イオン注入剥離法と基板直接接合法の融合による低コスト SiC 基板の作製*

Preparation of the Low Cost SiC Wafer by the Layer Splitting Method and the Wafer Direct Bonding Method

河原孝光**

八田直記**
内田英次**

坂田豊和**
小林元樹**

南 章行**
高木秀樹***

八木邦明**

Takamitsu KAWAHARA, Naoki HATTA, Toyokazu SAKATA, Akiyuki MINAMI, Kuniaki YAGI, Hidetsugu UCHIDA, Motoki KOBAYASI and Hideki TAKAGI

Key words

4H-SiC, low cost, surface activate bonding, direct wafer bonding, wafer splitting, SBD, power device

1. はじめに

シリコンカーバイド (SiC) は、シリコン (Si) とカーボン (C) からなる化合物半導体である。SiC にはさまざまなポリタイプ (結晶多形) が存在し、それぞれ物性値が異なる。中でも六方晶の 4H-SiC は Si と比べて絶縁破壊電界強度が 10 倍、バンドギャップが 3 倍と優れており、Si の限界を超える次世代のパワーデバイス用材料として期待されている¹⁾。特に近年は、地球温暖化などの環境問題に対して電力の高効率利用が急務であるハイブリッド車や電気自動車、鉄道等へ用いる省電力デバイス材料として注目が集まっている。

しかしながら、4H-SiC 基板は $\phi 200$ mm までの大口径化が実現されていながら、依然として高コストであることが SiC 半導体市場拡大の妨げとなっている。高コストの理由は、SiC の主な製造手法である昇華法では欠陥密度等の品質を維持しながらの大口径化や高速成長が難しいためである。さらに SiC は、高硬度であるために、スライスや研磨といった基板化加工が難しいことも高コストの要因となっている。

このような背景の中、筆者らは 4H-SiC 基板の低コスト化を目的とし、イオン注入剥離法と基板直接接合法の組み合わせによる貼り合わせ SiC 基板の開発を行っている²⁾³⁾。貼り合わせ SiC 基板は、ホモエピタキシャル成長を実施するのに十分な厚みの単結晶 4H-SiC 薄膜とそれを支持する安価な支持基板で構成される。低コスト化実現の仕組みは、貴重な 4H-SiC インゴットから取れる基板枚数を激的に増加させることにある。例えば、市販されている 4H-SiC 基板は、1~2 cm 長のインゴットから約 20 枚しか得

られないのが現状だが、貼り合わせ SiC 基板の場合は 2000 枚相当以上得ることが可能となる。すなわち、貴重な材料を効率良く使用することが低コスト化の考え方の軸となる。

本解説では、単結晶 4H-SiC/多結晶 SiC 貼り合せ基板について説明した後、これまでに実施した貼り合わせ SiC 基板上の 4H-SiC ホモエピタキシャル層 (ホモエピ層) の評価、および貼り合わせ SiC 基板上のショットキーバリアダイオード (SBD) の評価結果を紹介する。

2. 貼り合わせ SiC 基板の作製

図 1 に貼り合わせ基板の断面構造と想定される使用方法を示す。貼り合わせ SiC 基板は前述したとおり単結晶 4H-SiC 薄膜を支持基板上に貼り合わせたものである。この貼り合わせ SiC 基板は、単結晶 4H-SiC 基板と同様に扱うことができる必要がある。すなわち、(a) の貼り合わせ SiC 基板上に (b) ホモエピ層を形成し、(c) 縦型のデバイスを形成することに対応できなくてはならない。貼り合わせ基板を SiC パワーデバイスに適用するためには、このような SiC に特有の高温プロセスへの耐性や高品質なホモエピ層が形成できることに加えて、さらに縦型デバイスとして使用するため支持基板の抵抗、および接合界面抵抗がデバイス抵抗に比べて十分小さいことが要求される。

図 1 貼り合わせ SiC 基板と想定使用方法

*原稿受付 平成 29 年 6 月 19 日

** (株)サイコックス (東京都千代田区神田松永町 20 番)

***正 会 員 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 (茨城県つくば市並木 1-2-1 産総研つくば東)

図2 貼り合わせ SiC 基板の製造プロセス

そのため、支持基板には前述要求に合致する多結晶 SiC 基板を選定し、貼り合わせ方法には接合界面に何も介さず直接接合が可能な表面活性化・基板直接接合法を採用した⁴⁾。

図2に貼り合わせ SiC 基板の製造プロセスを示す。①のイオン注入工程では、単結晶 4H-SiC 基板表面から深さ $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ 程度の領域に水素イオンを高濃度で注入し脆弱層を形成する。また、界面抵抗を低減するために単結晶 4H-SiC 基板最表面に高濃度のリンイオンを注入する。②の表面活性化接合工程では、単結晶 4H-SiC 基板と多結晶 SiC 支持基板の表面を Ar ビーム照射により活性化して基板同士を接合し加圧する。③の熱処理工程では、貼り合わせた基板を高温で熱処理し、①であらかじめ設けた脆弱層にて単結晶 4H-SiC を劈開分割する。これにより単結晶薄膜を支持基板表面へ転写することができる。④の単結晶 4H-SiC 再生利用工程では、分割した単結晶 4H-SiC 基板を CMP 加工して再び貼り合わせ SiC 基板の製造に用いる。①～④を繰り返すことで、高価な単結晶 4H-SiC を効率良く使用することが可能となる。

採用したイオン注入剥離法⁵⁾は、イオン注入エネルギーの面内ばらつきが非常に小さいため、膜厚が均一な薄膜を剥離させることができる。また、高濃度イオン注入により形成した脆弱層から劈開する際は、カーフロスがほぼゼロということも魅力である。当技法によれば、市販されている $350 \mu\text{m}$ 厚の 4H-SiC 基板 1 枚から貼り合わせ SiC 基板 100 枚相当の単結晶薄膜層を得ることが十分可能である。例えば図3に示すように、ひとつの 4H-SiC インゴットから従来取得できた基板枚数の 100 倍相当の基板を作製することが可能となる。

表面活性化・基板直接接合法は、活性化した基板表面どうしを真空中で接触させることにより、母体となる材料間の共有結合が形成されて、酸化物などの中間層を介在することなく基板の貼り合わせを行うことが可能となる。

図4に透過型電子顕微鏡 (TEM) による貼り合わせ界面の断面観察像を示す。図では単結晶 4H-SiC 薄膜が均一

図3 インゴットからの基板取得枚数イメージ

図4 貼り合わせ SiC 基板の断面 TEM 像

な膜厚で隙間なく多結晶 SiC 基板に貼り合わされていることが分かる。そして、接合界面に酸化膜や析出物は見られておらず、清浄な界面が形成されている。熱的に不安定な中間層の存在は、SiC に特有の高温プロセスへの耐性を損なう恐れもあるため、不要な中間層を介さない接合界面の形成は、SiC の縦型パワーデバイス用途において重要な要素である。

3. 貼り合わせ SiC 基板上 4H-SiC ホモエピタキシャル層の評価

貼り合わせ SiC 基板をパワーデバイス用途に使用するためには、単結晶 4H-SiC 基板と同様に基板上にホモエピ層を形成できなければならない。そこで、貼り合わせ SiC 基板上にも 4H-SiC ホモエピ層が問題なく形成できることを確認するために、貼り合わせ SiC 基板上に $10 \mu\text{m}$ 厚のホモエピ層形成を試みた。エピ成長条件は単結晶 4H-SiC 基板上にホモエピ層を形成する条件と同条件とした。表1に貼り合わせ SiC 基板上に形成したホモエピ層の膜厚、不純物濃度分布の一例を示す。

本結果から、貼り合わせ SiC 基板上にも単結晶基板上と同様のホモエピ層が形成できることを確認できた。

貼り合わせ SiC 基板上に形成したエピ層の品質を調べるために、エピ層表面の溶融 KOH 処理によるエッチピット密度を測定した。図5に、貼り合わせ基板上ホモエピ層表面のエッチピット観察写真を示す。測定された貫通転位密度は $4850 \text{ 個}/\text{cm}^2$ で、単結晶 4H-SiC 基板上のホモエピ層の貫通転位密度と同レベルであり、貼り合わせ基板に起因した新たな貫通転位の増加は見られない。この結果は、単結晶 SiC バルク基板と同等の品質を有したホモエピ層が

表 1 貼り合わせ SiC 基板上のホモエピ層評価結果

評価項目		単位	貼り合わせ SiC 基板	単結晶 SiC 基板
膜 厚	平均値	μm	10.5	10.0
	均一性 (σ/Ave)	%	5.4	6.0
ドナー 濃 度	平均値	$10^{16}/\text{cm}^3$	1.09	1.04
	均一性 (σ/Ave)	%	4.7	4.9

図 5 貼り合わせ SiC 基板上エピ層表面の顕微鏡像

貼り合わせ SiC 基板上に形成できていることを示している。

4. 貼り合わせ SiC 基板を用いた SBD の特性と 界面抵抗の低減

貼り合わせ SiC 基板上に作製したデバイスは、単結晶 4H-SiC 基板上に作製した同デバイスと同等の性能が求められる。それを確認するために、ホモエピ層上にショットキーバリアダイオード (SBD) を作製し I-V 特性を評価した。通常、貼り合わせた基板の接合界面は、界面準位や接合欠陥などで界面抵抗が生じる。特に本貼り合わせ SiC 基板は、多結晶 SiC 基板 (結晶多形は 3C が主) と単結晶 4H-SiC 基板のヘテロ接合構造であるため、縦型構造のデバイスの順方向電流に無視できない抵抗が生じることが分かっている。

図 6 に貼り合わせ界面のバンドモデル想定図を示す。貼り合わせ界面では、単結晶 (4H-SiC) と多結晶 (3C-SiC) のヘテロ接合によるバンドオフセットが生じており、かつ界面に位置する界面準位に電荷が捕獲されてエネルギー障壁が形成される。この障壁が界面抵抗となっていることが想定される。さらに、このエネルギー障壁は、窒素濃度の低い単結晶 4H-SiC 側の空乏層 (X2) がより広がって非対称となっていることが考えられる。

この界面抵抗を低減させるために、筆者らは接合界面近傍に高濃度のリンをドーピングし、空乏層幅を狭くしてエネルギー障壁の電子のトンネリング電流を増大させる方法を採用している (図 2 の①)。その SBD の順方向 I-V 特

図 6 貼り合わせ界面近傍のエネルギーバンドの想定図

図 7 貼り合わせ SiC 基板上 SBD の順方向特性

図 8 貼り合わせ SiC 基板上 SBD の逆方向特性

性を図 7 に示す。接合界面にリンをドーピングした貼り合わせ SiC 基板上 SBD は、単結晶 4H-SiC 上 SBD と同等の I-V 特性が得られている。測定された抵抗値は、ほぼ基板の抵抗値と同等であり、界面抵抗は十分小さくなっていることが確認できた。単結晶 4H-SiC 基板および貼り合わせ基板共に、SBD の理想係数は 1 と良好な値であった。

図 8 に SBD 逆方向特性を示す。貼り合わせ SiC 基板と単結晶 4H-SiC 基板上 SBD 両者の逆特性は同等であることを確認した。SBD の I-V 諸特性の結果は、貼り合わせ SiC 基板が単結晶 4H-SiC 基板と電気的に同等の品質のホモエピ層およびデバイスが作製可能であることを示している。

5. ま と め

4H-SiC 基板の新しい低コスト化アプローチとして、イオン注入剥離法と表面活性化接合法を組み合わせた貼り合わせ SiC 基板の作製を検討した。貼り合わせ SiC 基板は、単結晶 4H-SiC 基板と同等に取り扱えることを実証し、パワーデバイス用途として有力であることを示した。近い将来、本貼り合わせ SiC 基板は 4H-SiC の市場拡大に大いに貢献できるものと期待する。

参 考 文 献

- 1) 松波弘之, 大谷昇, 木元恒暢, 中村孝: 半導体 SiC 技術と応用 (第2版), 日刊工業新聞社, (2011) 9.
- 2) J. Suda, T. Okuda, H. Uchida, A. Minami, N. Hatta, T. Sakata, T. Kawahara, K. Yagi, Y. Kurashima and H. Takagi: Characterization of 4H-SiC homoepitaxial layers grown on 100-mm-diameter 4H-SiC/poly-SiC bonded substrates, Th-P-62, abstracts of ICSCRM, (2013) 358.
- 3) N. Hatta, A. Minami, T. Sakata, T. Kawahara, K. Yagi, H. Uchida, T. Okuda, J. Suda, Y. Kurashima and H. Takagi: Low-resistance 4H-SiC/poly-SiC Bonded Interfaces Fabricated by a Surface-Activated Bonding Method, MO-P-50, abstracts of ECSCRM, (2014).
- 4) H. Takagi, K. Kikuchi, R. Maeda, T.R. Chung and T. Suga: Surface activated bonding of silicon wafers at room temperature, Applied Physics Letters, **68**, 16 (1996) 2222-2224.
- 5) M. Bruel: Application of hydrogen ion beams to Silicon On Insulator material technology, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B **108** (1996) 313-319.

河原孝光

1995 年東海大学大学院工学研究科電子工学専攻修士。修士。HOYA(株)に入社し単結晶 3C-SiC の開発に従事。現在(株)サイコックスにて貼り合わせ SiC 基板の開発を行っている。

八田直記

2001 年大阪大学大学院理学研究科物理学専攻修士課程修了。修士。HOYA(株)に入社し単結晶 3C-SiC の開発に従事。現在(株)サイコックスにて貼り合わせ SiC 基板の開発を行っている。

坂田豊和

1998 年東海大学大学院工学研究科電子工学専攻修了。修士。沖電気工業(株)、産業技術総合研究所にて SiC インバータ開発業務、HOYA(株)を経て現在は(株)サイコックスにて貼り合わせ SiC 基板の開発を行っている。

南 章行

1991 年東京理科大学基礎工学部修了。修士。沖電気工業(株)に入社。産業技術総合研究所にて SiC インバータ開発業務、HOYA(株)を経て現在は(株)サイコックスにて貼り合わせ SiC 基板の開発を行っている。

八木邦明

1993 年東京工業大学大学院工学部無機材料工学専攻修士課程修了。修士。HOYA(株)にて半導体薄膜の構造解析、単結晶 3C-SiC 基板の開発に従事。現在(株)サイコックスにて貼り合わせ SiC 基板の開発を行っている。

内田英次

1981 年三重大学工学部電気工学科修了。学士。沖電気工業(株)に入社し、LSI プロセス技術開発、生産技術開発、不良解析、酸化膜信頼性評価、生産工場立ち上げに次々と携わり、HOYA(株)を経て(株)サイコックスに入社、SiC デバイスの開発を行っている。

小林元樹

1985 年法政大学工学部電気工学科修了。学士。沖電気工業(株)にて生産工場立ち上げ、SiC パワー MOS 等の新技術の企画、研究開発に従事。HOYA(株)を経て(株)サイコックスに入社。技術部長として SiC 貼り合わせ基板開発全体のマネージメントに従事。

高木秀樹

1991 年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年、通商産業省工業技術院機械技術研究所研究員。1999 年博士(工学)。ウェハの常温接合技術開発、ウェハ接合によるマイクロシステムの集積化技術および高機能半導体複合基板の開発に従事。現在、(国研)産業技術総合研究所集積マイクロシステム研究センター総括研究主幹、同ウェハレベル実装研究チーム長を兼務。