

1. はじめに

近年のパワー半導体素子の著しい性能向上に伴い、民生用機器や産業用機器におけるパワーエレクトロニクス技術の適用範囲が大きく拡大している。電力分野においては、直流送電システムや周波数変換所、無効電力補償装置、分散電源連系のための高性能交直変換装置、高速電力制御のための静止型半導体開閉装置などの技術開発が望まれている。分散電源や電力貯蔵装置を含む将来の電力系統においては、パワーエレクトロニクス技術を用いた電力変換容量は益々増加するものと考えられ、パワーエレクトロニクスの心臓部となるパワー半導体素子の一層の高効率化、高電圧・大容量化が、電力を効率よく変換して信頼性高く制御するための重要な技術課題の一つとなっている。

シリコンカーバイド (SiC) 単結晶はシリコン (Si) 単結晶に比べて、約 10 倍の絶縁破壊電界強度 (3 MV/cm)、約 3 倍の熱伝導率 (4.9 W/cmK) を有するとともに、比較的大きな電子移動度 (4H-SiC で 1000 cm²/Vs) を持つことから、従来の Si 系パワー半導体素子に比べて飛躍的な性能向上を実現可能とする半導体材料として期待されている。このことから、多くの研究機関において SiC 半導体素子に関する研究開発が精力的に進められ、SiC 単結晶基板、エピタキシャル結晶成長、素子形成などの分野において長足の進歩がなされてきた。現在では、直径 3 インチまでの 4H-SiC、6H-SiC 単結晶基板が市販され、直径 2 インチのものではマイクロパイプと呼ばれる中空状結晶欠陥密度が市販レベルで 15 個/cm² 以下に達している。最近では Si の性能限界を超えるショットキーダイオード⁽¹⁻⁵⁾ や MOSFET⁽⁶⁻⁹⁾ の報告が相次いでなされるとともに、耐電圧 19 kV を超える pn ダイオード⁽⁹⁾ の報告がなされるなど高性能 SiC 素子の開発が着実に進み、600 V 級の SiC ショットキーダイオード⁽⁶⁾ に関しては市販開始に至っている。このような高性能 SiC 素子の実現の背景としては、低ドーピング濃度かつ高品位のエピタキシャル結晶成長が可能となったことや、界面形成技術、素子終端部の電界緩和技術の開発が進められたことによる大きい。

高電圧素子用のエピタキシャル膜には、厚膜であることと同時に、低ドーピング濃度であることが要求される。例えば、耐電圧として 30 kV を得るためには、膜厚 200 μm 以上、ドーピング濃度 10¹³ cm⁻³ オーダーのエピタキシャル膜が必要とされる。さらに、高電圧・大面積 SiC 素子の実現のためには、エピタキシャル結晶成長時に発生する結晶欠陥の極小化が必要となる。以上の背景から、我々は、厚膜化や高品位化を目指した SiC エピタキシャル結晶成長技術の開発に取り組んでいる⁽¹⁰⁻¹²⁾。

2. エピタキシャル結晶成長装置

我々が今回開発した気相エピタキシャル結晶成長装置の模式図を図 1 に示す。反応管には縦型水冷 2 重管を採用した。キャリアガスならびに反応ガスは、炉の下部より導入し、炉の上部より排出する構造とした。ガスの流れを下から上へ向かう方向とすることにより、ガスの流れと自然対流の主方向とを一致させている。試料加熱法には、ホットウォール方式を採

用した。ホットウォールの加熱は高周波誘導加熱により行った。ホットウォールの外周には、カーボン断熱材を設置している。サセプタは楔形をしており、加熱時にはホットウォールの内部に配置される。基板は成長面が斜め下方に向くようにサセプタ上に設置される。サセプタには、最大で直径 2-inch の基板が 2 枚まで設置可能である。この配置においては、主にホットウォールに高周波誘導が加わり、基板ならびにサセプタはホットウォールからの輻射によって加熱されるため、サセプタの形状、位置に大きな自由度が得られるとともに、減圧下においても基板温度の高温化が容易である。ホットウォール内に配置されるサセプタの温度は、ホットウォールよりも少し低い温度となるため、結晶成長中にサセプタは SiC により in-situ コーティングされることになる。さらに、基板は基板背面のサセプタ表面よりも少し高い温度となるため、エピタキシャル結晶成長中に基板の裏面にサセプタ上の多結晶 SiC が堆積されなくなるという利点を有している。

ガス系には、キャリアガスとして H₂、反応ガスとして SiH₄、C₃H₈、n 型ドーパントガスとして N₂、p 型ドーパントガスとして Al(CH₃)₃ を用いた。エピタキシャル成長には、市販の 8 off 4H-SiC(0001) 基板を使用した。

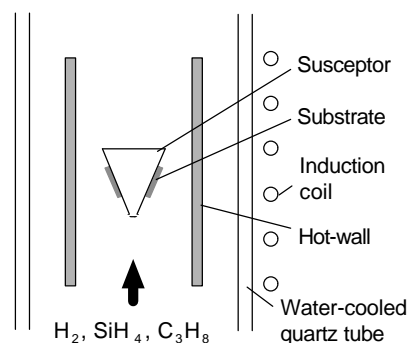


図 1 SiC エピタキシャル結晶成長装置 (縦型輻射加熱式反応炉) の模式図

3. 厚膜成長

膜厚が数十 μm 以上の厚膜エピタキシャル結晶成長には、成長時間の短縮のために成長速度の高速化が望まれる。図 2 は、成長温度 1530 (サセプタ上面温度) における成長速度の炉内圧力依存性を示す。水素流量は 10 slm 一定としている。成長速度は炉内圧力に強く依存し、45 Torr 前後で最大となった⁽¹¹⁾。成長温度 1530 1560 , 炉内圧力 40 50 Torr , SiH₄ 流量 30 sccm に対する典型的な成長速度は 13 16 μm/h で、従来の横型コールドウォール式反応炉における成長速度 (3 5 μm/h 程度) に比べて数倍の成長速度が得られている。

一般にエピタキシャル膜厚の増加に伴って表面のラフネスが増加する傾向があるため、厚膜エピタキシャル結晶成長にはモフォロジー制御が重要となる。エピタキシャル膜のモフォロジーは、原料に用いる SiH₄ と C₃H₈ の

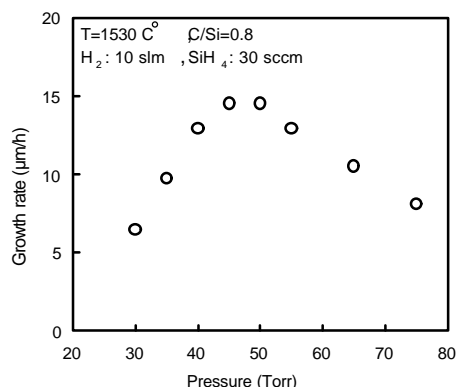


図2 4H-SiC に対する成長速度の炉内圧力依存性

流量比 (C/Si 比) に大きく依存することが判明している。今回の実験において、良好なモフォロジーは C/Si 比=0.8 前後で得られ、C/Si 比=0.9 1.0 以上ではマクロステップパッチングが発生した。図 3 は、膜厚 150 μm の 4H-SiC エピタキシャル膜に対する原子間力顕微鏡像を示す。成長速度は 1530 °C、C/Si 比は 0.8 とした。10 μm×10 μm 範囲に対する rms ラフネスは 0.20 nm であり、良好な平坦性が得られている⁽¹¹⁾。最近では、膜厚が 240 μm 以上の非常に厚いエピタキシャル膜に対しても同等なラフネスが得られている⁽¹²⁾。

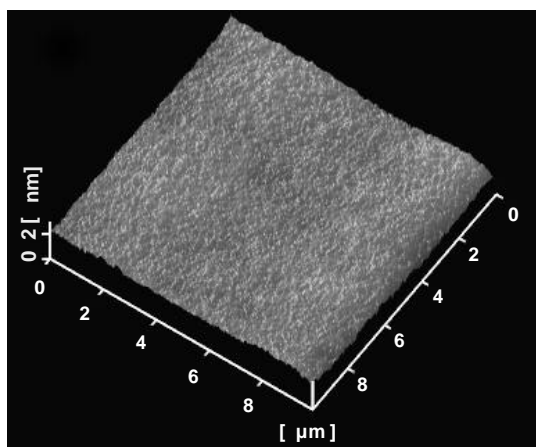


図3 膜厚 150 μm の 4H-SiC エピタキシャル膜の原子間力顕微鏡像

厚膜化のための成長時間の増加や、高速化のための成長温度の上昇は、高温部材の寿命低下あるいは高温部材からの不純物汚染を誘発させて高純度化の妨げとなり得る。このため、厚膜化と同時に高純度化を両立させるための技術開発も重要となる。図 4 は、膜厚 150 μm の 4H-SiC エピタキシャル膜に対するフォトルミネッセンス測定結果を示す。フォトルミネッセンス測定には HeCd レーザー (325 nm) を用い、測定温度は 8 K、測定分解能は 1 nm とした。バンド端領域では、自由励起子による発光 (図中で I_{77} と標記) が支配的となっており、窒素に束縛された励起子 (図中で Q_0 , P_{77} と標記) は比較的弱くなっている。また、A1 や B に起因する発光は観測されないことから、得られた膜が高純度であることが示されている。同試料に対する C-V 測定によりドーピング濃度は $N_D - N_A = 1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ と求められた。また、SIMS 測定より、Al, B, Ti, V, Cr の混入量はそれ

ぞれ $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 以下であることが確認された⁽¹¹⁾。このように、厚膜かつ高純度の 4H-SiC エピタキシャル膜が得られるようになった。これまでに、 $N_D - N_A = 2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ の非常に低いドーピング濃度のエピタキシャル膜も得られている^(10, 12)。真性欠陥の低減が今後の課題として挙げられる⁽¹²⁾。

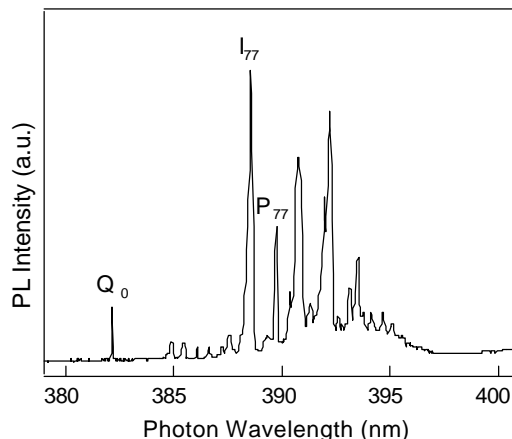


図4 膜厚 150 μm の 4H-SiC エピタキシャル膜に対するフォトルミネッセンス測定結果 (励起レーザー波長 325 nm, 測定温度 8 K, 測定分解能 1 nm)

以上、厚膜 4H-SiC エピタキシャル結晶成長に関する我々の研究内容を紹介した。今後は、真性欠陥の低減、少数キャリアライフタイムの向上・制御技術の開発など厚膜エピタキシャル結晶成長技術のより一層の向上を図るとともに、大電流化を目的としたマイクロパイプの閉塞技術の開発を進める計画である。

参考文献

- (1) H.M. McGlathlin, et al., IEEE Dev. Res. Conf., CA (1999).
- (2) T. Tsuji, et al., Mat. Res. Soc. Sym. Proc. **640** (2001).
- (3) F. Dahlquist, et al., Mat. Sci. Forum **338-342**, 1179 (2000).
- (4) D. Peters, et al., Mat. Sci. Forum **353-356**, 675 (2001).
- (5) R. Rupp, et al., Mat. Sci. Forum **338-342**, 1167 (2000).
- (6) K. Asano, et al., Proc. ISPAD'01, 23 (2001).
- (7) J. Tan, et al., IEEE Electr. Dev. Lett. **19**, 487 (1998).
- (8) R. Schörner, et al., Mat. Sci. Forum **338-342**, 1295 (2000).
- (9) Y. Sugawara, et al., Proc. ISPSD'01, 27 (2001).
- (10) H. Tsuchida, et al., Mat. Sci. Forum **353-356**, 131 (2001).
- (11) H. Tsuchida, et al., Mat. Res. Soc. Sym. Proc. **640** (2001).
- (12) H. Tsuchida, et al., J. Crystal Growth (to be published).

連絡先:

財団法人電力中央研究所機能材料部 土田秀一
〒240-0196 横須賀市長坂 2-6-1
Tel: 0426-56-2121 ; Fax: 0468-56-5571
E-mail: tsuchida@criepi.denken.or.jp