

高機能トンネル電子デバイスと その応用に関する研究

代表者： 水柿 義直（電子工学科 准教授）

メンバー： 柏竜太、河合章生、滝口将志

（電子工学専攻 M1）

田中文之、田村信行、速水翔太

（電子工学科 B4）

高機能トンネル電子デバイスとは

- 超伝導電子(クーパ対)のトンネリング
 - 巨視的量子波導関数で記述される超伝導電子のトンネリング
 - 基本となる物理: 超伝導、磁束量子化、ジョセフソン効果
 - 研究内容: 超伝導体トンネル接合を用いたデバイスと回路
 - 特徴: 超高速、超低消費電力、超高感度、超高精度
- 電子1個ずつのトンネリング
 - 電子1個のレベルで電子のトンネリングを制御
 - 基本となる物理: クーロン・ブロッキング、スピン依存伝導
 - 研究内容: 微小トンネル接合を用いたデバイスと回路
 - 特徴: 超高密度、超低消費電力、超高感度、超高精度

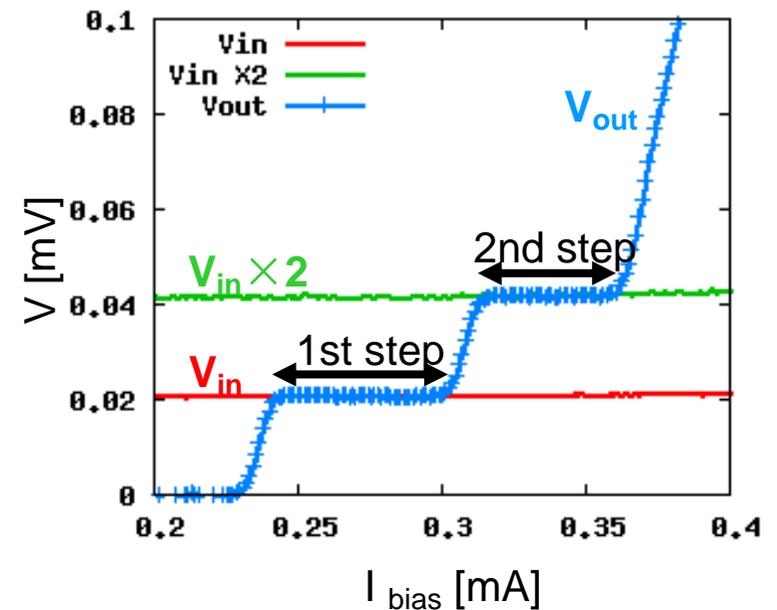
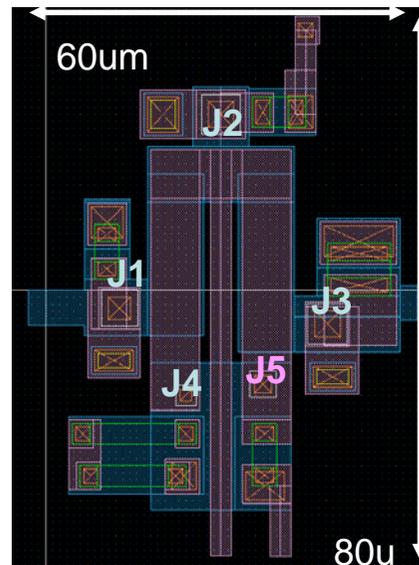
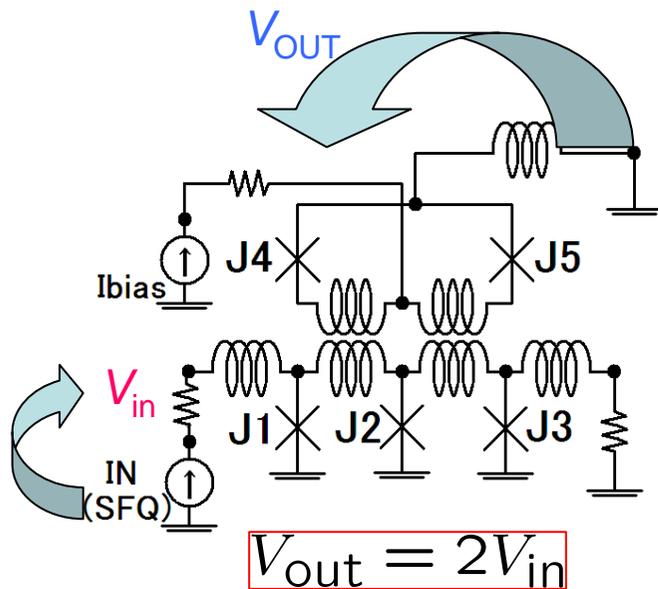
高精度ジョセフソン電圧増倍器の動作実証

交流ジョセフソン効果 → 電圧が周波数だけで決まる (材料を問わない)

$$V = n\Phi_0 f$$

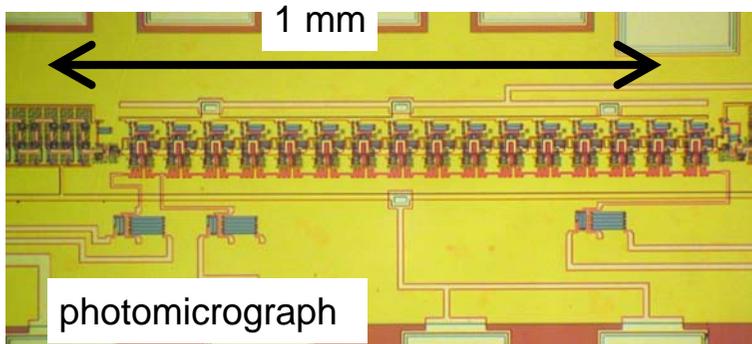
↓
電圧標準、高精度D/A変換 → 高精度電圧増幅

- 単一磁束量子 (SFQ) 回路による電圧2倍回路を設計し、その動作実証を行った。

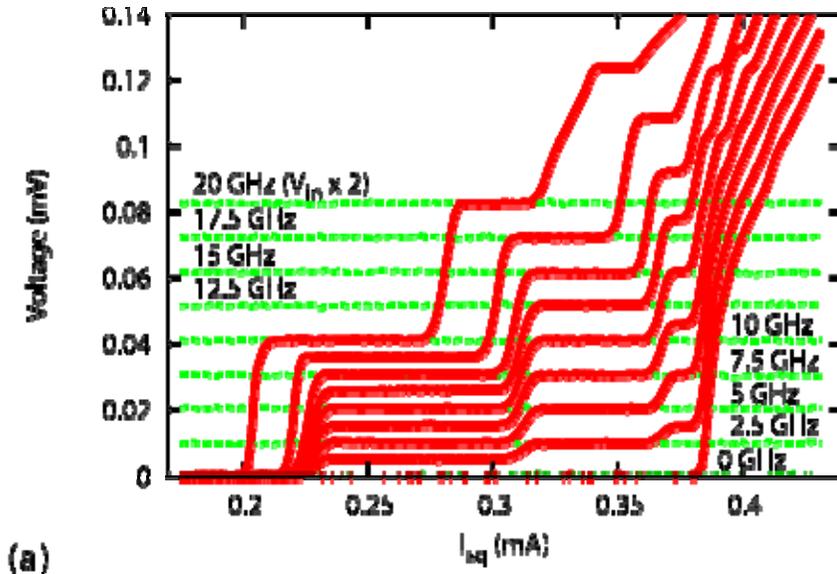


1セルで電圧を高精度に2倍する電圧2倍回路 Voltage Doubler

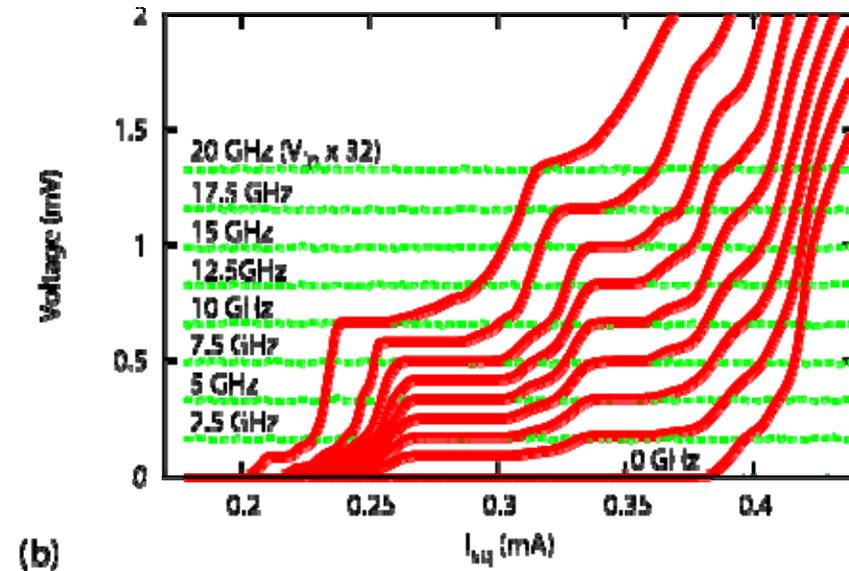
ジョセフソン電圧2倍回路の16段接続動作



- デバイス・パラメータを再最適化し、16段接続動作（電圧32倍）を実証した。

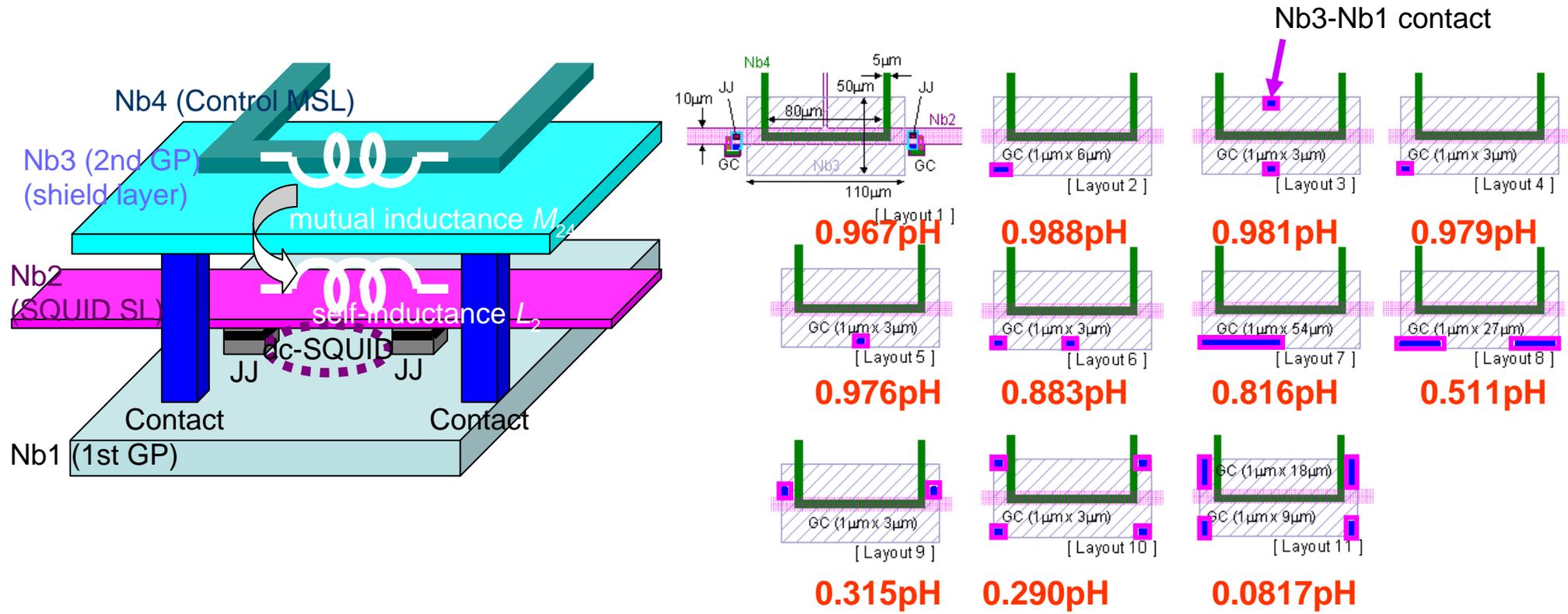


(a) 第1段セルの I_{sq} - V 特性



(b) 16段全体での I_{sq} - V 特性

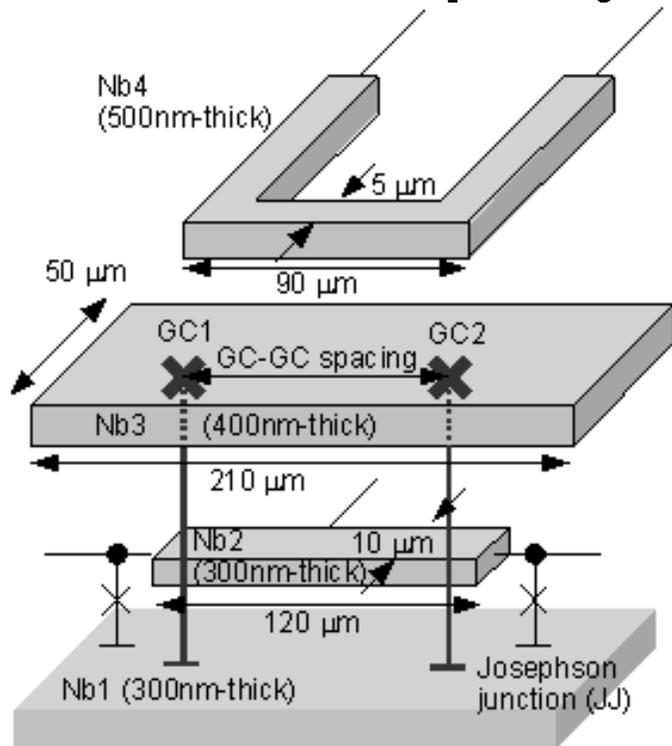
超伝導多層集積回路内の 超伝導ストリップラインのパラメータ評価



レイアウトとコンタクト配置の上面図

- Nb3層とNb1層に挟まれたNb2ラインと、Nb3層上のNb4ラインとの間の相互インダクタンスが、Nb3層とNb1層のコンタクトの配置や面積で変化することを確認した。

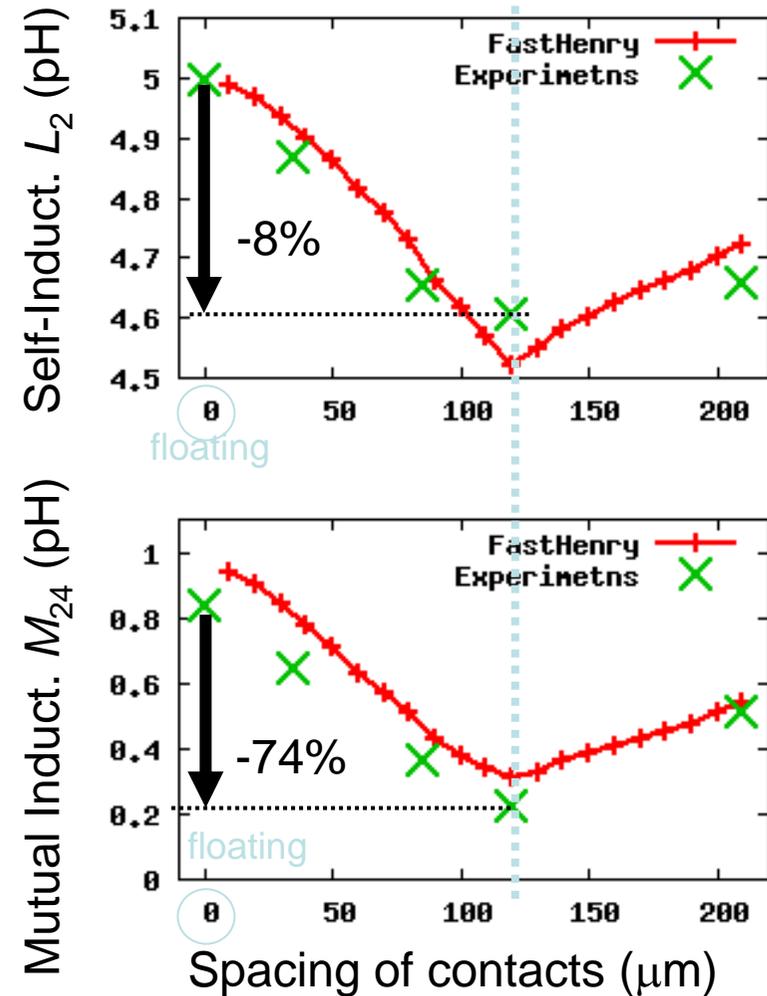
Nb3層とNb1層のコンタクト点間距離と インダクタンス値の関係



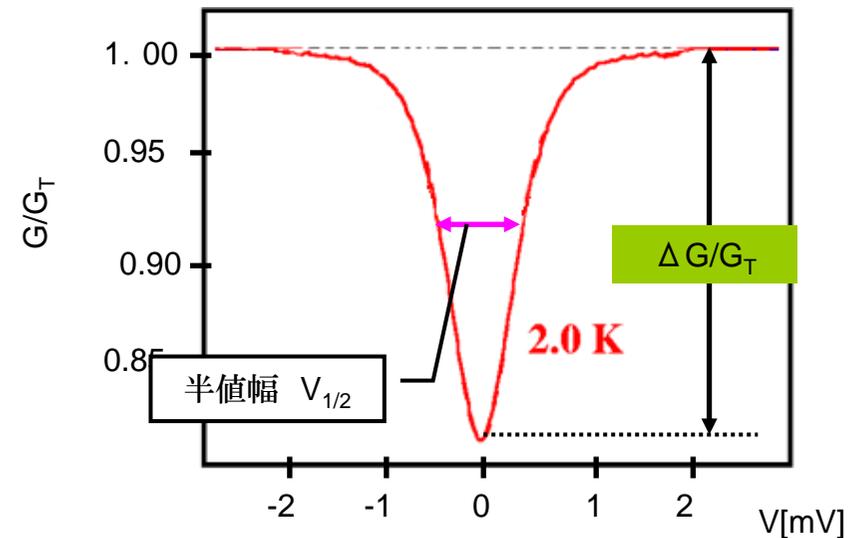
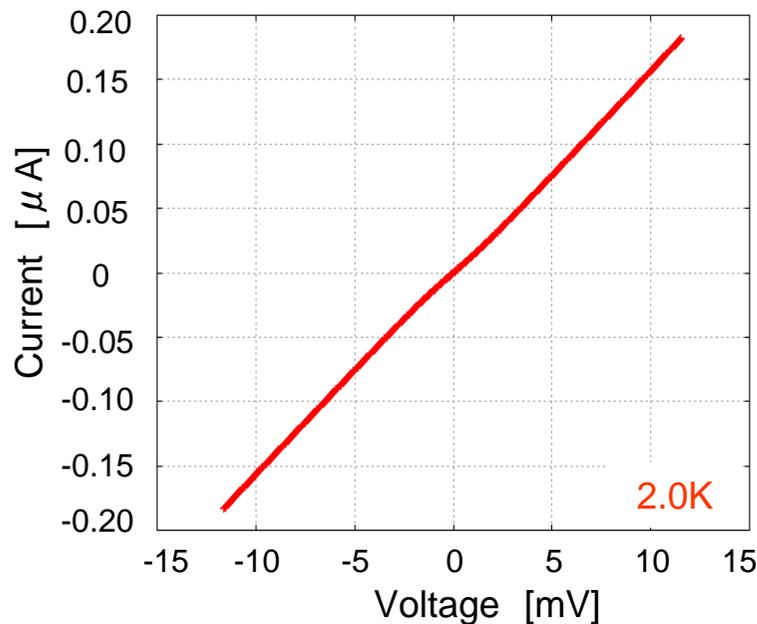
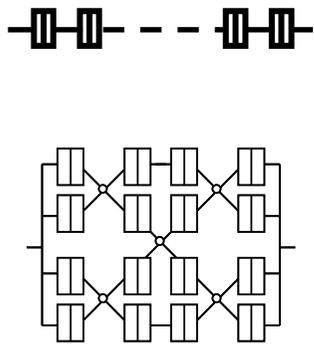
GC-GC spacing:
35, 85, 120, 210 μm
+ floating Nb3 layer (0 μm)

- ストリップラインと平行方向に配置された2つのコンタクト点間の距離の変化により、インダクタンスが変わることを確認した。

Nb2 stripline length (120 μm)
(JJ-to-JJ spacing)



Coulomb Blockade Thermometry (CBT) における自己発熱の影響の評価

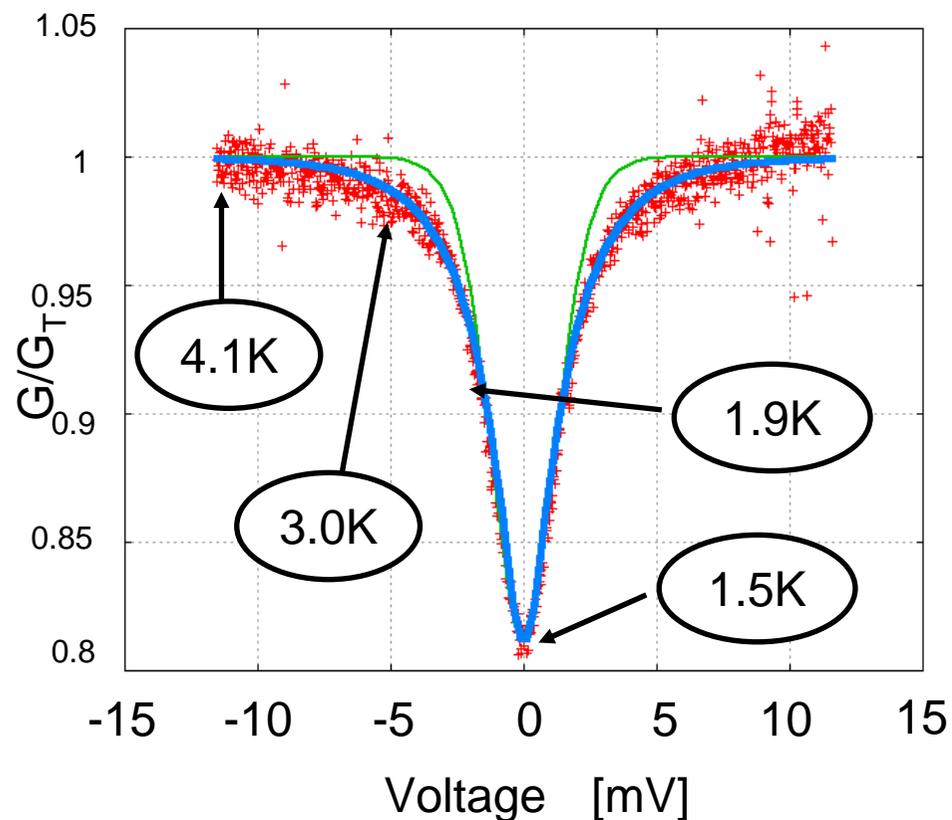


$$eV_{1/2} = 5.439Nk_B T$$

- 微小トンネル接合アレイの微分コンダクタンス—電圧特性のディップの半値幅を利用して温度計測 (CBT) が可能である。

— ただし、微小トンネル接合での電力消費が温度上昇を招く。

CBTにおける自己発熱の見積もり



- + 実験から求めたGV特性 $T_0=1.51$ [K]
- 電子温度は考慮していないGV特性
- 電子温度 T_e を考慮したGV特性

- 下記の発生電力 P と格子温度 T_{ph} ・電子温度 T_e の関係を仮定することで、実験値をよく説明できることを明らかにした。

$$P = \Omega \Sigma (T_e^5 - T_{ph}^5)$$

Ω : 島電極の体積

Σ : 格子-電子結合パラメータ