

GaN-on-Si技術

GaNをはじめとした窒化物半導体は、高出力電子デバイス用半導体材料として期待されています。窒化物半導体はその物性上の特性から、半導体材料として広く大規模集積回路 (LSI: Large-Scale Integrated circuit) 等に使用されているシリコン (Si) をはるかに凌駕するデバイスを実現する可能性を秘めています。本稿では、特にコスト面からもメリットが大きいと期待される、GaNを安価で量産性に優れたSi基板上に形成する技術 (GaN-on-Si技術) について、結晶成長技術を中心に紹介します。

わたなべ のりゆき
渡邊 則之

NTTフォトニクス研究所

窒化物半導体

窒化物半導体は、窒素を含む2種類以上の元素から構成されている化合物半導体の1つです。代表的なものに窒化ガリウム (GaN: Gallium Nitride) や窒化アルミニウム (AlN: Aluminum Nitride) があります。これらの半導体は、短波長の光に相当するバンドギャップを実現でき、また化学的に安定で、機械的性質にも優れ、高温環境下でも破壊されにくいという特徴があります。最近、白熱電球や蛍光灯に代わって、発光ダイオード (LED: Light Emitting Diode) 照明が広く使われていますが、このLEDの中にも窒化物半導体が使われています。実は皆さんの身近に広くいきわたっている半導体なのです。

なぜ、窒化物半導体が注目されるのか

窒化物半導体は、前述したようにLED照明に用いることができるのが大きな理由の1つです。LED照明による省エネ効果が非常に大きいことはよく知られています。これ以外に、実はもう1つ大きな省エネ効果が期待できる分野があります。それは、家電製品等に電力を供給する部分に使われて

いる回路への応用です。例えば、冷蔵庫やエアコンなどを動かすためのモーター・コンプレッサ等の電動機を駆動する回路などです。日本の家電製品のほとんどはインバータと呼ばれる回路が採用されています。インバータはトランジスタのスイッチング機能を用いることにより任意の周波数の交流信号を生み出す回路で、単純にオン・オフすることで出力を調整するタイプの回路よりも消費電力を少なくできます。日

本ではほとんどの冷蔵庫・エアコンにインバータが用いられていますが、欧米や発展途上国ではインバータそのものがほとんど普及していません。世界中のノンインバータの家電製品をインバータ製品に置き換えることによる省エネ効果は極めて大きく (図1)、冷蔵庫やエアコンのインバータ化だけで火力発電所8基分にも相当する電力の削減が可能、との試算もあります。インバータにはシリコン (Si) でつくら

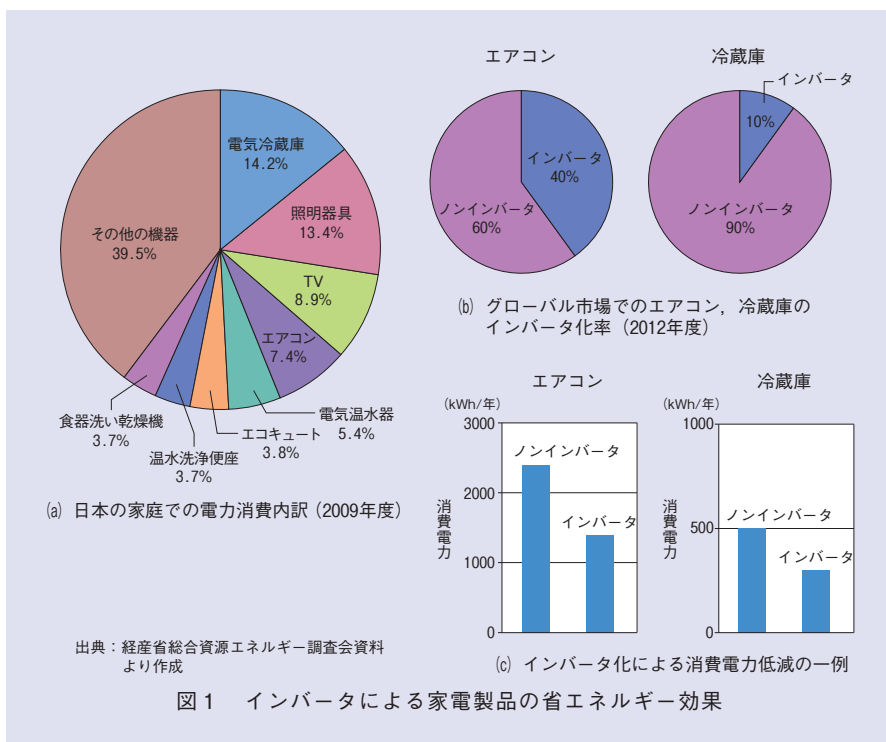


図1 インバータによる家電製品の省エネルギー効果

れたトランジスタが使われていますが、これを窒化物半導体のトランジスタに変えることによって消費電力をさらに2分の1～3分の1程度削減できるとも見積られています。こういった意味で、窒化物半導体を用いたトランジスタは省エネの切り札として期待されているのです。

窒化物半導体トランジスタによる省電力化

次に、窒化物半導体トランジスタを用いることで省電力化が可能となる仕組みについてみてみましょう。インバータにおけるトランジスタによる電力損失には、大きく分けて2つの項があります。1つは導通損失で、トランジスタに電流が流れている際の電力損失に相当します。導通損失は導通時の抵抗（オン抵抗）が高いほど大きくなります。もう1つはスイッチング損失で、トランジスタがスイッチングする際に生じる電力損失です（図2(a)）。

■導通損失

インバータには絶縁ゲートトランジスタ（IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor）と呼ばれるトランジスタが使われています。IGBTにはゲート・エミッタ・コレクタという3つの端子があり、基板表面のエミッタから注入され基板裏面のコレクタへ電子が流れる状態（導通状態）と流れない状態（非導通状態）をゲートに印加する電圧で切り替えます。IGBTでは高い電圧にも耐えられるように電子の流れる領域の電子密度は比較的少なくなっているため、オン抵抗が高くなります。また、IGBTはその動作原理上、エミッタ・コレクタ間に電圧を印加しても、ある電圧（オフセット電圧）以下では

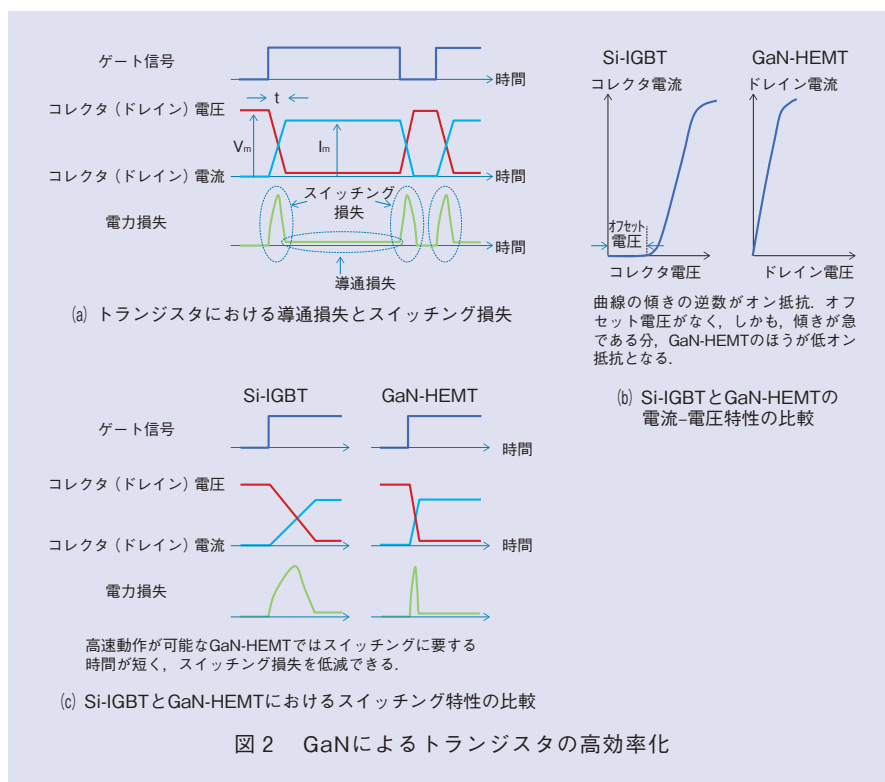


図2 GaNによるトランジスタの高効率化

電流が流れません。これもオン抵抗を高くしている要因です。

一方、窒化物半導体では、高電子移動度トランジスタ（HEMT: High Electron Mobility Transistor）と呼ばれるトランジスタが主流です。2次元電子ガスという非常に高密度の電子層があり、その名が示すとおり、この2次元電子ガスに含まれる電子の移動度も非常に高いという特徴を有したトランジスタです。HEMTにはゲート・ソース・ドレインという3つの端子があり、いずれも基板の表面側にあります。ソースから注入された電子は2次元電子ガス層を流れてドレインに至ります。この電子の流れをゲート電圧で制御することで導通状態と非導通状態を切り替えます。窒化物半導体はSiよりも高い破壊電界強度を持っているため、高い電子密度であるにもかかわらず高い電圧に耐えられます。また、

IGBTのようなオフセット電圧がありません。したがってオン抵抗がSiのIGBTよりも格段に小さくなります。結果として導通損失は2分の1以下に低減することが可能です（図2(b)）。

■スイッチング損失

スイッチング損失とは、ゲート電圧によってトランジスタを非導通状態から導通状態、あるいは導通状態から非導通状態にスイッチさせた際に生じる電力損失です。非導通状態から導通状態になるようにゲート電圧が切り替わると、コレクタ電流もしくはドレイン電流は0→ I_m へ変化し、エミッタ・コレクタ間電圧またはソース・ドレイン間電圧は V_m →0と変化します。電流が0→ I_m 、電圧が V_m →0へ切り替わる時間が0であれば、スイッチング損失はありませんが、実際のトランジスタでは有限の時間が必要で、切り替わるために必要な時間を t とすると、

近似的には $V_m \times I_m \times t$ に比例した大きさのスイッチング損失が生じます。したがって、切り替わる時間が短いほどスイッチング損失は小さくなります。Si-IGBTに比べてGaN-HEMTはおよそ10倍程度的高速動作が可能で、その分切り替わる時間も短くなりスイッチング損失が小さくなるのです(図2(c))。

GaN-on-Si技術

GaN-HEMTはどのようにつくのでしょうか。Siトランジスタは膜形成、拡散・イオン注入、電極形成などのプロセス技術を用いて直接Si基板の上にトランジスタをつくり込んでい

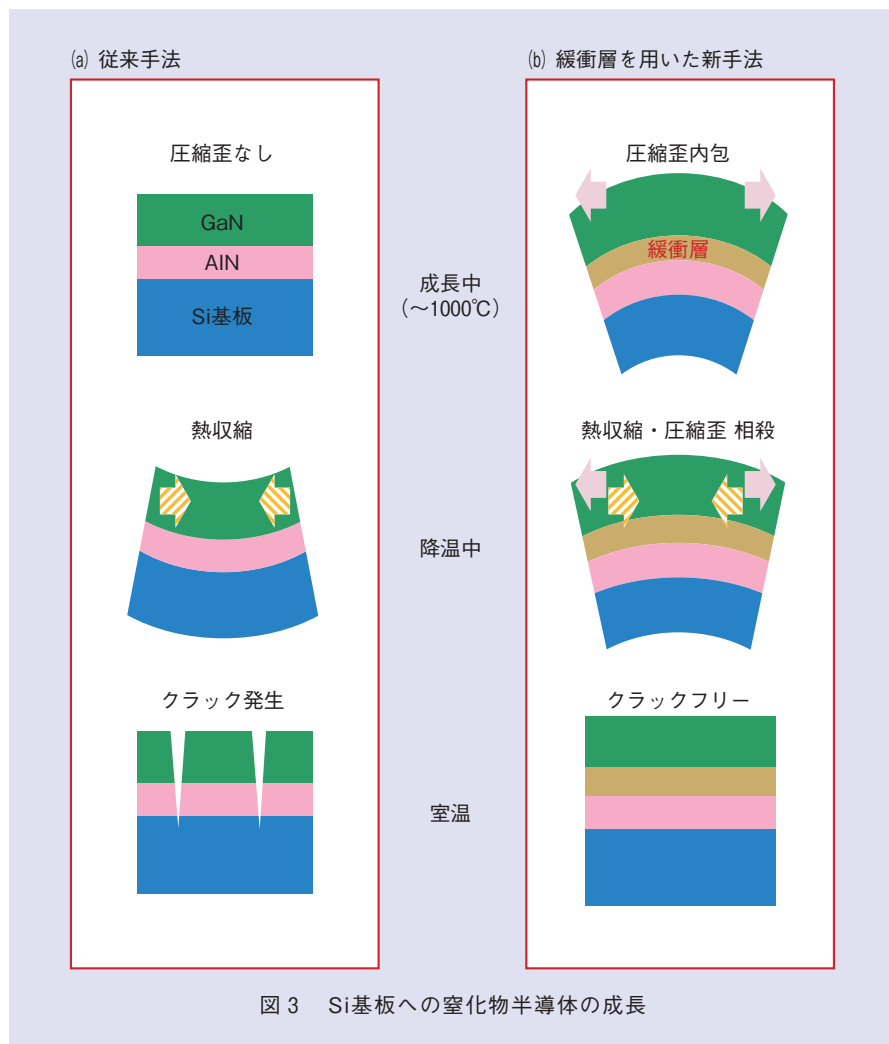
きます。これに対し、GaN-HEMTは最初に結晶成長技術を用いて窒化物半導体の結晶を基板の上に形成し、それからプロセス技術によりトランジスタの形にしていきます。ここでは、特に結晶成長技術に焦点を当てて説明していきます。

窒化物半導体に限らず、III-V族化合物半導体と呼ばれる一連の半導体のデバイス製造においては、まず結晶成長から始まります。結晶を成長させる基板の上に、主に気相成長により半導体の薄膜の結晶を順次成長させていきます。このとき、基板には成長させる半導体と同じ半導体、あるいは似通っ

た性質を持った半導体の基板を用いるのが一般的です。これにより高品質な半導体結晶を成長させることができるからです。しかし、窒化物半導体の基板はつくるのが難しいため非常に高価でサイズの小さいものしか入手することができないのが現状です。特に、GaN-HEMTを家電製品などに使うことを考えると、コスト面での競争力を担保することは必須です。このような観点から注目されているのが、Si基板の上に窒化物半導体を成長させるGaN-on-Si技術です。つまり、大口径で高品質の基板を安価に入手可能なSi基板の上に窒化物半導体を成長させるのです。

Si基板の上にGaNを成長させるには、いくつかの技術課題をクリアする必要があります。特に「SiとGaNの物性上の違いをどのようにして緩和させるか」が最大の問題です。結晶成長は種となる基板の性質を引きずって進みます。その際にまず問題となるのが、格子定数という、結晶としての最小単位の大きさが物質により異なっていること(格子不整合)です。SiとGaNとでは14%もの格子不整合が存在します。化合物半導体の結晶成長では格子不整合を0.1%程度以内にするのが普通ですので、GaN-on-Si技術ではこれに比べて100倍以上もの差を乗り越えなければいけません。

もう1つ重要なのが、熱膨張係数です。結晶は温度を上げたり下げたりすると格子が伸縮します。この伸縮の度合いが熱膨張係数です。化合物半導体の結晶成長は500～700℃程度の温度で結晶成長を行うのに対し、GaNの結晶成長は1000℃という高温で行います。成長が終わった後に室温まで冷やした際に、SiとGaNで熱膨張係数



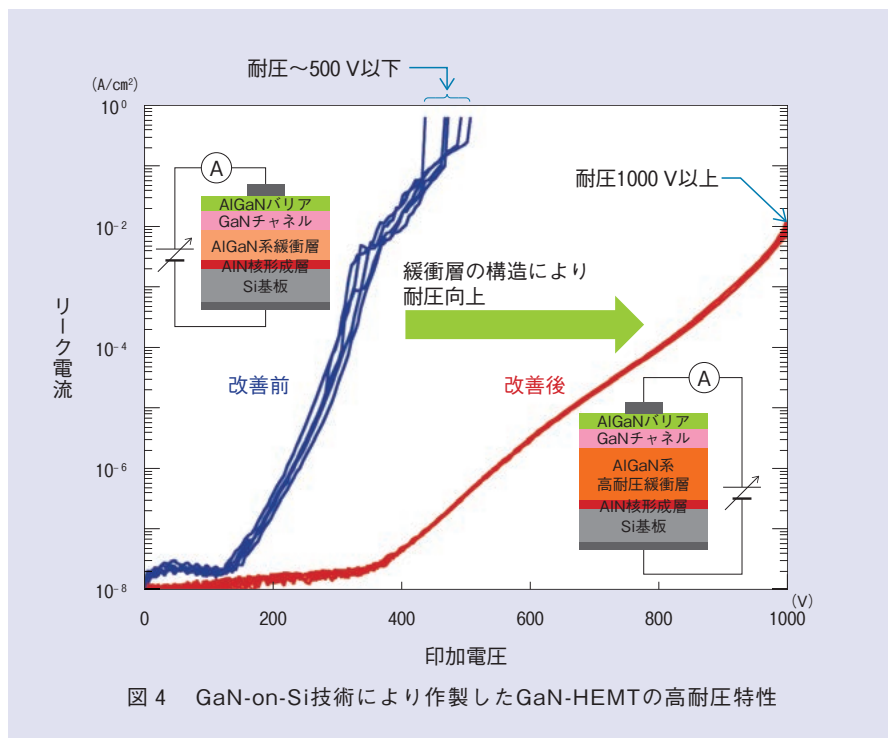


図4 GaN-on-Si技術により作製したGaN-HEMTの高耐圧特性

が異なるために、室温まで冷やした際の結晶の縮む度合いも当然異なります。SiよりもGaNのほうが高い熱膨張係数を有するため、結晶成長した基板は大きく凹型に変形することになります。そのまま形状を保てれば良いのですが、結晶の機械的強度を超えて変形してしまうと、結晶に亀裂（クラック）が入って（図3(a)）使い物にならなくなります。このような熱膨張係数の差も克服しなければいけません。こうした物性上の違いに起因した問題を解決するために、Si基板とGaN結晶の間に、格子不整合や熱膨張係数の差を吸収する層（緩衝層）を入れます。NTTフォトニクス研究所では、この緩衝層の作製手法を開発し、高品質なGaN-HEMT用結晶をSi基板に作製することに成功しました（図3(b)）。そして、GaN-HEMTの用途（インバータなどの電源系に使うのか、高周波パワーアンプのように高速動作を求めら

れる用途なのか等）に応じて緩衝層を使い分けることで、コスト競争力に優れたGaN-on-Si技術を目指して開発を進めています。現在までのところ、基板サイズとして6インチまでの大口径化を実現しており、また、1000Vの電圧を印加しても壊れないGaN-HEMT用結晶をSi基板上に成長させることにも成功しています（図4）。こうしたGaN-on-Si技術により作製されたSi基板上GaN-HEMT用結晶基板は、NTTグループ会社を通じて国内外のデバイスメーカーにも供給されています。GaN-on-Si技術を用いたGaN-HEMTは、近い将来省エネ社会を支えるグリーンデバイスとして広く使われていくことになるものと期待されます。

GaN-on-Si技術の課題

GaN-on-Si技術はこれからの省エネ社会実現のキーとなる技術ですが、課

題もまだまだ山積しています。例えば、電流コラプスと呼ばれる、トランジスタを動作させると時間とともにオン抵抗が増大してしまう、という現象があります。結晶成長の観点からその主原因は分かっているのですが、単にその主原因を取り除くだけでは、1000Vでもトランジスタが壊れない、という優れた特性が失われてしまいます。また、基板形状の制御も難しくなります。こうした課題も早急に解決していく必要があります。電流コラプスの抑制だけでなく、他の課題の解決も含めてGaN-on-Si技術の高度化を進め、高品質なGaN-HEMT用結晶を作製する技術を開発し、省エネ社会に受け入れられるデバイスの礎となるべく、研究開発を進めていきます。



渡邊 則之

窒化物半導体を用いた電子デバイスは、LED照明ほど目立ちませんが、省エネ効果は非常に大きいと期待されています。GaN-on-Si技術を通じてその一助を担えるように研究開発を進めていきたいと思っております。

◆問い合わせ先

NTTフォトニクス研究所
 テラビットデバイス研究部
 電子デバイス結晶プロセス研究グループ
 TEL 046-240-2931
 FAX 046-240-3261
 E-mail watanabe.noriyuki@lab.ntt.co.jp