

# SiC ショットキーダイオードの特性と欠陥の関係

渡辺行彦<sup>1</sup>・勝野高志<sup>1</sup>・石川 剛<sup>1</sup>・藤原広和<sup>2</sup>・山本敏雅<sup>3</sup>

<sup>1</sup>(株)豊田中央研究所 ☎ 480-1192 愛知県長久手市横道 41-1

<sup>2</sup>トヨタ自動車(株) ☎ 470-0309 愛知県豊田市西広瀬町桐ヶ洞 543

<sup>3</sup>(株)デンソー ☎ 470-0111 愛知県日進市米野木町南山 500-1

(2013年10月15日受付; 2013年11月27日掲載決定)

## Relationship between Characteristics of SiC-SBD and Surface Defect

Yukihiko WATANABE<sup>1</sup>, Takashi KATSUNO<sup>1</sup>, Tsuyoshi ISHIKAWA<sup>1</sup>, Hirokazu FUJIWARA<sup>2</sup> and Toshimasa YAMAMOTO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>TOYOTA Central R & D Labs. Inc., 41-1 Yokomichi, Nagakute, Aichi 480-1192

<sup>2</sup>TOYOTA MOTOR CORPORATION, 543 Kirigahora, Nishihirose-cho, Toyota, Aichi 470-0309

<sup>3</sup>Research Laboratories DENSO CORPORATION, 500-1 Minamiyama, Komenoki-cho, Nissin, Aichi 470-0111

(Received October 15, 2013 ; Accepted November 27, 2013)

The good relations between the reverse characteristics of 4H-SiC JBS diodes and the surface defects were obtained. The reverse characteristics of 4H-SiC JBS diodes were categorized in three groups as follows : (A) low blocking voltage, (B) high leakage current and (C) low leakage current. The groups of (A) and (B) were caused by the existences of the micropipe and small particles, and the carrot-like defects on the SiC surfaces, respectively. In group (C), nanosized circular cone shaped pits (nanopits) were observed at the leakage current sources. The positions of nanopits corresponded to the positions of threading dislocations.

KEYWORDS : SiC, diode, defect, leakage current

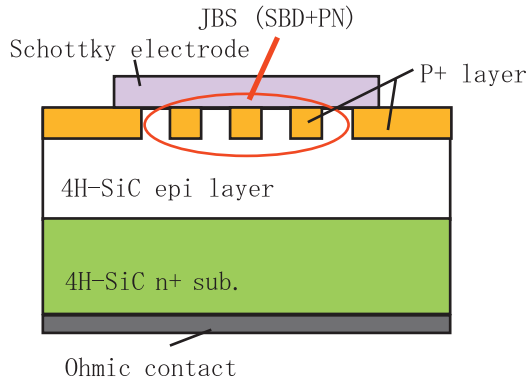
## 1. はじめに

シリコン(Si)を使ったパワーデバイスは、その物性値から耐圧や耐熱性が限界に近づきつつあり、ワイドバンドギャップ半導体を用いたデバイスが期待されている。ワイドバンドギャップ半導体である炭化珪素(SiC)の絶縁破壊強度は、Siに比べ約10倍大きいため、高耐圧・低損失の次世代パワーデバイス材料として注目されている。現在では、高品質かつ大口径のSiCウェハは製品化されており<sup>1,2)</sup>、多くの研究グループでデバイス開発がなされている<sup>3-6)</sup>。しかしながら、SiCダイオードは、逆方向特性に大きなばらつきが生じてしまう、といった課題が存在する<sup>7-9)</sup>。SiCダイオード特性にばらつきが生じることは、歩留まりが低くなるため、結果としてコストが高くなる、といった問題が生じる。そのため早急な原因究明が必要となる。SiCダイオードの逆方向特性

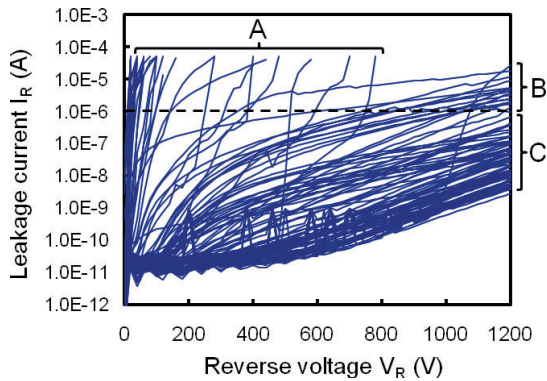
のばらつきが生じる原因の一つに、表面欠陥の存在が示唆されている<sup>10)</sup>。これまでに報告されている代表的な表面欠陥は、マイクロパイプ、異物、キャロットなどがあげられる<sup>7-10)</sup>。キャロットとは、人参の形状をした表面欠陥であり<sup>3,5,10)</sup>、類似した表面欠陥にコメットや三角欠陥なども存在するため欠陥の分類が難しく、逆方向特性のばらつき原因解明を阻害している。これら表面欠陥がSiCダイオードに存在する場合、どのような悪影響を及ぼすのか、多くの文献で報告されているが<sup>7-10)</sup>、その電気的特性と表面欠陥の関係は明らかになっていない。そこで、4H-SiCダイオードの逆方向特性と表面欠陥の関係を明らかにし、さらにデバイス特性に悪影響を及ぼす表面欠陥の構造を解析した。

## 2. 実験<sup>1)</sup>

市販品3インチの4°オフ基板4H-SiCウェハ上にFig. 1に示すような4H-SiC JBS (Junction Barrier Schottky) ダイオードを作製した。エピタキシャル層の厚さは13



**Fig. 1.** (color online). Schematic diagram of 4H-SiC JBS diode.



**Fig. 2.** (color online). Reverse characteristics of 4H-SiC diode.

$\mu\text{m}$ , 濃度は  $5.0 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , 不純物は窒素である。ショットキー電極には Mo を使用し, 電極サイズは  $3.9 \text{ mm}\phi$  とした。JBS ダイオードとは, Fig. 1 に示すようにに微細な p+ 層 (不純物はアルミ) が SiC 表面に多数イオン注入されているダイオードのことである。その特徴として, JBS ダイオードに逆バイアスを印加すると, p+ 層領域間に空乏層が広がってピンチオフし, リーク電流を抑制できる。本評価サンプルもリーク電流を抑制する目的で, JBS 構造の 4H-SiC ダイオードを解析に用いた。Fig. 2 に 4H-SiC JBS ダイオードの逆方向特性を示す。

Fig. 2 に示すように, 逆方向特性のばらつきを以下の 3 種類のモードに分類した。

- ・ A モード: 耐圧不良
- ・ B モード: 大リーク電流
- ・ C モード: 低リーク電流

これら A~C モードのサンプル数は, Table 1 に示すような割合で存在した。この中から無作為に, A モード 10 個, B モード 6 個, C モード 6 個を評価サンプルと

**Table 1.** The number of 4H-SiC JBS diode in the classification of the reverse properties.

	Classification of the reverse properties	Number of sample
A mode	Low blocking voltage	30%
B mode	High leakage current	12%
C mode	Low leakage current	58%

して選り解析した。

### 3. 結果および考察

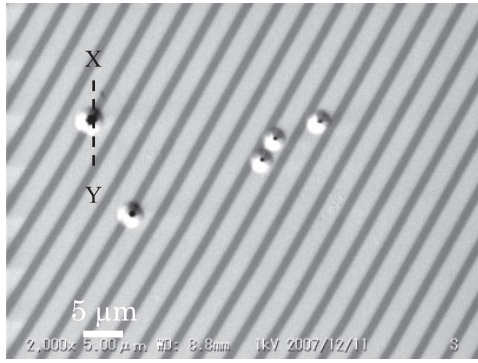
#### 3.1 耐圧不良 (A モード) の解析<sup>11,12)</sup>

耐圧不良である A モードのサンプルの表面電極を除去した後, SEM で SiC 表面を観察した。Fig. 3 (a) と (b) に観察された表面欠陥の一例を示す。Fig. 3 (a) で観察される表面欠陥は 5 個集まって存在し, その直径はマイクロサイズのオーダーであった (約  $1 \mu\text{m}$ )。その形状から, この表面欠陥は, マイクロパイプそのものと考えられる。Fig. 3 (b) は形状から, 異物であることがわかる。その異物の大きさはおよそ  $22 \mu\text{m}$  であった。解析した A モードの 10 サンプルすべてに, マイクロパイプもしくは異物が 1 個以上存在していた。以上のことから, これら表面欠陥が耐圧を低下させる原因であることがわかった。

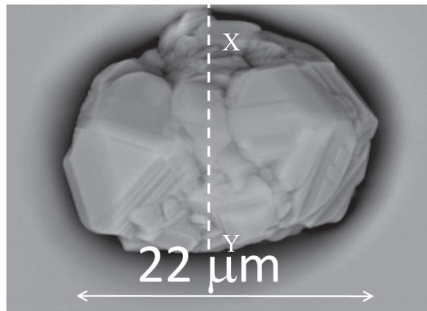
これら 2 種類の表面欠陥の起源を調べるために, 表面欠陥の断面加工を行い, SEM 観察した。マイクロパイプおよび異物の断面 SEM 像をそれぞれ Fig. 4 (a) および (b) に示す。なお Fig. 4 (a) および (b) は, それぞれ Fig. 3 (a) および (b) で示した X-Y 間を観察した。Fig. 4 (a) より, エピタキシャル層  $13 \mu\text{m}$  より深いところに空洞が観察されたため, マイクロパイプは SiC 基板からエピタキシャル層にかけて伝搬していると考えられる。一般的にマイクロパイプは, 耐圧を低下させるキラー欠陥であることが知られており<sup>10)</sup>, 本結果も同じであった。Fig. 3 (b) の異物の断面 SEM 観察より, 異物は球状の塊であり, エピタキシャル層に存在していることがわかった。このことから, 異物はエピタキシャル成長初期に混入したと考えられる。なお EDX により, 異物の元素分析を行ったところ, 異物は SiC であった。

異物 (SiC) がエピタキシャル膜に存在する原因として, エピタキシャル成長装置の側壁等に堆積した SiC パーティクルが, エピタキシャル膜成膜中に, SiC ウェハに降り注いだためと考えられる。

マイクロパイプや異物が存在する箇所ではショットキー電極がエピタキシャル膜中に進入し, 耐圧保持ができなくなると考えられる。

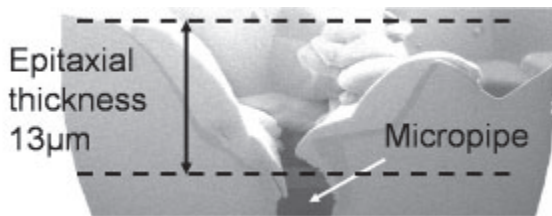


(a)

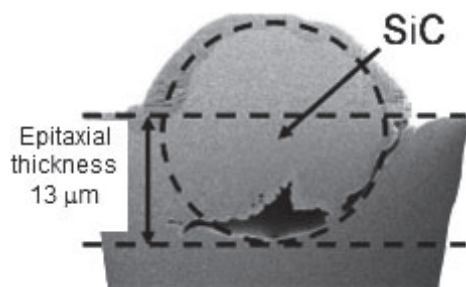


(b)

**Fig. 3.** SEM images of surface defects in samples of A mode. (a) Micropipe, (b) Particle.

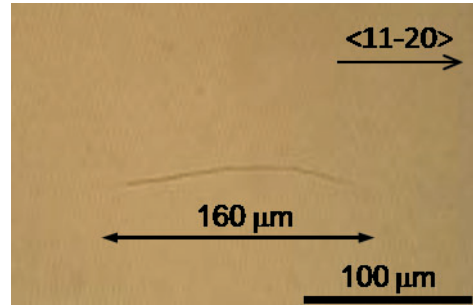


(a)

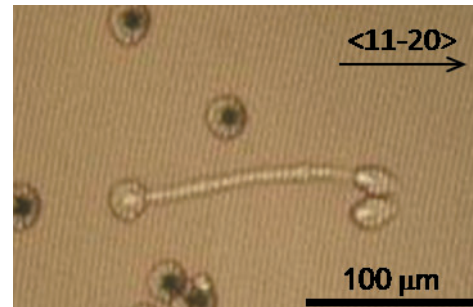


(b)

**Fig. 4.** Cross-sectional SEM images of surface defects in samples of A mode. (a) Micropipe, (b) Particle.



**Fig. 5.** (color online). Optical image of carrot-like defect observed in the samples of B mode.



**Fig. 6.** (color online). Optical image of carrot-like defect observed in the samples of B mode after molten KOH etching.

### 3.2 大リーク電流 (B モード) の解析<sup>11,12)</sup>

大リーク電流である B モードのサンプルの表面電極を除去した後、光学顕微鏡で SiC 表面を観察したところ、Fig. 5 に示すスジ状の欠陥が観察された。この欠陥は、キャロット・ライクな欠陥であると考えられる。このキャロット・ライクな欠陥の特徴として、 $\langle 11-20 \rangle$  方向に伸びており、長さは  $160 \mu\text{m}$  であった。なお評価した B モード 6 サンプルすべてに、キャロット・ライクな欠陥が観察され、かつ A モード (耐圧不良品) で見られるマイクロパイプや異物は観察されなかった。この結果から、キャロット・ライクな欠陥がリーク電流を増大させる欠陥であると考えられる。

Fig. 5 で観察された表面欠陥の欠陥種を同定するために、溶融 KOH エッチング後の表面欠陥の光学顕微鏡像を Fig. 6 に示す。キャロット・ライクな欠陥自体が顕著化させているが、そのほかの特徴として、その欠陥の左側と右側にエッチピットが出現した。キャロット・ライクな欠陥の左側には、円形/六角形のエッチピット、右側には、楕円形のエッチピットが 2 個観察された。なお上側の楕円ピットは、キャロット・ライクな欠陥と結ばれているが、下側の楕円ピットは、単独で存在していた。一般的に、エッチピットの形から結晶欠陥の種類を

同定することができ、円形は貫通刃状転位、六角形は貫通らせん転位、楕円形は基底面内転位であることが知られている<sup>13)</sup>。このことから、エッチピットの形状から判断すると、キャロット・ライクな欠陥の左側には貫通刃状転位もしくは貫通らせん転位であり、右側には基底面内転位であると考えられる。なお Fig. 6 には、キャロット・ライクな欠陥に關与するエッチピットのほかにも、エッチピットが観察された。これらのエッチピットは、貫通らせん転位および貫通刃状転位がエッチングされて出現したと考えられる。

キャロット・ライクな欠陥は、結晶性が悪いと考えられるので、断面 TEM 観察により、原子レベルでの断面構造を評価した。Fig. 7 にキャロット・ライクな欠陥の

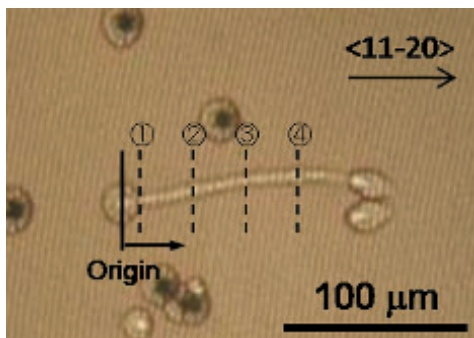


Fig. 7. (color online). Optical image of carrot-like defect (Positions ①～④ are observed by cross-sectional TEM images).

断面 TEM 観察を行った箇所 (①～④) の表面光学顕微鏡像を示す。①～④の位置は、キャロット・ライクな欠陥の左側のエッチピットの中心を原点とし、それぞれ 5, 42, 78, 108  $\mu\text{m}$  とした。Fig. 8 にキャロット・ライクな欠陥下部 4 箇所 (①～④) の断面 TEM 像を示す。箇所①～④すべてにおいて、一つの大きさが数 10 nm サイズの欠陥群が観察された。これら欠陥群は、立体的には球か棒状の断面の可能性が考えられるが、4 箇所 (①～④) すべてにおいて円形の欠陥が確認されたことから、この欠陥群は立体的には棒状の欠陥であると推測される。なお箇所①～④で確認できる 1 個数 10 nm サイズの欠陥は、表面からそれぞれ 8.3, 6.0, 3.1, 1.5  $\mu\text{m}$  の深さまで存在していた。

### 3.3 低リーク電流 (C モード) の解析<sup>14)</sup>

低リーク電流である C モードの 6 サンプルを光学顕微鏡で表面観察を行ったところ、6 チップすべてに表面欠陥は存在しなかった。耐圧もあり、リーク電流も低く抑えられている C モードには、異物もキャロット・ライクな欠陥の存在しないことがわかった。しかしながら、C モードにおいてもリーク電流ばらつきは存在する。このばらつき原因を探るため、リーク電流の異なる試料のエミッション顕微鏡観察を試みた。その結果、リーク電流の大きい試料にはエミッション発光が見られた (Fig. 9)。そこで、発光点の表面形状を原子間力顕微鏡で調べたところ、発光点が見られた箇所には Fig. 10 に示すナノスケールの窪みが見られた (ナノピット)。ナノピットの深さは 40～60 nm、幅は 180～240 nm であ

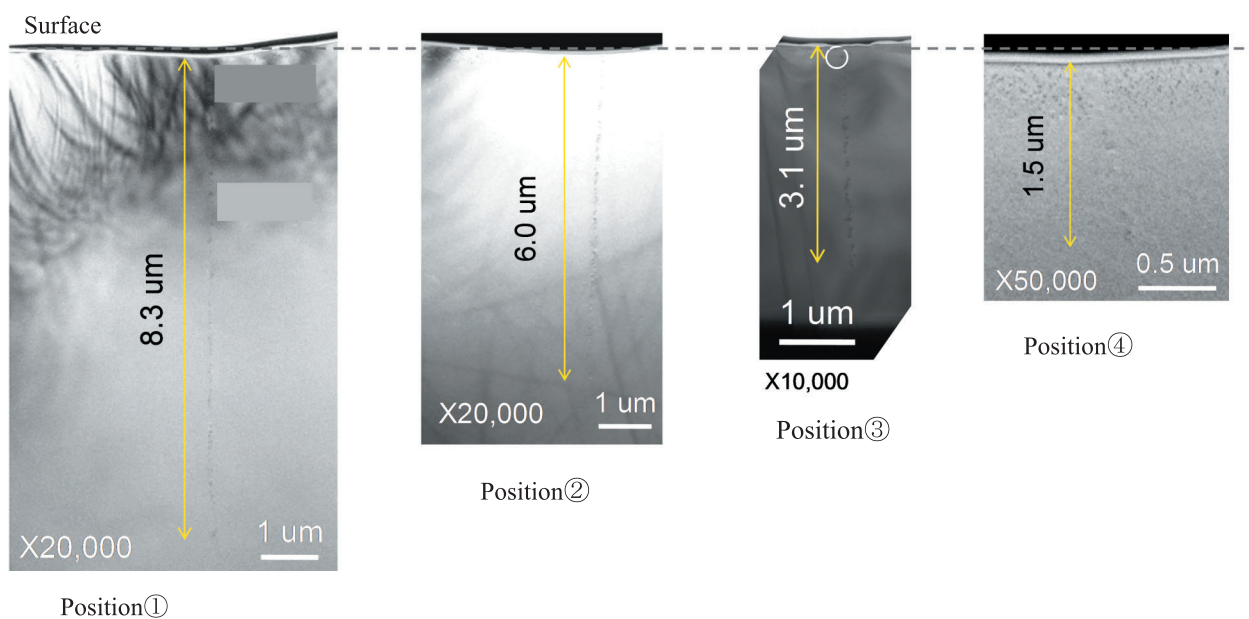
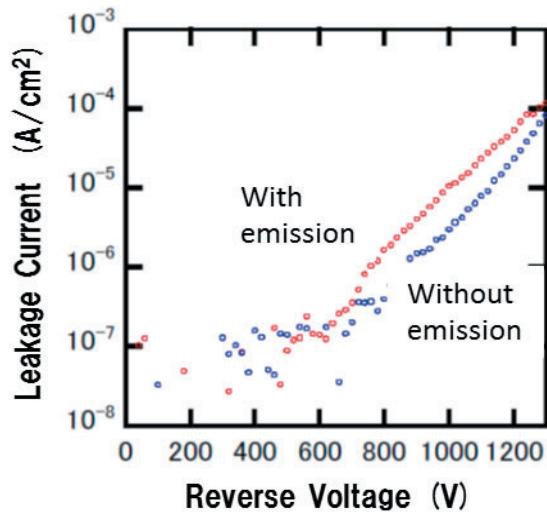
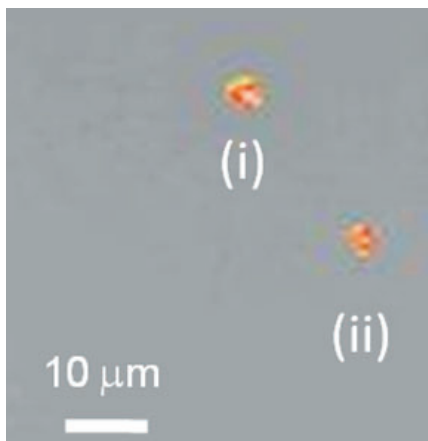


Fig. 8. (color online). Cross-sectional images of carrot-like defect observed at position ①～④.



(a) Reverse bias characteristics

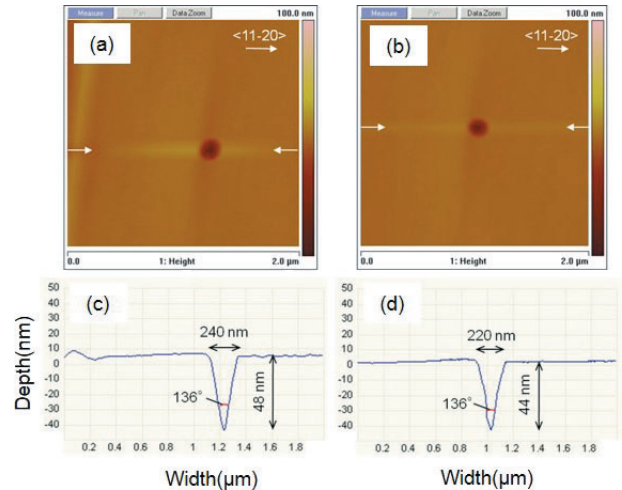


(b) Emission microscope image with emission

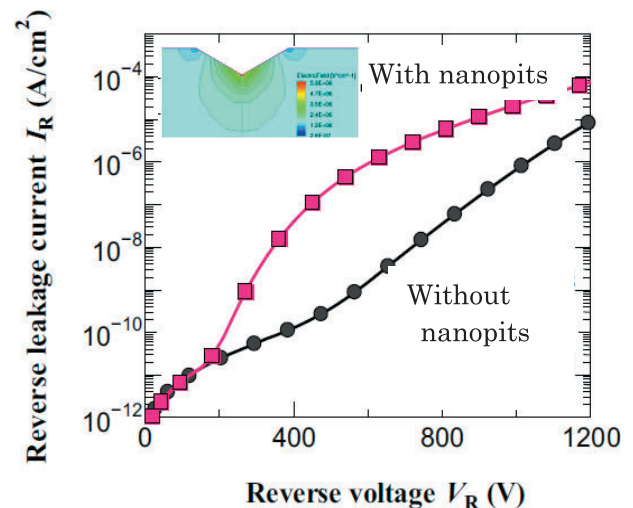
**Fig. 9.** (color online). Reverse bias characteristics and Emission microscope image.

り、底部の角度は  $120\sim 136^\circ$  である。また、この試料を溶融 KOH でエッチングしたところ、貫通転位を示すエッチピットが見られた。すなわち、貫通転位がナノピットを形成する原因であると考えられる。貫通転位の表面は原子の結合が弱くなっており、熱処理で転位部分の原子が抜けることにより形成されると推測している。

次に、ナノピットの影響をデバイスシミュレーションで調べた<sup>15)</sup>。シミュレータは Synopsys 製の Sentaurus を用いた。シミュレーションは Fig. 11 中に示すようにナノピットを模擬した構造で、シミュレータ内蔵のトンネルモデルを用いて行った。Fig. 11 より明らかなようにナノピット底部で電界が高くなり、リーク電流が増加することが確認できた。また、C モードの試料のエッチピット密度とリーク電流の関係を Fig. 12 に示す。リーク



**Fig. 10.** (color online). AFM images of leakage current sources (i) and (ii). (a) Surface morphology of position (i). (b) Surface morphology of position (ii). (c) Line profile of nanoridge in (a), and (d) line profile of nanoridge in (b).

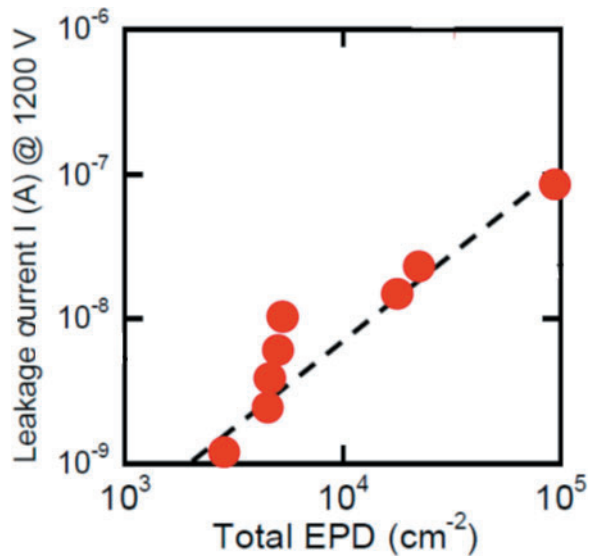


**Fig. 11.** (color online). Comparison of I-V curves between with nanopits and without nanopits.

電流は貫通転位密度に比例していることがわかる。すなわち、貫通転位密度がデバイスごとにばらついていることがリーク電流ばらつきの原因と考えられる。

#### 4. ま と め

4H-SiC JBS ダイオードの逆方向特性と表面欠陥との関係を明らかにすることを目的とし、SiC JBS ダイオードの逆方向特性のばらつき原因を調べた。その結果、マイクロパイプや異物 (SiC) が耐圧不良を引き起こす原因であるが、耐圧低下の寄与は両者に大きな違いはないと考えられる。キャロット・ライクな欠陥が低電圧印加



**Fig. 12.** (color online). Coloration between leakage current and etch pit density (nanopit density).

時からのリーク電流増大を引き起こす原因である。この欠陥の断面を TEM 観察したところ、直径数 10 nm の円形の欠陥（立体的には棒状欠陥）が多数存在した。この結晶の乱れが原因で、逆方向特性のリーク電流が増加すると考えられる。また、低リーク電流品はデバイス中の貫通転位の表面のナノピットがリークの原因である。ナノピットは貫通転位の表面に存在し、熱処理で形成されたと推定される。

## 文 献

- 1) E. Berkman, R.T. Leonard, M.J. Paisley, Y. Khlebnikov, M.J. O'Loughlin, A.A. Burk, A.R. Powell, D.P. Malta, E. Deyneka, M.F. Brady, I. Khlebnikov, V.F. Tsvetkov, H. McD. Hobgood, J. Sumakeris, C. Basceri, V. Balakrishna, C.H. Carter, Jr. and C. Balkas : *Mater. Sci. Forum* **615-617**, 3 (2009).
- 2) B. Thomas, C. Hecht and B. Kallinger : *Mater. Sci. Forum* **615-617**, 77 (2009).
- 3) Q. Wahab, A. Ellison, A. Henry, E. Janzen, C. Hallin, J. Di Persio and R. Martinez, *Appl. Phys. Lett.* **76**, 2725 (2000).
- 4) M. Ruff, H. Mitlehner and R. Helbig : *IEEE Trans. Electron Devices* **41**, 1040 (1994).
- 5) T. Kimoto, N. Miyamoto and H. Matsunami, *IEEE Trans. Electron Devices* **46**, 471 (1999).
- 6) L. Chen, O.J. Guy, D. Doneddu, S.G.J. Batcup, S.P. Wilks, P.A. Mawby, T. Bouchet and F.A. Torregrosa : *Microelectronics Reliability* **46**, 637 (2006).
- 7) K.-Y. Lee and M.A. Capano : *J. Electron. Mater.* **36**, 272 (2007).
- 8) H. Fujiwara, T. Kimoto, T. Tojo and H. Matsunami : *Appl. Phys. Lett.* **87**, 1-1 (2005).
- 9) S. Tumakha, D.J. Ewing, L.M. Porter, Q. Wahab, X. Ma, T.S. Sudharshan and L.J. Brillson : *Appl. Phys. Lett.* **87**, 242106-1 (2005).
- 10) P.G. Neudeck : *Mater. Sci. Forum* **338-342**, 1161 (2000).
- 11) 勝野高志, 渡辺行彦, 藤原広和, 小西正樹, 山本武雄, 遠藤 剛, 石子雅康 : *電気学会論文誌 C* **130**, 944 (2010).
- 12) T. Katsuno, Y. Watanabe, H. Fujiwara, M. Konishi, T. Yamamoto and T. Endo : *Jpn. J. Appl. Phys.* **50**, 04DP04 (2011).
- 13) J. Takahashi, M. Kanaya and Y. Fujiwara : *J. Cryst. Growth* **135**, 61 (1994).
- 14) T. Katsuno, Y. Watanabe, H. Fujiwara, M. Konishi, H. Naruoka, J. Morimoto, T. Morino and T. Endo : *Appl. Phys. Lett.* **98**, 222111 (2011).
- 15) T. Ishikawa, T. Katsuno, Y. Watanabe, H. Fujiwara and T. Endo : *Mater. Sci. Forum* **717-720**, 371 (2012).