

基板CMPによるSiCエピ膜中の基底面転位密度の低減

Growth of SiC Homoepitaxial Layer with Low Basal-plane Dislocation Density by Using CMP Substrates

堀 勉*
Tsutomu Hori

木本 恒暢**
Tsunenobu Kimoto

単結晶4H-SiC 8度オフSi面基板上に、横型ホットウォールCVD 炉を用い1,650 °Cにてホモエピタキシャル成長を行った。成長条件の最適化により、50 $\mu\text{m/h}$ の高速で、表面欠陥の少ない平滑なエピ膜を成長できた。CMP基板上に成長したエピ膜では、市販基板上に成長したものに比べて、大幅に表面モフォロジーの改善が見られた。CMP基板上に高速でエピ成長することにより、エピ膜中の基底面転位密度は低減し、本研究では最低で 0.22×10^6 個/ m^2 の基底面転位密度となった。成長温度を最適化することにより、高速成長時においても深い準位密度を比較的低い値に保つことができた。

Fast homoepitaxial growth of 4H-SiC has been carried out on 8° off-axis (0001)_{Si} substrates by horizontal hot-wall chemical vapor deposition (CVD) at 1,650 °C. By optimizing the growth conditions, smooth epilayers with few surface defects were obtained at a high growth rate of 50 $\mu\text{m/h}$. Epilayers grown on chemical mechanically polished (CMP) substrates show much better surface morphology than those on as-received substrates. The basal-planes dislocation (BPD) density can be decreased by fast epitaxy on CMP substrates, and the minimum BPD density obtained in this study is 220,000 pcs per square meter. Deep-level concentration can be kept at relatively low value by optimizing the growth temperature even at a high growth rate.

1. 緒 言

SiCはバンドギャップが広く、絶縁破壊電界や熱伝導率が高いといった特長がある。SiCを用いたデバイスはパワーデバイス用途として有望であり、高耐圧 (300~1,200 V) ショットキーバリアダイオードが市販されている。高耐圧のユニポーラデバイスとしては電界効果トランジスタ (Field Effect Transistor : FET) が開発途上にある。さらに、耐圧5 kV以上の用途では、伝導度変調の効果により低いオン抵抗となるバイポーラデバイスが有望であるが、その実現のためには数十ミクロン以上の膜厚で、高品質のエピ膜が必要となる。

高耐圧デバイスを目的とする50 $\mu\text{m/h}$ 以上の高速エピ成長がいくつかのグループにより報告されている^{1), 2)}。これらの報告によれば、エピ膜の評価は表面モフォロジーの観点によるものであり、高速で成長したエピ膜中の深い準位、構造欠陥に関する研究ではない。このため、高速で成長したエピ膜がデバイスとしての使用に耐えるものかどうかについてはいまだよくわかっていない。高速成長エピ膜は、特に基底面転位 (Basal Plane Dislocation : BPD) 密度³⁾ や深い準位の密度⁴⁾ が大という点において、通常の

エピ膜より品質が劣っている。

基板中のBPDは、そのほとんどが基板/エピ膜界面において、デバイスに対する悪影響の少ない貫通刃状転位 (Threading Edge Dislocation : TED) に変換されることが知られている⁵⁾。これは、BPDからTEDへの変換により転位長が短縮 (縮小) し、転位部に内在する弾性エネルギーが小さくなるためである。しかし、変換されなかったエピ膜中の残存BPDは、順方向に電流を流したときにこれを起点とする積層欠陥を広げ、デバイスのオン抵抗を増大させるという問題点が知られている⁶⁾。

SiC中の深い準位については、キャリア寿命との関連が指摘されている⁷⁾ ので、高耐圧SiCバイポーラデバイスの作製のためには、深い準位密度の低減が必須となる。

本報では、50 $\mu\text{m/h}$ での高速エピ成長と、基板に化学機械研磨 (Chemical Mechanical Polishing : CMP) を施すことによる基底面転位密度の低減、およびエピ成長条件の最適化による深い準位密度の低減について述べる。

2. 実験方法

基板は市販の4H-SiC 8度オフSi面基板を用いた。エピ

* 日立金属株式会社 NEOMAXカンパニー

** 京都大学 工学研究科 教授 工学博士

* NEOMAX Company, Hitachi Metals, Ltd.

** Kyoto University

成長は京都大学 木本研究室の横型ホットウォールCVD（化学気相堆積：Chemical Vapor Deposition）炉を用い、キャリアガスとして H_2 、原料ガスとして SiH_4 および C_3H_8 を用い、ドーパントとして N_2 ガスを用いた。成長温度は $1,650^\circ\text{C}$ 、成長時の圧力は $6.7\sim 11\text{ kPa}$ である。

CVD炉の概略を図1に示す。使用した基板の一部に日立金属にてCMP加工を施し、CMP加工の有無によるエピ膜の品質について比較を行った。なお、エピ成長に先立ち $1,650^\circ\text{C}$ 、 4.7 kPa にて1時間、 H_2 ガスで基板表面のエッチングを施した。

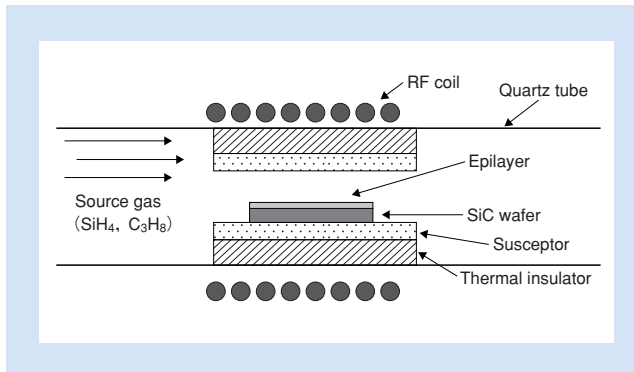


図1 CVD炉の概略

Fig. 1 Schematic image of CVD furnace

3. 成長速度

成長速度の SiH_4 流量依存性を図2に示す。なお、成長ガス中に含まれるC原子とSi原子の比（C/Si比）は $1.2\sim 1.5$ とした。成長速度は SiH_4 流量にほぼ比例して増加し、流量 20 sccm （図2参照）にて $50\text{ }\mu\text{m/h}$ となった。

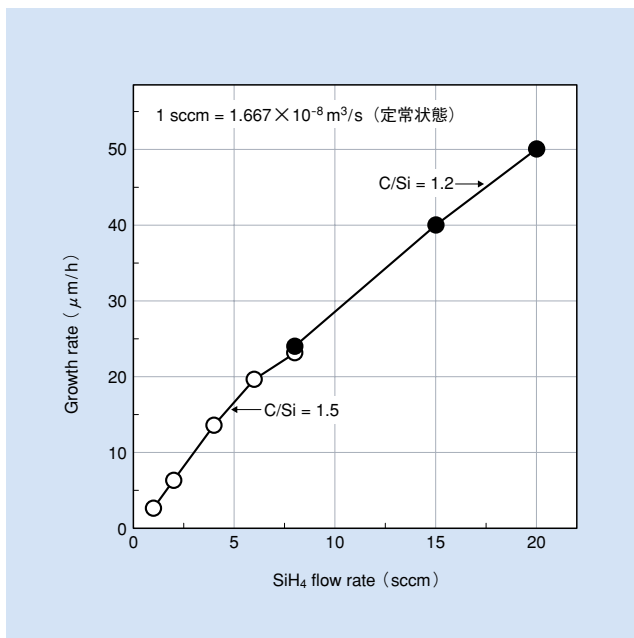


図2 成長速度の SiH_4 流量依存性

Fig. 2 SiH_4 rate dependence of the growth rate

4. 表面モフォロジー

$50\text{ }\mu\text{m/h}$ で成長した $100\text{ }\mu\text{m}$ 厚のエピ膜の光学顕微鏡像を図3に示す。成長時の圧力は（a） 11 kPa 、（b） 6.7 kPa である。 11 kPa で成長したエピ膜では $[11\bar{2}0]$ 方向に伸びる欠陥が見られ、粗い表面モフォロジーとなった。一方、成長圧力を 6.7 kPa に低下させると、表面欠陥は大幅に減少し、表面モフォロジーは大幅に改善した。

ホットウォールCVDでは、 SiH_4 ガスはサセプター入口付近で分解され、Siおよび SiH_x 種に分解される。Si種が過飽和になった場合、Siが凝集して成長表面に付着し、成長が阻害される（図3 a）。圧力を低下させると、Siの凝集が緩和され、平滑なエピ膜が得られたものと考えられる（図3 b）。

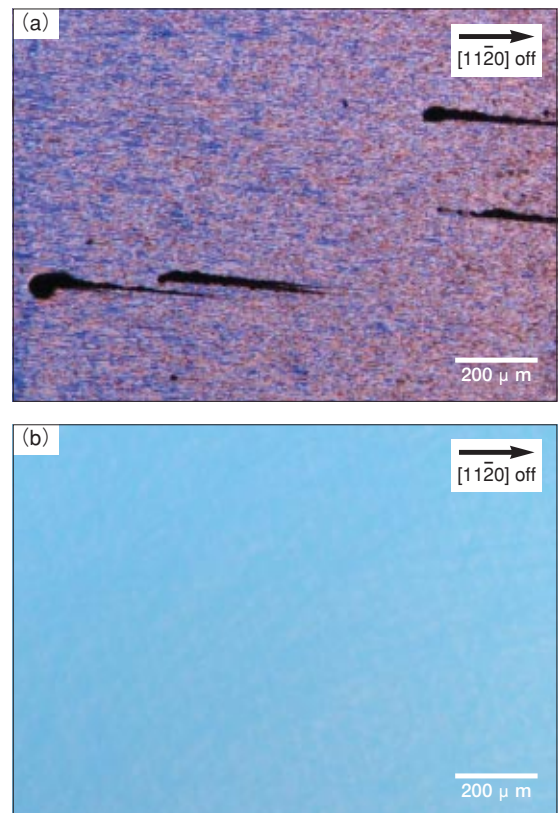


図3 $100\text{ }\mu\text{m}$ 厚エピ膜の光学顕微鏡像

（a）成長圧力 11 kPa 、（b） 6.7 kPa

Fig. 3 Nomarski photographs taken from $100\text{ }\mu\text{m}$ -thick epilayers grown at (a) 11 kPa and (b) 6.7 kPa

市販の基板と日立金属にてCMP処理した基板、および各基板上に成長したエピ膜のAFM像を図4に示す。市販の基板上にはスクラッチが見られるが、CMP処理した基板は平滑な表面モフォロジーを示し、RMSの値は 0.037 nm となった。また、市販基板上に成長したエピ膜のRMSは 2.65 nm であったが、CMP基板上のエピ膜では 0.22 nm となり、CMP処理によりエピ膜の表面モフォロジーが改善した。

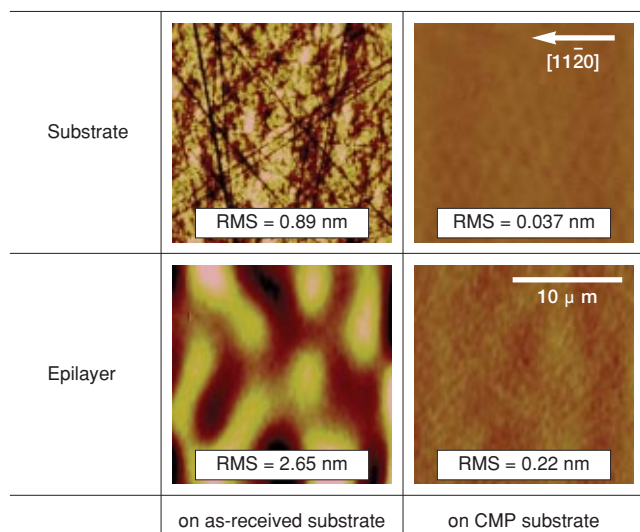


図4 市販基板およびCMP基板と、その上に成長したエピ膜のAFM像
Fig. 4 AFM images taken from as-received and CMP substrates and epilayers grown on these substrates

5. BPD密度

基板中のBPD密度に対するエピ膜中のBPD密度の比と、成長速度の関係を図5に示す。基板中のBPD密度は $100 \sim 200 \times 10^6$ 個/ m^2 であった。CMP基板上に成長したエピ膜では、市販基板上に成長したものに比べて、低いBPD密度が得られた。これは、土田らの報告⁸⁾とも一致する結果である。基板中のBPDは、転位とエピ膜表面との相互作用（鏡像力）によりTEDに変換されることが知られており、この鏡像力は転位と結晶表面の距離が小さいほど強くなる。CMP基板が市販基板に比べて平滑であるために転位と結晶表面の距離が最小化され、これによって鏡像力が増大し、エピ膜中のBPD密度の低減に対して有効に働いたと考えられる。また、CMPにより基板表面付近の加工変質層が除去されたこともBPD密度低減の一因であると考えられる。

図5からは、成長速度が大きいほどBPD密度が低下する傾向も見られる。これまでに、BPD密度は成長速度が向上するとともに増加するという報告³⁾がなされており、本報における結果と矛盾する。この原因については明らかではないが、水素エッチング条件の最適化がBPD密度の低減に効果があった可能性が考えられる。本報においては、最小で 0.22×10^6 個/ m^2 のBPD密度、最高で99.8 %の転位変換率を達成した。

6. 深い準位密度

6.1 $Z_{1/2}$ センターおよび $\text{EH}_{6/7}$ センター

DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy) では、ほとんどすべてのエピ膜において295 Kと600 Kに大きなピークが見られた。295 Kのピークは $\text{Ec}-0.58$ eVに存在する $Z_{1/2}$ センター⁹⁾に、600 Kのピークは $\text{Ec}-1.55$ eVに存在する $\text{EH}_{6/7}$ センター¹⁰⁾によるものである。成長速度に対す

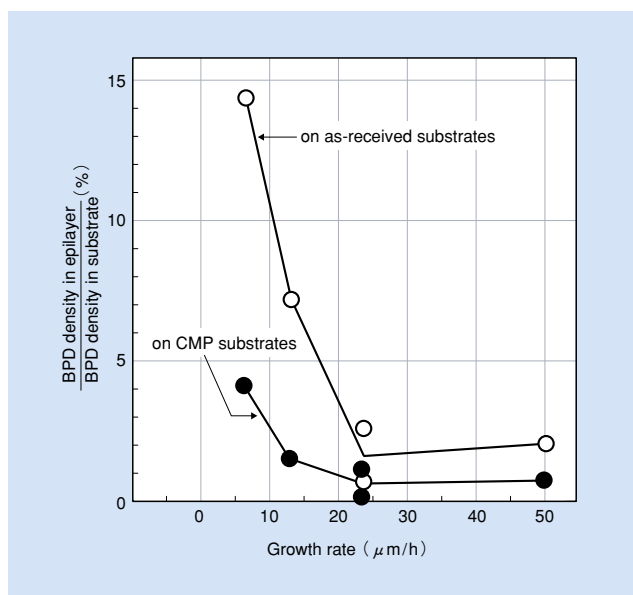


図5 基板中のBPD密度に対するエピ膜中のBPD密度の比と成長速度の関係

Fig. 5 Growth rate dependence of the ratio of BPD density in epilayers to that in substrates

る深い準位密度依存性を図6に示す。過去には、 $20 \mu\text{m/h}$ 以上の高速成長における $Z_{1/2}$ センター密度は、 10^{18} 個/ m^3 台後半 $\sim 10^{19}$ 個/ m^3 台前半の、比較的高い値が報告されている⁴⁾。本報では、 $50 \mu\text{m/h}$ においても $Z_{1/2}$ センター密度は 2.8×10^{18} 個/ m^3 、 $\text{EH}_{6/7}$ センター密度は 1.4×10^{18} 個/ m^3 の低い値を実現した。これは、深い準位密度が成長速度ではなく、主に成長温度、および原料ガスのC/Si比に依存するためであると考えられる。過去の報告に比べて低いC/Si比、および低い成長温度を採用することにより、深い準位密度を低減することができた。

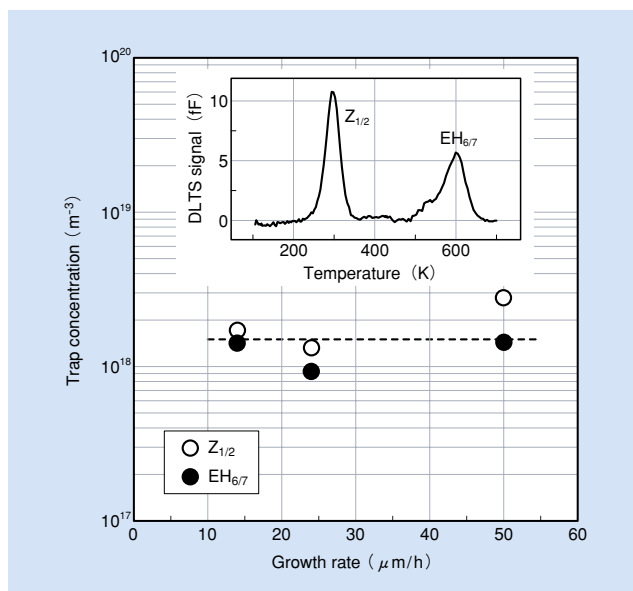


図6 成長速度に対する深い準位密度の依存性

Fig. 6 Deep level concentration vs. growth rate

6.2 D_1 センター

4 Kと300 Kにおけるエピ膜のPLスペクトルを図7に示

す。高速で成長したエピ膜では、 D_I センターの存在により、 L_1 ピーク (2.901 eV) が観察されることが報告されている⁴⁾。本報においては、50 $\mu\text{m/h}$ の高速成長においても L_1 ピーク強度は非常に小さい (自由励起子発光に比べて 1/1,000 以下の強度)。 L_1 ピーク強度の成長温度依存性を図 8 に示す。成長温度が高くなるにつれて L_1 ピーク強度が高くなっている。単純なモデルによる計算では、真性欠陥の密度 (N_{id}) は、定数 A 、欠陥の生成エンタルピー ΔH 、絶対温度 T を用いて、

$$N_{id} = A \exp(-\Delta H/kT) \quad (1)$$

で与えられる。この式からは、欠陥密度 (N_{id}) は温度が低下すると低くなることが示される。同様に本研究でも低温成長により欠陥密度が低くなるものと考えられる。

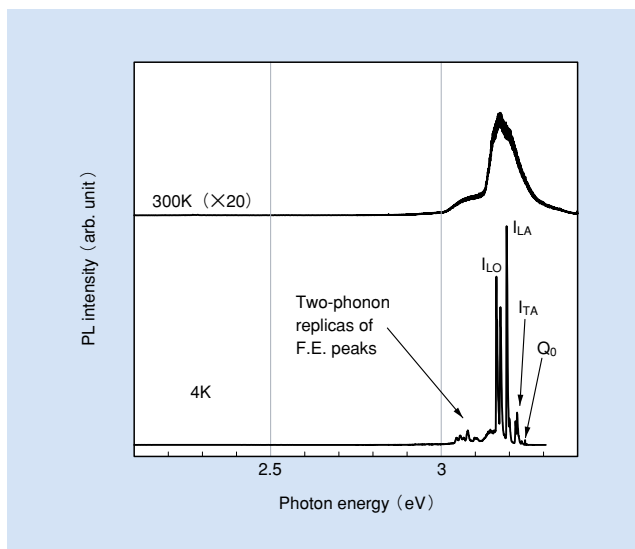


図 7 4 K, 300 K での 100 μm 厚エピ膜の PL スペクトル
Fig. 7 PL spectra at 4 K and 300 K obtained from a 100 μm -thick epilayer

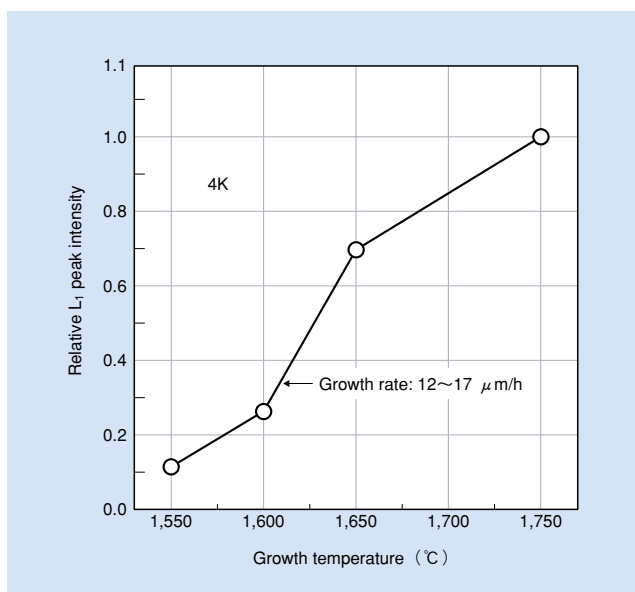


図 8 L_1 ピーク強度の成長温度依存性
Fig. 8 The growth temperature dependence of L_1 peak intensity

7. 結 言

横型ホットウォールCVD 炉を用いて、単結晶 4H-SiC 8 度オフ Si 面基板上に 1,650 $^{\circ}\text{C}$ にてホモエピタキシャル成長を行った。

- (1) 成長条件の最適化により、50 $\mu\text{m/h}$ の高速で、表面欠陥の少ない平滑なエピ膜を成長できた。
- (2) CMP 基板上に成長したエピ膜では、市販基板上に成長したもの比べて、大幅に表面モフォロジーの改善が見られた。
- (3) CMP 基板上に高速でエピ成長することにより、エピ膜中の基底面転位密度は低減し、本研究では最低で 0.22×10^6 個/ m^2 の基底面転位密度となった。
- (4) 成長条件の最適化により、深い準位密度の低減に成功した。

参考文献

- 1) M. Masahara et al., Mater. Sci. Forum 389-393 (2002) 179.
- 2) Y. Ishida et al., Mater. Sci. Forum 457-460 (2004) 213.
- 3) T. Ohno et al., J. Cryst. Growth 271 (2004) 1.
- 4) H. Tsuchida et al., J. Cryst. Growth 237-239 (2002) 1206.
- 5) S. Ha et al., J. Cryst. Growth 244 (2002) 257.
- 6) H. Jacobson et al., J. Appl. Phys. 95 (2004) 1485.
- 7) L. Strasta et al., Mater. Sci. Forum 389-393 (2002) 549.
- 8) H. Tsuchida et al., Mater. Sci. Forum 527-529 (2006) 231.
- 9) T. Dalibor et al., Phys. Stat. Solidi A 162 (1997) 199.
- 10) C. Hemmingsson et al., J. Appl. Phys. 81 (1997) 6155.



堀 勉

Tsutomu Hori
日立金属株式会社
NEOMAX カンパニー
セラミックスセンター



木本 恒暢

Tsunenobu Kimoto
京都大学 工学研究科
教授
工学博士