

大学の研究・動向

半導体シリコンカーバイドのパワーデバイス —電気エネルギー有効利用の礎—

工学研究科 電子物性工学専攻 機能物性工学講座 半導体物性工学分野
教授 松波 弘之
e-mail: matsunam@kuee.kyoto-u.ac.jp

1. はじめに

これまでのエネルギー需要を支えてきた化石燃料の枯渇化によるエネルギー問題や、地球温暖化などの環境問題が深刻化しており、新しいエネルギー源の開発やエネルギーの有効利用が求められている。最も使いやすいエネルギーである電力の需要は増加の一途をたどっており、電気エネルギーの高効率利用が電気電子工学の分野における大きな課題となっている。

現在、電力変換、制御をハードウェアとして支えているのは半導体シリコン (Si) のパワーデバイスである。しかしながら、Siパワーデバイスは、その物性上の制限のために理論的性能限界に近づきつつあり、飛躍的な性能向上は期待できない。したがって、Siパワーデバイスの限界を打破し、より高出力化、低損失化、高速化を実現できる新しい半導体材料を用いたパワーデバイスの開発が不可欠とされている。

シリコンカーバイド (SiC) は、現用のSiに比べ、絶縁破壊電界強度が約10倍、飽和電子速度が約2倍、熱伝導率が約3倍という優れた物性値を持つので、これをパワー半導体デバイスに適用すれば、小型化、高速化が実現できるとともに、熱損失をSiデバイスの1/10以下に低減でき、Siでは120°Cである動作上限温度を300~400°Cまで増大できるなど、各種の電気機器、システムの大幅な効率向上と高性能化が期待できる。

2. 研究内容

2. 1 ステップ制御エピタキシー—高品質SiC単結晶の作製—

SiCパワーデバイスの実現には高品質の結晶成長技術が必要である。しかしながら、SiCには同一の組成ではあるが一つの方向に対して原子の積層構造が異なる多数の結晶構造 (ポリタイプ) が存在するために、従来、ポリタイプ混在のない高品質単結晶を作製することが困難であった。例えば、入手が容易な六方晶SiC (4H-SiC、6H-SiCなど) 基板上にSiCを成長させると低温安定型の立方晶SiC (3C-SiC) が成長するという問題があった。物性の良さは認識されながらも結晶成長の困難さのために研究開発は立ち止まっていた。

当研究室では、この材料の重要性に鑑み、高品質の結晶成長法を確立する研究を続けてきた。六方晶基板のSiC {0001} 面に数度のオフ (傾き) 角度を設けることによって、比較的低温で高品質ホモエピタキシャル成長層が得られることを見出し、これを「ステップ制御エピタキシー法」と名付けた^{[1][2]}。この方法により、デバイス作製を可能にする高品質のSiCエピタキシャル成長層が初めて得られるようになった。この成果に米国の研究機関が飛びつき、デバイス分野で世界をリードする研究が始まった。我々は、大学の使命とも言うべき原理の追求を果たすために、結晶成長機構の解明に精力を傾けた。ここでは、その内容を概術する。

図1に六方晶SiC (0001) 基板上に化学気相堆積 (CVD) 法により形成したSiCエピタキシャル

成長層の表面写真と結晶成長の概念図を示す。SiC (0001) ジャスト基板上では、二次元核発生モードにより結晶成長が進行する。このとき、成長層のポリタイプは主に温度によって決定され、低温安定型の立方晶SiCが成長する。また、六方晶SiC基板の積層順序の影響を受けて、成長した立方晶SiCは双晶（積層順序が反転した領域が混在した結晶）となる。一方、オフ角度を導入した基板上では原子ステップ（原子面の段差）からの横方向成長（ステップフロー成長）が起こり、成長層は基板の積層順序を引き継いで六方晶SiC単結晶となる。これは、オフ基板表面に存在する原子ステップがテンプレート（下敷き）となり、この上に自己整合的に結晶成長が起こると解釈できる。

図2にステップ制御エピタキシー法により作製した4H-SiC成長層表面の断面透過電子顕微鏡像の一例を示す^[3] 図中、一つの円形像がSi-C原子対に対応している。成長表面には原子ステップと(0001) テラス（平坦部）が明瞭に観察され、テラス上での核発生による結晶成長は見られないことから、上記の成長モデルが妥当であることが確認できる。また、原子ステップの集合合体（ステップバンチング）がポリタイプ固有の構造を反映しているという興味深いことも判明した。

成長時の原料供給比を制御することにより、不純物を添加しないSiC成長層の実効キャリア密度を約 $1 \times 10^{14} \text{cm}^{-3}$ (n型) まで低減した。紫外線励起によるフォルトミネセンス測定では、不純物に関係した発光ピークが非常に小さく、室温でも自由励起子発光が観測できた。SiCが間接遷移型（半導体のバンド構造は直接型と間接型に分けられる）半導体であることを考慮すると、これは、成長層が高純度、高品質であることを意味している。4H-SiCの室温での電子移動度（電界印加時の電子の速度）として $851 \text{cm}^2/\text{Vs}$ が得られ、その温度依存性において低温で電子移動度の低下がなく、不純物補償は極めて小さいことが分かった（荷電状態が正・負の不純物が存在するときは補償されて実効キャリア密度は小さくなるが、このとき低温での電子移動度か下がる）。さらに、過渡容量法（接合容量の時間変化からトラップ密度を推定する方法）を用いた深い準位の分析により、トラップ密度は 10^{12}cm^{-3} と非常に少ないことも判明した。

現在、世界の研究グループがSiC半導体を実用化するためにステップ制御エピタキシー法により形成したSiCのデバイス開発や物性評価を積極的に取り上げているが、上記の成果はその学術的裏付けを示したことになる。

2. 2 高耐压SiCパワーデバイスの提示

高品質結晶が作製できるようになったので、パワーデバイスを試作し、半導体材料としての良さを提示する研究へと発展させた。前述のようにSiCはSiの約10倍の絶縁破壊電界を有する。したがって、同耐压のデバイスを作製するとき、Siに比べて、活性層の不純物密度を2桁高くでき、しかも活性層の厚さは1/10で良い。これが、SiCパワーデバイスのオン抵抗（オン時の直列抵抗）、ひいてはパワー損失を著しく低減できる理由である。

ショットキーダイオードは低いオン電圧、高速の逆回復特性を有するために、高周波パワーダイオードとして有用である、しかし、Siショットキーダイオードでは耐压が100Vを超えるとオン抵抗とリーク電流の増大によりパワー損失が著しく大きくなるので実用化されていない。したがって、高耐压 (>500V) SiCショットキーダイオードが作製できれば、Siでは実現できない大容量、低損失、高速スイッチング特性を兼備した高性能パワーダイオードとして斯界に大きなインパクトを与えることができる。

ショットキー用電極材料を決めるために、4H-SiC成長層上にAu、Ni、Tiを用いた。ダイオードの理想因子n値は、1.02~1.08であり、電流輸送は理想的な熱電子放出モデルで説明できる。電流・電圧特性の飽和電流密度から計算した障壁高さはAu: 1.73eV、Ni: 1.62eV、Ti: 0.95eVとなり、金属の仕事関数に依存する^[4]。このように表面フェルミ準位のピン留め現象がない半導体は障壁高

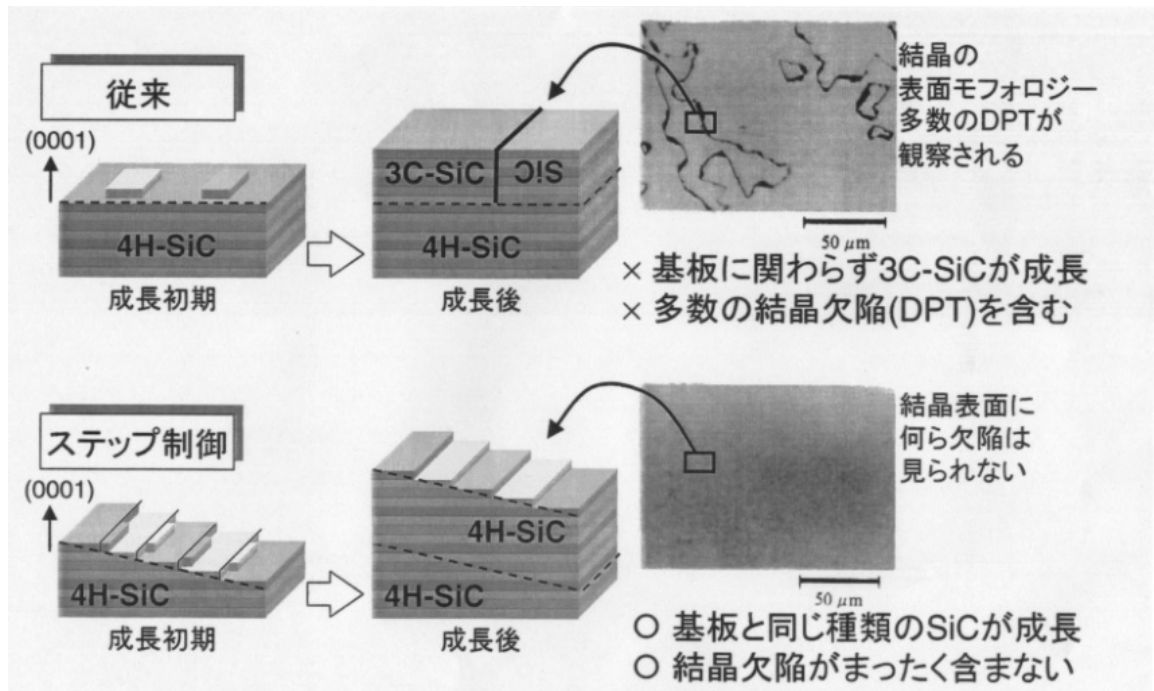


図1 ステップ制御エピタキシーの概念図

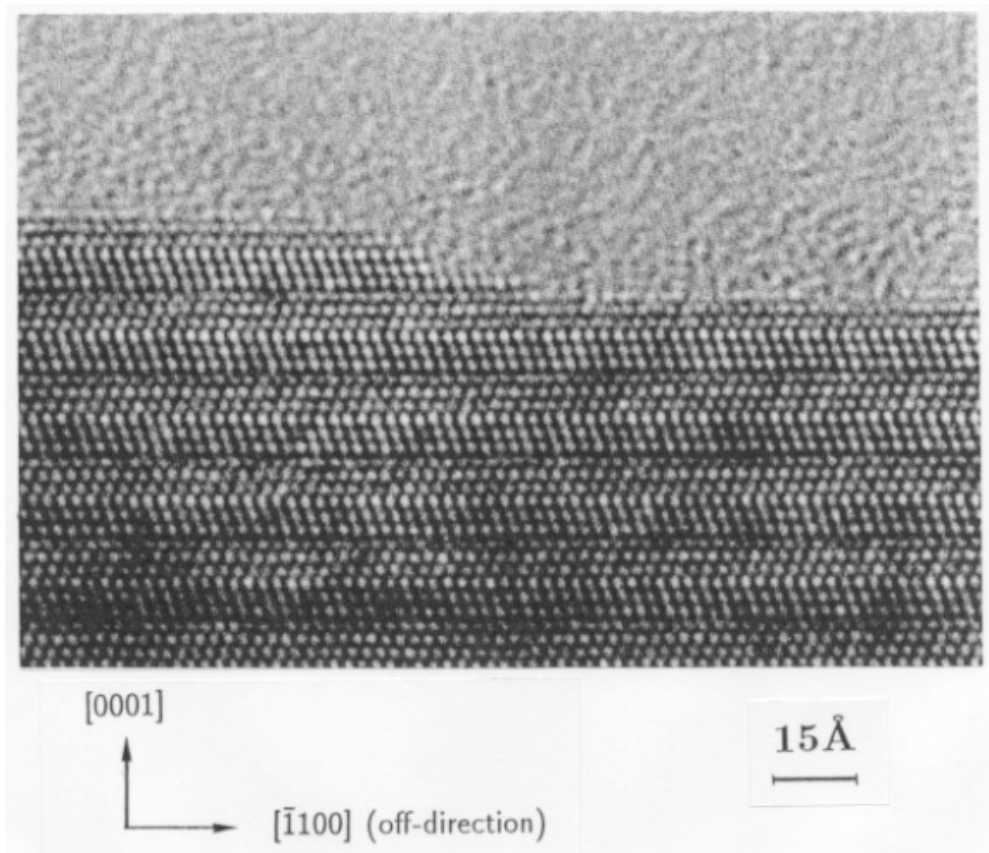


図2 ステップ制御エピタキシーにより作製したSiC成長層表面の断面透過電子顕微鏡像

さの制御が可能であり、応用上重要である。

次に、厚さ $13\mu\text{m}$ 、ドナー密度 $6\times 10^{15}\text{cm}^{-3}$ のn型成長層を用いて高耐圧Ti/4H-SiCショットキーダイオードを作製した。ショットキー電極端部での電界集中を緩和するために、Bイオン注入により高抵抗ガードリングを電極周囲に形成した。この構造を用いて得られたダイオードの電流密度-電圧特性を図3に示す^[5]。1750Vという高耐圧が得られ、しかもオン抵抗は、 $5.0\text{m}\Omega\text{cm}^2$ と非常に小さい。このオン抵抗は同耐圧のSiデバイスと比較して約2桁優れた値である。

この他、当研究室ではエピタキシャル成長によって形成したpn接合ダイオードで2.0kV、イオン注入で形成したpn接合で1.1kVの高耐圧を達成している。また、SiCはSiと同様に熱酸化により良質の酸化膜(SiO₂)が形成できるという利点を活かして、酸化膜/SiC界面における電子物性を制御する研究も行っている。現在、反転形の金属-酸化膜-半導体電解効果トランジスタ(MOSFET)の動作を確認し、その特性向上を進めている。

3. おわりに

研究室では、今後、高耐圧(>3kV)デバイス作製に必要な超高純度・厚膜SiC単結晶を作製し、結晶欠陥をさらに低減する方法を確立する。次いで、パワー半導体デバイス製作に必要な要素技術をさらに発展させ、最終的には、Siパワー半導体デバイスの限界を大きく打破する、小型、高耐圧、低損失のSiCダイオード、縦型の電界効果トランジスタなどを試作し、実用への指針を提言したい。このテーマに関連して、平成9年度から4年間の計画で文部省科学研究費「特別推進研究」の助成を受けている。

デバイス研究を通じて、この半導体が実用される見通しができれば、パワーエレクトロニクス分野への寄与がたいへん大きい。高電力インバータ用MOSFETが開発できればその成果は図4に示すように、素子レベルでの寸法が1桁、損失が1/300まで低減でき、システムレベルの一例として損失を1/3にまで低減できると予測される。直流送電などの電力輸送や電力変換機器のほか、各種の産業用電力変換装置、電車や電気自動車の速度制御など、あらゆるパワーエレクトロニクス機器において、現用の半導体Siでは不可能な、大幅な効率向上を可能にする。電気エネルギーの有効利用を目指す新しい「エネルギーエレクトロニクス」の開拓に資し、不必要な化石燃料や原子力の使用を抑制し、地球環境の改善に寄与すると期待される。また、SiCは通信機器用の高周波パワーデバイス、自動車や宇宙開発用の耐環境(高温、輻射下)デバイスとしても重要な寄与をすると予想される。国レベルでは、平成10年度から「低損失電力用半導体デバイス」の研究プロジェクトが始まる予定である。

<参考文献>

- [1] N. Kuroda, K. Shibahara, W.S. Yoo, S. Nishino, and H. Matsunami, *Ext. Abstr. of the 19th Conf. on Solid State Devices and Materials*, Tokyo(1987), p.227.
- [2] H. Matsunami and T. Kimoto, *Mat. Sci. and Eng. R20*, 125(1997).
- [3] T. Kimoto, A. Itoh, H. Matsunami, and T. Okano, *J. Appl. Phys.* 81, 3494(1997).
- [4] A. Itoh, O. Takemura, T. Kimoto, and H. Matsunami, *Silicon Carbide and Related Materials 1995* (IOP, Bristol, 1996), p.685.
- [5] A. Itoh, T. Kimoto, and H. Matsunami, *IEEE Electron Device Lett.* 17, 139(1996).

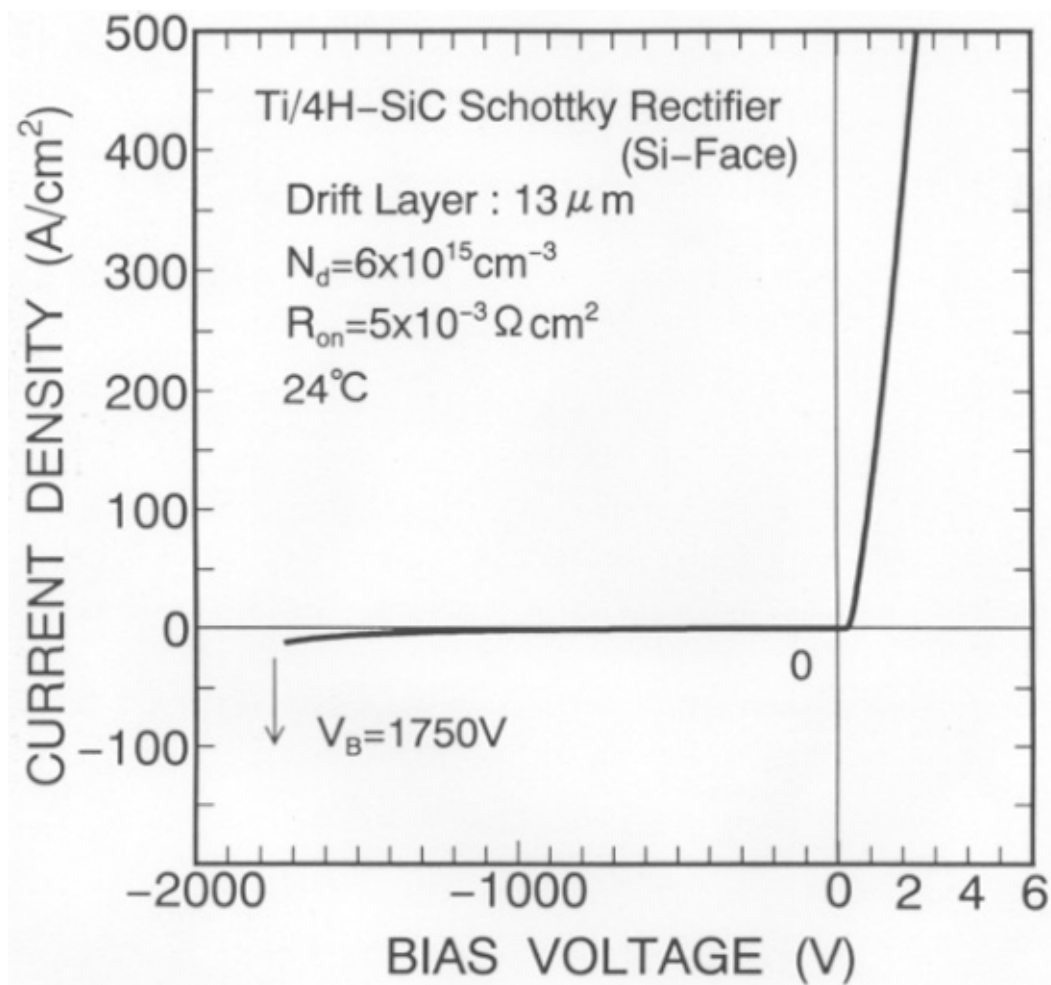


図3 Ti/SiCショットキーダイオードの電流-電圧特性



図4 SiおよびSiCパワーデバイスの比較