

# SiC パワーデバイス

SiC Power Devices

四戸 孝

SHINOHE Takashi

炭化ケイ素 (SiC) は Si の約 10 倍の絶縁破壊電界強度 ( $E_c$ ) を持ち、高耐圧・低損失の次世代パワーデバイス材料として期待されている。既に海外メーカーから 600 V 級 SBD (Schottky Barrier Diode) が製品化されて電源に組み込まれ始めており、スイッチング素子の研究開発も多くの研究機関や企業で活発に行われている。

東芝は、SiC デバイス設計の基礎となる移動度と耐圧の異方性の評価や、ショットキーリーク電流モデルの研究などの要素技術を積み重ね、SiC デバイスに適した新型接合終端構造 GRA-RESURF (Guard Ring Assisted-REduced SURface Field) や微細ゲート構造の採用などにより、SBD で Si ユニポーラ限界の 1/100、SIT (Static Induction Transistor) で 1/10 の特性オン抵抗を実現した。これらのデバイスにより、各種電源や電力変換装置の省エネルギー化と小型化が期待される。

Silicon carbide (SiC) has a 10 times higher electric breakdown field than silicon, and is expected to be an excellent material for next-generation high-voltage, low-loss power devices. Already, 600 V Schottky barrier diodes (SBDs) have been used for switching mode power supplies, and switching devices are being competitively developed in many research organizations and companies.

Toshiba has performed basic research on the anisotropy of carrier mobility and breakdown voltage as well as physical models of Schottky leakage current. We have developed a new junction termination structure for the guard ring assisted-reduced surface field (GRA-RESURF) especially suitable for SiC devices, as well as a fine gate layer structure for the static induction transistor (SIT). Specific on-resistances of 1/100 and 1/10 compared with the theoretical minimum on-resistances attainable in silicon unipolar devices have been attained for the SBD and SIT, respectively. These SiC power devices will help to reduce power loss and permit downsizing of various power supply units and power conversion equipment.

## 1 まえがき

次世代パワーデバイス用の材料としては、炭化ケイ素 (SiC)

のほかにも、表 1 に示すダイヤモンドや窒化ガリウム (GaN) などのワイドバンドギャップ半導体材料が候補として挙げられている。これらの材料は絶縁破壊電界強度 ( $E_c$ ) が Si より

表 1. ワイドバンドギャップ半導体材料の物性定数

Physical properties of wide band gap semiconductor materials

材 料	ダイヤモンド	GaN	4H-SiC	6H-SiC	3C-SiC	GaAs	Si
バンドギャップ (eV)	5.47	3.39	3.26	2.93	2.23	1.43	1.12
電子移動度 $\mu_e$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	2,200	900	1,000/850	80/400	800	8,500	1,400
正孔移動度 $\mu_h$ ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ )	1,600	150	115	90	40	400	600
絶縁破壊電界強度 $E_c$ (V/cm)	$1 \times 10^7$	$3.3 \times 10^6$	$2.5 \times 10^6$	$2.8 \times 10^6$	$1.2 \times 10^6$	$4.0 \times 10^5$	$3.0 \times 10^5$
熱伝導度 ( $\text{W/cmK}$ )	20	2.0	4.9	4.9	4.9	0.5	1.5
飽和速度 $v_{\text{sat}}$ (cm/s)	$2.7 \times 10^7$	$2.7 \times 10^7$	$2.2 \times 10^7$	$1.9 \times 10^7$	$2.0 \times 10^7$	$2.0 \times 10^7$	$1.0 \times 10^7$
誘電率	5.5	9.0	9.7	9.7	9.7	12.8	11.8
バルク成長		x			x		
エビ成長		x			x		
BM (対 Si)	27,128	653	340	191	30	16	1
BHFM (対 Si)	1,746	78	50	25	9	11	1
デバイスの種類	$\mu$ エミッタ パワー素子	青色発光素子, 高周波素子, 横型パワー素子	縦型パワー素子	GaN 用基板	中容量 パワー素子	高周波素子	全般

GaAs: ガリウムヒ素

性能指数:  $\text{BM} = \mu_e E_c^3$ ,  $\text{BHFM} = \mu_e E_c^2$

: パワーデバイスとして広く使われているレベル

: 使い始められるレベル

: 研究報告はあるがまだ使えないレベル

x: 使い物にならないレベル

1けた程度大きく、耐圧を保持するためのドリフト層を1/10程度まで薄くできるため、パワーデバイスの低損失化を実現できる。そのほかにも、高温動作(SiCでは650動作の報告がある)、高い熱伝導度(SiCは銅(Cu)並み)、大きな飽和電子ドリフト速度などの優れた物性値を持っている。

表中のバリガー性能指標(BM)はユニポーラ素子のドリフト層抵抗の逆数になっており、パワーデバイスの導通損失を比較する性能指標であるが、ダイヤモンドが格段に大きく、GaN、4H-SiC、6H-SiC、3C-SiC(いずれもSiCの結晶多形<sup>(注1)</sup>)とバンドギャップの大きさの順に並んでいる。例えば、4H-SiCのBM(対Si)=340は、ユニポーラ素子のドリフト層抵抗をSiの1/340まで小さくできることを意味している。これにより、Siではバイポーラ素子しか使えないような高耐圧領域でも、SiCではユニポーラ素子が使えるようになり、高周波化による電源の小型化などのメリットを出すことができる。これらの材料の中では、特に4H-SiCが材料特性、結晶品質、製造プロセスの成熟度、デバイス開発の進捗度などの点で実用化にもっとも近く、既に海外メーカーでは600V-6AのSiC-SBD(Schottky Barrier Diode)が製品化され電源に組み込まれ始めている。スイッチング素子の研究開発も多くの研究機関や企業で活発に行われており、家電、自動車、電力などのパワーエレクトロニクス応用分野においても、応用装置への適用時期について関心が高まってきている。

## 2 SiC基板の高品質化，大口径化

SiCはSiと炭素(C)原子から成る単位層の最密充填(じゅうつん)構造から成るが、その重なり方の周期的な違いから200種類もの結晶多形が存在する。その中で主なものは六方晶の4H、6H及び立方晶の3Cの3種類である。パワーデバイス用としては移動度の高い4Hが主流となっており、6Hは青色発光素子などのGaN用基板として使われている。

4Hと6H単結晶の製造には、炭素をつば内でSiC粉末を2,500程度に加熱して種結晶上に昇華再結晶させる、改良Lely法(昇華法)という成長方法を用いる。従来は、マイクロパイプと呼ばれる致命的な貫通欠陥が問題となっていたが、最近では、市販レベルでも数個/cm<sup>2</sup>程度まで改善が進み、10A級のチップサイズまで実用的な歩留りで製造できるようになってきた。現在は2インチから3インチへの移行期であるが、2004年には4インチが市販される見込みであり、材料コストの低減が進んで、パワーデバイスの事業化にますます弾みがつくものと思われる。一方、3Cは6インチSi基板上に成長できることと、製造プロセスがSi並みに低温化できる可能性がある(4Hと6Hではイオン注入後に

1,600以上のアニールが必要)ことにより、材料コストの劇的な低減と既存Siパワーデバイス製造ラインの活用という点で非常に大きなポテンシャルを秘めている。Siとの格子不整合に起因して発生する高密度の面欠陥が長い間解消されなかったが、近年になってアンジュレーションSi基板を用いる新技術によりかなり改善され、3Cバルク基板の市販が始まった。まだ十分な品質とは言えないが、今後の品質改善が期待されている。

## 3 4H-SiCパワーデバイス設計の基礎技術

4H-SiC材料をパワーデバイスに用いる際には、六方晶系という結晶構造に起因する物性値の異方性を持つことと、Siの約10倍という高い絶縁破壊電界強度を持つことの2点に特に注意する必要がある。ここでは、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)プロジェクト“超低損失電力素子技術開発”の一環として行った高品質エピタキシャル成長層を用いた試作により、物性定数の異方性とショットキーリーク電流モデルについて検討した結果について述べる。

### 3.1 物性定数の異方性<sup>(1),(2)</sup>

図1(a)は4H-SiCの移動度の異方性を示したもので、通常のウェーハ断面にあたる結晶面((1120)面)に測定用の素子を15°ずつ傾けて配置し移動度を測定した結果である。電子移動度 $\mu_e$ はウェーハ厚さ方向が20%程度大きく、縦型パワーデバイスに適した特性になっている。正孔移動度 $\mu_h$ の結晶方位依存性は、電子とはまったく逆の傾向になっている。なお、ウェーハ面内では素子を傾けて配置しても特性オン抵抗に変化はないので、パターン配置には自由度がある。

図1(b)は、耐圧を決めている衝突イオン化係数の電界強度依存性の異方性を示したものである。通常のウェーハとその断面にあたる結晶面とにPINダイオードを試作して、光

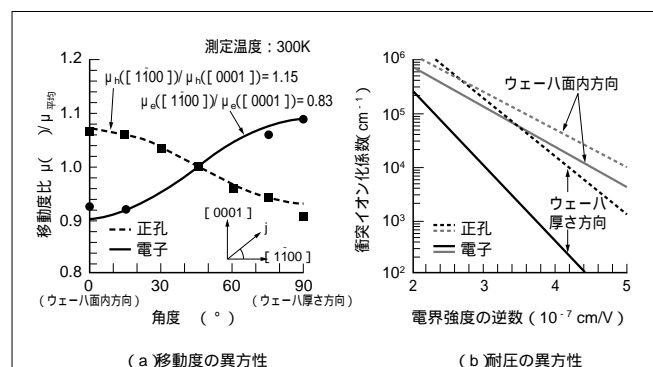


図1. 4H-SiCの移動度と耐圧の異方性 - 4H-SiCは六方晶系という結晶構造を持つため、物性定数に異方性がある。ウェーハの厚さ方向の電子移動度や耐圧が高く、縦型パワーデバイスに適した物性値を示す。  
Anisotropy of carrier mobility and breakdown voltage

(注1) 同一の組成で異なる結晶構造をとること。

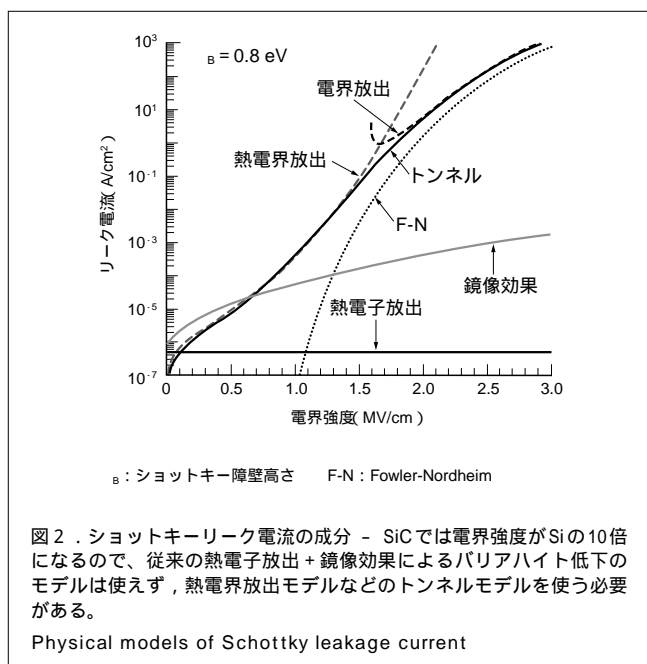
#### 4 SBDの開発

励起によるリーク電流の増倍を測定して求めた。Siの場合とは逆に、正孔の衝突イオン化係数が電子よりも大きくなっている。ウェーハ厚さ方向のほうが衝突イオン化係数が小さく(耐圧が大きく)、こちらも縦型パワーデバイスに適した特性になっている。ウェーハ面内方向の耐圧はウェーハ厚さ方向の耐圧の60%しか出ないことがわかった。

このように、4H-SiCには移動度や耐圧の異方性があり、パワーデバイスの設計にあたっては、十分に配慮する必要がある。

##### 3.2 ショットキーリーク電流の成分<sup>(3)</sup>

注意深く用意した清浄なSiC結晶表面上では、電極金属の仕事関数とショットキー障壁高さとの間に直線的な関係(傾きが1)が成り立っていることが報告されており、リーク電流やオン電圧の仕様に依じて、最適な電極金属をこの中から選択できる。実際には、製造プロセス中に発生する界面ダメージなどによりショットキー障壁高さは高めになる傾向があり、プロセス条件には十分に注意する必要がある。図2は、オフ状態での逆方向リーク電流をその成分ごとに表示したものである。Siでは、鏡像効果によるバリアハイト低下を考慮した熱電子放出モデルでリーク電流をよく説明することができ、素子設計にも一般的に用いられている。これに対し、SiCではSiより1けた高い電界強度で使用するために、量子力学的なトンネル効果の成分が主体となり、もはや同じモデル式を使うことはできない。簡略化した熱電界放出のモデル式を導出して4H-SiC SBDのリーク電流と比較したところ、よく一致していることが確認された。このモデル式を用いることにより、リーク電流上限値を決めてオン電圧が最小となる最適なショットキー障壁高さを簡単に求めることができるようになった。

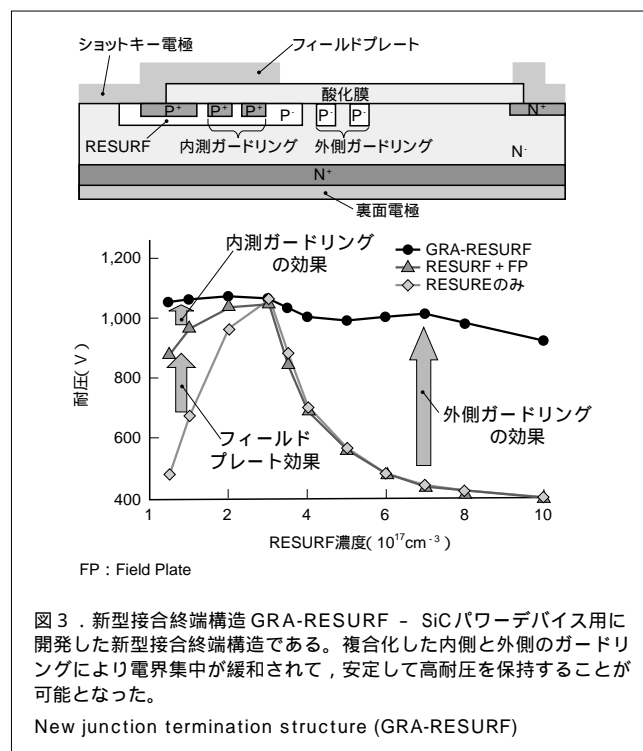


Si-SBDは耐圧200V以下の低耐圧用ダイオードであるが、SiCでは耐圧4kV以下で使われる高耐圧用ダイオードである。SiCではpn接合の拡散電位が2.5V程度と非常に大きく、PiNダイオードでは原理的にオン電圧をこれ以下にはできない。そのため、耐圧4kV程度を境にして、それ以下ではSBDやJBS(Junction Barrier Schottky diode)を使うほうがオン電圧を小さくすることができる。それ以上の耐圧領域ではPiNダイオードを使うことになるが、通電状態で結晶欠陥が増殖してオン電圧が増大する不良モードが発見されて、バイポーラ素子の実用化の大きな障害となっている。これを防止するために結晶品質の改善が精力的に進められているが、実用化にはしばらく時間が必要と考えられる。

SBDはもっとも基本的なユニポーラデバイスであり、SiCの材料特性がストレートに発揮できるデバイスである。前述したように、既に製品化が始まっており、高速性能が活かせるPFC(Power Factor Correction)回路に適用されている。200W級スイッチング電源にSiC-SBDを適用した例では、高周波化と損失低減により、受動部品の小型化やヒートシンクとファンの削除などが達成され、コンパクトな電源を実現したと報告されている。今後、Si-IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)とのペアで使われるなど、適用用途が広がっていくと期待される。

##### 4.1 新型接合終端構造 GRA-RESURF<sup>(4)</sup>

図3は、東芝がSiCパワーデバイス用に開発した新型接合



終端構造 GRA-RESURF( Guard Ring Assisted-REduced SURface Field )の断面図と、耐圧のRESURF濃度依存性を従来構造と比較したものである。従来のRESURF構造だけの場合は、濃度が最適値からわずかにずれるだけで耐圧は数百Vも低下するのにに対し、GRA-RESURF構造では、複合化した内側と外側のガードリング構造によって電界集中を緩和し、耐圧の濃度依存性を極めて小さくすることができる。この新型接合終端構造の採用により、SiよりP濃度や界面準位・固定電荷が変動しやすいSiC製造プロセスにおいても、安定して高耐圧を保持することが可能となった。

#### 4.2 開発した SiC-SBD の特性

図4は、当社が開発したSiC-SBDの特性オン抵抗をベンチマーキングしたものである。世界トップレベルの報告ライン(点線)に乗っており、1.2 kV-2.6 m cm<sup>2</sup>( Siユニポーラ限界の1/100の特性オン抵抗)を実現している。図中の写真は、12 A品をTO-220にパッケージングしたものである。このSiC-SBDを同じ耐圧のSiのPiNダイオードと比較すると、

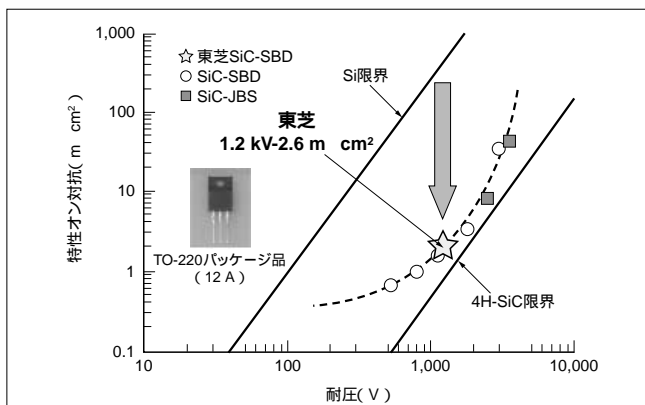


図4 . 開発した SiC-SBD の特性オン抵抗 - Siユニポーラ限界の1/100の特性オン抵抗を実現した。図中の写真は TO-220にパッケージングした12 A級SiC-SBDである。

Specific on-resistance of SiC Schottky barrier diodes

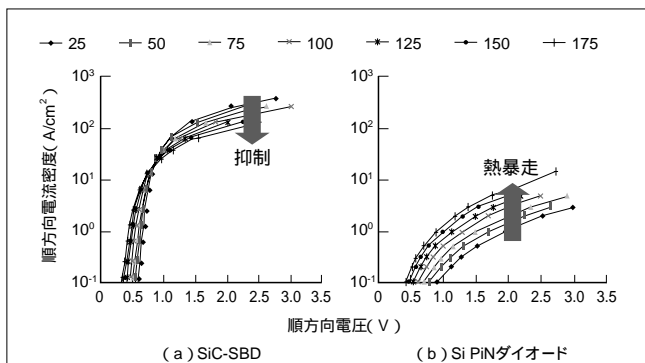


図5 . 優れた温度特性(1) : 順方向電流 - SiC-SBDは高温になると電流が抑制されるので、多数チップの並列接続が容易にできる。

Excellent temperature dependences (1): forward I-V

特に高温で際だって良い特性を示す。図5は、順方向電流の温度依存性を示したものである。Si PiN ダイオードでは高温で電流が増加するので熱暴走しやすいが、SiC-SBDはユニポーラ素子なので、高温で電流が減少して電流が均一化する方向に働き、熱暴走は起きにくいことがわかる。このため、SiC-SBDは並列接続が容易であり、10 A以下のチップを多数並列接続して大電流ダイオードとして使うことも可能である。また、図6に示したように、SiC-SBDでは空乏層が広がる際の容量性電荷の排出しかないので、逆回復電荷が小さい上に温度依存性がなく、スイッチング素子側のターンオン電流のオーバシュートが小さいままで高温動作させることができ、大幅なターンオン損失の低減が可能となる。

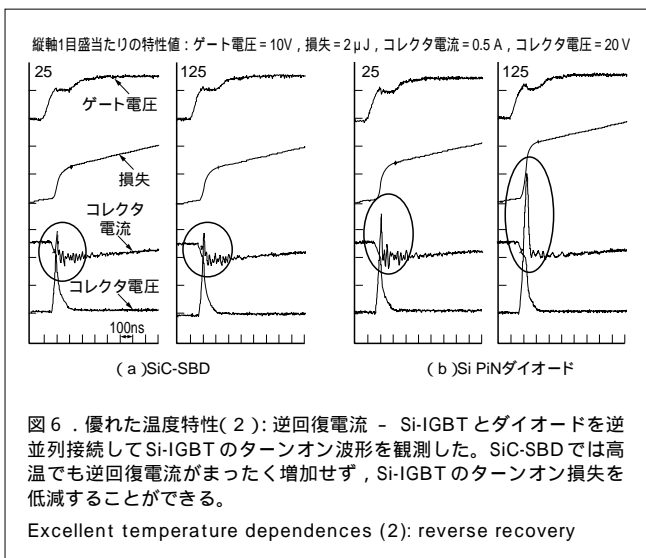


図6 . 優れた温度特性(2) : 逆回復電流 - Si-IGBTとダイオードを逆並列接続してSi-IGBTのターンオン波形を観測した。SiC-SBDでは高温でも逆回復電流がまったく増加せず、Si-IGBTのターンオン損失を低減することができる。

Excellent temperature dependences (2): reverse recovery

## 5 SITの開発<sup>(5)</sup>

Siではスイッチング素子というパワー MOSFET( MOS (金属酸化膜半導体)型電界効果トランジスタ)やIGBTなどのMOSゲート素子が一般的であるが、SiCではパワー MOSFETでやっと10 m cm<sup>2</sup>を下回るオン抵抗が報告されるようになった段階であり、Siのスーパージャンクション素子より少し良い程度でしかない。その原因は、SiC(特に4H-SiC)ではMOS界面準位密度が非常に高く、ソースから注入された電子のほとんどが捕獲されて伝導に寄与しないからである。要素実験としては、酸化雰囲気制御したりチャネル構造を工夫したりすることにより200 cm<sup>2</sup>/Vsを超えるMOSチャネル移動度が実証されたが、スループロセスへの適用はこれからの課題である。また、ゲート酸化膜の信頼性がSi上より低いことも実用化での問題となっている。ゲート酸化膜にかかる電界強度を低減するために埋込みP型層を形成するとともに、酸化膜自体の絶縁耐圧改善が必要である。SIT(Static Induction Transistor)は、これらMOSチャネル移動度と

ゲート酸化膜の信頼性の問題を回避できるために、SiCでは盛んに開発が行われている。海外メーカーから Si-MOSFET と SiC-SIT (ノーマリオン) をカスコード接続したデバイスのサンプル供給が開始されている。

当社で試作した SIT の素子構造断面図と特性オン抵抗のベンチマークを図7, 図8に示す。図中の写真は5A素子のチップ写真である。チャンネルをはしご状に配置することでセルの微細化、高密度化を図り、MeVのイオン注入によって低抵抗の深いBoxプロファイル(箱型)状ゲート層を形成している。耐圧と特性オン抵抗は、300Vで7.8m cm<sup>2</sup>, 500Vで10m cm<sup>2</sup>, 600Vで13m cm<sup>2</sup>, 800Vで15m cm<sup>2</sup>, 1,100Vで28m cm<sup>2</sup>を得ている。これはSiユニポーラ限界の1/10程度の値になっている。ただし、これはSiのスーパージャンクション素子をわずかに超える程度の値であり、更に数分の一の特性オン抵抗を目指して開発を進めていく。

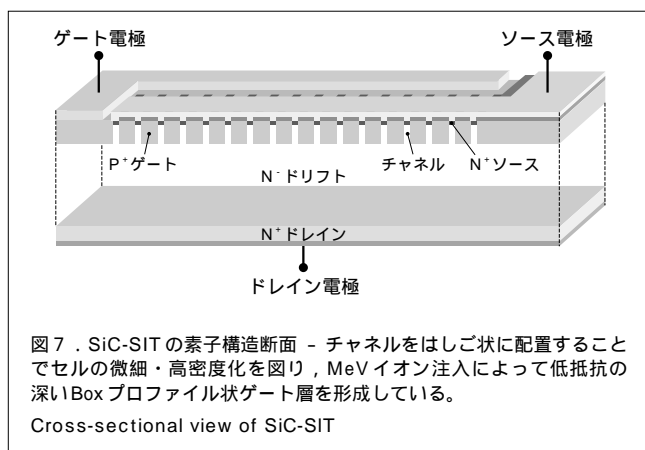


図7. SiC-SITの素子構造断面 - チャンネルをはしご状に配置することでセルの微細・高密度化を図り、MeVイオン注入によって低抵抗の深いBoxプロファイル状ゲート層を形成している。

Cross-sectional view of SiC-SIT

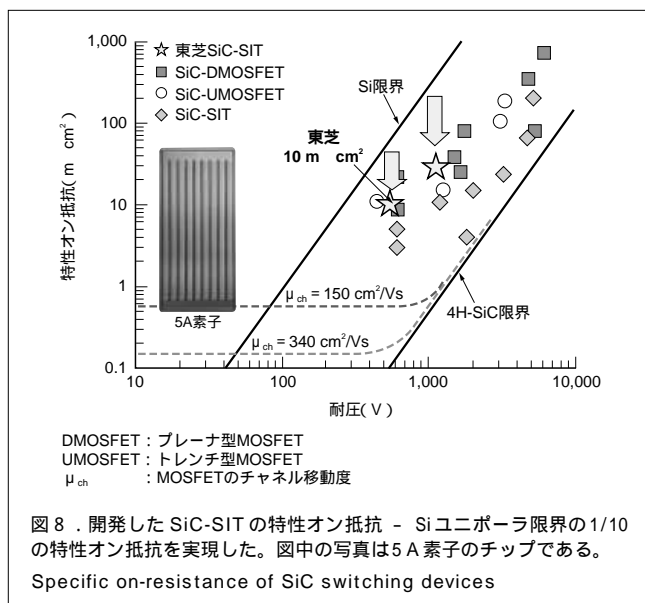


図8. 開発した SiC-SIT の特性オン抵抗 - Siユニポーラ限界の1/10の特性オン抵抗を実現した。図中の写真は5A素子のチップである。

Specific on-resistance of SiC switching devices

## 6 あとがき

SiCに特有な移動度と耐圧の異方性の評価や、高電界強度に起因するショットキー電流モデルの再検討など設計基礎技術を固め、SiCデバイスに適した新型接合終端構造 GRA-RESURF や微細ゲート構造の採用などにより、SBDでSiユニポーラ限界の1/10, SITで1/10の特性オン抵抗を実現した。今後、SBDとSIT共に、Si素子に対して格段の優位性を持つ特性を目指して開発を進める。

なお、この研究の一部は、NEDOから(財)新機能素子開発協会に委託された、超低損失電力素子技術開発の研究の一環として行われたものである。

## 文献

- (1) Hatakeyama, T., et al. Measurement of Hall Mobility in 4H-SiC for Improvement of Accuracy of the Mobility Model in the Device Simulation. Materials Science Forum. 433-436, 2003, p.443 - 446.
- (2) Hatakeyama, T., et al. Impact Ionization Coefficients of 4H-SiC. 10th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2003. Lyon, France, 2003-10, to be published in Materials Science Forum Series.
- (3) Hatakeyama, T., et al. Optimum Design of a SiC Schottky Barrier Diode Considering Reverse Leakage Current due to Tunneling Process. Materials Science Forum. 433-436, 2003, p.831 - 834.
- (4) Kinoshita, K., et al. Guard Ring Assisted RESURF: A New Termination Structure Providing Stable and High Breakdown Voltage for SiC Power Devices. Proceedings of the 14th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs 2002. Santa Fe, NM, 2002-06. IEEE, 2002, p.253 - 256.
- (5) Mizukami, M., et al. A 600V Deep-Implanted Gate Vertical JFET. 10th International Conference on Silicon Carbide and Related Materials 2003. Lyon, France, 2003-10, to be published in Materials Science Forum Series.



四戸 孝 SHINOHE Takashi

研究開発センター 個別半導体基盤技術ラボラトリー研究主幹。Si縦型パワー半導体素子、SiCパワー半導体素子の研究・開発に従事。電気学会、応用物理学会会員。Advanced Discrete Semiconductor Technology Lab.