

テラヘルツ光駆動半導体超格子における光着衣電子・正孔系の多体問題

日野 健一 (筑波大学・数理物質科学研究科)

[背景と目的]

光と電子系が相互作用する際、光子場が強くなるに従い光・電子系を非摂動的に扱う必要があり、これを光の衣を纏った**光着衣電子**状態とみなす描像が有効になる。とりわけ、光子場が時間周期性を有する場合、これは **Floquet 状態** と呼ばれ、良い量子数として擬エネルギーを有するので、擬定常状態と考えることができる。本研究の物理系は、THz 領域の周波数をもつ単色光に駆動された半導体超格子(SL)である。ここでは、積層方向に静電場および駆動 THz 光 (L_d) 電場を印加した SL を対象とし、これを**動的 Wannier-Stark 階段(DWSL)**と呼ぶ。この系では、 L_d のピーク電場 (F_{ac})、周波数 (ω_d)、位相によって SL サイト間の結合の強さを変調できるので、キャリアの電気伝導度や擬エネルギーミニバンド幅が自在に制御可能になる。これは**光媒介トンネリング(PAT)**という現象の一種であり、とりわけ、**動的局在化(DL)**という現象の発現は注目すべきでもある[1]。しかしながら、高電場 L_d 領域 ($F_{ac} \geq 100$ kV/cm) における DWSL の研究は限定的であり、理論・実験ともに未踏領域といえる。本研究では、バンド間光遷移によるキャリア生成は、図 1(a)のように光着衣下の電子(e)及び正孔(h)が「擬定常状態」にあるとする描像で理論の構築を行う。そこで、最初に、光着衣電子・正孔の擬定常状態に内在する新奇現象を明らかにし、次に、これらの粒子を構成要素とする多体系物理の理論を構築することを主要な目的とする。このような視点は、図 1(b)の従来の描像とは一線を画するものである。

[研究内容]

単一電子(1e)系において、 F_{ac} の大きさによって DWSL の物理描像は大きく変遷する。低電場領域 ($F_{ac} = 10 \sim 30$ kV/cm) では単一サブバンドモデルは正当化されるが、 F_{ac} が増大するとこれは破綻し、**ac-Zener トンネリング(ac-ZT)**を介したサブバンド間結合が重要になる[2,3]。更に、 L_d が高電場領域に入ると、結合するサブバンド数は(連続状態も含め)無数になり、有限数のサブバンド間結合の描像も破綻する。この領域での 1e の古典的運動はある条件でカオスになるので、当該量子系の DWSL でも量子カオスの発現が期待される[4]。このような DWSL の問題を多チャンネル散乱問題に帰着させ、 F_{ac} の大きさに依存しない統一的な物理描像での理解を目指す。そこで、多彩な物理を内包する光着衣電子・正孔の DWSL を統一的見地から理解することと、これらを構成要素とする多体系を「擬静的相関」及び「動的相関」の二つの観点から理解することを目指す。ここで、次

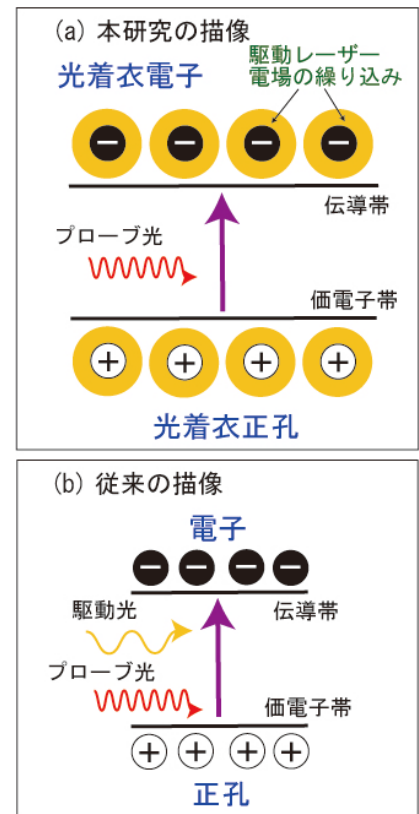


図 1 バンド間光遷移

の 3 件の課題を提示する。いずれの課題においても、DL や量子カオスの挙動に着目して、 F_{ac} 及び ω_d の変調を通して内在する物理とその量子制御の可能性を探索する。

(1) 光着衣電子の擬エネルギー構造 : $1e$ の DWSL の多チャンネル散乱問題を R 行列伝搬法[5]に基づき数値解析し、擬エネルギー共鳴状態の構造と安定性 (寿命) を明らかにする。

(2) 光着衣電子・正孔系の擬静的相関 (擬定常状態における相関) : 光着衣電子・正孔を構成粒子とする新奇な複合体《励起子($1e1h$)、荷電励起子($2e1h$)、励起子分子($2e2h$)など》(図 2) の少数多体問題を超球座標法[6]に基づき数値解析し、擬エネルギー構造及び擬静的相関効果を調べる。

(3) 光着衣電子・正孔系の動的相関 : プローブ光照射によるバンド間光遷移に際して、上記(2)の複合体生成の非平衡系量子ダイナミクスを半導体 Bloch 方程式[7]に基づき数値解析し、誘起分極の時間発展等を通して動的相関効果を調べる。

[研究の位置づけ]

DWSL の研究は 1986 年に始まり、1990 年代に入ると PAT の概念の導入があり、DL や擬エネルギーフラクタル構造など新奇な現象の研究や、SL における Anderson 局在、非対称二重量子井戸、分子振動、原子の超微細構造分裂などへ PAT を適用する研究、更に、非平衡系での非線形光学応答の研究が報告された。2000 年代に入ると、光超格子系 DWSL の実験、 $1e1h$ 系、 $2e$ 系の擬エネルギー計算、励起子ボゾン化法による非線形光学応答など多彩な研究が展開した。また、単色光に代わって二色光や周期的パルス列を L_d とする($1e1h$)系の量子制御の研究や、ac-ZT による擬エネルギー変調、バンド間光吸収スペクトル特異性の報告が行われた。近年このような現象は、原子のボーズ-アインシュタイン凝縮体やジョセフソン素子のクーパー対でも研究されている。一方、これらの光科学研究とは別に、カオス研究の側面から DWSL が対象とされた。課題(1)では、従来 F_{ac} の大きさごとに適用された個々のモデルに代わる新しい物理描像を提案し、高電場領域を中心に全 F_{ac} 領域に亘る DWSL の「統一的理解」を目指す。課題(2)、(3)では、電子相関の観点から、ac-ZT や量子カオスの挙動を内包する「新奇(新規)な」光着衣電子・正孔系多体問題の理解を目指す。

参考文献

- [1] M. Grifoni and P. Hänggi, Phys. Rep. **304**, 229 (1998) .
- [2] K. Hino, X. M. Tong, and N. Toshima, Phys. Rev. **B77**, 045322 (2008).
- [3] K. Hino, K. Yashima, and N. Toshima, Phys. Rev. **B71**, 115325 (2005).
- [4] M. Glück, et al., Phy. Rep. **366**, 103 (2002) .
- [5] K. Hino, Phys. Rev. B **64**, 075318 (2001).
- [6] K. Hino and J. H. Macek, Phys. Rev. Lett. **77**, 4310 (1996).
- [7] K. Hino, K. Goto and N. Toshima, Phys. Rev. B **69**, 035322 (2004).

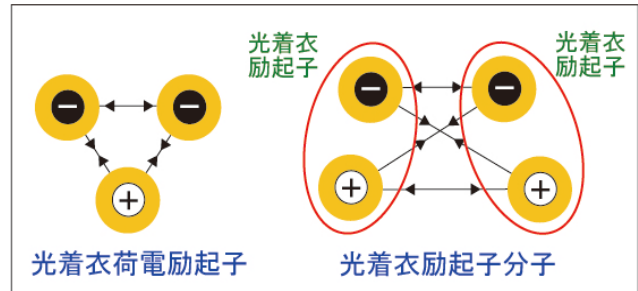


図 2 光着衣した電子・正孔複合系