c-BN

# 新機能ワイドギャップ半導体材料の開拓

ワイドギャップ半導体であるc-BN(立方晶窒化ホウ素)は、半導体の中 でもっとも高い絶縁破壊電界を有しており、高効率なパワーデバイスを実 現できる材料として高い可能性を秘めています。NTT物性科学基礎研究所 では、独自の成長技術を開発することによって、c-BN薄膜の高品質ヘテロ エピタキシャル成長を初めて実現しました。本稿では、その成長技術と、 実際のパワーデバイス応用に不可欠なドーピングによるc-BN薄膜の電気伝 導性制御について紹介します。

<sup>ひらま</sup>	<sup>かずゆき</sup>	たにやす	ょしたか
平間		<b>/谷保</b>	<b>芳孝</b>
やまもと	ひでき	<まくら	<sup>かずひで</sup>
山本	秀樹	<b>/熊倉</b>	一英

## NTT物性科学基礎研究所

# ワイドギャップ半導体の パワーデバイス応用

ワイドギャップ半導体は、現在主流 の半導体材料であるSi(シリコン)や GaAs (ヒ化ガリウム) では実現でき ない. 低電力損失のパワーデバイスへ の応用が期待されている材料です. パ ワーデバイスは、システムの要求に合 わせて電力を直流から交流、交流から 直流へと変換したり. 直流電圧の昇 圧・降圧. 交流の周波数変換を行った りする、電力変換デバイスです。こう したデバイスは身の回りのいたるとこ ろで使われており、例えば、100 Vの 交流をPCや携帯端末の駆動・充電に 適した20 V前後の直流に変換するAC アダプタもパワーデバイスの1つで す. パワーデバイスをある特定の電圧 で動作させたときの、半導体材料ごと の電力損失の傾向を図1に示します. 電力損失は、そのデバイスの動作時の 抵抗値(オン抵抗)で決まり、使われ ている半導体材料のキャリア濃度に反

\*1 絶縁破壊電界:絶縁体や半導体材料に印加 する電界強度を大きくしていくと、ある電 界強度以上で急激に大電流が流れるように なります(絶縁破壊が起こります). 絶縁破 壊が起こり始める電界強度を絶縁破壊電界 といい、その大きさは材料によって異なり ます. 比例し,電流パスの長さに比例します. 絶縁破壊電界\*1が高い半導体材料ほ ど,キャリア濃度をより高濃度に,ま た電流パスもより短くすることができ るため,SiやGaAsと比べて,約1桁 もしくはそれ以上の高い絶縁破壊電界 を有するワイドギャップ半導体を用い ると,オン抵抗を3桁以上小さくする ことができます.その結果,電力損失 (エネルギー損失)が小さく,省エネ ルギー・高効率なパワーデバイスが作 製できることになります.代表的なワ イドギャップ半導体はSiC(炭化シリ コン)とGaN(窒化ガリウム)です. これらの材料を用いたパワーデバイス は、すでに実用化が進んでおり、例え ばSiCは、架線の直流電圧を交流に変 換してモーターを駆動する鉄道車両用 のインバータなどに使用され始めてい ます.



NTT物性科学基礎研究所では、次 世代のワイドギャップ半導体として注 目を集めているc-BN(立方晶窒化ホ ウ素). AlN (窒化アルミニウム). ダ イヤモンドの研究を行っており、本稿 では、半導体中でもっとも高い絶縁破 壊電界を有しているc-BNについて紹 介します. c-BNを利用したパワーデ バイスは、ほかの半導体材料のパワー デバイスと比べて、同じ電圧で動作さ せたときの電力損失をもっとも小さく することができます (図1). Siや GaAsと比べると、動作時の電力損失 を4桁以上(実用化が進んでいるSiC やGaNと比べても、さらに1桁以上) 低減できるポテンシャルがあります. こうした電力損失の小さい(高効率の) パワーデバイスを,電気自動車や鉄道, また太陽光・風力発電に応用できれ ば,地球規模でのエネルギー利用の高 効率化や資源の有効利用につながり, 持続可能な社会の実現に貢献できると 考えています.

#### 独自の手法によるc-BN薄膜の成長

BN (窒化ホウ素) は、ホウ素と窒 素からなる化合物であり、ホウ素と窒 素の結合の仕方や積層の周期の違いに よって結晶構造が異なります.代表的 な結晶構造は、グラファイトに似た層 状構造のh-BN (六方晶窒化ホウ素)と、 閃亜鉛鉱構造のc-BNです(図2). h-BNは、層内はsp<sup>2</sup>と呼ばれる共有結 合、層間はファンデルワールス結合に



より結合しており、常温常圧下では もっとも安定な結晶相(常温常圧安定 相)です. 一方, c-BNは, sp<sup>3</sup>と呼ば れる共有結合のみからなる高温高圧安 定相であり、常温常圧下では進安定な 結晶相です。半導体のデバイス応用の ための薄膜の作製では、主に、キャリ ア濃度や膜厚を精密に制御可能な気相 成長法が利用されていますが、一般的 な気相成長法の成長温度と成長圧力の 範囲(1400 ℃以下, 1気圧以下)で は準安定相であるc-BNの成長は困難 です.気相成長法においても、試料表 面にイオンを照射(イオンアシスト) しながらBN薄膜を成長することで、 高温高圧安定相であるsp<sup>3</sup>結合相の形 成が可能になりますが、熱力学的安定 相であるsp<sup>2</sup>結合相が混入しやすいた め、これまでに報告されているBN薄 膜にはsp<sup>3</sup>結合相とsp<sup>2</sup>結合相の両方が 混在していました.

NTT物性科学基礎研究所では、Ar<sup>+</sup> イオン照射(イオンアシスト)を利用 した独自の気相成長手法(イオンビー ムアシストMBE法)を開発し(図3), 気相成長法でありながら $sp^2$ 結合相を 含まないc-BN薄膜のエピタキシャル 成長に成功しました.c-BN薄膜の原 料であるホウ素は電子線加熱蒸発源か ら供給しました.窒素は、 $N_2$ (窒素 分子ガス)ではなく、高周波プラズマ 下で生成する、反応性の高い原子状の N<sup>\*</sup>(窒素ラジカル)として供給して



います.同時に、イオンソースからは Ar<sup>+</sup>イオンを加速させて供給していま す.各原料とイオンの供給量は独立に 制御することが可能です.薄膜成長の 土台となる基板には、c-BNと格子定 数の近いダイヤモンド(001)基板上を 用いています<sup>(1),(2)</sup>.

まず,成長中のAr<sup>+</sup>イオン照射の有 無によるホウ素と窒素の結合様式の違 いを説明します.成長後のBN薄膜の FT-IR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) 透過吸収測定<sup>\*2</sup>の結 果を図4に示します.Ar<sup>+</sup>イオン照射 を行わずに成長したBN薄膜のFT-IR スペクトルでは,sp<sup>3</sup>結合に由来する 吸収ピークはみられず,1380 cm<sup>-1</sup>と 780 cm<sup>-1</sup>近傍にsp<sup>2</sup>結合に由来する吸 収ピークのみがみられました.この結 果は、すべてのホウ素と窒素の結合が sp<sup>2</sup>結合であることを意味しており、 熱力学的に安定なsp<sup>2</sup>結合のBN薄膜が 成長していることが分かります. 一方,  $Ar^+ ( \tau \times ) \Pi h c$ 行いながら成長した 場合では, sp<sup>2</sup>結合の吸収ピークはみ られず, 1070 cm<sup>-1</sup>近傍にsp<sup>3</sup>結合に

\*2 FT-IR透過吸収測定:サンプルに赤外光 (IR)を照射し、透過した光と入射した光量 の差から、サンプルに由来する赤外光の吸 収を評価する測定手法、検出器で検出した 広い波長範囲のIRを一括してフーリエ変換 (FT)することでスペクトルに変換してい ます。 特

由来する吸収ピークのみがみられま す. このことから、すべてのホウ素と 窒素の結合はsp<sup>3</sup>結合になっており、 sp<sup>2</sup>結合を含まないBN薄膜となってい ることが分かります.このように、N\* によるホウ素の窒化だけではホウ素と 窒素の結合はすべてsp<sup>2</sup>結合となりま すが、同時にAr<sup>+</sup>イオンを照射するこ とでsp<sup>3</sup>結合のみを選択的に形成する ことが可能です.成長中のイオン照射 によってsp<sup>3</sup>結合が形成されるメカニ ズムはいまだ明らかではありません が、イオン照射による運動エネルギー または運動量を受けて高いエネルギー 状態になったホウ素と窒素どうしが結 合して直接sp<sup>3</sup>結合を形成しているか. sp<sup>2</sup>結合が運動エネルギーまたは運動 量を受けてsp<sup>3</sup>結合になっているかの どちらかだと考えています.

原子配列の規則性の有無が分かる断 面透過電子顕微鏡 (TEM: Transmission Electron Microscope) 観察の結果を図 **5**に示します.sp<sup>3</sup>結合のみのBN薄膜 は,基板として用いたダイヤモンド (001)基板上に均質に成長しています. 薄膜部分の制限視野電子線回折のパ ターンは,理論的に予測されたc-BN (001)の制限視野電子線回折パターン と,スポットの位置と間隔の点で一致 することから,形成された薄膜が,単 結晶のc-BN (001)薄膜であること,ま た,ダイヤモンド (001)基板の原子配 列を引き継いでエピタキシャル成長し







ていることが明らかになりました<sup>(3)</sup>.

#### c-BN薄膜の電気伝導性制御

デバイスを作製するためには、単に c-BNの高品質薄膜を成長するだけで はなく、そこにアクセプタやドナーに なる不純物をドーピングして、p型や n型半導体をつくる必要があります. そこでまず、n型c-BN薄膜の成長を目 的として、c-BN中でドナーとなるこ とが知られているSiをドーピングし ました.Siは、c-BN薄膜成長中にク ヌーセンセル(K-セル)\*<sup>3</sup>から供給し ています.

シリコン濃度([Si])が1.2×10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>のc-BN薄膜のキャリア濃度の温 度依存性を図6に示します.室温と 500 °Cにおけるキャリア濃度は2.1× 10<sup>15</sup> cm<sup>-3</sup> および $6.0 \times 10^{17}$  cm<sup>-3</sup> であ り,温度に対してキャリア濃度が単調 に増加しています.電荷中性条件の式 によるフィッティングから見積もっ た,ドナーのイオン化エネルギー( $E_D$ ), ドナー濃度( $N_D$ ),アクセプタ濃度( $N_A$ ) は,それぞれ,0.20 eV,1.1×10<sup>18</sup> cm<sup>-3</sup>, 4.6×10<sup>17</sup> cm<sup>-3</sup> です. $N_D$ が,[Si]とほ



したSi原子のほとんどがホウ素サイ トを置換してドナーとして働いている と考えられます.また,フィッティン グから得られたE<sub>D</sub>の値(0.20 eV)は, c-BNと同様に次世代のワイドギャッ プ半導体として期待されているダイヤ モンドやAINへドーピングした際のE<sub>D</sub> よりも小さい値です.E<sub>D</sub>の値が小さ いほど,室温でドナーがイオン化しや すく,高いキャリア濃度が得られるこ とから,c-BNを用いると,ダイヤモ ンドやAINよりも低損失なパワーデバ イスが作製できると期待できます.

ぼ一致していることから、ドーピング

特

室温におけるSiドープc-BN薄膜の 抵抗率のSiドーピング濃度依存性を 図7に示します.比較のために、意図 的なドーピングを行っていない(ノン ドープ) c-BN薄膜のデータも記載し ています. ノンドープc-BN薄膜は抵 抗率が~10<sup>8</sup> Ω·cmであり,非常に高 い絶縁性を示しますが、Siドーピング した [Si]: 1.5×10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup>のc-BN薄 膜では、約260 Ω·cmの低い抵抗率が 得られました.この値は,エピタキシャ ルc-BN薄膜では現在もっとも低い値 です. Si濃度の増加によってc-BN薄 膜の抵抗率が系統的に減少しているこ とから、Siドーピングによって、n型 c-BN薄膜の電気伝導性を制御できる

\*3 クヌーセンセル:原料の分子線の供給量を 高精度かつ安定に制御可能な抵抗加熱蒸発



図7 Siドープc-BN薄膜の抵抗率のSiドーピング濃度依存性

といえます. 電気伝導性制御は実際の デバイス応用にとって必要不可欠であ り, c-BN薄膜のデバイス応用への道 を大きく拓く成果です.

### 今後の展開

本稿では、NTT物性科学基礎研究 所が精力的に取り組んでいる新材料研 究のうち, c-BN研究の現状について 紹介しました. 高品質薄膜の成長と ドーピング制御の研究の積み重ねによ り,現在までに、デバイス応用の足掛 かりとなるn型c-BN薄膜の電気伝導性 の制御が可能になりました. 今後、 c-BN薄膜のさらなる結晶性の向上と ともに、p型ドーピングや、トランジ スタ等のデバイスを作製する研究を通 じ、実用化に向けた基盤技術の確立に 取り組んでいきます.

#### ■参考文献

- 平間・谷保・山本・熊倉:"イオンビームア シストMBE法による立方晶BN (c-BN) 薄膜 のヘテロエピタキシャル成長,"応用物理, Vol.85, No.4, pp.306-310, 2016.
- (2) K. Hirama, Y. Taniyasu, S. Karimoto, H. Yamamoto, and K. Kumakura: "Heteroepitaxial growth of single-domain cubic boron nitride films by ion-beam-assisted MBE," Appl. Phys. Exp., Vol.10, No.3, 035501, 2017.
- (3) K. Hirama, Y. Taniyasu, S. Karimoto, Y. Krockenberger, and H. Yamamoto: "Singlecrystal cubic boron nitride thin films grown by ion-beam-assisted molecular beam

epitaxy," Appl. Phys. Lett., Vol.104, No.9, 092113, 2014.



## (左から) 平間 一行/ 谷保 芳孝/ 山本 秀樹/ 熊倉 一英

c-BNは, 高効率のパワーデバイスへの応 用が期待できる産業上重要な半導体材料で すが, 一方で, その物性や結晶成長機構は いまだ完全には解明されていません. 今後 は, 独自のc-BN成長技術をさらに高めてパ ワーデバイス応用の研究を加速させながら, そうした学術的な課題の解決にも取り組ん でいきます.

◆問い合わせ先 NTT物性科学基礎研究所 機能物質科学研究部 TEL 046-240-3356 FAX 046-240-4929 E-mail kazuyuki.hirama.gz@hco.ntt.co.jp