



注目されるワイドギャップ半導体SiC, GaN 高耐圧, 低ON抵抗, 高速スイッチングを実現 パワーデバイスへの応用に期待

石谷彰康・川名喜之/サクセス インターナショナル

Siに替わる半導体として有望視されているのが、SiCとGaN、すなわちワイドギャップ半導体だ。ワイドギャップ半導体は、不純物濃度がSiより二桁も高く、高耐圧、低ON抵抗、高速スイッチングを実現できるが、実用化するには未解決の課題も多くあり、研究の進展が期待されている。

はじめに

近年、省資源化、省エネルギー化の要請が従来以上に高まっている。現在の半導体パワーデバイスはSiを中心に生産されており、性能向上も進んでいる。しかしそろそろSiの物性から来る限界に近づいてきている。

パワーデバイスとしては、数十Vの低耐圧デバイスは、従来の縦型パワーDMOSFET (Double Diffused MOSFET) から、トレンチ構造を導入することにより大幅性能向上をしてきた。

数百V以上のパワーデバイスとしては、縦型パワー

DMOSFET (図1) と、これから進化したIGBTが一般的に採用されている。また98年にInfineon Technologiesから発表されたCoolMOS (図2) は、複雑な製造工程が必要であるが、画期的な性能向上が得られた。この技術はSuper Junction技術として各社から新しい製造工程の発表が続いている。

さらに性能を向上させるには、新しい材料が必要であり、SiC (炭化珪素)、GaN (窒化ガリウム) のワイドギャップ化合物半導体に注目が集まっており、すでにSiデバイスを凌駕した性能が発表され、商品化が進み出した。

今回、SiCおよびGaNのパワーデバイスの特徴と開発概況について述べる。

ワイドギャップ半導体の利点

パワーデバイスに有用とされるワイドギャップ半導体はSiCとGaNの二つである。表1に示すようにSiのバンドギャップが1eV台であるのに対し、SiCとGaNはいずれも3eV台と大きく違っている。

これらのワイドギャップ半導体が何故パワーデバイス

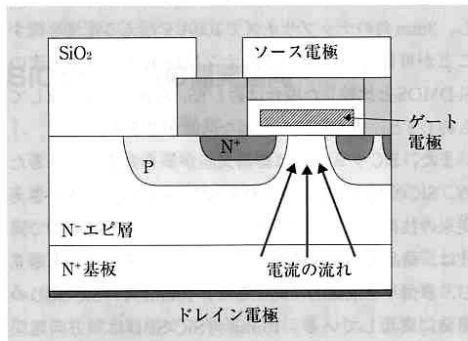


図1 縦型DMOSFETの基本構造

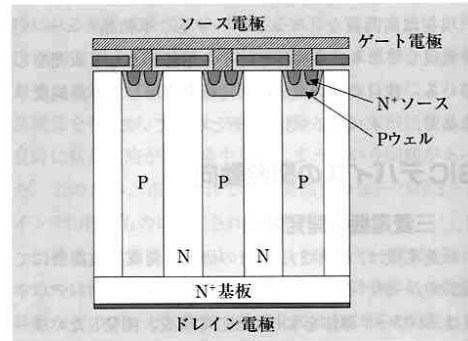


図2 Super Junctionの基本構造

表1 各種半導体結晶の物性値¹⁾

項目	単位	Si	4H-SiC	GaN
禁制帯幅	eV	1.1	3.3	3.4
比誘電率		11.8	10	9.5
電子移動度	cm/V・sec	1500	1000	1200
破壊電界	MV/cm	0.3	3.0	3.3
熱伝導率	W/cmK	1.5	4.9	2.1
電子飽和速度	10 ⁷ cm/s	1.0	2.0	2.5

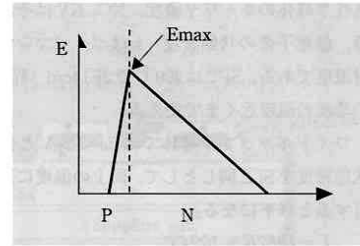


図3 簡略化したPN接合電界分布

に対して有利であるかはその破壊電界 (V/cm) の大きな差によって説明される。Siが 3×10^5 V/cmに対して、SiCとGaNは $2 \sim 6 \times 10^6$ V/cmと1桁ないしそれ以上の差があるからである。

そもそもバンドギャップの大きさは、その材料の結合の強さをも表しており、言わば硬さの表現でもある。破壊耐圧が高いというのはそれだけ高い電界を掛けなければ原子間結合を破れないという意味である。表1に各種半導体結晶の物性値を示す。ここで4H-SiCとは結晶のSiとCの原子の重ね方が4層の繰り返しになっている六方晶 (Hexagonal) であることを示す。Hの代わりにCがあれば立方晶 (Cubic) を意味する。

破壊電界が高いということは、例えばPN接合に電圧を印加した場合の空乏層の広がり近似式で下のようになる。

$$W \approx 2\phi_T / E_{max} \quad (1)$$

ここで、Wは空乏層の幅、 ϕ_T はP、N間のポテンシャルエネルギーの全変動 ($\phi_B + V_R$)、(ここで ϕ_B はPN接合のbuilt-in potential、 V_R は逆印加電圧) この場合印加電圧にほぼ等しい。 E_{max} は最大電界である。一方階段接合の場合の空乏層の幅は、以下のようになる。

$$W = (2 \epsilon_s \epsilon_0 \times \phi_T / qN)^{1/2} \quad (2)$$

ここで、 ϵ_s は半導体の誘電率、 ϵ_0 は真空の誘電率、qは電子の電荷、Nは低濃度側の不純物濃度である。(P側は高濃度で空乏層の伸びは無視) ここでSiとワイドギャップ半導体を比べた場合、同一の破壊電圧 ($\phi_T = V_{BD}$) の空乏層の幅Wは式 (1) より、ワイドギャップ半導体はSiの1/10程度になることが分かる。 V_{BD} におけるワイドギャップ半導体およびSiの不純物濃度をそれぞれ N_W および N_S とすれば、式 (2) より、 ϵ_s が両者によってあまり差がないため、以下のようになる。

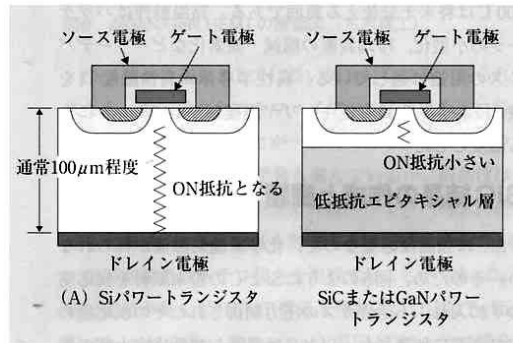


図4 縦型MOSFETのON抵抗の比較図

$$N_W / N_S \approx 10^2 \quad (3)$$

従って、Siより2桁の高濃度をワイドギャップ半導体に与えることができる。

高耐圧、低ON抵抗、高スイッチング速度がパワーデバイスに求められる要件であるから、高不純物濃度化はすべてその目的に一致している。ワイドギャップ半導体がもてはやされる理由である。なお、N⁺Nのエピタキシャル基板を用いた縦型構造デバイスを考えるとエピ層 (N層) の薄さ ($\approx 1/10$) がそれだけON抵抗の減少に繋がることは当然である。総合して理論的には同じ耐圧ではワイドギャップ半導体はSiに対してほぼ3桁のON抵抗の改善が実現できることになる (実際にはSiCで約2桁、GaNで約3桁となる。またIGBT、CoolMOSはSi限界より低くなる)。以上の説明を図4に示す。

ワイドギャップ半導体の温度特性

半導体のキャリア濃度は温度の強い関数であると同時にバンドギャップ E_G に強く依存している。

$$pn = ni^2 = (N_C N_V) \exp(-E_G / kT) \quad (4)$$

ここで、p、nはそれぞれ正孔および電子の密度、niは

次世代半導体材料 優れた特性を誇るSiC

真性半導体のキャリア濃度, NC, NVはそれぞれ, 伝導帯, 価電子帯の状態密度, k はボルツマン定数, T は絶対温度である。Siでは200℃で $2E14\text{cm}^{-3}$ 程度であり, その程度の温度近くまで使える。

ワイドギャップ半導体では $E_g=3.2\text{eV}$ と仮定し, また状態密度をSiと同じとして, 同上の温度に達する値を計算すると以下になる。

$$T = 1367K = 1094^\circ\text{C} \quad (5)$$

実際にはパッケージの関係でそこまでは使えないが300℃は将来十分使える範囲である。高温動作はパッケージの小型化, 冷却装置の削減・簡素化などパワーデバイスの用途に適している。真性半導体の真性温度 T_i を表2に示す。 T_i は真性キャリア濃度が $5 \times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ になる温度とした。

SiC結晶の作成と課題

SiCは包晶反応型なので, 化学量論的融液が得られない。そのため, 図5のようにSiとCの粉末原料を反応室の下に入れ, 不活性ガスの圧力制御されたその反応室の中で高温に加熱され, SiとCは昇華して反応室上部の種結晶に析出して成長する。

表2 真性半導体温度

Si	600K
SiC (4H)	1400K
GaN	2000K

坩堝の温度は2200℃から2500℃にする。SiCは結晶形が多く存在する(ポリタイプ)ため, 単

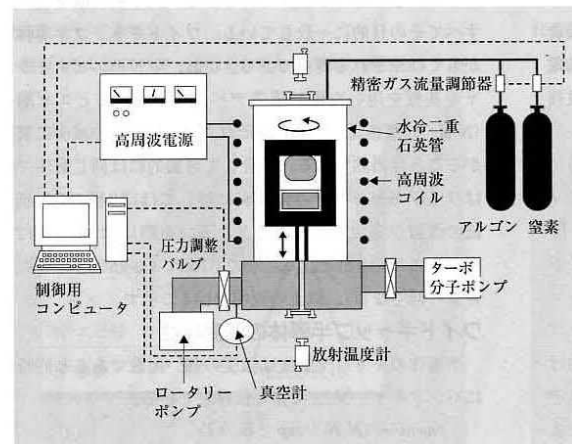


図5 SiCバルク結晶成長炉装置の例 (改良レーレー法)¹⁾

一構造の単結晶を得るのも最初は困難であったが, 現在は良好な単結晶が得られるようになって来た。

SiCパワーデバイスの概況

多種類のデバイスの開発が発表されているが, その一部を紹介する。

1. SiC・ショットキ・バリヤ・ダイオード

SiCのパワーデバイスは01年にInfineonから出されたショットキ・バリヤ・ダイオード(SBD)が最初の生産開始である。現在300V, 600V, 1200Vがラインナップされている。SiのパワーMOSFET, IGBTと組合せた混合使用の場合でも, 電力変換効率は大幅に改善されている。SiCの結晶は年々改善が進んでおり, 当初の試作品は小チップ寸法が中心であったが, 最近では, 大きなチップ寸法の開発品も発表され出した。ロームは07年12月, 10mm□のショットキ・バリヤ・ダイオード試作を発表した。逆方向耐圧は660Vで, 順方向電圧は, 300Aで1.5Vを達成している。

図6に, 10mm□の試作品の順方向電圧-電流特性を示す。これも結晶品質の改善が進んだためである。

2. SiC・パワーMOSFET

SiC結晶は酸素雰囲気中で酸化され, 酸化膜(SiO_2)が形成されることからGaNに比べてMOSFETが実現しやすい。

SiCのスイッチング用パワーデバイスは縦型パワーMOSFETが各社から開発の発表がなされている。重要なパラメータは, 耐圧と順方向のON電圧である。

すでにSiの理論限界は突破しているが, SBD

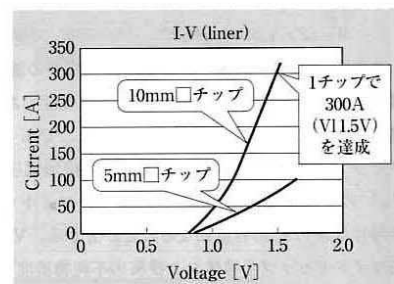


図6 10mm□のショットキ・バリヤ・ダイオードの順方向V-I特性 (ローム)

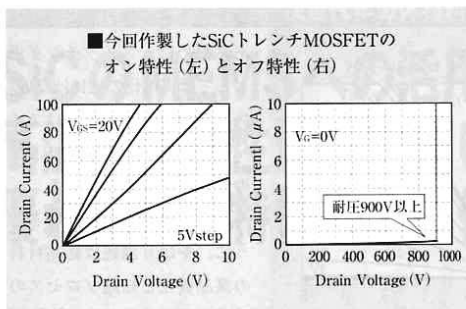


図7 SiC トレンチMOSFETの特性 (ローム)

より結晶欠陥に対して敏感であるため、発表は主に小チップ寸法での試作であり、ON電圧の評価は、面積当りの単位 ($\text{m}\Omega/\text{cm}^2$) である。

最大電流は最初の商品化は10Aクラスが考えられているようである。車載用には100Aクラスが必要で10年代に実現が期待されている。

1年以上前からロームが900V耐圧の縦型プレーナ構造のサンプル出荷を発表し、展示会でも応用デモをしている。また、同社は昨年末には、トレンチ構造のパワーMOSFETの試作を発表した。耐圧900V、チップ寸法3mm $\square$ で、300Aの電流を流している。ON抵抗は2m Ω/cm^2 台で、SiのIGBTの1/5になっている。(図7)

3. SiC・パワーJFET

Infineon Technologiesは、縦型構造のパワー接合型FET (JFET) も開発を進めている。これは、入力電圧が零の時でもドレイン電流の流れるデプレッション型特性を示す。一般パワーデバイスは入力電圧が零の時は電流の流れないエンハンスメント型が要求されている。JFETの場合はMOSFETと異なり、酸化膜-半導体界面の電流を利用してないので界面移動度の心配もなく、安定な特性が得やすい特徴がある。安価な低耐圧のパワーMOSFETとカスコード接続を採用することによりエンハンスメント・デバイスと同じように用いることができる。ただし、MOSデバイス(エンハンスメントタイプである)が実現できた場合は装置の小型化では不利である。

GaNパワーデバイスの概況

GaN結晶は青色LEDの開発が有名であるが、パワーデバイスとしても注目を浴びている。

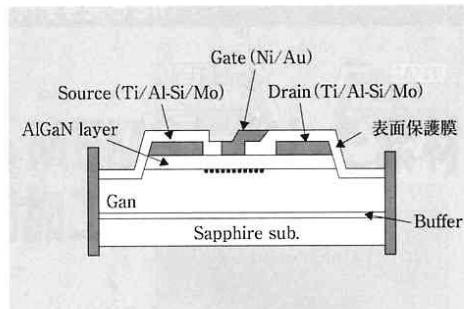


図8 AlGaIn/GaN HEMTの断面図 (古河電工)

GaN結晶は基板としては長い間良好な結晶が得られて来なかった。そのためサファイア・SiC基板の上にGaNエピ層を成長させることが一般的である。コストダウンのためにSi基板を使う開発も進んでいるが、結晶性は少し劣っている。Si基板が使えれば、ウェーハの大口径化にも有利で、大きな市場を形成する可能性を秘めている。

GaN系結晶はヘテロ接合を形成することができ、GaAs系で開発が進んだHEMT構造を作れる。(HEMT=High Electron Mobility Transistor) HEMTはヘテロ接合界面に電流を流すデバイスであり、SiCで苦労している酸化膜界面での移動度の低下を心配しなくて良い。

1. GaN高周波パワーHEMT

高周波デバイスは、絶縁性基板の上に薄い活性層をエピタキシ成長させたウェーハを使ったHEMT構造が主であり、数GHz以上の高周波電力増幅用に数社で商品化が始まっている。HEMTの基本断面構造図の例を図8に示す。この高周波パワー領域はすでに実用化の一端を確保したと言える。

2. GaNスイッチング用パワーMOSFET

スイッチング用高耐圧大電流用パワーデバイスとしては、SiCと同じく基板に電流を流す縦型構造が適している。GaN結晶の低抵抗ウェーハ基板開発が進み、デバイス開発に使えるようになって来た。GaNパワーMOSFETとしてはSiCデバイスより開発が遅れているが、将来は有望なデバイスと思われる。

最近ロームから発表されたトレンチ構造のパワーMOSFETの断面構造とその特性を図8に示す。チップ寸法はいまだ59 $\times$ 533 μm^2 と小さいが、これを大面積で作れるようになれば有力な候補となるであろう。

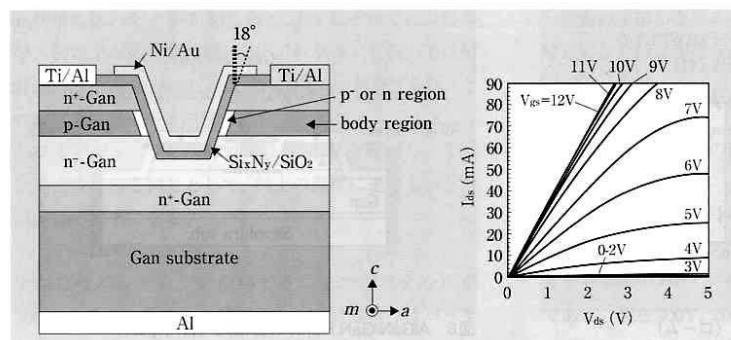


図9 GaN トレンチ MOSFET の構造図と特性（ローム）

今後の課題と将来性

ワイドギャップ半導体（SiC、GaN）は本質的にSiに対して優れた高耐圧、低ON抵抗、高速スイッチング特性のために、現在のエレクトロニクスの課題である省エネルギーの強い要望に応えられるとして期待を集めてきた。特に周波数変換装置、ハイブリッドカー、太陽電池電源装置などに注目が集まっている。一方SiもCoolMOSなどの新技術によって従来のSiの材料限界を超えるような優れたデバイスが商品化され、また、IGBTも進化を続けている。従って、ワイドギャップ半導体にもさらなる技術改革が求められている。

SiCのショットキ・バリア・ダイオード（SBD）はこのような中で、高耐圧（2～3KVまで）、高速性と低消費電力の利点を生かして同分野でSiには対応できない領域に活路を見出したと言えるだろう。現実には600～1200VのSiC SBDが市場に導入され、その高いavalanche耐量が評価されている。

SiCのスイッチング・デバイスとしてはパワー周波数変換用としてSiCのSBDの回路搭載と共に期待されているが、Siの回路技術も向上しており、そう容易な分野ではない。ハイブリッドカーへの応用も同様な領域である。今後の技術開発による発展が期待される。

GaNのMOS FETは本文でも述べたようにまだSiとの競争場裏には入ってきていない。それはまだ大面積大電力化ができていないことによるとみられる。GaNのHEMTは優れた特性が出されているが、ノーマリオフ（normally off）特性（高い V_{th} ）と高耐圧、大電流化を实

現することがまだ研究段階にあるために、スイッチング用としては実用化の域にはない。高周波パワーの分野ではスイッチング用とは別にHEMTの優位性が示されている。

論文²⁾にも示されているように、やはり課題は結晶材料の高品質化と結晶プロセスの改善が鍵であろう。SiCでは今まで大きな問題であったマイクロパイプの密度は結晶技

術の改善によって現実には大きな問題でなくなりつつある。それでも良質な大きな直径の結晶ウェーハを廉価で購入しようとするはまだその壁は高いと言わざるを得ない。Creeは現在3インチのウェーハを販売してきた。最近に至ってCreeはマイクロパイプフリーという100mm径のn型4H-SiCを発表した（ICSRM, International Conference on Silicon Carbide and Related Materials, 2007）。また一方、大直径の異種基板（サファイア、Si）などにエピタキシャル結晶成長させればこの問題は解決するかもしれない。GaNでも事情は同じである。様々な会社がその課題に挑戦しているが、まだ道半ばであると思われる。論文³⁾によればGaN MOSFET（GaN基板上のエピ構造）のチャネル領域のP型キャリア濃度は $10^{17} \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$ となっているが、同領域のMg濃度は $4 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ であり、不純物の活性化率が低く、結晶欠陥に左右されていると見られる。如何に結晶を含めたデバイス構造制御が困難であるかを窺わせる。

課題は結晶技術、加工技術、プロセス技術に山積している。これらが改善された時こそbreakthroughの時であり、新しいwide band gap power deviceの時代が開かれるのではないだろうか。□

参考文献

- 1) “ワイドギャップ半導体”，長谷川・吉田編著，森北出版，(2006)
- 2) “Silicon Carbide Power Devices-Status and Upcoming Challenges” Peter Friedrichs, SiCED Electronics Development GmbH & Co. KG, a Siemens Company, European Conference on Power Electronics and Application, Sept. 2007
- 3) “Vertical GaN-based Trench Gate Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors on GaN Bulk Substrates” H. Otake et al. ROHM Co. Applied Physics Express 1 (2008) 011105