

2010年6月11日 学術総合センター
戦略的情報通信研究開発推進制度(SCOPE)成果発表会
若手ICT研究者育成型研究



半導体量子構造による電氣的電子スピン位相制御/ 検出技術の開拓と量子情報端末への応用

好田 誠

東北大学大学院 工学研究科

Acc.V Spot Magn Det WD | 1 μ m
10.0 kV 4.0 20000x SE 10.5

半導体における電子スピンの活用

量子情報処理

$$|1\rangle \quad |0\rangle \quad |1\rangle + |0\rangle$$

1. 量子コンピューティング

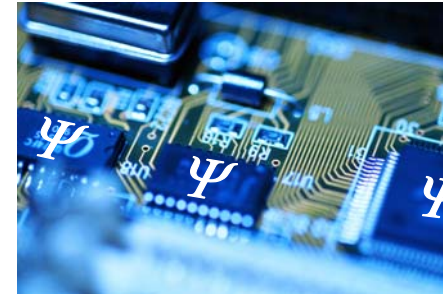
- ・並列計算処理

2. 量子暗号通信

- ・暗号鍵の安全性を保障

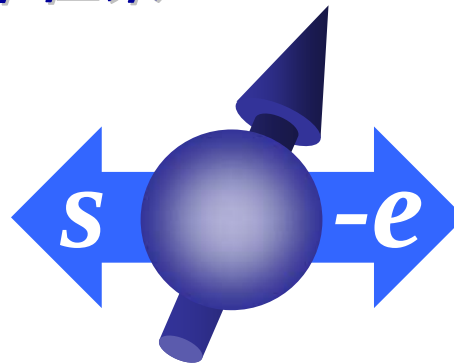
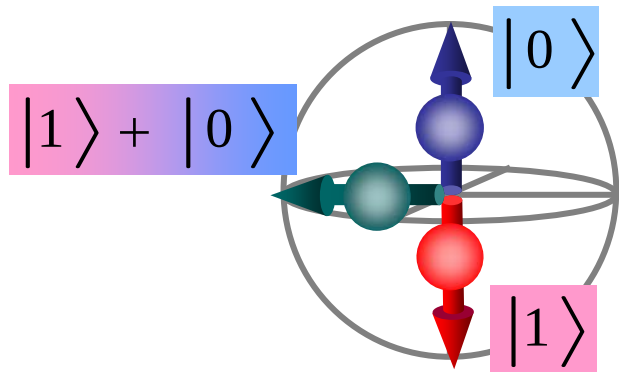


インターフェース基盤技術の確立



既存の情報処理デバイスとの整合性

スピンは量子力学的2準位系



半導体エレクトロニクス

電子の電荷の性質を利用

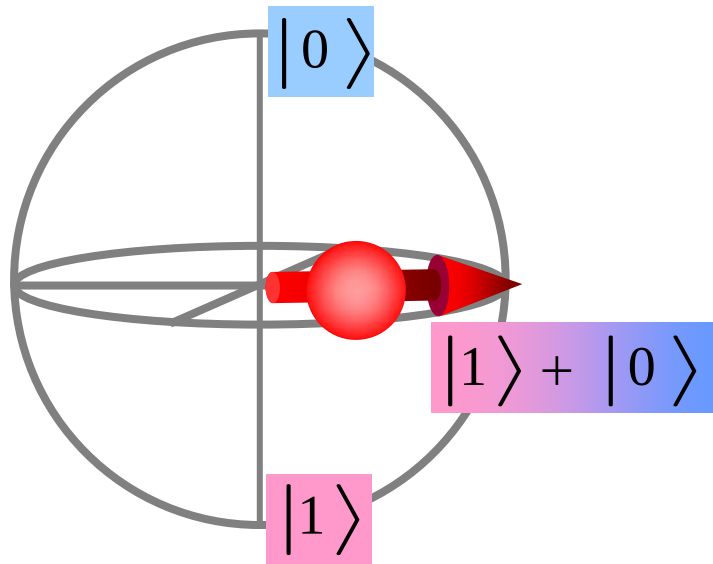
電界効果トランジスタ

Flashメモリ SRAM / DRAM

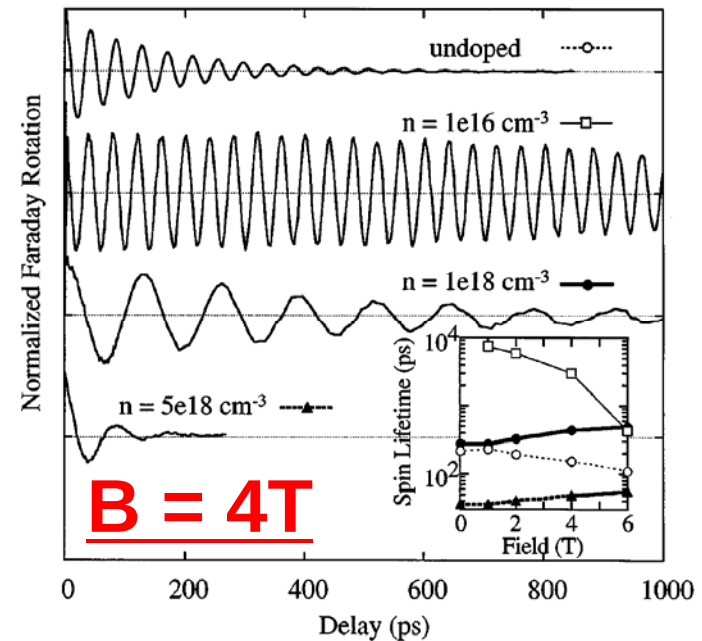
Si CMOSテクノロジー

半導体における電子スピンを利用した新ICTパラダイム創出

量子情報処理に向けた基盤技術



時間分解ファラデー回転測定



J. M. Kikkawa et al., PRL (1998)

電子スピンの位相制御



外部磁場を用いない電氣的スピン位相制御・検出の確立

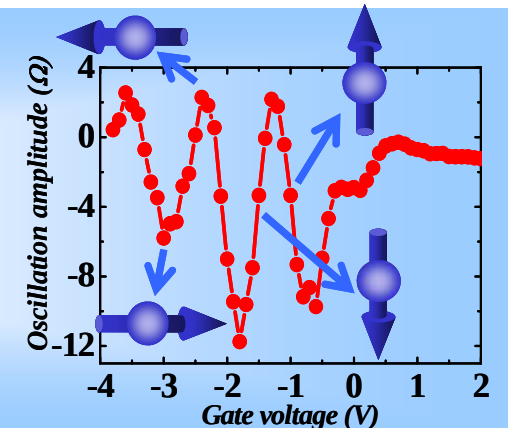
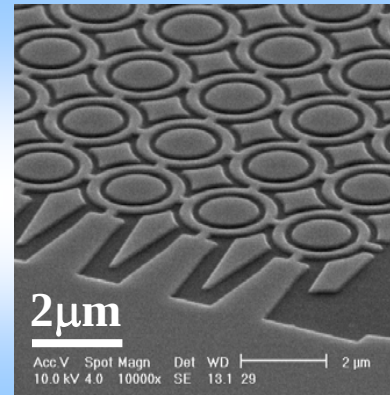
SCOPEにおける研究成果

1. 電子スピンのゲート電界制御

ゲート電圧のみで電子スピンを
 6π 回転制御することに成功

M. Kohda et al., ECS Trans. (2008)

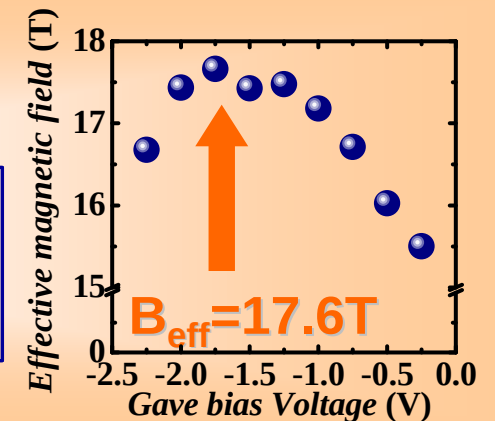
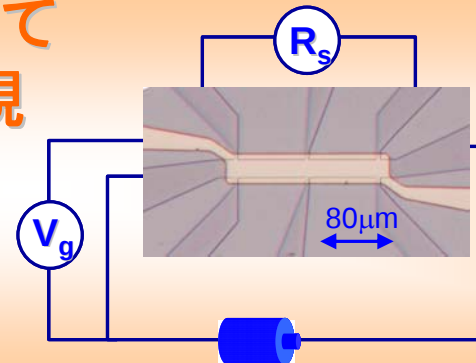
M. Kohda et al., JPSJ (2008)



2. InGaAsP量子井戸構造において 内部有効磁場 $B_{\text{eff}} = 17.6\text{T}$ を実現

InGaAsP/InGaAs界面のスピン
軌道相互作用による有効磁場増大

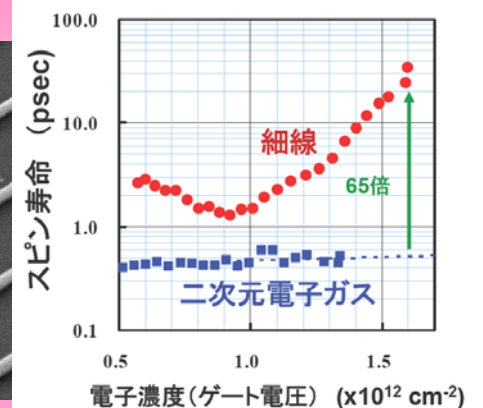
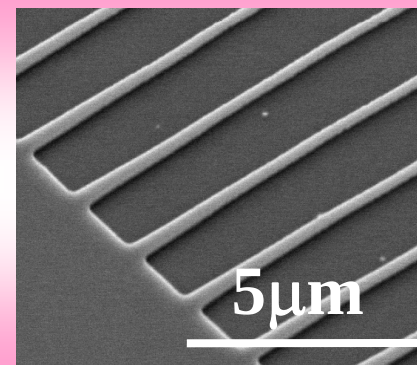
M. Kohda et al., Phys. Rev. B (2010)



3. InGaAs半導体細線構造における スピン緩和時間の増大

細線構造のスピン緩和時間が
2次元電子ガスの65倍増大

Y. Kunihashi, M. Kohda, and J. Nitta, Phys. Rev. Lett. (2009)

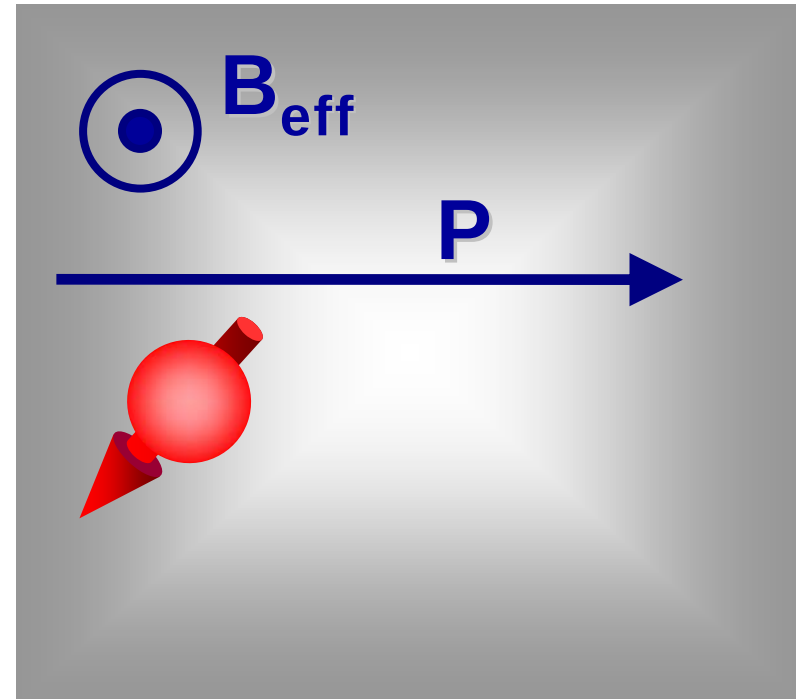
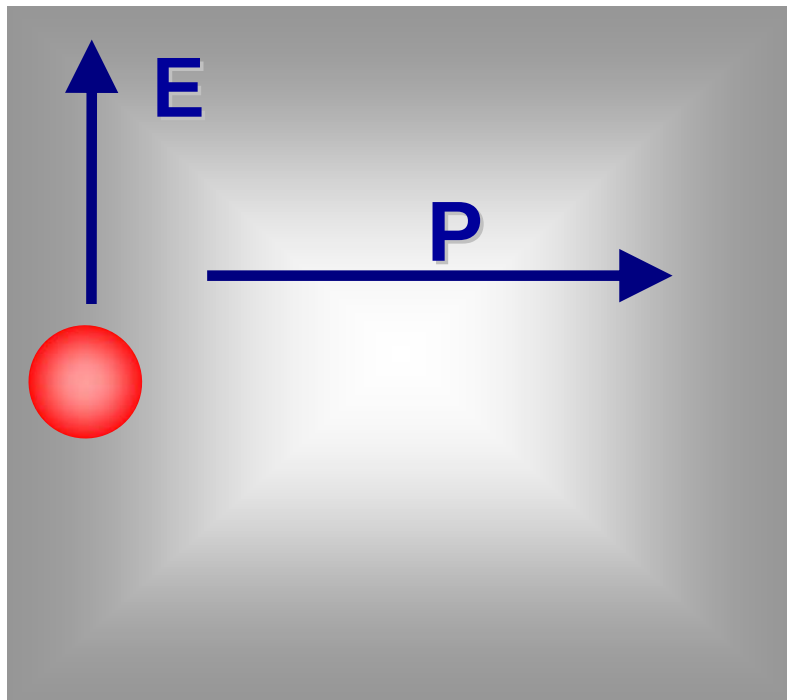


スピン軌道相互作用による有効磁場

スピン軌道相互作用
による有効磁場

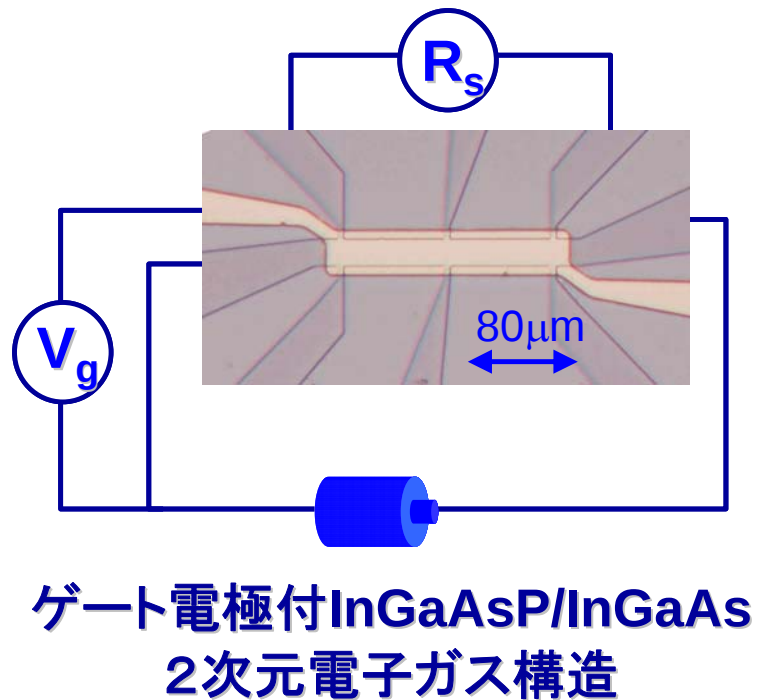
$$B_{\text{eff}} = \frac{\vec{p} \times \vec{E}}{2m_0c^2}$$

有効磁場 B_{eff} 方向は電子
の運動量と電界に依存

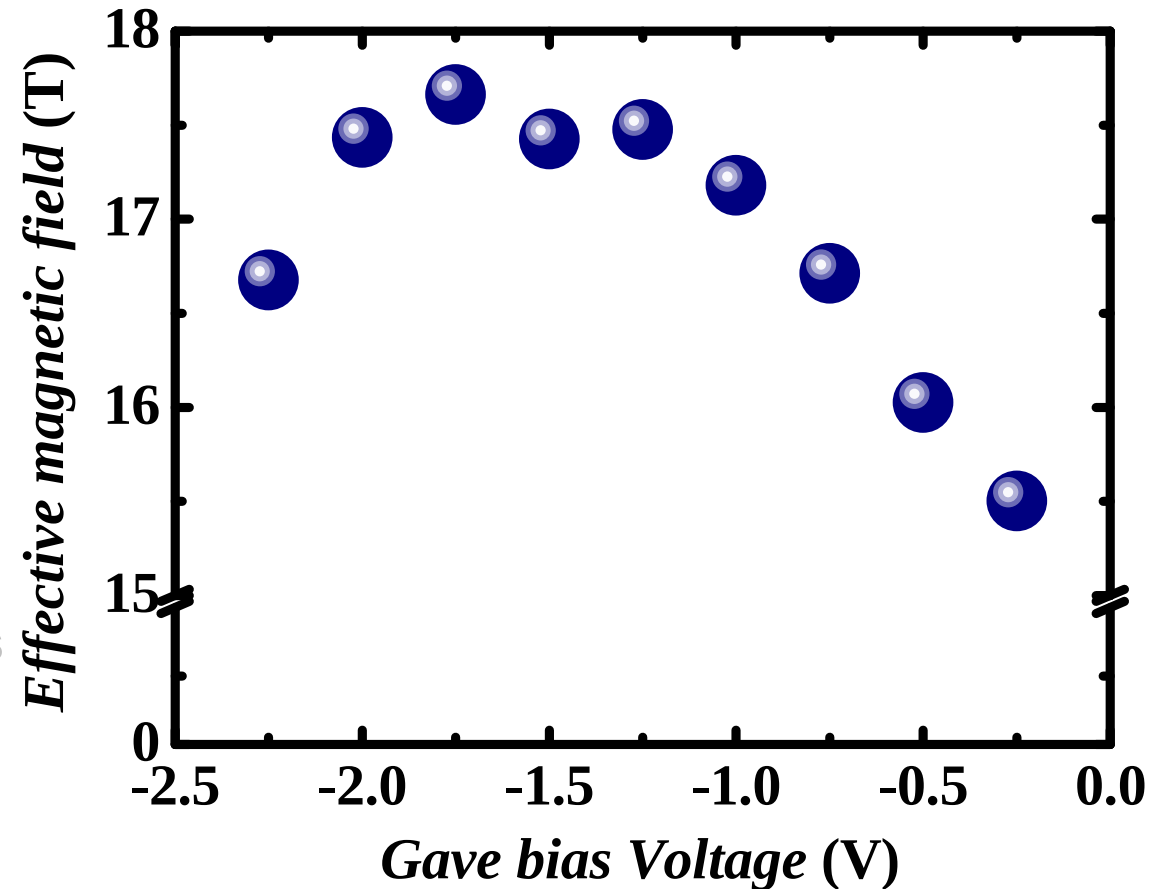


有効磁場により電子スピンはゼロ磁場で歳差運動する

有効磁場のゲート電圧制御



有効磁場 B_{eff} のゲート電圧依存性

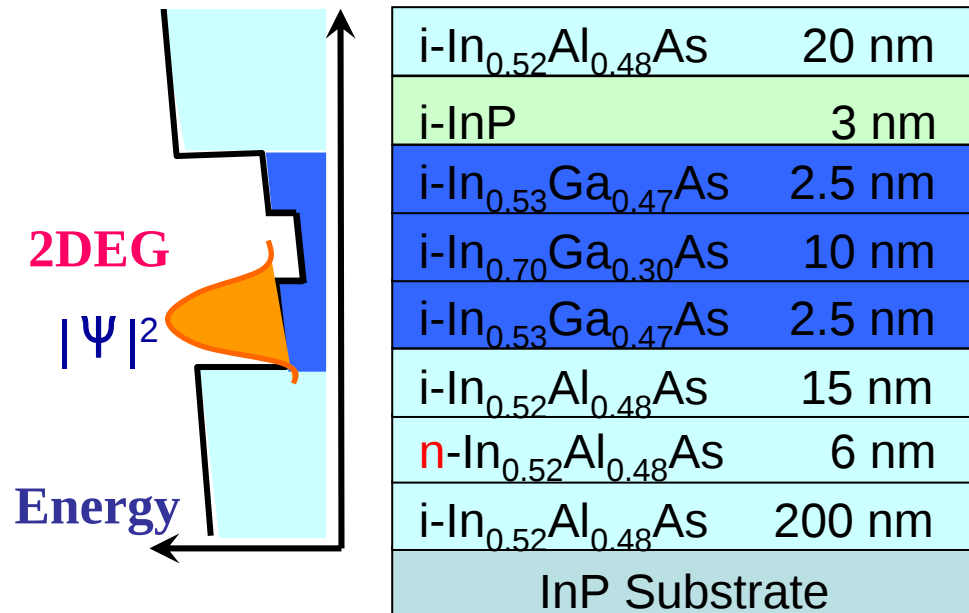


M. Kohda et al., Phys. Rev. B (2010)

有効磁場 B_{eff} はゲート電圧により制御可能

スピン干渉デバイス構造

$\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ / $\text{In}_{0.70}\text{Ga}_{0.30}\text{As}$ 2次元電子ガス構造
レイヤー構造



測定方法

磁気伝導測定 / ゲートバイアス依存性

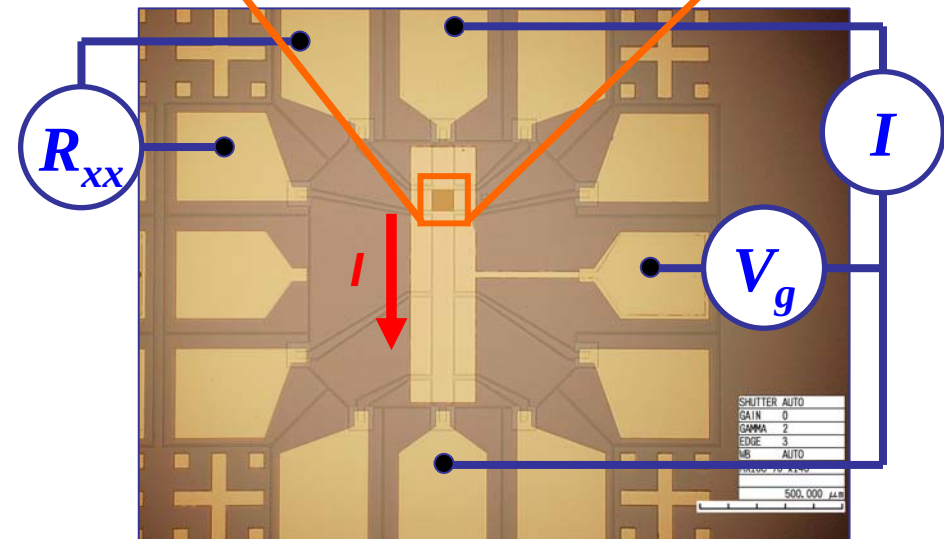
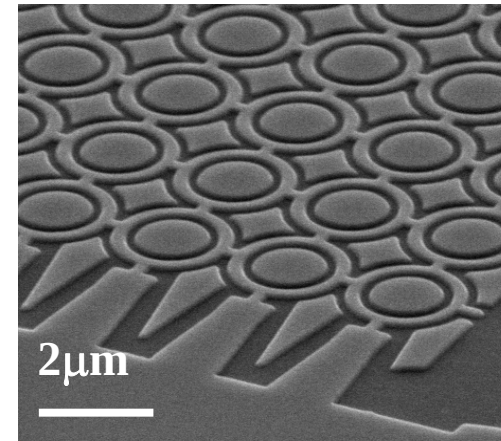
外部磁場: $-40\text{mT} < B < +40\text{mT}$ for R_{xx}

ゲート電圧: $-4\text{V} < V_g < +1\text{V}$

温度: $T = 0.3\text{K}$

デバイス構造

リング部分のSEM写真



$20\mu\text{m} \times 80\mu\text{m}$ with top Au/ SiO_2 gate

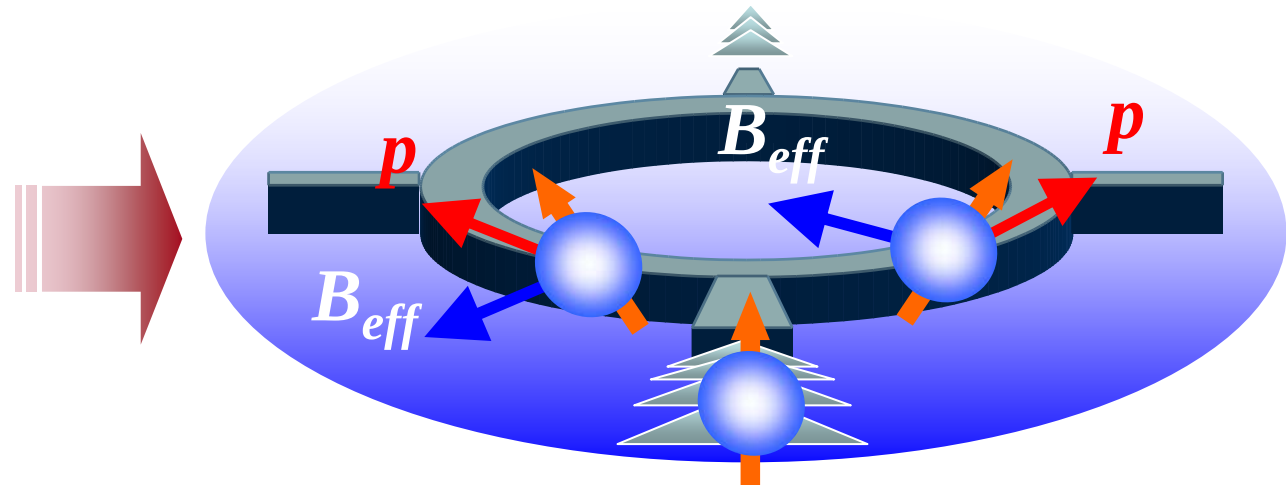
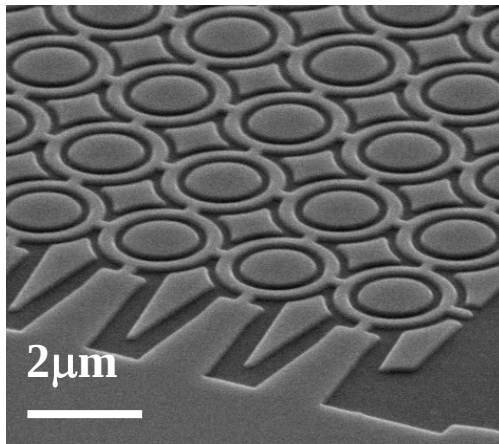
スピン干渉効果を用いたスピン位相の電氣的検出

スピン軌道相互作用
による有効磁場

$$B_{eff} = \frac{\vec{p} \times \vec{E}}{2m_0c^2}$$

有効磁場 B_{eff} 方向は電子
の運動方向に依存

半導体リング構造を用いたスピン干渉効果



J. Nitta et al. APL (1999)

リング内を右回り・左回りに運動した電子スピンは
互いに逆向きの有効磁場が作用する

電子スピンの回転角に応じて干渉効果が生じる

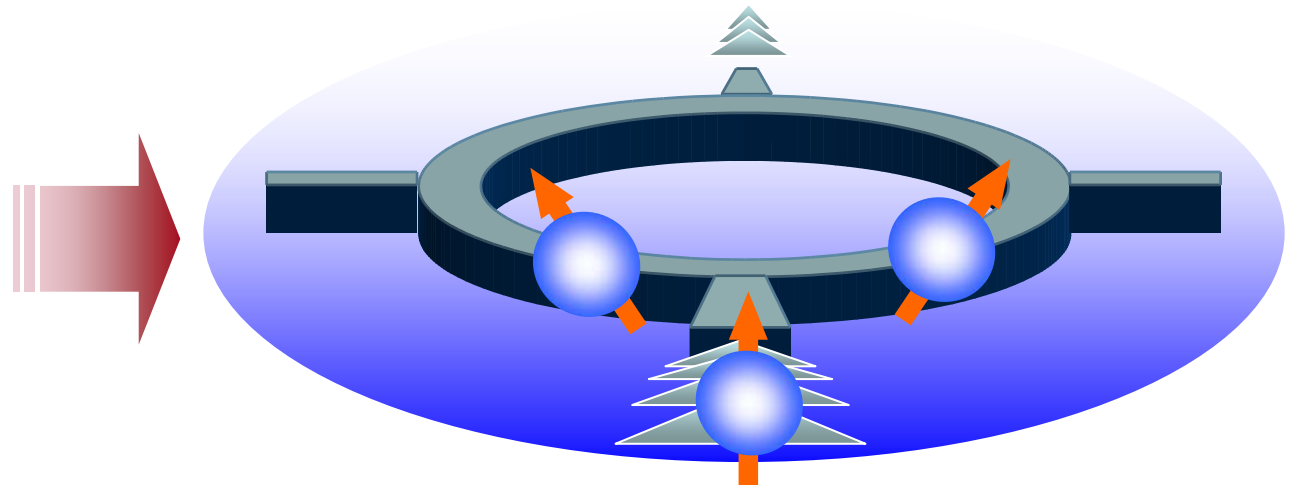
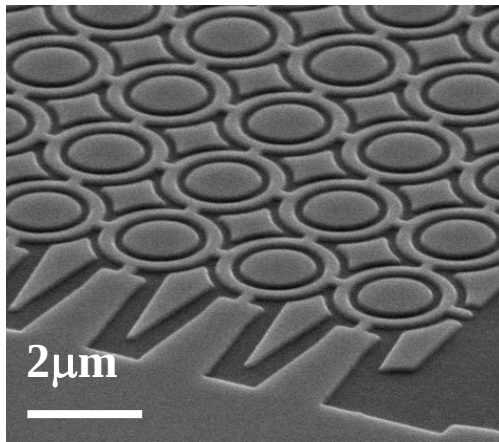
スピン干渉効果を用いたスピン位相の電氣的検出

スピン軌道相互作用
による有効磁場

$$B_{eff} = \frac{\vec{p} \times \vec{E}}{2m_0c^2}$$

有効磁場 B_{eff} 方向は電子
の運動方向に依存

半導体リング構造を用いたスピン干渉効果

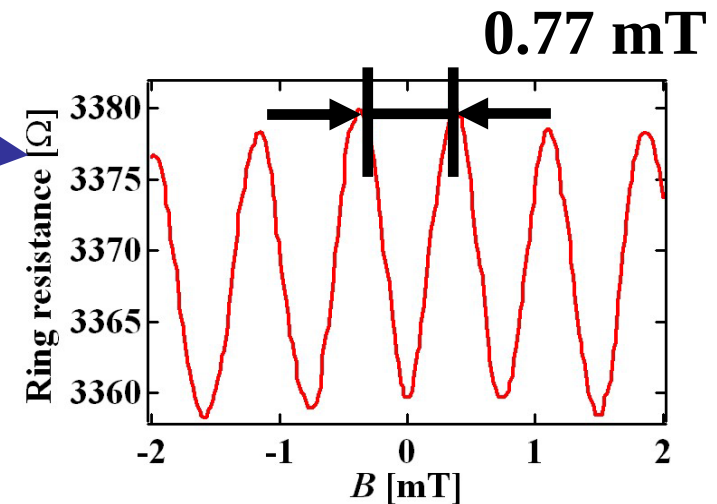
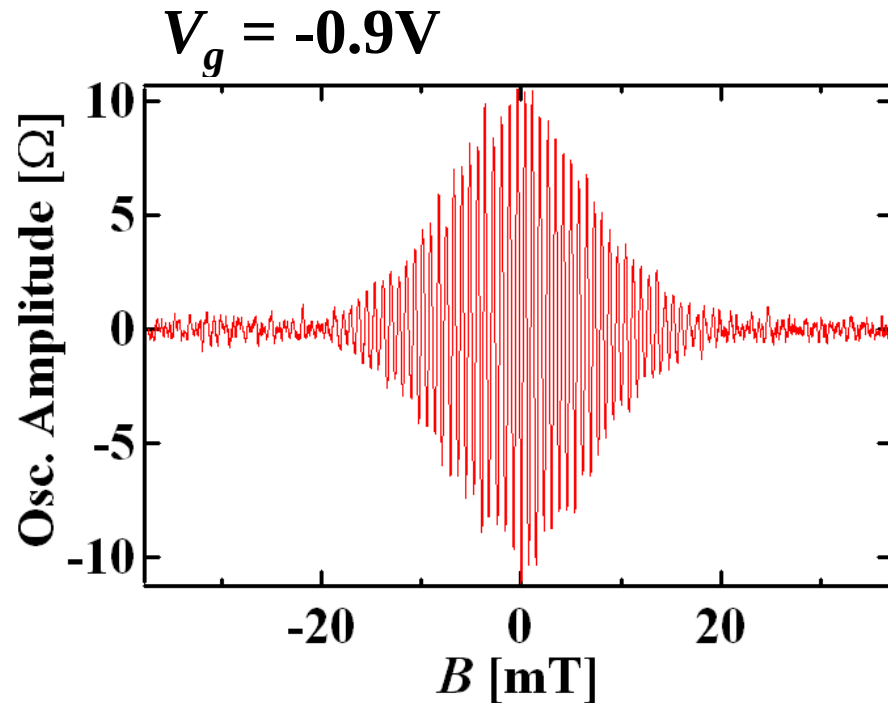


J. Nitta et al. APL (1999)

リング内を右回り・左回りに運動した電子スピンは
互いに逆向きの有効磁場が作用する

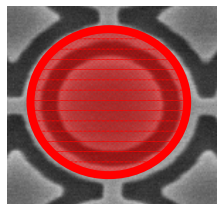
電子スピンの回転角に応じて干渉効果が生じる

リング構造における磁気抵抗測定



外部磁場による抵抗振動

$h/2e$ に起因する磁場周期



$$B = \frac{1}{S} \frac{h}{2e} \approx 0.77 \text{ [mT]}$$

外部磁場による運動量 P の変調

$$\begin{array}{ccc} B=0T & & B>0T \\ P=\hbar k & \xrightarrow{B=\nabla \times A} & P'=(\hbar k - eA) \end{array}$$

電子波動関数

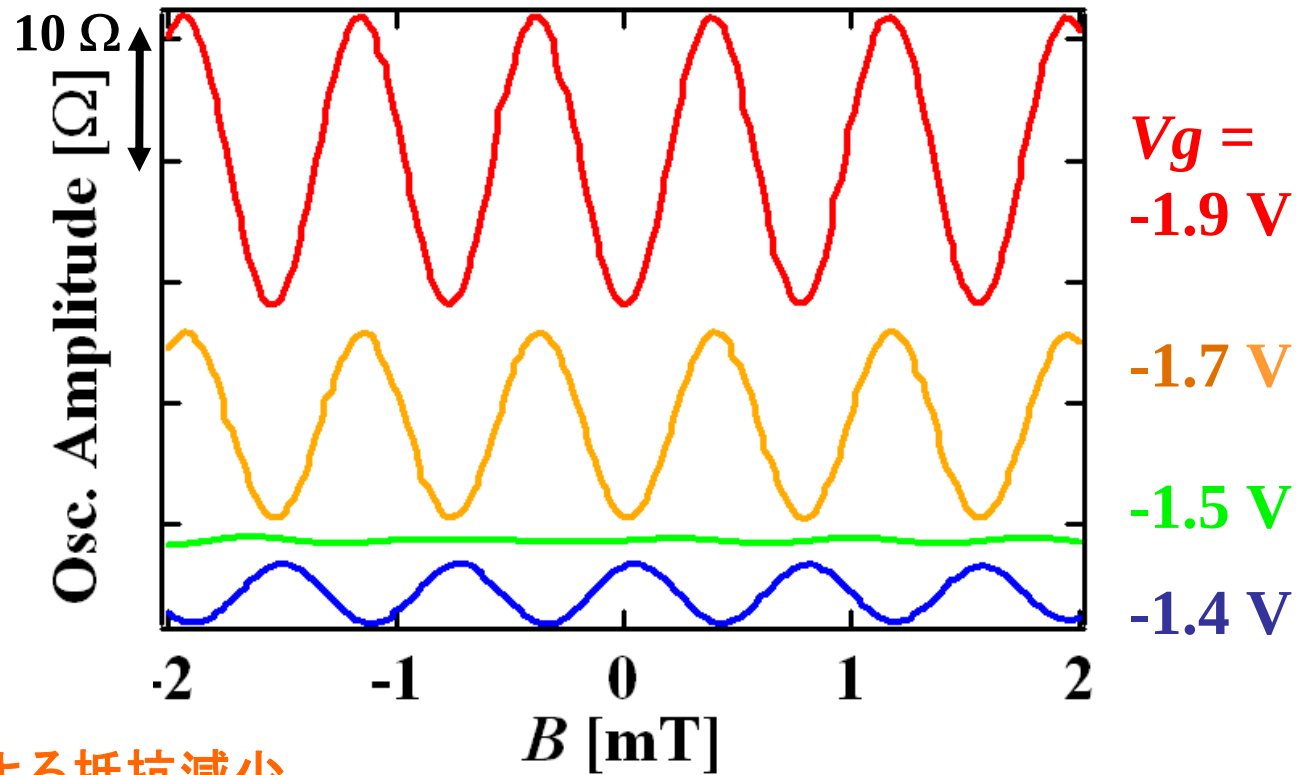
$$\Phi_{k\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{ikx} \begin{pmatrix} e^{-\frac{i\alpha m^* x}{\hbar^2}} \\ e^{\frac{i\alpha m^* x}{\hbar^2}} \end{pmatrix}$$

軌道位相 スピン位相

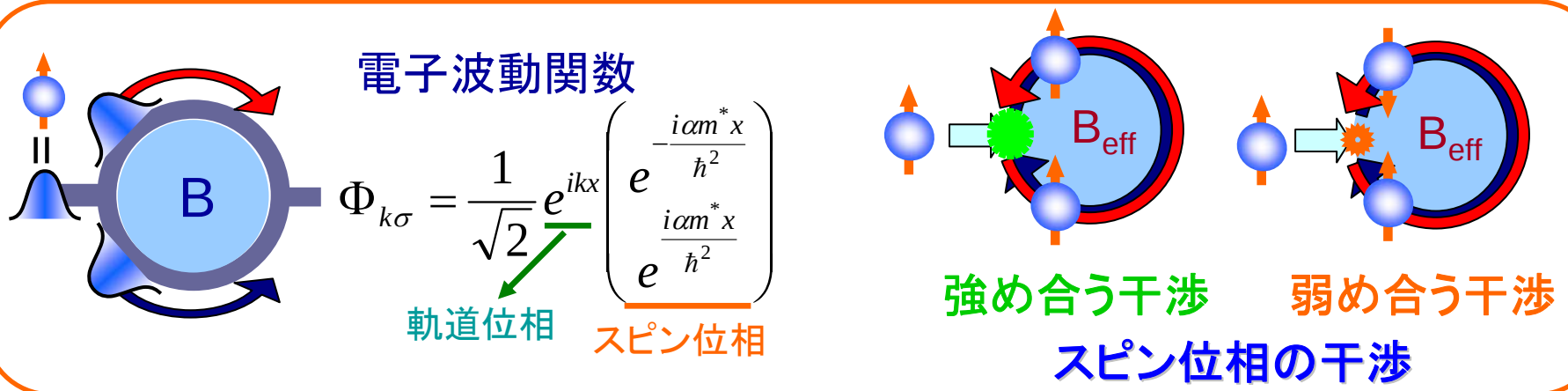
軌道位相の干渉

Al'tshuler-Aronov-Spivak振動

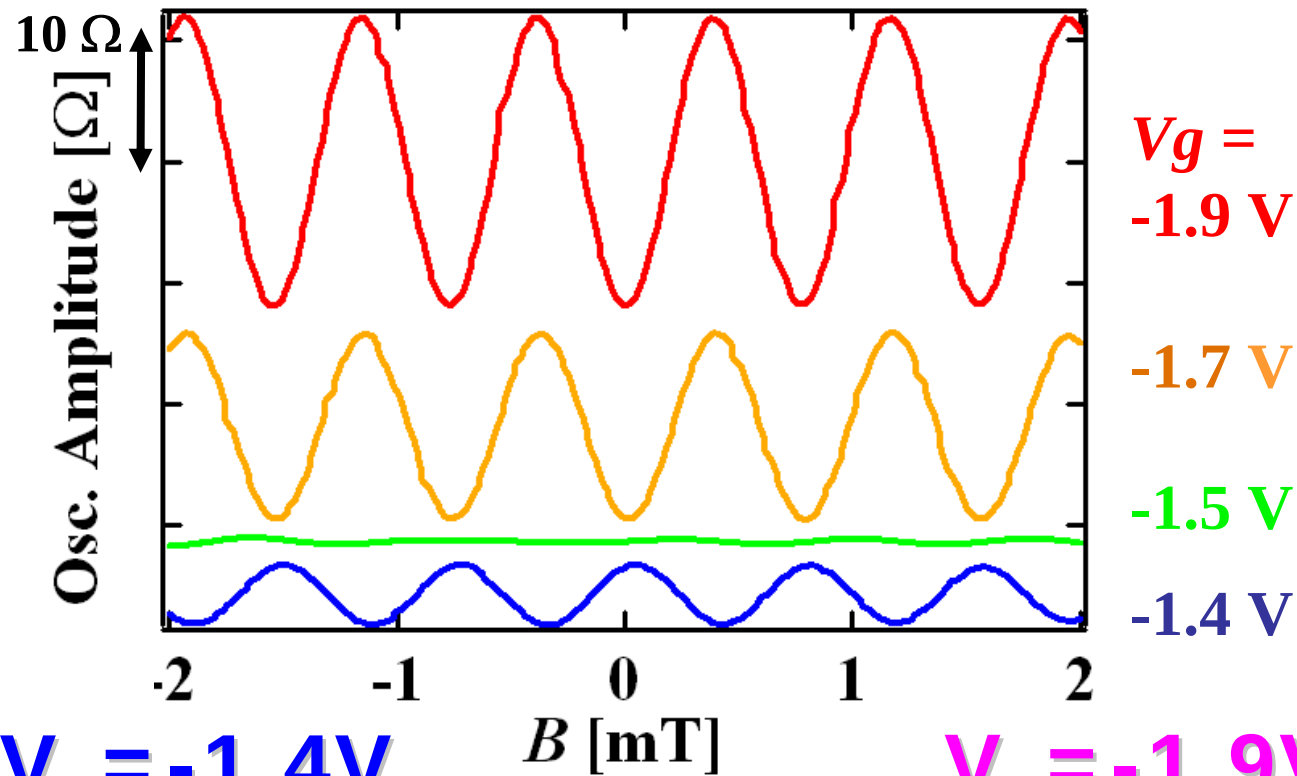
磁気抵抗振動のゲート電圧依存性



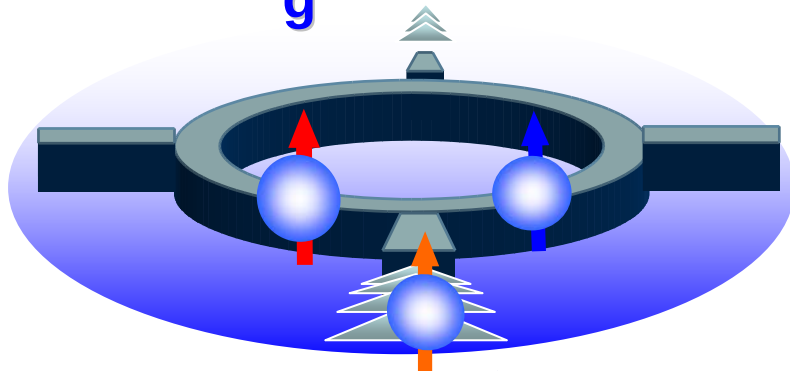
ゼロ磁場による抵抗減少



磁気抵抗振動のゲート電圧依存性

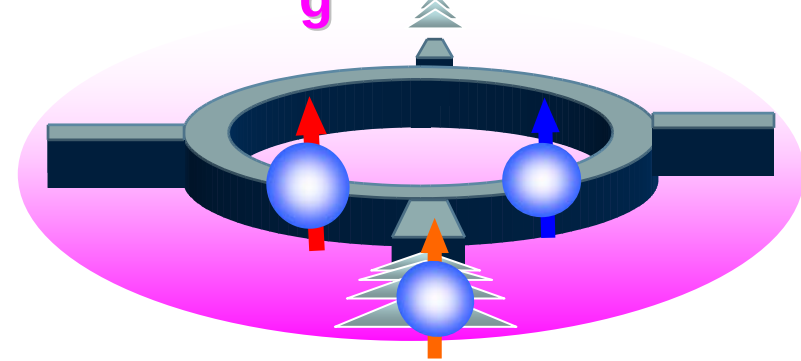


$V_g = -1.4\text{ V}$



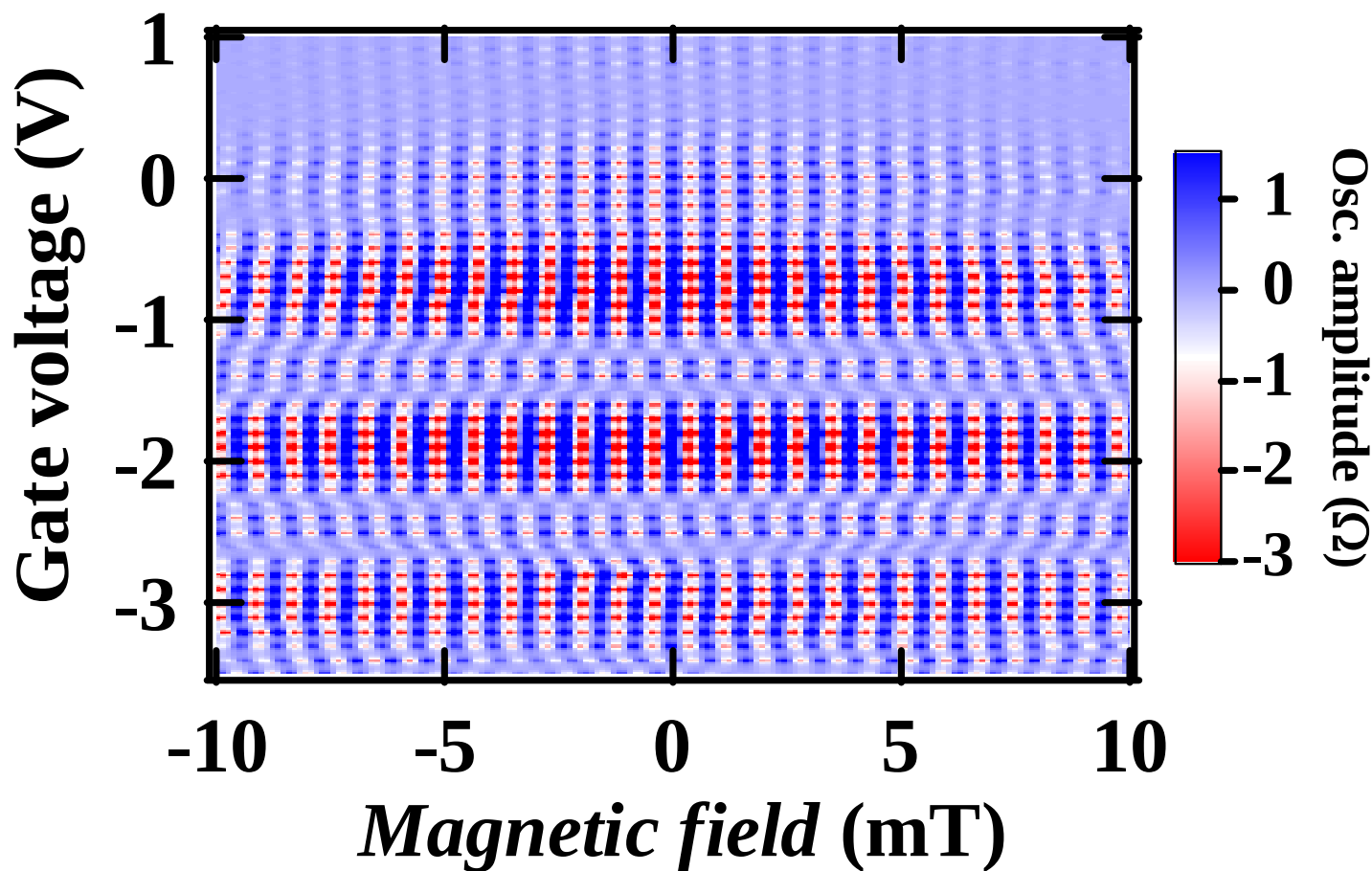
強めあう干渉効果 ➡ 抵抗増大

$V_g = -1.9\text{ V}$



弱めあう干渉効果 ➡ 抵抗減少

Al'tshuler-Aronov-Spivak振動のゲート電圧依存性

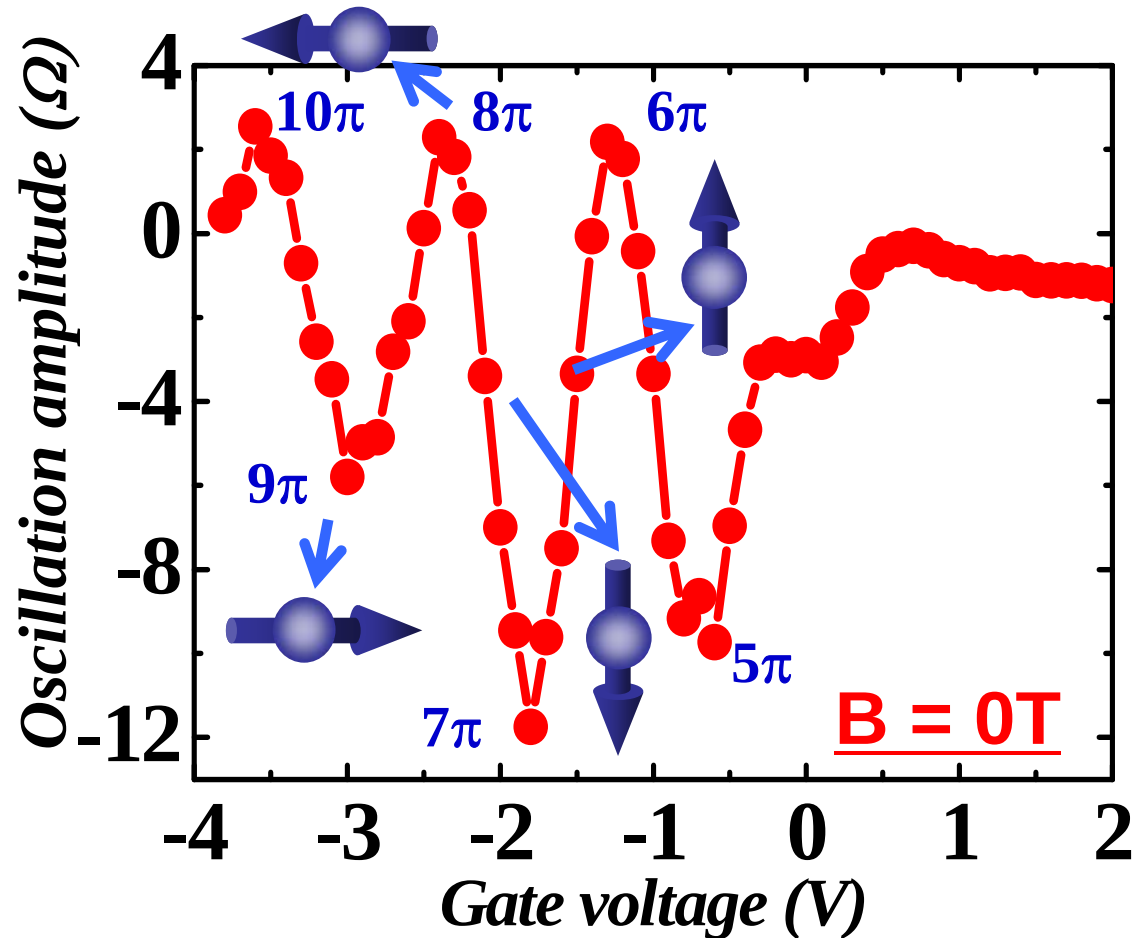


B=0Tにおいてゲート電圧より周期的な抵抗変化が観測



電子スピン位相の電氣的回転制御が実現

ゲート電圧によるスピン回転角



ゲート電圧のみにより電子スピンを 6π 回転制御



外部磁場を用いない電氣的スピン位相制御・検出を確立

まとめ

スピン干渉効果の電氣的検出に成功

ゲート電圧のみにより電子スピンを 6π 回転制御

外部磁場を用いない電氣的スピン位相制御技術を確立

InGaAsP量子井戸構造において内部有効磁場 $B_{\text{eff}} = 17.6\text{T}$ を実現

InGaAs半導体細線構造におけるスピン緩和時間の増大

