

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：82401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2021

課題番号：20K21011

研究課題名（和文）超伝導転移温度の人工的制御とデバイス応用可能性に関する研究

研究課題名（英文）Artificial control of superconducting transition temperature and its applications to detector devices

研究代表者

大谷 知行 (Otani, Chiko)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・チームリーダー

研究者番号：50281663

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：超伝導体の超伝導転移温度（ T_c ）は物質固有の値とされていたが、超伝導ハイパボリックメタマテリアル構造では実効誘電率が膜の並行・垂直方向で非対称となり、Cooper電子同士の引力相互作用が強められるという指摘がなされた。そこで、制御性と再現性の高い超伝導体-絶縁体の積層薄膜（Al層の厚み、約8 nm）により3層と5層のMKIDs検出器を作製し、周波数2-8 GHzでのマイクロ波透過ゲイン測定で上記の実験的検証を目指した。バルクの $T_c \sim 1.15$ KのAl薄膜について T_c の値が1.7-1.8 Kが観測されたものの、超伝導ハイパボリックメタマテリアルの効果により T_c が上昇した事実は確認されなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

仮に、超伝導ハイパボリックメタマテリアル構造を導入した影響で T_c が変化するならば、超伝導薄膜の膜構造で人工的に制御できることとなり、より高温での超伝導状態の実現や民生利用に繋がる衝撃的な事実となる可能性があったが、今回の検証では、そのような事実は確認できず、ハイパボリックメタマテリアル構造がCooper Pairの引力相互作用に影響を与えると結論づけるには至らなかった。

研究成果の概要（英文）：The superconducting transition temperatures (T_c) have been considered to be material-specific values, but recently it has been pointed out that, in superconducting hyperbolic metamaterial structures, the effective dielectric constant is asymmetric in the parallel and vertical directions of the film, possibly enhancing the Cooper pair's attracting interaction. In this study, we fabricated 3- and 5-layer MKIDs using a well-established and reproducible superconductor(Al)-insulator(AlOx) multilayer thin films (Al layer thickness of about 8 nm) to verify the superconducting transition temperatures by measuring microwave transmission gain between 2-8 GHz. Then, T_c values of 1.7-1.8 K were observed for Al thin films (bulk $T_c \sim 1.15$ K), but the effect of the hyperbolic metamaterial was not confirmed.

研究分野：テラヘルツ工学、超伝導検出器

キーワード：超伝導 メタマテリアル マイクロ波 MKIDs

1. 研究開始当初の背景

これまで超伝導体の超伝導転移温度(T_c)は物質固有の値と考えられてきており、高い T_c の実現には新たな物質の探索が必要と考えられ、探索に多大な努力が払われてきた。ところが、2016年に Smolyaninova らが「Al 超伝導体 ($T_c=1.15$ K) と酸化アルミ (AlO_x) 絶縁体を交互に多数積層した構造でバルクの T_c を大きく越える温度 (2 K) での超伝導転移を見出した」と報告した(文献 1, 図 1-3)。この積層膜はハイパボリック・メタマテリアルの構造を有し、実効誘電率が膜の並行方向と垂直方向とで非対称なために超伝導の元となる Cooper 電子対のフォノン相互作用による引力が強められて高い T_c を実現していると論じた。

この実験結果が本当だとすると、超伝導体の T_c を人工的に制御可能となり、より高温での超伝導状態の実現や民生利用に繋がる衝撃的な事実である。しかし、同様の報告は Smolyaninova らのグループによるものだけであり、他グループによる検証は進んでいない。また、Smolyaninova らの実験では、Al 蒸着膜の積層と大気雰囲気下での酸化を繰り返して薄膜作製を行っているが、大気雰囲気では酸素のみならず水分などの混入も考えられ、再現性・制御性の高い酸化膜形成ができていない。さらに、その原理もメタマテリアルの観点から論じているが、その物理的根拠は不十分であり機構は未解明と考えるべきである。さらに、Smolyaninova らが直流測定による超伝導転移を確認したのみであり、その確かな検証と機能性の活用のためにも他の手法での検証が不可欠である。

2. 研究の目的

本研究では、我々がこれまでミリ波・テラヘルツ波検出器開発で培ってきたマイクロ波読み出し技術を活用し、Al/ AlO_x 膜を複数セット積層させた薄膜で MKID デバイスを作製し、GHz 帯での交流電気的特性を調べた。これにより、 T_c の新たな実験的検証を行うとともに、MKID 検出器の性能・感度向上にも活用可能性を検証した。

3. 研究の方法

デバイスの作製には理研内に有する超伝導デバイス作製専用装置群を用いた(図 1)。薄膜は DC スパッタ装置を用いて膜厚 8 nm の Al 膜をスパッタ成膜し、同装置に接続されている搬送用チャンバ(ロードロック(LL)室)に真空を保持したまま移送し、LL 室内において 1 torr・hour の酸化条件で表面を酸化した。これを 3 回、もしくは、5 回繰り返して 3 層と 5 層の構造を持つ素子を作製した。その後、接触式露光装置(アライナ)とリフトオフによるパターンニングを行って MKID デバイスを作製した。マスクパターンは MKID 検出器用のものを流用しており、マイクロ波コプレナ導波路に 1/4 波長マイクロ波共振器を接続させたデバイスを用いた。



図 1. 理研の超伝導デバイス作製専用装置群

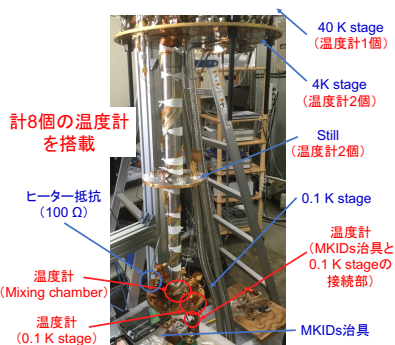


図 2. 希釈冷凍機の温度計配置

次に、MKID デバイスのマイクロ波帯での電氣的応答測定用の実験セットアップを用い、作製した MKID デバイスを希釈冷凍機内にセットし、デバイスのマイクロ波コプレナ導波路に同軸ケーブルを電氣的に接続させた。冷凍機内では、信号入力側においては、外乱の雑音を低減する

ために極低温部に-30 dB の減衰器と DC ブロックを置き、MKID デバイスからの帰還信号は極低温 HEMT アンプで+30 dB の増幅器と DC ブロックを介して信号を読みだした。なお、マイクロ波応答測定にはベクトルネットワークアナライザ (VNA) を使用した。なお、実験に用いた希釈冷凍機の温度測定を正確にするために、計 8 個の温度計を搭載して温度較正環境を整えた上で実験を行った (図 2)。

4. 研究成果

3 層構造を有する MKID デバイスのマイクロ波帯交流電気応答の実験結果を図 3 に示す。横軸は周波数、縦軸はマイクロ波透過ゲイン (いわゆる S_{21} 信号) である。まず、明らかに Al の T_c より低い温度での超伝導状態での応答は、図中の 0.19 K の特性に代表され、2-6.5 GHz にわたる広帯域のマイクロ波透過性が確認された。なお、6.5 GHz 以上で透過ゲインが低下しているのは読み出し実験系に起因するものである。一方、Al の T_c (バルクで 1.15 K) を上回る温度では、温度により異なる周波数応答が得られた。具体的には、温度が低下するに連れて高周波側から徐々に透過特性が低下していき、1.87 K では、この測定周波数範囲において超伝導性が消失した場合と同じ特性を示した。同じ温度領域での DC 特性が確認できていないので、どの温度で DC における超伝導性が消失したかは確認が必要であるが、常伝導—超伝導の遷移が周波数によって異なっていることは非常に興味深い。また、同様の実験を 5 層のデバイスについても行った結果 (図 4)、周波数ごとに特性に若干の差はあるものの 1.7-1.8 K での超伝導転移が観測された (図 5)。

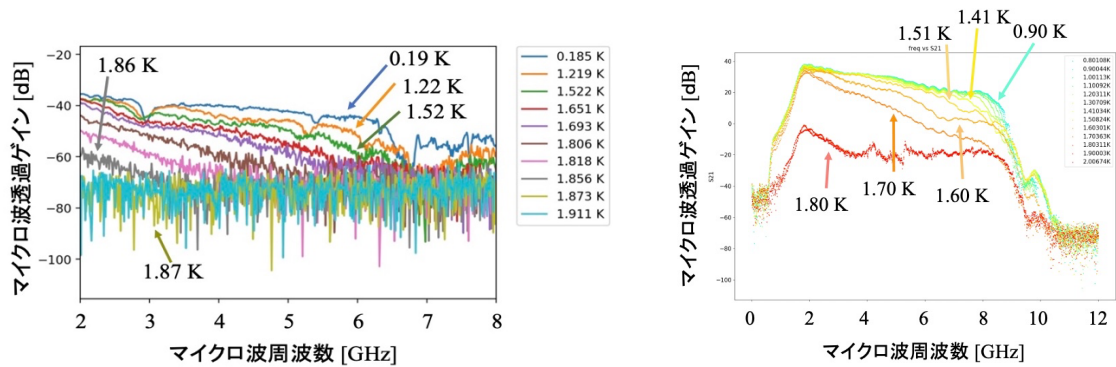


図 3.3 層構造素子のマイクロ波信号透過特性 図 4.5 層構造素子のマイクロ波帯信号透過特性

このように、3 層と 5 層で若干の転移温度の違いは見られたものの、 T_c の値は 1.7-1.8 K と顕著な差異は観測されなかった。このように、多層化によって T_c がさらに高まる効果は確認されず、また、Chubov ら (1969) の結果[2]とも矛盾がないことから、超伝導ハイパボリックメタマテリアルの効果により T_c が上昇したという事実は確認されなかった。一方、超伝導転移端付近でのマイクロ波ゲインの違いを温度の関数として調べた結果は、例えば、光誘起クーパー対解離のようなことが起こったということも考えられるが、電力印加の周波数依存性による影響の可能性も依然としてあり、明瞭な決着をつけるにはさらなる検討が必要である。

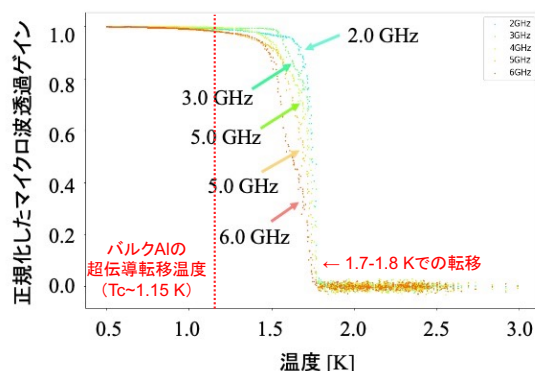


図 5.5 層構造を持つ素子の温度ごとのマイクロ波透過ゲイン

REFERENCES

- [1] V. N. Smolyaninova *et al.*, “Enhanced superconductivity in aluminum-based hyperbolic metamaterials”, *Scientific Reports*, **6**, 34140 (2016).
- [2] P. N. Chubov, V. V. Eremenko, Yu. A. Pilipenko, “Dependence of the critical temperature and energy gap on the thickness of superconducting aluminum films,” *Soviet Physics JETP*, **28**, pp. 389-395 (1968).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 大谷知行、美馬 覚、辻 悠汰、石田秀郷、田井野徹、斗内政吉
2. 発表標題 超伝導メタマテリアルを組み込んだミリ波・テラヘルツ帯マイクロ波力学インダクタンス検出器の研究
3. 学会等名 光・量子ビーム科学合同シンポジウム 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大谷知行、美馬 覚、田井野徹、斗内政吉
2. 発表標題 超伝導体の転移温度の人工的制御の実証とマイクロ波力学インダクタンス検出器の研究
3. 学会等名 光・量子ビーム科学合同シンポジウム 2021
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

テラヘルツイメージング研究チーム 理化学研究所 https://thzimg.riken.jp
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------