

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23340083

研究課題名(和文)半導体量子ドット中の励起子の光誘起縦電場効果

研究課題名(英文) Photoinduced longitudinal electric field effect of the excitons in semiconductor quantum dots

研究代表者

三森 康義 (Mitsumori, Yasuyoshi)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：70375153

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：半導体量子ドット中の励起子分極は3次元閉じ込めポテンシャルにより、横電場成分だけでなく縦電場成分も光学的に誘起される。この縦電場成分は励起子分極の共鳴周波数を変調することが知られている。このため、量子ドットの励起子分極の共鳴周波数は光励起強度により変化する新しい物性機能を備えていると考えられる。本研究ではこの新しい光学効果である量子ドット中の光誘起縦電場効果を時間分解分光法により観測し、数値計算等を用いて解析を行う事で解明を行った。

研究成果の概要(英文)：The three-dimensional quantum confinement effect of the carriers in a semiconductor quantum dot gives the excitonic polarization the longitudinal component of the electric field, as well as the transverse component. The longitudinal component shifts the resonant frequency of the excitonic polarization, indicating that the resonant frequency of the excitonic polarization is modified by changing the excitation intensity and exhibiting a new optical effect. We studied the new optical effect arising from the photoinduced longitudinal component in a quantum dot by time-resolved spectroscopies and numerical calculations.

研究分野：半導体光物性

キーワード：量子ドット 縦電場効果

1. 研究開始当初の背景

半導体量子ドットは、エネルギーギャップの大きな半導体中にギャップの小さいナノメートルサイズの半導体を結晶成長させた場合に形成される。このようなナノ空間中に生成または注入された電子は、3次元的な閉じ込めポテンシャルを感じ、離散的エネルギー構造を示すようになる。この離散的エネルギー構造は電子-フォノン相互作用を著しく制限するため(フォノンボトルネック効果)、半導体量子ドット中の量子状態(励起子状態)は長い位相緩和時間を示すようになる。この離散的エネルギー構造と長い位相緩和時間を持つという特徴により、量子ドット中の励起子は原子系と同様に理想的2準位系としての光学応答を示すと期待されており、量子情報通信を実現する固体量子ビットの有力な候補の一つとして活発に研究が進められている。その一方で、半導体量子ドット中の励起子は基本的な光学特性の一つに原子系とは異なる量子ドット独特の性質を示すことが報告されている。その性質は単一量子ドットの発光スペクトルにおける偏光に依存する微細構造である。この偏光依存微細構造は、量子ドット内で励起子分極が閉じ込めサイズに応じた空間的広がりを持つため、純粋な横電場成分だけでなく縦電場成分も光学的に誘起されることに起因する。この縦電場成分の大きさは量子ドットの形状に敏感であるため、縦電場成分を介した量子ドット内のミクロな分極間の相互作用である電子正孔交換相互作用エネルギーに異方性が生じ、その結果として発光スペクトルに偏光依存微細構造が出現する。この量子ドット内の励起子分極が持つ縦電場成分は量子ドットの基本的な光学特性の一つである発光スペクトルの形状に強く関与していることから、非線形光学応答に代表される他の光学的性質に対しても強く影響を及ぼしていることが予測される。つまり、半導体量子ドット中の励起子は理想的2準位系とは異なる光学応答を示す可能性が強く示唆され、光誘起縦電場効果による新しい物性機能を内在していると考えられる。

一般に物質中に光誘起された励起子分極の縦電場成分は光誘起電荷を生成する。この光誘起電荷は量子ドット内においてクーロン相互作用する。励起子共鳴エネルギーはこのクーロンエネルギーを通じて励起子分極の縦電場成分によって変調を受ける。特に3次元的に強い閉じ込めを実現している量子ドットでは、励起子共鳴エネルギー $\omega$ が励起子分布数差 $\rho_D = \rho_{ee} - \rho_{gg}$ に依存するようになり、 $\omega = \omega_0 - \delta\omega \rho_D$ と修正される。ここで $\omega_0$ は縦電場成分を考慮しない場合の励起子エネルギー、 $\delta\omega$ は反電場シフトと呼ばれる量で励起子のダイポールモーメント、量子ドットの体積、量子ドットの形状に依存する量である。このことから、縦電場効果は励起子共鳴エネルギーを励起密度または励起子分布数差 $\rho_D$

を通して、ダイナミックにシフトさせ、原子系とは異なる半導体量子ドット独特の光学効果をもたらすことが強く予測される。

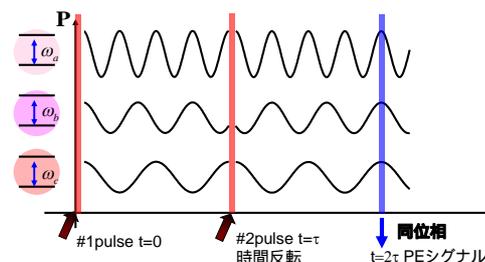
2. 研究の目的

本研究では、量子ドットの新しい物性機能である光で誘起される縦電場効果に着目し、時間分解分光法を用いて、量子ドット中の光誘起縦電場効果に起因する光学応答の実験的抽出と解明を行う。

3. 研究の方法

量子ドット中の縦電場効果は励起子のダイポールモーメントと量子ドットの体積および形状に依存したエネルギーシフトを与える。このため、本研究においてはAFM像で量子ドットの形状や大きさが比較的評価しやすく、励起子の強い閉じ込めが実現されているIII-V族系の歪誘起型量子ドット(SKドット)を中心に研究を行った。用いる分光法は、一般的な高速分光であるフォトンエコーを用いた。フォトンエコーは核磁気共鳴におけるスピンエコーに類似の効果である。図1に示すように、不均一幅を持つ試料を第1パルスで時刻 $t = 0$ に励起すると、それぞれの分極はそれぞれの共鳴周波数で振動し始める。巨視的分極は各々の分極の共鳴周波数の不均一性による位相差により直ちに消失してしまう(自由誘導減衰)。ここに第2パルスを $t = \tau$ で入射し、時間反転操作を行うと、第1パルスで励起された全ての分極は時刻 $t = 2\tau$ で同位相になり、巨視的分極を回復してフォトンエコー信号を放出する。このような光学過程において縦電場効果が発生した場合、

2準位系でのフォトンエコー



局所電場効果が発現時

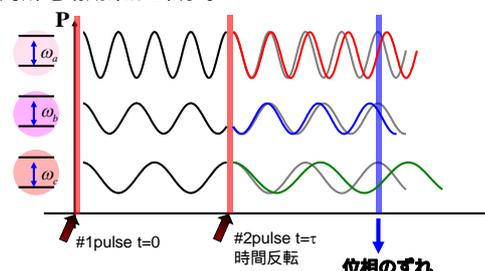


図1: 2準位系のフォトンエコー過程(上)、局所電場効果が発現した場合のフォトンエコー過程(下)の模式図

第2パルスによる時間反転操作は必ず励起による分布数差の変化 $\Delta\rho_D = \rho_D(t>\tau) - \rho_D(t<\tau)$ を伴うため、励起子分極の共鳴周波数は時刻 $0 < t < \tau$ 間 ( $\omega_1$ )と時刻 $\tau < t < 2\tau$ 間 ( $\omega_2$ )では異なる値を示すようになる[図1]。結果として、この共鳴周波数の変化は時刻 $t = 2\tau$ で各分極の位相の揃い具合に影響するため、フォトンエコー信号は第2パルスの強度に非常に敏感になることが予測される。本研究においてはこの縦電場効果による第2パルスの影響を第1パルスの関数で測定したラビ振動の形状変化として観測を行った。

#### 4. 研究成果

図2は第1パルスと第2パルスの遅延時間 $\tau = 100$  psにおいて信号強度を第1パルスの強度の関数として測定を行った結果である。第2パルスの強度は $I_2 = 0.3 \mu\text{J}/\text{cm}^2/\text{pulse}$ に設定した。図2の横軸は $I_1^{0.5}$ でプロットしており、次元としてはパルス面積 $\theta$ の次元と等価である。測定結果より、第1パルスの強度の増加に対して、2周期分の振動形状を示す信号が得られた。理想2準位系におけるラビ振動は正弦曲線で表されるが、フォトンエコー法で観測されるラビ振動の形状は巨視的測定のため、励起光の空間強度分布の影響を受けることが知られている。図中の赤線は実験で用いたビーム形状(ガウシアンビーム)を考慮に入れた2準位系のフォトンエコー法で観測されるラビ振動の理論曲線をあらわしている。測定結果は2準位系の理論曲線によって良く再現されている。

次にラビ振動の第1周期の形状の第2パルスの励起強度依存性を図3(a)に示す。ラビ振

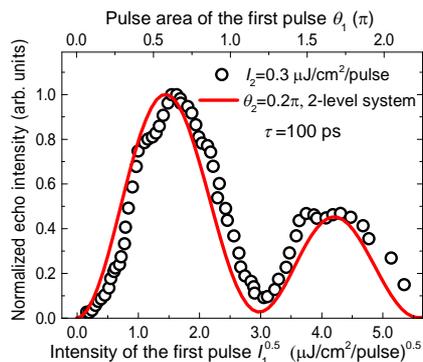


図2: 遅延時間 $\tau = 100$  psにおけるフォトンエコー信号強度の第1パルス励起強度依存性

動は第2パルスの強度が増加するに従い、弱励起下( $I_2 = 0.3 \mu\text{J}/\text{cm}^2/\text{pulse}$ )では、ピーク位置だった第1パルスの励起強度の両脇に新しいピークが出現し始め、 $I_2 = 1.3 \mu\text{J}/\text{cm}^2/\text{pulse}$ においては、弱励起時のラビ振動のピーク位置でくぼみ構造が観測された。観測されたラビ振動の形状変化が縦電場効果によるものが確認するために、縦電場効果

を考慮したブロッホ方程式を用いて数値計算を行った。結果を図3(b)に示す。数値計算内の反電場シフトは $\delta\omega = 22 \mu\text{eV}$ とした。数値計算のラビ振動の第2パルス依存性は実験で観測された形状変化を非常に良く再現で

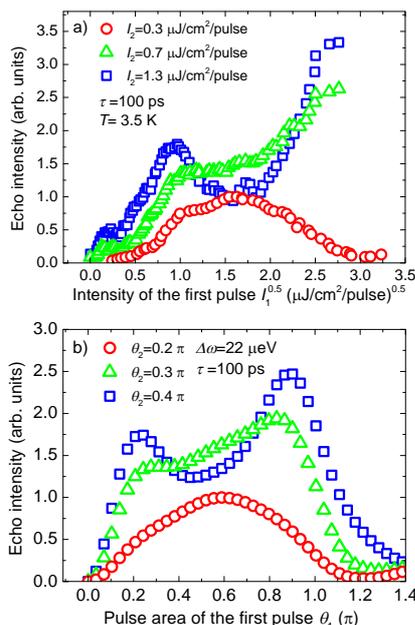


図3: ラビ振動の形状の第2パルス強度依存性(a)、数値計算結果(b)

きることを確認できた。また、用いた反電場シフトの大きさは本研究で用いた量子ドットのサイズ、ダイポールモーメントから推定される値 $\delta\omega = 20 \mu\text{eV}$ とも良い一致を示し、定量的な側面からも確認ができた。

観測されたラビ振動の形状変化について定性的には以下のように説明できる。第2パルスが弱励起の場合は分布数差変化 $\Delta\rho_D$ が小さいため、 $0 < t < \tau$ 間の共鳴周波数 $\omega_1$ と $\tau < t < 2\tau$ 間の共鳴周波数 $\omega_2$ は殆ど変化せず( $\omega_1 \sim \omega_2$ )、ラビ振動の形状は図4に示すように2準位系に近い振る舞いを示すと考えられる。一方、第2パルスが強励起の場合は、分布数差変化 $\Delta\rho_D$ が大きくなり、 $\omega_2$ は $\omega_1$ と異なる値を示す。結果、時刻 $t = 2\tau$ で各分極の位相の揃い具合も $\Delta\rho_D$ により変化し、それに伴いフォトンエコー信号強度が変調されると考えられる。特に図4に示すように、第2パルスによる分布数差変化 $\Delta\rho_D$ が最大となる第1パルスのパルス面積 $\theta_1 = \pi/2$ の周辺では、周波

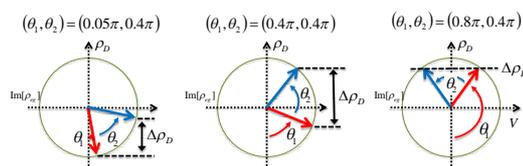


図4: ブロッホベクトルによる第1パルスのパルス面積と第2パルスによる分布数変化 $\Delta\rho_D$ の模式図

数変化( $\omega_2$ と $\omega_1$ の差)も最大となる。その結果、 $t = 2\tau$ で各分極の位相が最も揃い難くなり、フォトンエコー信号強度が低下すると考えられる。さらに第1パルスのパルス面積が増加すると、分布数差変化 $\Delta\rho_0$ が減少に転じ、 $\Delta\rho_0 = 0$ となる第1パルスのパルス面積でフォトンエコー信号強度が最大になると考えられる。また、2準位系でのフォトンエコー信号は第1パルスが $\theta_1 = \pi/2$ 付近で最大信号強度を示す[図3]。そのため、第2パルスが強励起の場合、弱励起時のラビ振動のシグナルピーク位置に窪み構造が現れると定性的に理解できる。

本研究課題では上記のラビ振動の観測による量子ドット内の光誘起縦電場効果の解明以外に、過渡的回折格子による実験、単一量子ドットによる測定も試み、いずれの結果も数値計算の結果と非常に良い一致を示していた。これらの結果から、量子ドット中の光誘起縦電場効果は量子ドットの光学応答において非常に重要な役割を果たしていることが判明した。今後の課題として、縦電場効果を用いる光デバイスの開発、他の固体中の局在電子分極での光誘起縦電場効果の観測解明が急務であると考えられる。

#### 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6件)

1. S. Matsuura, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, K. Miyazaki, D. Kim, M. Nakayama, G. Oohata, H. Oka, H. Ajiki, and H. Ishihara, "Observation of bound and antibound states of cavity polariton pairs in a CuCl microcavity", *Phys. Rev. B* 89, 035317/1-6 (2014). (査読有) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.035317>
  2. T. Inagaki, H. Kosaka, Y. Mitsumori, and K. Edamatsu, "Process tomography of coherent state transfer from light polarization to electron spin polarization in a semiconductor", *Phys. Rev. B* 89, 085311/1-7 (2014). (査読有) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.89.085311>
  3. R.-B. Jin, J. Zhang, R. Shimizu, F. Kaneda, Y. Mitsumori, H. Kosaka, and K. Edamatsu, "Entangled state generation with an intrinsically pure single-photon source and a weak coherent source", *Phys. Rev. A* 88, 012324/1-4 (2013) (査読有) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.88.012324>
  4. K. Asakura, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, K. Akahane, N. Yamamoto, M. Sasaki, and N. Ohtani, *Phys. Rev. B* 87, 241301(R)/1-4 (2013). (査読有) <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.87.241301>
  5. K. Asakura, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, K. Akahane, N. Yamamoto, M. Sasaki, and N. Ohtani, "Excitonic Rabi oscillations in self-assembled quantum dots studied by photon echoes", *Phys. Stat. Sol. (c)* 9, 2513-2516 (2012) (査読有) DOI: 10.1002/pssc.201200328
  6. S. Matsuura, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, K. Miyazaki, Y. Kanatani, D. Kim, M. Nakayama, G. Oohata, H. Oka, H. Ajiki, and H. Ishihara, "Polarization dependence of four-wave mixing via biexcitons in CuCl microcavities", *Phys. Stat. Sol. (c)* 9, 2505-2508 (2012) (査読有) DOI: 10.1002/pssc.201200326
- [学会発表](計38件)
1. 綿貫哲也, 佐々木匠, 三森康義, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克, 「半導体量子ドットにおける過渡的回折格子の減衰形状の励起強度依存性」日本物理学会 第70回年次大会 23pPSA-40 2015年3月21~24日 早稲田大学 (東京都, 新宿区)
  2. 岸本直, 曹博, 陳切春, 上野若菜, 藪野正裕, 三森康義, 荒平慎, 村井仁, 枝松圭一 「分極反転デバイスによるもつれ光子対発生」第62回応用物理学会春季学術講演会 12p-D2-1 2015年3月11~14日 東海大学 (神奈川県, 平塚市)
  3. 内山将一, 松浦心平, 三森康義, 枝松圭一, 幸内淳悟, 金大貴, 中山正昭 「CuCl薄膜における励起子分子のエネルギー緩和時間と位相緩和時間の膜厚依存性」第25回光物性研究会 III B-98, 2014年12月12日~13日 神戸大学 (兵庫県, 神戸市)
  4. 佐々木匠, 三森康義, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克, 「半導体量子ドットにおけるトランジェントグレーティングの減衰形状の励起強度依存性」第25回光物性研究会 I A-12, 2014年12月12日~13日 神戸大学 (兵庫県, 神戸市)
  5. 阿部洋一, 藪野正裕, 三森康義, 枝松圭一, 土澤泰, 松田信幸, 畑中大樹, 山田浩治 「シリコン細線マイクロリング共振器を用いた高効率光子対発生」第31回量子情報技術研究会 (QIT31) P-2 2014年11月17~18日 東北大学 (宮城県, 仙台市)
  6. Bo Cao, Qiechun Chen, Wakana Ueno, Masahiro Yabuno, Yasuyoshi Mitsumori, Nao Kishimoto, Jin Murai, Keiichi Edamatsu, 「Efficient polarization-entangled photon generation using two-period PPLN

- waveguides」第 31 回量子情報技術研究会 (QIT31) P-2 2014 年 11 月 17~18 日 東北大学 (宮城県, 仙台市)
7. 阿部洋一, 藪野正裕, 三森康義, 枝松圭一, 土澤泰, 松田信幸, 畑中大樹, 山田浩治, 「シリコン細線マイクロリング共振器を用いた高効率光子対発生」2014 年第 75 回応用物理学会秋季学術講演会 18p-C2-9 2014 年 9 月 17 日~20 日 北海道大学 (北海道, 札幌市)
  8. 曹博, 陳切春, 上野若菜, 藪野正裕, 三森康義, 岸本直, 村井仁, 枝松圭一, 「Efficient polarization-entangled photon generation using two-period PPLN waveguides」2014 年第 75 回応用物理学会秋季学術講演会 18p-C2-8 2014 年 9 月 17 日~20 日 北海道大学 (北海道, 札幌市)
  9. 佐藤悠毅, 長谷川寛幸, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克 「半導体量子ドットにおける顕微共鳴発光分光法の開発 II」日本物理学会 2014 年秋季大会 10aPS-78 2014 年 9 月 7~10 日 中部大学 (愛知県, 春日井市)
  10. 三森康義, 佐藤悠毅, 朝倉健太, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克 「III-V 族半導体量子ドットにおけるフォトンエコーの減衰形状の励起強度依存性」日本物理学会 2014 年秋季大会 9pAD-5 2014 年 9 月 7~10 日 中部大学 (愛知県, 春日井市)
  11. 安食博志, 松浦心平, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 宮崎健一, 金大貴, 中山正昭, 大島悟郎, 石原一 「CuCl 微小共振器における励起子分子の輻射緩和: Z12 励起子の影響」日本物理学会 2014 年秋季大会 8aAJ-3 2014 年 9 月 7~10 日 中部大学 (愛知県, 春日井市)
  12. 三森康義, 松浦心平, 小坂英男, 枝松圭一, 宮崎健一, 金大貴, 中山正昭, 大島悟郎, 岡寿樹, 安食博志, 石原一 「CuCl 微小共振器における四光波混合スペクトルの偏光依存性」日本物理学会 第 69 回年次大会 27aCD-9 2014 年 3 月 27~30 日 東海大学 (神奈川県, 平塚市)
  13. 安食博志, 松浦心平, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 宮崎健一, 金大貴, 中山正昭, 大島悟郎, 石原一 「CuCl 微小共振器における励起子分子の輻射緩和」日本物理学会 第 69 回年次大会 27aCD-8 2014 年 3 月 27~30 日 東海大学 (神奈川県, 平塚市)
  14. 長谷川寛幸, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克 「半導体量子ドットにおける顕微共鳴発光分光法の開発」第 24 回光物性研究会 III A-95 2013 年 12 月 13~14 日 大阪市立大 (大阪府, 大阪市)
  15. 安食博志, 松浦心平, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 宮崎健一, 金谷侑佳, 金大貴, 中山正昭, 大島悟郎, 石原一 「共振器中の CuCl 薄膜における励起子分子の輻射緩和」第 24 回光物性研究会 III A-89 2013 年 12 月 13~14 日 大阪市立大 (大阪府, 大阪市)
  16. 内山将一, 松浦心平, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 金谷侑佳, 幸内淳悟, 金大貴, 中山正昭 「CuCl 薄膜における励起子分子の位相緩和時間の膜厚依存性」第 24 回光物性研究会 II B-75 2013 年 12 月 13~14 日 大阪市立大 (大阪府, 大阪市)
  17. 佐々木匠, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克 「外部印加静電場による量子ドット中の荷電励起子の観測」第 24 回光物性研究会 III A-64 2013 年 12 月 13~14 日 大阪市立大 (大阪府, 大阪市)
  18. 長谷川寛幸, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克 「半導体量子ドットにおける顕微共鳴発光分光法の開発」日本物理学会 2013 年秋季大会 26pPSA-31 2013 年 9 月 25~28 日 徳島大学 (徳島県, 徳島市)
  19. 内山将一, 松浦心平, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭一, 金谷侑佳, 金大貴, 中山正昭 「CuCl 薄膜における励起子分子の位相緩和時間の膜厚依存性」日本物理学会 2013 年秋季大会 26pPSA-21 2013 年 9 月 25~28 日 徳島大学 (徳島県, 徳島市)
  20. 阿部尚文, 小坂英男, 新倉菜恵子, 三森康義, 枝松圭一 「ダイヤモンド単一 NV 中心における磁気光学三重共鳴」日本物理学会 2013 年秋季大会 25pBB-13 2013 年 9 月 25~28 日 徳島大学 (徳島県, 徳島市)
  21. 渡邊俊太, 三森康義, 朝倉健太, 小坂英男, 枝松圭一, 赤羽浩一, 山本直克 「III-V 族自己形成型半導体量子ドットにおけるスペクトル分解フォトンエコー IV」日本物理学会 第 68 回年次大会 日本物理学会 2013 年秋季大会 27pEJ-6 2013 年 3 月 26~29 日 広島大学 (広島県, 東広島市)
  22. 新倉菜恵子, 小坂英男, 佐々木匠, 阿部尚文, 武藤好昭, 三森康義, 枝松圭一 「ダイヤモンド中の単一 NV 中心における光子とスピンの量子制御 II」日本物理学会 第 68 回年次大会 26aED-4 2013 年 3 月 26~29 日 広島大学 (広島県, 東広島市)
  23. 阿部尚文, 小坂英男, 武藤好昭, 佐々木匠, 新倉菜恵子, 三森康義, 枝松圭一 「ダイヤモンド中の単一 NV 中心における光子とスピンの量子制御 I」日本物理学会 第 68 回年次大会 26aED-3 2013 年 3 月 26~29 日 広島大学 (広島県, 東広島市)
  24. 朝倉健太, 三森康義, 小坂英男, 枝松圭

- 一、赤羽浩一、山本直克 「III-V 族半導体量子ドットのフォトンエコー信号における局所電場効果」日本物理学会 2012 年秋季大会 20pFJ-2 2012 年 9 月 18 ~ 21 日 横浜国立大学 (神奈川県, 横浜市)
25. 松浦心平、三森康義、小坂英男、枝松圭一、宮崎健一、金谷侑佳、金大貴、中山正昭、大島悟郎、岡寿樹、安食博志、石原一 「CuCl 微小共振器中励起子分子のエネルギー緩和」日本物理学会 2012 年秋季大会 18pHB-5 2012 年 9 月 18 ~ 21 日 横浜国立大学 (神奈川県, 横浜市)
26. 渡邊俊太、三森康義、朝倉健太、小坂英男、枝松圭一、赤羽浩一、山本直克 「III-V 族自己形成型半導体量子ドットにおけるスペクトル分解フォトンエコー III」日本物理学会 2012 年秋季大会 18aPSB-36 2012 年 9 月 18 ~ 21 日 横浜国立大学 (神奈川県, 横浜市)
27. S. Matsuura, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, K. Miyazaki, Y. Kanatani, D. Kim M. Nakayama, G. Oohata, H. Oka, H. Ajiki and H. Ishihara, "Polarization dependence of four-wave mixing via biexcitons in CuCl microcavities", Fifth International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications, 1P-22, June 3-7, 2012, Nara Prefectural New Public Hall (奈良県, 奈良市)
28. K. Asakura, Y. Mitsumori, H. Kosaka, K. Edamatsu, K. Akahane, N. Yamamoto, M. Sasaki and N. Ohtani, "Excitonic Rabi Oscillations in Self-assembled Semiconductor Quantum Dot Studied by Photon Echoes", Fifth International Conference on Optical, Optoelectronic and Photonic Materials and Applications, 1P-25, June 3-7, 2012, Nara Prefectural New Public Hall (奈良県, 奈良市)
29. 松浦心平、三森康義、小坂英男、枝松圭一、宮崎健一、金谷侑佳、金大貴、中山正昭、大島悟郎、岡寿樹、安食博志、石原一 「時間分解 2 光子偏光分光法による CuCl 薄膜及び微小共振器中励起子分子寿命の評価」日本物理学会 第 67 回年次大会 24pPSA-51 2012 年 3 月 24 ~ 27 日 関西学院大学 (兵庫県, 西宮市)
30. 関圭介、三森康義、朝倉健太、小坂英男、枝松圭一、赤羽浩一、山本直克 「InAlGaAs/AlGaAs 量子ドットにおける顕微分光 II」日本物理学会 第 67 回年次大会 24pPSA-46 2012 年 3 月 24 ~ 27 日 関西学院大学 (兵庫県, 西宮市)
31. 朝倉健太、三森康義、小坂英男、枝松圭一、赤羽浩一、山本直克 「III-V 族自己形成型半導体量子ドットにおける 3 パルスフォトンエコー」日本物理学会 第 67 回年次大会 24pPSA-42 2012 年 3 月 24 ~ 27 日 関西学院大学 (兵庫県, 西宮市)
32. 関圭介、三森康義、朝倉健太、小坂英男、枝松圭一、赤羽浩一、山本直克 「InAlGaAs/AlGaAs 量子ドットにおける顕微分光」第 22 回光物性研究会 IIB-101 2011 年 12 月 9 日 ~ 11 日 熊本大学 (熊本県, 熊本市)
33. 渡邊俊太、三森康義、朝倉健太、小坂英男、枝松圭一、赤羽浩一、山本直克 「III-V 族半導体量子ドットにおけるスペクトル分解フォトンエコー」第 22 回光物性研究会 III B-100 2011 年 12 月 9 日 ~ 11 日 熊本大学 (熊本県, 熊本市)
34. 金田文寛、清水亮介、石坂智、三森康義、小坂英男、枝松圭一 「束縛エンタングルメントの活性化の観測」日本物理学会 2011 年秋季大会 24aED-8 2011 年 9 月 21 ~ 24 日 富山大学 (富山県, 富山市)
35. 松浦心平、三森康義、小坂英男、枝松圭一、宮崎健一、金大貴、中山正昭、大島悟郎、岡寿樹、安食博志、石原一 「CuCl 微小共振器中における励起子分子 - 光子結合状態 II」日本物理学会 2011 年秋季大会 23pRB-3 2011 年 9 月 21 ~ 24 日 富山大学 (富山県, 富山市)
36. 三森康義、渡邊俊太、朝倉健太、小坂英男、枝松圭一、赤羽浩一、山本直克、佐々木雅英、大谷直毅 「III-V 族自己形成型半導体量子ドットにおけるスペクトル分解フォトンエコー II」日本物理学会 2011 年秋季大会 21pRB-12 2011 年 9 月 21 ~ 24 日 富山大学 (富山県, 富山市)
37. 朝倉健太、三森康義、小坂英男、枝松圭一、赤羽浩一、山本直克、佐々木雅英、大谷直毅 「III-V 族自己形成型半導体量子ドットの励起子ラビ振動における局所電場効果 III」日本物理学会 2011 年秋季大会 21pRB-11 2011 年 9 月 21 ~ 24 日 富山大学 (富山県, 富山市)
38. 関圭介、三森康義、朝倉健太、小坂英男、枝松圭一、赤羽浩一、山本直克 「InAlGaAs/AlGaAs 量子ドットにおける顕微分光」日本物理学会 2011 年秋季大会 21pPSB-28 2011 年 9 月 21 ~ 24 日 富山大学 (富山県, 富山市)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.quantum.riec.tohoku.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

三森 康義 (MITSUMORI YASUYOSHI)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：70375153