

薄膜超伝導共振器の特性に対する残留準粒子の寄与

Residual quasiparticle contribution to the properties of thin-film superconducting resonators

○ 野口 卓^{1,2}, 美馬 寛², 大谷 知行² (1. 国立天文台, 2. 理研)

○ T. Noguchi^{1,2}, S. Mima², C. Otani² (1. NAOJ/NINS, 2. RIKEN,)

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

マイクロ波と結合した超伝導共振器では、共振器内部に誘起される強いマイクロ波電界によって残留準粒子のエネルギー分布に変化が生じる。それに伴い、フェルミ準位付近の準粒子の実効数が変化し、常伝導伝導率に変動すると考えられる。その結果、常伝導伝導率に反比例する超伝導共振器の内部 Q 値は、共振器内部のマイクロ波電界の強度によって変動することになる。超伝導共振器の内部 Q 値は読み出しマイクロ波電力に大きく依存することが知られているが、この振舞いがマイクロ波電界に対する残留準粒子の常伝導伝導率の変動に依るものと考え解析を行なった。

超伝導共振器の共振周波数 f_r は、読み出しマイクロ波電力 P_{RO} に依らずほぼ一定であることが知られている。共振周波数 f_r は超伝導複素伝導度 $\sigma_s = \sigma_1 - i\sigma_2$ の虚数部 σ_2 のみに依存することを考慮すると、複素伝導度の虚数部 σ_2 が読み出しマイクロ波電力 P_{RO} に依存せず一定であることを示唆している。一方、超伝導共振器の内部 Q 値 Q_i は読み出しマイクロ波電力 P_{RO} の増加に従って増大する。内部 Q 値 Q_i が超伝導複素伝導度の虚数部 σ_2 と実数部 σ_1 との比で与えられ、 σ_2 が読み出しマイクロ波電力 P_{RO} によらず一定であることを考慮すると、内部 Q 値 Q_i の増大は読み出しマイクロ波電力 P_{RO} の増加に対して σ_1 が減少することを示唆している。

Tien-Gordon モデルによると、マイクロ波が伝搬するコプレーナ線路 (CPW) では、中心導体中の準粒子がマイクロ波電界による変調を受け、等しいエネルギー間隔の複数のエネルギーレベルが生成される (図 1)。この時、これらのエネルギーレベル間遷移によって準粒子のエネルギー再分配が起こり、Fermi レベル近傍のエネルギーをもつ準粒子の有効数が減少する。そ

の結果、有効準粒子数に比例する常伝導伝導度 σ_1 が減少し、共振器の内部 Q 値 Q_i は増大すると予想される。

マイクロ波電圧 $V_{res} \cos \omega t$ によって変調を受けた超伝導体の有効状態密度 $D'_s(\mathcal{E})$ は、

$$D'_s(\mathcal{E}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n^2(\alpha) D_s(\mathcal{E} + n\hbar\omega) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $J_n(\alpha)$ は引数 $\alpha = eV_{res}/\hbar\omega$ の n 次のベッセル関数、 $D_s(\mathcal{E})$ は無摂動の超伝導体の状態密度である。伝導に寄与する有効準粒子密度 $n_{qp}(\alpha)$ は (1) 式とフェルミ分布関数 $f(\mathcal{E})$ を用いて次式で計算できる。

$$n_{qp}(\alpha) = 4N_0 \int_0^{\infty} D'_s(\mathcal{E}) f(\mathcal{E}) d\mathcal{E} \quad (2)$$

ここで、 N_0 は常伝導状態におけるフェルミ準位での単一スピン状態密度である。マイクロ波周波数 ω がギャップ周波数に比べて十分低い ($\hbar\omega \ll \Delta$) 場合、有効準粒子密度 $n_{qp}(\alpha)$ は近似的に次式で与えられる。

$$n_{qp}(\alpha) \simeq n_{qp}(0) \left[J_0^2(\alpha) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} J_n^2(\alpha) \right] \quad (3)$$

共振器の内部 Q 値の逆数 $1/Q_i$ は準粒子密度 $n_{qp}(\alpha)$ に比例するので、内部 Q 値の逆数 $1/Q_i$ は規格化されたマイクロ波電圧 α に対して、(3) 式にしたがって変化すると予想される。

Al 共振器の内部 Q 値の逆数 $1/Q_i$ の実験値と (3) 式を用いたフィッティング曲線を図 2 に示す。図で横軸の共振器マイクロ波電圧 V_{res} は読み出しマイクロ波電力 P_{RO} の測定値から求めた。内部 Q 値の逆数 $1/Q_i$ の測定値は (3) 式を用いたフィッティング曲線と非常に良く一致することがわかった。

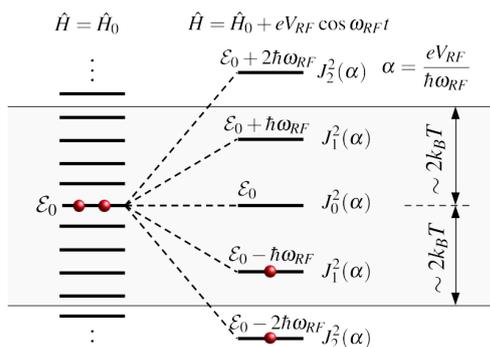


Fig. 1: Energy diagram of QP under microwave field.

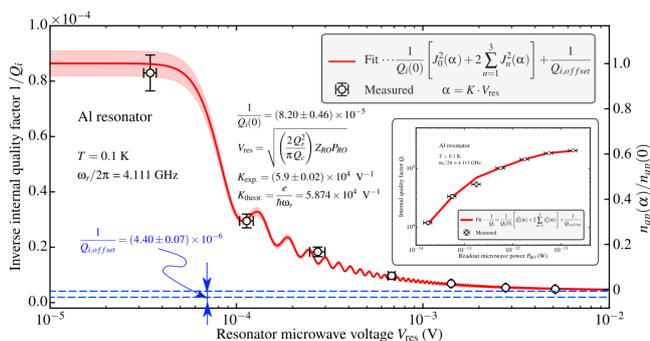


Fig. 2: Q_i as a function of resonator microwave voltage V_{res} .