

審査の結果の要旨

氏名 野瀬 健二

立方晶窒化ホウ素(cubic boron nitride: cBN)は III-V 属半導体で最大のバンドギャップと良好なドーパビリティを有するといった基礎特性から、高温・高出力電子デバイスとしての応用が期待される物質である。本論文はこうした応用において最も重要となる、電子デバイス級高品位 cBN 薄膜の堆積とその電気伝導性を議論し、伝導制御の可能性を初めて明確に示した研究報告である。本論文は以下の五章から成る。

第一章は序論であり、BNの基本的な性質と応用可能性をまとめ、薄膜成長で提唱されているモデルと電気伝導性制御の物理的背景について詳述し、本研究の位置付けと目的を明確化している。

第二章は二極 RF バイアススパッタ、ICP-CVD 両手法における基礎的なパラメータの影響と cBN の形成において本質的なイオンエネルギーのその場測定の結果を詳述している。具体的には、0.6 nm/s 以上の堆積速度で cBN を堆積する条件下での基板電位とイオンエネルギー分布との関連等を明らかにし、cBN 堆積に必要とされるプラズマパラメータとして、プラズマ密度; 10^{17} m^{-3} 以上、イオンエネルギー; 250~350 eV、およびイオン運動量流束; $5 \times 10^{-12} \text{ kg/ms}^2$ 以上、を導出した。他方、シリコンおよび石英の基板を用いた衝撃イオンエネルギーの流束分布の比較から、石英のような絶縁性基板上へのイオン流束はシリコンのそれと比較して 1/6 程度まで低減されることを示し、光電子分光法(XPS)による π -プラズモン、B1s、N1s ピークシフトの分析結果に基づき堆積条件を再設定し、絶縁性基板においても立方晶 BN の堆積を可能とした。本成果は、これまで明確に議論されてこなかった、基板の電気伝導性に依存した cBN 堆積に要する最適印可電圧の存在を明示したもので、これにより、第三章以降に記す BN 薄膜の電気伝導性の定量的評価を可能とした点で高く評価される。

第三章は無ドーパ BN 薄膜における伝導特性をまとめている。まず、乱層 BN 薄膜における強い電界強度下での伝導が、B 過剰の組成において顕著となる結果を明示し、その理由として B-B 結合の生成を伴うアンチサイト B による 0.4 eV 程度以上の深い不連続な準位形成をあげ、この欠陥をプロセスへの過剰な窒素導入により除去することで、上述のリーク電流が完全に消失しうることが示した点が高く評価される。他方、乱層 BN を自発的な初期層とする乱層 BN/cBN の二層構造を n 型シリコン基板上に形成し、初期層の厚さを低減させた場合には、異種接合ダイオード的な整流作用を発現しうることを見出している。このダイオード特性による整流比(正負の電圧における電流値の違い)は初期乱層 BN 層の厚さに依存し、初期層膜厚が約 25 nm 以下の膜構造においては、室温において 4 桁以上にも及ぶことを示している。また、二層薄膜の電流-電圧特性に関しては、室温から 300°C までの温度依存性ととも、キャリア密度の小さな BN 中の正孔に対する 0.35eV 程度のエネルギー障壁の印可電圧に依存した増減により理論付けられている。以上の成果は cBN 薄膜を用いたデバイス動作を初めて実証するものとして興味深い。

第四章ではスパッタ・ドーピング法と名付けられた、プラズマ中への棒状バルク挿入と DC 負バイアス印可に基づいた新規の in-situ のドーピング手法が詳述されている。

この手法はプラズマプロセスに広く応用可能なものであり、スパッタリング、プラズマ中での自由散乱、表面での付着の三過程に基づくモンテ・カルロ法による計算により、実験で示された Si と Zn の面内濃度分布を定量的に予測可能であることが示され、濃度制御の基本原則を明確にしている。更に、Zn ドープにより実現された伝導度の向上は 6 桁にもおよび、ゼーベック測定による p 型伝導の確認と合わせて、cBN 薄膜では初めてとなる、添加不純物による伝導度制御を実証している。この伝導度の向上が、組成比が B 過剰から化学量論組成比に近づくことにより消失する結果から、ドープ効果を Zn による不純物準位の形成とアンチサイト B を含む点欠陥の生成によるものと結論付けている。

第五章は総括であり本研究で得られた成果を総括している。

以上を要するに、本研究は精緻な薄膜堆積プロセスの制御と、それに基づいた BN 薄膜の様々な物性評価により、高導電性 cBN 薄膜の実現という本分野研究の先駆的役割を果たすものであり、材料工学に対する貢献は極めて大きい。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。