

# 化合物半導体デバイス —限りなき可能性を求めて(その2)—

林 秀 樹

Development of Common Platform for ITS Devices II — by Hideki Hayashi — Many different compound semiconductors can be formed by changing the combination of constituent elements. Properties of alloy semiconductors, mixture of multiple compound semiconductors, can be changed in a continuous fashion by changing the mixing ratio. Very thin alloy semiconductor multilayers, which show interesting properties, can be formed by sophisticated epitaxial growth method such as MOVPE (metalorganic vapour phase epitaxy) or MBE (molecular beam epitaxy). Based on these matters, uncounted numbers of compound semiconductor devices with a wide variety of functions and characteristics have been developed. This fact is the most fascinating feature of compound semiconductors compared with silicon semiconductors.

Sumitomo Electric has developed various kinds of compound semiconductors for about half a century and is the world's biggest company on compound semiconductors. GaAs and InP substrates and their epitaxial wafers for consumer and communication markets have been the lead products. Recently, GaN substrates for blue-violet lasers have been developed for the new generation optical disk market.

In this paper, power semiconductor devices, especially those by using wide-bandgap semiconductors, are reviewed, as the sequel of the paper entitled "Development of Compound Semiconductor devices for Pursuit of Infinite Possibilities" in SEI Technical Review No.173.

Keywords: compound semiconductor, MOVPE, MBE, wide-bandgap semiconductor, power semiconductor device

## 1. 緒 言

2種類以上の元素から構成される化合物半導体は、その元素の組み合わせにより多くの種類の化合物半導体が構成できる。また2種類以上の化合物半導体の混ざり合った混晶半導体では、その混合比を変えることにより物性値を連続的に変えることができる。さらに異種の化合物半導体や混晶半導体の薄膜を多層に積層させることにより、無限と言える種類の半導体構造が形成でき、それによって多種多様な機能、特性を持った半導体デバイスが実現できる。ここがSi半導体とは全く異なる点であり、化合物半導体の魅力でもある。

当社では、約半世紀前から化合物半導体材料の開発・事業化に取り組んできた。通信用や民生用のGaAs基板、InP基板とそのエピタキシャルウェハが主な製品であったが、最近ではブルーレイディスクに使われる青紫レーザー用のGaN基板の開発・製品化を実現させており、世界最大の化合物半導体材料総合メーカーとなっている。

一昨年本誌に掲載した「化合物半導体デバイス—限りなき可能性を求めて—」で当社のこれまで四半世紀の化合物半導体デバイスへの取り組みについてレビューした<sup>(1)</sup>。本論文では、その続編(その2)として21世紀に入り益々その重要性が高まっている半導体パワーデバイスについて、

特にワイドバンドギャップ半導体<sup>\*1</sup>を用いた次世代パワーデバイスを中心に述べる。

## 2. パワー半導体デバイス

1948年のベル研究所でのトランジスタの発明以来60有余年の間に、非常に多種の半導体デバイスが発明・開発され、実用化されてきた。その応用分野は、パソコン、携帯電話、液晶テレビ等の家電製品、ハイブリッド車、電車、新幹線等の輸送機器、情報機器、医療機器、産業用重機械、等々挙げればきりが無いほど多くの分野で用いられている。

半導体デバイスは、半導体レーザー(LD)、発光ダイオード(LED)等の光デバイスとトランジスタに代表される電子デバイスに大別される。さらに電子デバイスは、マイクロプロセッサや各種メモリなどの集積デバイスと電力を制御するパワーデバイスとに分類される。

パワーデバイスとは、ダイオード、トランジスタ、サイリスタなど電力の変換や制御を行う半導体デバイスであり、パワーエレクトロニクスの根幹となる部品である。トランジスタが発明された1947年以前は、交流から直流、直流から交流への電力変換には水銀整流器が用いられてい

た。水源整流器は真空中の水銀の放電現象を応用したものであり、その信頼性に問題があった。1960年頃から整流機能を持つSiダイオードが実用化され、その電圧、電流定格の増加とともに大容量の直流、交流間の電力変換に用いられるようになってきた。

また、1950年台に2個のトランジスタを組み合わせるとベース電流によりオン状態が持続できるということが見いだされ、後ほどサイリスタと呼ばれるデバイスが生まれ、小電力の制御に使用されるようになった。その後、シリコン半導体デバイス技術の進展によって、ダイオード、トランジスタ、サイリスタの電圧・電流定格は大きくなり、動作特性は大幅に改善されてきた。パワーデバイスは、今や送配電などの電力システム、新幹線を初めとする各種電気鉄道、ハイブリッド車や電気自動車、燃料電池車など各種電動自動車、無停電電源（UPS）を初めとする各種電源、産業用ロボットなどのACサーボ、エアコン等の家電製品、各種OA機器など極めて幅広い分野で使用されており、その世界市場規模は2兆円とも3兆円とも言われている。

電力の変換、制御を行うのがパワーデバイスであるが、電力の変換で言えば変換に伴うエネルギー損失は最小であることが望ましく、変換効率100%が理想である。現在全世界で使用される全エネルギーの数パーセントがパワーデバイスで消費されており、今後の省エネ社会の実現のためにはパワーデバイスの低損失化は必須となっている。また電力の制御というと、できる限り小さい制御入力で、必要な電力が正確に遅れなく制御できることが理想となる。

パワーデバイスでは、これら二つの要求を満足させるために、繰り返し高速でオン・オフできるデバイス技術の向上が図られてきた。現在使用されているパワーデバイスは、Si（シリコン）を材料としたデバイスであり、Si技術の進展に伴い上記理想に向かって進化してきたわけであるが、Siという材料物性による限界に近づきつつあるというのが現状である。

繰り返しオン・オフさせるパワーデバイスでの損失は、オン時のオン抵抗による損失、オフ時の漏れ電流による損失、それとスイッチング時の電圧、電流の過渡損失の合計となる。これらの損失を少なくするには、デバイスのオン抵抗値が小さくでき、高速で動作できるものであればよい。これらの条件を満たすものとしては、Siより広いエネルギーバンドギャップを持った材料をデバイスの構成材料に用いればよく、次節で述べるSiCやGaNといったワイドバンドギャップ半導体を用いたパワーデバイスの研究開発が進められている。これらワイドバンドギャップ半導体パワーデバイスは、従来のSiパワーデバイスに比べて、そのバンドギャップの広さが故に高耐圧、低消費電力、高速動作、高温動作などが可能となるため、次世代パワーデバイスとしての期待が大きい。

### 3. ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイス

3-1 ワイドバンドギャップ半導体 これまで実用化されてきたパワーデバイスは、集積デバイスと同様に使用されている半導体材料は、ごく一部を除き、Siである。Siパワーデバイスとしては、ダイオード、サイリスタやMOSFET<sup>\*2</sup>、IGBT<sup>\*3</sup>等のトランジスタなどの多くのデバイスが開発され、極めて広い分野で数多く使用されており、年々その数も増大を続けている。

パワーデバイスの使用数量の増大に伴い、その消費電力も増加の一途を辿っている。前節でも述べたように、近年、特に地球温暖化防止の観点から省エネルギー指向がますます高まってきており、パワーエレクトロニクス機器に対する更なる低損失化、高効率化が望まれている。上記要望に応えるためにはSiよりエネルギーバンドギャップが広いSiC、GaN等のワイドバンドギャップ半導体によるパワーデバイスの実現が不可欠になってきている。

ワイドバンドギャップ半導体は、表1に示すように、Siに比べて広いバンドギャップを持った半導体であり、SiC、GaNなどはそのバンドギャップは、Siに比べて約3倍と大きい。広いバンドギャップを持つことは、電界印加時の破壊が起こりにくいことになり、SiC、GaNの絶縁破壊強度は、Siのその約10倍の値となっている。また速い飽和ドリフト速度、高い熱伝導度などの優れた物性も有している。パワーデバイスの消費電力は、電流が流れているオン時の抵抗（オン抵抗）での損失と、スイッチング時の損失が主であり、消費電力低減のためにはオン抵抗を下げるのが重要になる。パワーデバイスのオン抵抗は、デバイスの種類によっても異なるが、ドリフト層（パワーデバイスの耐圧を保持する層）と呼ばれる半導体層の抵抗が大きな部分を占める。SiCを用いるとその絶縁破壊電界がSiのその約10倍であるので、ドリフト層の厚みをSiに比べて約1/10に低減できる。また、半導体内部の電界強度はドーピング濃度の1/2乗に比例するので、ドーピング濃度は電界強度の2乗に比例した値まで調整できる。すなわち絶縁破壊電界が10倍である場合は、ドーピング濃度を100倍という高い値にすることができる。ドリフト層の抵

表1 各種半導体の物性値

	Si	4H-SiC	GaN	AlN	ダイヤモンド
バンドギャップ (eV)	1.1	3.3	3.4	6.2	5.5
電子移動度 (cm <sup>2</sup> /Vs)	1,400	1,020	2,000	1,090	2,000
絶縁破壊電界 (MV/cm)	0.3	3.0	3.3	12.0	8.0
飽和ドリフト速度 (cm/s)	1.0×10 <sup>7</sup>	2.0×10 <sup>7</sup>	2.7×10 <sup>7</sup>	2.2×10 <sup>7</sup>	2.5×10 <sup>7</sup>
熱伝導率 (W/cmK)	2	5	1	3	20

抗の値は、その厚さに比例し、濃度に反比例するので、SiCを用いるとその抵抗は、Siのその約1/1000にすることができる。オン抵抗には、ドリフト層抵抗以外の抵抗も加わるが、絶縁破壊電界の値が大きいSiC等のワイドバンドギャップ半導体を用いると、Siに比べてパワーデバイスのオン抵抗の値を大幅に下げることができ、パワーデバイスの損失を下げるができる。

ワイドバンドギャップ半導体の絶縁破壊電界はSiのそれに比べて十分に大きいので、デバイスの厚さを最適化することにより、Siパワーデバイスに比べて高耐圧、低消費電力のパワーデバイスが実現できることになる。

**3-2 SiCパワーデバイス** SiCはワイドバンドギャップで高温耐性があるということで1950年代には世界的規模で精力的に研究開発が進められたが、高品質な単結晶製造が困難であるという問題があり、その後あまり研究されなくなった。ところが、1970年代終わり頃に「種付け昇華法」と呼ばれる結晶成長手法がロシアで見出され、また1980年代後半には高品質エピタキシャル成長法である「ステップ制御エピタキシー技術」が日本で報告された<sup>(2)</sup>。これら2つの大きな技術開発により、1990年代に入ってSiCパワーデバイス開発への機運が一気に高まった。

SiCパワーデバイスとしては、まずショットキーバリアダイオード<sup>\*4</sup>が開発され、2001年から市販されるようになってきている。現在の研究開発の対象は、スイッチング用の各種トランジスタであり、国内外で盛んに研究開発が進められている。当社では、通信機器、産業用機器、各種電源、ハイブリッド車等の電動自動車や民生機器への搭載を目指し、SiCの特長を最大限に生かすうパワーデバイスとしてRESURF (REduced SURface Field：表面電界緩和)型接合型電界効果トランジスタ (JFET<sup>\*5</sup>)<sup>(2)~(6)</sup>とMOS型電界効果トランジスタ (MOSFET)<sup>(7)</sup>の開発を進めている。

前者のJFETは、チャンネル部分の電流経路が半導体内部にあるので、MOSFETなどとは異なりSiC材料固有の移動度をチャンネル移動度として活用できることとなり、SiC材料物性を十分に生かすことができるデバイスであると言える。デバイスの構造を工夫することにより、既存のSiパワーデバイスでは得られない高速動作、低損失、高耐圧の性能を兼ね備えたユニークなデバイスが実現できる。

写真1にRESURF型JFETの顕微鏡写真を、図1にその断面構造図を示す。

図中のソース電極、ドレイン電極間のn型チャンネル層を流れる電流をゲート電極の電位で制御する構造であるが、n型チャンネル層はp型層で挟まれた構造となっている。この構造は、ゲート、ドレイン間の電界強度のピークを抑え、同時にチャンネル層の高キャリア密度化による低抵抗化を図るものであり、デバイスの低抵抗、高耐圧性能の両立を実現させている。チャンネル長1umのデバイスのスイッチング特性としては、立ち上がり、立ち下がりとも約3nsという値が得られている。このような数百V耐圧領

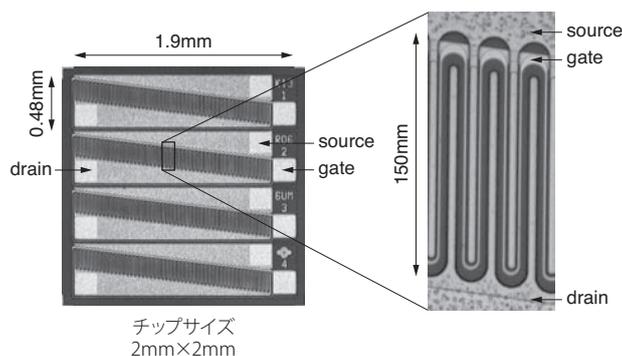


写真1 RESURF-JFETの顕微鏡写真

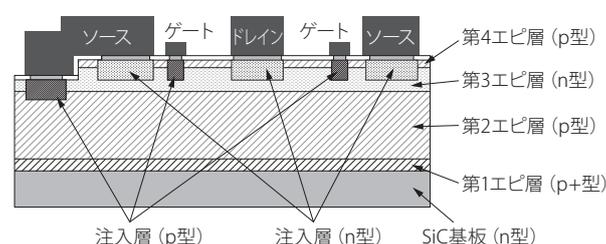


図1 Resurf型SiCJFETの模式断面図

域において高速スイッチングが可能であるという特性から、スイッチング電源や省エネ型の携帯基地局電源への応用が期待できる。

一方、後者のMOSFETに関しては、ノーマリオフ<sup>\*6</sup>動作が可能で、高耐圧、低損失が期待できるデバイスであるが、MOS界面の不完全さで未だ十分な電子移動度が得られていないのが実情である。当社では、特殊なプロセスを施すことにより、表面が原子層レベルで平坦なSiC表面を形成し、この表面に形成したMOS構造で高電子移動度が得られることを示した<sup>(7)</sup>。このSiC MOSFETは高耐圧、低損失、大電流動作が期待できるため、Siパワーデバイスのうちでも比較的大容量向けのIGBTの置き換えとして電力機器用や自動車用への応用が期待されている。

**3-3 GaN系電子デバイス** GaNはSiCとほぼ同じバンドギャップのワイドバンドギャップ半導体であり、その材料特性は似通っているが、GaN電子デバイスはSiC電子デバイスに比べて同一構造ではそのオン抵抗の値を数分の1に下げることができるため、省エネデバイスとして期待されている。

GaN系デバイスとしては、白色LEDや青紫レーザ等の光デバイスがまず市場に出たが、電子デバイス用の大口径GaN基板の入手が困難であったため、基板としては格子不整合系のSiCやSiが用いられた。SiC基板上のGaN電子デバイスとしては、無線通信用のデバイスとしてのGaN

HEMT<sup>\*7</sup>をSEDI（住友電工デバイスイノベーション株）がいち早く開発・製品化を実現させ、市場でリードしている。いわゆるパワーデバイスとしては、GaN基板上のGaNデバイスが高性能パワーデバイスとしての期待が大きい。低コストで良質のGaN基板が未だ得られないこともあり、Si基板上のGaNパワーデバイスの研究開発が広くなされている。基板が低コストのSi基板であり低コストデバイスの期待が持てるが、基板とデバイス動作層の材料が全く異なるヘテロデバイスであるため縦方向に電流を流すことには適していないこと、基板材料のSiの熱伝導率がGaNやSiCに比べて低いことなどにより、大容量のパワーデバイスには適しておらず、小容量のSiパワーMOSFETの置き換え等が考えられている。

当社では当社で開発した高品質GaN基板上のGaN系電子デバイスの研究開発を進めている。まず、GaN自立基板上にGaNショットキバリアダイオードおよびPN接合ダイオードを形成した。GaNショットキバリアダイオードでは、GaN基板上の電子移動度 $930\text{cm}^2/\text{Vs}$ といった高品質n型GaN層を用いており、ダイオードの特性オン抵抗値は、 $0.71\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 、耐圧は $1100\text{V}$ といった良好な値が得られている<sup>(8)</sup>。一方、GaN PN接合ダイオードにおいても、p型GaN層のMgのドーピング密度を十分下げることにより、特性オン抵抗 $6.3\text{m}\Omega\text{cm}^2$ 、耐圧 $925\text{V}$ というダイオードが得られている<sup>(9)</sup>。

GaN基板上のGaNトランジスタとしては、当社はAlGaN/GaN系2次元電子ガス<sup>\*8</sup>をチャンネルとした縦型ヘテロ接合FETを試作した<sup>(10)</sup>。このトランジスタの模式断面構造図を図2に示す。作製プロセスとしては、GaN基板上に形成したn<sup>-</sup>-GaN、p<sup>-</sup>-GaN、n<sup>+</sup>-GaNの積層構造を斜め研磨し、AlGaN/GaN構造を再成長させた後、オーミック電極、ゲート電極を形成している。ノーマリオンデバイスでは、耐圧 $672\text{V}$ 、特性オン抵抗 $7.6\text{m}\Omega$ でGaN系縦型トランジスタではこれまで報告された中で最も高いFigure of Merit ( $V_B^2/R_{onA}$ )の値が得られている。AlGaN層の厚さを変えることによりFETの閾値電圧を制

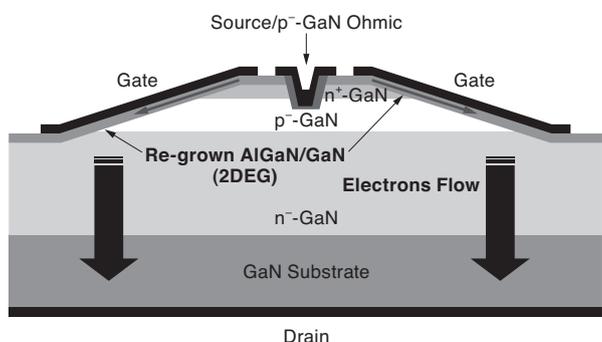


図2 GaN基板上のAlGaN/GaN 2次元電子ガスをチャンネルとした縦型ヘテロ接合FETの模式断面構造図

御することができ、ノーマリオン動作デバイスも得られている。

3-4 AIN系パワートランジスタ AINは、表1でも示すように、そのバンドギャップは $6.2\text{eV}$ と大きく、光デバイス用途としては紫外光源の基板が考えられるが、電子デバイスとしては、SiCやGaNより高温動作が可能でより堅牢なパワーデバイスが期待される。ただし、AINは、SiCやGaNよりさらにその結晶成長が難しく、未だウェハと呼ばれるような口径の単結晶基板は得られていない（写真2参照）。

当社では、90年代後半よりAINの基板技術、エピタキ

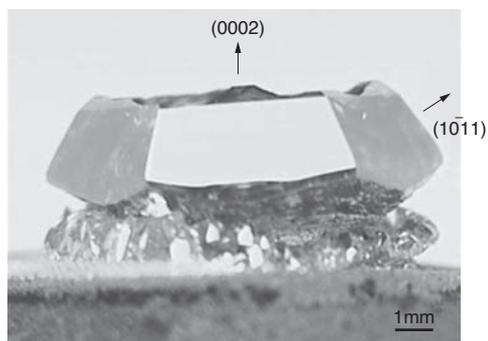


写真2 AIN単結晶の写真

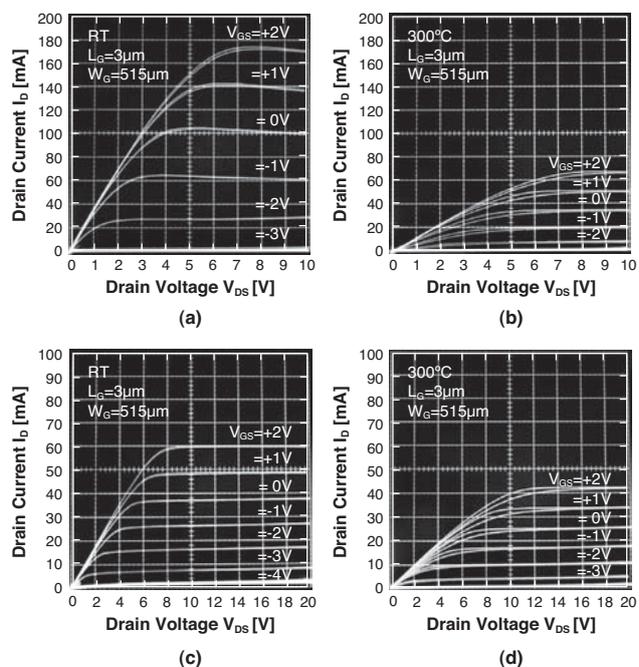


図3 Drain I-V characteristics for GaN-channel HEMT (a, b) and AlGaN-channel HEMT (c, d)<sup>(11)</sup>

シヤル成長技術開発を進めており<sup>(11)</sup>、<sup>(12)</sup>、2007年から参画している新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）プロジェクトでは、当社作製の基板、エピを用いたトランジスタをプロジェクトの共同研究者が試作し、評価を行っている<sup>(13)</sup>。このデバイスは、AlN 自立基板上に形成された（Al<sub>0.24</sub>Ga<sub>0.76</sub>N チャンネル層と Al<sub>0.51</sub>Ga<sub>0.49</sub>N アンドープ層からなる）初めての HEMT である。V<sub>gs</sub> = 2V での最大飽和電流は、0.13A/mm で最大 gm は、25mS/mm であった。また、比較のために GaN をチャンネル層とする標準構造の HEMT の作製も行い、この 2 種類のトランジスタの特性の温度依存性を評価している。図 3 にこれらのトランジスタの室温および 300℃ におけるドレイン I-V 特性を示す。またドレイン電流の温度依存性を図 4 に示す。オン抵抗、ゲート漏れ電流、および閾値電圧の温度依存性をそれぞれ図 5、図 6、図 7 に示す。ドレイン電流の温度依存性については、AlN 基板上の AlGaIn チャンネル HEMT の温度依存性は、GaN チャンネル HEMT のそれに比べて約 1/2 であり、AlN 基板上のデバイスが高温特性に優れていることが初めて示された。

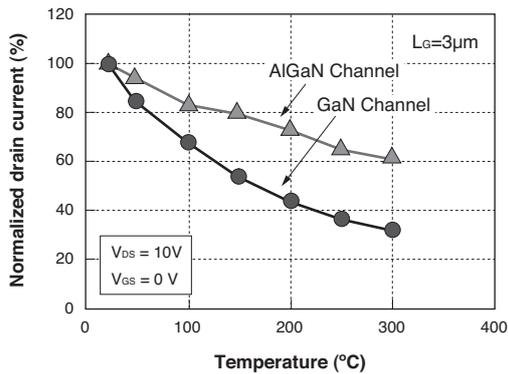


図 4 Normalized drain current vs temperature<sup>(13)</sup>

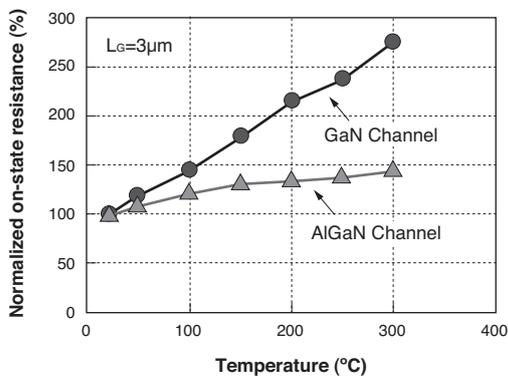


図 5 Normalized on-state resistance vs temperature<sup>(13)</sup>

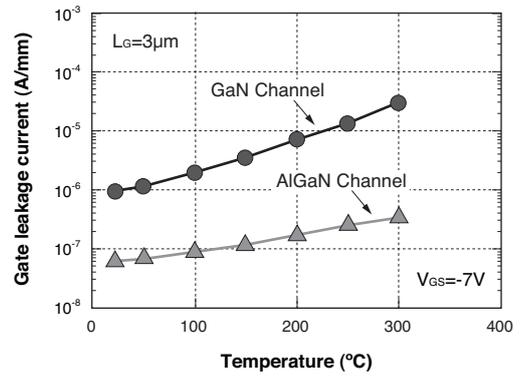


図 6 Gate leakage current vs temperature<sup>(13)</sup>

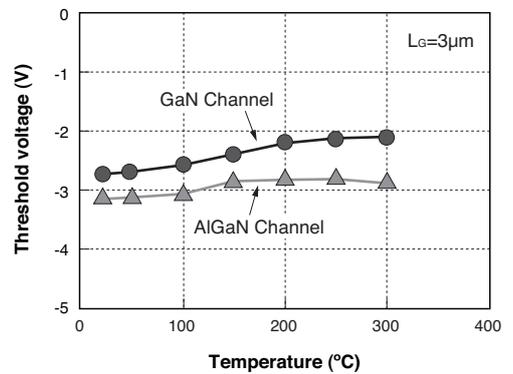


図 7 Threshold voltage vs temperature<sup>(13)</sup>

3-5 ダイヤモンドパワーデバイス ダイヤモンドは、炭素単体の結晶であり化合物半導体ではないが、ワイドバンドギャップ半導体ということでパワーデバイス用材料として期待が大きいものであり、本稿で述べることにする。ダイヤモンド結晶は、硬さ・強度等の機械的特性が優れており、また熱伝導率が高い、といった材料物性により、線引きダイスや精密バイト等の加工工具やヒートシンク等に用いられてきたが、ワイドバンドギャップ半導体材料としての応用は未だない。

ダイヤモンドの半導体材料としての性能では、そのバンドギャップの大きさからくる高絶縁破壊電界強度と高熱伝導度が最大の特長である。パワーデバイスとしての性能指数では他の材料を圧倒する値となっており、ダイヤモンドパワーデバイスへの期待は大きい。

ダイヤモンドパワーデバイスの実用化に向けての大きな課題は、結晶成長技術とデバイスプロセス技術の高度化が挙げられる。前者の結晶成長に関しては、不純物や結晶欠陥の少ない大型の高品質な単結晶ダイヤモンドを然るべき製造コストで作製することが必須となる。ダイヤモンドの合成法としては、超高圧合成法や気相合成法があるが、半

導体デバイス用の基板としては、プラズマCVD法などの気相合成法が適している。産業技術総合研究所（以下産総研と略す）では、従来から気相合成法によるダイヤモンド単結晶作製技術の研究を進めてきているが、最近では、大型結晶が得られる成長面を変えて気相成長する結晶成長技術「繰返し成長技術」、種結晶から板状に成長したダイヤモンドをロスなしに分離する技術「ダイレクトウェハ化技術」の開発に成功し、これらの技術の適用により大型ウェハの作製が可能となっている<sup>(14)</sup>。産総研はさらに、ダイレクトウェハ法を使って性質のそろった単結晶ダイヤモンド薄板を複数作製し、これらの薄板同士を接合して1インチ角程度の大面積ウェハを作製した<sup>(15)</sup>（写真3）。この成果は、ダイヤモンドデバイスの製造に必要な大型ダイヤモンド基板の量産可能性を示したものと言える。

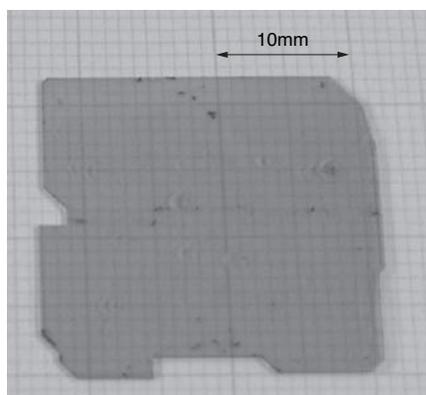


写真3 ダイヤモンドウェハの写真<sup>(15)</sup>

ダイヤモンドを用いたデバイスとしては、これまで SAW（表面弾性波）デバイス<sup>※9</sup>、電子エミッタ、紫外LED（発光ダイオード）やショットキバリアダイオード、MOSFET（MOS型電界効果トランジスタ）等のパワーデバイスが研究開発されている。

SAW デバイスはいわゆる半導体デバイスではないが、ダイヤモンドの表面を伝搬する弾性波の高速性を活用すべく、当社でも GHz 帯の高周波 SAW デバイスへの応用開発を行った<sup>(16)</sup>、<sup>(17)</sup>が、実用化へは至っていない。ダイヤモンドは電子を引き出しやすい性質があり低電圧、大電流の電子エミッタが可能となるため、電子ビーム露光装置、電子顕微鏡、電子線照射装置などの電子銃への応用が期待されている。当社では、高濃度にリンをドーブした n 型ダイヤモンドで優れた電子放出性能を示すことを見だし、1mm<sup>2</sup>のデバイスから1103mAの大電流電子放出を得ることに成功している<sup>(18)</sup>（写真4）。また、NEDO プロジェクトとしてエリオニクス社、産総研とで行った共同開発では、ダイヤモンド電子源による電子線描画でレジスト上に世界

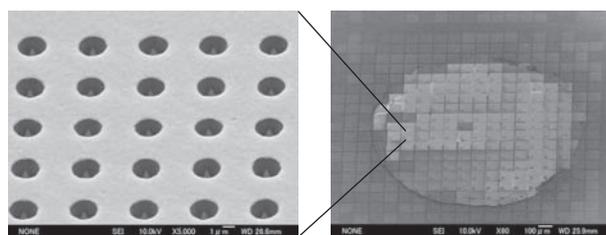


写真4 ダイヤモンド電子エミッタアレイ（5μmピッチアレイ）



写真5 電子源モジュール

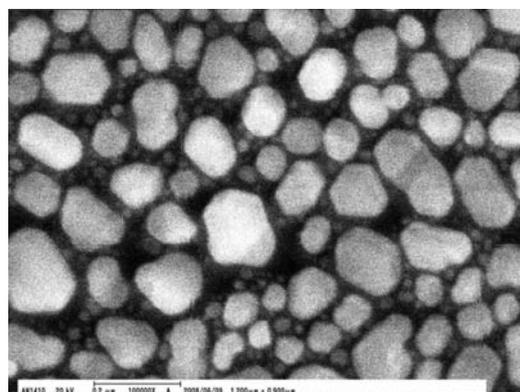


写真6 ダイヤモンド電子銃で撮影した観察倍率10万倍の金粒子二次電子像

最狭線幅となる4nmの電子線描画に成功しており<sup>(9)</sup>、また、電子顕微鏡用電子銃モジュール（写真5）を作製し、観察倍率10万倍での金粒子の二次電子像の撮影に成功している（写真6）。

さて本論のパワーデバイスであるが、ダイヤモンドを用いたパワーデバイスとしては、ショットキバリアダイオードとトランジスタの研究が進められている。当社が産総研と共同で行ったショットキーバリアダイオードの研究で

は、耐電界強度は3.1MV/cmとSiCを超える高い値が得られている<sup>(20)</sup>。ダイヤモンドはそのエネルギーバンドギャップが大きく、高温動作デバイスが期待できるが、産総研はRu（ルテニウム）という材料をショットキ電極に用いることにより、400℃、500℃という高温で動作するダイオードを開発している<sup>(21)</sup>。また、このダイオードの高速スイッチング特性についても報告がなされている<sup>(22)</sup>。

ダイヤモンドを用いたトランジスタの研究に関しては、1990年代から始まっている。水素終端したダイヤモンド表面にはホールの蓄積層が生じ、このホール蓄積層をチャンネルとしたトランジスタが多く報告されている。早稲田大学からは、ゲート長0.15μmのトランジスタでカットオフ周波数として45GHzという高い値が報告されている<sup>(23)</sup>。

ダイヤモンド半導体は、これを用いたパワーデバイスの性能指数としては、他の半導体材料デバイスのそれを圧倒する値を示し、高耐圧、低消費電力、高温動作デバイスとしての期待が大きく、また上記したようにダイオード、トランジスタの研究も進められている。しかし、これらのデバイスの実用化のためには、高品質、大口径のダイヤモンドウェハは必須であり、産総研が成果を挙げつつはあるが、今しばらくの開発期間がかかるものと予想される。

## 4. 結 言

SiC、GaN等の化合物半導体やダイヤモンドなどのワイドバンドギャップ半導体を用いたパワーデバイスは、その材料物性により、現在市場で広く用いられているSiパワーデバイスに比べて、低消費電力、高耐圧、高周波動作、高温動作が可能となるため、多くの市場分野で次世代パワーデバイスとしての期待が大きい。

これらのワイドバンドギャップ半導体パワーデバイスの実用化に向けての最大の課題は、如何にしてSiパワーデバイス並の製造コストで生産できるかであり、その鍵は高品質、低コストの大口径基板の実現だと思われる。基板結晶の成長が難しく、未だ低コスト、大口径の基板が得られていないのが実情である。この課題へのソリューションを見出したものが市場参入の一番乗りになるものと予想され、当社もこの難しい課題を解こうと種々の検討を進めている。

一旦でも化合物半導体デバイスの開発に携わった技術者は、その魅力に取り付かれ、寝ても覚めても新しいデバイスの実現に向けて行動することになる。筆者も化合物半導体材料メーカーに入社して以来この魔物に取り付かれ、一貫して化合物半導体デバイスの研究開発を行ってきた。今は、来るべき省エネルギーの社会の実現に向けて、ワイドバンドギャップ半導体を何とか手なずけようと奮闘している。

## 用語集

### ※1 ワイドバンドギャップ半導体

SiC、GaN、ダイヤモンドといったそのエネルギーバンドギャップがSiのそれより大きい半導体。次世代パワーデバイス用の半導体材料として期待されている。

### ※2 MOSFET

Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor：電界効果トランジスタ（FET）の一種で、ゲート部はゲート電極と半導体層との間に酸化物を挿入したMOS（金属／酸化物／半導体）構造。LSIの中で最も一般的に使用されているデバイス。

### ※3 IGBT

Insulated Gate Bipolar Transistor：バイポーラトランジスタのベース部にMOSFETを付けた複合デバイス。中容量のパワートランジスタとして広く用いられている。

### ※4 ショットキバリアダイオード

金属と半導体との接合（ショットキ接合）によって生じるショットキ障壁を利用したダイオード。

### ※5 JFET

Junction Gate Field Effect Transistor：pn接合により生じる空乏層をゲートに印加する電圧によって変化させ、ソース-ドレイン間に流れる電流を制御するトランジスタ。

### ※6 ノーマリオフ型

トランジスタのゲート電極に電圧を印加しない時は、ソース-ドレイン間に電流が流れないタイプ。反対にゲート電極に電圧を印加しない時も電流が流れるデバイスは、ノーマリオン型と呼ばれる。

### ※7 HEMT

High Electron Mobility Transistor：半導体ヘテロ界面に生成される二次元電子ガス<sup>\*8</sup>をチャンネルに用いる高速トランジスタ。

### ※8 二次元電子ガス

半導体のヘテロ界面に生成される電子が二次元的に分布している状態。※7のHEMTは、この二次元電子ガスをチャンネルに応用したもの。

### ※9 SAWデバイス

固体の表面を伝搬する表面弾性波（SAW: Surface Acoustic Wave）を利用してデバイス。バンドパスフィルタ等が実用化されている。

## 参考文献

- (1) 林秀樹、「化合物半導体デバイス—限りなき可能性を求めて—」、SEIテクニカルレビュー第173号、PP14-24 (2008)
- (2) K. Fujikawa, S. Harada, A. Ito, T. Kimoto and H. Matsunami, "600V 4H-SiC RESURF-type JFET", Material Science Forum, 457, p.1189 (2004)
- (3) T. Masuda, K. Fujikawa, K. Shibata, H. Tamaso, S. Hatsukawa, H. Tokuda, A. Saegusa, Y. Namikawa and H. Hayashi, "Low On-Resistance in 4H-SiC RESURF JFETs Fabricated with Dry Process for Implantation Metal Mask", Material Science Forum, 527, p.1203 (2006)
- (4) K. Fujikawa, K. Shibata, T. Masuda, S. Shikata and H. Hayashi, "800V 4H-SiC RESURF-Type Lateral JFETs", IEEE Electron Device Letters, 25, p.790 (2004)
- (5) H. Tamaso, J. Shinkai, T. Hoshino, H. Tokuda, K. Sawada, K. Fujikawa, T. Masuda, S. Hatsukawa, S. Harada and Y. Namikawa, "Fabrication of a Multi-chip Module of 4H-SiC RESURF-type JFETs", Materials Science Forum, 556, P.983 (2007)
- (6) K. Fujikawa, K. Sawada, T. Tsuno, H. Tamaso, S. Harada and Y. Namikawa, "Fast Swtching Characteristics of 4H-SiC RESURF-type JFET", International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (2007)
- (7) T. Masuda, S. Harada, T. Tsuno, Y. Namikawa and T. Kimoto, "High Channel Mobility of 4H-SiC MOSFET Fabricated on Macro-Stepped Surface", International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM) (2007)
- (8) Y. Saitoh, K. Sumiyoshi, M. Okada, T. Horii, T. Miyazaki, H. Shiomi, M. Ueno, K. Katayama, M. Kiyama and T. Nakamura, "Extremely Low On-Resistance and High Breakdown Voltage Observed in Vertical GaN Schottky Barrier Diodes with High-Mobility Drift Layers on Low-Dislocation-Density GaN Substrates", Appl. Phys. Express 3, 081001 (2010)
- (9) Y. Yoshizumi, S. Hashimoto, T. Tanabe and M. Kiyama, "High-breakdown-voltage pn-junction diodes on GaN substrates", J. Crystal. Growth, 298, pp.875-878 (2007)
- (10) Okada, Y. Saitoh, M. Yokoyama, K. Nakata, S. Yaegassi, K. Katayama, M. Ueno, M. Kiyama, T. Katsuyama and T. Nakamura, "Novel Vertical Heterojunction Field-Effect Transistors with Re-grown AlGaIn/GaN Two-Dimensional Electron Gas Channels on GaN Substrates", Appl. Phys. Express 3, 054201 (2010)
- (11) M. Tanaka, S. Nakahata, K. Sogabe, H. Nakahata and M. Tobioka, "Morphology and X-ray diffraction peak widths of Aluminium Nitride single crystals prepared by the sublimation method", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.36, L10621 (1997)
- (12) 宮永倫正、水原奈保、藤原伸介、嶋津充、中幡英章、「昇華法によるAlN単結晶成長」、SEIテクニカルレビュー第168号、p.p.103-106 (2006)
- (13) M. Hatano, N. Kunishio, H. Chikaoka, J. Yamazaki, Z.B. Makhzani, N. Yafune, K. Sakuno, S. Hashimoto, K. Akita, Y. Yamamoto and M. Kuzuhara, "Comparative high-temperature DC characterization of HEMTs with GaN and AlGaIn channel layers", CS MANTECH Conference, p.101 (2010)
- (14) 産総研プレスリリース (2007.03.20)
- (15) H. Yamada, A. Chayahata, Y. Mokuno, H. Umezawa, S. Shikata and N. Fujimori, "Fabrication off 1 Inch Mosaic Crystal Diamond Wafers", Applied Physics Express 3, 051301 (2010)
- (16) 鹿田真一、「ダイヤモンドの特性を活用したデバイスの開発」、化学、Vol.62、No.6 (2007)
- (17) 藤井知 他、「ダイヤモンドSAWデバイスの進展」、NEW DIAMOND、Vol.25、No.2 (2009)
- (18) N. Tatsumi, A. Ueda, K. Tanizaki, Y. Nishibayashi and T. Imai, "Phosphorus Doped Diamond Electron Emitter Devices", Mater. Res. Soc. Symp. Proc. Vol.1039- P09-04 (2008)
- (19) 植田暁彦、西林良樹、池田和寛、辰巳夏生、今井貴浩、上柿順一、布川博、土田智之、小若裕則、本目精吾、山田貴壽、鹿田真一、「ダイヤモンド電子源の開発とその応用」、学振158委員会、p.9 (2010)
- (20) 辰巳夏生、池田和寛、梅澤仁、鹿田真一、「ダイヤモンド・ショットキ・ダイオードの開発」、SEIテクニカルレビュー第174号 (2009)
- (21) K. Ikeda, H. Umezawa, K. Ramanujam and S. Shikata, "Thermally Stable Schottky Barrier Diode by Ru/Diamond", Applied Physics Express 2, 011202 (2009)
- (22) K. Kodama, T. Funaki, H. Umezawa and S. Shikata, "Switching characteristics of a diamond Schottky barrier diode", IEICE Electronics Express, Vol.7, No.17, 1246-1251 (2010)
- (23) 平間一行、川原田洋、「ワイドギャップ半導体ダイヤモンドを用いた高周波高出力MOSFETの開発」、科学と工業 Vol.83、No.4 (2009)
- (24) N. Kuroda, K. Shibahara, W. S. Yoo, S. Nishino and H. Matsunami, "Step-Controlled VPE Growth of SiC Single Crystals at Low Temperatures," Ext. Abstr. 19th Conf. on Solid State Devices and Materials, p. 227 (1987)

## 執筆者

林

秀樹 : フェロー 博士 (工学)

情報通信・システム事業本部 技師長

IEEE フェロー

電子情報通信学会 評議員

応用物理学会 フェロー

放射科学研究会理事

日本工学アカデミー会員

1978年入社以来一貫して化合物半導体デバイスの研究開発およびその実用化に従事。

オプトエレクトロニクス研究所長、デバイス技術センター長、半導体技術研究所長、パワーデバイス開発室長、材料技術研究開発本部 技師長を経て、現職

