

【領域番号】 2003

【領域略称名】 動的相関光科学

【領域代表者（所属）】 五神真（東京大学・大学院理学系研究科・教授）

研究領域の概要

レーザー技術の革新とナノテクノロジーや新物質開拓による物質科学の発展により、光と物質の科学技術は近年大きな展開を示しており、その一層の深化を図りその潜在力をさらに引き出す好機となっている。本研究領域では、先端レーザー分光技術、量子多体物理学の学理の進歩を背景として、未利用な物質の光効果・現象を探求し、その活用に向けた道筋を創ることを目的としている。このため、理論および実験物理・工学・材料化学など異なる学問分野において散在する最新の学術知識と研究者の融合連携を図り、その体系的整理と深化を進め、既存の技術の壁を破る原理を探求する。特に、半導体中の光励起状態として生じる多数の電子と正孔の相関効果である動的電子相関効果に主眼を置き、既存の半導体エレクトロニクスの基礎学理である一電子バンド理論の適用限界を明確にしつつ、この相関効果がもたらす特異な光効果・現象を引き出し、それを発現させるための物質科学—物質探索やナノ構造制御—の推進をはかる。動的相関電子系の学理を確立し、新規な光の科学と活用技術を創出し応用の道筋を探る。

研究目的及び全体構想

① 研究の社会的・学術的背景

発光ダイオードや半導体レーザーなどの半導体を用いた光素子は、現代の我々の生活に深く浸透している。これら光素子の基礎である半導体エレクトロニクスは成熟期にある。これらの基礎原理は、前世紀半ばに完成したバンド理論によっている。バンド理論は本来複雑な多数の電子系の運動を一電子問題に帰着させ、少数の物質パラメータによるデバイス設計を可能にした。これは、エレクトロニクスを工学として発展させた立役者である。しかし一方で、ナノ構造素子や低次元人工構造などで、キャリア間の相関が直接顔をだすことも明らかになってきた。これらは、既存の光エレクトロニクスの限界を突破する革新技術創出の鍵を示唆している。革新技術としては、「Shockley-Queisser 限界を超える高効率太陽電池」「シリコンを光らせる」「摂動域を超える光非線形性」「高速かつ高効率の光スイッチング」「しきい値ゼロのレーザー」「ショットノイズレベル以下の低雑音光源」「単一光子源」「量子情報処理・通信」などがある。これらの実現には、バンド理論を越えた多電子系としての効果を捉え、引き出すことが必要である。このためには、半導体という極めて制御性のよい優れた材料をさらに深く使い込むことと新物質系の利用を広げ、多体相関電子系に特有の光効果・現象を発現させ、それを活用する道筋を探ることが必要となっている。このような光と物質の科学を深化させることは、人類社会が抱えるエネルギー枯渇や環境保全といった地球規模の課題の解決にとって重要な役割を果たすはずである。

② 提案者の研究成果・背景と提案の経緯

本領域の提案メンバーは物質と光の相互作用について、基礎物理、工学、材料化学の分野において長年研究を積み上げて来た。例えば、励起子・励起子分子・荷電励起子などの電子励起状態の電子構造解明、あるいは、電子正孔プラズマやその凝縮状態としての電子正孔液滴、それらの相転移やクロスオーバー、さらには、励起子ボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC)・電子正孔 BCS 状態 (BCS 超伝導と同種の状態)、整数分数量子ホール系などのマクロな量子系についての基礎的な研究を、半導体材料を中心に進めてきた。これと並行して、これらの素励起が関わる超高速光非線形光学効果、低次元半導体レーザーの利得機構といった応用技術につながる現象についても実績を上げてきた。これらの研究において、光励起された電子—正孔系のキャリア間の動的電子相関効果の重要性を指摘してきた。近年注目を集めている「強相関電子系」も電子系の強い相関効果・多体効果が本質的であり本課題と関わりが深い。旧来の研究対象は主に基底状態近傍であり、超伝導のような輸送性質や磁性などの物理現象に対し、実験的および理論計算的な研究手法開発が中心課題であった。基底状態近傍の電子相関を詳細に調べることは、多体量子系の現象を正しく捉えそれを記述するという観点において王道であるが、一方で、そのような現象を発現させる物質系を支配しているエネルギースケールは eV 以上の大きなものであること

も事実である。本領域参加メンバーはこれらの物質の光学応答に着目し、大きなエネルギースケールの現象に直接切り込み、その本質に直裁に迫る研究を開始している。近年注目を集めている「光誘起相転移」はその好例で、光による電子励起がトリガーとなって物質全体の相が変化するものである。これは本領域に含まれるものであるが、従来は、格子系やスピン系などの自由度との結合を介した相転移が中心であり、多体電子系そのものが創り出す状態を動的に捉えるという観点での研究例は少ない。そこで、我々は、理学工学の枠を超えて物理、工学、材料化学といった幅広い分野にまたがる連携によりこの課題にも組織的に取り組み、動的相関電子系の学理をより広い視点でとらえ、幅広い分野の人々にその重要性を伝えていきたいと考えた。

③ 研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか。該当する新学術領域のポイントなど

本領域では、分光学・量子光学、半導体デバイス工学、ナノ材料化学の3の分野と、光と半導体の物理実験と理論を連携させた学際共同研究により、動的相関電子系における新規な光効果・現象を組織的に研究し、その学理を確立し、新しい光の科学と活用技術を創出することを目指す。

分光学・量子光学との連携 (A01)では、冷却原子系の量子凝縮や光周波数標準研究の分野で近年急速に発展した精緻なレーザー分光技術とその概念を、半導体の励起子系で展開する。これにより、励起子系の自発的量子凝縮を世界にさきがけて実現し、動的電子相関効果の本質を引き出す。また、量子光学研究との密接な連携をはかり、物質系のコヒーレンスと輻射場の相関の量子光学効果を探求し、ナンバーズテートの発生など新たな光量子機能発現の道筋を探る。

半導体デバイス工学との連携 (A02)では、豊富な技術蓄積を背景として、クリーンな低次元ナノ構造成長と精緻なデバイスプロセスにより高度かつ高品質な半導体光デバイスを作製し、ゼロから金属的な高密度域に至るキャリア密度制御、量子閉じ込め、外場、温度依存性などに応じて、動的電子相関効果が光学応答や光機能にどう反映し活用可能かを系統的・定量的に調べ上げる。

ナノ材料化学との連携 (A03)では、様々な化学的手法によって得られる多彩多様な半導体ナノ材料および微粒子系に対して、時空間ダイナミクスを計測する分光手法を新たに開発適用することで、特異的あるいは普遍的な動的電子相関効果の発現と機能性を発見し解明する。

量子多体系理論と実験の連携 (A04)では、動的相関電子系をマイクロに記述する新しい理論体系や計算手法の構築を行い、上記の様々な材料や手法の実験において得られる実験結果と比較検討する。系統的理解・解釈を得て、全体として学理に纏め上げ、新現象・新機能の予測を行う。

これらに加えて、(A01-04)の物理・工学・材料化学の各分野で特に発展している研究手法、例えば、材料の開発・加工・評価手法、設計・数値計算法、冷却・外場印加、狭帯域精密分光・顕微分光・時間分解分光・中～遠赤外分光など、研究手段の面での連携も重視して進める。本計画では、異なる学問領域で異なる手法を武器に活躍する強力な中堅研究者を核として領域を形成し、そこに若手研究者・学生を有機的に連携させ、それぞれの視点や手法をぶつけ合いながら共同研究と人材育成ができるようにする。個々の研究成果と共に、それらを集約した半導体動的相関電子系の学理を創出し、新しい光科学や光技術の基礎とする。共通の学理・基礎を、物理、工学、材料化学の各分野に帰還・浸透させることにより、更なる発展・展開を期待する。

④ 本領域の発展がどのように学術水準の向上・強化につながるか

本研究の対象である光励起状態の動的電子相関効果は、物理・工学・材料化学などの分野において、断片的な議論は行われ始めている。しかし、同じ現象や効果が分野ごとに違う言葉で語られ、さらには電子相関が「多体効果」という名のブラックボックスにしまい込まれており、その本質の系統的理解は手つかずの状態である。本領域の研究の発展により、動的相関電子系の学理形成と異分野間交流が進めば、物質の光効果について、一電子バンド理論を越えたレベルでの共通した考え方、基礎、手法などが形成される。分野間を超えて統一的に理解され、共通の言葉で語れるようになり、先端学理と技術の共有化が分野を超えて進み、関連する分野全体の学術研究水準の向上・強化がはかれる。また、eV オーダーの大きなスケールでの議論は、基底状態近傍での物性物理学にも新たなインパクトを与えうる。さらには、全く新しい融合的学術や新しい産業が興る可能性もある。半導体の高い制御性のさらなる活用を進める一方でそれを補う物質の開拓にも寄与できる。これにより、未利用の光効果を利用可能なものとし、太陽光エネルギーの活用など地球持続に向けた人類社会の課題解決にも寄与できる。