

## 高温耐環境 cBN 薄膜デバイス創製

Development of High-temperature cBN Thin Film Devices  
for Severe Environments

吉田 豊信 (Yoshida Toyonobu)  
東京大学・工学系研究科・教授



### 研究の概要

アルミニウムが軟化するほどの高温や強い紫外・粒子線に晒される原子炉近傍などの過酷な環境下でも作動する立方晶窒化ホウ素(cBN)の薄膜を使った半導体デバイス創製を目指し、二種の異なるプラズマプロセスを適用して、ガス・イオンエネルギー動的制御機構と不純物添加法を新規に開発し、cBN 薄膜で初めてとなる伝導度制御を実現するとともに、局所的ではあるが Si 表面原子ステップでのエピタキシャル成長現象を見出した。

研究分野：工学

科研費の分科・細目：材料工学 ・ 材料加工・処理

キーワード：高温耐環境半導体、薄膜、プラズマプロセス、新材料創製

### 1. 研究開始当初の背景

cBN 薄膜に関する研究は 80 年代後半から急激な広がりを見せた。それらは超硬コーティングへの応用を狙ったものであり、高温耐環境半導体を志向した薄膜成長や電子物性研究は皆無であった。本研究グループは、cBN 薄膜合成研究の揺籃期よりプラズマを用いた薄膜合成に取り組み、高品質薄膜合成に関する学術的バックグラウンドを確立してきたと自負している。これらの研究履歴を背景に、世界に先駆けて半導体物性についての研究を行い、デバイス化への展開を図る。

### 2. 研究の目的

1) 薄膜デバイスに必須となる新規ドーピング手法の開発、並びに伝導、電極コンタクトに関する諸現象の解明、2) 単結晶 cBN 薄膜堆積を目指した、バイアス・ガス組成変調を駆使したヘテロエピタキシー成長法の工学的基礎展開、及び③それらを含めたナノ結晶 cBN 薄膜高温耐環境デバイス創製。

### 3. 研究の方法

設計試作した超高真空仕様の CP-CVD 反応器、1200°C までのアニール機構を有する超高真空仕様二極 RF スパッタリング装置により薄膜堆積を行った。新規に開発したガス/バイアス自動制御機構と不純物添加手法を用い、高純度 cBN 薄膜中の微量添加不純物濃度を任意に制御する手法を開発し、四重極質量分析計、Voltage

source により in-situ で観測・分析した。堆積された薄膜試料はスピコーターや EB 等を用いて計測用電極を形成し、マニュアルプローバー、半導体特性評価装置を用いて電気特性を評価した。

### 4. 研究の主な成果

本研究における成果は以下の 4 点にまとめられる。

#### 1) 新規不純物添加手法の開発。

スパッタドーピング法と命名した固体ドーパントを用いる新規の不純物添加手法を開発した。本手法により簡便かつ、有機金属ガス種を用いない安全な方法で cBN 薄膜中に金属元素を添加し、その濃度を数桁の広い範囲で制御可能であることを実証した。また、in-situ のプラズマ状態計測により固体ドーパントの表面状態を明らかにし、ex-situ の不純物定量化手法により濃度制御性が確認された。

#### 2) バイアス・ガス組成変調手法の開発。

物性の異なる二つの物質からなる急峻な界面を実現するため、動的に変化するプラズマ/基板状況に合わせた堆積環境を実現する手法として、基板負バイアスとガス組成を 0.1 sec 間隔で自動制御する機構を開発した。PC-based のソフトウェアにより任意の時間関数を有するバイアス及びガス組成が 0.1 % 以下の誤差範囲で再現性良く実現するシステムを作製した。

#### 3) 伝導や電極接触に関する諸現象の解明。

Zn、Mg ドーパントにより薄膜で初となる

伝導性制御を実現した。従来の研究においては II 族元素がホウ素置換することにより p 型伝導が発現するとの理論的予想が立てられていたが、本研究では窒素置換においても同様の結果が得られる可能性を示した。更に、気相合成 cBN 薄膜に対する金属電極の接触比抵抗を初めて定量的に評価した。また、Si、S ドーピングについても検討した。

4) Si 表面原子ステップにおけるヘテロエピタキシーの実現。

上述のバイアス・ガス変調手法と、透過型電子顕微鏡像の解析により、Si 表面に存在する原子状ステップにおいて部分的ではあるが、cBN/Si のエピタキシャル成長を確認した。

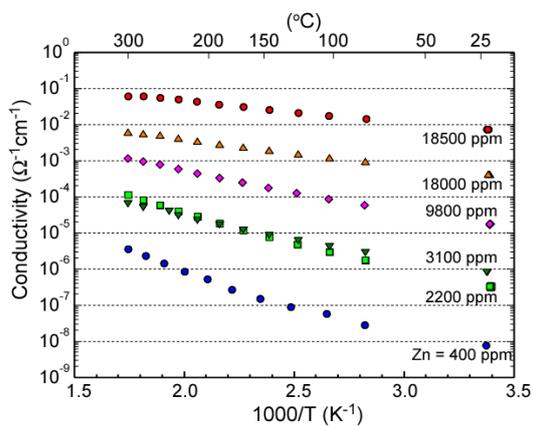


図 1: スパッタドーピング手法により初めて実現された伝導度の制御を示す結果。不純物濃度を制御し、それに応じて半導体的な伝導度が変化している。

5. 得られた成果の世界・日本における位置づけとインパクト

上述の成果 1) は実験室的手法の段階であるが、プラズマプロセスの大半に適用可能であり、低コスト、高安全性の産業用的手法として応用が広がるものと期待されている。2) のガス変調機構は時を同じくして数社の装置メーカーから販売が開始された。バイアス変調機構は新規に開発したものであり、イオン衝撃を伴う非平衡プロセスの制御において今後欠かすことが出来ないものになると推測される。3) は従来の理論的説明に欠落していた II 族元素の窒素置換を実験及び理論の両面で示した特異な成果であると言える。議論の決着には時間を要するが、cBN において置換サイトを陽に考慮する必要があることを世界で初めて示した成果である。4) については 2004 年に初めて報告された、ダイヤモンド上でのヘテ

ロエピタキシャルに続く成果であり、安価な Si 基板上で工学的手法によりエピタキシャル成長が可能であることを示した画期的な成果となった。特に 3)、4) の成果については、国際・国内学会において多数の質問を受けるなど本分野の研究者に大きなインパクトを与えていると確信している。

## 6. 主な発表論文

1. K. Kojima, K. Nose, M. Kambara, T. Yoshida, Effects of magnesium doping on growth and electric conductivity of nanocrystalline cubic boron nitride thin films, *J. Phys. D-Applied physics*, **42** [5] (2009) 055304.
2. K. Nose and T. Yoshida, Semiconducting properties of zinc-doped cubic boron nitride thin films, *J. Appl. Phys.*, **102** (2007) 063711.
3. H. S. Yang, C. Iwamoto, T. Yoshida, Direct nucleation of cubic boron nitride on silicon substrate, *Diamond Related Mater.*, **16**[3], (2007) 642.
4. H. Oba, K. Nose and T. Yoshida, Effects of Si impurity on the nucleation and growth of cubic boron nitride thin films, *Surf. Coat. Technol.* **201** (2007) 5502.
5. K. Nose, H. Oba, T. Yoshida, Electric conductivity of boron nitride thin films enhanced by in situ doping of zinc, *Appl. Phys. Lett.* **89**[11] (2006) 112124.
6. K. Nose, HS. Yang, H. Oba, and T. Yoshida, Defect-induced electronic conduction of tBN thin films, *Diamond Related Mater.* **14**[11-12] (2005) 1960-1963.
7. H. S. Yang and T. Yoshida, Mechanical properties of boron nitride films prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition, *Surf. Coat. Technol.* **200** [1-4] (2005) 984-987.
8. K. Nose, HS. Yang, and T. Yoshida, Electrical characterization of p-type cubic boron nitride/n-type silicon heterojunction diodes, *Diamond Related Mater.*, **14** [8] (2005) 1297-1301.
9. H. Yang, C. Iwamoto, and T. Yoshida, Peculiar deformation characteristics of turbostratic boron nitride thin film, *Thin Solid Films*, **483** (1-2) (2005) 218-221.

ホームページ等

<http://www.plasma.t.u-tokyo.ac.jp/>