

# 固体イメージセンサ

固体イメージセンサ = 撮像管の固体化, 超LSI技術

☆ 機能: 光電変換, 蓄積, 走査

走査: スイッチング または クロックパルスにより電荷転送  
(rf. 撮像管の場合には電子ビーム)

☆ 分類

受光部配列	光電変換	走査	デバイス
{ 1次元 }	{ pn接合 }	{ アドレス方式 }	{ MOS, CCD, CID }
{ 2次元 }	{ MOS容量 }	{ 信号転送方式 }	{ FTCCD, ILCCD }

☆ 用途

1次元: ファクシミリ, 図形・文字の読み取り

寸法・形状・厚み・位置などの測定, スペクトル測定

2次元: カラービデオカメラ用, 工業用ロボットの目,  
生産ラインなどの監視

# MOS形イメージセンサの画素構造

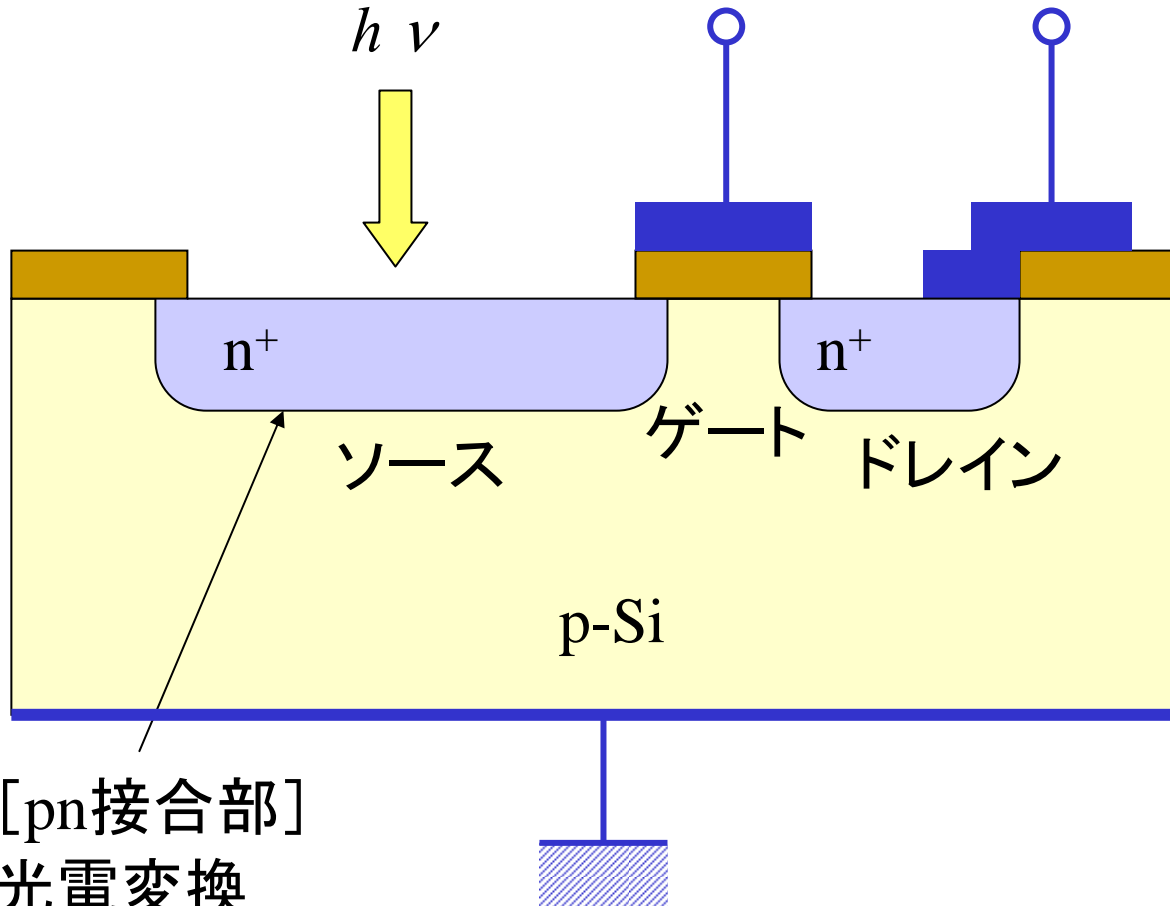
ホトダイオード

MOSFET

走査パルス

出力

$h\nu$



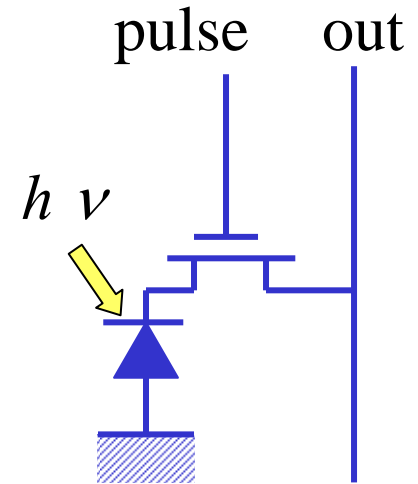
ソース

ゲート

ドレイン

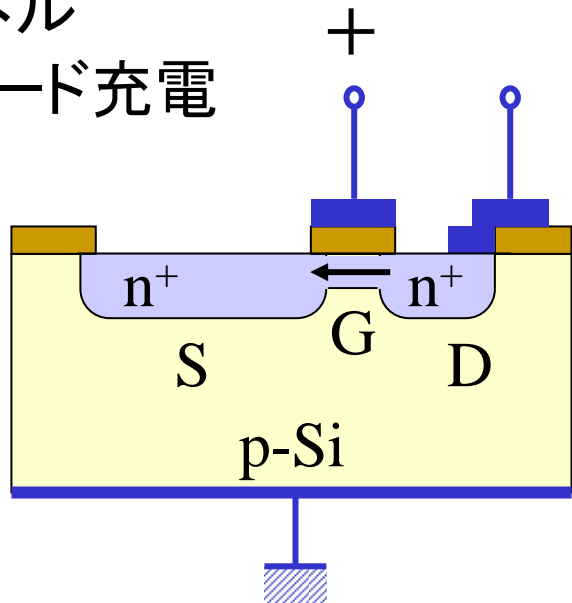
p-Si

[pn接合部]  
光電変換  
電荷蓄積部

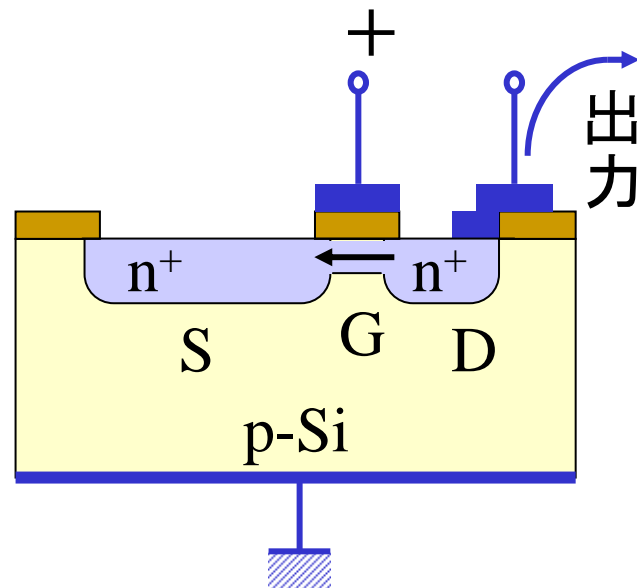


等価回路

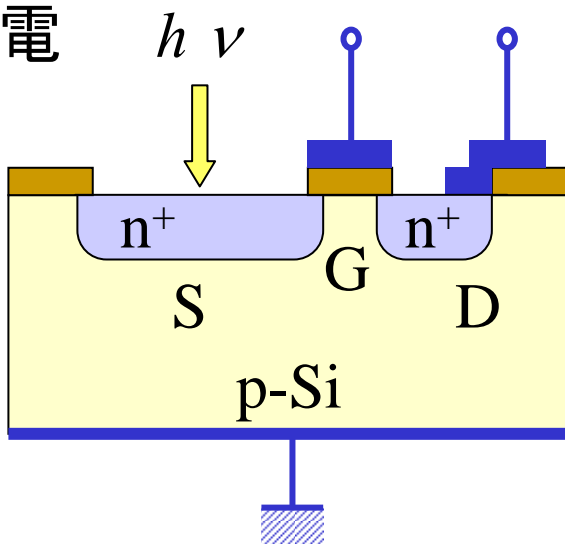
- (1) パルス電圧 = 正  
 → nチャネル  
 → ダイオード充電  
 ( $V_S = V_D$ )



- (3) (1)の過程  
 充電量 = (2)の放電量  
 = 信号

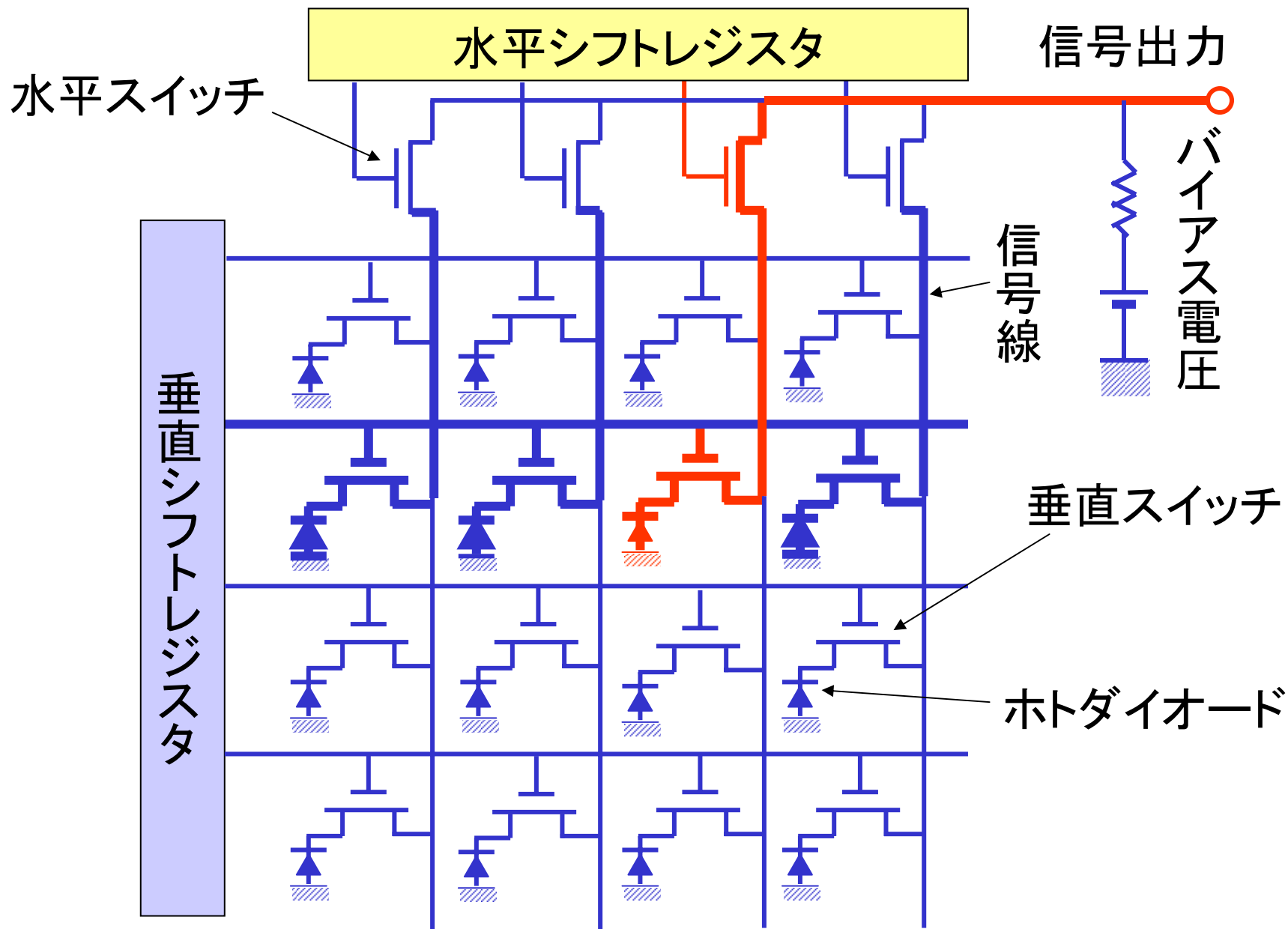


- (2) 光照射  
 → 放電

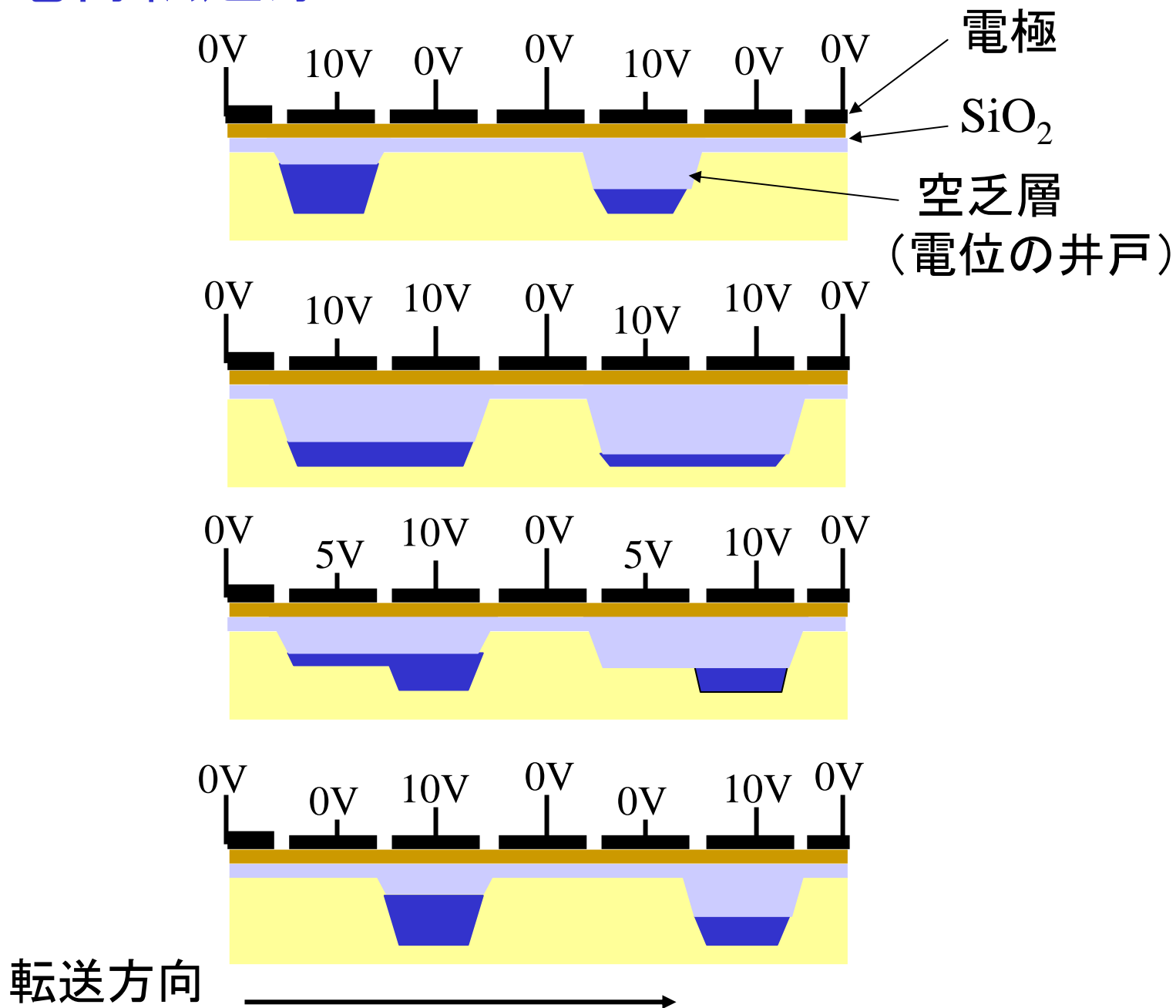


全放電電荷  
 = 入射光量 × ゲートオン時間

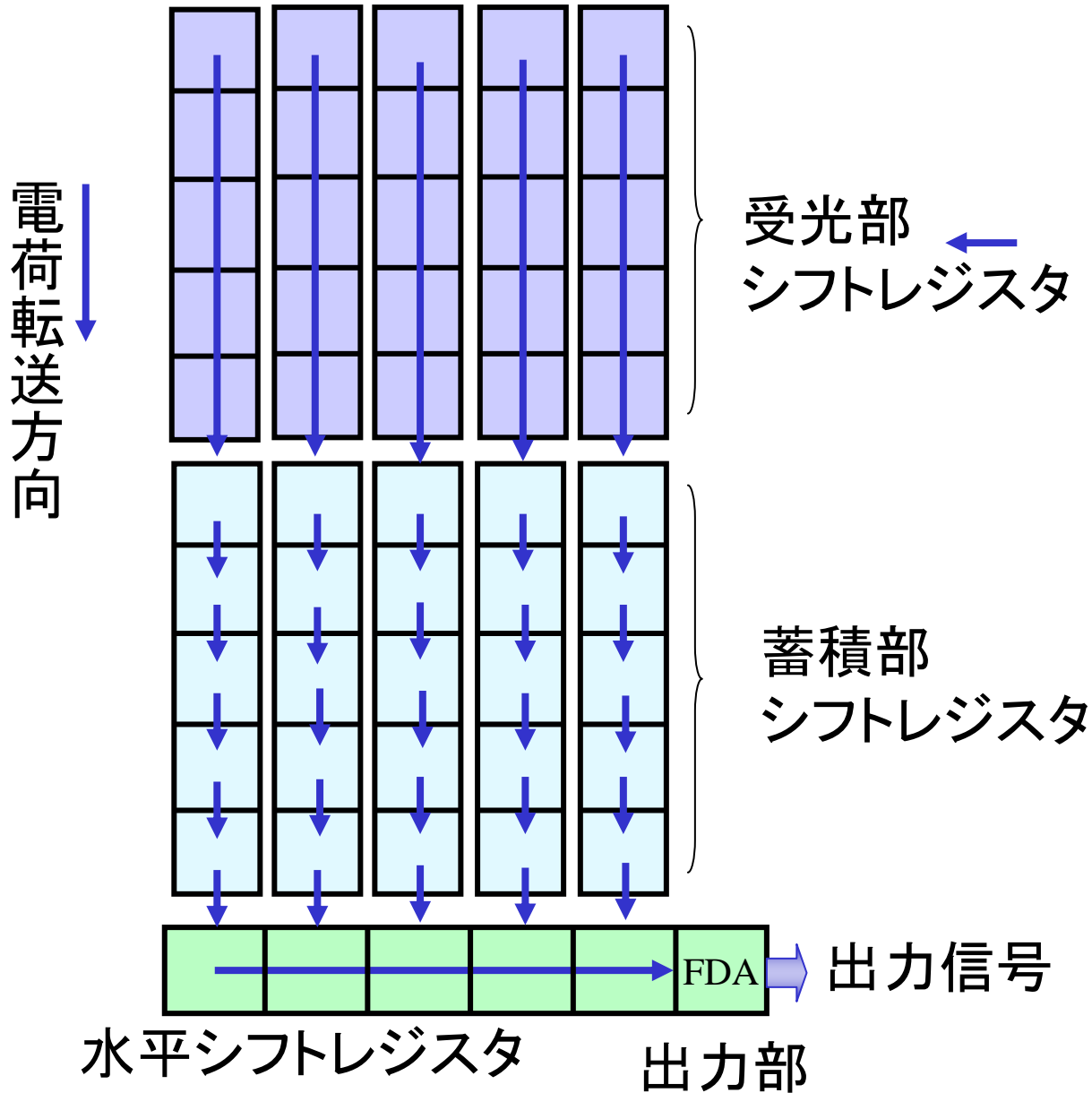
# 2次元MOS形イメージセンサの構成



# CCDの電荷転送原理



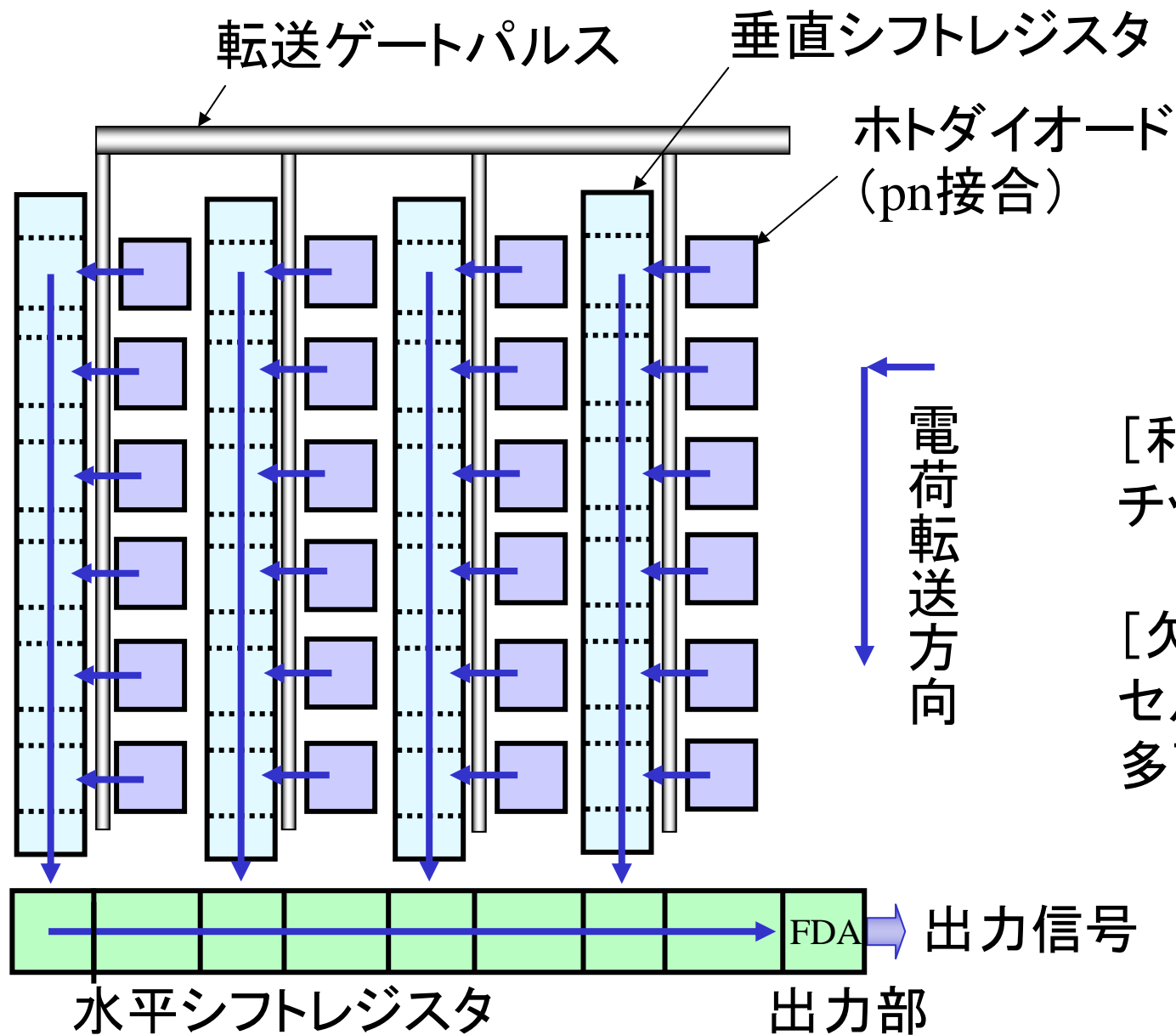
# FTCCD形イメージセンサ



[利点]  
セル構造単純  
多画素化容易  
感光部全面が有効

[欠点]  
大きなチップ寸法  
(感光部と同じ素子数の蓄積部)

# ILCCD形イメージセンサ



[利点]  
チップ寸法小さい

[欠点]  
セル構造複雑  
多画素化困難

## [CCD]

利点: 高S/N比

欠点: 狭いダイナミックレンジ, 無欠陥デバイスが得にくい  
スミア・ブルーミングの影響を受けやすい

## [MOS]

利点: 大きな最大信号電荷量, 無欠陥デバイス  
大きな開口率, スミア・ブルーミング対策容易

欠点: スイッチに伴う誤差発生

→ CCD・MOS併用形: MOS = 光電変換部 + 垂直走査部  
CCD = 水平走査部

## 固体イメージセンサの本質的特徴

小さな図形ひずみ, 小型軽量, 耐衝撃性, 低電圧, 低消費電力  
+

半導体加工処理技術の進展

→ 高密度化, 高感度化, 高機能化, 集積化, 知能化



# ジョセフソン効果

超伝導現象： 量子効果が巨視的に現れた現象の1つ

[ジョセフソン素子]

量子状態(位相)の検出 ⇒ 高精度電圧測定, 微弱磁場測定

# 粒子

フェルミ粒子： 電子, 核子など, 半整数スピン  
パウリの排他律に従う

ボーズ粒子： 光子, 中間子, 複数フェルミ粒子など  
整数スピン, パウリの排他律に従わなくてよい

# 量子力学

状態関数(波動関数)  $\psi(x)$  : 2乗が粒子の存在確率を表す  
複素関数

物理量 = 演算子

$$\text{運動量} \quad \hat{p}_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \quad \longrightarrow \quad \hat{\mathbf{p}} = -i\hbar \nabla$$

$$\text{電磁場も考慮した一般化運動量} \quad \hat{\mathbf{p}} = -i\hbar \nabla - q\mathbf{A}$$

$\mathbf{A}$ : ベクトルポテンシャル

$$\text{エネルギー} \quad \hat{E} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$$

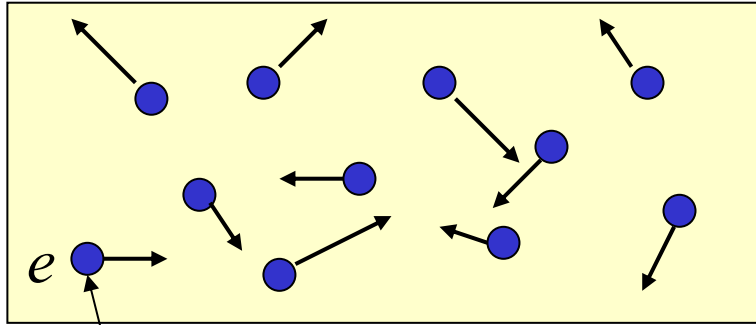
状態関数の絶対値, 位相表示

$$\psi(\mathbf{r}) = \sqrt{\rho(\mathbf{r})} e^{i\theta(\mathbf{r})}$$

$$\text{電流密度} \quad \mathbf{J} = \rho \mathbf{v} = \rho \frac{\hat{\mathbf{p}}}{m} = \frac{\hbar}{m} \left( \nabla \theta - \frac{q}{\hbar} \mathbf{A} \right) \rho$$

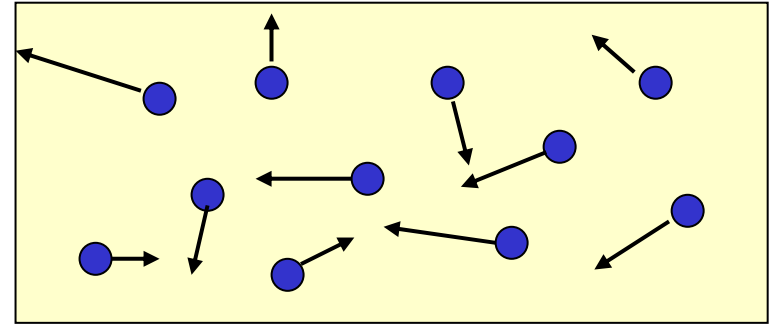
# 良導体

電流 = 0



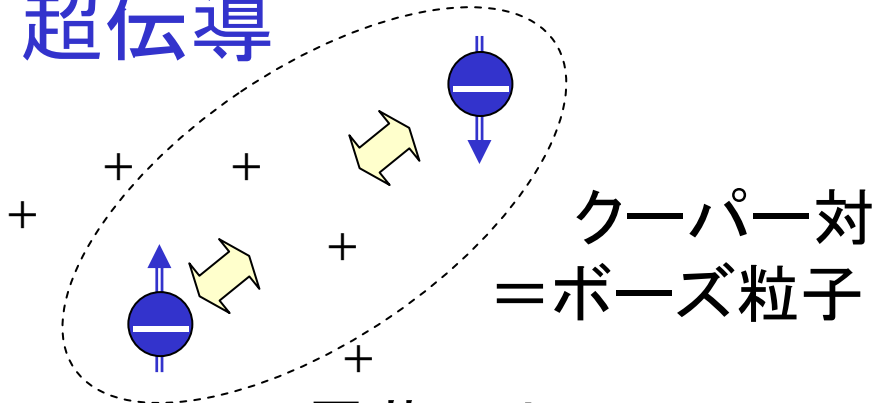
フェルミ粒子

電流 =  $\rightarrow$   
(平均的電子運動 =  $\leftarrow$ )



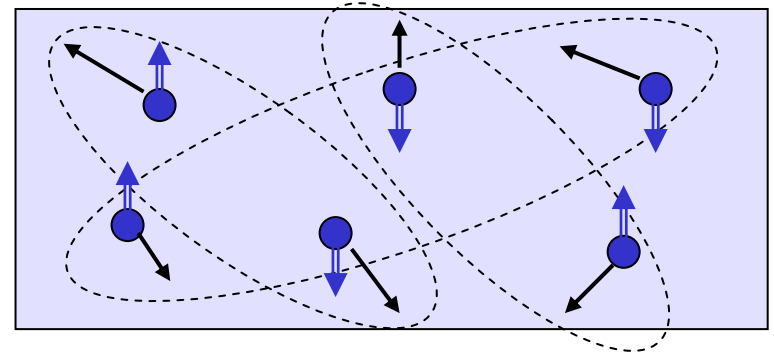
電気抵抗 = 格子欠陥, 格子振動  
と相互作用

# 超伝導



正電荷の衣  
(格子)

ボーズ・アインシュタイン凝縮

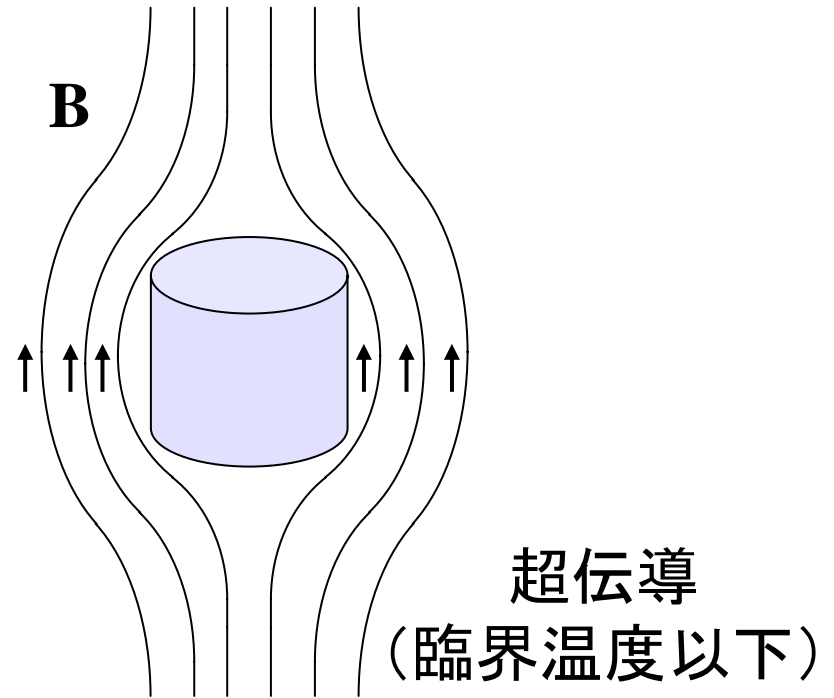
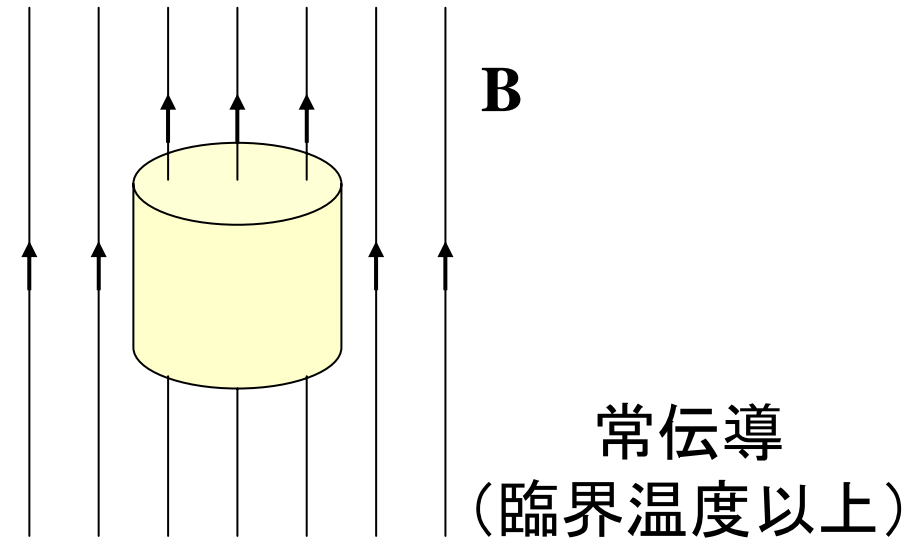


クーパー対 = ボーズ粒子

↳ 全て同一 (最低エネルギー) 状態

↳ 抵抗 = 0 (格子と相互作用なし)

# マイスナー効果

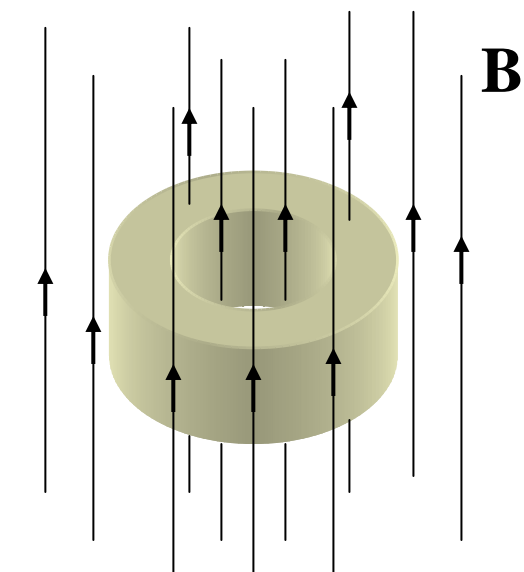


金属片に磁場  $\Rightarrow$  金属内に電場誘起  $\Rightarrow$  金属内に電流  
 $\Rightarrow$  磁場を打ち消す磁束発生

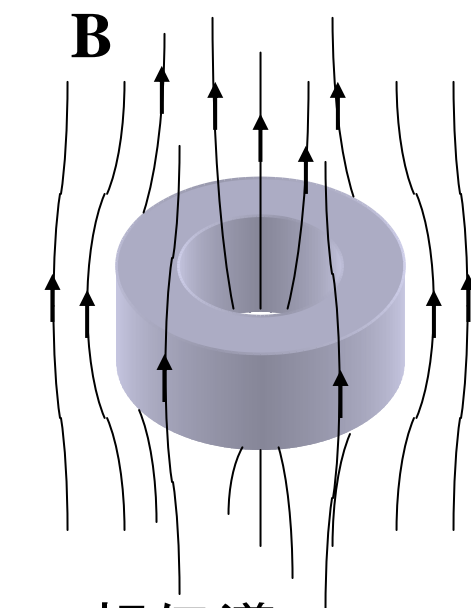


超伝導では磁場を完全に打ち消す電流発生  
= 超伝導状態にある物質内部には磁場は侵入できない

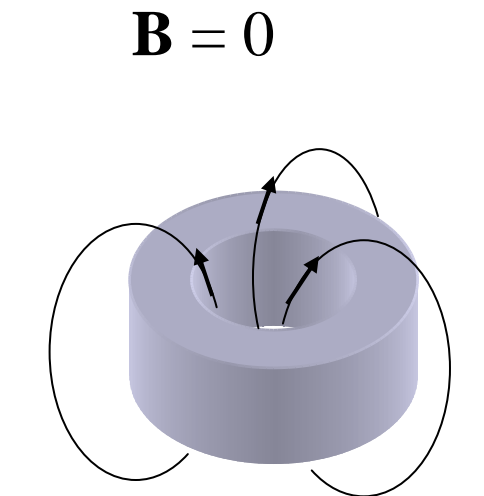
# 磁束の量子化



常伝導  
(臨界温度以上)



超伝導  
(臨界温度以下)



超伝導  
外磁場を取り除く  
→ 磁束の凍結

## [凍結された磁束について]

リングの内部では電流=0  $\hbar \nabla \theta = q \mathbf{A}$

リングの一回りの曲線上の線積分  $\hbar \oint \nabla \theta \cdot ds = q \oint \mathbf{A} \cdot ds$

一方, ベクトルポテンシャルの定義により  $\oint \mathbf{A} \cdot ds = \Phi$

また,  $\int_1^2 \nabla \theta \cdot ds = \theta_2 - \theta_1$

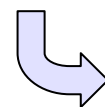
超伝導体では各点における状態関数がただ1つの値

} より

$$\oint \nabla \theta \cdot ds = 2\pi n$$

したがって,  $\Phi = n(2\pi\hbar)/q = n(h/2e) = n\phi_0$

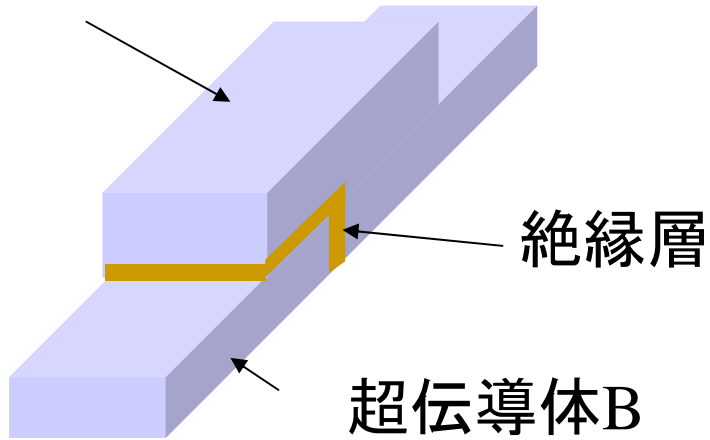
凍結された磁束は磁束量子  $\phi_0$  の整数倍の離散値



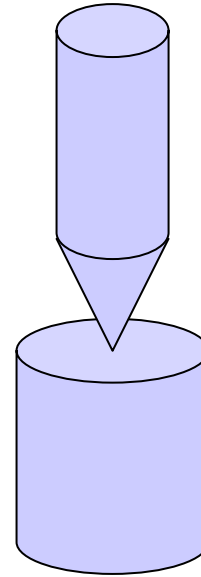
磁束の量子化

# ジョセフソン効果

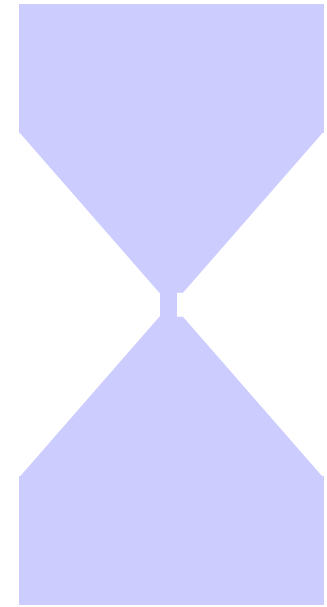
超伝導体A



トンネル接合



点接触形



ブリッジ形

ジョセフソン接合： 2つの超伝導体の弱い連結  
電子は量子力学的に通り抜ける

ジョセフソン効果 (Josephson effect)： 接合を介してクーパー対  
が抵抗なくトンネル効果で一方から他方に流れる

## 超伝導体A, B における状態関数

$$\psi_A = \sqrt{\rho_A} e^{i\theta_A}, \quad \psi_B = \sqrt{\rho_B} e^{i\theta_B}$$

$\rho_A, \theta_A, \rho_B, \theta_B$  : 超伝導体A, B における電子密度, 位相

## シュレディンガー方程式

$$\left. \begin{aligned} i\hbar \frac{\partial \psi_A}{\partial t} &= eV\psi_A + \hbar T\psi_B \\ i\hbar \frac{\partial \psi_B}{\partial t} &= -eV\psi_B + \hbar T\psi_A \end{aligned} \right\}$$

$V$ : 接合点を横切ったの電位差,  $\hbar T$  : 相互作用

接合を流れる超伝導電流 (ジョセフソン電流)

$$I_S = -\frac{\partial \rho_A}{\partial t} = \frac{\partial \rho_B}{\partial t}$$



## [直流ジョセフソン効果]

電場, 磁場 = 0,  $V = 0$ ,  $\rho_A \approx \rho_B$

直流電流  $I_S = I_C \sin(\theta_A - \theta_B)$ ;  $I_C = 2T \sqrt{\rho_A \rho_B}$

## [交流ジョセフソン効果]

直流電圧  $V$   $\delta(t) = \theta_A - \theta_B = \delta(0) + \frac{2eV}{\hbar} t$

$I_S = I_C \sin\left[\delta(0) + \frac{2eV}{\hbar} t\right]$  振動数  $\omega = \frac{2eV}{\hbar}$  の交流電流

電子対が接合部を通過

⇒ エネルギー =  $\hbar\omega = 2eV$  の光子を放出または吸収

振動数測定 (高精度) ⇒ 正確な電圧測定

483.6 MHz

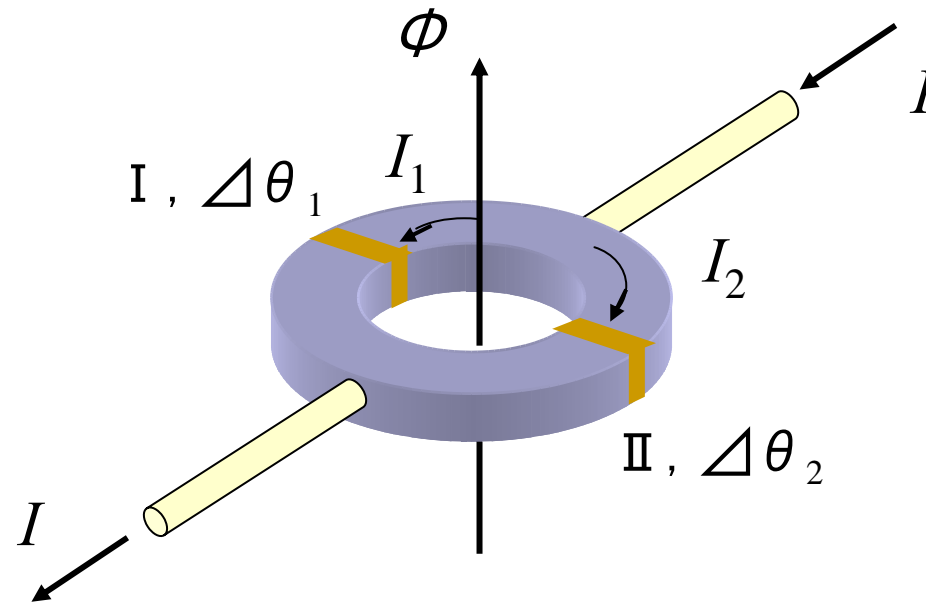
1  $\mu$  V

# 超伝導磁気センサ (ジョセフソン接合を含む超伝導リング)

SQUID (superconducting quantum interference device)

超伝導量子干渉素子: 弱磁場を高精度で測定

[dc SQUID]



リングを貫く磁束  $\Phi$  に対する量子化条件

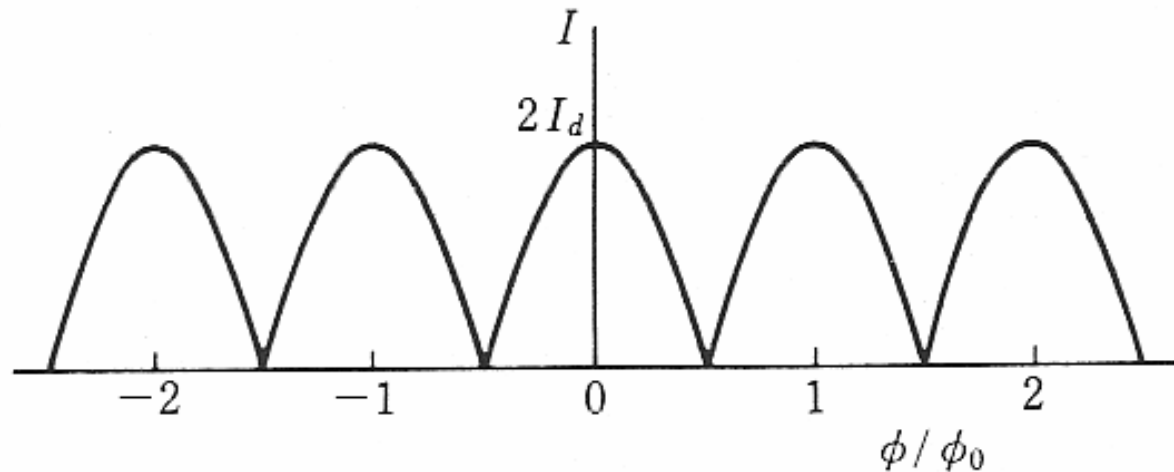
$$\Phi = \left( n + \frac{\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2}{2\pi} \right) \phi_0 \quad \text{または} \quad \Delta\theta_1 = \Delta\theta_0 + \pi \frac{\Phi}{\phi_0}, \quad \Delta\theta_2 = \Delta\theta_0 - \pi \frac{\Phi}{\phi_0}$$

## 接合部を流れる電流

$$I_1 = \sin\left(\Delta\theta_0 + \pi \frac{\Phi}{\phi_0}\right), \quad I_2 = \sin\left(\Delta\theta_0 - \pi \frac{\Phi}{\phi_0}\right)$$

## 全電流

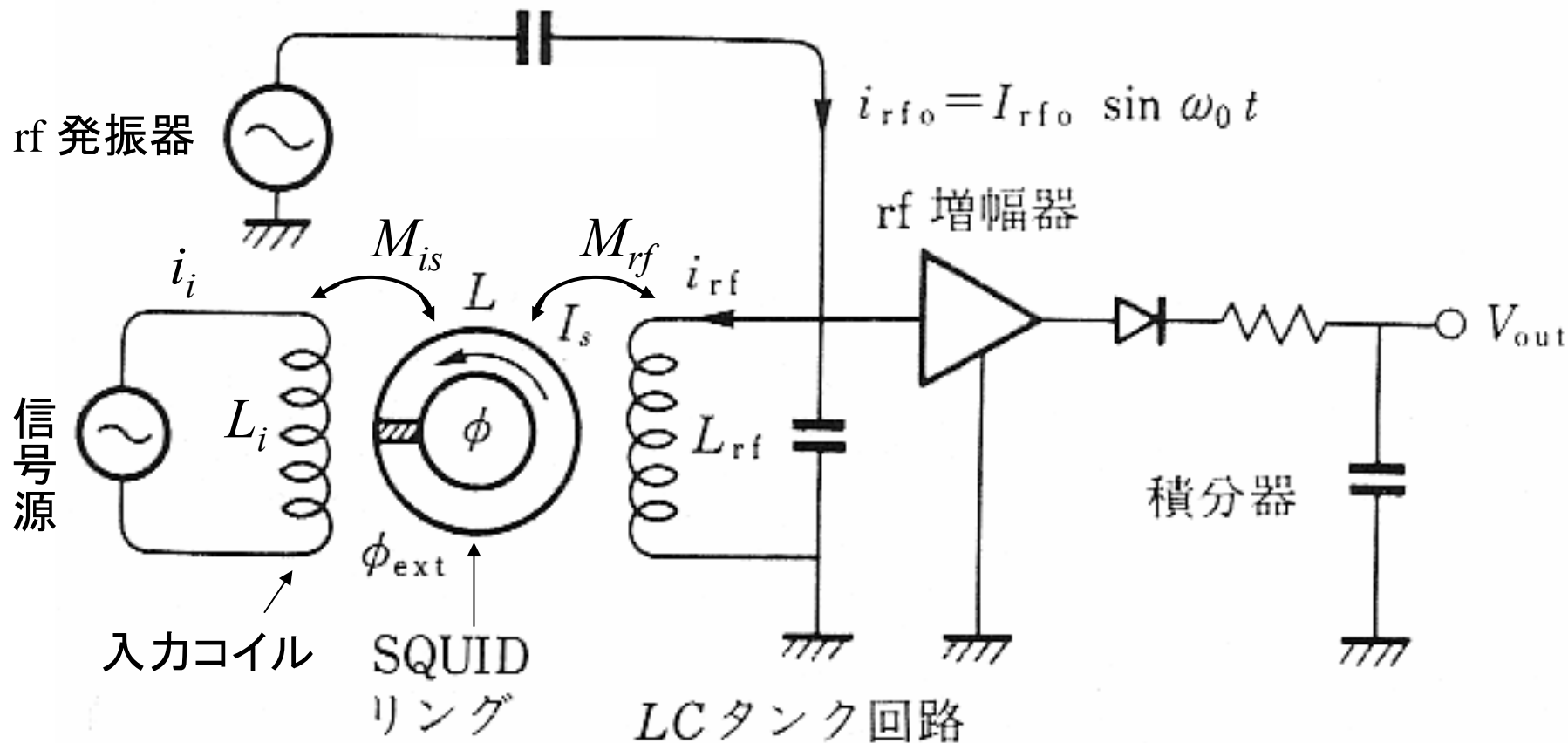
$$I = I_1 + I_2 = 2I_C \sin(\Delta\theta_0) \cos\left(\pi \frac{\Phi}{\phi_0}\right) = 2I_d \cos\left(\pi \frac{\Phi}{\phi_0}\right)$$



超伝導を生かした量子干渉効果

# [rf SQUID]

信号からの微弱磁場  $\Rightarrow$  SQUIDリング  $\Rightarrow$  rf 回路の電圧



リングを貫く磁束  $\Phi = \Phi_{ext} - LI_S$

$\Phi_{ext}$  : 外部磁場