

高感度光検出器に向けたナノ細線内部における熱エネルギーの検討

A Study of Joule Heat Inside a Nano Wire for High Sensitivity Photodetector

○関口洋平¹, 大貫進一郎², 藤井剛³, 井上修一郎⁴

*Yohei Sekiguchi¹, Shinichiro Ohnuki², Go Fujii³, Shuichiro Inoue⁴

Abstract: Recently, a niobium wire has attracted attention as an approach to high sensitivity photodetectors. Such detectors are indispensable for quantum communication system and one of the key issues is to concentrate electromagnetic energy inside the wire whose cross section is in nano scale. We have proposed the detector which consists of a nanowire with a thin Au stripe to enhance the electromagnetic energy. In this paper, we discuss the joule heat inside the niobium nano wire.

1. はじめに

微弱な光を検出するために、細線型の超伝導転移端センサーの研究が行われている^[1-3]。超伝導転移端センサーは、吸収した電磁エネルギーから生じる熱エネルギーを感知し、微弱な光の検出を行う。しかし、細線断面がナノサイズであるため、電磁エネルギーを吸収させることが困難である。本報告では超伝導転移端センサーとしてNb細線を用い、細線内部の電磁界解析及び熱解析を行う。そして、金属ストライプを用いる事で、効率の良いエネルギー吸収が可能となる事を示す。

2. 解析モデル

解析手法にはADE-FDTD法を用い、金属の分散性はDrude modelとした。以下にADE-FDTD法における電界E、磁界H、及び分極電流密度Jの計算式を示す、

$$\mathbf{E}^{n+1} = C_1 \mathbf{E}^n + C_2 (\nabla \times \mathbf{H}^{n+1/2} - (1 + \alpha) \mathbf{J}^n) \quad (1)$$

$$\mathbf{H}^{n+1/2} = \mathbf{H}^{n-1/2} - \frac{\Delta t}{\mu_0} (\nabla \times \mathbf{E}^n) \quad (2)$$

$$\mathbf{J}^{n+1} = \alpha \mathbf{J}^n + \beta (\mathbf{E}^{n+1} + \mathbf{E}^n) \quad (3)$$

本報告では、Fig. 1に示すSiO₂に覆われた細線と金属ストライプで構成される光検出器について電磁界解析を行う。ここで、細線の媒質はNb、金属ストライプの媒質はAuとした。入射波には、z軸正方向に伝搬するのガウシアンビームを用いた。

3. 解析結果

Fig. 2にx-z平面における電界強度分布を示す。(a)は細線のみの場合で、(b)は金属ストライプを配置した場合である。これらの結果より、金属ストライプを用いることで、細線近傍に電磁界の集中が確認出来る。

次に、細線内で吸収された電磁エネルギーから発生

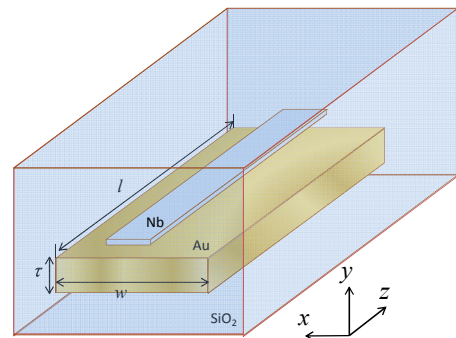
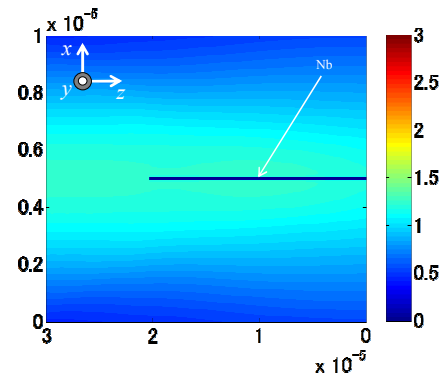
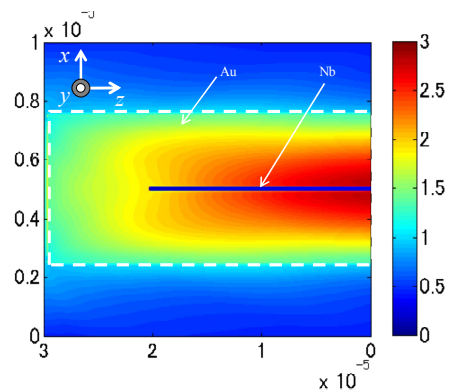


Figure 1. Metal stripe with the Nb wire.



(a) Without metal stripe.



(b) With metal stripe.

Figure 2. Distribution of electric field intensity.

する熱エネルギーの評価を行う。ここで、熱エネルギーは次式から評価しており、 σ は Nb の導電率を示す^[4]。

$$W_e = \int_t \int_V \sigma \mathbf{E}^2 dV dt \quad (4)$$

Fig. 3 に x - z 平面における観測時間 $t = 180$ fs での細線の熱エネルギー分布を示す。(a)の金属ストライプを配置しない場合と (b)の金属ストライプを配置した場合は共に発生する熱エネルギーが小さい。

Fig. 4 に x - z 平面における観測時間 $t = 360$ fs での細線の熱エネルギー分布を示す。(a)の金属ストライプを配置しない場合に比べ、(b)の金属ストライプを配置することで細線後方で特に高い熱エネルギーが発生していることがわかる。これは金属ストライプを配置することで後方に電磁界が集中し、細線に吸収される電磁エネルギーが増えたためである。

Table1 に細線内に発生した熱エネルギーの総計を示す。観測時間 $t = 360$ fs において、細線のみの場合では発生した熱エネルギーは 3.32×10^{-29} J であるが、金属ストライプを用いた場合では約 40 倍の 1.65×10^{-27} J に増大した。

4. まとめ

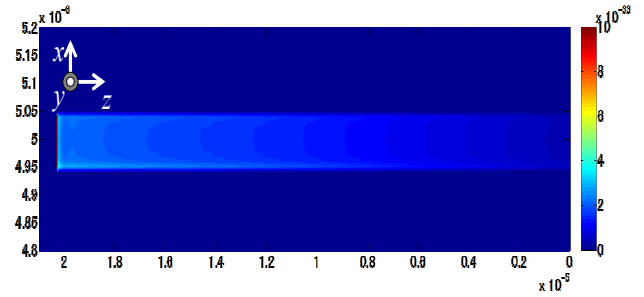
本報告では超伝導転移端センサーとして Nb 細線を用いた光検出器について電磁界解析を行った。金属ストライプを用いる事で、電磁エネルギーが光検出器後方に集中する事を確認した。また、電磁界を集中させることで、細線内部に吸収されるエネルギーが約 40 倍に増大することを確認した。

5. 謝辞

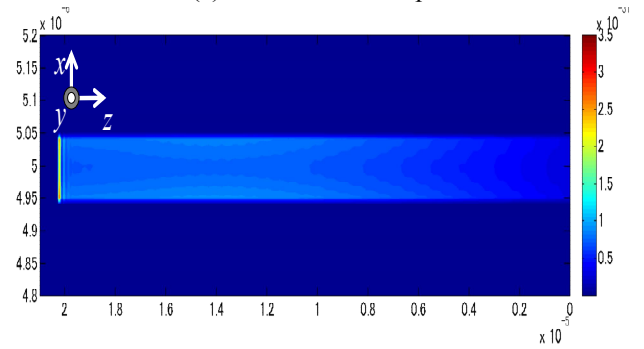
本研究の一部は、日本大学学術研究戦略プロジェクト及び私立大学戦略的研究基盤形成支援事業の援助を受けて行われた。

6. 参考文献

[1] G. Fujii, D. Fukuda, T. Numata, A. Yoshizawa, H. Tsuchida, S. Inoue, and T. Zama : Quantum Communication and Quantum Networking Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, Vol.36, pp.220-224, 2010.
 [2] S. Ohnuki, Y. Sekiguchi, D. T. Quang, G. Fujii, and S. Inoue : Proc. AP-RASC, 290606, 2013.
 [3] Y. Sekiguchi, S. Ohnuki, G. Fujii, and S. Inoue : IEICE Society Conference 2013, C-15-7, 2013.
 [4] A. J. Annunziata, D. F. Santavicca, J. D. Chudow, L. Frunzio, M. J. Rooks, A. Frydman, and D. E. Prober, : IEEE Trans. Appl. Supercond. Vol.19, No.3, pp.327-331, 2009.

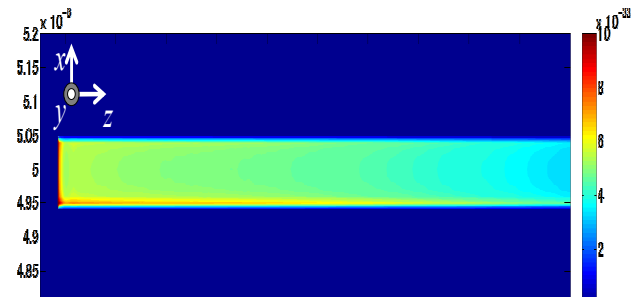


(a) Without metal stripe.

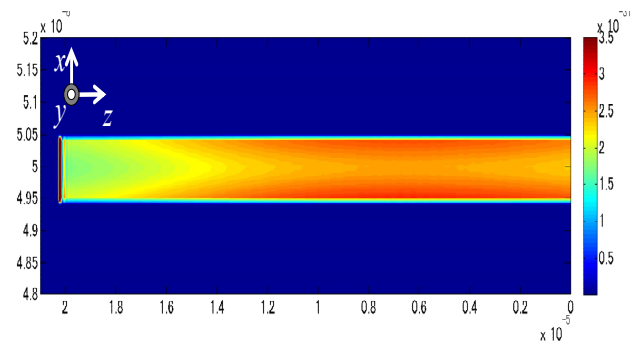


(b) With metal stripe.

Figure 3. Distribution of joule heat at 180 fs



(a) Without metal stripe.



(b) With metal stripe.

Figure 4. Distribution of joule heat at 360 fs.

Table 1. Internal joule heat in Nb nano wire.

	Joule heat [J]	
	180fs	360fs
Nb nano wire	9.98×10^{-30}	3.32×10^{-29}
Nb nano wire with Au stripe	4.57×10^{-28}	1.65×10^{-27}