

“酸化ガリウム(Ga₂O₃)MOSトランジスタ”を世界で初めて実現！

～日本発、“革新的次世代半導体パワーデバイス”の実用化に道～

独立行政法人情報通信研究機構(理事長：坂内 正夫)は、株式会社タムラ製作所(代表取締役社長：田村 直樹)、株式会社光波(代表取締役社長：中島 康裕)と共同で、**新しいワイドギャップ半導体^{*1}材料である酸化ガリウム(Ga₂O₃)^{*2}を用いた実用性に優れたMOSトランジスタ^{*3}の開発に世界に先駆けて成功しました。**

Ga₂O₃は、そのワイドギャップに代表される材料物性から、高耐圧・低損失なパワーデバイス^{*4}用途の新しい半導体材料として非常に有望です。また、酸化ガリウムは、シリコンカーバイド(SiC)^{*5}、窒化ガリウム(GaN)^{*6}といった既存のワイドギャップ半導体では不可能な融液成長法^{*7}による単結晶基板の作製が可能であることから、基板サイズの拡大や、製造に必要なエネルギーやコストの大幅な削減が見込まれます。今回開発したGa₂O₃MOSトランジスタは、そのまま実用可能といえる構造、特性を有します。そのため、**現代の省エネルギー問題に直接貢献することができる新しい半導体デバイス研究開発分野における大きなブレイクスルーであると同時に、近い将来の半導体産業の更なる発展につながることを期待させる成果です。**

なお、本研究成果の詳細は、2013年6月24日(月)から米国ノートルダム大学で開催される半導体電子デバイスに関する国際会議「Device Research Conference (DRC2013)」にて、発表(レートニュース)を予定しています。

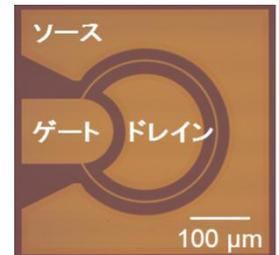
本研究の一部は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託事業である、平成23～25年度「省エネルギー革新技术開発事業 挑戦研究(事前研究一体型)/課題名：超高耐圧酸化ガリウムパワーデバイスの研究開発」により実施しました。

【背景】

現在、世界的な課題として革新的な省電力技術の開発が求められています。このような社会事情から、現状のシリコン(Si)よりも更に高耐圧・低損失なパワーデバイスの実現が期待できるSiC、GaNといったワイドギャップ半導体材料が注目され、日本はもとより米国、欧州といった諸外国においても活発に研究開発が進められています。Ga₂O₃は、SiC、GaNよりも更に大きなバンドギャップ^{*8}に代表されるその物性から、パワーデバイスに応用した場合、より一層の高耐圧・低損失なデバイス特性が期待できます。また、融液成長法により簡便に単結晶基板が作製可能であるという、実際に基板を作製する上で非常に有益な特徴もあります。しかし、これらの高いポテンシャルにもかかわらず、未開拓の新半導体材料です。

【今回の成果】

今回、新たにGa₂O₃に合わせて開発したデバイスプロセス技術を駆使して、最も実用に適した電界効果トランジスタの一種であるMOSトランジスタを作製し、その動作実証に世界で初めて成功しました。今回開発した新技術の中での最大のポイントは、イオン注入及びゲート絶縁膜に関する技術です。その結果、デバイス特性は約2年前に報告したトランジスタ(MESFET^{*9})と比べて大幅に向上しました。具体的には、非常にシンプルなトランジスタ構造であるにもかかわらず、(1) 高いオン電流(39 mA/mm)、(2) 高いオフ状態耐圧(370 V以上)、(3) 非常に小さいリーク電流(測定限界数 pA/mm以下)、(4) 高い電流オン/オフ比(10桁以上)など、パワーデバイスとして実用上要求される性能を十分に満たす特性が得られております。そのため、今回新たに開発に成功したGa₂O₃MOSトランジスタを、実際のパワーデバイス機器に応用した場合、既存の半導体トランジスタと比較して、高い耐圧とスイッチング動作時の大幅な損失低減が期待されます。



Ga₂O₃ MOSFET
顕微鏡写真

【今後の展望】

今回、新ワイドギャップ半導体材料であるGa₂O₃を用いたMOSトランジスタの開発に成功したことにより、この新しい半導体材料の利用価値は大幅に膨らみ、また次世代高性能パワーデバイスの近い将来の実用化に対して道筋をつけることができました。今後、その優れた物性を生かしたGa₂O₃デバイスに関する研究開発が、世界的に急速かつ本格的に広がると予想されます。高性能Ga₂O₃パワーデバイスは、グローバルな課題である省エネ問題に対して直接貢献するとともに、日本発の新たな半導体産業の創出という経済面での貢献も併せて期待されます。近い将来、送配電、鉄道といった高耐圧から、電気、ハイブリッド自動車応用などの中耐圧、更にはエアコン、冷蔵庫といった家電機器などで用いられる低耐圧分野も含めた非常に幅広い領域での応用が見込まれます。

< 本件に関する 問い合わせ先 >

独立行政法人情報通信研究機構
未来 ICT 研究所
東脇 正高
Tel: 042-327-6092
E-mail: mhigashi@nict.go.jp

< 広報 問い合わせ先 >

独立行政法人情報通信研究機構 広報部
廣田 幸子
Tel: 042-327-6923 E-mail: publicity@nict.go.jp
株式会社タムラ製作所 コアテクノロジー本部 コーポレート情報統括部
竹内 夏美
Tel: 03-3978-2012 E-mail: natsumi.takeuchi@tamura-ss.co.jp

<用語 解説>

*1 ワイドギャップ半導体

半導体の材料特性を決める最も基本的なパラメーターである「バンドギャップ」が大きい半導体の総称。バンドギャップに関しては、下記*8を参照。代表的なワイドギャップ半導体としては、シリコンカーバイド(SiC)、窒化ガリウム(GaN)、酸化亜鉛(ZnO)などが挙げられる。電子デバイスに応用する場合、高耐圧、高出力、低損失などのパワーデバイスに適した特性を示す。そのため、現在シリコン(Si)に替わる次世代パワーデバイス材料として盛んに研究開発が進められている。

*2 酸化ガリウム(Ga₂O₃)

酸化ガリウムは、ガリウム(Ga)と酸素(O)の化学量論比 2:3 の化合物で、化学式 Ga₂O₃ で表される半導体。結晶構造として、 α 、 β 、 γ 、 δ 、 ϵ の 5 つの異なる形が存在することが知られている。それらの中でも、最も安定な構造である β -Ga₂O₃のバンドギャップは、室温で 4.8-4.9 eV(電子ボルト)と非常に大きな値である。

*3 MOSトランジスタ (MOSFET:モスフェット)

MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor)は、電界効果トランジスタの一種。ゲート金属と半導体の間に酸化絶縁膜を挟んだ構造を持つ。この酸化絶縁膜により、リーク電流を大幅に減少させることができ、その結果、トランジスタの高効率化につながる。シリコン (Si) MOSFET は、現在様々なエレクトロニクス用途で最も多く用いられている。

*4 パワーデバイス

パワーデバイスは、電力機器向けの半導体素子の総称。その構造は電力制御用に最適化されており、パワーエレクトロニクスの中心となる電子部品。家庭用電化製品やコンピュータなどに使われている半導体素子に比べて、高電圧、大電流を扱えることが特徴となる。

*5 シリコンカーバイド(SiC)

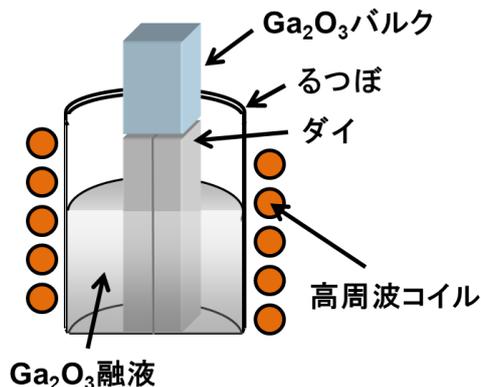
シリコンカーバイドは、ケイ素(Si)と炭素(C)の 1:1 の化合物で、化学式 SiC で表される半導体。バンドギャップは室温で 3.3 eV(電子ボルト)である。その大きなバンドギャップから、現在次世代パワーデバイス材料として活発に研究開発が進められている。

*6 窒化ガリウム(GaN)

窒化ガリウムは、ガリウム(Ga)と窒素(N)の 1:1 の化合物で、化学式 GaN で表される半導体。そのバンドギャップは室温で 3.4 eV(電子ボルト)と大きい。現在、主に、青色発光ダイオード、レーザーダイオード等の発光デバイスの材料として用いられている。また、電子デバイスとしても、昨今 SiC と同様に、パワーデバイス用途での研究開発が活発に進められている。

*7 融液成長法

溶融した材料を用いた単結晶成長方法。半導体基板作製に適用した場合の特徴として、(1) 単結晶基板の大型化が容易、(2) 作製時に高温・高圧といった条件が不要なため低エネルギー・低コストでの作製が可能、(3) 原料効率が高い等が挙げられる。これらの特徴から、実際の生産に非常に適した方法である。



単結晶酸化ガリウムバルクの融液成長法の一例

*8 バンドギャップ

半導体、絶縁体において、電子が占有する最も高いエネルギーバンドである価電子帯の頂上と、最も低い空のバンドに相当する伝導帯の底までのエネルギー差。材料物性を決める最も基本的なパラメーターの一つ。

*9 MESFET(メスフェット)

MESFET (Metal-Semiconductor Field Effect Transistor)は、電界効果トランジスタの一種。ショットキー接合性の金属をゲートとして半導体上に形成した構造を持つ。一般に、MESFET は、化合物半導体(GaAs、InP、SiC 等)で利用され、Si MOSFET と比較して高性能であることから、各種の高周波素子に利用されている。

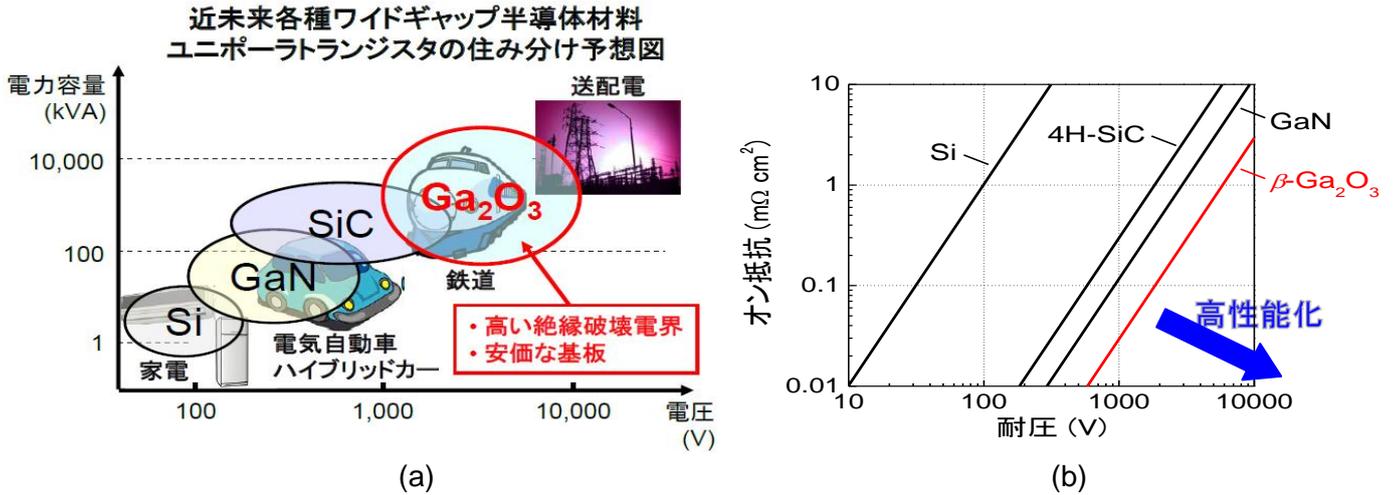


図 1: (a) 近未来における各種半導体トランジスタの住み分け
(b) パワーデバイスに用いられる代表的な半導体と酸化ガリウム(Ga₂O₃)のオン抵抗と耐圧の関係

図 1(a)は、代表的な半導体及び酸化ガリウム(Ga₂O₃)の、主に物性値から見積もられた将来的な適用分野の住み分け予想図です。Ga₂O₃ は、その物性からシリコンカーバイド(SiC)、窒化ガリウム(GaN)より、更に高耐圧、大電力分野で最初にその利用が進むと予想されます。その後、Ga₂O₃ デバイスの普及に伴い、基板作製が簡便かつ安価で可能であることによるコスト面での有利さを活かして、さらに、SiC、GaN の分野へも利用が広がっていくと考えられます。

Ga₂O₃ パワーデバイスの性能を決める 2 大パラメーターである「耐圧」と「オン抵抗」は、常にトレードオフの関係にあります。パワーデバイスには高耐圧・低損失が求められますが、高耐圧を得ようとするともオン抵抗が高くなり、発熱量が増加し損失が大きくなります。そのため、図 1(b)に描く各々の材料の性能限界を示す直線に関しては、グラフ上、右下へ行くほどパワーデバイス材料として優れていることを表しています。同じ耐圧特性になるように設計した同様のトランジスタ構造において比較した場合、Ga₂O₃トランジスタは、現在主流のシリコン(Si)トランジスタと比較して損失(オン抵抗)が 3,000 分の 1 以下、また代表的なワイドギャップ半導体 SiC と比較しても 1/10 程度に抑えることが可能と言えます。損失の低減量は、そのまま省エネルギーに相当します。このように、Ga₂O₃ は、Si はもとより代表的なワイドギャップ半導体である GaN、SiC と比較しても、パワーデバイス材料として更に優れた特性を有していることが分かります。

図 2 は、融液成長法により作製した単結晶β-Ga₂O₃ 基板を示しています。融液成長法は、(1) 基板の大型化が容易、(2) 作製時に高温、高圧といった条件が必要でないことから、低エネルギー、低コストでの作製が可能、(3) 原料効率が高い等の特徴を持つことから、実際の生産に非常に適した方法です。単結晶 Ga₂O₃ 基板が、他のワイドギャップ半導体材料(SiC、GaN)では不可能な融液成長法で作製可能であることは、実用面・産業面での大きなアドバンテージとなります。特に、Ga₂O₃ 基板の価格面でのアドバンテージは大きく、少なく見積もっても将来的には SiC や GaN 基板の 1/10~1/100 以下の価格になると考えられます。なお、パワーデバイスでは、一般的に基板のコストが最終的な製品の製造に要するコスト全体に占める割合が大きく、およそ 6 割程度となります。

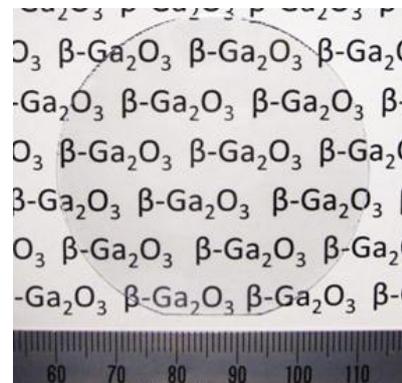


図 2: 融液成長法により作製した直径 2 インチ単結晶β-Ga₂O₃ 基板

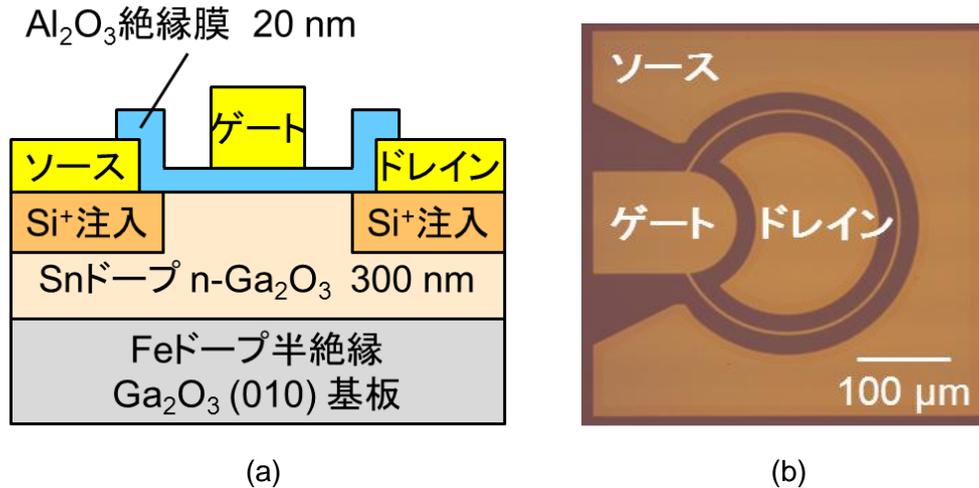


図 3: 作製した Ga_2O_3 MOSFET の (a) 断面模式図、(b) 光学顕微鏡写真

図 3 に示す、実用性に富むトランジスタ構造である MOSFET を、今回新たに開発した(1) Si イオン注入による選択ドーピング技術、(2) 絶縁膜堆積技術 (Al_2O_3 絶縁膜) を用いて作製しました。

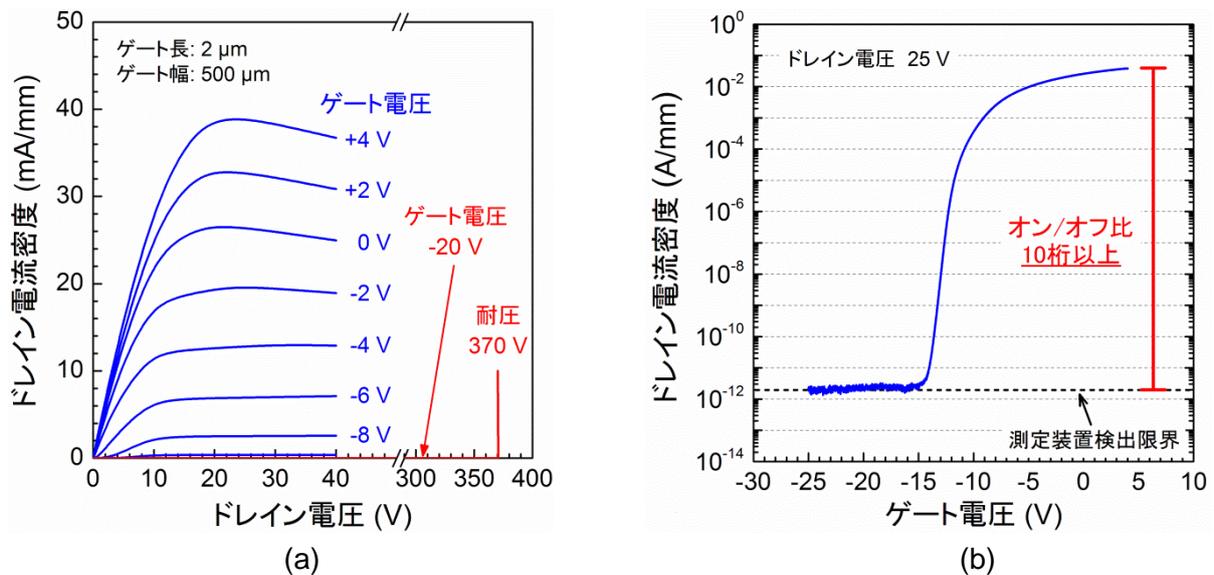


図 4: Ga_2O_3 MOSFET の (a) 電流－電圧特性、(b) トランスファー特性(ドレイン電圧 25 V)

図 4(a)の電流、電圧特性に示すように、ゲート電圧によるドレイン電流量及びオン・オフ制御が完璧になされています。また、ドレイン電流をオフにした状態で、耐圧 370 V が得られています。これは、耐圧向上対策を施していない非常に単純な FET 構造であることも考慮した場合、非常に高い値と言えます。

また、図 4(b)に示すように、トランジスタオフ時のドレインリーク電流が非常に小さいことも特徴です。このデバイスでは、リーク電流が測定装置の検出限界以下となっています。この結果、トランジスタ動作時のオン／オフ比も 10 桁以上と非常に高い値が得られています。オフ時のリーク電流が小さいことは、そのまま電力損失の低減につながります。単純なトランジスタ構造であるにもかかわらず、上述のようにパワーデバイスとして要求される重要な特性を既に満たすレベルにあります。 Ga_2O_3 の材料特性及び単結晶基板を用いたことによる結晶品質の高さと、今回新たに開発したプロセス技術のコンビネーションが、 Ga_2O_3 MOSFET の優れたデバイス特性につながりました。