

チャンネルの異方伝導性を考慮した高T_c超伝導トランジスタの解析

Analysis of High T_c Superconducting Transistor with Anisotropic Conductive Channel

拓殖大学大学院 工学研究科 機械・電子システム工学専攻 吉森研究室

王 振華

指導教員 教授 吉森 茂

キーワード：高 T_c 超伝導体、TDGL 方程式、超伝導トランジスタ、電流注入、温度依存性

1. 研究の背景と目的

ジョセフソン効果は電磁波検出器へ応用できるだけでなく、オン・オフを行うスイッチング素子にも応用できる可能性がある。ジョセフソン効果を応用して半導体トランジスタと同様の動作方式が得られれば、新しい超伝導回路を実現することができる。

本研究はベース領域への電流注入による超伝導エネルギーギャップの変化を利用し、高 T_c 超伝導体の結晶構造の異方性を考慮して解析を行う、その特性を理論的に明らかにすることを目的とする。

2. 高 T_c 超伝導トランジスタの模式図

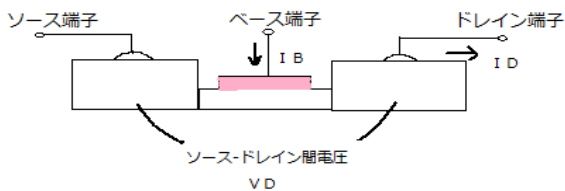


図1. 電流注入型超伝導トランジスタの模式図

電流注入型高T_c超伝導トランジスタの模式図を図1に示す。基本的には電極部分とブリッジ部分に臨界温度110[K]のBi系高T_c超伝導体を使用したマイクロブリッジ型ジョセフソン接合の構造であり、その動作原理は次のようである。

ソース・ドレイン間電流 I_Dは、ベース領域に注入された電流によって超伝導エネルギーギャップが

変化し、臨界電流が変化するために、ソース・ドレイン間電圧 V_D と I_D の関係（電流電圧特性）を制御できる。

3. 理論式

図1の模式図の示すトランジスタにドレイン電流を流した時のドレイン電圧 V_D を I_{c0}R_n積で規格化すると、

$$v_D = \frac{V_D}{I_{c0}R_n} = \sqrt{\left(\frac{I_D}{I_{c0}}\right)^2 - \left(1 - \frac{T + \alpha I_b}{T_c}\right)^2} \quad (1)$$

が得られる。

次に

$$i_b = \frac{I_b}{I_{c0}} < 1 \quad (2)$$

と定義すると、動作点における規格化微分抵抗 r_Dは次式のようにになる。

$$r_D = \frac{dv_D}{di_b} = \frac{1 - i_b - \frac{T}{T_c}}{\sqrt{(i_D)^2 - (i_b)^2 + 2\left(1 - \frac{T}{T_c}\right)i_b - \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^2}} \quad (3)$$

また、規格化微分抵抗の温度安定性を表す理論式は次のようになる。

$$\frac{dr_D}{d\left(\frac{T}{T_c}\right)} = \frac{-1}{\sqrt{(i_D)^2 - (i_b)^2 + 2\left(1 - \frac{T}{T_c}\right)i_b - \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^2}} - \frac{\left(1 - i_b - \frac{T}{T_c}\right)^2}{\left\{\sqrt{(i_D)^2 - (i_b)^2 + 2\left(1 - \frac{T}{T_c}\right)i_b - \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^2}\right\}^3} \quad (4)$$

4. 高 Tc 超伝導体の結晶構造の異方性を考慮した解析

Bi 系高 Tc 超伝導体の結晶構造は図 2 に示すように強い異方性を示すことが知られており、電流注入型高 Tc 超伝導トランジスタのベース電極下のチャネル部分の抵抗値は Bi 系超伝導体の結晶構造に大きく依存する。本研究では、チャネル部分の抵抗値の理論解析に時間依存の GL (TDGL) 方程式を用いた。

チャネル部分に c 軸が図 2 の左右方向に向いた結晶粒子の混じる割合を γ としたとき、 γ の平均値 $\langle \gamma \rangle$ とチャネル部分の抵抗値の関係は図 3 のようになる。ただし、 $\langle \gamma \rangle = 1$ のときの抵抗値を 100 [Ω] と仮定した。チャネル長が 50 [μm]、厚さが [μm]、幅が 1 [μm] の場合に相当する。

チャネル抵抗値を 100 [Ω] と 32 [Ω] ($\langle \gamma \rangle = 0.9$) のときのベース電流とドレーン電圧の関係の解析結果を図 4 と図 5 (に示す。ただし、ドレーン電流を 0.29 [mA] と一定とし、動作温度を 50 [K] とした。

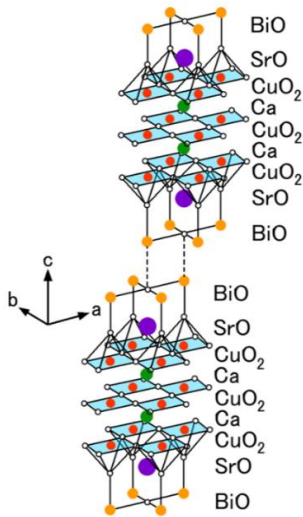


図 2. Bi 系高 Tc 超伝導体の結晶構造

5. まとめ

TDGL 方程式を用いて Bi 系高 Tc 超伝導体の結晶の異方性を考慮してチャネル抵抗値を解析し、Bi 系高 Tc 超伝導トランジスタのドレーン電圧とベース電流の関係について解析した。そのベース電流によってドレーン電圧を制御できることが分かった。Bi 系高 Tc 超伝導体の異方性を考慮し、規格化微分抵抗の温度依存性を解析することができた。

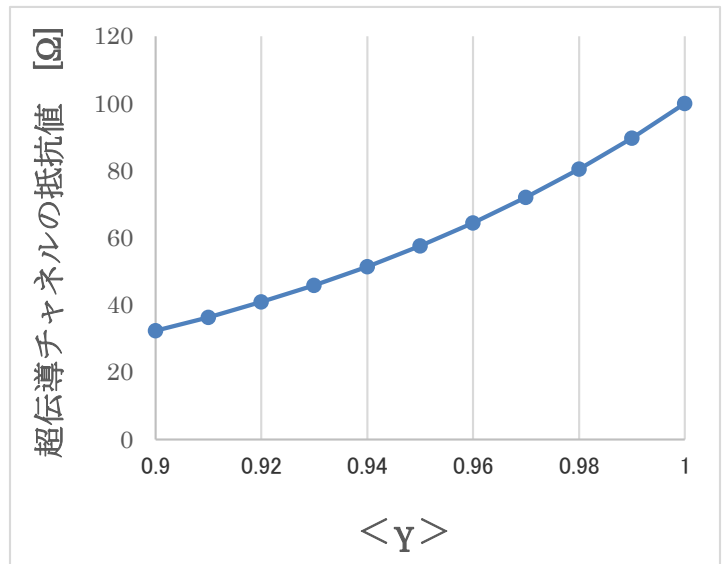


図 3. チャネル抵抗値と $\langle \gamma \rangle$ の関係

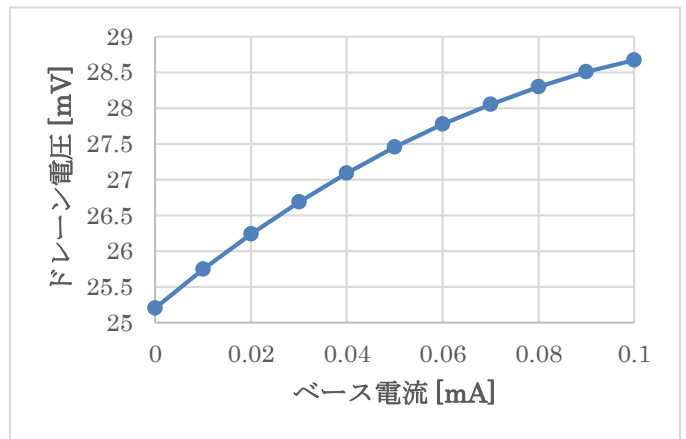


図 4. チャネル抵抗が 100 [Ω] のときのドレーン電圧とベース電流の関係 (ドレーン電流 0.29 [mA]、動作温度 50 [K])

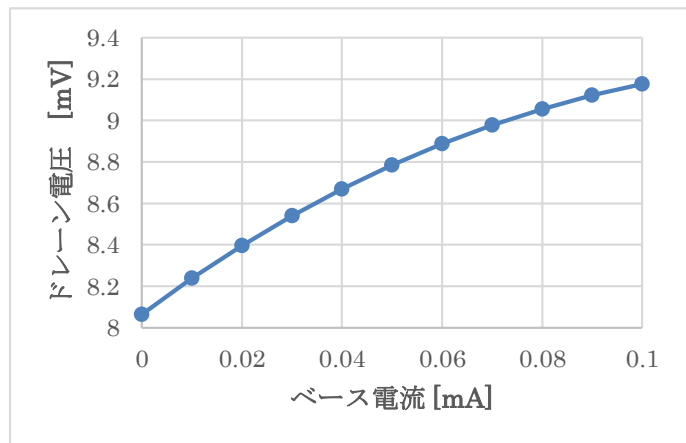


図 5. チャネル抵抗が 32 [Ω] のときのドレーン電圧とベース電流の関係 (ドレーン電流 0.29 [mA]、動作温度 50 [K])