

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 7月25日現在

機関番号：14501

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656050

研究課題名（和文） 励起子量子ビートを利用した超高速光スイッチの実現

研究課題名（英文） Realization of ultrafast optical switch based on exciton quantum beats

研究代表者 小島 磨

(KOJIMA OSAMU)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00415845

研究成果の概要（和文）：

本研究では、超高速光スイッチの実現に向けて、半導体中の励起子準位間の干渉効果である量子ビートによる超高速光応答を利用し、そのスイッチング特性およびその制御性を明らかにすることを目的とした。波形スペクトルを精密制御したパルスを GaAs 薄膜に照射し、ポンプ-プローブ法による測定を行った。その結果、重心運動閉じ込め系で初めて、ポンプ-プローブ法による量子ビートの観測に成功した。さらに相互相関信号の測定から、ポンプ光の照射により、プローブ光が最大で40%程度変調されることを見出した。これらの結果は、超高速光スイッチの実現に向けて重要な知見であると考えている。

研究成果の概要（英文）：

To realize the ultrafast optical switch, the use of the quantum beat oscillation, which is the coherent oscillation of excitons induced by simultaneous excitation of two exciton states, has been proposed. In the GaAs thin film with the thickness of 110 nm, the center-of-mass motion of excitons is confined and quantized, so that the discrete levels are created. We found that the control of the probe pulse is important factor to realize and observe the quantum beats. Furthermore, measurement of the cross-correlation signal suggests that the modulation of the probe pulse is 40 %. These results are essential to realize the ultrafast optical switches based on the quantum beat with high repetition rates.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,100,000	930,000	4,030,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎・応用光学・量子光工学

キーワード：非線形光学、超高速光スイッチ、励起子、半導体

1. 研究開始当初の背景

光情報通信分野において、光を光で操作する超高速光スイッチの実現が期待されている。光子同士はほとんど相互作用しないため、半導体中の励起子を介して光を制御する方法が注目されている。超高速光スイッチの研究は、量子状態間のサブバンド間遷移やフォトニック結晶を利用する導波路構造型や量子ドットを利用した面型デバイスなどが提

案されている。一方、これまで、量子井戸構造などの低次元系半導体における励起子ダイナミクスを、種々の超高速分光法により明らかにしてきた。特に励起子準位間の干渉効果(量子ビート)によるコヒーレント振動に関する研究から、半導体薄膜中の励起子の非線形光学応答に関する研究において、この量子ビートにより、励起パルス幅に匹敵する超高速応答を得られことを見出していた。これら

の成果は、励起子の高い振動子強度を利用した上で、超高速な応答を得られることを示唆している。これらの結果から、励起子準位間干渉効果を利用した従来にない高効率な超高速光スイッチが実現できると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、次世代超高速光通信の基幹デバイスであるフェムト秒の時間スケールで応答する超高速光スイッチの実現に向けて、半導体中の励起子準位間の干渉効果による超高速光応答を利用し、そのスイッチング特性およびその制御性を明らかにすることを目的とする。半導体中に閉じ込められた励起子の離散化された2つの準位を超短パルスにより、同時に励起することで、これらの準位間の干渉効果である励起子量子ビートが生じる。この励起子量子ビートによる振動構造が過渡応答信号に重畳することにより超高速応答を得ることができる。そこで、この応答の光スイッチとしての特性を評価し、さらに振動に合わせてポンプ・パルスをもう一度入射することで、コヒーレント制御することを試みた。

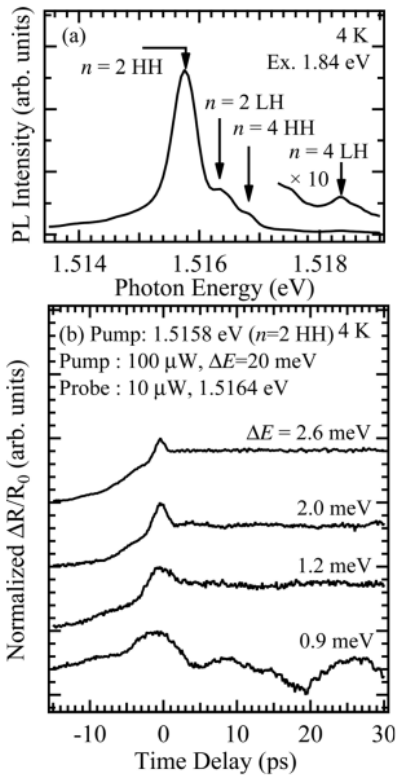


図1 発光スペクトルとポンプ-プローブ信号。

3. 研究の方法

試料には、膜厚 110 nm の GaAs 薄膜を用いた。これを、反射型ポンプ-プローブ法により評価した。その際、一对の回折格子とシリンドリカルレンズの中心にスリットを配置したスペクトル幅制御系により、プローブ光のスペクトル幅とエネルギーを適切に制御することで、重心運動閉じ込め状態での量子ビートが明確に出現することを明らかにした。そして、これを利用した励起子量子ビートの超高速光スイッチング性能を明らかにした。

超高速光スイッチのスイッチング特性の評価方法として、プローブ光の時間プロファイル測定する。試料から反射されたプローブ光とゲート光を、非線形光学結晶である BBO 結晶に入射する。この時に、位相整合条件が満たされた場合、プローブ光とレーザー光との和周波光が発生するので、これを観測すれば、プローブ光の時間プロファイルを得ることができる。

4. 研究成果

図 1(a)は、GaAs 薄膜の発光スペクトルである。この図から励起子エネルギーを見積もり、プローブ光のスペクトル幅を制御して、反射型ポンプ-プローブ法による応答特性の測定を行った。

図 1(b)は、プローブ光のスペクトル幅のみを制御して測定した結果である。プローブ光のスペクトル幅を狭めることで、ブロードバンドパルスを使用した場合には観測されなかった超高速応答が時間原点付近に出現した。これは、最大の応答強度を有する最低次の励起子状態の応答が、プローブ

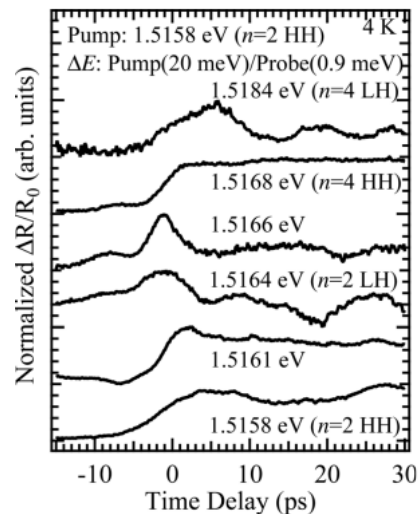


図2 プローブ光エネルギー依存性。

光のスペクトル幅を狭めることでより明瞭に観測できるようになったためであると考えている。スペクトル幅が励起子準位間のエネルギー差程度である 0.9 meV で信号に振動構造が出現している。

この振動構造が励起子量子ビートによるものであることを明らかにするため、この 0.9 meV の条件で、プローブ光エネルギー依存性を測定した。その結果を、図 2 に示す。検出エネルギーが 1.5184 eV および 1.5164 eV の場合に、明確な振動構造を観測した。これらの振動構造の周期から、これらが重心運動閉じ込め励起子間の量子ビートであると結論付けた。これまでポンプ-プローブ法により重心運動閉じ込め励起子の量子ビートを観測した例はほとんどなく、これが初めての結果であると考えている。このように、プローブ光のスペクトル幅を制御することで量子ビートが観測された理由として、複数のポラリトンモード間の干渉を考えている。つまり、スペクトル幅が広いプローブ光を用い、3 つ以上の励起子ポラリトン状態を観測した場合、それらの応答が破壊的に干渉しあうために、量子ビートが観測できなくなると考えている。つまり、これは通常の検出過程の問題とは異なることを明らかにした。

そして、検出エネルギーを 1.5166 eV とした場合に、超高速応答が出現している。これは、量子ビートによる振動と運動量緩和に起因するものと考えている。そこで、この応答による変調効果を明らかにするために、ポンプ光を照射した場合とそうでな

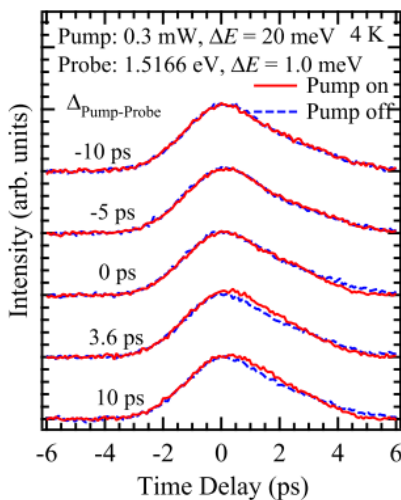


図 3 相互相関信号。

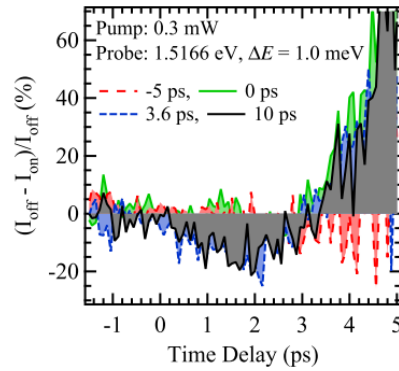


図 4 ポンプ光入射前後の強度比。

い場合のプローブ光の時間波形を測定した。測定は、相互相関法で行った。その結果を、図 3 に示す。この測定では、プローブ光のスペクトルを 1.5166 eV でスペクトル幅を 1.0 meV とし、ポンプ光との時間差を様々に変えて、測定を行った。ポンプ光を照射することで信号強度が増加しており、これはプローブ光の強度が変調されていることを意味している。その変調量を明らかにするために、ポンプ光入射前後の比を求めた結果を図 4 に示す。ゲート光との時間差が大きい 4 ps から 5 ps 付近で、 40% を超える変調量を得ることができた。

量子ビートによるスイッチングにおけるパターン効果の抑制の効果を明らかにするために、ダブルパルスポンプ-プローブ法による反射率変化信号の測定を行った。その結果を図 5 に示す。二つのポンプパルスの時間差を、 Δt_{12} で示している。 Δt_{12} が 8 ps 以上の場合に、明確に二つのポンプパルスによる応答を得ることができ、さらに 10 ps では、パターン効果はほとんどない。したがって、量子ビートによる高速緩和の利用は、超高速光スイッチの実現において、重要な寄与を与えると考え

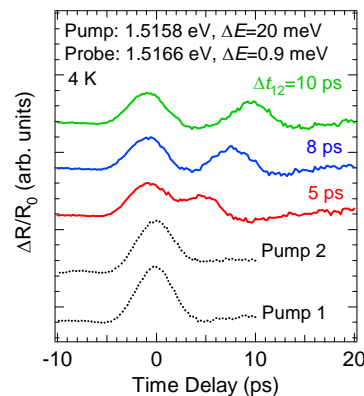


図 5 ダブルポンプによる測定結果。

えている。

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 9 件)

1. O. Kojima, S. Ohta, T. Kita, T. Isu, “Effects of pumping on propagation velocities of confined exciton polaritons in GaAs/Al_xGa_{1-x}As double heterostructure thin films under resonant and non-resonant probe conditions”, J. Appl. Phys. **113**, 013514 (2013). (査読有)
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4772717>
2. H. Tanaka, O. Kojima, T. Kita, K. Akahane, “Enhancement of optical anisotropy by interconnection effect along growth direction in multistacked quantum dots”, Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 012001 (2013). (査読有)
<http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.52.012001>
3. O. Kojima, K. Mizoguchi, M. Nakayama, “Quantum beats of type-I and type-II excitons in an In_xGa_{1-x}As/GaAs strained single quantum well”, J. Appl. Phys. **112**, 043522 (2012). (査読有)
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4748339>
4. S. Ohta, O. Kojima, T. Kita, T. Isu, “Observation of quantum beat oscillations and ultrafast relaxation of excitons confined in GaAs thin films by controlling probe laser pulses”, J. Appl. Phys. **111**, 023505 (2012). (査読有)
http://www.lib.kobe-u.ac.jp/infolib/meta_pub/G0000003kerneldetail-jp
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3676429>
5. O. Kojima, N. Tobita, T. Kita, K. Akahane, “Dynamics of above-barrier state excitons in multi-stacked quantum dots”, J. Appl. Phys. **110**, 093515 (2011). (査読有)
http://www.lib.kobe-u.ac.jp/infolib/meta_pub/G0000003kerneldetail-jp
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3660210>
6. Y. Harada, T. Kubo, T. Inoue, O. Kojima, T. Kita, “Extremely uniform bound exciton states in nitrogen δ -doped GaAs studied by photoluminescence spectroscopy in external magnetic fields”, J. Appl. Phys. **110**, 083522 (2011). (査読有)
http://www.lib.kobe-u.ac.jp/infolib/meta_pub/G0000003kerneldetail-jp
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3654015>
7. O. Kojima, S. Hamano, T. Kita, O. Wada, “Saturation of Förster resonance energy transfer between two optically nonlinear cyanine dyes of small Stokes shift energies in polymer thin films”, J. Appl. Phys. **110**, 083521 (2011). (査読有)
http://www.lib.kobe-u.ac.jp/infolib/meta_pub/G0000003kerneldetail-jp

<http://dx.doi.org/10.1063/1.3653228>

8. T. Yamashita, O. Kojima, T. Kita, T. Isu, “Depolarization effect on optical control of exciton states confined in GaAs thin films”, J. Appl. Phys. **110**, 043514 (2011). (査読有)
http://www.lib.kobe-u.ac.jp/infolib/meta_pub/G0000003kerneldetail-jp
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3624667>
9. C. Jin, O. Kojima, T. Kita, O. Wada, M. Hopkinson, “Observation of phase shifts in a vertical cavity quantum dot switch”, Appl. Phys. Lett. **98**, 231101 (2011). (査読有)
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3596704>

[学会発表] (計 36 件)

1. 小島 磨, 林井研, 喜多隆, 赤羽浩一, “GaAs/AlAs多重量子井戸における励起子量子ビートによる光パルス強度変調”, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 予稿集 4, 26aXQ-4, 2013. 3.26
2. O. Kojima, K. Goi, T. Kita, T. Isu, “Effect of fifth nonlinear polarization on exciton Rabi oscillation in GaAs/Al_xGa_{1-x}As double heterostructure thin films”, European Optical Society Annual Meeting 2012, 2012. 9.27, Aberdeen, UK
3. O. Kojima, S. Ohta, T. Kita, T. Isu, “Control of response of exciton polariton confined in GaAs thin films by controlling pump and probe pulses”, Photon12 IOP's premier conference in optics and photonics, 2012. 9. 3, Durham, UK
4. O. Kojima, S. Ohta, T. Kita, T. Isu, “Excitation effects of confined exciton polariton on pulse shape propagating in GaAs thin films”, 10th International Conference on Excitonic Processes in Condensed Matter, Nanostructured and Molecular Materials, 2012. 7. 3, Groningen, the Netherlands
5. 小島磨, “半導体中の励起子非線形光学応答のコヒーレント制御”, 神戸大・徳島大合同セミナー半導体量子ドットと励起子の光デバイス応用, 徳島大学, 2011.12.27
6. 小島磨, 山下太香恵, 喜多隆, 赤羽浩一, “GaAs/AlAs超格子における励起子超高速応答”, 第22回光物性研究会, 熊本大学, 論文集, IB-22, 2011.12. 9
7. 大田翔平, 小島磨, 喜多隆, 井須俊郎, “GaAs薄膜における励起子応答の光スイッチング特性”, 第 22 回光物性研究会, 熊本大学, 論文集, IA-8, 2011.12. 9
8. K. Goi, O. Kojima, T. Kita, T. Isu, “Effects of fifth-order nonlinear polarization on optical control of excitonic states confined in GaAs thin films by using Rabi oscillation”, Workshop on Innovation and Pioneering Technology 2011, 2011.12. 1, Kobe, Japan
9. S. Ohta, O. Kojima, T. Kita, T. Isu, “Switching

characteristics of exciton response in GaAs thin films”, Workshop on Innovation and Pioneering Technology 2011, 2011.12. 1, Kobe, Japan

10. 五井恵太, 小島磨, 喜多隆, 井須俊郎, “GaAs薄膜における励起子状態の光制御に対する入射光エネルギー依存性”, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 富山大学, 予稿集 4, 21aRB-9, 2011. 9.21

11. O. Kojima, T. Kita, K. Akahane, “Photoluminescence dynamics of spacer layer carriers in multi stacked quantum dots”, 12th International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems, 2011. 9.15, Paris, France

12. S. Ohta, O. Kojima, T. Kita, T. Isu, “Interaction of quantized exciton polaritons with nonresonant pump pulse in GaAs thin films”, 12th International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems, 2011. 9.12, Paris, France

13. 大田翔平, 小島磨, 喜多隆, 井須俊郎, “非共鳴励起下における励起子ポラリトンと光電場の結合”, 第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形大学, 予稿集, 1p-K-9, 2011. 9. 1

14. 小島磨, 山下太香恵, 喜多隆, 井須俊郎, “GaAs薄膜中の光電場に対する局所場の効果”, 第 72 回応用物理学会学術講演会, 山形大学, 31p-P16-3, 2011. 9. 1

[図書] (計 2 件)

1. C.-Y. Jin, M. Hopkinson, O. Kojima, T. Kita, K. Akahane, O. Wada, “Quantum Dot Switches: Towards Nanoscale Power-Efficient All-Optical Signal Processing”, Springer Science+Business Media New York 2012, *Quantum Dot Devices, Lecture Notes in Nanoscale Science and Technology* 13, 2012, 197-221(367)

2. O. Kojima, “Exciton Dynamics in High Density Quantum Dot Ensembles”, InTech, *Fingerprints in the Optical and Transport Properties of Quantum Dots*, 2012, 231-244(468)

[その他]

ホームページ等

<http://www.research.kobe-u.ac.jp/eng-photonics/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小島 磨 (Kojima Osamu)

神戸大学大学院工学研究科・准教授

研究者番号：00415845

研究協力者

神戸大学大学院工学研究科

喜多隆教授、原田幸弘助教

学生 山下太香恵、大田翔平、五井恵太、林

井研、濱野将吾、飛田直樹、田中秀治
徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研
究部井須俊郎教授

情報通信研究機構 主任研究員 赤羽浩一博
士

Technische Universiteit Eindhoven C. Y. Jin 博士