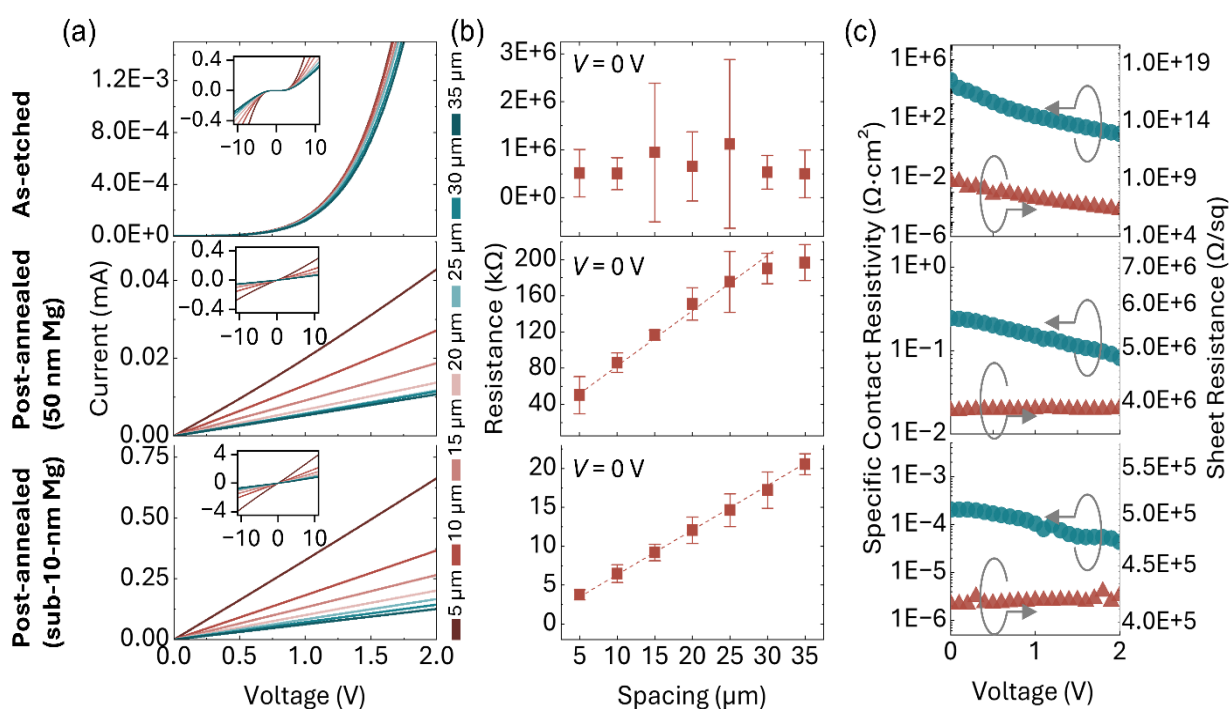


図3 非エッチングおよびエッチング薄膜 p-GaN 試料の TLM 法評価。(a)I-V 特性、(b)電極間隔に対するゼロバイアス全抵抗、(c)電圧掃引モードで得られた 3 種類の試料における比接触抵抗およびシート抵抗の掃引電圧依存性。各結果は、上から順にエッチング試料、厚膜 Mg アニール試料、薄膜 Mg アニール試料を示す。値は、独立した三つの CTLM 構造から得られた平均値±標準偏差として示す。

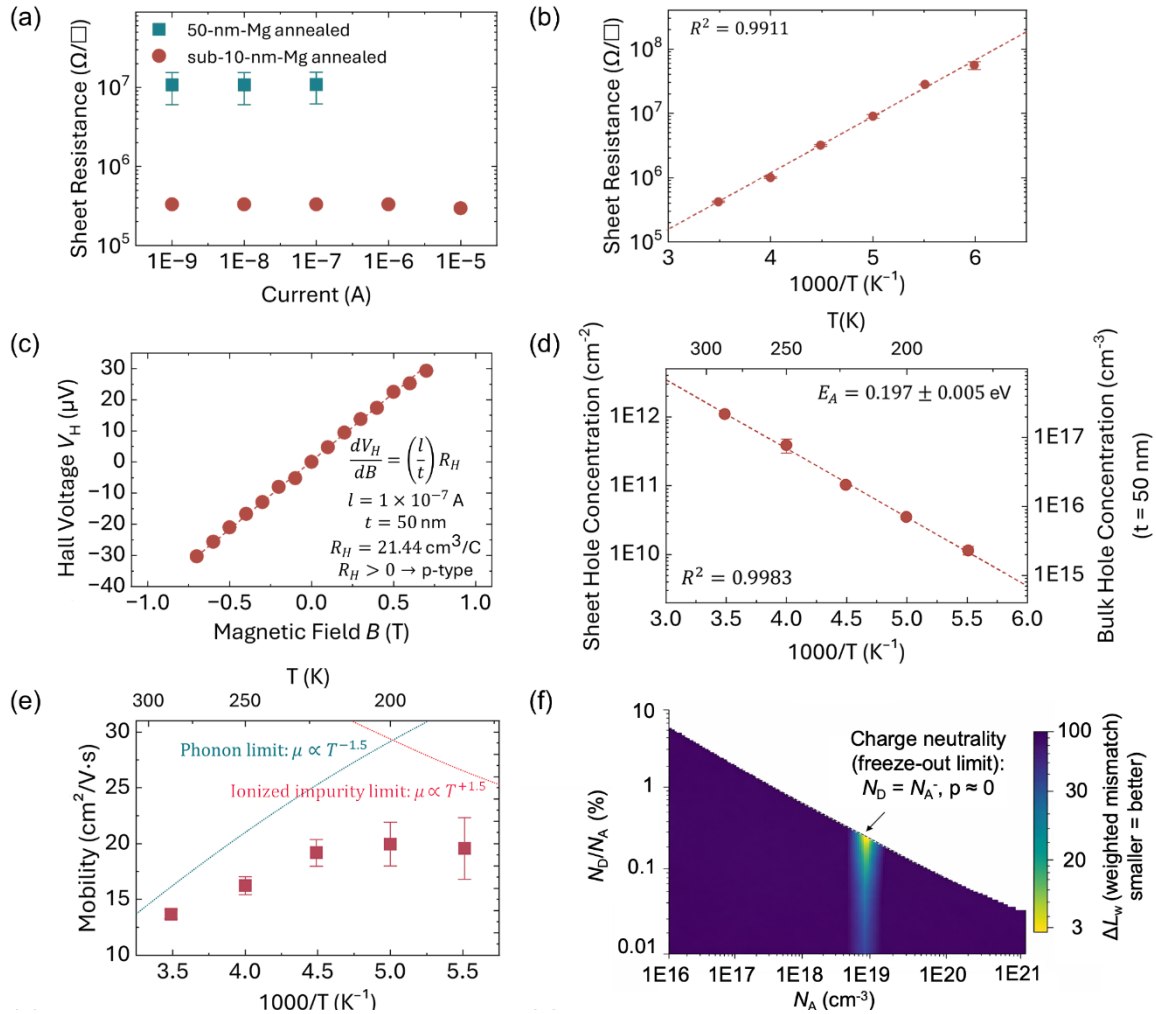


図4 エッチング p-GaN 試料のホール輸送特性。(a) 50 nm Mg アニール試料および 10 nm 未満 Mg アニール試料について、van der Pauw 法により測定したシート抵抗。(b) シート抵抗のアレニウスプロット。(c) 298 K におけるホール電圧の磁場依存性。(d) シート正孔濃度のアレニウスプロット、および(e) 10 nm 未満 Mg アニール試料の正孔移動度の温度依存性。(f) ホール測定データの重み付きパラメータ空間解析。補償比 N_D/N_A は 1% 未満であり、補償が弱いことを示す。

図5 に示す準縦型 p-i-n ダイオードにおいても、ソフトアニールによって順方向の正孔注入特性が大幅に改善されました。一方、逆方向特性では、推定ピーク電界約 2 MV/cm に相当する 800 V を超える耐圧が維持され、逆方向漏れ電流の増加も認められませんでした。

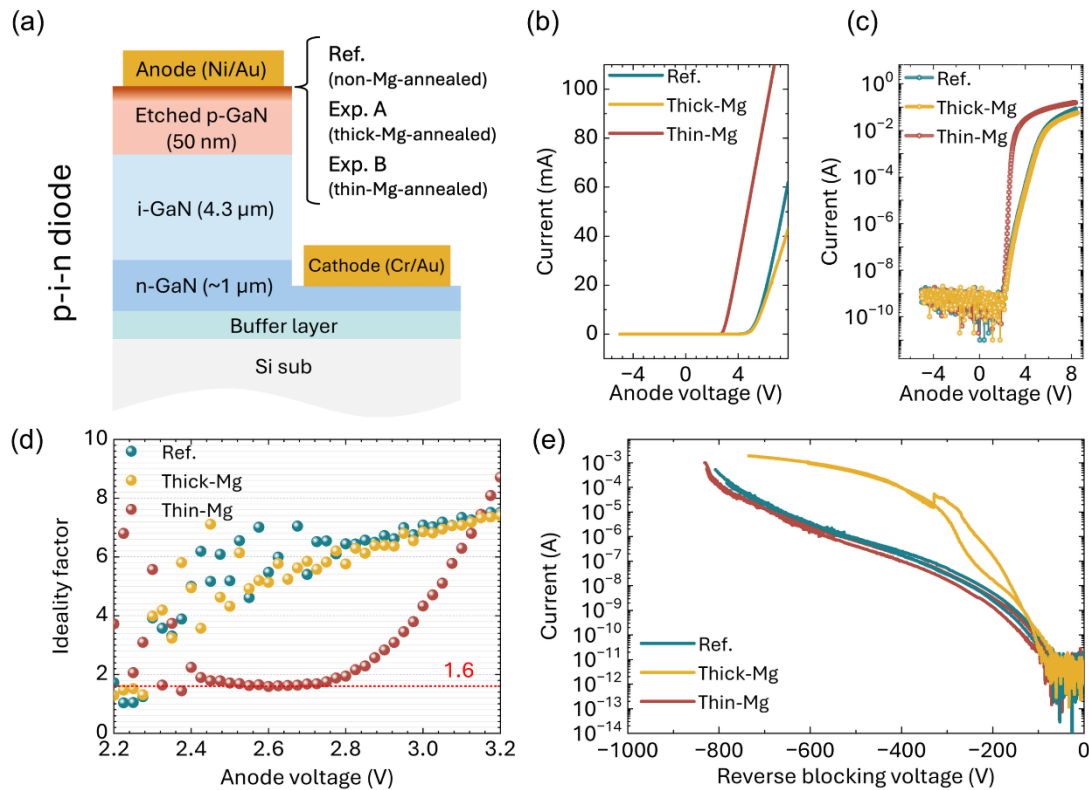


図 5 準縦型 p-i-n ダイオードによるデバイス検証。(a)デバイス構造、(b)(c)順方向 I-V 特性、(d)理想係数、(e)逆方向耐圧特性。超薄膜 Mg 処理は順方向注入を改善しつつ、低リーク・高耐圧を維持した。

これらの結果は、ソフトアニールに伴って GaN 内部に導入され得る不純物や欠陥が、キャリア輸送を著しく阻害する散乱中心や、漏れ電流の増加につながる深い準位として顕在化していないことを示唆しています。すなわち、本手法は、薄い p-GaN 層の表面平坦性、キャリア輸送特性ならびに高耐圧・低漏れ電流特性を維持しながら、低抵抗なオーミック接触を形成できることを実証しました。

【成果の意義】

本研究は、厚い Mg 膜や高温・長時間の熱処理に依存することなく、薄い p-GaN の表面平坦性を維持しながら、低抵抗なオーミック接触を形成できる実用的なプロセスを示しました。特に、キャップ層を必要とせず、10 nm 未満の Mg 膜と 600℃・5 分の短時間熱処理のみで実施できるため、工程が簡便であり、既存の半導体製造プロセスにも導入しやすいという特長があります。

また、プラズマ加工による表面損傷の有無にかかわらず低い接触抵抗が得られることに加え、薄い p-GaN 層の表面形状、正孔輸送特性、高耐圧・低漏れ電流特性が維持されることから、本技術は多様なデバイス構造や製造工程に広く適用できる可能性があります。表面粗化を抑えつつ、低温・短時間で安定した接触を形成できることは、デバイスの高性能化だけでなく、プロセスの再現性向上や製造負荷の低減にもつながり、実用化および量産化を加速すると期待されます。

本技術は、p-GaN ゲート HEMT、micro-LED、HBT、縦型 GaN パワーデバイスなど、薄い p-GaN 層を用いる多様な電子・光デバイスへの展開が期待されます。さらに、

本研究で示された「金属 Mg によって表面電子状態が制御された GaN 表面」は、低抵抗接触の形成にとどまらず、GaN 表面の欠陥やバンド構造を制御する新たな表面工学の基盤となる可能性があります。

本研究は、科学技術振興機構(JST)先端国際共同研究推進事業(ASPIRE)「金属マグネシウム層と GaN 層の超格子構造(MiGs)の物性とデバイス応用およびウルトラワイドバンドギャップ半導体材料(AlN、Ga₂O₃ 等)への超高濃度ドーピング」(研究代表者:天野浩、課題番号:JPMJAP2311)の支援を受けて実施されました。

特に、JST の ASPIRE プログラムの支援のもと、米国コーネル大学の Debdeep Jena 教授、Huili Grace Xing 教授、Joseph E. Dill 氏、ならびに米国マサチューセッツ工科大学(MIT)の Joshua Jaehyung Park 氏が本研究グループを訪問し、密接な議論と共同実験を行いました。これらの交流を通じて共同研究が大きく進展し、本研究成果の創出につながりました。

【用語説明】

注 1)ソフトアニール:

従来よりも低い温度かつ短い時間で行う、熱負荷を抑えた低ダメージ熱処理。本研究では、厚さ 10 nm 未満の Mg 膜に対して 600℃で5分間のアニールを行い、p-GaN 表面の粗化を抑えながら、表面近傍に極浅い Mg 高濃度領域を形成する。

注 2)GaN(窒化ガリウム):

ガリウムと窒素からなるワイドバンドギャップ半導体。LED、高周波デバイス、パワーデバイスなどに利用される。

注 3)比接触抵抗:

金属／半導体界面の接触性能を表す指標。値が小さいほど、界面における電流の流れやすさが高いことを示す。

注 4)オーミック接触:

金属と半導体の界面で電流が双方向に流れ、電圧と電流がほぼ比例する低抵抗接触。

注 5)空乏層幅:

半導体の金属との接触面付近に形成される、電流を運ぶ正孔や電子が少ない領域の厚さ。空乏層が薄いほど、正孔が界面を通過しやすくなり、接触抵抗が低下する。

注 6)LED(発光ダイオード):

電流を流すと光を発する半導体デバイス。照明、ディスプレイ、通信などに広く利用される。

注 7)micro-LED(マイクロ発光ダイオード):

一辺が数十 μm 以下の微小な LED を画素として用いる表示デバイス。高輝度、低消費電力、高速応答などの特長を持つ。

注 8)p-GaN ゲート HEMT:

p 型 GaN をゲート層に用いた高電子移動度トランジスタ。ゲート電圧によって GaN/AlGaN 界面の電子を制御し、電源回路などに適したノーマリーオフ動作を実現する。

注 9)HBT(ヘテロ接合バイポーラトランジスタ):

異なる半導体材料の接合を利用して電流を増幅するトランジスタ。高速・高周波・高出力動作に適しており、薄い p 型 GaN 層がベース層として用いられる。

注 10)縦型 GaN パワーデバイス:

電流を半導体基板の表面から裏面方向へ流す構造の GaN デバイス。高い耐圧と大電流動作を両立しやすく、電力変換装置への応用が期待される。

注 11)インターカレーション:

外来原子が GaN 結晶中の特定の原子面間に規則的に入り込み、原子層状の構造を形成する現象。

注 12)SIMS/XPS:

SIMS は試料中の元素濃度の深さ方向分布を、XPS は表面の化学状態や価電子帯位置を評価する分析法。

注 13)HAADF-STEM/EDS:

HAADF-STEMは原子スケールの断面構造を、EDSは試料中の元素分布を評価する電子顕微鏡・元素分析法。

注 14)TLM 法:

間隔の異なる複数の電極間の抵抗を測定し、半導体のシート抵抗および金属／半導体界面の接触抵抗を求める評価法。TLMは Transfer Length Method の略。本研究では、同心円状の電極を用いる CTLM 法を使用。

【発表者・研究者等情報】

名古屋大学

Haitao Wang 王 海涛(ワン・ハイトオ)研究員

Shumeng Yan (エン・シュモウ)研究員

Zhiyu Xu (ジョ・ヂューユー)研究員(米国コーネル大学客員教員)

Yingying Lin (リン・インイン)研究員

Jia Wang 王 嘉(ワン・ジャア)YLC 特任助教

Hiroshi Amano 天野 浩 特別教授

米国コーネル大学

Joseph E. Dill (ジョセフ・E・ディル)博士後期課程学生

Debdeep Jena (デブディープ・ジェナ)教授

Huili Grace Xing (フイリ・グレース・シン)教授

米国マサチューセッツ工科大学(MIT)

Joshua Jaehyung Park (ジョシュア・ジェヒョン・パーク)博士後期課程学生

Tomás Palacios (トマス・パラシオス)教授

【論文情報】

雑誌名:Applied Physics Letters

論文タイトル:Enabling thin p-GaN Ohmic contacts through ultrathin magnesium deposition and brief thermal annealing

著者:Haitao Wang, Shumeng Yan, Zhiyu Xu, Yingying Lin, Peirong Yu, Joshua Jaehyung Park, Joseph E. Dill, Hei Wong, Qingyuan Han, Xigen Li, Qian Sun, Tomás Palacios, Debdeep Jena, Huili Grace Xing, Jia Wang, Hiroshi Amano

DOI:10.1063/5.0339815

URL:<https://doi.org/10.1063/5.0339815>



東海国立大学機構は、岐阜大学と名古屋大学を運営する国立大学法人です。
国際的な競争力向上と地域創生への貢献を両輪とした発展を目指します。
東海国立大学機構 HP <https://www.thers.ac.jp/>

