

二次元金属粒子層の Kosterlitz-Thouless-Berezinskii 転移温度の制御

Control of Kosterlitz-Thouless-Berezinskii transition temperature of a two dimension metal particles layer

○中拓也¹, 羽柴秀臣²*Takuya Naka¹, Hideomi Hashiba²

Abstract: Aligned metal particles shows its conductivity change from metallic to insulative at a temperature, so called Kosterlitz-Thouless-Berezinskii transition. We study transport property of two dimensionally aligned metal clusters by capacitor-network model. With clusters of 10 nm in diameter, its transition temperature changes at a gradient of 5 K/nm with a separation of two clusters.

1. はじめに

Kosterlitz-Thouless-Berezinskii 転移(KTB 転移)とは、金属粒子間の導電性が転移温度を境に金属から、電子・正孔対が互いに束縛し合う絶縁に転移する現象^[1]である。本研究では 2 次元状に配置した微小金属クラスタに現れる KTB 転移温度のクラスタ間隔の依存性を明らかにする。この依存性は、半導体を用いない金属薄膜によるスイッチング素子や数 nm 変化の圧力素子などの MEMS への応用が期待できる。

2. 原理

○電荷 KBT 転移

2 次元金属クラスタは簡単なモデルのコンデンサーネットワークモデル^[2]であらわされる (Fig1)。

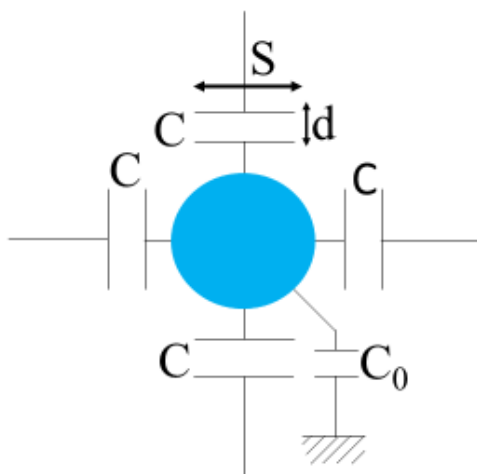


Figure 1. Schematic diagram of two dimensional metal particle layer.

あるコンデンサーから r だけ離れた別のコンデンサーに電子を移動させたとき、電子と正孔の相互作用

エネルギーは $\frac{r}{d} \sqrt{\frac{C_0}{C}} \ll 1$ のとき

$$U(r) = \frac{e^2}{2\pi C} \ln\left(\frac{r}{d} \sqrt{\frac{C_0}{C}}\right) \quad (1)$$

となる。 e は素電荷、 C は静電容量、 C_0 はアースからの静電容量、 d は平行板間の距離である。

この結果が無限遠方までこの対数型の相互作用が続く場合、KTB 転移の臨界温度は

$$T_C = \frac{e^2}{8\pi C k_B} \quad (2)$$

となる。温度が T_C より低い場合、電子と正孔対が互いに束縛状態になる。この相互作用がすべての領域で作用するため、 $r \rightarrow \infty$ で $U(r) \rightarrow \infty$ となり絶縁となる。

また T が T_C 近傍で $T > T_C$ の場合、電気伝導率の温度依存性は

$$\sigma \propto \exp\left[-\frac{2b}{\sqrt{\frac{T}{T_C}-1}}\right] \quad (3)$$

となる。このとき b は 1 程度の定数である。

また、静電容量 C は誘電率 ϵ と平行版面積 S より

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (4)$$

であるから、(2)式は

$$T_C = \frac{e^2 d}{8\pi \epsilon k_B S} \quad (5)$$

となる。

1: 日大理工・学部・物理. Department of Physics, College of Science and Technology, CST., Nihon-U.

2: 日大・教員・量科研. Supervisor, Institute of Quantum Science, CST., Nihon-U

平行板面積 S はクラスタのサイズに等しい. ここで, クラスタを直径 10nm , 平行板距離を $d=1\text{nm}$ と仮定すると,
 (5) 式から $T_c=11.2\text{K}$ となるため, (3) 式より Fig.2 が示せる. この図から, 一次になる部分は Ohm の法則を表し, KTB 転移のため変化し, 一定になる部分は絶縁を表している. 変化しているため, 測定ではフィッティング曲線を出すと T_c が求められる.

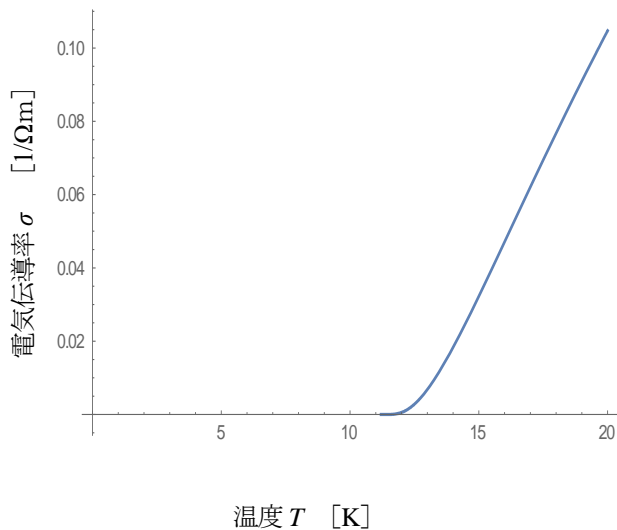


Figure 2. Temperature dependence of electrical conductivity of two dimensional metal particle layer. Above 11K , is the conductance follows Ohm's law, below that conductance is zero.

転移温度は Fig.3 で示すようにクラスタ間距離に対して 10K/nm 程度の変位を持ち, 一般的な冷凍機が 0.1K 以下の温度制御性を持つことを考えると, 十分に測定可能である.

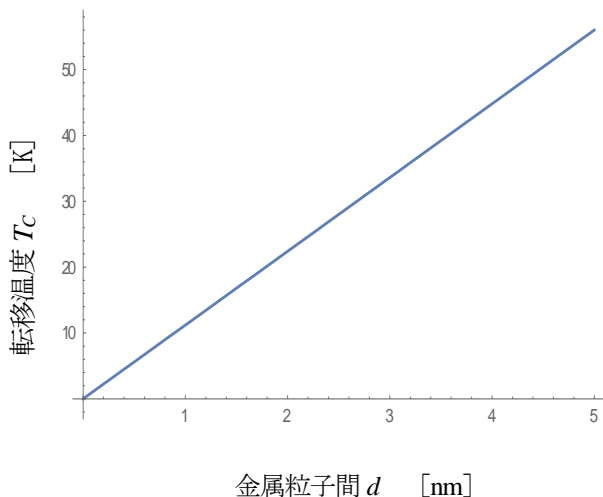


Figure 3. Transition temperature T_c versus separation distance d

Fig.3 は, 微小クラスタが小さすぎると, サイズ効果により, 離散準位が現れるため, 変化が予想される. このため検討すべき課題である.

3. 試料構造

今回作製する試料は Fig.4 のように, Si 基板上に Al 薄膜を作製し, 自己集積化した Al クラスタを用い, KTB 転移を測定する. クラスタサイズは, Al 薄膜の膜厚に依存した大きさになる.

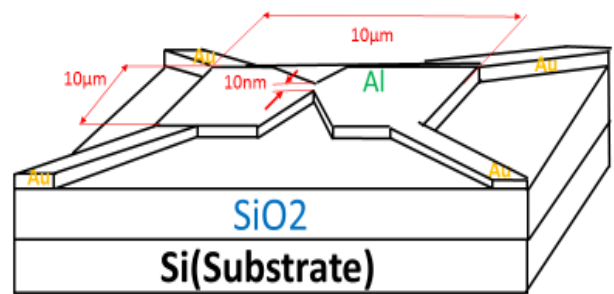


Figure 4. The 2-d layer is formed on narrow part in the Al layer, and is connect to Au pad.

4. まとめ

本稿ではコンデンサーモデルを適応し, KTB 転移温度がクラスタ距離に比例することを導いた. 今後, 実際にサンプルを作製し, KTB 転移の温度による抵抗変化を測定する予定である. そして, 転移温度の間隔依存性について明らかにすることを目指す.

5. 参考文献

[1] S.Kobayashi, A.Kanda and R.Yamada: 「Charge Kosterlitz-Thouless Transition in Two-Dimensional Arrays of Small Tunnel Junctions」 Jpn. J. Appl. Phys. Vol.34, No 8B, pp4548-4551, 1995
 [2] 川畑有郷: 「新物理学シリーズ 31 メゾスコピック系の物理学」、初版第 4 刷、培風館