

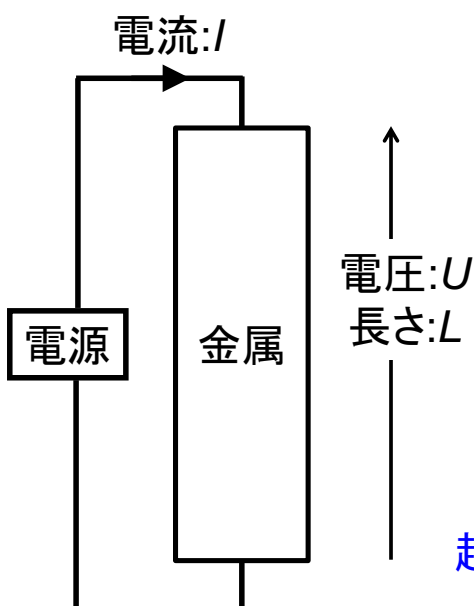
超伝導デバイスと それを用いたDA変換器の設計

-群馬大学アナログ集積回路研究会-
群馬大学大学院 理工学府
(平成29年5月19日)

国立研究開発法人 産業技術総合研究所
中西正和

超伝導現象とはなにか

- 電気抵抗=0ならば...



電界: E $E = \frac{U}{L}$

電子: 電荷 e , 質量 m

電子の受ける力: $F = eE$

電子の速度: $V(t)$

$$m \frac{dV(t)}{dt} = F = eE$$

$$V(t) = \frac{eE}{m} t \quad \text{速度が時間比例!}$$

超伝導現象は単純な電気抵抗=0ではない!!

超伝導現象とはなにか

- 2個の電子が格子振動を介して結合
 - Cooper pair $(k, \uparrow) + (-k, \downarrow)$: 準粒子 (スピン=0)
 - Bose粒子

Bose-Einstein凝縮

→ 同一波動関数 $\psi(r)$: 巨視的

$$\alpha\psi + \frac{\hbar}{2mi} \left(\frac{\partial}{\partial x} - i \frac{2e}{\hbar} A \right)^2 \psi = 0$$

$|\psi(x)|^2 \propto n(x)$: 超伝導電子密度に比例

$$J = \frac{2e}{m} \left(\psi^* \frac{\hbar}{i} \left(\frac{\partial}{\partial x} - i \frac{2e}{\hbar} A \right) \psi \right)$$

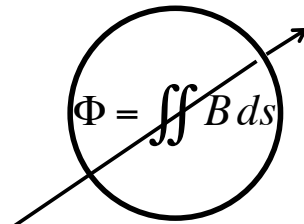
位相: ベクトルポテンシャルAを含む

超伝導デバイスの特徴

- 巨視的量子状態
 - 低消費電力
 - 応答が速い/高速
 - 高感度&高精度: **精密計測&標準応用**
 - 超伝導現象の例: 超伝導ループ → 鎖交磁束が量子化

$$\frac{2e}{\hbar} \oint A dx = \frac{2e}{\hbar} \Phi = 2n\pi$$

$$\oint A dx = \iint \nabla \times A ds = \iint B ds = \Phi$$



$$\Phi = \iint B ds = n \frac{\hbar}{2e} = n\Phi_0 \quad \text{超伝導ループ鎖交磁束が量子化}$$

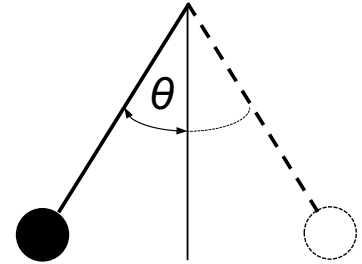
($\Phi_0 = \hbar/2e$: 磁束量子)

超伝導デバイス

- Josephson junction (JJ、ジョセフソン接合素子):
 - ex. superconducting tunnel junction (超伝導トンネル素子)
superconductor / insulation layer / superconductor

$\psi_1 = \psi_1 e^{i\varphi_1}$	superconductor1	φ_1 : 超伝導体1の位相
insulation layer		
$\psi_2 = \psi_2 e^{i\varphi_2}$	superconductor2	φ_2 : 超伝導体2の位相

$\theta = \varphi_1 - \varphi_2$: 位相差



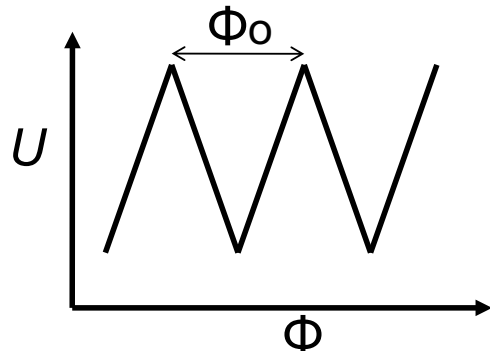
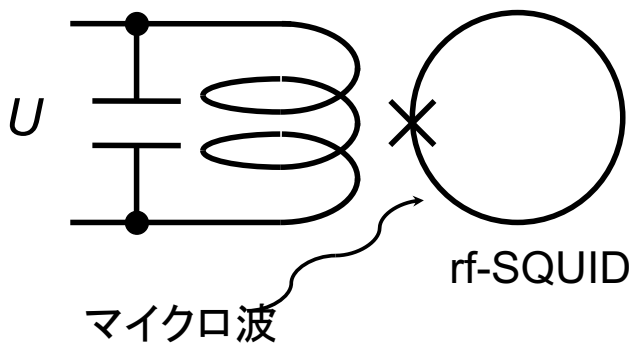
振り子モデル

JJを流れる電流: $I \propto \sin\theta$
(dcジョセフソン効果)

JJを含む超伝導ループ $\Phi = \left(n - \frac{\vartheta}{2\pi} \right) \Phi_0$
 →鎖交磁束Φは連続値:
 →特性は周期的、周期: 磁束量子Φ₀

超伝導量子干渉素子(superconducting quantum interference device: SQUID)

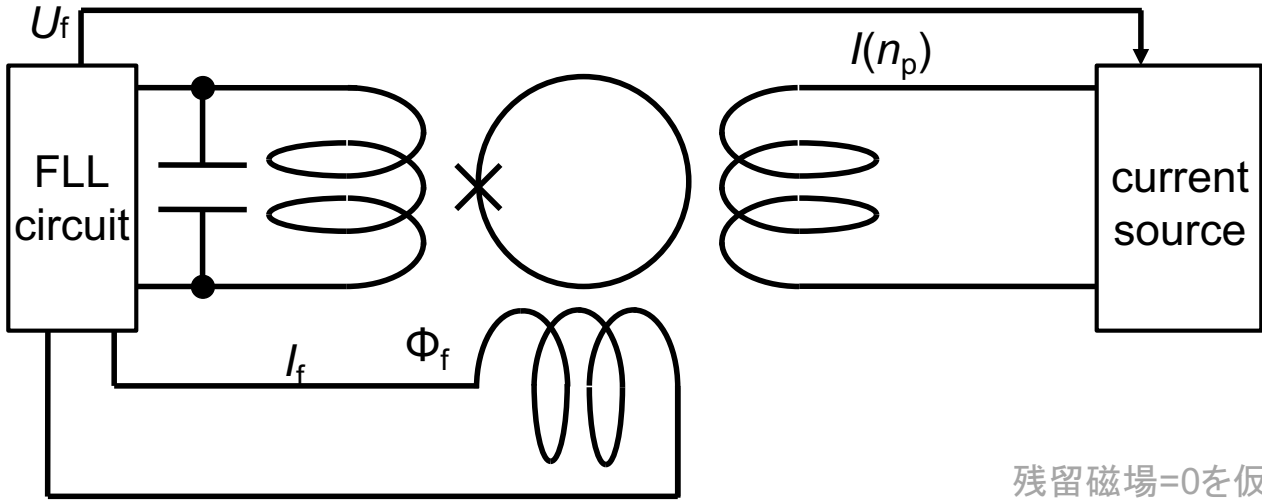
- Josephson接合素子を含む超伝導ループ(SQUID loop)
 - Josephson接合素子1個: rf-SQUID
 - Josephson接合素子2個: dc-SQUID
- SQUID特性はループ鎖交磁束(Φ)に対し周期的
 - 周期: Φ₀ (=h/2e, 磁束量子)



Flux Locked Loop operation (FLL)

- Peak detection & locking
 - $\Phi = \Phi_e - \Phi_f = n_p \Phi_o \rightarrow U_f \propto \Phi_f = \Phi_e - n_p \Phi_o = M_p I(n_p) - n_p \Phi_o$
- $U_f = 0$ となるように $I(n_p)$ を制御
 - $U_f \propto \Phi_f = 0 \rightarrow M_p I(n_p) = n_p \Phi_o \rightarrow I(n_p) \propto n_p$: 電流出力型DA変換器

SQUIDの量子効果を利用→DA出力は原理的に線形

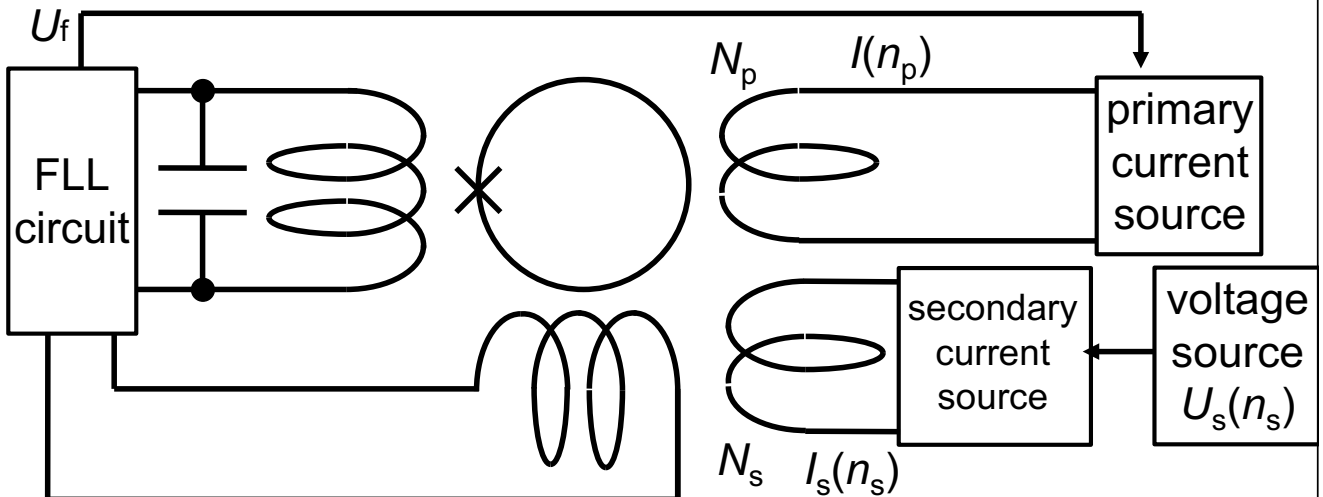


残留磁場=0を仮定

Flux Locked Loop operation (FLL)

- Peak detection & locking
 - $\Phi = \Phi_e - \Phi_f = n_p \Phi_o \rightarrow V_f \propto \Phi_f = \Phi_e - n_p \Phi_o = M_p I(n_p) - n_p \Phi_o$
- secondary current source: $I_s(n_s)$ を流す→ビット数増加(+11bit)

$I_s(n_s)$ の誘導磁束 $M_s I_s(n_s) = n_s \Phi_o / 2048 \rightarrow I(n_p; n_s) = (n_p - n_s / 2048) \Phi_o / M_p$
 必要条件: $M_p(N_p) / M_s(N_s) = 2048 \rightarrow$ 相互インダクタンスがコイル巻数に比例

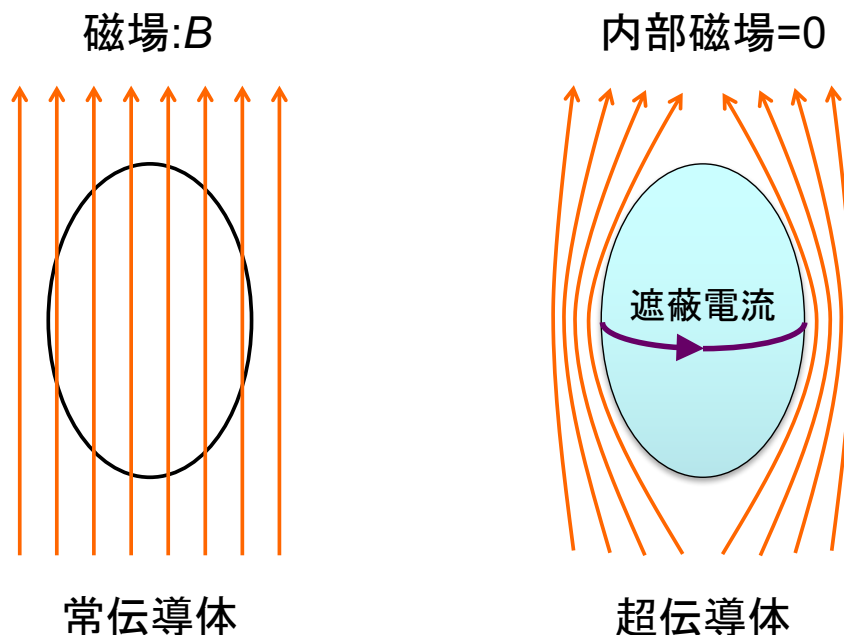


結論

- SQUIDの鎖交磁束に対する周期性を利用した電流出力型DA変換器(SQUID DA)の特徴
 - 原理的に線形性 (SQUIDの量子効果を利用)
- 市販のrf-SQUID (Quantum Design, model: 2000)を用い24-bit SQUID DA作製 (2,800,000)
 - 最大電流出力: 約±1.4mA → 3420 Φ_0 相当 (SQUIDの周期性)
 - 最小制御電流: 約100pA → 0.2m Φ_0 相当
 - 電流揺らぎ: 約100pA → 0.2m Φ_0 相当 (SQUIDの自己雑音)
- ビット数を増すには.....
 - 低雑音dc-SQUID: 約1 $\mu\Phi_0$ →約0.5pA 32-bit SQUID DA
- ただし、応答は遅い

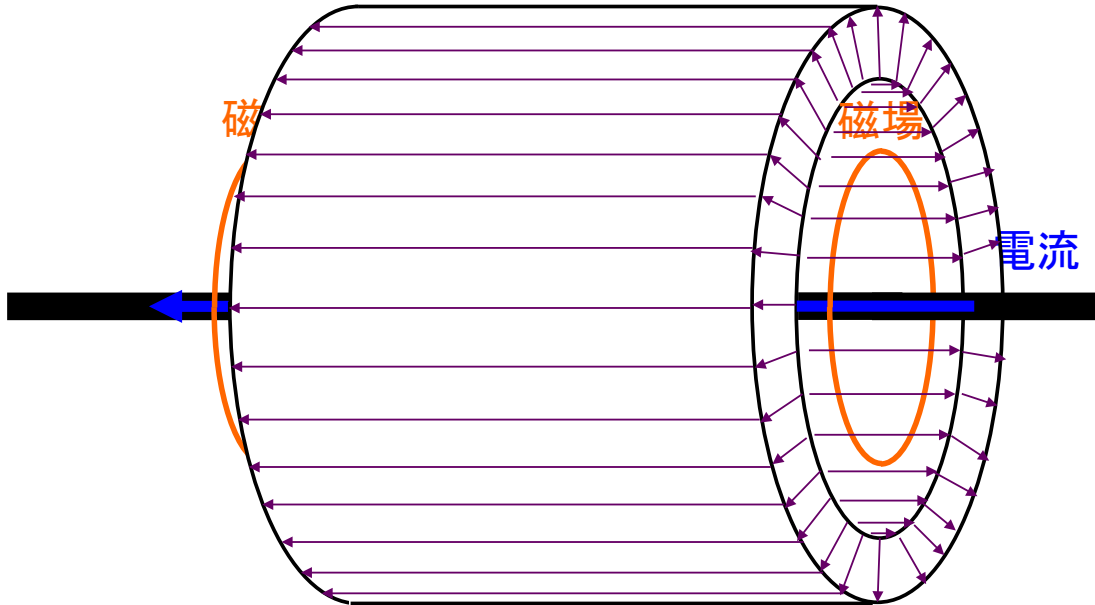
Meissner効果 : 超伝導体内部磁場=0

- Meissner効果→超伝導体表面を遮蔽電流が流れる



CCC (Cryogenic Current Comparator)

- Meissner効果→超伝導体表面を遮蔽電流が流れる
(遮蔽電流合計の大きさ)=(リード線を流れる電流の大きさ)



外表面遮蔽電流分布:リード線位置に依らず一定

CCC (Cryogenic Current Comparator)利用

- 筒状の超伝導体(superconducting sheath)表面に遮蔽電流
- 遮蔽電流はNIに比例

