

超伝導ギャップ内準粒子の超伝導共振器の特性に及ぼす影響について

Influence of the quasiparticles in intra-gap states on the properties
of superconducting resonators国立天文台¹, 東大理², 埼玉大工³ ○野口 卓¹, 関根 正和², 唐津 謙一, 成瀬 雅人³, 関本 裕太郎¹National Astronomical Observatory¹, Tokyo Univ.², Saitama Univ.³ ○Takashi Noguchi¹,Masakazu Sekine², Masato Naruse³, Kenichi Karatsu¹, Yutaro Sekimoto¹

E-mail: Takashi.Noguchi@nao.ac.jp

1. はじめに

我々は、これまで、超伝導ギャップ内に存在する準粒子状態が、トンネル接合や超伝導薄膜の特性に大きな影響を与えることを明らかにしてきた。今回、我々は、ギャップ内準粒子状態の寄与を考慮して、超伝導共振器における Q 値と残留準粒子数の温度依存性について解析を行ったので報告する。

2. Q 値の温度依存性

超伝導体の複素伝導率を計算する Mattis-Bardeen 方程式は、複素平面での積分に拡張することにより、ギャップエネルギーが複素数であっても成り立つ。この複素拡張した Mattis-Bardeen 方程式を用いて、超伝導薄膜の表面インピーダンス $Z_s = R_s + iX_s$ を求めることができる [1]。超伝導体の Q 値は表面リアクタンス X_s と表面抵抗 R_s の比 $Q_i = X_s/R_s$ で求めることができる。図 1 に、Al、Nb および Al/Nb ハイブリッド超伝導膜 [2] を用いた共振器の Q 値の温度依存性を示す。鎖線、破線および実線は、それぞれ、複素ギャップエネルギーをパラメータとしてフィッティングした、それぞれの薄膜の超伝導共振器の Q 値の温度依存性である。複素ギャップエネルギーの虚数部 Δ_2 の存在により低温で Q 値が飽和し、その大きさによって Q 値の飽和する温度が変化することが明らかになった。また、複素ギャップエネルギーの虚数部の値が小さくなるにつれて薄膜共振器の Q 値が増加している。これは、複素ギャップエネルギーの虚数部の値が小さくなるにつれてギャップ内状態密度が減少した結果、表面抵抗の値が小さくなったものと考えられる。

3. 残留準粒子数の温度依存性

超伝導共振器の Q 値が低温で飽和することは、低温においても有限の数の準粒子が超伝導体内

に存在していることを示唆している。de Visser らが測定した超伝導共振器内の準粒子数の温度依存性には、準粒子数が低温で飽和することが示されている。ところで、ギャップ内準粒子状態を考慮した場合、温度 T での準粒子数 N_{qp} は

$$N_{qp} = 2N(0)V \int_{-\infty}^{\infty} \frac{N_s(E)}{N(0)} f(E) dE \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $N(0)$ は Fermi 面での常伝導状態密度、 $N_s(E)$ は超伝導状態での準粒子状態密度、 V は共振器の体積、 $f(E)$ はフェルミ分布関数である。図 2 に、de Visser らの求めた Al 共振器内の残留準粒子数 (▲, ■) [3] と (1) 式から求めた準粒子数の温度依存性を示す。ここで、準粒子数を求める計算には図 3 に示した状態密度を用いた。残留準粒子数の温度依存性は図 3 の実線で示した準粒子状態密度により定量的に説明できることが明らかになった。また、この時の準粒子状態密度は、図 3 の点線で示した Al/AlOx/Al トンネル接合の I-V 特性から求めた状態密度と非常に良く一致することが判った。さらに、注目すべき点は、残留準粒子数の低温での飽和にギャップ中央付近の状態密度のピーク (局在準位) が大きく寄与していることである。超伝導共振器の Q 値の向上にはこのピークの低減が不可欠であると考えられる。

4. まとめ

超伝導共振器における Q 値と残留準粒子数の温度依存性が、超伝導ギャップ内準粒子状態を考慮することにより、定量的に説明できることを明らかにした。

[1] T. Noguchi *et al.*, Physics Procedia, 36, 318–323 (2012).

[2] 関根 正和 他, 超伝導エレクトロニクス研究会, 2014 年 1 月.

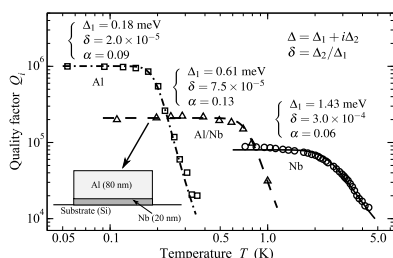
[3] de Visser *et al.*, Phys. Rev. Lett., 106, 167004 (2011).

Fig. 1 Q factors of superconducting resonators as a function of temperature.

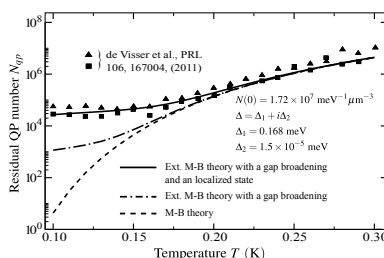


Fig. 2 Residual quasiparticle number in the Al resonator as a function of temperature.

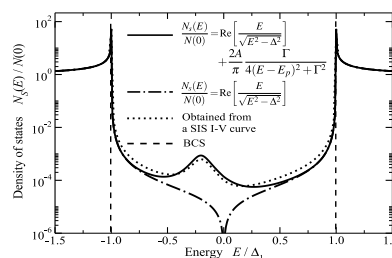


Fig. 3 Quasiparticle density of states used in the calculation of N_{qp} .