

並列2重量子ドットにおける 電磁波照射と干渉効果

SATテクノロジー・ショーケース2025

■ はじめに

量子ドットとは、半導体の微細加工技術の向上により作製が可能となった、電子を閉じ込めるナノスケールの箱のようなデバイスである。量子ドット内のエネルギーは離散化され、電子を1個ずつ電氣的に制御できる特徴を持つ。量子ドットに電磁波を照射するとフォトン放出と吸収を伴った電気伝導が起こるが、これはフォトン支援伝導 (photon-assisted tunneling: PAT) と呼ばれ実験と理論の両面から研究されている [1-3]。単一量子ドットでのPATはTien-Gordon理論によると、フォトンと電子の複合状態を介した伝導と理解される [4, 5] が、厳密な定式化はなされていない。本研究では、時間に依存するシュレーディンガー方程式を厳密に解いて、単一および並列2重量子ドットでのPATの定式化を行った。特に並列2重量子ドット系では、PATと外部磁場による干渉効果 (アハラノフ・ボーム効果) との関係を調べた。

■ 活動内容

1. 単一量子ドットでのPAT

まず、単一量子ドットに電磁波を照射した時の電気伝導について厳密な定式化を行う。単一量子ドット内のエネルギー準位 ε_0 が、電磁波によって $\varepsilon(t) = F_{AC}(t) = \varepsilon_0 + eV_{AC} \cos \omega t$ と振動すると仮定し、トンネル結合 H_T で2つの電極 (L, R) に接続した系を考える。

PATの条件 $\Gamma \ll \hbar\omega$ (ω は電磁波の周波数、 Γ はトンネル率) の下で、時間に依存するシュレーディンガー方程式を解き散乱理論から、トンネル過程を無限次まで含めて、電極LからRへの電流、さらに低温条件 $k_B T \ll \Gamma$ での微分コンダクタンス (電流の流れやすさ) の表式

$$-\frac{dI}{d\mu_R} = \frac{e}{h} \frac{4\Gamma_L\Gamma_R}{(\Gamma_L + \Gamma_R)^2} \sum_n \left[J_n \left(\frac{eV_{AC}}{\hbar\omega} \right) \right]^2 \frac{(\Gamma/2)^2}{(\varepsilon_0 + n\hbar\omega - \mu_R)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

を導出した (J_n は n 次のBessel関数)。

図(a)は単一量子ドットでの微分コンダクタンスを量子ドット内のエネルギー準位 ε_0 の関数として表している。電磁波照射によって、メインピークの高さの減少、サブピークの出現といったピーク構造の変化が見られる。

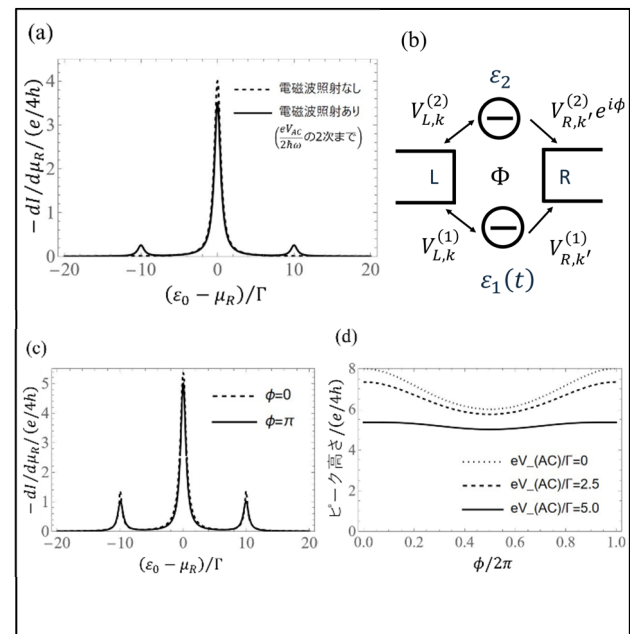
2. 並列2重量子ドットでのPAT

次に1の計算を用いて、2つの量子ドットがそれぞれ2つの電極に接続 (L, R) した、並列2重量子ドット系を考える (図(b))。2つの量子ドットのうち一方にのみ電磁波を照射し、エネルギー準位は $\varepsilon_1(t) = F_{AC}(t)$ と $\varepsilon_2 = \varepsilon_0$ とする。この時、2つの量子ドットの間に外部磁場 Φ を印加して系に

AB位相 $\phi = 2\pi\Phi/(h/e)$ を与え、アハラノフ・ボーム効果とPATとの関係を調べる。また、両量子ドット間の干渉しやすさ (コヒーレンス) を表す、 $p_\alpha = \Gamma_{12}^\alpha / \sqrt{\Gamma_{11}^\alpha \Gamma_{22}^\alpha}$ ($0 \leq p_\alpha \leq 1$) を導入する。例えば $p_\alpha = 0$ では2つの量子ドットが独立した状態を表す。1と同様にして電流、微分コンダクタンスの厳密な定式化を行った。

図(c)は $p_L = p_R = 0.5$ での微分コンダクタンスであるが、メインとサブピーク両方にAB位相 ϕ 依存、つまり干渉効果が見られる。図(d)はメインピーク高さをAB位相 ϕ の関数としてプロットしたもの (AB振動) である。電磁波の照射強度 eV_{AC}/Γ の増加に伴って、振動の振幅が減少しているが、これは電磁波を照射したことで干渉効果が現れづらくなっている (位相緩和) と考えられる。

- [1] T. H. Oosterkamp et al., Nature **395**, 873 (1998).
- [2] G. Platero and R. Aguado, Phys. Rep. **395**, 1 (2004).
- [3] S. Kohler, J. Lehmann, and P. Hänggi, Phys. Rep. **406**, 379 (2005).
- [4] K. Yoshida, K. Shibata, and K. Hirakawa, Phys. Rev. Lett. **115**, 138302 (2015).
- [5] P. K. Tien and J. P. Gordon, Phys. Rev. **129**, 647 (1963).



代表発表者 梅林 美悠 (うめばやし みゆ)
 所属 慶應義塾大学 理工学研究科
 産業技術総合研究所 新原理コンピューティング研究センター
 問合せ先 〒223-8522 神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1
 TEL: 045-566-1671 FAX: 045-566-1672

■ キーワード: (1) 量子ドット
 (2) フォトン支援伝導
 (3) アハラノフ・ボーム効果
 ■ 共同研究者: 江藤幹雄、慶應義塾大学