

時間依存のGinzburg-Landauモデルを用いたジョセフソン弱結合のピコパルス応答の解析*

Pico Pulse Response Analysis of Josephson Weak-Link using Time-Dependent Ginzburg-Landau Model

吉森 茂 Shigeru YOSHIMORI**

Abstract

The pulse wave whose width is picosecond is called the pico pulse. In this paper, the pico pulse response analysis of high Tc superconducting Josephson weak-link made of Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ in the Terahertz (THz) region is reported. Since the photon energy of the THz radiation is greater than the energy gap of high Tc superconductor, the one dimensional time dependent Ginzburg-Landau (TDGL) equation is used and the TDGL model as the equivalent circuit of Josephson weak-link instead of the Resistively-Shunted-Junction model is derived by use of the TDGL equation. It is found that the peak value of pulse response decreases when the pulse width decreases.

Keywords: Josephson weak-link, THz region, Pico pulse response, TDGL equation

1. まえがき

ジョセフソン接合はミリ波領域やテラヘルツ領域において高感度・低雑音という特性を有することから、それらの周波数領域の超高感度検出器へ応用できる。テラヘルツ領域は近年、高速通信や化学分析への応用の観点から注目を集めている⁽¹⁾。ここでは、パルス幅がピコ秒であるようなパルス波をピコパルスと呼ぶこととする。ピコパルスにはテラヘルツ領域の高調波成分が含まれるので、本報告では時間依存のギンズブルグ・ランダウ方程式に基づくTDGLモデルをジョセフソン弱結合の等価回路として用いることによって、ピコパルス応答特性を解析した⁽²⁾。

2. ジョセフソン弱結合のTDGLモデル

本報告で使用したピコパルス応答解析用TDGLモデルの等価回路を図1に示す。なお、ジョセフソン弱結合の構造やTDGLモデルの導出は、文献(3)を参照されたい。

図1において、 I_d はジョセフソン弱結合に流す直流駆動電流であり、 I_p はピコパルス等を等価的に表現した電流振幅である。また、 $R(V)$ はジョセフソン弱結合の非線形抵抗であり、 ϕ はジョセフソン弱結合両電極間の位相差である。 I_{J1} はジョセフソン電流として知られる $\sin \phi$ 項の振幅で、 I_{J2} は $\cos \phi$ 項の電流振幅である。

図1より次式を得る。

$$I_d + I_p(t) = I_{J1} \sin \phi + I_{J2} \cos \phi + \frac{V}{R(V)} \quad (1)$$

式(1)を用いてピコパルス応答を数値解析した。本報告では、ジョセフソン弱結合の長さLは超伝導体のコヒーレンス長さ ξ 以下と仮定し、 $R(V)$ は正常抵抗 R_n に等しいとした。さらに I_{J1} と I_{J2} はテラヘルツ領域では以下のように表すことができる。

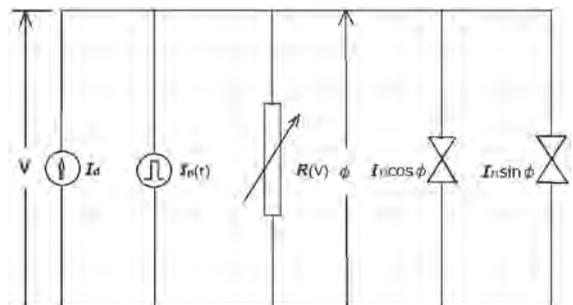


図1. ジョセフソン弱結合のピコパルス応答解析に用いたTDGLモデル

$$I_{J1} = I_c \quad (2)$$

$$I_{J2} = -\frac{17\tau_c}{735} \frac{2eV}{\hbar} \left(\frac{L}{\xi} \right)^2 \quad (3)$$

式(2)において、 I_c はジョセフソン弱結合の臨界電流であり、式(3)の τ は超伝導電子対の緩和時間、 e は電子電荷の絶対値である。

ピコパルスは矩形波であり、本報告の数値解析では図1の $I_p(t)$ として次式のようなフーリエ級数展開式を用いた。

$$I_p(t) = I_{p0} \left[\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\sin \left(\frac{(2n+1)\pi t}{t_p} \right)}{2n+1} \right] \quad (4)$$

ここで I_{p0} と t_p は照射したピコパルスの振幅とパルス幅である。

3. 解析結果と考察

本報告では、以下のような仮定の下でピコパルス応答解析を行った。

- (1) ジョセフソン弱結合は高Tc超伝導体Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀で出来ており、その超伝導臨界温度は110 [K]。

* 原稿受付 平成30年11月6日
IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1054 (2018)
** 工学部電子システム工学科

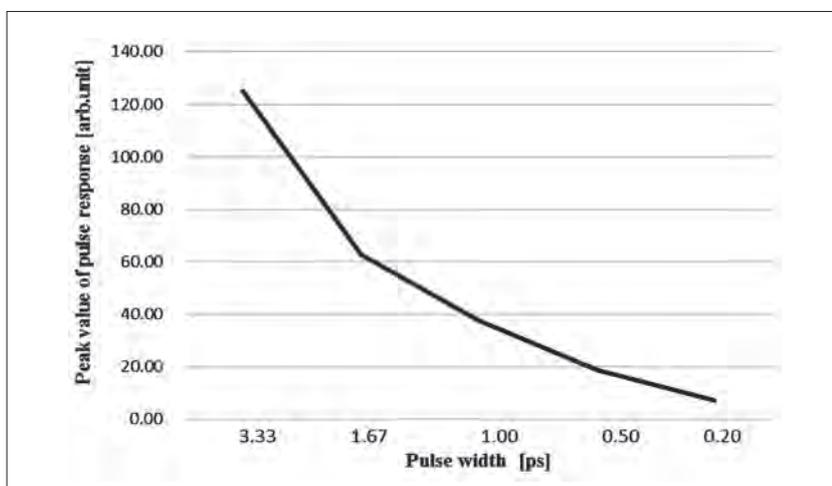


図2. 4.2[K]におけるピコパルス応答のピーク値とパルス幅の関係

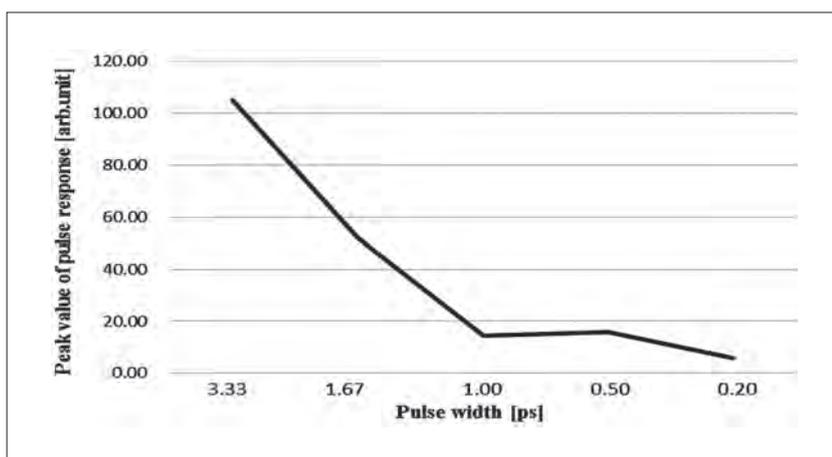


図3. 50[K]におけるピコパルス応答のピーク値とパルス幅の関係

- (2) $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ の超伝導エネルギーギャップは 4.2 [K] と 50 [K] でそれぞれ 30 [meV], 28 [meV]。
- (3) ジョセフソン弱結合の正常抵抗は 1.0 [Ω]。
- (4) ジョセフソン弱結合の $I_c R_n$ 積は, 4.2 [K] と 50 [K] で, それぞれ 18.5 [mV] と 17.1 [mV]。
- (5) $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ の超伝導コヒーレンス長は, 4.2 [K] と 50 [K] で, それぞれ 1.02 [nm] と 1.35 [nm]。
- (6) 臨界電流で規格化された直流駆動電流の値は 1.1。
- (7) 臨界電流で規格化されたパルス振幅は 3.0。

4.2 [K] と 50 [K] におけるピコパルス幅とパルス応答の解析結果を図2と図3に示す。解析結果のグラフにおいて、縦軸はパルス応答のピーク値を示している。

解析結果から、パルス幅が小さくなる、すなわちパルス幅が狭くなるとパルス応答のピーク値は急速に減少し、その傾向は動作温度に依存しないことが明らかになった。その原因

としては、ピコパルスに含まれる高調波成分の影響であると考えている。例えば、パルス幅が 0.5 [ps] のピコパルスには 10 [THz] の高調波成分が含まれている。

4. まとめ

TDGLモデルを用いて、高 T_c 超伝導体で出来たジョセフソン弱結合のピコパルス応答の解析を行った。その結果、パルス幅が小さくなると、パルス応答のピーク値は急速に小さくなることが明らかとなった。

参考文献

- (1) Hua T *et al.* 2011 *Cross Strait. Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference (IEEE)* 668
- (2) Gor'kov L P and Eliashberg G M 1969 *JETP* **29** 698
- (3) Yoshimori S, Terashima T and Kawamura M 1998 *Infrared Phys. & Technol.* **39** 41