

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2015～2016

課題番号：15H06132

研究課題名(和文) 電磁気学における量子・半古典クロスオーバー：半導体レーザーをモデル系として

研究課題名(英文) crossover between quantum and semi-classical physics in semiconductor lasers

研究代表者

挟間 優治 (HAZAMA, YUJI)

東京大学・物性研究所・助教

研究者番号：80759150

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：これまでに、高密度に励起された半導体からフェムト秒オーダーの光パルスの発生が確認されている。このような現象では、電子系の量子力学的コヒーレンスや極端に非平衡なエネルギー分布とその時間変化の関与が予想されるが、その発現機構は現在に至るまで解明されていない。本課題では、時間分解発光分光法を用いて高密度励起条件下で試料から放出された光パルスのスペクトルの時間変化を詳細に観察することで、短パルス発生機構の解明に向けた研究を推進した。

研究成果の概要(英文)：In the previous study, it was found that a short pulse can be generated directly from a photoexcited semiconductor structure. However, the role of quantum coherence or nonequilibrium distributions of carriers in this phenomenon is still unclear. In this study, temporal change of the spectrum of such short pulses was investigated using time-resolved photoluminescence spectroscopy.

研究分野：光物性

キーワード：半導体レーザー

1. 研究開始当初の背景

半導体内部に生成された電子と正孔は、再結合して消滅することで光を放出する。電子と正孔の密度が十分に低い場合、放出される光には時間的なコヒーレンスは存在しない。このような光の放出は、発光として知られている。一方、半導体と光共振器構造を組み合わせると十分な光学利得が得られる状況では、光の誘導放出によって発光とは異なる時間的なコヒーレンスを有する光が放出される。従来のレーザーでは、この現象を利用して高強度かつ高コヒーレンスの光を発生させている。このようなレーザー発振の物理は、物質系を量子力学的、電磁波を古典的に扱う半古典論によってよく記述されることが知られている。一方、物質系の位相緩和時間が十分に長い場合、電磁波との相互作用によって物質内部に生じる誘起分極の集団が自発的に位相を揃え、ある瞬間に同時に光を放出して崩壊する超蛍光という現象が起きると予測された(図1)。この現象は、超蛍光と呼ばれるもので、原子ガスや量子ドット集団において実際に観測されている。超蛍光は、複数の誘起分極が電磁場の量子揺らぎを通して同調する量子電磁気学的な現象であり、物質と電磁場をともに量子力学的に取り扱う必要があるという点で、半古典的なレーザー発振とは異なる階層に属する現象である。超蛍光では誘起分極間の同調が完了するまで物質系の量子力学的なコヒーレンスが保たれる必要がある。そのため、電子の位相緩和時間が短い固体中では長年にわたり観測されていなかった。近年、磁場を印加した半導体量子井戸において類似の現象が観測され、注目を集めた。さらに、高密度に光励起された量子井戸中で、電子および正孔の擬フェルミ面から超蛍光と類似の光放出現象が観測された。このような系は、原子等の希薄な系とは異なり、半導体内部の電子・正孔間のクーロン相互作用が強く働く多体系であり、超蛍光の発現は理論的に非自明である。また、長年にわたって理論的に議論されている光励起キャリアのBCS状態との関連も指摘されており、電子・光子多体系の新たな状態として興味深い対象である。実験的にも、これまでの測定では放出される光パルスの特性が希薄な系の場合と類似していることが指摘されているものの、自発的誘起分極の発生を直接観測した例は無く、超蛍光と同様の効果が働いているかという点について検証の余地がある。また、半導体を光パルスで瞬間的に励起する際には、光学利得の時間的な変化によって光パルスが発生する利得スイッチや、発光が固体中を伝播する過程で誘導放出によって増幅されるASE等の現象も引き起こされる可能性があり、自発的な誘起分極の発生を伴わない場合でも、超蛍光と類似の光の放出が起き得るため、このような現象を理解するためには多角的な測定が不可

欠である。

研究代表者の所属する物性研秋山グループでは、GaAsバルク半導体レーザーを作製し、その試料を光励起した際に百フェムト秒オーダーの幅を持つ光パルスが発生することを観測した。この時間スケールは、半導体内部の電子の位相緩和時間に迫るものであり、フェムト秒パルスの発生には超蛍光発現時のような電子系の量子力学的な位相コヒーレンスが関与している可能性がある。また、原子等の系とは異なり、半導体中の電子状態にはバンド分散が存在するため、バンド内での高速のエネルギー緩和過程とそれによって形成される非平衡なキャリアのエネルギー分布も放出される光パルスの特性に影響することが予測される。そのため、更なる短パルスの発生を行うためには、電子系のダイナミクスを詳細に観察し、パルスの発生機構を解明した上で、適切なデバイス設計を行うことが不可欠である。

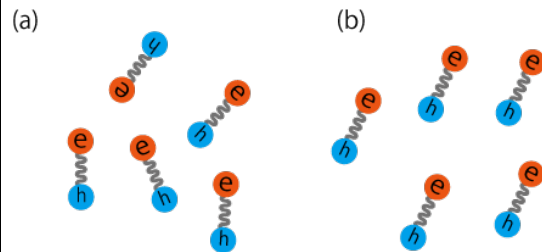


図1:(a)誘起分極間に位相相関が無くランダムに振動している状態。(b)超蛍光の発達段階。電磁場の量子力学的な揺らぎを介して誘起分極が位相を揃えて運動している状態。

2. 研究の目的

半導体からの光パルス発生においては、超蛍光との関連が指摘されている。固体でのこのような現象では、電子系の量子力学的な位相コヒーレンス、電子および正孔のバンド内緩和に起因する非平衡性、キャリア間のクーロン相互作用の影響、光パルスの空間伝播効果など、複数の要因が影響を与えている可能性がある。そのため、光パルスの発生機構を正確に理解し、原子系等で確認されている超蛍光との関係を明確にするためには、光励起キャリアの密度等の条件を系統的に変化させながら放出される光パルスの振る舞いを実験的に検証することが不可欠である。そこで本研究では、短パルス発生の機構に迫ることを目的として、励起光の強度を系統的に変化させた上で、導波路構造を有するGaAs半導体試料から放出される光パルスの光学ス

ペクトルの高速の時間変化を観察した。

3. 研究の方法

分子線エピタキシー法によって作製した GaAs バルク半導体レーザー試料に対して、励起光強度を変えながら時間分解発光測定を行った。顕微分光型の光学系を構築し、試料の導波路方向に対して励起光を線状に照射することで、導波路内部を一様に光励起した。試料端面から放出された光を分光器に導入することでエネルギー的に分解し、その後ストリークカメラを導入することで時間分解発光スペクトルを得た。高密度励起条件下での発光特性も検証するため、励起光源には繰り返し周波数 1 KHz のチタンサファイア再生増幅器を用いた。

また、上記の測定と平行して、光キャリアを生成した GaAs 量子井戸試料に対して縮退四光波混合測定を適用することによって、高密度励起条件下での電子系の位相緩和時間を調べた。測定では、励起用と四光波混合測定用の同期した 2 台のレーザーを用いることで、高密度励起下での位相緩和時間の励起光強度依存性を測定した。

4. 研究成果

時間分解発光測定を行ったところ、最も低密度の励起条件下では、まず時間とともにレッドシフトするパルスが現れ、それから数十ピコ秒後に比較的にブロードなパルス幅を持つ 2 つ目のパルスが出現した (図 2)。励起光強度を増加させると、1 つ目のパルスのスペクトル幅が増加する一方で、2 つ目のパルスは相対的に強度が弱くなり、消失した。さらに励起光強度を増加させると、1 つ目のパルスが時間とともにレッドシフトする途中で 2 つのパルスに枝分かれした。そのうち、より低エネルギー側のパルスはレッドシフトの後半で光の強度が最大になったが、その付近でパルスが特徴的な時間遅延を示した。このような時間遅延は高密度励起の場合ほどより顕著に見られた。先行研究では、光励起キャリアのバンド内緩和によって形成される非平衡なキャリア分布とフェルミ統計性から短パルスの発生が議論されていた。今回の観測結果は、このようなモデルを超えた豊かな物理の存在を示唆している。特に、高密度励起下で観測されたパルスの遅延は、超蛍光の特徴的な振る舞いであることから、電子系の位相コヒーレンスの関与を示唆する興味深い結果である。

一方、縮退四光波混合の測定では、励起光強度を透明キャリア密度まで増加させたところ、励起子の位相緩和時間が減少する振る舞いが見られた。これは、励起子密度が増加することで励起子間散乱が増強されたためであると考えられる。

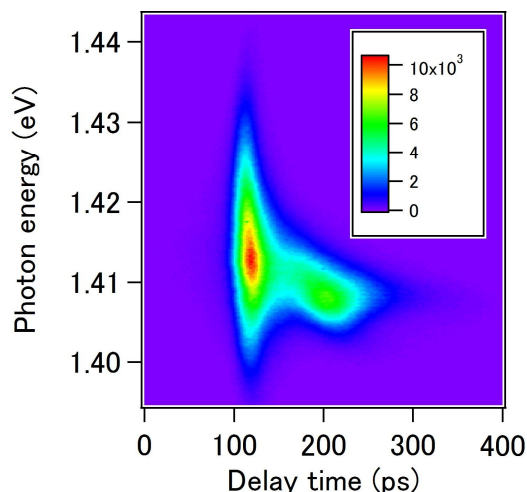


図 2 : ストリークカメラを用いて測定された、低密度光励起条件下において半導体レーザー試料から発生した光パルスの時間分解スペクトル。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

なし

〔学会発表〕(計 4 件)

1. 伊藤隆、中前秀一、中村考宏、挾間優治、金昌秀、小林洋平、吉田正裕、秋山英文、「利得スイッチ半導体レーザーによるフェムト秒パルス発生と評価」、2015 年第 76 回応用物理学会秋季学術講演会、2015-09-13 - 2015-09-16、名古屋国際会議場 (愛知県・名古屋市)

2. 伊藤隆、中前秀一、中村考宏、挾間優治、金昌秀、小林洋平、吉田正裕、秋山英文、「利得スイッチ半導体レーザーにおけるフェムト秒パルス発生のメカニズム」、日本物理学 2015 年秋季大会、2015-09-16 - 2015-09-19、関西大学 千里山キャンパス (大阪府・吹田市)

3. 伊藤隆、中前秀一、挾間優治、中村考宏、金昌秀、小林洋平、吉田正裕、秋山英文、「利得スイッチ半導体レーザーの短パルス発生限界」、レーザー学会第 37 回年次大会、2017/01/07-09、徳島大学常三島キャンパス (徳島県徳島市)

4. 中前秀一、伊藤隆、中村孝宏、金昌

秀、挾間優治、黒田隆之助、秋山英文、「半
導体反転分布状態に対する位相緩和測定」、
日本物理学会第 72 回年次大会、2017/3/17-20、
大阪大学・豊中キャンパス（大阪府豊中市）

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

挾間 優治 (HAZAMA, YUJI)
東京大学・物性研究所・助教
研究者番号：80759150