

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2010～2014

課題番号：22221007

研究課題名(和文)量子ドットスピナー

研究課題名(英文)Spin-polarized Lasing in Quantum Dots

研究代表者

村山 明宏 (Murayama, Akihiro)

北海道大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：00333906

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 150,800,000円

研究成果の概要(和文)：電子のスピン緩和が抑制されるIII-V族化合物半導体量子ドットを用いて、電子スピン情報をレーザー光の円偏光特性に変換する量子ドットスピナーについて研究した。量子ドットに対するスピン注入のダイナミクスとスピン緩和、スピン保持に優れた量子ドットの作製等の研究を行い、スピン注入の主要な阻害要因としてパウリブロッキングの影響を明らかにした。そして、ドットの高密度化や二次元電子系とのトンネル効果により、高効率で超高速のスピン注入が可能になることを示した。また、レーザー媒質となる量子ドット活性層と金属強磁性体スピン電極を持つ発光ダイオードを作製し、電子スピンの電流注入による円偏光特性を得た。

研究成果の概要(英文)：We have studied spin-polarized lasing, which can transform electron-spin information into circular polarization properties in stimulated emission, by employing III-V compound semiconductor quantum dots (QDs) exhibiting strong suppression of spin relaxation. Spin-injection dynamics and spin relaxation in QDs in addition to fabrication processes of QDs have been studied for the purpose of temporal spin storage during the emission. We show that Pauli spin blocking is a major factor of spin loss during the spin injection into QDs. To resolve this issue, we conclude that high density QDs and tunneling of spins from two-dimensional electron systems realize highly efficient and ultrafast spin injection into QDs. QD light emitting diodes with active layers composed of QDs and metallic ferromagnetic spin electrodes have been fabricated, which indicates circularly polarized electroluminescence reflecting efficient electron-spin injection.

研究分野：半導体量子ドット光スピントロニクス

キーワード：ナノ構造作製 量子ドット ナノ光デバイス スピンドバイス ナノ表面・界面

1. 研究開始当初の背景

角運動量を考慮した光電変換により、電子の持つスピン情報を発光の円偏光特性に変換し、その偏光情報を持つコヒーレント光を放出するスピンレーザーに興味を持たれている。しかしながら、光学活性層として用いられる通常の化合物半導体では非常に速い電子のスピン緩和が生じるため、その発光再結合過程においてスピン情報の多くが失われてしまう。一方、III-V族などの化合物半導体の量子ドットにおいては、この電子スピンの緩和現象が顕著に抑制されることが知られている。

そこで、この半導体量子ドットを光学活性媒体として用いることにより、発光やレーザー発振中にスピン情報の散逸を防ぐことが可能な量子ドットスピンレーザーの実現が期待されている。また、量子ドットスピンレーザーでは、電子スピン情報のコヒーレントな光伝送が可能になることに加えて、スピン分裂状態密度を反映する光増幅発振が生じるため、量子ドットの離散的な状態密度を反映した低閾電流発振特性の更なる改善も可能になる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、半導体量子ドットを用いたスピンレーザーの実現に向けて、その設計指針を確立することである。一般的な三・二次元半導体中の電子の輸送注入時には電子のスピン状態は非常に不安定であり、温度の増加とともに顕著なスピン緩和現象を示す。

本研究の目的を達成するためには、これまでその詳細が不明であった量子ドットへのスピン偏極電子の注入（スピン注入）時のスピンダイナミクスを研究し、特に注入時のスピン緩和とその原因を明らかにする必要がある。さらに、実用的な光スピン素子の実現に向けて、室温動作可能な金属強磁性体を用いた電子スピン注入電極を作製し、半導体量子ドット層に対してスピン偏極電子を高効率に輸送注入する必要がある。そのため、スピン輸送注入時のスピン緩和を十分抑制することが可能な高品質の原子層制御エピタキシャル界面を形成し、室温動作に向けたスピンの輸送注入手法を開拓する必要がある。以上により、量子ドットスピンレーザーを実現するための物理的機構を明らかにしていく。

3. 研究の方法

本研究では、半導体量子ドットを用いたスピンレーザーの設計指針を確立するために、主に以下の3点について研究を行う。

(1) 半導体量子ドットのスピン緩和の研究とスピン保持に優れた量子ドットの作製

化合物半導体自己組織化量子ドットにおける電子スピンの緩和現象については、これまで数多くの研究がなされてきた。しかしながら、本研究の目的である高効率の円偏光発光

特性を示す量子ドットの作製方法や、室温動作に向けたスピン特性の保持やスピン注入手法については未だ十分には確立されていない。

そこでまず、InGaAs系III-V族化合物半導体量子ドット作製のため導入した分子線エピタキシー装置により量子ドット結晶成長条件の検討を行い、作製した量子ドットにおける電子スピン緩和の研究を行った。さらに、量子ドットにおけるスピン緩和の主要な要因の一つである自己組織化結晶成長におけるドット面内形状の非対称性やサイズ分布を人為的に抑制可能な、全く新しいトップダウン型のナノ構造作製についても研究を行った。

(2) 半導体量子ドットへのスピン注入ダイナミクスの研究

本研究では、半導体量子ドットに対して、電子スピン状態を十分に保持できる高効率のスピン注入手法の確立が非常に重要である。量子ドット中の電子のスピン状態は、強い量子閉じ込め効果により発光再結合中は比較的安定に保たれるものの、ドットへの輸送注入時には様々な要因により緩和する。このようなドットに対する輸送注入時のスピン緩和とその抑制手法に関して、系統的な研究はこれまで十分には行われていない。

そこで、スピン緩和現象が生じるピコ秒領域におけるスピンダイナミクスをリアルタイムで観測するため、円偏光フェムト秒パルスを用いてバリア中にスピン偏極電子を光励起し、時間・エネルギー・スピン状態の同時分解発光(PL)分光を行った。さらに、詳細な励起エネルギー依存性の測定が可能なスピン分解励起発光(PLE)分光や、サブピコ秒までの時間分解能を持つポンププローブ法を用いた電子スピンの歳差運動が観測可能な光カー効果の測定も行った。そして、作製した様々な量子ドットに対する研究を行った。

(3) 室温動作を目指した金属強磁性体と半導体量子ドット活性層を持つ電流スピン注入型量子ドット光デバイスの研究

室温で自発的スピン分極を持つFe系金属強磁性体電子スピン電極層からInGaAs半導体量子ドット層に対してスピン偏極電子を高効率に輸送注入するため、電流注入時のスピン緩和を十分抑制することが可能な半導体と金属強磁性体の原子層制御エピタキシャル接合界面を研究する。このため、超高真空基板搬送機構を備えた超高真空電子ビーム蒸着装置を分子線エピタキシー装置に連結し、半導体層の結晶成長後にその表面を大気に晒すことなく、酸化物や金属薄膜を成膜可能にした。

そして、金属強磁性体スピン電極を持つ量子ドット光デバイスを作製するため、電極トレンチ構造の微細加工を行うとともに、電流電圧特性や電流注入発光(EL)特性の測定を行った。特に、微細構造素子のEL円偏光特性の定量的評価を行うため、0~5Tの磁場中で

温度を 6 K から室温まで変えながら測定可能な、磁場中スピ分解顕微 EL 分光装置を開発した。ここで以下の式により、右回り (σ^+) と左回り (σ^-) 円偏光発光強度を用いて発光の円偏光度 (ρ) を定義した。この円偏光度は、発光再結合に関わる電子の時間に依存するスピ分解率の時間積分値を反映している。

$$\rho = \frac{I_{\sigma^+} - I_{\sigma^-}}{I_{\sigma^+} + I_{\sigma^-}}$$

実際には波長板の配置を変えて発光の強度測定を行うため、この円偏光度は外部振動の影響を受ける。そこで、装置全体を動的振動除去システムに搭載し、さらに光学素子を全てリモート操作することにより、1%以下の高い円偏光度の分解能と再現性を得ている。

4. 研究成果

量子ドットスピンレーザーを実現する上で本質的に重要な「量子ドットへの高効率・超高速電子スピン注入」に対して、上記の研究目的と方法に従って研究を推進した。

(1) 半導体量子ドットのスピ緩和の研究とスピ保持に優れた量子ドットの作製

III-V 族の InGaAs 自己組織化量子ドットと AlGaAs/GaAs バリア層からなるエピタキシャル半導体積層構造を成長させ、量子ドットの高い結晶性と良好な光学特性を示す強い PL と、低温領域では 1 ns 以上の十分長い電子スピ緩和時間を得た。また、量子ドット結晶成長条件の検討を行い、基板温度と As フラックス量、In 組成などの最適化を行った。さらに、量子ドットにおける電子スピ緩和現象の詳細な研究を行い、過剰キャリアによる荷電励起子の生成とそのスピ緩和を反映した円偏光特性の変化や、スピ位相緩和のドット構造依存性などを明らかにした。

また、電子の波動関数の空間的対称性に優れた量子ドットの作製法を研究した。GaAs 量子井戸を閉じ込めた AlGaAs バリア層上に、タンパク質工学を援用して作製した 10 nm の金属ナノ粒子を分散固定し、この金属粒子をエッチングマスクとして用いる無損傷エッチングにより量子井戸層を円柱状の量子ドットへとトップダウンによるナノ加工を行った。ドットの厚さは井戸厚により 4~10 nm、ドットの直径はタンパク質球殻構造の設計により 15~20 nm、ドット密度はタンパク質に修飾した分子鎖長さにより $5 \times 10^{10} \sim 2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ の範囲でそれぞれ設計制御が可能である。そして、室温までの高輝度発光と、量子閉じ込め効果に依存した 1 ns 以上の十分長いスピ保持特性を得た。このトップダウンナノ加工により作製する III-V 族量子ドットは、レーザー発振特性に優れた極めて高い面密度と、空間対称性の高い電子の波動関数や十分長いスピ保持特性を併せ持つ、独自の新しい光スピ機能性ナノ材料である。

(2) 半導体量子ドットへのスピ注入ダイナミクスの研究

スピ分解 PLE 分光により、バリア層から量子ドット基底発光状態への光励起スピンの注入実験を行い、室温で 20% の PL 円偏光度を得た。ここで、三次元バリア中に光励起される電子のスピ分解率は 50% である。三次元バリア中のスピは極めて速い緩和を示すが、一旦ドットに注入されたスピは発光過程において十分保持されることを示している。

また、バリアへの光パルス励起スピ注入を行い、量子ドットへの注入直後のスピ状態を直接観測できるドット励起状態に対するピコ秒スピ分解 PL 分光を行った。この測定は、ドットへのスピ注入ダイナミクスの直接かつリアルタイムの研究を可能にする。

まず、スピ注入時間と注入時におけるスピの保存率 (注入直後のスピ分解率) の温度依存性を測定し、200 K 以上まで高いスピ保存率を得た (図 1)。さらに、注入後のスピ緩和や、状態密度が極度に制限される量子ドット特有のパウリの排他律を反映するスピ状態占有効果を考慮して円偏光 PL の時間変化に対するレート方程式解析を行った。量子ドットへのスピ注入時には、パウリの排他律により多数個スピの連続的な注入が妨げられ、その結果スピ分解率が低下するスピのパウリブロッキングが生じる (図 2)。そして、このスピブロッキングは、ドットへのスピ注入時の効率を低下させる主要なスピ損失機構であることを明らかにした。スピブロッキングは、ドット内の電子占有率を抑制することにより改善できる。すなわち、温度上昇によるドット内電子のバリア層への熱的再分布によりスピブロッキングは抑制される (図 1)。また、輻射再結合速度が著しく高まる誘導放出過程においても、このスピブロッキングは同様に抑制可能である。

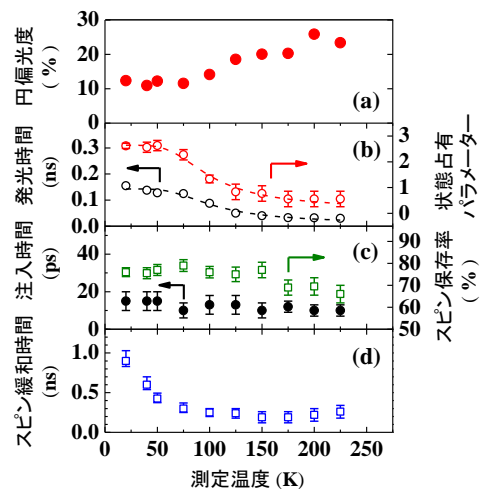


図 1 InGaAs 量子ドットへのスピ注入ダイナミクスの温度依存性; PL 円偏光度(a)、発光減衰時定数と状態占有パラメーター: 大きい値ほど状態占有率が高い (b)、スピ注入の時定数とスピの保存率(c)、注入後のドット内スピ緩和時定数(d)。ドットのスピ状態占有率の低下により PL 円偏光度は増加する。

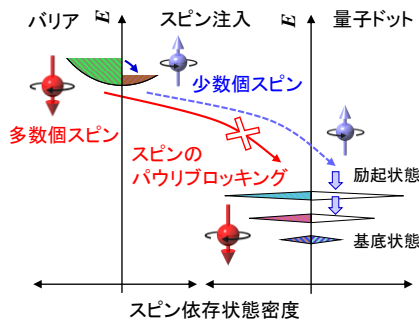


図 2 スピン状態密度が制限される量子ドットへのスピン注入における、多数個スピンのパウリブロッキング現象を示す模式図。少数個スピンの注入は継続するため、結果的に注入後のスピン分極率は低下する。

さらに、このスピンのパウリブロッキング現象のドット作製条件依存性を詳細に研究し、ドット面密度を自己組織化法で作製可能な $5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$ まで高めることにより、十分に抑制できることを示した。すなわち、量子ドットの高密度化により注入時のパウリブロッキングを回避し、スピン状態を高く保持した高効率のスピン注入が可能になることを世界に先駆けて示した。このドットの高密度化は、通常の量子ドットレーザーの開発指針とも完全に一致しており、量子ドットを用いた様々な半導体光スピンデバイスの実現に向けて強い動機を与える方向性を示したものと言える。

次に、電子の波動関数スピン状態の連続性を利用することにより原理的にスピン緩和が生じない、トンネルスピン注入を研究した。

まず II-VI 族化合物半導体 CdSe 量子ドットと希薄磁性半導体 ZnMnSe 量子井戸のエピタキシャル結合構造を作製した。希薄磁性量子井戸のスピン偏極電子のフェルミレベルを磁場により精密に制御することで、バリアを超えて拡散注入される電子に生じる注入時のスピン緩和を明らかにした。

さらに、III-V 族 InGaAs 量子井戸と量子ドットのエピタキシャルトンネル結合を作製し、井戸の基底状態とドット励起状態のエネルギー差が縦光学フォノンのエネルギーに相当する場合に、高効率のスピン注入が生じることを観測した (図 3)。この二次元電子系と量子ドットから成る次元性の異なる量子結合構造におけるトンネルスピン注入ダイナミクスの詳細を研究し、バリア厚さに依存したスピン注入時定数とスピン注入効率を明らかにした。スピン注入時定数は、トンネル効果を反映してバリア厚の減少により単調に減少する。また、厚いバリアを用いるとトンネル確率が低下するため、井戸中に滞留する電子にスピンブロッキングやスピン緩和が生じ、結果的にスピン注入効率が低下する。ピンホールなど原子レベルでの構造欠陥がない 6 nm 厚のバリア層のエピタキシャル成長に成功し、10 ps の時定数を持ちトンネル時のスピン保存率が 90 % 以上の超高速かつ高効率のドットへのトンネルスピン注入を実現した (図 3b)。

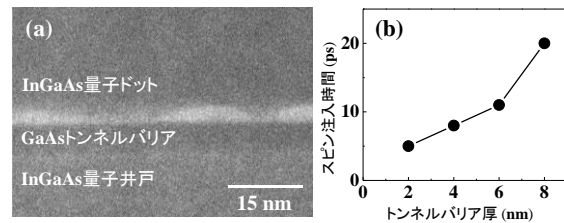


図 3 InGaAs 量子井戸(二次元電子系)とトンネル結合した量子ドット断面構造の元素分析 TEM 像: 白色度は In 組成を反映している(a)、量子井戸からドットへのトンネルスピン注入時定数のバリア厚さ依存性(b)。

(3) 室温動作を目指した金属強磁性体と半導体量子ドット活性層を持つ電流スピン注入型量子ドット光デバイスの研究

Fe 系強磁性体スピン電極と InGaAs 量子ドット活性層を持つ、電流スピン注入型の量子ドット発光ダイオード (LED) を作製した。

まず、量子ドットと積層した *n* 型 AlGaAs や GaAs 半導体バリア層表面における Fe 薄膜の結晶成長を研究した。量子ドット中 In の熱拡散を抑制しつつ良好な光学・電子スピン特性を得ることが可能な量子ドット層と積層した *n* 型バリア層の最適な結晶成長条件について検討を行い、バリア層の二段階成長やポストアニールにより高品質の積層構造を得た。次に、結晶性の良好な高濃度 *n* 型 AlGaAs バリア層表面に Fe 超薄膜を超高真空成膜し成長条件の検討を行い、原子層レベルで平坦な Fe 単結晶エピタキシャル成長を実現した (図 4a)。この場合、Fe/AlGaAs 界面では Fe 層中への As 原子の拡散が不可避免的に生じてしまう。

さらに、AlGaAs 層表面における高品質 MgO 酸化物バリア層の形成について研究を行った。その結果、まず超真空中で MgO 薄膜を連続成膜し、その後酸素雰囲気中でアニール処理を施すことで、半導体層表面の酸化を抑えつつ高品質の MgO バリア層の形成を可能にした (図 4b)。この場合には、As の拡散は抑えられるが、AlGaAs と MgO 間の格子定数差により、僅か 1-2 原子層ではあるがその界面に格子不整合層が発生していることが確認できる。

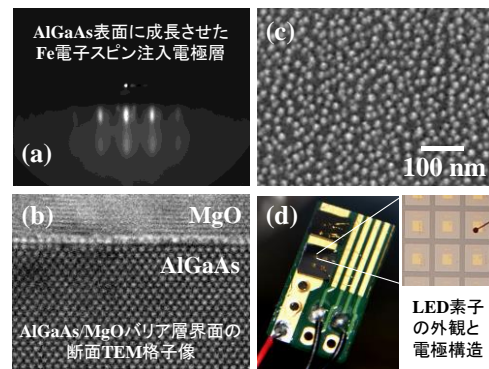


図 4 AlGaAs 表面における bcc-Fe 単結晶成長を示す RHEED ストリーク像(a)、AlGaAs 表面の MgO 層の結晶成長を示す断面 TEM 格子像(b)、 10^{11} cm^{-2} 台に達する高密度 InGaAs 自己組織化量子ドットの SEM 像(c)、作製したスピン LED の外観と電極構造(d)。

これらのバリア層表面に Fe や FeCo 電極層を形成し、量子ドットスピンレーザーの活性層となる電流注入型のスピンLED素子を作製した(図4d)。そして、リーク電流が十分に抑制された良好なダイオード特性と、室温までの高い輝度を持つ EL 発光を得た。さらに、MgO バリアを用いた場合、200 K という室温に近い温度領域において、EL 発光に 5 % の円偏光度を得ることができた(図5, 6)。測定では、膜厚 10 nm の FeCo 薄膜の膜面垂直方向に磁場を印加してその磁化を垂直配向させ、素子上部の発光取り出し方向とファラデー配置になるように注入スピンの向きを制御した。量子ドット中のスピンに対する磁場によるゼーマン効果は図中破線で表され、ゼーマン分裂準位間の熱的再分布と長いスピン緩和時間によりその寄与は 1 % 以下と十分に抑制されている。一方低温時には、前記 2-(2) 記載のスピンロックにより円偏光度が 1~2 % 程度まで低下するが、高い温度領域では注入された電子の熱的再分布により円偏光度が増加する。Fe 強磁性体中の電子スピン分極率(40%)を考慮すると、その電子スピンの 15 % 程度が量子ドットへと輸送注入され発光に寄与していることが明らかになった。すなわち、作製した量子ドットLEDにおける電子スピンの高効率電流注入発光が確認された。さらに、室温でも 2 % 程度の円偏光度が観測され、量子ドットを用いる実用的な光スピンデバイスの展開に向けて期待が持たれる。

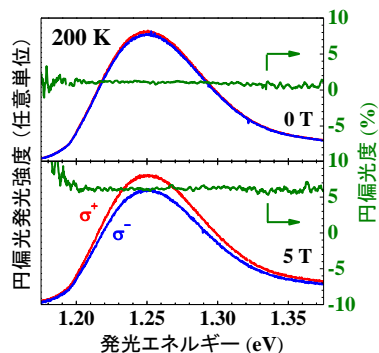


図5 InGaAs 量子ドット活性層と FeCo スピン電極を持つ量子ドットスピン LED の電流注入円偏光発光(EL)スペクトルとその円偏光度の発光エネルギー依存性(測定温度 200 K、印加磁場は上図:0 T、下図:5 T)。

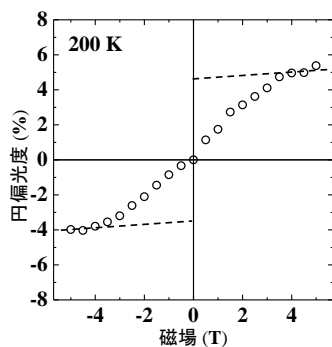


図6 InGaAs 量子ドットと FeCo 電極を持つ量子ドットスピン LED における EL 円偏光度の磁場依存性。破線はゼーマン効果による寄与を示す。

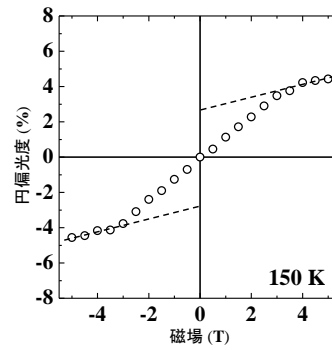


図7 InGaAs 量子井戸と FeCo 電極を持つスピンLEDのEL円偏光度の磁場依存性(150 K)。破線はゼーマン効果による寄与を示す。

一方、光学活性層に InGaAs 量子井戸を用いたスピンLEDでは、低温領域において電子スピン注入効率として 20% を得た。量子井戸の場合、膜面垂直方向から電流注入される電子の捕獲確率が高く、半導体バリアから活性層へのスピン輸送中のスピン緩和はある程度抑えられる。一方、量子ドットの場合にはドット間の空隙により直接捕獲される電子の割合が低くなるため、ドット層下部に電子捕獲のためのバリアが必要になる。そして、電子捕獲バリアからの拡散注入ではスピンがある程度緩和する可能性が考えられる。しかし量子井戸の場合には、井戸内のスピン緩和が顕著であるためゼーマン効果による寄与も大きくなる(図7)。この量子井戸におけるスピン緩和は非常に強い温度依存性があり、高い温度領域ではEL円偏光度は減少する。すなわち、室温動作可能な光スピンデバイスの実用化を考える上で、量子ドットを光学活性層に用いる優位性を明確に示すことができた。

また、本研究に用いている量子ドット光学活性層の光学的増幅効果(モード利得)を明らかにするために、光励起により数値解析を援用した端面取り出し型の可変ストライプ長法による利得測定を行った。その結果、ストライプ型光導波路長の増加により増幅放出光の非線形的な強度増加が明瞭に観測され、解析の結果、光学モード利得の最大値として、ストライプ長が $0.2 \mu\text{m}$ で $0.025 \mu\text{m}^{-1}$ を得た。この利得は、通常の光デバイス活性層に用いられている GaAs 量子井戸と同程度である。

スピンレーザーの発振動作においては、注入される電子の多数個スピン状態を反映する円偏光発光強度は少数個スピンの円偏光強度より大きいため、多数個スピンの発振閾電流は小さくなる。すなわち、発光の円偏光度が比較的小さい場合にも、動作電流を適切に設定することにより高い円偏光特性を持つ誘導放出を得ることができると考えられる。低温で導波路長が $0.2 \mu\text{m}$ 以下の場合に、円偏光励起によりドット励起状態からの増幅放出光において 20% 程度の円偏光度が得られている。導波路長の増加により円偏光度は 5% 程度に減少するため、導波路中の伝播モードの解析とその改善が必要と考えられる。

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 25 件)

① Y. Huang, K. Sueoka, A. Murayama, 他 5 名 (2~5, 8 番目), Size dependence of electron spin dephasing in InGaAs quantum dots, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. **106**, 2015, pp. 093109:1-4, doi: 10.1063/1.4914084.

② T. Kiba, A. Murayama, 他 5 名 (2~6 番目), Impact of artificial lateral quantum confinement on exciton-spin relaxation in a two-dimensional GaAs electronic system, AIP Advances, 査読有, Vol. **4**, 2014, pp. 107112:1-7, doi: 10.1063/1.4897958.

③ Y. Puttisong, K. Sueoka, A. Murayama, 他 5 名 (2~5, 8 番目), Anomalous spectral dependence of optical polarization and its impact on spin detection in InGaAs/GaAs quantum dots, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. **105**, 2014, pp. 132106:1-4, doi: 10.1063/1.4897306.

④ T. Yamamura, K. Sueoka, A. Murayama, 他 4 名 (2~5 番目), Growth-temperature dependence of optical spin-injection dynamics in self-assembled InGaAs quantum dots, Journal of Applied Physics, 査読有, Vol. **116**, 2014, pp. 094309:1-7, doi: 10.1063/1.4894712.

⑤ X.J. Yang, K. Sueoka, A. Murayama, 他 4 名 (2~5 番目), Ultrafast spin tunneling and injection in coupled nanostructures of InGaAs quantum dots and quantum well, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. **104**, 2014, pp. 012406:1-4, doi: 10.1063/1.4861387.

⑥ T. Kiba, X.J. Yang, T. Yamamura, Y. Kuno, A. Subagyo, K. Sueoka, A. Murayama, Temperature dependence of the dynamics of optical spin injection in self-assembled InGaAs quantum dots, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. **103**, 2013, pp. 082405:1-5, doi: 10.1063/1.4819208.

⑦ A. Murayama, N. Tamura, T. Yamazaki, T. Kiba, High-density optical spin injection in self-assembled semiconductor quantum dots, Journal of Luminescence, 査読有, Vol. **133**, 2013, pp. 110-113, doi: 10.1016/j.jlumin.2011.12.032.

⑧ D. Dagnelund, Q.J. Ren, I.A. Buyanova, A. Murayama, W.M. Chen, Antiferromagnetic interaction in coupled CdSe/ZnMnSe quantum dot structures, Applied Physics Letters, 査読有, Vol. **101**, 2012, pp. 052405:1-5, doi: 10.1063/1.4739852.

[学会発表] (計 87 件)

① Akihiro Murayama, Crystal Growth of III-V Compound Semiconductor Nanostructures and Transient Spin-related Optical Phenomena,

The Collaborative Conference on Crystal Growth 2014, November 4 2014, Phuket (Thailand).

② Akihiro Murayama, Dynamics of photo-excited carriers and spin-related phenomena in III-V semiconductor nanostructures, 2014 IEEE 6th International Nanoelectronics Conference, July 29, 2014, Conference Hall, Hokkaido University (Sapporo, Hokkaido).

③ Akihiro Murayama, Dynamics of photo-excited carriers and the spin states in III-V semiconductor nanostructures; application to quantum-dot lasing, 3rd Annual World Congress of Nano Science and Technology 2013, September 28, 2013, Xi'an (China).

④ 末岡和久, STM/NC-AFM による局所スピン分光, 日本顕微鏡学会第 56 回シンポジウム, 2012 年 11 月 20 日, 北海道大学学術交流会館 (北海道, 札幌).

⑤ 村山明宏, 光学応用を目指す半導体量子ドットの新展開, 第 53 回ガラスおよびフォトニクス材料討論会, 2012 年 10 月 26 日, 北海道大学学術交流会館 (北海道, 札幌).

⑥ 村山明宏, 半導体量子ドットへの超高速電子スピン注入とレーザーへの応用, レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会, 2012 年 1 月 31 日, 仙台 TKR カンファレンスセンター (宮城県, 仙台).

[図書] (計 1 件)
村山明宏, 株式会社エヌティーエス, 「自己組織化量子ドットにおける高効率スピン注入とその制御技術 (量子ドットエレクトロニクスの最前線)」, 2011, pp. 111-121.

[その他]
ホームページ等
<http://processing.ist.hokudai.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者
村山明宏 (Murayama Akihiro)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 00333906

(2) 研究分担者
末岡和久 (Sueoka Kazuhisa)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 60250479

(3) 連携研究者
菅原広剛 (Sugawara Hirotake)
北海道大学・大学院情報科学研究科・
准教授
研究者番号: 90241356