半導体量子ドット中の量子ビットのデコヒーレンス制御とコヒーレント操作に関する研究
(0213015)
Decoherence suppression of excitons in semiconductors by bang-bang control

研究代表者
南不二雄　東京工業大学大学院理工学研究科
Fujio Minami, Department of Physics, Tokyo Institute of technology

研究分担者
松下道夫(H14 年度～H15 年度)、黒田隆（H14 年度)、小川佳宏（H16 年度～）
Michio Matsushita, Takashi Kuroda, Yoshihiro Ogawa
東京工業大学大学院理工学研究科
Department of Physics, Tokyo Institute of technology

研究期間　平成 14 年度～平成 18 年度

本研究開発の概要
本研究では、光パルス列を用いて量子ビットのコヒーレンスが破壊される過程であるデコヒーレンス過程を凍結し、その間に量子ビットのコヒーレント制御を実現するという原理的に新しい方法を開発することを目的としている。具体的には、半導体中の励起子準位を対象として、コヒーレントなフェムト秒光πパルス列により量子ビットのデコヒーレンス過程の凍結を実現することを目的とした。その結果、励起子のデコヒーレンス時間がパルス列照射により延びるという画期的な成果を得ることができた。この方法を、半導体量子ドット中の励起子準位に対して適用し、この量子ビットに対してデコヒーレンスフリーの環境を作成することも目的とした。

Abstract
We report the demonstration of decoherence control on excitons in semiconductors by using successive femtosecond pulses, i.e., the multi-wave mixing method. The intermediate pulses act as π-pulses, which reverse the time evolution of non-Markovian dynamics. By changing the pulse interval conditions, we confirmed for the first time the suppression of exciton decoherence by π pulse irradiations. From the analysis of the decoherence, it is found that the multi-wave mixing technique can successfully be applied to determine the reservoir parameters. We also apply this technique to excitons in GaAs quantum dots. The decoherence suppression of excitons is demonstrated even in quantum dots.

１．まえがき
量子計算、量子通信等の量子情報処理においては、２準位系の波動関数の重ね合わせ、すなわち量子ビットをいかに操作するのかが最も重要な要素の一つとなっている。この操作が可能なのは波動関数の重ね合わせのコヒーレンスが持続している間のみだが、外部環境との相互作用によりコヒーレンスは壊される。従って、デコヒーレンス過程をいかに抑えて量子ビットのコヒーレント操作をしやすくするかが解決すべき課題である。そこで本研究では、多数のπパルスを入射して、時間反転を繰り返すことでデコヒーレンスの抑制が可能であると考え、従来は不可能と思われていた物質中のデコヒーレンス過程を凍結する試みを行った。

２．研究内容及び成果
一般に不均一広がりがある系で位相緩和時間を調べるためには四光波混合法が用いられる。最初のパルスで作られた励起子の位相緩和を抑制するためにさらに 1 つパルスを入射すると六光波混合の励起配置となる。抑制パルスの入射時間を変えながらこの信号を調べることで位相緩和時間の変化する様子が分かる。通常位相緩和は現象論的に導入された T_2 で表わされるが、熱浴の相関時間と同じくらいに速い時間領域になると緩和定数である T_2 のみでは表わされず、非マルコフ過程が位相緩和時間を決める重要な役割をする。したがって非マルコフ領域内でπパルスを入射して時間反転を起すことでデコヒーレンスの抑制が可能であると考えた。

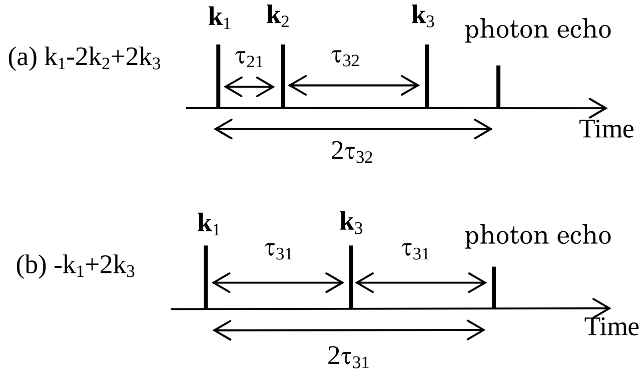

図１　六光波混合(a)と四光波混合(b)におけるパルスの時間的順序

実験では、試料として層状化合物半導体 GaSe を用い、試料に３つのパルスを照射して、複数の六光波混合信号の中からデコヒーレンスの凍結作用が期待できる $\mathbf{k}_1$-2$\mathbf{k}_2$+2$\mathbf{k}_3$方向の信号を観測した。これは 2$\mathbf{k}_3$-$\mathbf{k}_1$方向の四光波混合信号に、デコヒーレンスを制御するためのパルス＃２を加えた過程とみなすことができる(図１参照)。通常の T_2理論によると、この方向の六光波混合信号の時間積分強度は＃１と＃２パルスの時間間隔 τ_{21}に依存せず、τ_{32}のみで決まる。したがって、＃２パルスの入射時間

τ_{21}を変えてエコーの積分強度を観測することにより＃2パルスの励起子デコヒーレンス過程への影響を調べることができる。τ_{21}を変えながらエコー強度を遅延時間τ_{32}の関数として表したものが図２である。

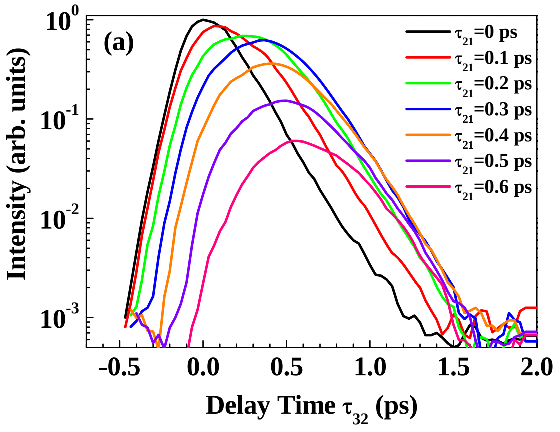

図２　六光波混合信号のτ_{32} 依存性

実験の特徴として空間を選択するだけで同じ条件のまま四光波、六光波混合の信号両方を測定することができる。四光波混合では、2つのパルスの時間間隔を変えながら信号強度を測定することで励起子の位相緩和時間を調べることができ、この系での位相緩和時間が約 1ps と見積もることができた。六光波混合の場合、第3パルスの遅延時間を変えながら信号強度を測定することで位相緩和の情報が得られる。つまり抑制パルスである第2パルスの入射時間を変えて測定した六光波混合の信号形状を比較することで抑制パルスの影響が分かる。第 2 パルスが第 1 パルスと重なっている時は緩和が起こる前に第 2 パルスは入射していて、四光波混合と同じ過程となってしまうため、四光波混合信号とほぼ同じように減衰する信号形状となっている。第 2 パルスの入射時間を徐々に遅らせていく(τ_{21}を大きくする)と信号形状が第 3 パルスの遅延時間の遅い方へずれていく結果が得られている。つまり第 1 パルスで作られた分極が一定の強度まで減衰してしまう時間が後ろのほうに延びたということを意味している。信号が時間的にずれるのは第2パルスの遅延が約0.4psまでで、さらに入射時間を遅らせても信号はさらにはずれなくなっている。このことから今回用いた試料においては熱浴の相関時間はおよそ 0.4ps であり、系が非マルコフ的に振舞うのも約0.4psまでであると考えられる。これらの結果から我々が行った実験が固体で初めて、抑制パルスによって信号の減衰を抑え、位相緩和時間を延ばしたことを示したと考えられる。

さらに、制御パルスをもう1本追加して、4本のビームを照射することにより、更なるπパルスによる励起子のデコヒーレンス過程の凍結が可能であるかの検討も行った。結果は満足すべきものであり、励起子のデコヒーレンス時間がさらに 0.4ps ほどパルスにより延びるという画期的な成果を得ることができた。

これらの結果を熱浴と量子ビットが相互作用しているという理論モデルを用いて考察し、この系の相関時間などのパラメーターの値を求めた。

同時に、本研究で量子ビットとして取り扱う量子ドット中の電子の状態を光学的に詳細に調べ、この系でデコヒーレンス制御の実験を行う研究も行った。単一の量子ドット中の電子状態の微細構造を測定した。最も量子ビットのコヒーレント操作が行い易い電子準位を探求し、その準位を使用してデコヒーレンス制御とコヒーレント操作に関する研究を行った。

量子ドット系でのデコヒーレンス制御の測定に対しては、単純な多光波混合法では実験が困難であるので、従来の方法より感度の点で数段優れているヘテロダイン検波法を用いた多光子混合法の開発を進めた。実際に量子ドット系でデコヒーレンス制御の実験を行うために、ヘテロダイン検波法を用いた多光子混合法の変調周波数の最適化に取り組み、GaAs 量子ドット系で光パルス照射によるデコヒーレンス制御を行う上で必須の時間領域である非マルコフ領域での四光子混合信号の観測に成功した。この方法は提案時には考えていなかった方法であるが、量子ドット系での多光波混合の実験は予想していたよりも困難であることが分わかり、新たに導入した測定法である。この方法の導入により、感度の問題は克服され、かつ GaAs 量子ドット系で音響フォノンと励起子の相互作用をコヒーレント制御できたので、この系で光パルスによるデコヒーレンス制御が可能になった。

この方法はどのような系にも適用することができるため、量子情報の研究の対象を選ぶ必要がなくなり、半導体の量子情報処理素子としての応用への道が開かれる可能性が高くなる。また多光波混合法を用いると熱浴との相互作用に関する知見が得られるため、フォノンとの相関が明らかになり、物理の基礎的な理解も得られると期待される。

３．むすび

非マルコフ性が顕著に現れる光励起された直後の非常に早い時間領域では、通常の現象論的に取り入れられたT_2緩和という概念が通用せず、この領域を積極的に利用すると今までに不可能と思われていた物質中のパラメーターであるデコヒーレンス過程制御が可能となることが分かった。

近年盛んに研究が行われている量子計算、量子情報通信においてもデコヒーレンスを制御するということは重要なテーマであるので、多光波混合法を用いる今回の結果の意義は大きいと思う。また、半導体中の励起子と熱浴との相互作用に関する詳細な情報も得られる方法でもあるので今回の成果の波及効果は大きいと考えられる。

【誌上発表リスト】

[1] Y. Ogawa, F. Minami, “Coherent control of electron-phonon scattering and the dephasing process in GaAs multiple quantum wells”, Phys. Rev. B75, 073302 (2007).

[2] T. Kishimoto, A. Hasegawa, Y. Mitsumori, J. Ishi-Hayase, M. Sasaki, F. Minami, “Decoherence suppression of excitons in GaSe using three successive femtosecond optical pulses”, Phys. Rev. B74, 073202 (2006).

[3] M. Sasaki, A. Hasegawa, Y. Mitsumori, F. Minami “Theory of multiwave mixing and decoherence control in qubit array system, Phys. Rev. B 71, 165314 (2005).

【登録特許リスト】

[1] 長谷川敦司、佐々木雅英、南不二雄、岸本直、「半導体中の励起子の位相緩和制御方法」、特許公開 2006－0987