ダイヤモンド SQUID を構成するジョセフソン接合の微細化

Miniaturization of Josephson Junction in Diamond SQUID

早稲田大学¹,物質・材料研究機構²,早大材研³○(B)若林 千幸¹, (M2)高橋 泰裕¹,

蔭浦 泰資 ^{1,2}, 高野 義彦 ², 立木 実 ², 大井 修一 ², 有沢 俊一 ², 川原田 洋 ^{1,3}

Waseda Univ.¹, NIMS², Kagami Memorial Research Institute for Materials Science and Technology ³

°Chiyuki Wakabayashi¹, Yasuhiro Takahashi¹, Taisuke Kageura^{1,2}

Yoshihiko Takano², Minoru Tachiki², Shuuichi Ooi², Shunichi Arisawa², Hiroshi Kawarada^{1,3}

E-mail: cw-wakaba@fuji.waseda.jp

代表的な超伝導素子であるジョセフソン接合は、弱結合により隔てられた超伝導体の接合であり、量子ビットや超伝導FET、高感度磁気センサである超伝導量子干渉計(SQUID)など様々な超伝導デバイスに応用されている。一般的に、ジョセフソン接合にはNbやAl、YBCOといった超伝導材料が用いられるが、いずれも酸化や摩耗などによる劣化が課題である。これに対してダイヤモンドは、耐酸化性や耐摩耗性など堅牢性の面で優れた物性を有しており、劣化が極めて少ない堅牢な超伝導デバイスの実現が期待される。我々はこれまでに、超伝導ダイヤモンドを用いたジョセフソン接合とその応用としてSQUIDを数例実証してきた^{[1][2]}。しかし従来のダイヤモンドSQUIDは、磁気感度に関わるパラメータである電圧の磁場応答 V_{pp} が他材料 SQUIDと比較して小さいことが課題であった。 V_{pp} は、ジョセフソン接合の常伝導抵抗 R_n や臨界電流 I_c 、SQUIDのインダクタンスLなどに依存しており、特に依存度が高い R_n を増加させることで V_{pp} の大幅な向

上が見込まれる。また、SQUID を構成するジョセフソン接合の特性非対称性は V_{pp} 減衰の原因となるため、接合の非対称性を抑制することも重要である。そこで本研究では、ジョセフソン接合を微細化することで R_n を増加させるとともに、接合への予期せぬ欠陥生成を抑制し、接合の非対称性を低減することで V_{pp} 増大を図った。また、ジョセフソン接合を微細化するに当たり、従来の選択成長プロセスよりも超伝導ダイヤモンドの細線化に適するとされる選択エッチングプロセスを用いた^[3]。

作製プロセスとしては、(111)単結晶ダイヤモンド基板上に高 さ 40 nm の段差 (Fig.1 の Step) を選択エッチングにて形成後、 超伝導ボロンドープダイヤモンドをマイクロ波プラズマ化学 気相堆積法によりエピタキシャル成長させる。その後、金属マ スクを用いた選択エッチングによりFig.1に示す最小線幅5µm のデバイス形状に成形する。40 nm の段差及びデバイス成形に は、誘導結合型プラズマ中の酸素イオンによる反応性イオンエ ッチングを用いた。選択エッチングプロセスにより作製した SQUIDでは、ジョセフソン接合幅が従来の15 µm から5 µm に 微細化されたことで Rn が約3倍に増加した。SQUIDの磁場応 答は 1.6~4.2 K で観測され、Fig.2 に示すように、1.6 K におい て V_{p-p}=47.7 μV であった。この値は、接合幅 15 μm の同構造 SQUID(V_{p-p}=1.4 µV)^[2]の 34 倍、従来のダイヤモンド SQUID の 最高値(V_{pp}=4.0 µV)^[2]の 10 倍以上である他、同程度のサイズの ジョセフソン接合を有する他材料 SQUID と同等の値である。 また、従来の選択成長プロセスを用いて同様に接合微細化を行 った SQUID では、R_nの増加にも関わらず、最高で V_{p-p}=0.22 μV であった。この 200 倍以上の V_{PP} 増加が得られる選択エッチン グは、本ジョセフソン接合の微細化による特性向上に有用であ ることが示された。



Fig.1 Optical microscope image of SQUID

(JJ: Josephson Junction)



Fig.2 SQUID oscillations at 1.6K (JJs formed by selective etching)

本成果により、ジョセフソン接合の材料として超伝導ダイヤモンドが他材料と同等のポテンシ ャルを有することが実証された。その一方で、他材料ではサブミクロンスケール以下のジョセフ ソン接合が広く応用されており、今後はダイヤモンドジョセフソン接合のさらなる微細化を検討 する。

[謝辞]本研究の一部は、物質・材料研究機構(NIMS)の NIMS 連携拠点推進制度、及び文部科学省「ナノテクノロジ ープラットフォーム」事業(課題番号: JPMXP09F19NM0030)の支援を受けて実施されました。

[1] T. Kageura, H. Kawarada et al. Sci. Rep. 9 (2019) 15214

[2] A.Morishita, H.Kawarada et al. Carbon 181 (2021) 379

[3] T.Kageura, H. Kawarada et al. Diamond and Related Materials 90 (2018) 181.