

第16回ミリ波サブミリ波受信機ワークショップ
2016年3月8日, 電通大

超伝導A/D変換器の基礎

前澤 正明

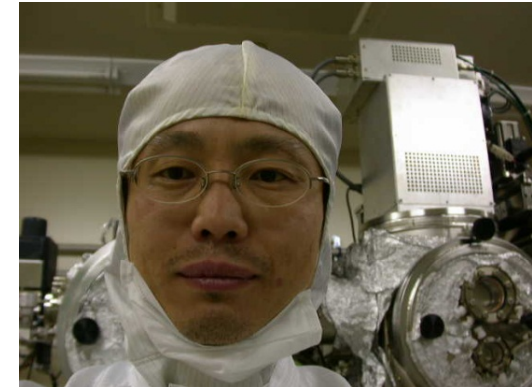
産業技術総合研究所

概要

1. はじめに
2. 超伝導A/D変換器の概要
動作原理、設計、性能見積もり
3. 過去の実験
比較器、SQUIDアンプ

自己紹介

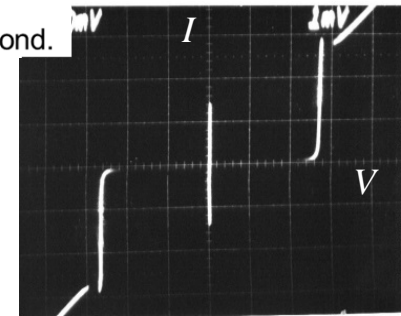
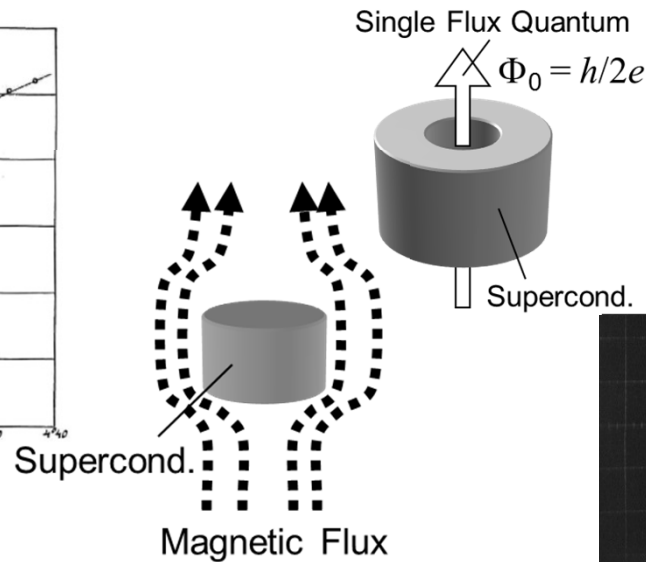
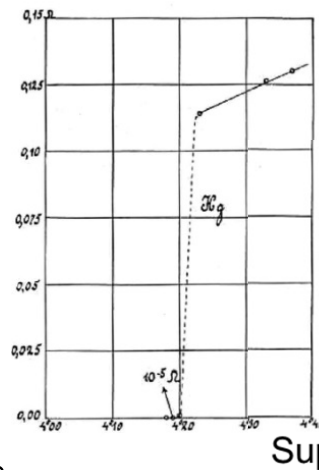
- 氏名：前澤 正明
- 所属：産業技術総合研究所
ナノエレクトロニクス研究部門
- 専門分野：超伝導エレクトロニクス、電子工学
- 研究してきたこと
 - ✓ 超伝導エレクトロニクス：ジョセフソン接合、RSFQ、SQUIDなど
 - ✓ 金属系超伝導デバイス・回路の設計、作製、評価
- 電波天文との関わり
十年以上前に(魔がさして)手を出すがあえなく敗退



超伝導エレクトロニクス

超伝導現象

- ゼロ抵抗
- 完全反磁性
- 磁束量子化
- ジョセフソン効果
- エネルギーギャップ



固有機能

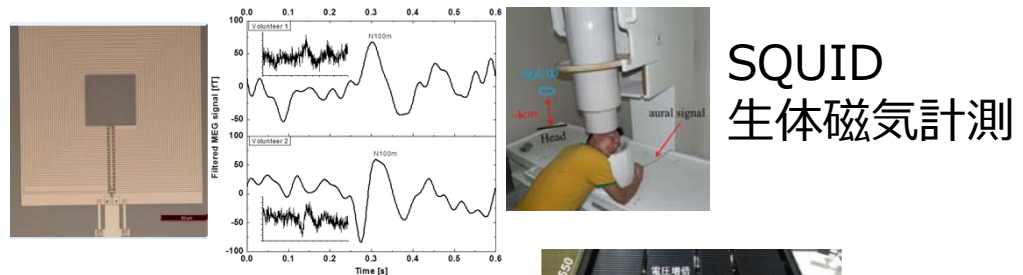
- 量子信号検出 $\varepsilon \sim h\nu$
- 量子化電圧発生 $V = \Phi_0 f$
- デジタルスイッチ $\tau \sim \Phi_0 / Vg$

特長

- 低雑音、高感度
- 低消費電力
- 高精度
- 高速、広帯域

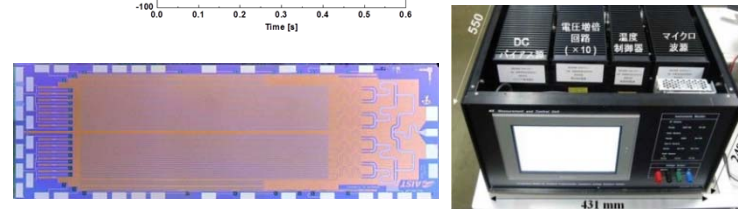
応用例

- センサ、検出器
「DCからX線まで」



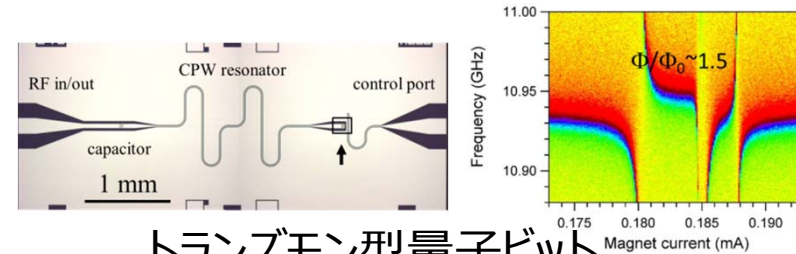
SQUID
生体磁気計測

- 電圧標準
国家一次標準



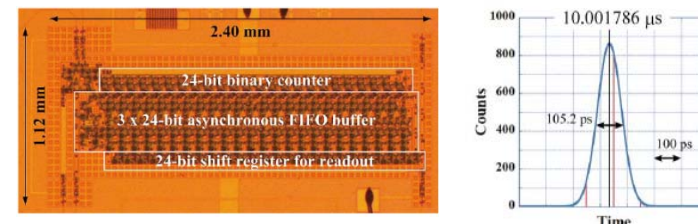
プログラマブル電圧標準システム

- 量子情報処理
最も有望な固体量子ビット



トランズモン型量子ビット

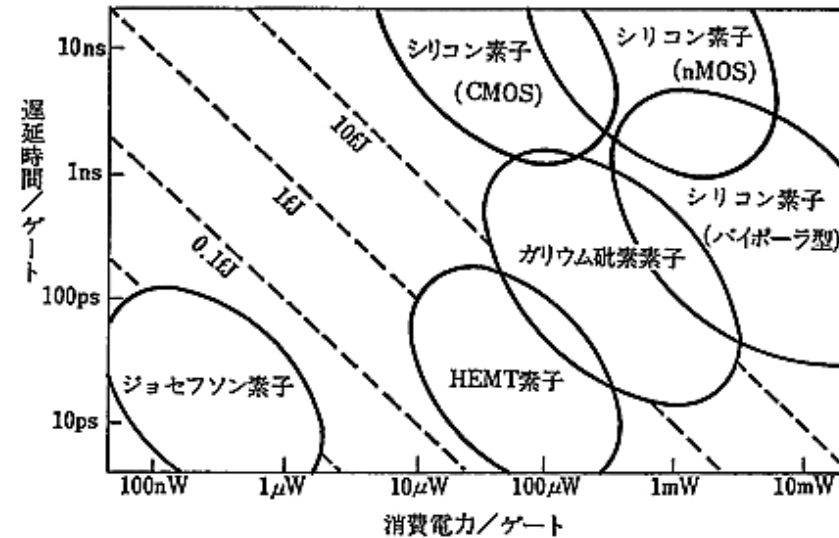
- デジタル信号処理
高性能検出器の信号処理



TOF質量分析用T/D変換器

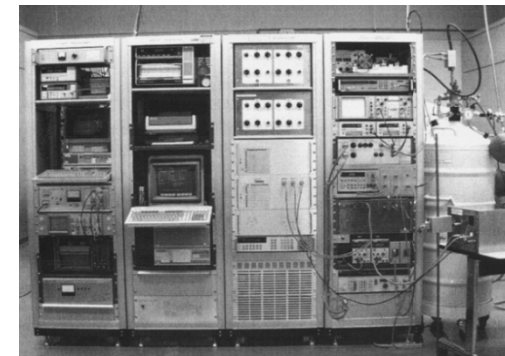
電波天文との薄い関わり 1/4

- 1993年電総研入所
超伝導大規模デジタル応用
「超伝導は速い」
「半導体で1GHzは不可能」
- 1994年 DECアルファチップ
300 MHz = 0.3 GHz
→超伝導はすでに遅くなり始めていた
- 当時実用化されていた超伝導デバイス
SQUID、SISミキサ、電圧標準



「昭和57年版科学技術白書」より

電総研の10V電圧標準

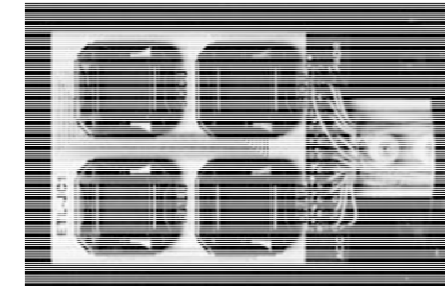


電波天文との薄い関わり 2/4

- 超伝導デジタル回路に未来は？
 - ✓ 優位性を失った速度、貧弱な集積度、極低温冷却
 - ✓ デジタル応用：機能はブール演算、数×速度の勝負
- 超伝導固有の機能を最大限に活用
 - 低雑音、高感度、(一応)高速、広帯域、低消費電力、磁束量子化、・・・
 - ~~低温でしか動作しない~~「低温で動作できる」
- 高性能低温センサ・検出器
 - その読出し回路：A/D変換器
 - その信号処理：デジタル信号処理(DSP)

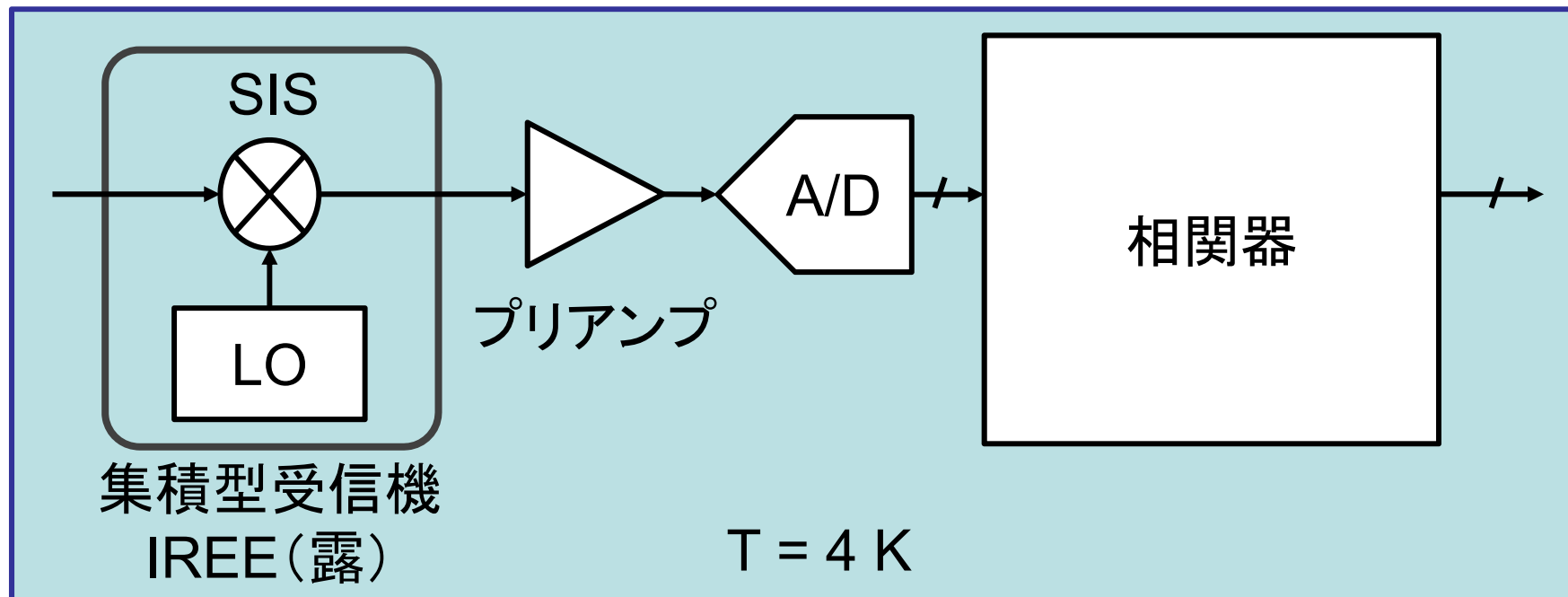
ETL-JC1

「世界初の超伝導コンピュータ」



電波天文との薄い関わり 3/4

- 電波天文：SISミキサは必需品
→冷却装置はすでにある！
- 全超伝導受信機システム

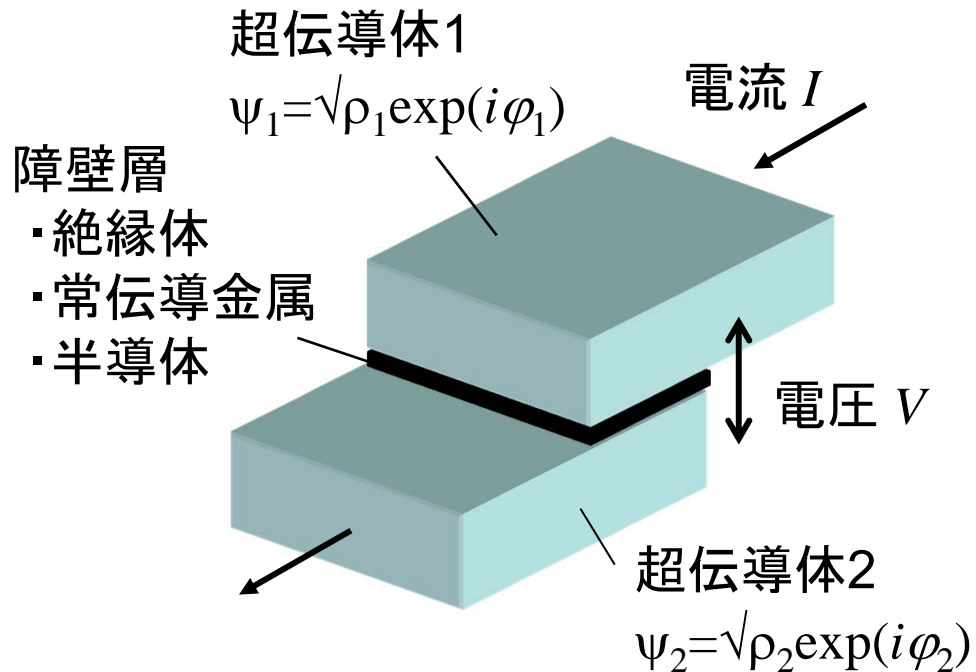


電波天文との薄い関わり 4/4

- 魔がさした出来心の顛末
 - ✓ 相関器
「手始めに2ビット1000ラグは欲しい」
→ 当時の作製技術ではほぼ不可能：不戦敗
 - ✓ A/D変換器
小金をもらって始めるも予想以上に難しい：甘かった見通し
→ そのうちプロジェクト終了
 - ✓ プリアンプ
SQUIDアンプをロシアIREEと共同研究（ポストク滞在）
→ 低雑音ではあるもののゲイン・帯域の厚い壁

2. 超伝導A/D変換器の概要

ジョセフソン効果



$$I = I_c \sin \phi$$

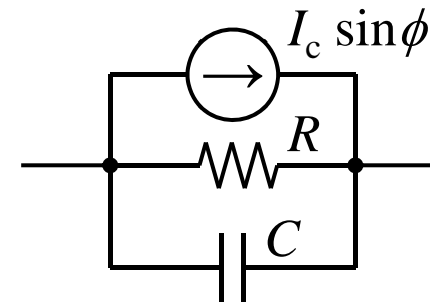
$$V = (\Phi_0/2\pi) d\phi/dt$$

$$\phi = \phi_2 - \phi_1$$

$$\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} \text{ [Wb]}$$

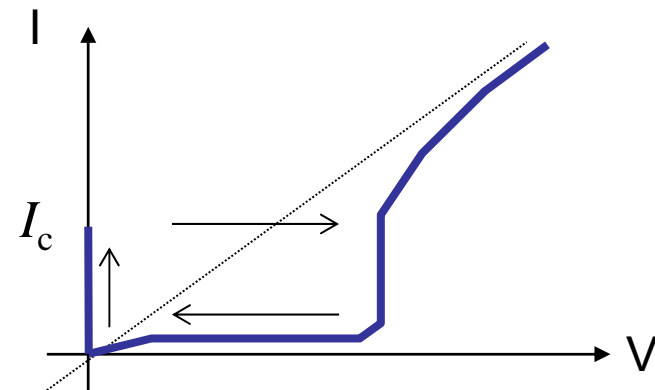
位相差 ϕ : 時間微分が電圧に比例
→ マクロな磁束に対応する量

等価回路 (RSJモデル)



$$\beta_c = 2\pi I_c R^2 C / \Phi_0$$

絶縁体障壁の場合 ($\beta_c \gg 1$)



ジョセフソン接合の動特性

$$I = i_J + i_C + i_R$$

$$= I_C \sin \phi + C \frac{dV}{dt} + \frac{1}{R} V$$

$$= I_C \sin \phi + \frac{2\pi C}{\Phi_0} \frac{d^2 \phi}{dt^2} + \frac{2\pi}{\Phi_0 R} \frac{d\phi}{dt}$$

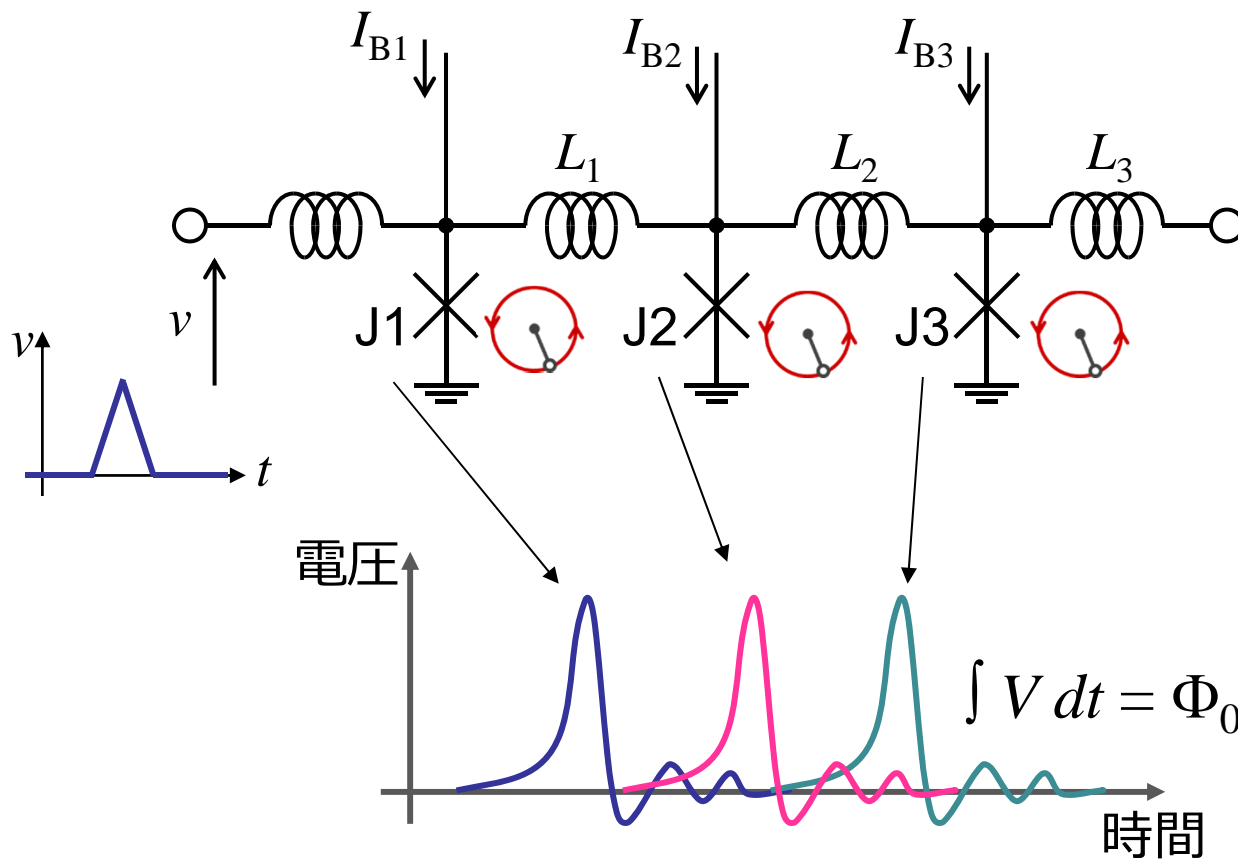
$V = (\Phi_0/2\pi) d\phi/dt$

$$T = mgl \sin \theta + ml \frac{d^2 \theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt}$$

振り子が一回転

磁束量子SFQの伝播

ジョセフソン伝送線路 (JTL)



$$I_{c1} = I_{c2} = I_{c3} = I_c$$

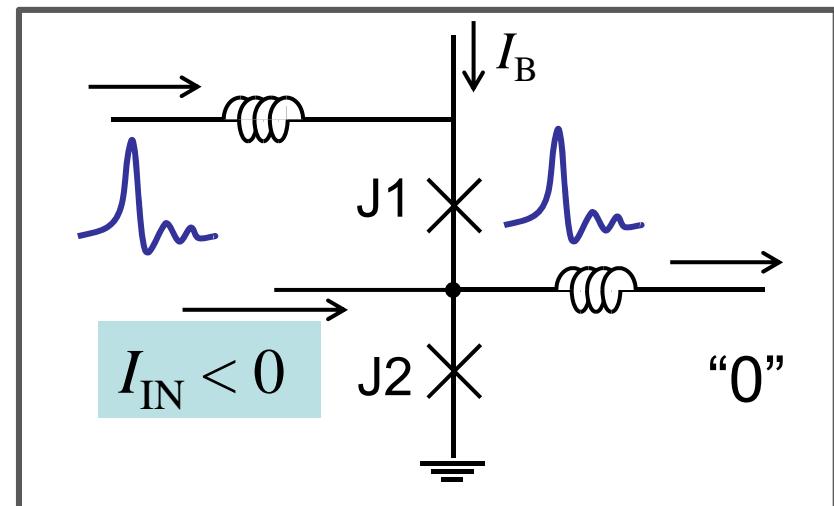
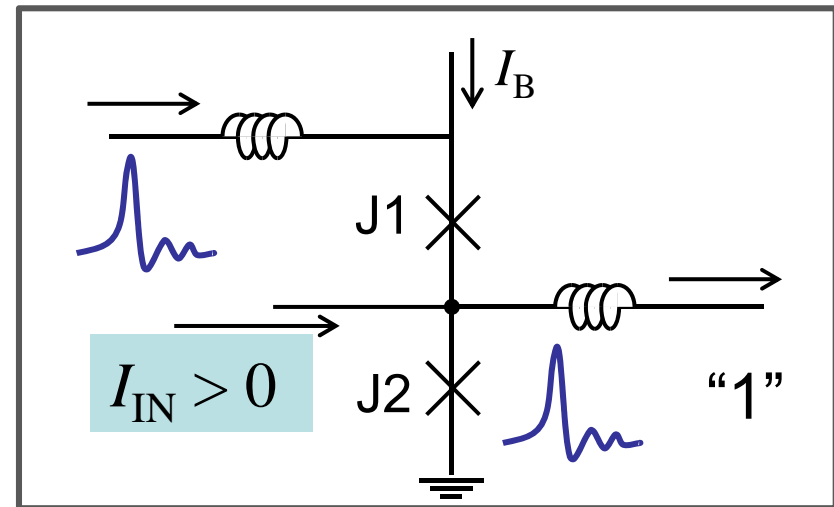
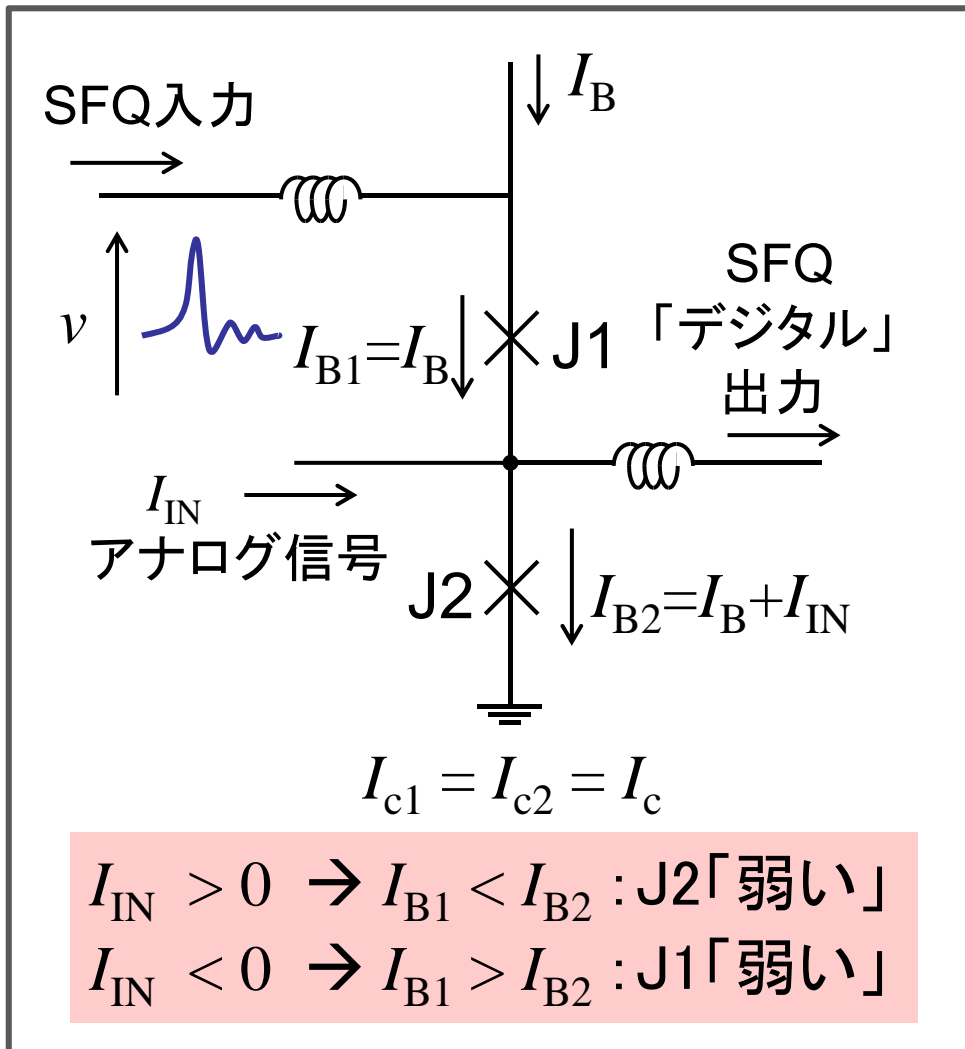
$$I_{B1} = I_{B2} = I_{B3} = I_B$$

$$L_1 = L_2 = L_3 = L$$

$$LI_c \sim 0.5\Phi_0$$

$$I_c/I_B \sim 0.7$$

磁束量子比較器



超伝導A/D変換器

- 基本動作原理

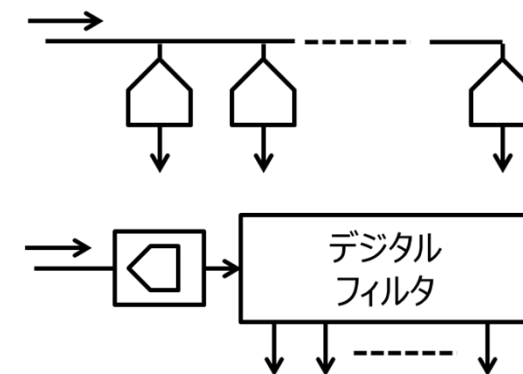
入力信号で二つのジョセフソン接合のパラメータ制御
→クック信号で読出し

- 特長

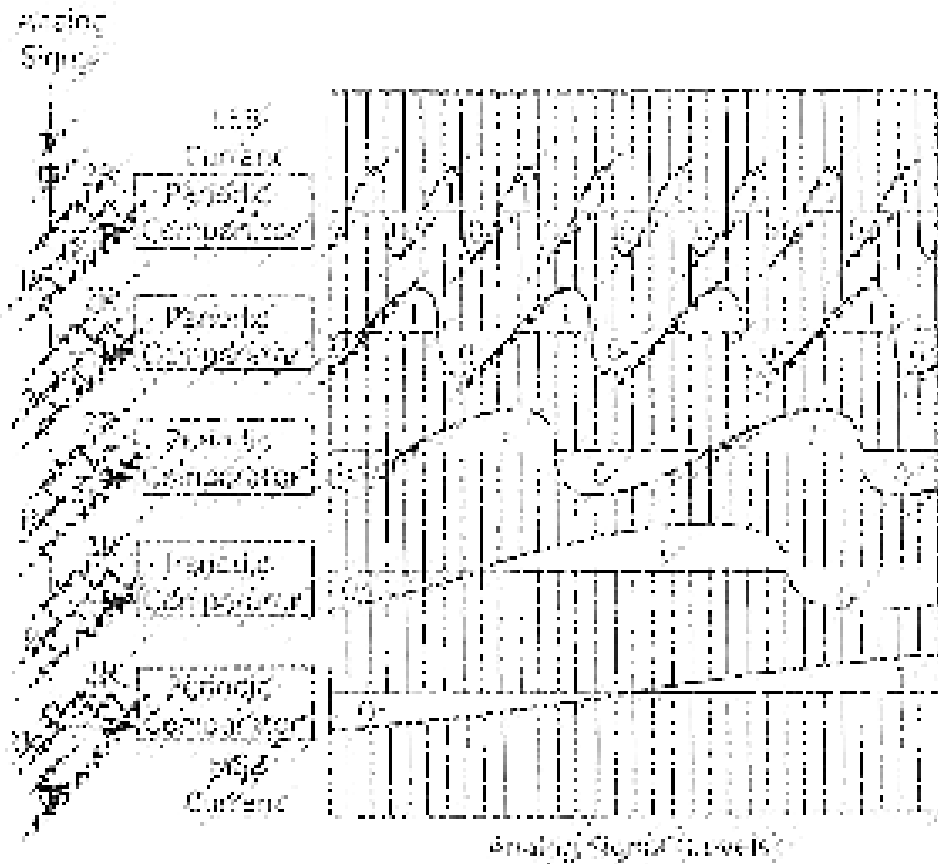
低雑音、広帯域、低消費電力、**低温動作**

- 方式

- ✓ 並列フラッシュ型：広帯域
- ✓ オーバーサンプリング型：高精度



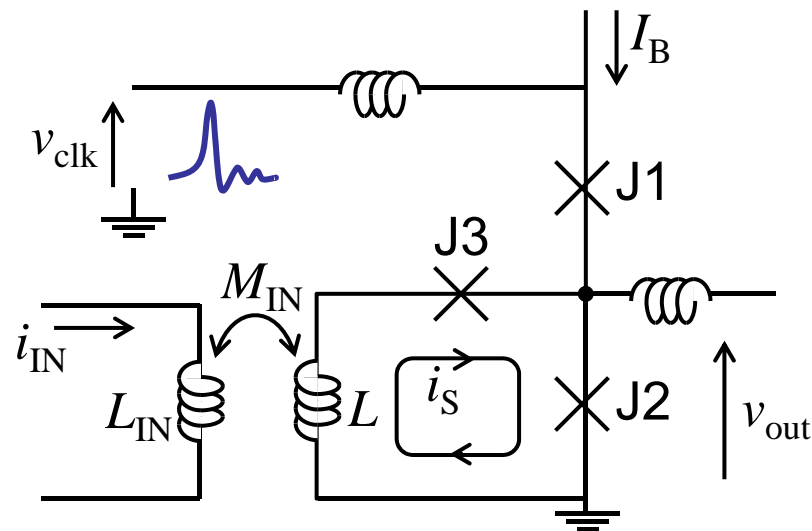
超伝導フラッシュA/D変換器



- R-2Rラダー
各ビット比較器に信号分配
分配比： $1/2, 1/4, \dots, 1/2^N$
- 超伝導比較器の周期性
→比較器N個でNビット実現
*半導体回路では (2^N-1) 個
- グレイコード出力

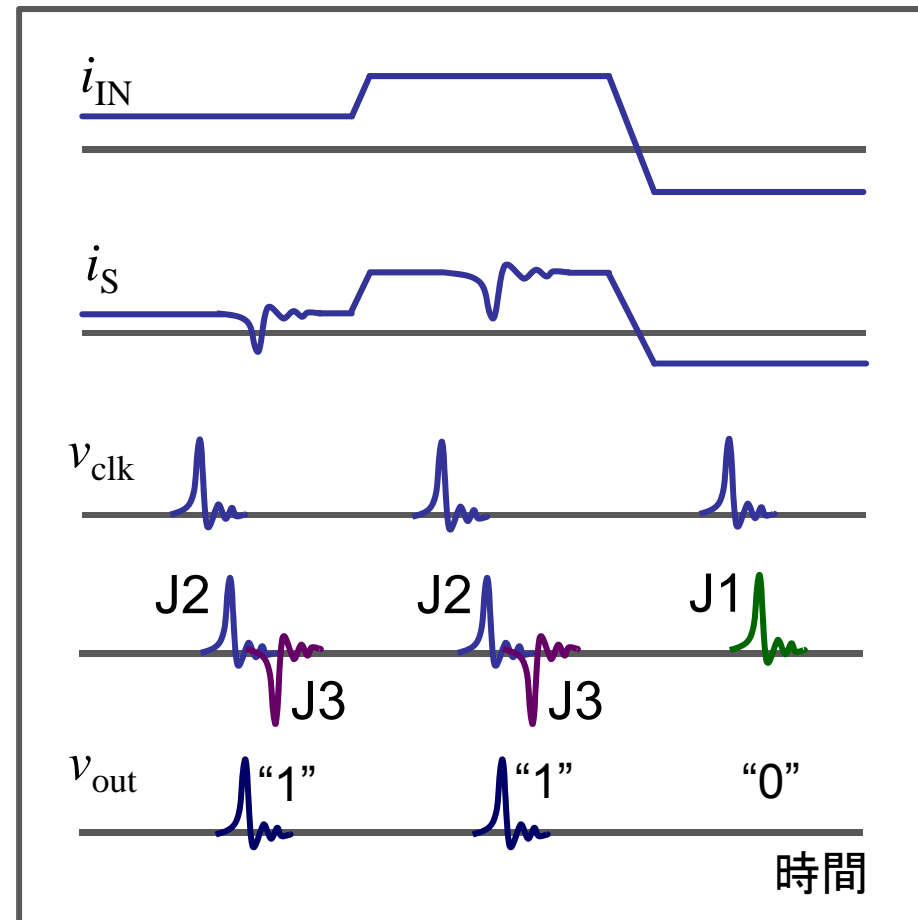
超伝導フラッシュA/D用比較器 1

高速単一磁束量子 (RSFQ) 型



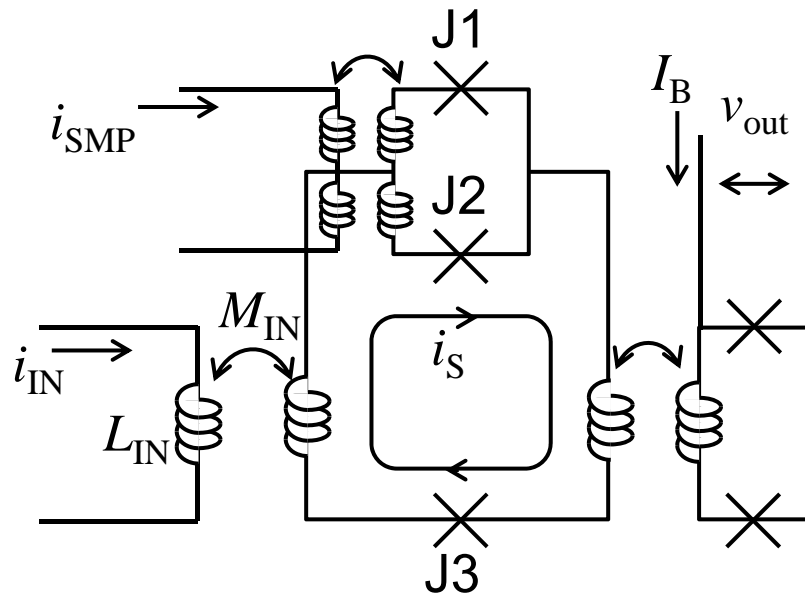
遮蔽電流 i_s : J1とJ2のバイアスに差
 → SFQクロックパルス : J1かJ2を励起

- ・簡単な構造・動作、広帯域
- ・感度？



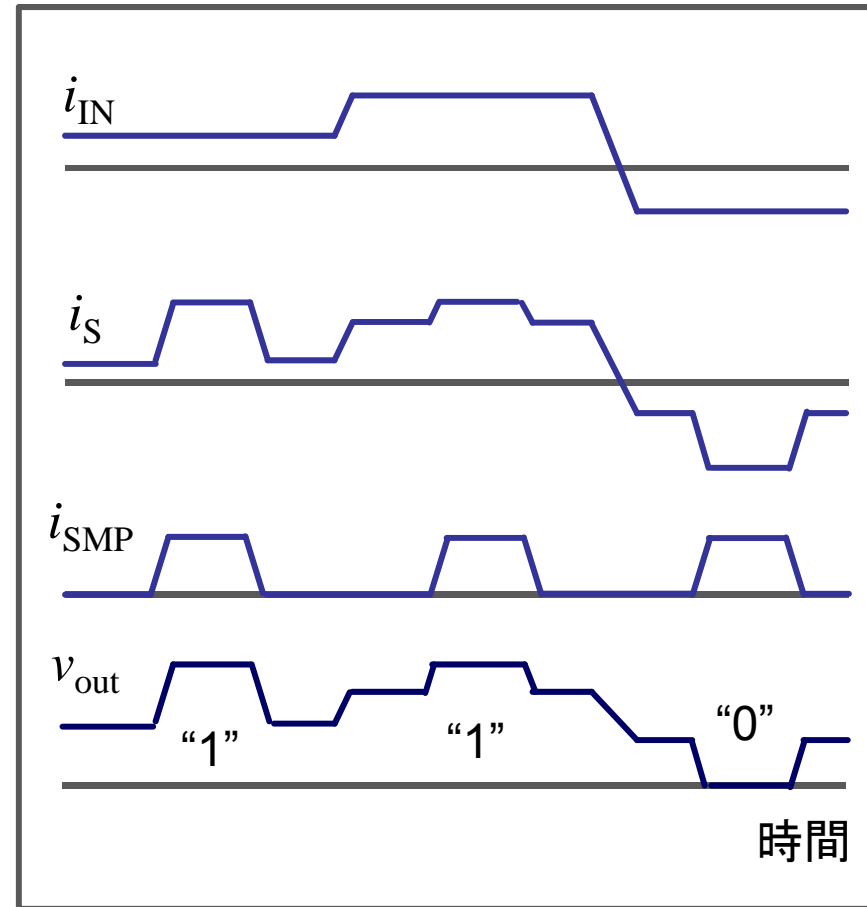
超伝導フラッシュA/D用比較器 2

磁束量子パラメトロン (QFP) 型

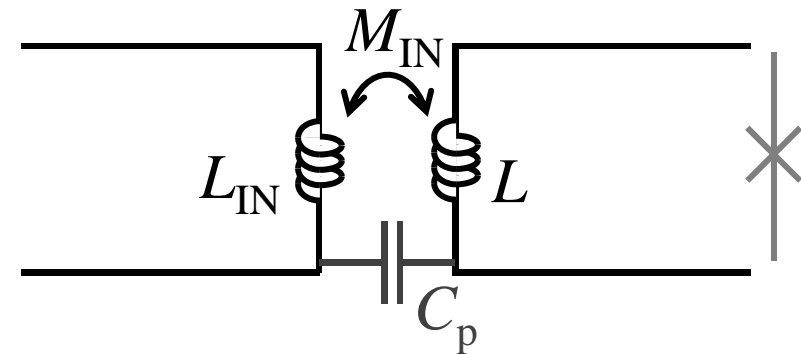
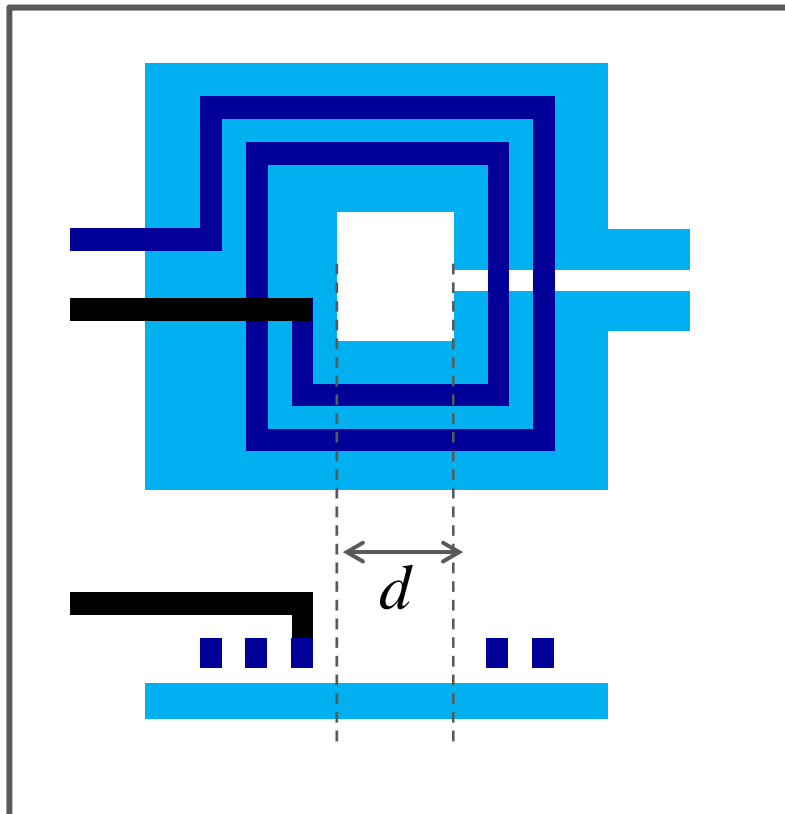


サンプル電流 i_{SMP} が遮蔽電流 i_S を「ラッチ」
 → 出力SQUIDの電圧変化

- 高感度、低消費電力
- 複雑な構造・動作、帯域？



入力回路：磁束トランス



$$L = 1.25\mu_0 d$$

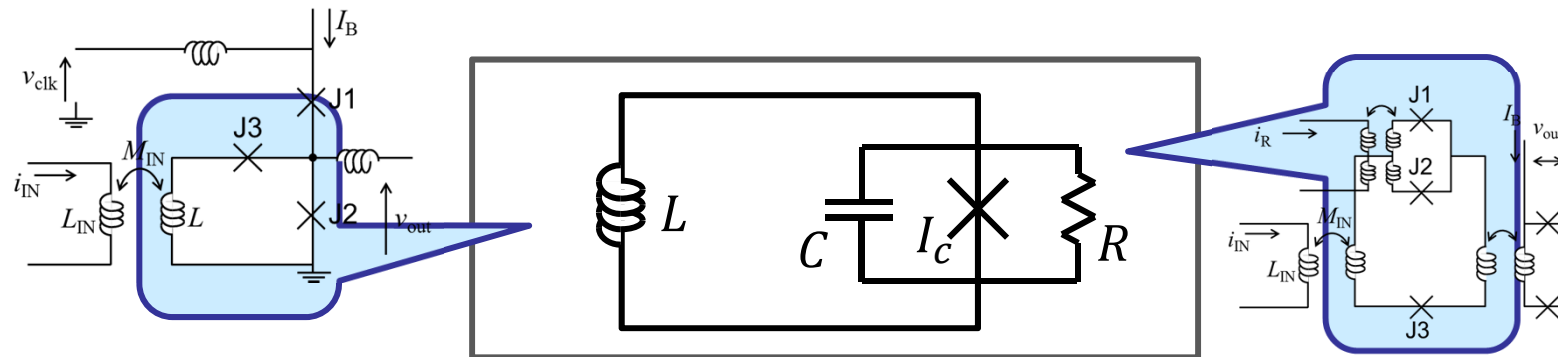
$$L_{IN} = n_{IN}^2 L + L_{strp} \sim n_{IN}^2 L$$

$$M_{IN} = n_{IN} L$$

- 薄膜積層、平面構造
- 電流「ゲイン」～巻線数 n_{IN}
- 入力インピーダンス@低周波

$$Z_{IN} = j\omega L_{IN} = j\omega n_{IN}^2 L$$
- 寄生容量 C_p → 共振@高周波

設計の基礎



- モデル：比較器主ループ → 1接合SQUID、RSJモデル

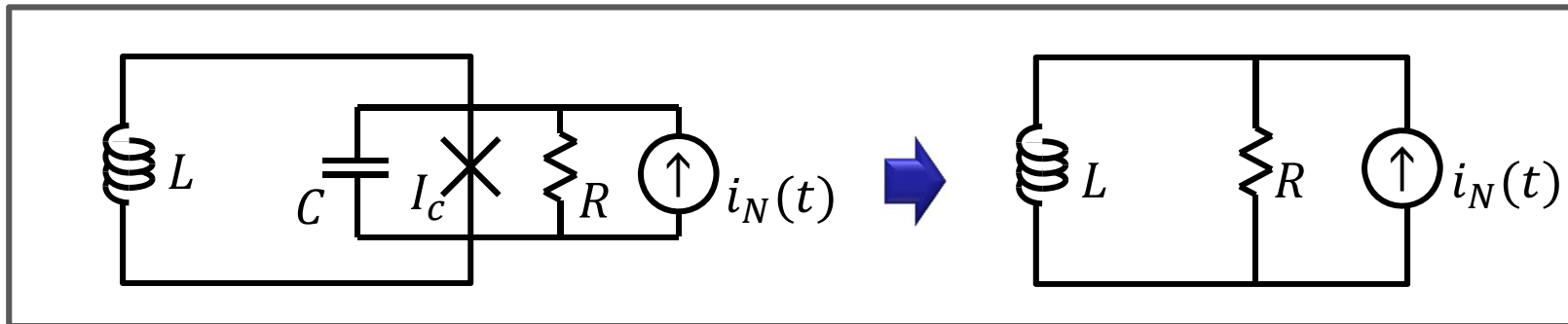
- パラメータの制限

(1) 臨界電流 I_c : ジョセフソンエネルギー/熱雑音 $> \alpha \rightarrow I_c > \frac{2\pi kT}{\Phi_0} \alpha$

(2) インダクタンス L : 磁束を記憶しない (単一モード) $\rightarrow L < \frac{\Phi_0}{2\pi I_c}$

(3) ダンピング抵抗 R : 発振を生じない $\rightarrow R < \sqrt{\frac{\Phi_0}{2\pi I_c C}}$

熱雑音電流の影響



- ダンピング抵抗Rの熱雑音電流(実効値) $i_N = \sqrt{4kTB/R}$

ループをLR回路で近似 $B = \frac{1}{2\pi\tau_{LR}} = \frac{R}{2\pi L} \rightarrow i_N = \sqrt{\frac{2kT}{\pi L}}$

- 数値例 : $T = 4 \text{ K}$, $\frac{E_J}{kT} > \alpha = 100$

$$I_c > \frac{\Phi_0}{2\pi kT} \alpha = 17 \mu\text{A}, \quad L < \frac{\Phi_0}{2\pi I_c} < 20 \text{ pH} \rightarrow i_N > 1.3 \mu\text{A}$$

→比較器ループ電流 i_s 換算で $\sim 1\mu\text{A}@4\text{K}$ のグレーゾーン

入力感度、分解能

- 入力感度

SN比 α_{SN} が与えられたとして

$$i_{INO} = \frac{i_S}{\eta} > \frac{\alpha_{SN} i_N}{\eta}, \quad \eta \equiv i_S / i_{IN}: \text{電流変換係数}$$

- 分解能(ビット数)

入力信号レンジ i_{INpp} に対して $N < \log_2 \left(\eta \frac{i_{INpp}}{\alpha_{SN} i_N} \right)$

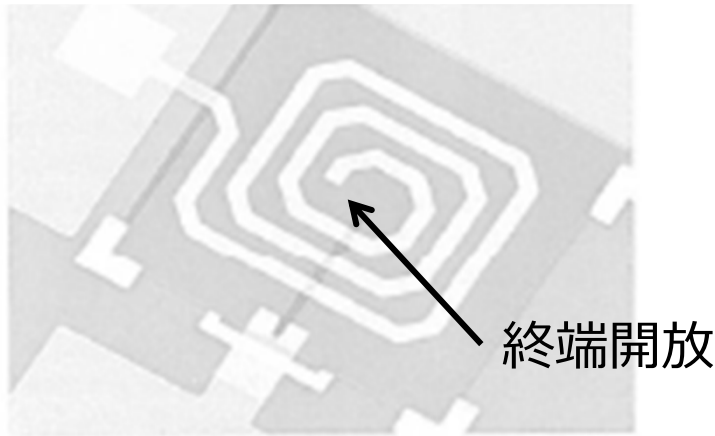
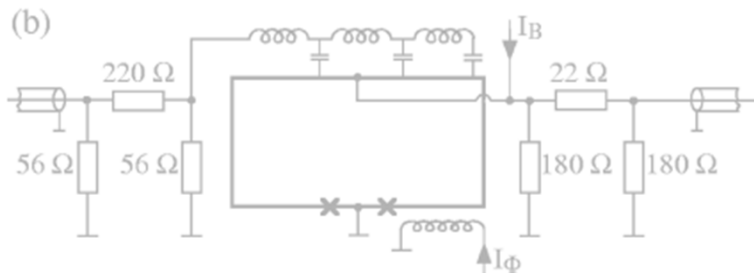
- 電流変換係数 η

どこまで大きくできるか？ → 入力回路に依存

- 低周波：トランス巻線数 n_{IN} に比例
- 高周波： ??? 【参考】GHz帯SQUIDアンプ

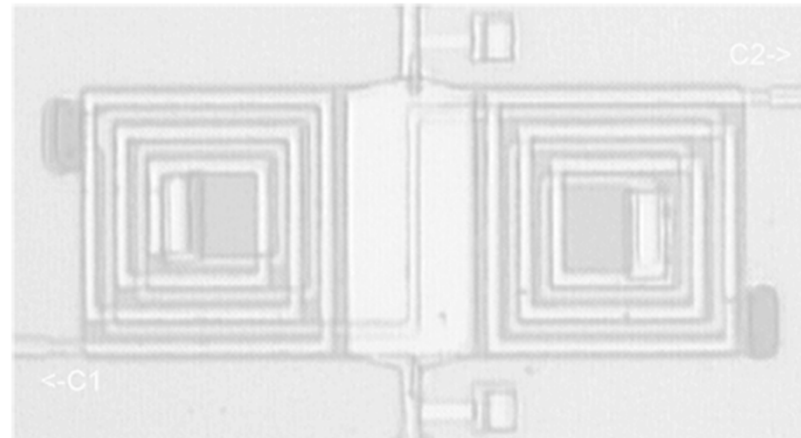
高周波入力回路：SQUIDアンプの例

共振マイクロストリップ結合
--分布定数設計--



M. Mück, J. Clarke (UCB)

共振トランス結合
--集中定数設計--



寄生容量削減
→コイルオーバーラップ排除

G. Prokopenko, S. Shitov (IREE)

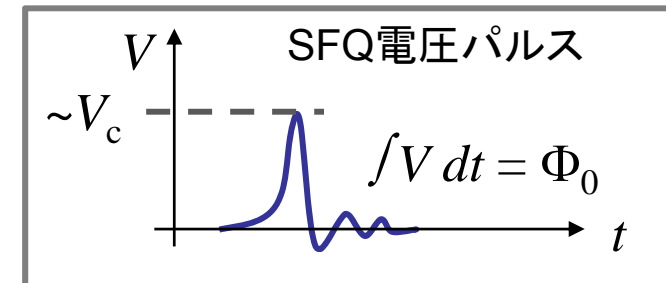
動作速度、帯域

- サンプルング(クロック)周波数

$$f_s \propto V_c = I_c R < \sqrt{\frac{\Phi_0 I_c}{2\pi C}} = \sqrt{\frac{\Phi_0 J_c}{2\pi C_s}}$$

例) 現在の標準的作製技術

$$J_c \sim \text{kA/cm}^2 \rightarrow f_s \sim 50 \text{ GHz}$$



- ジョセフソン接合「慣性」による閾値歪み
高周波($\sim 10\text{GHz}$)アナログ信号 \rightarrow 精度低下
 \rightarrow 対策: L低減、フィードバック機構、インターリーブ

3. 過去の実験

RSFQ型比較器、SQUIDアンプ

RSFQ型比較器

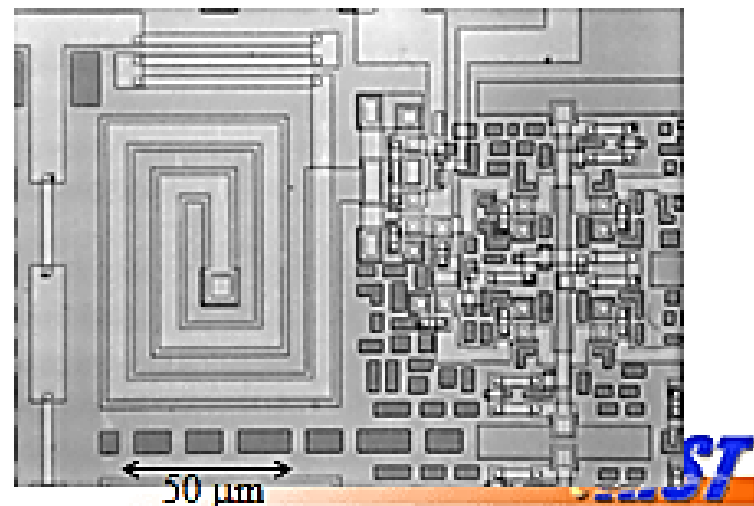
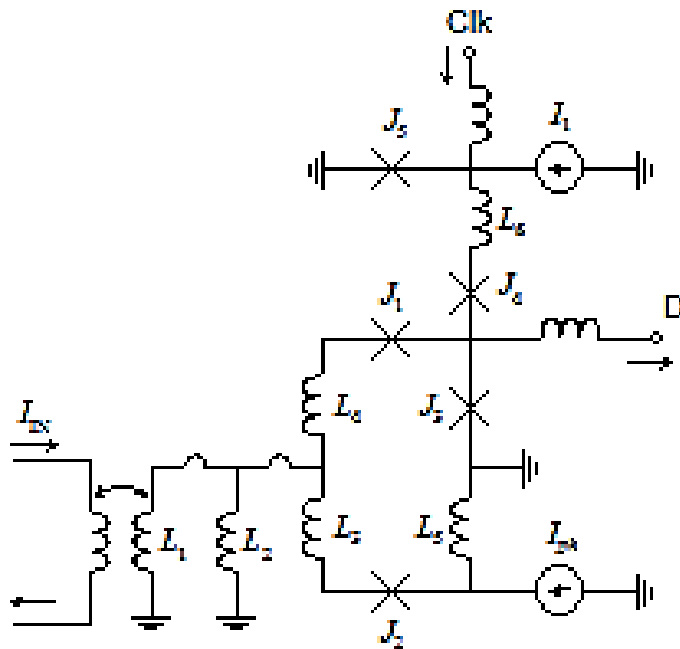


Comparator: Design

2-spoke SQUID wheel design

* S. Kaplan et al., *IEEE Trans. Appl. Supercond* 9
pp.3020-3025 (1999).

- Wide Bandwidth
- Simple Structure



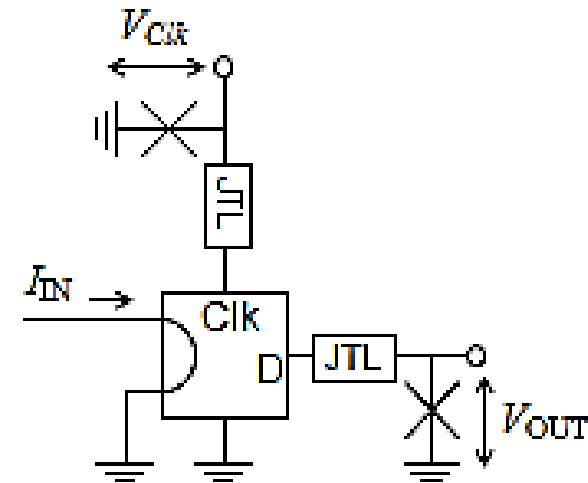
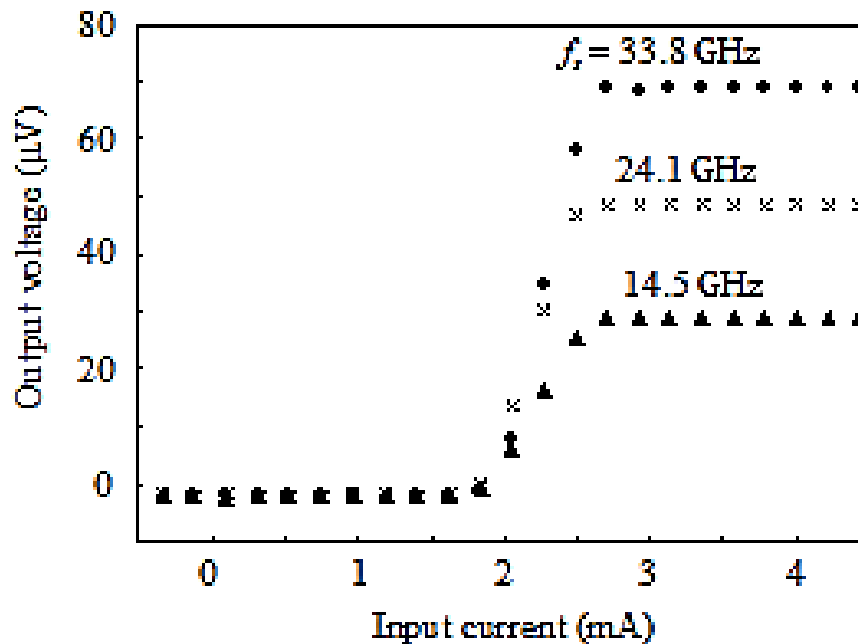
M. Maezawa et al., ISEC2001;
SUST vol. 14, p. 1106 (2001).

閾値特性の静的評価



Comparator: Results

Threshold Characteristics
by Average-Voltage Measurements



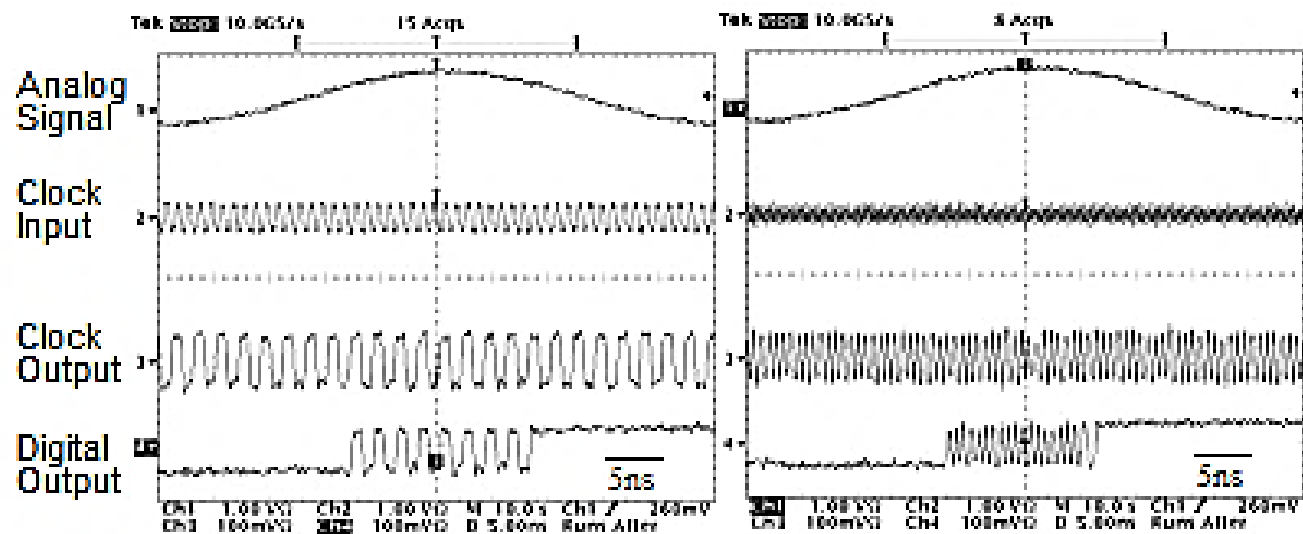
$$f_s = V_{CJk} / \Phi_0$$

M. Maezawa et al., ISEC2001;
SUST vol. 14, p. 1106 (2001).

比較器のGHz動作



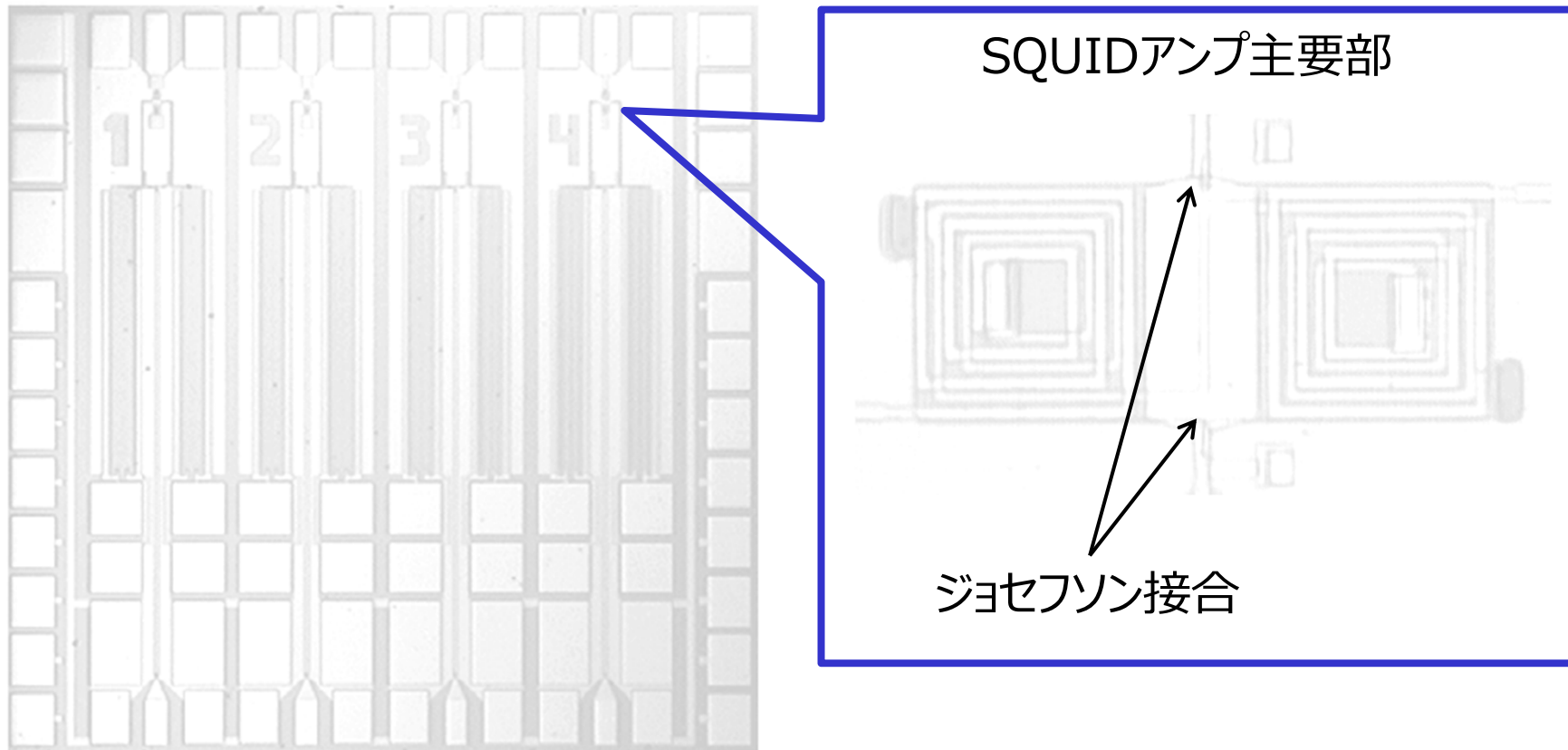
GHz Operation of Comparator



Signal : 20 MHz
Clock : 1 GHz

Signal : 20 MHz
Clock : 3 GHz

4-GHz SQUIDアンプ



G. Prokopenko et al., IEEE TAS, vol. 15, p. 741 (2005)

4-GHz SQUIDアンプの特性

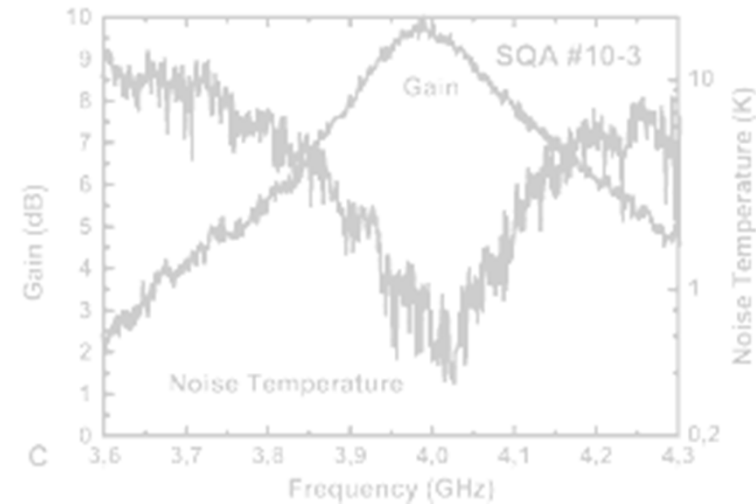
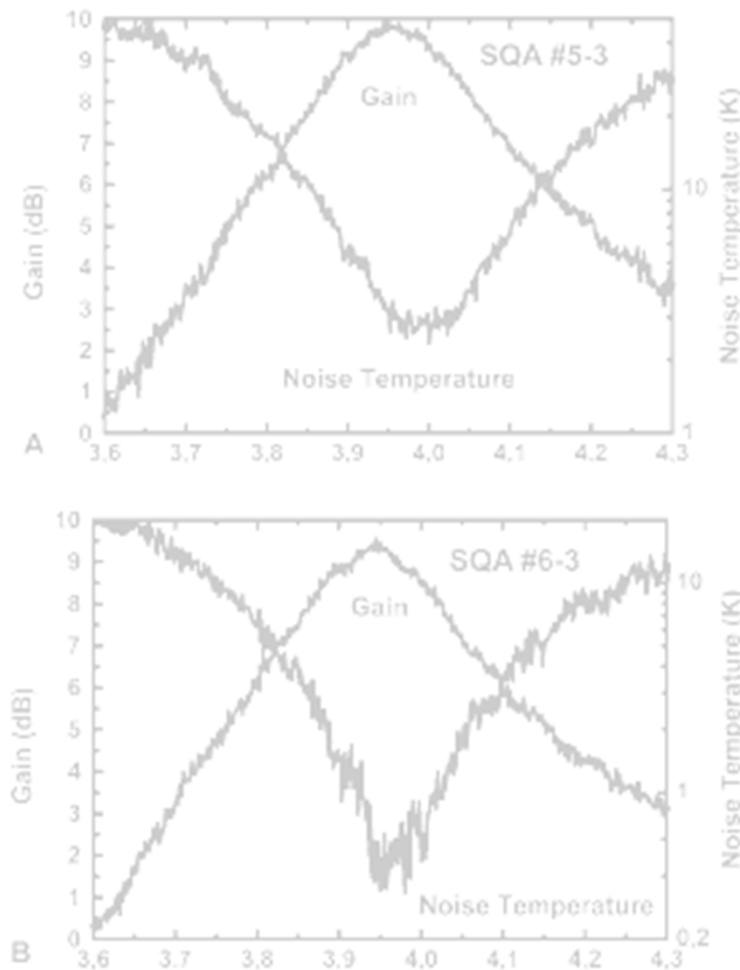


TABLE I
SQA PARAMETERS

Sample ID	Channel #	V_c (μ V)	I_c (μ A)	R_c (Ω)	Gain (dB)	Noise temperature (K)	BW (MHz)	Central frequency (GHz)
#5-3 "new" filter	3	$V_c = 407$	$I_c = 49$	$R_c = 8.3$	9.8 ± 1	2.5 ± 0.5	300	3.95
#6-3 "new" filter	3	$V_c = 285$	$I_c = 52$	$R_c = 8.9$	9.5 ± 1	$0.5 - 0.5 - 0.25$	300	3.95
#10-3 "old" filter	3	$V_c = 349$	$I_c = 49$	$R_c = 8.3$	9.7 ± 1	1.0 ± 0.5	250	4.0

G. Prokopenko et al., IEEE TAS, vol. 15, p. 741 (2005)

まとめ

- 超伝導エレクトロニクス of 電波天文応用
 - ✓ 低温検出器の「おまけ」
→抱き合わせ商法は成り立つか？
- 超伝導フラッシュ型A/D変換器
 - ✓ 動作原理、設計、性能
 - ✓ 過去の実験結果
RSFQ型比較器、SQUIDアンプ