

1.2 kV SiC スーパー Junction ション MOSFET

1.2 kV SiC Super Junction MOSFET

俵 武志 TAWARA, Takeshi

馬場 正和 BABA, Masakazu

竹中 研介 TAKENAKA, Kensuke

4H-SiC を材料にした 1.2 kV 耐圧の SiC スーパー Junction ション MOSFET (SiC-SJ-MOSFET) を n 型エピタキシャル成長と Al イオン注入を繰り返して作製し、静特性とリカバリー特性を評価した。SiC-SJ-MOSFET の 175℃ のオン抵抗は、従来の SiC トレンチゲート MOSFET に比べて、55% ~ 67% に低下した。またリカバリー特性についても、175℃ ではわずかに蓄積電荷量が増加する程度であり、過大なサージ電圧も見られなかった。これらの結果から SiC-SJ-MOSFET をインバータ回路に適用した際には、トータル損失の低減が期待できる。

Fuji Electric formed a 4H-SiC-based 1.2-kV SiC super junction MOSFETs (SiC-SJ-MOSFETs) by repeating n-type epitaxial growth and Al ion implantation and verified its static and recovery characteristics. The on-resistance of the SiC-SJ-MOSFETs at 175°C was 67% to 55% that of the conventional trench gate MOSFETs. In terms of recovery characteristics, the SiC-SJ-MOSFETs did not show an excessive surge voltage despite a slight increase in accumulated charge at 175°C compared with conventional SiC trench gate MOSFETs. We expect that the use of SiC-SJ-MOSFETs in inverter circuits will contribute to reducing total loss.

① まえがき

炭化けい素 (SiC) を基板に用いた SiC パワーデバイス、シリコン (Si) よりも絶縁破壊電界が一桁高い材料特性を生かし、ドリフト層のドーピング濃度を高めることで導通損失を減らすことができる。富士電機では、650 V ~ 3.3 kV 耐圧クラスの SiC-SBD (Schottky Barrier Diode) や 1.2 kV 耐圧クラスの SiC-MOSFET (Metal Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) を量産している。長年、SiC-MOSFET に関しては導通時のチャネル抵抗が高く、特性オン抵抗 $R_{on} \cdot A$ が下がらない問題があった。近年、トレンチゲートを採用したセルピッチの縮小や短チャネル技術により、チャネル抵抗の低減が急速に進んでいる⁽¹⁾。今後、さらなる $R_{on} \cdot A$ の低減のためには、MOSFET 抵抗の主要な部分を占めるドリフト層抵抗のより一層の低減に取り組む必要がある。

本稿では、ドリフト層抵抗を低減した 1.2 kV 耐圧クラスの SiC スーパー Junction ション MOSFET (SiC-SJ-MOSFET) のデバイス特性について主に述べる。

② SJ 構造のメリット

スーパー Junction ション (SJ) 構造は耐圧を低下させずに、ドリフト層抵抗を効果的に下げることができる構造である。1997 年に発表されて以来、各社で開発が行われている⁽²⁾。縦型 SJ 素子の場合、ドリフト層に周期的な p-n カラム構造を形成することにより、従来の素子に比べて

$(32/27) \cdot (d \cdot E_c / V_B)$ 倍にドリフト層抵抗を下げることができる⁽²⁾ (d 、 E_c 、 V_B はそれぞれ、カラム幅、絶縁破壊電界および耐圧)。SJ 構造ではカラム幅を微細化することでオン抵抗を下げるのが可能であり、Si の SJ-MOSFET では Si 限界を超えて低いオン抵抗が得られている。一方、絶縁破壊電界が Si より一桁高い SiC に適用した場合でも耐圧が高い素子ではドリフト層抵抗を十分に低減できる。例えば SiC を用いて耐圧 1.6 kV の SJ-MOSFET⁽³⁾ を作製した際には、ドリフト層抵抗はおおよそ半分になると推定される。図 1 に Si-SJ-MOSFET、Si-IGBT、SiC-MOSFET、SiC-SJ-MOSFET のオン抵抗と耐圧の関係を示す。SJ 構造によって SiC の場合でも高耐圧素子になるほどトレードオフは改善する。

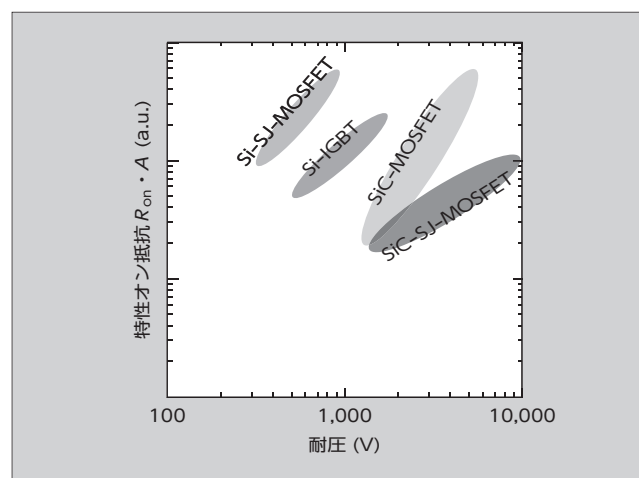


図 1 特性オン抵抗と耐圧の関係

〈注 1〉特性オン抵抗：単位面積で規格化したオン抵抗。導通損失の性能指標。

図2 試作した素子構造

図4 SJ構造の断面SEM像

る。図4に試作した標準 SiC-SJ-MOSFET と SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET の断面 SEM (Scanning Electron Microscope) 像を示す。多段エピタキシャル成長方式により、垂直な p カラムが形成できていることが分かる。

4 静特性

作製した素子は 3 mm×3 mm サイズであり、TO-247 パッケージに組み込んで評価した。なお、各素子の定格電流は 18 A (330 A/cm²) である。

試作した素子の室温および 175 °C でゲート電圧を 20 V に設定したときの $R_{on} \cdot A$ の温度依存性を図5に示す。SiC-non-SJ-MOSFET に比べ、いずれの温度でも標準 SiC-SJ-MOSFET と SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET はオン抵抗が低下し、さらに高温でオン抵抗が上昇しにくい特徴を示した。標準 SiC-SJ-MOSFET の 175 °C の $R_{on} \cdot A$ は、SiC-non-SJ-MOSFET に比べて 67% に低下した。また同様に SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET では 55% に低下した。SiC-SJ-MOSFET のオン抵抗が高温で大幅に下がる理由は、高温になるほど電子移動度が低下してドリフト層抵抗が増大し、オン抵抗におけるドリフト層抵抗の占める割合が増え、SJ 構造の効果が顕著になるためである。

標準 SiC-SJ-MOSFET と SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET の $R_{on} \cdot A$ を比べると、室温では差がほぼないものの、175 °C では SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET の方が低い値を示した。その理由として、室温ではチャネル抵抗、基板抵抗や JFET 抵抗^(注2)などに比べドリフト層抵抗が小さいので、試作した素子間の差が顕著ではなかった。しかし、高温では電子移動度の低下によりドリフト層抵抗が大きくなるため、ピッチ縮小の効果が現れ、試作した素子抵抗の差が顕著になったと推測される。この結果から、ドリフト層抵抗が支配的な場合には、カラム幅を狭めて狭ピッチ化することでさらに SiC-SJ-MOSFET の抵抗を下げられる。

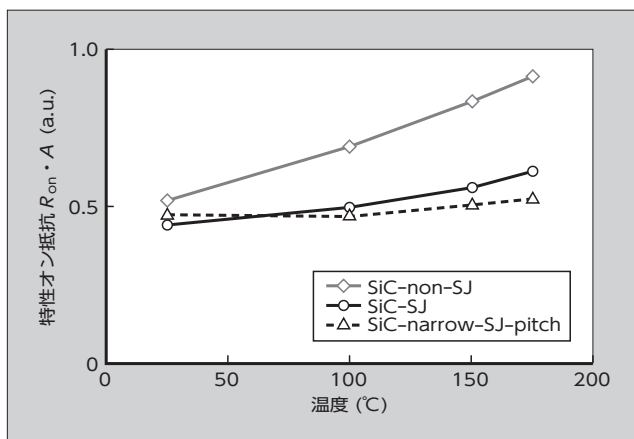


図5 特性オン抵抗の温度依存性

〈注2〉 JFET 抵抗：隣接する p 型領域からの n 型領域へ空乏層が伸びて電流通路を狭める JFET 効果によるオン抵抗増加分。

図6に室温の耐压波形を示す。いずれの構造も 1.2 kV 耐压クラスの素子として十分な特性を示した。

次にボディダイオードの I_F - V_F 特性と、特性から算出した微分コンダクタンス di/dv と V_F の温度依存性を図7および図8に示す。SiC-non-SJ-MOSFET は室温から 175 °C にするとわずかながら di/dv が増加（微分抵抗が減少）している。一方、標準 SiC-SJ-MOSFET、SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET では高温で di/dv が減少（微分抵抗が増加）している。高温におけるボディダイオードの微分

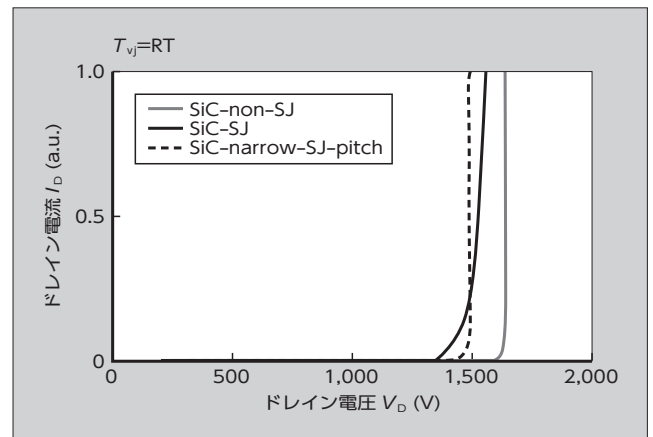


図6 耐压波形

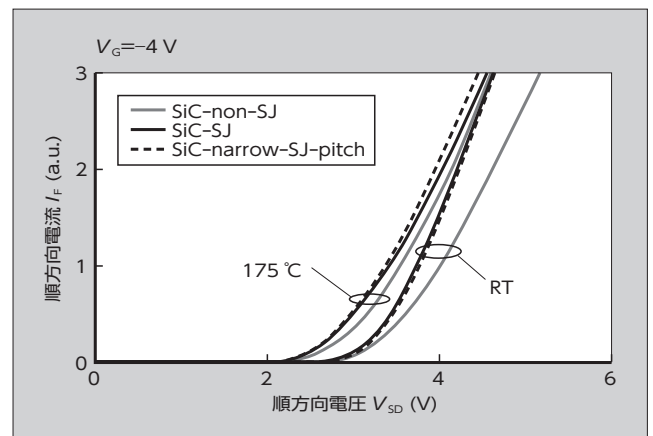


図7 ボディダイオードの I_F - V_{SD} 特性

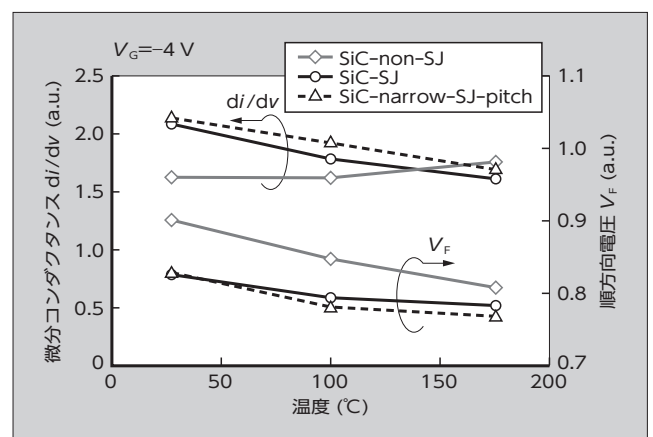


図8 ボディダイオードの di/dv 、 V_F の温度依存性

抵抗は、キャリア注入量の増加による抵抗減少と、移動度低下による抵抗増加のバランスで決まる。図8の結果から、高温において、SiC-SJ-MOSFETではSiC-non-SJ-MOSFETに比べてキャリア注入量が少なく、移動度低下の影響を強く受けていると考えられる。また、SiC-SJ-MOSFETでキャリア注入量が少ない原因としては、例えば、pカラム作製の際のイオン注入ダメージに起因してSJ構造部のキャリアライフタイムが短くなっていることなどが考えられる。

5 ボディダイオードのリカバリー特性と波形

近年、モジュールコスト低減や熱分布を改善するため、インバータ回路において外付けSBDの代わりにMOSFETの寄生ダイオード（ボディダイオード）を還流ダイオードとして用いることが検討されており、ボディダイオードのリカバリー特性が注目されている。Si-SJ-MOSFETではリカバリー特性が悪いことが報告されているが、SiC-SJ-MOSFETの場合についても調査する必要がある。

(1) ボディダイオードのリカバリー特性

スイッチング時のボディダイオードのリカバリー特性評価の結果について述べる。評価は図9に示す単純なチョップパ回路を用い、素子はSiC-non-SJ-MOSFET、標準SiC-SJ-MOSFET素子を用いた。ゲート電圧は

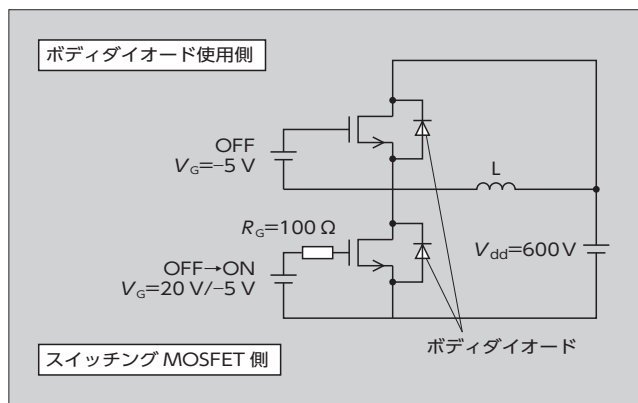


図9 スwitchング特性の評価回路

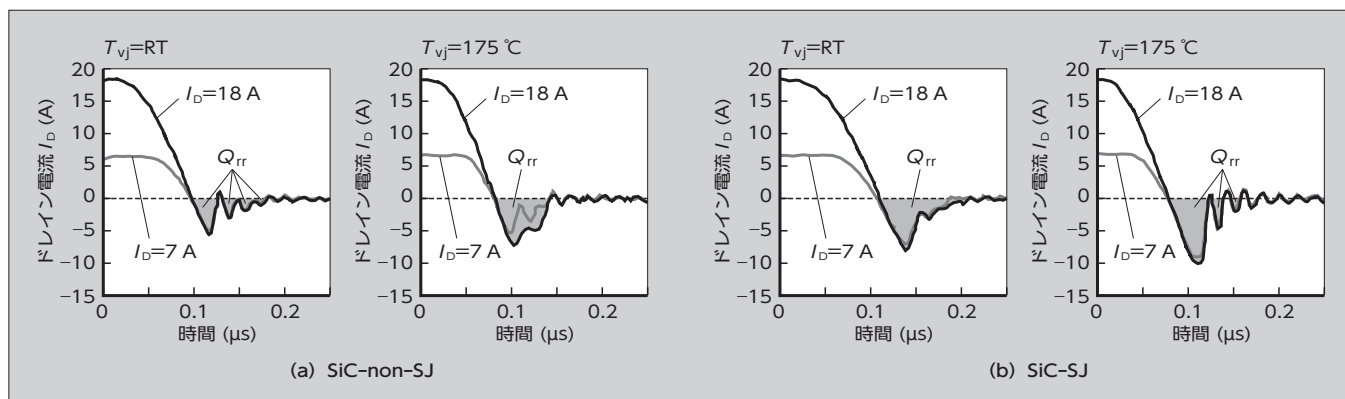


図10 ボディダイオードのリカバリー波形

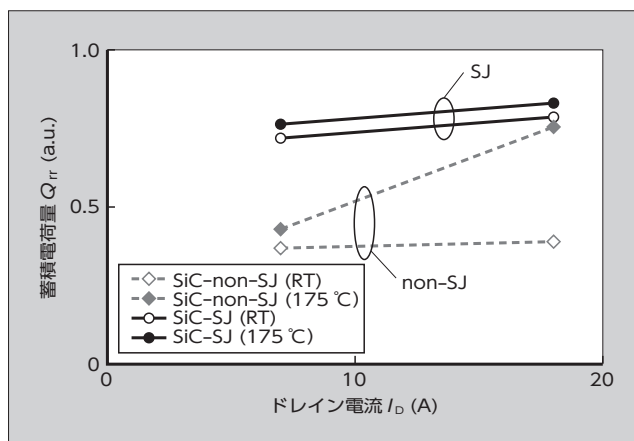


図11 Q_{rr} のドレイン電流、温度依存性

$V_G=+20\text{V}/-5\text{V}$ であり、ゲート抵抗は 100Ω である。図10に室温RTと 175°C のリカバリー波形を示す。ドレイン電流 I_D は 7A および 18A に設定した。図10に示すように蓄積電荷 Q_{rr} はリカバリー波形において、振動分を考慮した逆電流を時間積分した値である。ボディダイオードが順バイアスの際に素子内に蓄積される電荷量である Q_{rr} によって逆バイアス時に逆電流が流れて損失が発生するため、 Q_{rr} は小さいことが望ましい。Si-SJ-MOSFETではpnカラムから注入されるキャリアのライフタイムが長い⁽⁹⁾ため、 Q_{rr} が大きくなることが報告されている。

図11に示すように室温時や低電流密度の場合は、nカラム濃度、pn接合面積によるドレイン・ソース容量の違いを反映して、SiC-non-SJ-MOSFETに比べて標準SiC-SJ-MOSFETの Q_{rr} が高い。しかし、高温になりp層からのキャリア注入が増えてくると、SiC-non-SJ-MOSFETでは Q_{rr} が急増するのに対し、標準SiC-SJ-MOSFETでは Q_{rr} の増加量はわずかである。

Q_{rr} のドレイン電流、温度依存性の結果は、標準SiC-SJ-MOSFETがSiC-non-SJ-MOSFETに比べてキャリア注入効率が低いことを示唆しており、ボディダイオードの I - V 特性の温度変化とも整合している。このことから、高温、大電流通電時のスイッチング条件下では、標準SiC-SJ-MOSFETとSiC-non-SJ-MOSFETのリカバリー損失の差は小さくなる。

(2) ボディダイオードのリカバリー波形

ボディダイオードのリカバリー波形の di_R/dt について述べる。 di_R/dt は逆電流がピークを過ぎた後、ゼロになるまでの電流減少速度の最大値である。過大な di_R/dt は EMI ノイズや回路内にサージ電圧を発生させる原因となるため、値は小さいほうが望ましい。しかしながら、Si-SJ-MOSFET では注入されたホールがすぐに p カラム近傍から電界によって吐き出されるために、 di_R/dt が大きいハードリカバリー特性となることが知られている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。

SiC-non-SJ-MOSFET、標準 SiC-SJ-MOSFET、SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET の 175℃ のリカバリー波形を図 12 に示す。また波形から求めた di_R/dt 値の温度依存性を図 13 に示す。室温から 175℃ にかけて標準 SiC-SJ-MOSFET、SiC 狭ピッチ SJ-MOSFET の di_R/dt が大きくなるものの、SiC-non-SJ-MOSFET の 3～4 倍程度に抑制されており、ボディダイオードのサージ電圧に大きな差は見られなかった。

Si の SJ-MOSFET はボディダイオードの Q_{rr} やサージ電圧が大きいと、インバータ回路への適用は難しい。一方、SiC の SJ-MOSFET の場合、低 Q_{rr} や低サージ電圧が電子線照射などの特別な処理なしで実現できており、インバータに搭載するハードルは Si よりも低いと考えられる。今後、特性改善を進めることにより、リカバリー

特性に優れた SiC-SJ 素子の実現の可能性がある。

[6] あとがき

Semi-SJ 構造を備えた 1.2 kV 耐圧クラスの SiC-SJ-MOSFET について室温、高温での静特性、動特性の評価を行った。今回試作した SiC-SJ-MOSFET の 175℃ の $R_{on} \cdot A$ は、従来の SiC-non-SJ-MOSFET に比べて、55%～67% に低下した。SiC-SJ-MOSFET は温度依存性が小さいことから、将来的な超高温動作時には両構造の $R_{on} \cdot A$ の差は広がると期待される。SiC-SJ-MOSFET の低 $R_{on} \cdot A$ による定常損失が少ないメリットを生かし、さらにリカバリー特性を改善することで、インバータ回路への適用を目指す。

本研究は、共同研究体 つくばパワーエレクトロニクスコンステレーション (TPEC) 殿の事業として行われた。試作・評価、および議論に関してご協力頂いた小林勇介氏、京極真也氏、森本忠雄氏、熊澤輝顕氏、山城祐介氏、原田信介氏に深く謝意を表する。

参考文献

- (1) Harada, S. et al. "1200 V SiC IE-UMOSFET with Low On-Resistance and High Threshold Voltage". Mat. Sci. Forum 897 (2017) p.497.
- (2) Fujihira, T. "Theory of Semiconductor Superjunction Devices". Jpn. J. Appl. Phys. 36 (1997) p.6254.
- (3) Harada, S. et al. "First Demonstration of Dynamic Characteristics for SiC Superjunction MOSFET Realized using Multi-epitaxial Growth Method". IEDM (2018) p.181.
- (4) Deboy, G. et al. "A new generation of high voltage MOSFETs breaks the limit line of silicon". IEDM (1998) p.683.
- (5) Kosugi, R. et al. "First experimental demonstration of SiC super-junction (SJ) structure by multi-epitaxial growth method". Proc. ISPSD2014 (2014) p.346.
- (6) Kosugi, R. et al. "Breaking the Theoretical Limit of 6.5 kV-Class 4H-SiC Super-Junction (SJ) MOSFETs by Trench-Filling Epitaxial Growth". (Late News) Proc. ISPSD2019 (2019) p.39.
- (7) Lorenz, L. et al. "COOLMOSTM - a new milestone in high voltage Power MOS", Proc. ISPSD1999 (1999) p.3.
- (8) Saito, W. et al. "600V Semi-superjunction MOSFET". Proc. ISPSD2003 (2003) p.45.
- (9) Schmitt, M. et al. "A Comparison of Electron, Proton and Helium Ion Irradiation for the Optimization of the CoolMOSTM Body Diode". Proc. ISPSD2002 (2002) p.229.

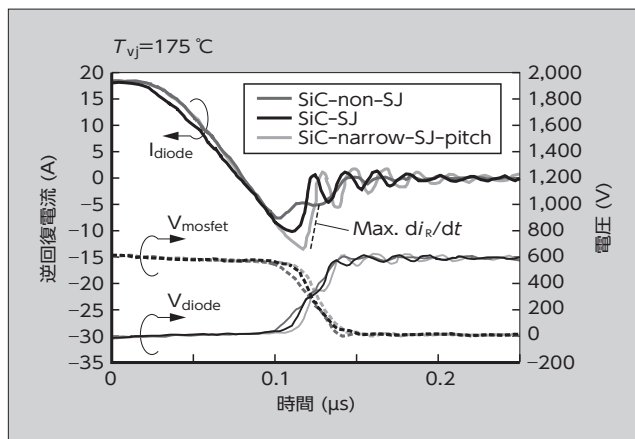


図 12 ボディダイオードのリカバリー波形の比較

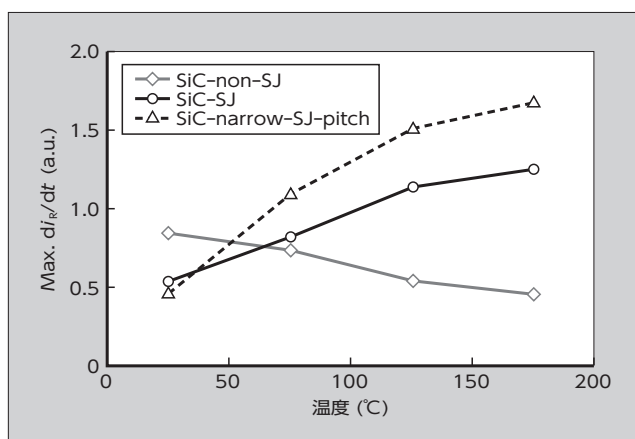


図 13 リカバリー波形の di_R/dt の温度依存性



俵 武志

SiC パワー MOSFET、SBD の研究開発に従事。現在、国立研究開発法人 産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センター（富士電機より出向）。応用物理学会、プラズマ・核融合学会会員。



竹中 研介

半導体デバイスの研究に従事。現在、国立研究開発法人 産業技術総合研究所先進パワーエレクトロニクス研究センター（富士電機より出向）。応用物理学会会員。



馬場 正和

SiC パワー MOSFET の研究開発に従事。現在、国立研究開発法人 産業技術総合研究所 先進パワーエレクトロニクス研究センター（富士電機より出向）。工学博士、応用物理学会会員。





＊本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。