

氏名	根本 裕也
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博甲第7672号
学位授与年月日	平成28年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
審査研究科	数理物質科学研究科
学位論文題目	

Theoretical Study of Resonance Structure in Dynamic Wannier-Stark Ladder Driven by Intense Terahertz Laser (高強度テラヘルツ波駆動動的ワニエーシュタルク階段における共鳴構造の理論的研究)

主査	筑波大学教授	工学博士	日野 健一
副査	筑波大学教授	理学博士	竹森 直
副査	筑波大学教授	工学博士	松石 清人
副査	筑波大学准教授	理学博士	全 暁民
副査	筑波大学講師	博士(理学)	前島 展也

論 文 の 要 旨

定電場が印加された半導体は、古くから研究対象となった最も基本的な物理系の一つであり、電子は角振動数 Ω_B (Bloch 振動数)で運動量空間を周期運動することが知られている。しかしながら、このような Bloch 振動が実時間で観測されたのは、バルク半導体ではなく、積層方向に定電場が印加された半導体超格子系においてである。これは、後者において、Bloch 周期($2\pi/\Omega_B$)が電子間の平均散乱時間に比べて十分短く、電子のコヒーレントな運動が保障されるからである。量子論的描像により Bloch 振動を定式化したものが Wannier-Stark 階段(WSL)と呼ばれるものであり、 $\hbar\Omega_B$ の等間隔の離散エネルギー準位が形成される。本論文で対象とするのは、この系にさらに定電場と平行に時間周期電場(cw レーザー)を印加した系であり、動的 WSL(DWSL) と呼ばれる。適切な位相変換(ゲージ変換)により、DWSL の全 Hamiltonian は Floquet の定理を満足する(時間周期性を有する)ように表されるので、当該の量子状態は電子と光の混成状態である着衣状態(Floquet 状態)によって理解される。

DWSL はレーザー電場が比較的強い非摂動領域(非線形光学過程)において顕著な特徴を示す。Bloch 振動数に対するレーザー周波数の比(η)が整数のとき、隣接する一連の離散 WSL 状態間に共鳴的な光吸収・放出遷移が起こるため、Floquet 状態の擬エネルギー(E)構造に特徴的な変化が発現する。このようなフォトン支援トンネル効果は $\eta=1$ のとき最も顕著であり、レーザー電場の強さ F_{ac} を次第に変化させると、絶縁体的特徴を有する離散 WSL 構造は金属的特徴を有する擬エネルギーバンド構造へ移行するようになる。さらに F_{ac} を変化すると、このバンド構造が消失し、すべての擬エネルギーが縮退した動的

局在状態を形成するようになる。一方、 η が有理数のとき、光子支援トンネル効果は抑制され、WSL 様の離散化された状態のみ発現する。この際、 E は η^{-1} の関数としてフラクタル構造(自己相似形)を有することが知られている。以上のような豊饒な物理的特徴を有する Floquet 状態は、半導体超格子系のみならず光超格子系においても多くの実験観測が行われてきた。さらに、近年、励起子系、強相関係、量子ホール系への展開も報告されている。

本論文で対象とするレーザー周波数は、テラヘルツ波領域から近赤外領域に亘る。とりわけ、テラヘルツ波領域では高強度化が進み、現在では数 100kV/cm~数 MV/cm 領域のピーク電場強度を有する光源が実用可能になっている。それに伴い、励起子準位間の Autler-Townes 分裂や半導体におけるトンネルイオン化など対応する周波数領域での非線形光学過程の研究が一気に進展している。このような高強度領域では、当該の DWSL における Floquet 状態は不安定化して有限の寿命で崩壊すると考えられる。従来、DWSL に関連する理論研究は、主として強束縛近似に基づいて解析されており、レーザー場によるバンド間結合(動的 Zener 効果)に起因する連続状態効果、とくに不安定性(寿命)を正確に評価することは不可能であった。この意味において、高強度テラヘルツ波領域での DWSL の研究は重要であり、内在する Floquet 状態の共鳴構造や新規な物理現象を調べることは意義あると考えられる。

本研究では、 η が整数および有理数の DWSL を R 行列 Floquet 理論に基づく多チャンネル散乱問題に帰着させ、Floquet 状態の寿命に対応する過剰状態密度 $\rho^{(ex)}(E)$ を大規模数値計算した。さらに、散乱理論に基づき $\rho^{(ex)}(E)$ の解析的表式を導出し、これが多チャンネル共鳴散乱断面積に対する Shore の公式と類似した構造を有することを見出している。具体的には、 $\rho^{(ex)}(E)$ は、単一チャンネル散乱からの形状共鳴による寄与 $\rho_0^{(ex)}(E)$ と多チャンネル散乱からの寄与 $\rho_{nr}^{(ex)}(E) + \rho_{res}^{(ex)}(E)$ の三つの項の和で表される。ここで、 $\rho_{nr}^{(ex)}(E)$ は Shore の公式における構造のないバックグラウンドからの寄与に対応し、 $\rho_{res}^{(ex)}(E)$ は特徴的な非対称スペクトル形状を示す Fano 共鳴の寄与に対応する。数値計算の結果とこれらの表式を比較することで、Floquet 状態の崩壊過程の物理的起因を特定することが可能になる。

ここでは、主として、 $\eta=1$ および $3/2$ の DWSL を調べ、レーザー電場 F_{ac} が大きくなるにつれて、 $\rho_0^{(ex)}(E)$ から $\rho_{res}^{(ex)}(E)$ の寄与が大きくなることを見出している。 $\eta=1$ の場合、動的 Zener 効果に起因するチャンネル間の相互作用(光子サイドバンド間結合)が大きいため、 F_{ac} が大きくなるにつれて、 $\rho^{(ex)}(E)$ の共鳴ピークは、 $\rho_0^{(ex)}(E)$ による単一の形状共鳴によるピークから $\rho_{res}^{(ex)}(E)$ による複数の Fano 共鳴ピークへと分岐し、短寿命化する。このような分岐過程は、 F_{ac} が大きくなるにつれて、 F_{ac} に関する高次項の寄与が $\rho_{res}^{(ex)}(E)$ の表式における自己エネルギー項に非摂動的に繰り込まれていくことから理解できる。この際、対応する Green 関数の分母の零点は単一の 1 位極から複数の1位極へと移行するため、ピークの方岐現象が現れると考えられる。一方、 $\eta=3/2$ の場合、 F_{ac} が大きくなると DWSL の特徴であるフラクタル構造は消失することが分かった。さらに、 F_{ac} が比較的大きい領域では、 $\rho^{(ex)}(E)$ は基本的には $\eta=1$ と類似した変化を示すが、単一の1位極から二つの1位極へと分岐する際、Floquet 状態が長寿命化するという特異な変化を見出した。これも自己エネルギー項の F_{ac} 依存性の観点から理解できると推察される。

以上、本論文では、高強度テラヘルツ波に駆動された DWSL の共鳴構造の定量的理解およびその物理的起因を明確化することに成功している。実験との比較による検証が期待される。また、多体系への展開も関心があるところである。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

当該論文の内容を中心に、本研究のオリジナリティやインパクト、知識の習得度や関連研究テーマに対する視野の広さ、数値計算技術の習熟度などの観点から質疑応答が行われた。自身の研究に関する理解は概ね良好であり、質疑に対して的確な応答がなされたと判断された。一方で、本研究の該当する分野全般における位置づけやインパクト、波及性、視野の広さなど、自身の研究の周辺知識に関して、もう少し深い理解が望まれた。

本研究に関連する掲載論文は現在 2 報ある。1 報は、 $\eta=1$ の DWSL に関する研究で、当該分野での国際的な基幹学術誌である *Phys. Rev. B* に掲載されている。もう一報は、この研究に関する国際会議発表におけるプロシーディングスである。これらの他に、 $\eta=3/2$ の DWSL に関する原著論文が現在投稿中の状況である。掲載された 2 報の論文の内容は問題ないとして、これらのみで学位授与に十分値するかという観点から、投稿中の論文に関して審議が行われた。この論文を精査して、計算データの精度や内容の新規性などを検証し、受理可能な論文であろうという判断がなされた。

〔最終試験結果〕

平成 28 年 2 月 18 日、数理物質科学研究科学学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。