

平成 21 年 5 月 20 日現在

研究種目：若手研究（B）
 研究期間： 2007～2008
 課題番号：19760213
 研究課題名（和文） 高濃度ボロン添加ダイヤモンド超伝導体薄膜を用いたジョセフソンデバイスの開発
 研究課題名（英文） Development of Josephson devices using heavily boron-doped diamond superconducting thin films
 研究代表者
 川江 健（KAWAE TAKESHI）
 金沢大学・電子情報学系・講師
 研究者番号：30401897

研究成果の概要：

ダイヤモンド超伝導体ジョセフソン接合の作製を目指し、高濃度ボロン添加ダイヤモンド薄膜の作製および微細加工プロセスの確立を試みた。

マイクロ波プラズマ CVD 法を用いた高濃度ボロン添加ダイヤモンド薄膜作製に関して、Si(111)およびダイヤモンド (111)基板上に超伝導転移温度 4～6K の超伝導ダイヤモンド薄膜の作製を実現した。特に Si(111)基板上でのダイヤモンド超伝導体薄膜のヘテロエピ成長は世界的にも初めての成功例であり、当該材料を用いた今後のデバイス応用を検討する上で有用な成果と言える。また、デバイス作製に向けたダイヤモンド薄膜の微細加工として O₂プラズマ RIE を用いたダイヤモンド基板の段差加工およびホモエピ成長したダイヤモンド超伝導体薄膜のエッチングを試み、段差基板上にウィークリン型接合形成を実現した。

上記の各種プロセスにより作製された接合試料の基礎特性を評価した結果、観測温度 2K においてジョセフソン接合的な振る舞いを確認した。今後は試料の超伝導転移温度の更なる向上と微小接合を用いたトンネル分光による詳細な各種接合特性の評価が求められる。

以上の結果より、本研究課題が掲げるダイヤモンド超伝導体ジョセフソン接合実現に向けたダイヤモンド超伝導薄膜作製および接合作製用微細加工プロセスの基礎がほぼ確立されたものと言える。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,800,000	0	1,800,000
2008 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	420,000	3,620,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電子・電気材料工学

キーワード：超伝導材料・素子、低温物性

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンド半導体はその優れた物性値(高移動度・ワイドバンドギャップ)から次世代

型半導体デバイス用の材料として知られる。一方、ダイヤモンドに高濃度のボロン添加を行うと超伝導性が発現する事が近年新たに

発見された。この添加不純物濃度に依存して超伝導体⇔半導体と劇的に変化する特性は、異なる伝導機構の素子が融合された革新的ハイブリッドデバイスや超伝導エレクトロニクス最大の利点である超低消費電力デバイスの新規創生を予見させるものと言える。

しかしながら、現状ではダイヤモンド超伝導体の発見から既に数年が経過しているものの、超伝導デバイスの基本素子となる「ジョセフソン接合(超伝導トンネル接合)」の報告例は未だ無い。一方、新しい材料の超伝導性に関する物性評価を行う際、ジョセフソン接合を用いたトンネル分光は各種超伝導特性の評価において信頼性の高い特性観測を実現する強力なツールとなりうる。

2. 研究の目的

本研究では、ダイヤモンド超伝導体ジョセフソン接合の作製と詳細な物性評価を実現するべく、ジョセフソン接合の作製を目指したダイヤモンド超伝導体薄膜の作製および微細加工プロセスの確立を目的とした研究を行った。

3. 研究の方法

ダイヤモンド超伝導体薄膜試料の作製はマイクロ波プラズマ CVD 装置を用いて、成膜時の原料ガスおよびボロン添加ガスをそれぞれ CH_4 とトリメチルボロン (TMB) とし、 H_2 プラズマ中で Si(111)およびダイヤモンド(111)基板上にダイヤモンド薄膜を堆積させた。成膜条件として、投入電力・ H_2 ガス圧・ CH_4 および TMB ガスの濃度を変化させて成膜を行った。なお、Si 基板上でのダイヤモンド成長を促す手法のひとつに BEN(Bias Enhanced Nucleation)処理がある。これは成膜前の真空層にプラズマを発生させた状態で基板に対して直流バイアスを印加する事でプラズマ中の活性種で表面を僅かにエッチングし、ダイヤモンドの成長核(初晶)形成を促す処理である。プロセスとしては、自然酸化膜除去(フッ酸処理)後、薄膜堆積前に H_2 プラズマ中で 100~150V の直流バイアス印加を施した。

作製されたダイヤモンド薄膜の微細加工は O_2 プラズマを用いた反応性イオンエッチング (RIE) および集束イオンビーム (FIB) 加工により行った。

試料の評価に関して、試料表面の直接観察を走査型電子顕微鏡 (SEM) および原子間力顕微鏡 (AFM)、膜厚測定を触針式膜厚計により行った。また、得られた高濃度ボロン添加ダイヤモンド薄膜の超伝導特性は 4 端子法を用いた抵抗-温度測定により 2~RT の温度範囲で行った。

4. 研究成果

Si 基板上への高濃度ボロン添加ダイヤモンド薄膜のヘテロエピ成長と超伝導特性の評価

Si(111)基板上へのダイヤモンド薄膜の作製を行った結果、一部に僅かなグラファイト層が見られるものの、三角形型のファセット形状を有する板状成長した粒径数 μm のダイヤモンド結晶が面内に一様に形成されている事が確認された(図 1)。さらに、成膜前の BEN 処理条件および初期層の堆積条件を最適化する事により、Si(111)基板上に(111)配向した高濃度ボロン添加ダイヤモンド薄膜を効率的に成長させる事に成功した。

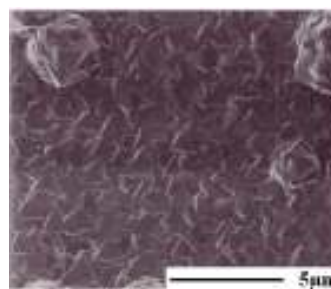


図 1 BEN 処理を施した Si(111)基板上に作製された試料の直接観察象

一方、作製された高濃度ボロン添加ダイヤモンド薄膜の超伝導特性としては、転移開始温度 6.0K が確認された(図 2)。この結果は従来のランダム配向試料で観測されてきた値(約 2-3K)より高く、Umezawa らの報告にある薄膜試料の配向性や歪みに由来する電子状態の変化に伴った超伝導転移温度の向上と同様の結果であるものと考えられる。

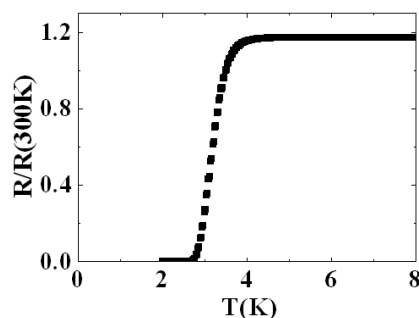


図 2 試料の抵抗-温度特性

ダイヤモンド基板上への高濃度ボロン添加ダイヤモンドホモエピタキシャル成長薄膜の作製と超伝導特性の評価

前節で述べた Si 上に作製された超伝導ダイヤモンドは配向性・超伝導性には優れているものの、デバイス作製を可能とする平坦表面を有する試料の形成や試料の薄膜化が困難であった。この問題を解決する為、優れた表面形状を有する超伝導ダイヤモンド薄膜の作製を目的とし、高圧合成ダイヤモンド

(111)基板上へのホモエピタキシャル成長膜の作製を試みた。

作製された試料は、最大 B/C 比 2000ppm の条件においても、表面形状・ラフネスは Si 上の試料と比較して大幅に改善される事が確認された。一方、超伝導特性については、Si 基板上の試料に比べて低下したものの、100nm まで薄膜させた試料においても最高で約 4.6K で超伝導転移を示した (図 3)。これにより、ジョセフソン接合の形成を目指した超伝導ダイヤモンド薄膜の作製については、平坦な表面状態を有すると同時に比較的高い転移温度を有する薄膜型試料が得られた。

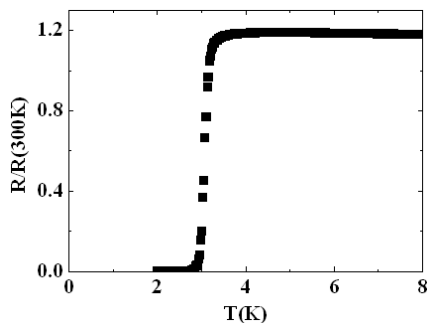


図 3 ダイヤモンド基板上に堆積された薄膜試料の抵抗-温度特性

高濃度ボロン添加ヘテロエピタキシャルダイヤモンド薄膜を用いたジョセフソン接合の作製と評価

前述のダイヤモンド(111)基板上に堆積された超伝導ダイヤモンド薄膜の微細加工プロセスを試みた。なお、目標とするデバイス形状は、基板表面の段差部をウィークリンクとする SNS 型ジョセフソン接合とした。図 4 に本研究で採用したジョセフソン接合作製プロセスフローを示す。

100nm の段差部を有する基板上に堆積されたダイヤモンド薄膜は 3.6K で超伝導転移を示し、段差基板上への堆積に伴う極端な特性劣化は生じない事が明らかにされた。さらに、観測温度 2K において接合の電流-電圧特性を評価したところ、SNS 型ジョセフソン接合に類似の特徴的な振る舞いが観測された (図 5)。しかしながら、AC ジョセフソン効果の検証として、~20GHz のマイクロ波照射実験を行ったところ、電流-電圧特性上のシャ

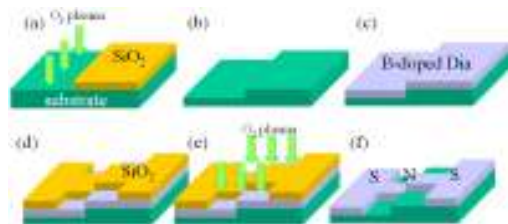


図 4 ジョセフソン接合作製プロセスフロー

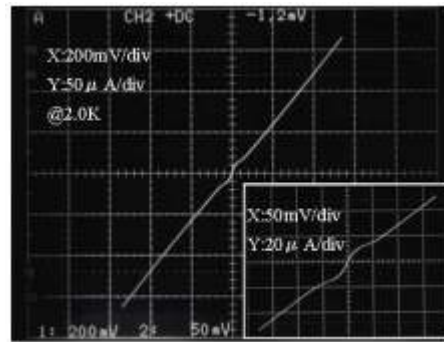


図 5 ダイヤモンド基板上に堆積された接合の電流-電圧特性 (観測温度 2K)

ピロステップ応答は観測されず、詳細な接合特性の評価には至っていない。この原因として、観測温度に対して試料の超伝導転移温度が十分に高くない事に由来した熱ゆらぎによるジョセフソンカップリングの著しい抑制が考えられる。

今後の課題として、明瞭なジョセフソン接合特性の評価に向けたダイヤモンド超伝導体の超伝導転移温度の向上が求められる。これを実現する為には更なる高濃度キャリアドーピングを目指した高 B/C 比といった成膜条件に対する一層の最適化が必要であり、高い不純物濃度と表面形状の維持という相容れない要求を満たす境界条件の模索が必須である。

以上、本研究で得られた知見を機軸とした更なる改善により、ダイヤモンド超伝導体ジョセフソン接合および当該材料における超伝導発現の詳細が近く明らかにされるものと期待する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 4 件)

①吉田和弘、奥野央典、石井 聡、川江 健、高野義彦、森本章治 (標題) BEN 処理を用いた Si 基板上へのダイヤモンド超伝導体薄膜の作製と評価、平成 20 年度応用物理学会北陸・信越支部学術講演会、2008.11.21、金沢

②T. Kawae, K. Yoshida, S. Ishii, K. Iiyama, M. Kumeda, Y. Takano, and A. Morimoto (標題) Fabrication of heavily boron-doped diamond films by microwave plasma chemical vapor deposition with bias-enhanced nucleation and their superconducting properties, International Symposium on Superconductivity,

2008.10.27, Tsukuba, Japan

③吉田和弘、奥野央典、石井 聡、川江 健、飯山宏一、高野義彦、久米田稔、森本章治 (標題) BEN 処理を用いた Si 基板上への高濃度 B ドープダイヤモンド薄膜の作製と超伝導特性, 第 69 回応用物理学会学術講演会, 2008.9.2, 愛知

④K. Yoshida, T. Kawae, S. Ishii, K. Iiyama, M. Kumeda, Y. Takano and A. Morimoto (標題) Superconducting properties of heavily boron-doped diamond films fabricated by microwave plasma chemical vapor deposition with bias-enhanced nucleation, International Workshop on Superconductivity in Diamond and Related Materials, 2008.7.7, Tsukuba, Japan

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川江 健 (KAWAE TAKESHI)

金沢大学・電子情報学系・講師

研究者番号：30401897

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

無し