高品質 Nb 薄膜を用いた MKID の共振特性 (II) Property of MKID resonators using a high quality Nb film (II) \bigcirc 野口 卓^{1,2}, Agnes Dominjon², Matthias Kroug², 美馬 覚¹, 大谷 知行¹ (1. 理研, 2. 国立天文台) ^OT. Noguchi^{1,2}, A. Dominjon², M. Kroug², S. Mima, C. Otani (1. RIKEN, 2. NAOJ/NINS)

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

超伝導共振器のQ値は、主に超伝導体中の 残留準粒子の伝導損失によって決定されると考 えられ、超伝導体中の残留準粒子の数を減らす ことができれば 超伝導共振器の 0 値を向上で きるものと考えている。 そこで、残留抵抗比 RRR > 80 をもち、残留準粒子数が少ないと考 えられる高品質 Nb 薄膜を用いて超伝導共振器 を作製し、その共振特性を詳細に調べた。

高品質 Nb 薄膜共振器の内部 Q 値 Q_i は、3 K 以下では、温度が低下すると急激に増加し、約 0.9 K でピークに達し、さらに温度が低下する と顕著な減少傾向を示す。測定した Qi の最大 値は4×107 に達し、我々が知る限り、Nb 薄膜 共振器でこれまでに得られた最高値示した。

高品質 Nb 薄膜共振器の Qi の 0.9 K 以下での 減少は、Al 共振器で観測された近藤効果によ る残留抵抗の増加が主要因と考えられるが[1]、 Al 共振器の場合とは異なり、 $a - b \ln T$ のよう な単純な温度挙動を示さない。詳細な解析の結 果、高品質 Nb 薄膜共振器の Q_iの温度依存性 は、次式で良く記述できることがわかった。

$$\frac{1}{Q_i} = \alpha \frac{R_s(T)}{X_s(T)} \left\{ 1 - b \ln\left(\frac{T}{T_K}\right) + aT^5 + cT^2 \right\}$$
(1)

ここで、 T_K は近藤温度、 aT^5 および cT^2 は、 フォノン散乱および準粒子間散乱によって生じ る残留抵抗成分を表す。図1(a)は、(1)式を用 いた Q_i のフィッティングの例であるが、 Q_i の 温度依存性が(1)式で非常に良く記述できるこ とがわる。特に、 cT^2 の抵抗成分の存在は、残 留準粒子系がフェルミ液体状態にあることを示 唆している。

一方、高品質 Nb 薄膜共振器の共振周波数 fr の温度変動 $\delta f_r / f_r$ は、温度の低下に伴い急激 に増加するが、2K付近で符号が負から正に変 化し、約1.2K付近でピークを示した後徐々に 0に向かって減少する。このような δ_{fr}/f_r の温 度依存性は、Al 共振器の場合と同様であり、次 式で良く近似できる。

$$\frac{\delta f_r}{f_r} = -\frac{\alpha}{2} \left\{ \frac{\delta X_s(T)}{X_s(0)} - b\omega_r \tau_K \frac{R_s(0)}{X_s(0)} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) \right\} \quad (2)$$

ここで、 $\omega_r = 2\pi f_r$ 、 τ_K は近藤散乱時間、 T_0 は 最低測定温度である。図 1(b) に、(2) 式を用い た $\delta X_s/X_s$ のフィッティングの例を示す。特に、 図 1(c) に示すように、 $\delta X_s/X_s$ の値が小さい場 合(1.2 K 以下の温度領域に対応)には、 $\delta f_r/f_r$ の測定値は log T に比例して増加しており、(2) 式の予測と非常に良く一致している。

0.9 K 以下の温度での O 値の低下の要因と考 えられる近藤効果の影響について考察する。近 藤相互作用の強さを示す係数bと近藤温度T_K は、読出マイクロ波パワーPROの増大とともに 減少する (図 2(a))。また、近藤散乱時間 TK は 読出マイクロ波パワー PRO の増大とともに増加 する(図2(b))。これらの結果は、マイクロ波パ ワーに比例して準粒子の平均エネルギーが増加 し、それにつれて近藤相互作用が弱くなる漸近 的自由性が現れたものと解釈できる。

[1] T. Noguchi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond., 28 (4), 2018, D.O.I. 10.1109/TASC.2018.2809615.



Fig. 1: Measured and calculated (a) quality factor and (b) resonance Fig. 2: Readout microwave power depenfrequency shifts as a function of temperature. (c) Magnified view of the area surrounded by broken lines in (b) as a function of $\log T$.



dence of (a) Kondo temperature T_K and coefficient b and (b) Kondo scattering time τ_K .