

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 6月 1日現在

機関番号：11501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656007

研究課題名（和文）超伝導ダイヤモンド薄膜による格子冷却型ホットエレクトロンボロメータ

研究課題名（英文）Phonon-cooling Hot Electron Bolometer of Superconducting thin films on Diamond

研究代表者

中島 健介 (NAKAJIMA KENSUKE)

山形大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70198084

研究成果の概要（和文）：極低温での大きな熱伝導性と優れたテラヘルツ波透過特性という特長を有するダイヤモンドを基板とする HEB 用超伝導 NbN 超薄膜を初めて作製してその超伝導特性を示した。超伝導ダイヤモンド薄膜の超伝導特性のボロンドープ量依存性を明らかにして全ダイヤモンド積層型ジョセフソン接合を作製することに初めて成功した。

研究成果の概要（英文）：NbN thin films for hot-electron bolometer (HEB) were first deposited on diamond which has advantages of a high thermal conductivity at cryogenic temperatures and a good terahertz transparency and its superconducting properties are also revealed. Superconducting properties of Boron-doped diamonds were studied and all-diamond Josephson junctions are first fabricated successfully.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：

科研費の分科・細目：電気・電子材料

キーワード：超伝導，ダイヤモンド，ボロメータ，NbN

1. 研究開始当初の背景

ダイヤモンドは、最高の硬度という傑出した機械的特性を持つ材料であるとともにワイドギャップ半導体としても盛んに研究が進められてきた。さらに近年、高濃度ボロンドープ・ダイヤモンドが 4.2K を超える高い温度で超伝導転移することが見出されたことにより、ダイヤモンドは、単純な構造の単元素物質でありながらキャリアドープによって絶縁体、半導体さらに金属/超伝導体への多様でしかもそれぞれに優れた特性を示す稀有なエレクトロニクス材料であり、しかもそれら全てをホモエピタキシャルに実現することが出来るという点で、革新的なデバイス創製の可能性を秘めている。

一方、ダイヤモンドはテラヘルツ波帯 (0.1～10THz) の透過性に優れ誘電損も小さいこ

とから検出器の窓材やボロメータの基板として好適であることが知られていた。超伝導を利用したテラヘルツ波帯の検出器には応用した高周波検出器は、その高速性と低雑音性において他の追随を許さない優れた特性を有しており、Nb や NbN を用いた超伝導体 (S)/絶縁体 (I)/超伝導体 (S) トンネル接合ヘテロダイナミック・ミキサ (SIS ミキサ) の等価雑音温度 T_N は、量子雑音限界の数倍という極めて優れた低雑音性能を持つことから電波天文用検出器として広く利用されている。しかし SIS ミキサは、検出周波数 (f) が超伝導エネルギーギャップ (2Δ) に近づく ($hf \sim 2\Delta$) 1 THz 付近以上では性能が低下する。幅広いテラヘルツ波領域をカバーし SIS ミキサに次ぐ低雑音性能が得られる検出器には超伝導ホットエレクトロンボロメータ (Hot-electron Bolometer, HEB) がある。超伝導 HEB ミキサ(格子冷却

型)の性能は、ホットエレクトロンのエネルギーをフォノンを通じて基板に逃がすため基板の格子熱伝導率の高さ、つまり「冷え易さ」が性能を向上させる鍵である。ダイヤモンドは、テラヘルツ波を透過し銅よりも大きな熱伝導性という特長を持つことから格子冷却型 HEB の基板材料として有望である。

2. 研究の目的

テラヘルツ波帯超伝導検出器材料として高い熱伝導性と高濃度ボロンドープによる超伝導性を兼ね備えるダイヤモンドに着目し、ダイヤモンドを用いた HEB、ジョセフソン接合を作製するために必要な、ボロンドープダイヤモンドの超伝導特性、ダイヤモンドを基板とする NbN 超薄膜の成膜条件といった基礎的知見を収集する。

3. 研究の方法

反応性 DC マグネトロンスパッターを用いて NbN 薄膜を作製し、XRD 測定による結晶構造解析、 R - T 測定による T_C 評価をとおして成膜条件を最適化するとともに、HEB に必要な超薄膜を得るために膜厚が超伝導転移温度(T_C)に与える影響を評価した。

マイクロ波アシストプラズマ CVD 法により面方位 111 および 100 ダイヤモンド基板に高濃度ボロンドープダイヤモンド薄膜を作製し、ボロン濃度が T_C に与える影響を評価した。また、その知見をもとに膜厚方向にドープ量を変調した薄膜を用いて全ダイヤモンドジョセフソン接合を作製した。

4. 研究成果

NbN 成膜に関して使用した反応性 DC マグネトロンスパッターにおいて NbN の生成条件を調べるためにまず Ar ガス流量を 10sccm 一定として N_2 ガス流量を 10, 4, 1.4sccm と変化させて Nb ターゲット(純度 99.9%)を用いて MgO 基板に 100nm 堆積させた反応生成物を X 線回折法により調査した。その結果、図 1 に示すようにガス流量 1.4sccm において基板温度によらず NbN 単相の薄膜を堆積できることを確認した。表 1 に MgO 基板を用いた場合の最適スパッタ条件をまとめた。なお、条件で成膜した NbN 薄膜(膜厚: 20nm)の T_C は 15.6~15.9K であった。

次にこの最適条件を参考として面方位 100 のダイヤモンド単結晶に成膜した NbN 薄膜(膜厚: 20nm)の抵抗温度(R - T)特性を図 2 に示す。ダイヤモンド 100 上に成膜した NbN 薄膜の超伝導転移特性は、MgO 上のそれに比べて T_C が低く転移もブロードであることが分かった。 T_C の低い主たる原因は、ダイヤモンド 100 面上に NbN が期待どおりにエピタキシャル成長しなかったことが上げられる。それに加えて、転移がブロードになった原因とし

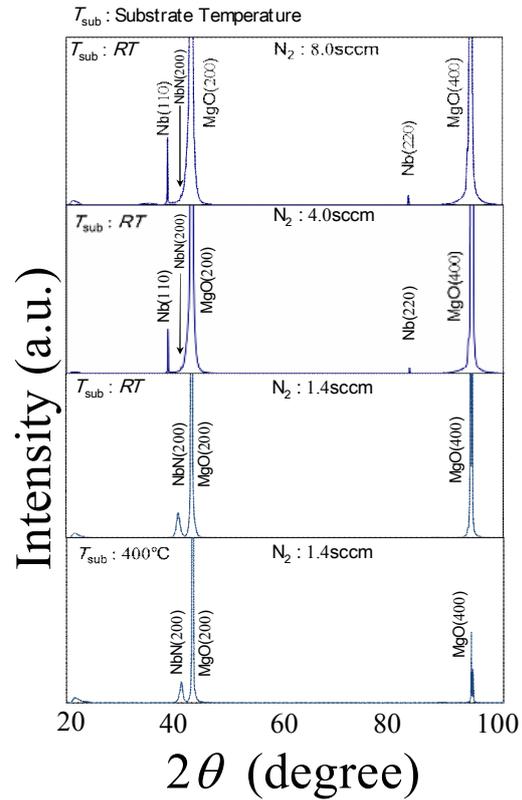


図 1 反応性 DC マグネトロンスパッターによる反応生成堆積物の X 線回折パターン

表 1 MgO 基板に対する最適スパッタ条件と超伝導転移温度

背圧 [Torr]	$<2 \times 10^{-7}$
Ar ガス流量 [sccm]	10
N_2 ガス流量[sccm]	1.4
スパッタ時圧力 [Torr]	2×10^{-3}
放電電流 [mA]	140
基板温度 [°C]	400
超伝導転移温度[K](膜厚 20nm)	15.6~15.9

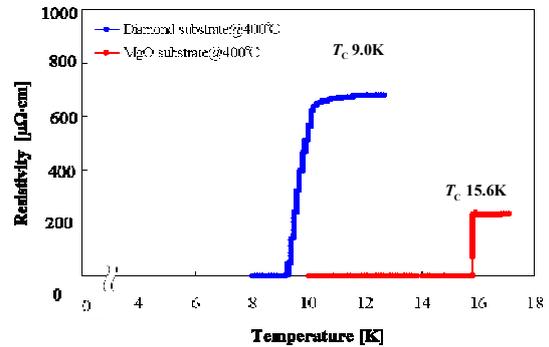


図 2 基板による超伝導転移特性の変化

て、高い基板温度(400°C)で成膜した場合に NbN($T_C \sim 16K$)とダイヤモンド(C)の反応によって生成した NbC($T_C \sim 10K$)が影響している可能性が他の実験結果から示唆された。

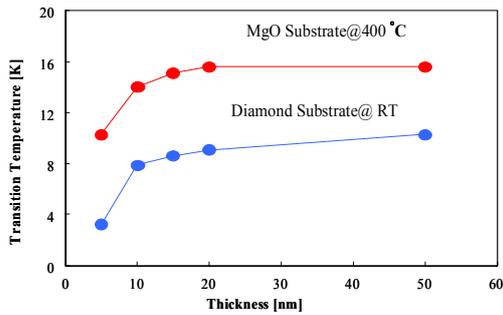


図 3 膜厚による NbN 薄膜の超伝導転移温度の変化

基板加熱せずにダイヤモンド 100 基板上に成膜した NbN 薄膜は超伝導転移が急峻で T_c も僅かに上昇した。

NbN は、コヒーレンス長が 5nm 程度と極めて短く 10nm 以下の超薄膜でも超伝導転移することが HEB 材料として優れている点である。図 3 に NbN 薄膜の T_c の膜厚依存性を示す。MgO 基板の場合、膜厚 5nm でも 10K 以上の T_c を保っており、高品質な NbN であることが分かる。また、ダイヤモンド 100 基板上に成膜した NbN においても 10nm で約 8K の T_c が得られており HEB 材料として利用できることが確かめられた。今後はバッファ層の導入による T_c の向上が課題である。

図 4 は、ボロンドープダイヤモンド CVD 薄膜のボロンドープ量と T_c の関係を示している。この図から分かるように比較的大きなサイズの基板が得られるダイヤモンド 100 面基板に比べて 111 面上に成膜した膜の方がエピタキシャル、多結晶に関わらず高い T_c が得られる傾向にあり、エレクトロニクス材料としても大いに期待される。ダイヤモンドの構造を保ったままボロンドープ量によって電気伝導性を絶縁体-半導体-超伝導体と幅広く制御できることは他の材料にはない極めて稀有な特徴といえる。そこで、図 5 のように膜厚方向にボロンドープ量を変調したダイヤモンド薄膜を製作し、図 6 の模式図のように微細加工することで断面積が約 $500\mu\text{m}^2$ ($50\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$) の SNS 接合を作製した。作製した接合は上下の超伝導電極が異なる T_c を持つ SNS ジョセフソン接合特有の電圧電流特性を示し、10GHz の高周波照射に対しては図 7 のようなシャピロステップが観測され、接合面に平行に印加した磁界に対する接合臨界電流のフラウンホーファー変調も観測されたことからこの接合が SNS ジョセフソン接合として動作していることが確認できた。これはダイヤモンド超伝導体のエレクトロニクス応用が可能であることを実証した極めて有用な知見といえる。

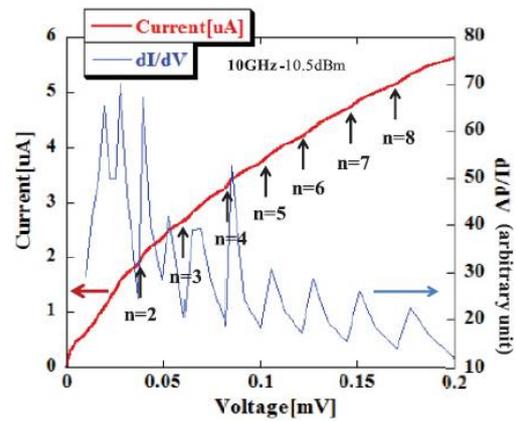


図 7 高周波(10GHz)照射されたダイヤモンド SNS 接合の電圧電流特性

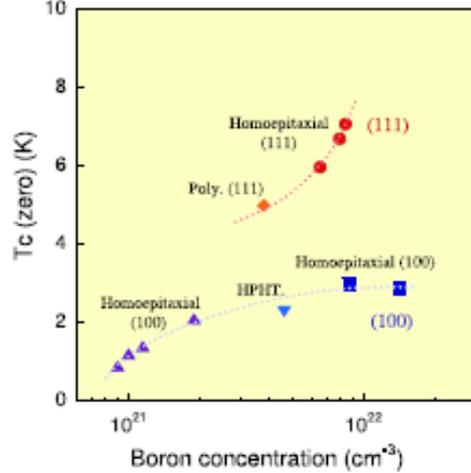


図 4 ボロンドープダイヤモンド薄膜のドーピング量に対する超伝導転移温度の変化

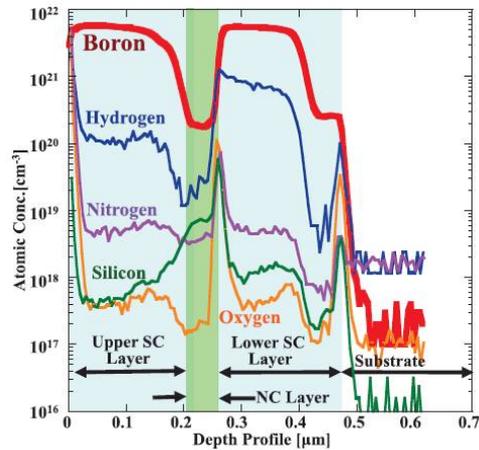


図 5 ドープ量変調ダイヤモンド薄膜の深さ方向組成分布

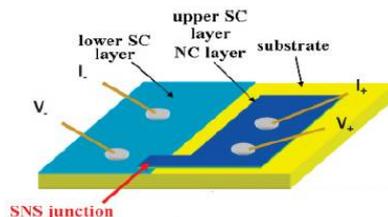


図 6 ボロンドープ量変調ダイヤモンド膜厚を用いた SNS 接合の模式図

[雑誌論文] (計 9 件)

1. K. Hayashi, A. Saito, T. Sawada, Y. Ogawa, K. Nakajima, H. Yamada, S. Ariyoshi, S. Ohshima
Microwave characteristics of microwave kinetic inductance detectors using rewound spiral resonators array
Physics Procedia 査読有, vol. 45, pp. 213-216, MAY 2013
2. S. Ariyoshi, K. Nakajima, A. Saito, T. Taino, H. Tanoue, K. Koga, N. Furukawa, H. Yamada, S. Ohshima, C. Otani, J. Bae
NbN-Based Microwave Kinetic Inductance Detector with a Rewound Spiral Resonator for Broadband Terahertz Detection
Applied Physics Express 査読有, vol. 6, pp. 064103 1-3, MAY 2013
3. M. Watanabe, R. Kanomata, S. Kurihara, A. Kawano, S. Kitagoh, T. Yamaguchi, Y. Takano, H. Kawarada,
Vertical SNS weak-link Josephson junction fabricated from only boron-doped diamond
PHYSICAL REVIEW B 査読有, vol. 85, 184516, DOI 10.1103, MAY 2012
4. H. Okazaki, T. Arakane, K. Sugawara, T. Sato, T. Takahashi, T. Wakita, M. Hirai, Y. Muraoka, Y. Takano, S. Ishii, S. Iriyama, H. Kawarada, T. Yokoya
Photoemission study of electronic structure evolution across the metal-insulator transition of heavily B-doped diamond
JOURNAL OF PHYSICS AND CHEMISTRY OF SOLIDS 査読有, vol. 72, No. 5, SI, pp. 582-584, DOI 10.1016, MAY 2011

[学会発表] (計 29 件)

1. 林 賢人, 齊藤 敦, 小川裕平, 村田光茂, 田中 希, 澤田俊宏, 中島健介, 山田博信, 有吉誠一郎, 田井野 徹, 田之上寛之, 大谷知行, 大嶋重利
スパイラル共振器を用いたマイクロ波力学インダクタンス検出器アレイの設計と評価
超伝導エレクトロニクス研究会, SCE8, 2013. 4. 19, 機械振興会館 (東京都)
2. 有吉誠一郎, 中島健介, 齊藤敦, 林賢人, 田井野徹, 田之上寛之, 山田博信, 大嶋重利, 大谷知行, ジョンソク ベイ
NbN 薄膜を用いたテラヘルツ帯・力学インダクタンス検出器の作製と評価

第 60 回応用物理学会春季学術講演会,
28p-G10-7, 2013. 3. 27-30, 神奈川工科大学 (神奈川県)

3. 山田博信, 早坂隆顕, 外谷弦太, 中島健介, 齊藤敦, 大嶋重利
単一 SDA 集積 HTS ジョセフソン接合テラヘルツ波検出器の電力特性および周波数特性
第 60 回応用物理学会春季学術講演会,
27p-G7-7, 2013. 3. 27-30, 神奈川工科大学 (神奈川県)
4. 日下康平, M. K. Sajja, 山田博信, 中島健介
テラヘルツ波帯 MKID 用高品質薄膜の作製
第 67 回応用物理学会東北支部学術講演会,
7pB13, 2012. 12. 6-7, 東北大学 (宮城県)
5. K. Hayashi, A. Saito, T. Sawada, Y. Ogawa, K. Nakajima, H. Yamada, S. Ariyoshi, S. Ohshima
Microwave characteristics of microwave kinetic inductance detectors using rewound spiral resonators array
25th International Symposium on Superconductivity, FDP-24, p. 245, 2012.12.3-5, タワーホール船堀 (東京都)
6. M. K. Sajja, K. Kusaka, H. Yamada, K. Nakajima
Deposition of NbN thin films on diamond substrate for Hot Electron Bolometer
Applied Superconductivity Conference 2012, 4EPE-08, 2012.10.7-12, Portland OR, USA
7. S. Ariyoshi, K. Nakajima, A. Saito, T. Taino, H. Tanoue, K. Koga, N. Furukawa, H. Yamada, S. Ohshima, C. Otani, J. Bae
Design and Fabrication of a Microwave Kinetic Inductance Detector for an Imaging Fourier Transform Terahertz Spectrometer
The 37th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Tue-A-5-2, 2012.9.23-28, Wollongong, Australia
8. 田之上寛之, 有吉誠一郎, 田井野徹, 古賀健祐, 古川昇, 大谷知行, 齊藤 敦, 中島健介, 成瀬雅人, 明連広昭
異なる基板上の窒化ニオブを用いた力学インダクタンス検出器の作製
第 73 回応用物理学会学術講演会,
14p-A2-6, 2012. 9. 11-14, 愛媛大/松山大 (愛媛県)

9. 川崎 寛樹, 木下 昂洋, 野村 幸寛, 川江 健, 中嶋 宇史, 徳田 規夫, 高野義彦, 岡村 総一郎, 森本 章治
(Bi, Pr) (Fe, Mn)O₃/SrTi O₃/B 添加ダイヤモンド積層構造の疲労特性評価
第 73 回応用物理学会学術講演会,
13a-PBI-10, 2012. 9. 11-14, 愛媛大/松山大 (愛媛県)
10. 中島健介, 齊藤敦, 田之上寛之, 有吉誠一郎, 田井野徹, 山田博信, 明連広昭, 大谷知行, 大嶋重利
スパイラル型マイクロ波インダクタンス検出器の設計とマイクロ波共振特性
超伝導エレクトロニクス研究会,
SCE22012. 4. 20, 機械振興会館 (東京都)
11. 田之上寛之, 有吉誠一郎, 田井野徹, 古賀健祐, 古川 昇, 齊藤 敦, 中島健介, 明連広昭, 大谷知行
窒化ニオブを用いた力学インダクタンス検出器の作製
第 59 回応用物理学関係連合講演会,
17p-B1-4, 2012. 3. 15-18, 早稲田大学 (東京都)
12. 山田博信, 齊藤 敦, 須藤陽介, 中島健介, 有吉誠一郎, 大嶋重利
スパイラル MKID の設計と室温モデルによる動作検証
第 59 回応用物理学関係連合講演会,
17p-B1-3, 2012. 3. 15-18, 早稲田大学 (東京都)
13. 有吉誠一郎, 中島健介, 齊藤敦, 田井野徹, 大嶋重利, 大谷知行
テラヘルツ帯 2 次元フーリエ分光用力学インダクタンス検出器の開発
第 59 回応用物理学関係連合講演会,
17p-B1-2, 2012. 3. 15-18, 早稲田大学 (東京都)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島 健介 (NAKAJIMA KENSUKE)
山形大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号：7 0 1 9 8 0 8 4

(2) 研究分担者

高野 義彦 (TAKANO YOSHIHIKO)
物質材料研究機構・超伝導材料研究センター・グループリーダー
研究者番号：1 0 3 5 4 3 4 1