

YBCO 薄膜コプレーナ線路パラメトリック増幅器の利得評価

Gain evaluation of a superconducting parametric amplifier using YBCO CPW

茨城大学 ◦高橋 惟吹、島影 尚

Ibaraki Univ. ◦Ibuki Takahashi, Hisashi Shimakage

E-mail: 23nm648r@vc.ibaraki.ac.jp

1. はじめに

天文観測や量子コンピュータなどの応用で注目されている超伝導パラメトリック増幅器は、超伝導体特有のカイネティックインダクタンス (L_K) の非線形性を利用した増幅器である^[1]。これらの応用では、極低温動作の金属系超伝導体を使用されているが、我々は $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ (YBCO) を用いた増幅器の研究を進めている^[2]。本発表では、YBCO 薄膜で作製したコプレーナ伝送線路の特性評価に基づき、単純な伝送線路によるパラメトリック増幅器利得と、ステップインピーダンス型フィルタ形状伝送線路における利得改善の見積もりを報告する。

2. マイクロ波伝送特性による L_K と I_* の評価

L_K は印加電流に対して以下の式(1)のように変化する。

$$L_K(I) \approx L_K(0) \left[1 + \left(\frac{I}{I_*} \right)^2 \right] \quad (1)$$

ここで、 I_* は対象とする超伝導薄膜の非線形性を示すパラメータである。既に、芯線が $8 \mu\text{m}$ 幅の YBCO 薄膜を用いたコプレーナ伝送線路 (CPW) にマイクロ波を入力し、直流電流バイアスによる位相変化から L_K を算出した結果を報告した^[2]。 L_K はバイアス電流に対して 2 次関数的な依存性を示し、 $L_K(0)$ と I_* は、膜厚 20 nm で $0.425 \mu\text{H}$ 、 3.47 mA 、膜厚 50 nm で $0.144 \mu\text{H}$ 、 62.5 mA 、膜厚 200 nm で $0.0585 \mu\text{H}$ 、 83.4 mA となった。

3. 増幅利得の見積もり

増幅利得 G_s は伝送線路でポンプ波が受ける変調の位相変化量 $\Delta\theta$ に関連しており、式(2)で表される。

$$G_s = 1 + \left(\frac{|I_p|^2}{8I_*^2} \right)^2 \Delta\theta^2 \quad (2)$$

ここで、 I_p はポンプ波の電流である。(2)式より、現状では、 0.024 dB の利得と見積もられた。また、金属系超伝導体で典型的に得られている増幅度 (20 dB) やポンプ電力 (-10 dBm)^[1] を得るために必要な YBCO CPW の線路長を見積もったところ、約 3.4 m となった。この長さは、位相整合の改善により、より短くすることが可能である。完全な位相整合は式(3)で表される。

$$k_s + k_i - 2k_p = -\frac{k_p |I_p|^2}{4I_*^2} \quad (3)$$

ここで、 k_p 、 k_s 、 k_i はポンプ波、信号波、アイドラー波の波数である。位相整合をとるための伝送線路の形状としてステップインピーダンス型フィルタを図1のように仮定し、

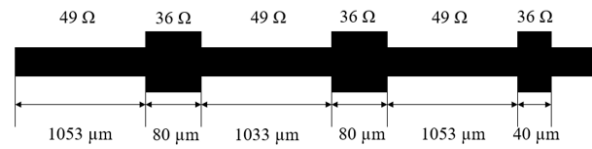


Fig. 1. Step-impedance filter with modulated structure.

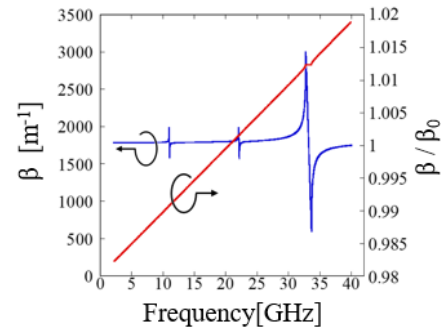


Fig. 2. Frequency dependence of propagation constant.

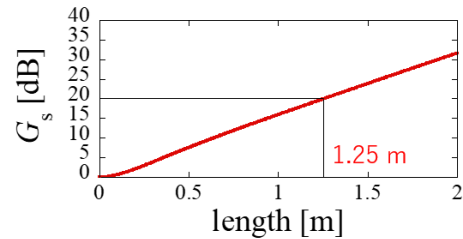


Fig. 3. Gain amplification using modulated structures

伝送線路の伝搬定数 β を計算した結果を図 2 に示す。この特性を用いて、ポンプ周波数を 11 GHz と設定し、 $k_s + k_i - 2k_p$ を計算したところ、 $-k_p |I_p|^2 / 32I_*^2$ となった。

次に、この伝送線路の線路長による増幅度を計算した結果を図 3 に示す。この結果から、増幅度 20 dB とポンプ電力 -10 dBm を達成するためには、約 1.25 m の線路長が必要であると見積もられた。現状の実験での芯線幅 $8 \mu\text{m}$ を考慮すると、 30 mm 角程度の基板が必要となる。位相整合の改善のため、線路形状の変更を進めており、完全位相整合達成においては、 20 mm 角程度の基板に実装できると見積もっている。詳細は当日発表する。

【謝辞】

本研究の一部は、産業技術総合研究所ナノプロセスング施設の支援を受けて実施されました。

文献

[1] C. Bockstiegel, et al. Journal of Low Temperature Physics 176 (2014): 476-482.

[2] 高橋 他、第 71 回応用物理学会春季学術講演会、23p-12N-5(2024 年)