

## 新しい温度計について

矢山, 英樹  
九州大学大学院理学研究院物理学部門

<https://doi.org/10.15017/11052>

---

出版情報 : 九州大学極低温実験室だより. 2, pp.21-25, 2001-06. Cryogenic Laboratory, Faculty of Science, Kyushu University

バージョン :

権利関係 :

# 新しい温度計について\*

大学院 理学研究院 物理学部門  
矢山 英 樹

## 1. はじめに

希釈冷凍機を用いて到達できる 20 mK 程度のまでの温度測定は、実際には抵抗温度計が主流である。1990 年代半ばまでは、ロックイン技術を用いてセンサーの消費電力すなわち発熱を小さくする改良は行なわれているが、測定法そのものの本質的な変化は見られなかった。しかし、メゾスコピック系の研究が進展するにつれ、微細加工技術を利用した素子が開発され、それを用いた新しい原理に基づく温度測定が可能になってきた。また、エレクトロニクスも発達し、複雑な回路がワンセットで販売されるようになってきた。さらに、小型で広範囲の温度測定ができる抵抗温度素子も作られるようになってきたので、それらを以下に紹介する。

## 2. クーロンブロッケード温度計

この温度計の原理は、1994 年に複数の研究者達によってほぼ同時に提案された[1, 2, 3]. そして市販品[4]が現れたのは最近のことである。この温度計は、抵抗温度計に属すると考えることもできるが、原理的に新しい温度測定法である。通常の抵抗温度計は、線形抵抗の温度依存性を利用するのであるが、これはクーロンブロッケード非線形抵抗素子を用い、一次温度計としても、また二次温度計としても用いることができる。したがって、他の温度計を用いて較正する必要がなく、それ自身で自己較正機能を有している。ここでは、主に文献[1]および Nanoway 社のカタログ[4]に基づいて簡単に説明する。

通常のトンネルジャンクションアレイは、静電エネルギー  $E_c$  が熱エネルギー  $k_B T$  に比べて大きい領域で研究されることが多い。逆に、接合の大きさを適当に選び、 $E_c \ll k_B T$  となるようにすると、トンネル電流  $I$  が温度  $T$  によって変化するため温度計として利用できることが容易に推測できる。

いま最も簡単な場合として、図 1 のように、対称なダブルジャンクションアレイ（トンネル抵抗  $R_T$ 、接合容量  $C$ 、中央の島の対グラウンド容量  $C_0$ ）を考え、左右の電極に  $+V/2$ ,

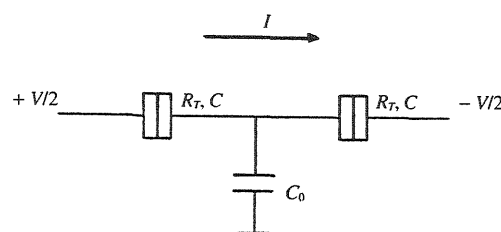


図 1 トンネル抵抗  $R_T$  と容量  $C$  をもつ対称的なダブルジャンクションアレイ。両電極に  $+V/2$ ,  $-V/2$  を印加したときに流れる電流を  $I$  とする[1].

\* 本稿は「超低温の実験技術」（ウクライナ科学アカデミー低温物理工学研究所編，矢山英樹，I.B.ベルクトフ共訳，九州大学出版会，2000年）の中から訳者補遺の部分を一部抜粋したものである。

$-V/2$  のバイアス電圧を印加する。このときの微分コンダクタンス  $G = dI/dV$  は、 $v = eV/2 k_B T$  とすると次式で与えられる[1].

$$G/G_T = 1 - ug(v) + \dots, \quad (1)$$

ここで,

$$g(v) = [v \sinh(v) - 4 \sinh^2(v/2)] / 8 \sinh^4(v/2) \quad (2)$$

であり、 $u = [e^2/(2C + C_0)]/k_B T$ ,  $G_T = (2R_T)^{-1}$  である。式(1)の値は、バイアス電圧  $V$  の絶対値が大きいたちころでは1になり、 $V=0$  のところで極小をとる。ゼロバイアス、すなわち  $v=0$  での極小値は、次式のようになる。

$$G(v=0)/G_T = 1 - u/6 + \dots. \quad (3)$$

式(1)~(3)を用いると、 $eV_{1/2}/2 k_B T \cong 5.439$  が得られる。ここで、 $V_{1/2}$  は式(1)を  $V$  に対してプロットしたときの半値幅である。したがって、1次温度計として、半値幅を測ることで絶対温度が求まる。また、 $V=0$  でのディップの大きさは絶対温度に反比例するため、二次温度計として用いることもできる。

電圧は接合の数に比例するため、トンネルジャンクションを  $N$  個直列に接続した場合、 $eV_{1/2}/N k_B T \cong 5.439$  になり、出力が増加する。図2は  $N=10$  の素子の写真、図3はその実験例を示す。実際の測定では、直流バイアス電圧に小さな交流電圧を重畳し微分コンダクタンスを測定する。通常は、測定がより簡単に行なえる二次温度計として用いられる。つまり、ディップ  $\Delta G/G_T$  の測定値から相対温度を測定する。しかし、ときどき一次温度計として  $V_{1/2}$  を測定して、温度の絶対値を自己較正することができる。この素子は、電子ビームリソグラフィ装置を用いて酸化アルミニウムのトンネル接合を形成したものである。したがって、素子を自作するのは簡単ではない。現時点では、市販品として、温度範囲に

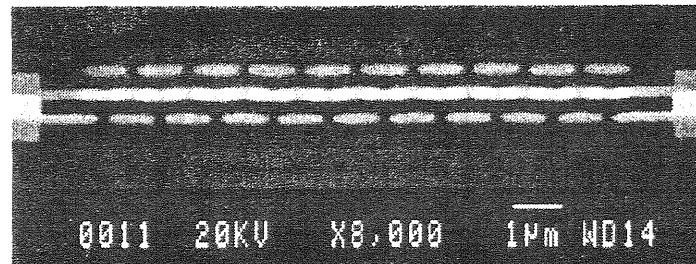


図2 トンネルジャンクションアレーの走査電子顕微鏡写真[4].

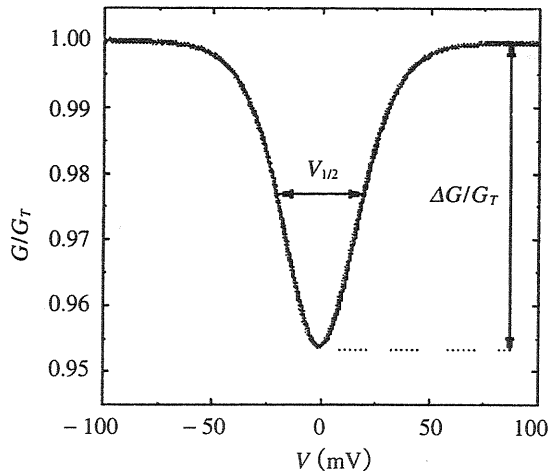


図3 バイアス電圧  $V$  に対する  $G/G_T$  の変化[4]. 1次温度計モードとして,  $V_{1/2}$  が温度に比例する. 2次温度計モードとして  $\Delta G/G_T$  が温度に反比例する.

よって2種類のセンサー（測定温度範囲が 20 mK ~ 1 K と 1 K ~ 30 K）と2種類のモニター装置がある[4].

通常, 極低温の温度計はいずれも磁場の影響を受ける. しかし, この温度計は原理的に磁場の影響を受けにくいという特長を有する. 図4はその磁場による温度誤差を示す[4]. 30 T の強磁場中でも, 一次温度計モードが 0.4%以下, 二次温度計モードが 0.2%以下であり, 極めて優秀であることが分かる. また, 発熱量は一次温度計モードで 100 nW (4.2 K), 20 pW (40 mK), 二次温度計モードで 40 pW (4.2 K), 8 fW (40 mK)に過ぎない[4]. しかし, 欠点として, 素子が電子ビームリソグラフィを用いて作られるため高価であることが挙げられる.

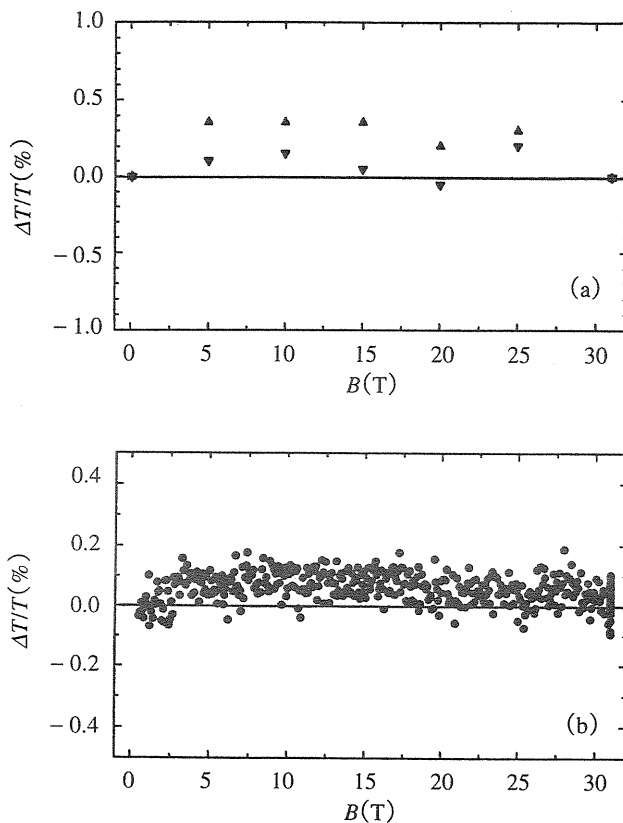


図4 強磁場による温度誤差[4].  
(a) 1次温度計モード.  
(b) 2次温度計モード.  
温度は両者とも  $T=1.4$  K.

### 3. 広範囲抵抗温度計

1 個の抵抗温度計がカバーする測定温度範囲は、あまり広くないのが常識である。例えば、4.2 K 以下 20 mK までの測定でも、通常 20 mK ~ 1 K と 1 K ~ 4.2 K の 2 個のセンサーが必要になる。希釈冷凍温度から室温までを測定しようとする、少なくとも 3 個あるいは 4 個くらい必要になる。しかし最近、20 mK ~ 300 K を 1 個のセンサーでカバーするものが開発されている。それは、半導体の GaAs 基板の上に Ge を蒸着したミニチュア薄膜ゲルマニウムセンサーである[5]。

図 5 にモデル TTR-1D の抵抗の温度依存性を示す[5]。2 つの線はバッチによる違いを示す。図 6 は同じく感度の温度依存性を示す[5]。室温付近での感度はあまり大きくないが、それでも十分な感度を有している。低温では感度が増加し使いやすくなる。このように広い温度範囲で動作するのは、等価回路として GaAs 基板と Ge 薄膜が電氣的にも機械的にも並列に接続され、それぞれが高温部と低温部をうまくカバーしているのではないかと想像されるが、はっきりとしたことは分からない。

図 7 はこのセンサーの見取り図である[5]。直径 1.2 mm 厚さ 0.9 mm であり、超小型で熱容量も小さいため比熱の測定などには都合が良い。センサーエレメントはこのプラスチックパッケージの中に封入されている。このセンサーの価格は、他の市販されているセンサー、例えば Ge や RuO<sub>2</sub> などと大きな違いはない。

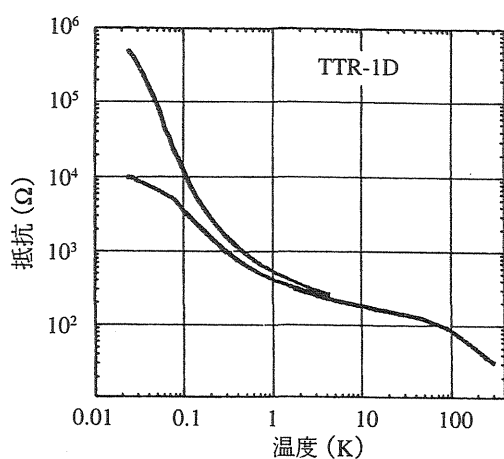


図 5 Ge 薄膜温度センサーの抵抗  $R$  の温度依存性[5]。

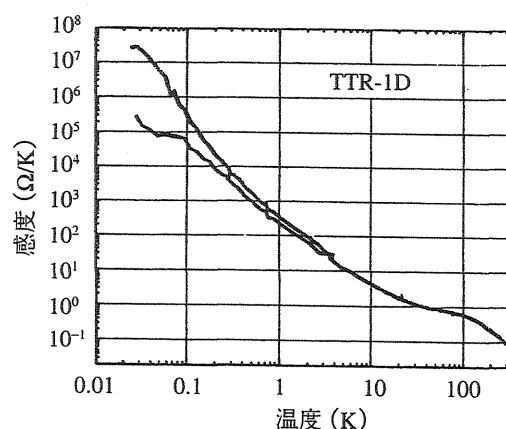


図 6 Ge 薄膜温度センサーの感度  $|dR/dT|$  の温度依存性[5]。

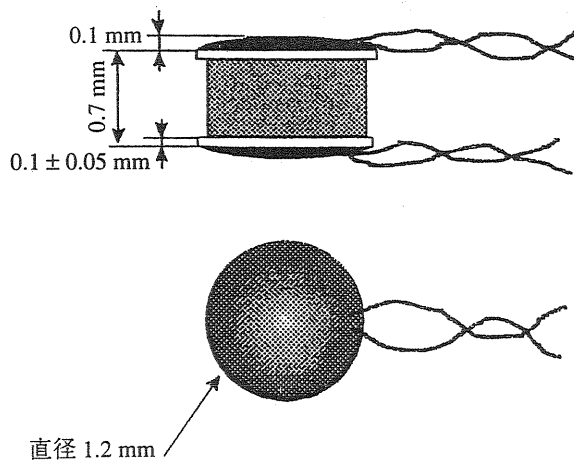


図7 センサーの見取り図[5].

## 参考文献

1. J.P. Pekola, K.P. Hirvi, J.P. Kauppinen, and M.A. Paalanen: Thermometry by Array of Tunnel Junctions, *Phys. Rev. Lett.* **21** (1994) 2903-2906.
2. P. Delsing, C.D. Chen, T. Claesson, P. Davidsson, B. Jonson, M. Lindroos, S. Norrman, G. Nyman, and S. Qutaishat: A New Temperature Sensors in Low-Temperature Composite Bolometers for High Resolution Spectroscopy of Nuclear Radiation, *Physica B* **194-196** (1994) 27-28.
3. A. Amar, D. Song, C.J. Lobb, and F.C. Wellstood:  $2e$  and  $e$  Periodic Pair Currents in Superconducting Coulomb-Blockade Electrometers, *Phys. Rev. Lett.* **72** (1994) 3234-3237.
4. Nanoway Oy カタログ "Nanoway CBT primary thermometer": URL: <http://www.nanoway.fi> および日本総代理店ロックゲート株式会社 URL: <http://www.rockgateco.com> から入手可能.
5. O. Myronov: Data of Minutire Germanium Film Temperature Sensors, Department of Physics, University of Warwick, COVENTRY, CV4 7AL, UK. E-mail: [o.a.mironov@csv.warwick.ac.uk](mailto:o.a.mironov@csv.warwick.ac.uk) から入手可能.