

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「新しい物理現象や動作原理に基づく
ナノデバイス・システムの創製」
研究課題「光量子位相制御・演算技術」

研究終了報告書

研究期間 平成13年12月～平成18年11月

研究代表者：小森 和弘

産業技術総合研究所
光技術研究部門
研究グループリーダー

1 研究実施の概要

本研究は、高品質量子ナノ構造の開発とコヒーレント量子制御技術の開発の双方を通して、半導体量子ナノ構造中で顕著に現れる物理現象(コヒーレント効果等)を利用する全く新しい光・電子デバイスの実現を目指している。具体的には、半導体量子ナノ構造を用いる量子情報素子と超高速光・電子制御素子を開発することを目的としている。

そのために、課題 A「高品質量子ナノ構造の作成と超高速光物性、量子情報素子研究への応用」の研究課題を担当する量子ナノ構造・量子制御研究グループと課題 B「コヒーレント量子制御技術の開発と光制御・演算素子への応用」の研究課題を担当する超高速光制御研究グループから構成される研究チームで研究を推進した。

プロジェクト前半までに、課題Aと課題Bの要素技術開発を重点的に行った。プロジェクト後半からはテーマの絞込みを行い、課題Aに関しては、基礎科学へのインパクトが大きい「量子情報デバイス研究」を重点化して推進した。課題Bに関しては、デバイステクノロジーへのインパクトが大きいテーマを「ナノ構造デバイス研究」として推進した。以下に、各研究課題の主要な成果を列挙する。

課題 A 「量子情報デバイス研究」

設計自由度が大きく、多ビット化が期待される結合量子ドット中の励起子を量子ビット(qubit)に対応させた2量子ビット(2qubit)の量子論理ゲートの開発と基本量子演算の実証を行うことを目的とし研究を行った。次に、それぞれの研究項目での研究展開と成果の概要を示す。

A-1. 結合量子ドット構造、励起子 2qubit 量子論理ゲートの開発

本研究では、2つの半導体量子ドット構造(量子ドットA、量子ドットB)を積層方向に近距離に並べて配置した結合量子ドットを用意し、各量子ドット中に1つずつエネルギー(波長)の異なる励起子 a と b を選び、それを qubit として用いる励起子 2qubit 量子論理ゲート(制御回転ゲート)を提案した。この励起子 2qubit 量子論理ゲート用の結合量子ドット構造としては、スケーラビリティは低いが相互作用が大きい強結合型の構造[1]とスケーラビリティの点で優れている弱結合型の構造[2]を提案した。弱結合、強結合の双方に対応可能な結合量子ドット構造として、層厚方向に結合した結合量子ドット構造の開発を重点化して研究を行った。

層厚方向に結合した量子ナノ構造として、MBEによるSK自己形成法とInフラッシュ法の双方を用いて、層厚の設計精度が高く、上下の量子ドットのエネルギーが近接したInAs/GaAs共鳴結合量子ドット構造の作製が可能になった。低密度の結合量子ドットと、微小窓(直径 $0.2\mu\text{m}$)を有するメタルマスク(または微小ピラー構造)を組み合わせることによって一対の結合量子ドット構造の発光分光&光制御が可能になった。障壁層厚(d)を7nm、5nm、3nmに変えた一対の共鳴結合ドット構造では結合準位Xbと反結合準位Xaの発光ピーク群が測定され、そのピーク群間の間隔(結合分裂エネルギー)は障壁層厚を薄くするにつれて拡大し、一対の結合量子ドットの結合効果を確認した[3],[4]。以上より、励起子2qubit素子の基本構造として、1つの結合ドットの光制御・計測が可能で、かつ、ドット間に結合(弱結合 $d=7\text{nm}$ 、強結合 $d=5\text{nm}$ 、 3nm)を有する単一の結合量子ドット構造が実現できた。

A-2. 電界印加型素子構造の開発

励起子2qubit 量子論理ゲートにおいては、励起子量子ビットの電子状態(エネルギー)を制御することと、量子ビット間の相互作用を形成&制御することが必要である。この目的のために縦方向電界印加素子構造と横方向電界印加素子構造の開発を行った。

結合量子ドット試料の表面に直径 $0.2\mu\text{m}$ の円形開口メタルマスクを有し、素子の上面、基板面に電極を形成した縦方向電界印加型の 2qubit 励起子結合量子ドットデバイスを作製した。この素子の電界印加時の発光(PL)特性の測定から、結合ドットの結合準位の PL 発光エネルギーは外部電界の強度の変化に伴って変化し(シュタルクシフト)、最大で約 1meV 程度の励起子エネルギーの制御が可能になった。また、外部電界によって結合状態が変化し、2つの結合準位の発光ピーク強度が相関的に変化した。以上より、縦方向電界による結合状態の制御が可能になった。

横方向電界印加素子としては、まず、弱結合型量子ドットでの横方向電界印加時の励起子間相互作用の理論解析を行い、量子論理ゲートとして利用する際の素子構造の条件を明らかにした。理論解析から、 10kV/cm の弱電界に対しても 0.3meV 程度の大きな相互作用エネルギーシフトが

得られることを明らかにした。

次に、横方向電界印加型構造として、量子ドットが存在する部分を細線上 (Nanowire 構造) に限定し、その左右から電界を印加する素子構造を開発した。この素子では両端の電圧が60V までのもれ電流は測定されず、120kV/cm の強い横方向電界印加を実現できた。この単一 QD 内励起子のシュタルクシフトの測定から最大で3meV のシュタルクシフトを実現した。実験で得られたシュタルクシフトと、電場を考慮した井戸型ポテンシャルモデルによる簡単な計算から、結合 QD での束縛エネルギーは 300 μ eV 以上が期待でき、この横電界印加構造は、励起子2qubit 素子でのビット間相互作用の形成&制御に利用可能であることが明らかになった。

A-3. 励起子 2qubit 量子論理ゲートでの2励起子間の「量子もつれ」の形成

励起子 2qubit 量子論理ゲートとしては、2つの励起子間に相互作用を有すること、「量子もつれ」を有する4状態 $|00\rangle$, $|10\rangle$, $|01\rangle$, $|11\rangle$ を独立に形成できることが必要である。その為には、2つの励起子状態 $|01\rangle$, $|10\rangle$ を独立に光励起する技術と、2励起子が生成された場合にエネルギーが1励起子状態からシフトした新しい励起子分子状態 $|11\rangle$ を生成する技術が必要である。

結合量子ドット中のそれぞれのドットに閉じ込められた励起子を独立に光制御・計測する技術を開発した。その技術を用いて、結合量子ドット中の2つの励起子量子ビット $|01\rangle$, $|10\rangle$ 状態の独立な生成と、励起子間に大きな相互作用を有する2qubit 状態 $|11\rangle$ の形成に初めて成功した。このときの2つの励起子 qubit 間の相互作用エネルギーは、光制御による 2qubit 演算を行うためには十分な1.3meV 以上の値が得られた。

以上のA-1~A-3を通して、2つの励起子 qubit 間に相互作用と、「量子もつれ」を有する励起子2qubit 量子論理ゲートの基本素子構造の開発に成功した[1]。

A-4. 1qubit の回転ゲート操作

以上に述べた素子構造の開発と共に、量子論理ゲート素子としての動作実証を目指して量子論理ゲートの光制御技術の開発を行い、1qubit の回転ゲート操作と2qubit の制御回転ゲート操作の初期的な実験を行った。

まず、量子論理ゲートを高精度にコヒーレント量子制御するための技術を開発した。位相制御の高精度化のために2波長レーザ干渉距離計を用いて、アーム間の距離差の精度を 3.7nm以内に向上したマイケルソン干渉計装置を開発し、顕微分光システムと共に用いることにより、単一量子ドット励起子のコヒーレント量子制御の 3.7nm以内 (位相制御誤差 1.5 度以内) の高精度化、長時間安定化が可能になった[5]。

結合ドット中の2つの励起子状態間において励起子の存在確率をパルス面積によって制御することによって1qubit回転ゲート操作に相当するラビ振動制御に関する実験を行った。2つの状態間 ($|00\rangle \leftrightarrow |01\rangle$) のエネルギーに共鳴する光パルス (パルス幅5psec) を照射し、パルス励起強度 (パルス面積) を増加していくにつれて、観測準位 $|01\rangle$ からのPL発光強度は正弦波的に振動を繰り返してラビ振動していることが測定され、1qubit回転ゲートとして位相回転角 3.5π までの回転が可能になった。この振動周期から計算した結合量子ドット中の励起子の遷移双極子モーメントは単一量子ドットの値よりも大きい値であることがわかった[6][7]。以上より、励起子量子ゲート素子 (結合量子ドット構造) において1qubitの回転ゲート操作は達成された。

A-5. 2qubit の制御回転ゲート操作

励起子2qubit量子論理ゲートの動作実証としては、 $|01\rangle$ 状態を形成した場合に限り $|01\rangle \Rightarrow |11\rangle$ の光制御を行うという条件付2qubit制御ゲート操作 (カスケード制御) と、 $|01\rangle$ 状態を形成した場合に限り $|01\rangle \leftrightarrow |11\rangle$ の回転 (θ) 制御を行うという条件付き2qubit回転ゲート (条件付ラビ振動制御) 操作の2つステップで研究を行った。

まず、条件付2qubit制御ゲート操作に関しては、 $|00\rangle$, $|01\rangle$, $|10\rangle$, $|11\rangle$ の4状態に関して、タイミング同期した2波長パルスレーザを用いて、 $|00\rangle \Rightarrow |01\rangle$ と、 $|01\rangle \Rightarrow |11\rangle$ の2つの励起子を光制御し、励起子分子 $|11\rangle$ からの発光 X_b' と、励起子 $|01\rangle$ からの発光を測定することによって、励起子 $|01\rangle$ 状態を生成した場合に限り、 $|01\rangle \Rightarrow |11\rangle$ の励起子分子を生成する条件付2qubit制御ゲート操作 (カスケード制御) をモニターした。実験結果からは、最初に $|00\rangle \Rightarrow |01\rangle$ を制御した場合に限り、 X_b の励起子が減少するのに従って励起子分子の発光である X_b' は逆に増加する傾向が顕著に測定された。これは、2波長の光パルス励起によって $|00\rangle \Rightarrow |01\rangle$ のプロセスに続けて $|01\rangle$

⇒ $|11\rangle$ のプロセス(カスケードプロセス)が制御可能であることが示された。

以上より、励起子 $|01\rangle$ を最初に形成した場合($|00\rangle \Rightarrow |01\rangle$ の励起)に限り、 $|01\rangle \Rightarrow |11\rangle$ の光制御が可能な条件付2qubit制御ゲート操作が可能であることが示された[8]。

次に、2qubit制御回転ゲート操作の実験を試みた。1番目の光パルスで $|01\rangle$ にあらかじめ励起子を作り、次に $|01\rangle \Rightarrow |11\rangle$ に相当する2番目の光パルスで2qubit目を励起制御した。2qubit状態(励起子分子 $|11\rangle$)の存在確率(発光強度)はパルス励起強度(パルス面積)に対して、回転角度 θ が π 以下の操作に相当する増加&飽和特性が得られた。以上より、2qubit制御回転ゲートでの回転角度 θ が π 以下の操作が可能になった。応用上は、回転角度 θ が π の場合は、特殊な2qubit状態の形成(Bell状態の形成等)のための量子演算には利用可能である。

A-6. 新しい研究展開：結合量子ドット構造からの2波長の単一光子発生

励起子2qubit量子論理ゲートでは、 $|01\rangle$ 状態の励起子と $|10\rangle$ 状態の励起子との間の量子もつれを利用すると、相関を有する2波長の単一光子光源としての応用が期待される。また、この2つの励起子からの単一光子発生過程を調べることで、逆に、励起子間の量子もつれの状態が測定できる。この目的のために、ドット間の弱結合($d=7\text{nm}$)量子ドットからの単一光子発生に関して時間相関単一光子係数法によって測定を行った。その結果、各々の量子ドットから単一光子の発生と、2つの量子ドットからの相関を有する2波長の単一光子の発生(片方のドットが光子を発生した時刻では、もう一方のドットからの光子発生は抑制される。)が可能になった。以上より、「量子もつれ」を有する励起子からの2波長の単一光子発生に成功した。この成果は、本プロジェクトの新しい研究展開として位置づけられ、今後は、量子通信用の光子光源への応用が期待される。

課題B「ナノ構造デバイス研究」

プロジェクト前半に開発した高品質量子ナノ作製技術と、デバイス作製技術、光制御・計測技術に関する要素技術を発展させてデバイステクノロジーへのインパクトが大きい課題として「B-1. 量子ドット集合体を用いた超高速光制御・演算素子」、「B-2. 結合ナノ構造を用いた負性抵抗 FETの開発とテラヘルツ帯発振素子への応用」を推進した。次に、それぞれの課題での成果を示す。

B-1. 量子ドット集合体を用いた超高速光制御・演算素子

量子ドット集合体を用いた超高速光制御・演算素子に関しては、「量子ドット集合体用のコヒーレント量子制御法の開発」、「高密度、高均一量子ドット集合体の開発と光デバイス応用」、「集積型光制御素子(波形整形素子)の開発」に分けて研究を進めた。

B-1-1. 量子ドット集合体用の新しいコヒーレント量子制御法

従来のコヒーレント制御法では、「①不均一幅が大きい材料でのコヒーレント量子制御は困難」、「②位相緩和時間 T_2 の時間内で制御に制限される」という2つの問題があり、量子ドット集合体を用いた光制御素子を開発する上ではこれらの問題の解決が不可欠であった。

まず、①不均一幅の問題を解決するために、面積制御した3連光パルス列を用いた新しいコヒーレント量子制御法の提案を行なった。理論解析を通して、コヒーレント量子制御を行なうための量子ドット集合体の条件を明らかにし、実際の量子ドット系における不均一幅(σ) $\sim 20\text{meV}$ を想定しても、コヒーレント量子制御が可能であることを示した[9]。

次に、②の T_2 時間制限の問題を解決するために、 T_2 フリーの新しいコヒーレント量子制御法として2連の $\pi-\pi$ パルス列を用いて制御する方法を提案した。光学的ブロッホ方程式による数値計算によって $\pi-\pi$ パルス列によるコヒーレント量子制御法が必要とする励起パルスおよび量子ドットの条件を明らかにした。以上より、新しい制御法によって、 T_2 が短く、かつ不均一幅を有する系に対しても励起子のコヒーレント量子制御が可能であることを明らかにした。

B-1-2. 高密度、高均一量子ドット集合体の開発と光デバイス応用

超高速光制御・演算素子のためのナノ構造集合体としては、不均一広がりが小さく高均一でかつ高密度な量子ドット集合体が必要不可欠である。そこで、MBE成長を用いて高均一、高密度の量子ドット集合体の開発を行った。さらに、半導体レーザ素子化してその特性を調べた。

従来使われているAs₄分子線の代わりにAs₂分子線を用いるMBE法を用いて高密度でかつ高均一性を同時に満たす量子ドット集合体の開発が可能になった[10],[11]。また、量子ドットを埋め込む際の組成の違いによる歪を制御する方法として傾斜組成制御法を新たに提案し、それによ

って発光波長の長波長(1.3 μm 帯)化が可能になった[12]。

以上より、本研究では、高密度かつ高均一な量子ドット(面密度: $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 、発光半値: 22meV)が世界で初めて実現できた。また、この量子ドットを用いた半導体レーザの試作を行い、通信波長帯である1.3 μm でのレーザ発振を得た。また高密度かつ高均一化を実現した事から、世界トップでかつ、従来の3~4倍程度の大きな光利得発振動作(5層で 43 cm^{-1})を実現した。

B-1-3. 集積型光制御素子(波形整形素子)の開発

量子ドット集合体を用いた超高速光制御・演算素子のモノリシック集積化を目指して、2次元スラブ型フォトニック結晶による波形整形部(2連パルス発生素子部)と、方向性結合器スイッチ部(量子ドット集合体スイッチ素子部)からなる素子構造を提案した。プロジェクト前半は、方向性結合器スイッチ構造の理論設計を行い、従来トレードオフ関係にあったスイッチング長と帯域幅を両立するための素子構造の設計が可能になった。

プロジェクト後半からは、主に、波形整形部の設計と動作実証を重点的に行った。2連パルス発生素子として、2次元スラブ型フォトニック結晶構造を用いて、光路長の異なる二つの導波路に分岐・合波することにより1つの入力パルスを時間間隔Tの二つのダブルパルスに整形する波形整形デバイスを試作し、素子評価を行い、サブピコ秒間隔でのダブルパルス形成が可能であることを実証した。これまで、2次元スラブ型フォトニック結晶導波路を用いる光導波路デバイス研究が多数行われているが、本研究で開発した方向性結合器スイッチや2連パルス発生素子の開発を行っているところはなく、初めての成果である。

B-2. 結合ナノ構造を用いた負性抵抗 FET の開発とテラヘルツ帯発振素子への応用

量子細線中のキャリアトランスポートを利用するナノデバイスとして、MBE法によるトレンチ溝形状極微細線構造を用いた量子細線FETの開発を行ない、初めて近室温($T=260\text{K}$)負性抵抗動作を達成した[13]。次に、細線FETと同じ動作原理を用いて大電流化が可能な、結合量子井戸デュアルチャネル負性抵抗FETを新たに提案した。負性抵抗のメカニズムは結合ナノ構造中でドレイン電圧によって加速された電子が、高移動度層から低移動度層にサブバンド間遷移することにより、その移動度差から生じる。実際に微細ゲート構造を有する素子の試作を行い、260Kまでの近室温動作、発振素子としては十分な20mAクラスの大電流動作を達成した。以上より、明瞭な負性抵抗を示す三端子電界効果トランジスタの開発に世界で初めて成功した[14]。

本負性抵抗素子の直近に、パターンニングされた金属薄膜をFET電極兼外部共振回路兼アンテナとして作製し、デバイス全体で発振機能を実現するアンテナ一体型発振素子を提案した。負性抵抗のパラメータから等価回路を仮定し、外部共振器(アンテナ)特性の導出のために有限要素法による3次元電磁界解析を行った結果、300GHz付近で発振可能条件が満足され、本負性抵抗素子を用いて300GHz超のサブテラヘルツ帯での発振が可能であることが分かった。

文献:

- [1] K. Goshima, S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi and T. Sugaya, , Appl. Phys. Lett., Vol.87, 253110-1 (2005) K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, A. Shikanai, T. Sugaya, IQEC and CLEO-PR 2005 2005/7/12
- [2] S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi, K. Goshima, T. Sugaya, , Appl. Phys. Lett. vol.87, 182103 (2005).
- [3] S. Yamauchi, K. Komori, T. Sugaya and K. Goshima: Jpn. J. of Appl. Phys. vol. 43, no4B, 2083 (2004)
- [4] S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi, K. Goshima and T. Sugaya, , J. Appl. Phys., Vol.99, 033522-1, (2006)
- [5] T. Okada, K. Komori, K. Goshima, S. Yamauchi, I. Morohashi, T. Sugaya, O. Yamazaki, M. Ogura and T. Hattori, , Jpn. J. Appl. Phys., vol.43, no.9A (2004)
- [6] K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, A. Shikanai, and T. Sugaya, , Jpn. J. of Appl. Phys., Vol.45, No.48, 3625, (2006)
- [7] K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, T. Sugaya, . SSDM. A- 2 -4 (2006)
- [8] K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi and T. Sugaya. CLEO/QELS. QThH5 (2006)
- [9] N. Tsurumachi, K. Komori and T. Hattori, , Appl. Phys. Lett., Vol.48, No. 13, 2235, (2004)
- [10] T. Sugaya, K. Komori, S. Yamauchi and T. Amano, J. Vac. Sci. Technol. B23, 1243 (2005).
- [11] T. Sugaya, T. Amano, and K. Komori, J. Appl. Phys. , 100, 063107 (2006).
- [12] T. Amano, T. Sugaya and K. Komori, Jpn. J. Appl. Phys., 44, L432 (2005).
- [13] K.Y. Jang, T. Sugaya, C-K. Hahn, M. Ogura, K. Komori, A. Shinoda, K. Yonei, Appl. Phys. Lett., Vol. 83, No. 4, pp. 701-703, (2003)
- [14] T. Sugaya, K. Komori, T. Yamane, S. Hori, and K. Yonei, Appl. Phys. Lett. 88, 142107 (2006).

2 研究構想及び実施体制

(1) 研究構想

本研究は、高品質量子ナノ構造の開発とコヒーレント量子制御技術の開発の双方を通して、半導体量子ナノ構造中で顕著に現れる物理現象(コヒーレント効果等)を利用する全く新しい光・電子デバイスの実現を目指している。具体的には、半導体量子ナノ構造を用いる量子情報素子と超高速光・電子制御素子を開発することを目的としている。

そのために、課題 A「高品質量子ナノ構造の作成と超高速光物性、量子情報素子研究への応用」の研究課題を担当する量子ナノ構造・量子制御研究グループと課題 B「コヒーレント量子制御技術の開発と光制御・演算素子への応用」の研究課題を担当する超高速光制御研究グループから構成される研究チームで研究を推進した。チーム内の密な研究連携を図るために産総研内に上記2グループからなる集中研を構成し、外部研究機関(大学等)からの研究者を含めて、研究実施場所を産総研内に集約して集中的に研究を推進した。

プロジェクト前半までに、課題Aと課題Bの要素技術開発を重点的に行った。プロジェクト後半からはテーマの絞込みを行い、課題Aに関しては、基礎科学へのインパクトが大きい「量子情報デバイス研究」を重点化し、結合ドット中の励起子対を用いる2qubit 量子論理ゲートの開発と、初期的な動作実証を目標にして研究を推進した。課題Bに関しては、デバイステクノロジーへのインパクトが大きいテーマを「ナノ構造デバイス研究」として副重点化し、量子ドット集合体を用いた光制御デバイスの為の要素技術開発と個別光素子としての動作実証、超高周波負性抵抗ナノ FET 素子の開発と超高周波発振素子への応用を目標にして研究を推進した。

それぞれの課題と研究項目は次の通りである。

課題 A: 量子情報デバイス研究: 量子ナノ構造・量子制御研究グループ

結合量子ドット中の励起子対を利用した 2-qubit 素子構造の開発を行う。具体的には、位相緩和と時間の長い高品質な量子ドット材料の開発と、遷移双極子モーメントが大きく、かつ励起子間の相互作用が大きい 2-qubit 素子構造の開発を行う。

また、量子情報素子を光制御・計測する為の微小領域光制御・光計測技術の開発および、2-qubit 素子の動作実証を目指した超高速光制御技術の開発を行う。具体的には、顕微分光法を用いた単一の量子ナノ構造に直接アクセスする技術、単一および結合量子ナノ構造中の励起子を超高速(ピコ秒時間域)光制御する技術の開発を行なう。これらを通して、結合量子ドット中の励起子対を用いた 2-qubit 素子に関して初期的な動作実証を目指す。

このために次の研究項目に分けて研究を行った。

- A-1. 結合量子ドット構造、励起子 2qubit 量子論理ゲートの開発
- A-2. 電界印加型素子構造の開発
- A-3. 励起子 2qubit 量子論理ゲートでの2励起子間の「量子もつれ」形成
- A-4. 1qubit の回転ゲート操作
- A-5. 2qubit の制御回転ゲート操作

課題 B: ナノ構造デバイス研究: 超高速光制御研究グループ

プロジェクト前半には「光量子位相制御技術の開発と光制御・演算素子への応用」という研究課題で、量子ドット集合体を用いる超高速光制御・演算素子を開発することを目的に、波形整形技術の開発、超高速光制御・演算技術等の要素技術の開発を行った。

後半からは、デバイステクノロジーへのインパクトが大きい課題としてナノ構造デバイスを重点的に推進し、特に、前半に開発した高品質量子ナノ構造作製技術、デバイス作製技術、光制御・計測技術に関する要素技術を発展させて (1) 量子ドット集合体を用いた超高速光制御・演算素子の研究を推進した。また高品質量子細線構造中のキャリアトランスポートを利用する超高周波ナノ電子素子に関しては、(2) 結合ナノ構造を用いた負性抵抗 FET の開発とテラヘルツ帯発振素子への応用 として研究を推進した。

このために次の研究項目に分けて研究を行った。

B-1. 量子ドット集合体を用いた超高速光制御・演算素子

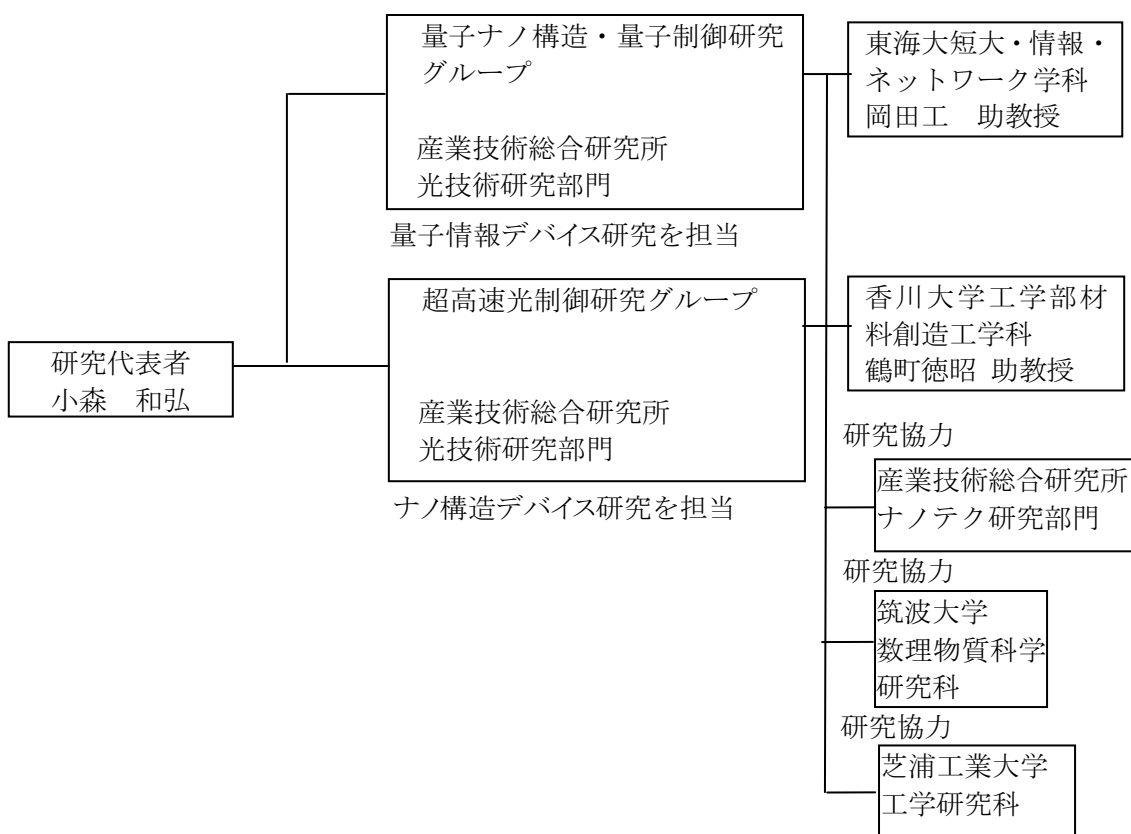
B-1-1. 量子ドット集合体用の新しいコヒーレント量子制御法

B-1-2. 結合ナノ構造を用いた負性抵抗 FET の開発とテラヘルツ帯発振素子への応用

B-1-3. 集積型光制御素子(波形整形素子)の開発

B-2. 結合ナノ構造を用いた負性抵抗 FET の開発とテラヘルツ帯発振素子への応用

(2)実施体制



3 研究実施内容及び成果

3.1 量子情報デバイス研究

(産業技術総合研究所 量子ナノ構造・量子制御研究グループ)

(1)研究実施内容及び成果

設計自由度が大きく、多ビット化が期待される結合量子ドット中の励起子を量子ビット(qubit)に対応させた2量子ビット(2qubit)の量子論理ゲートの開発と基本量子演算の実証を行うことを目的にして研究を行った。次に、それぞれの課題での研究展開と成果を示す。

A-1. 結合量子ドット構造、励起子2qubit量子論理ゲートの開発

本研究で提案する励起子 2qubit 量子論理ゲート(制御回転ゲート)は、2つの半導体量子ドット構造(量子ドットA、量子ドットB)を積層方向に近距離に並べて配置した結合量子ドットを用意し、各量子ドット中に1つずつエネルギー(波長)の異なる励起子 a と b を選び、それを qubit として用いる。図1に結合量子ドットを用いた素子構造の模式図を、図2に2qubit 素子の状態遷移図を示す。量子ビットの2つの状態 $|0\rangle$ と $|1\rangle$ は、着目する励起子が存在しない状態(結晶基底状態)を0状態、存在する状態(1励起子状態)を1状態に対応させる。以降では、a,b 励起子の 4 状態を $|a\ b\rangle = |00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle$ として示す。本素子においては、1ビットの演算(回転ゲート操作)は、着目する励起子 a に対する遷移波長(遷移エネルギー: X_a)の光パルスを用いて励起子 a の状態を0状態から1状態へ、または1状態から0状態、さらに0と1の重ね合わせた状態に制御することによって行う。

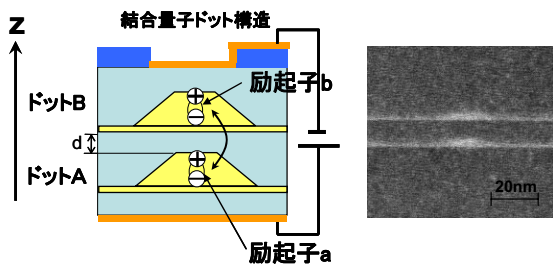


図1 (a)結合量子ドットを用いる励起子 2qubit 量子論理ゲートの構造模式図 (b)結合量子ドットの断面TEM図

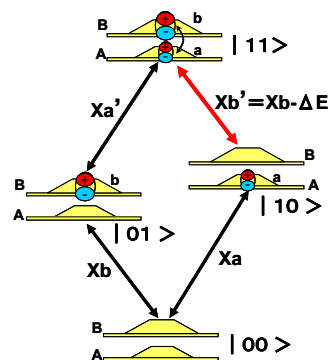


図2 励起子 2qubit 量子論理ゲートでの状態遷移図

また、2ビットの演算(制御回転ゲート操作)に関しては、励起子 a を制御ビット、励起子 b を標的ビットに対応させる。励起子 a が1の状態、励起子 b を生成したときは、励起子間に相互作用(ビット間相互作用)が生じるので、このエネルギー変化を利用して励起子 a が1の時に限り回転ゲート操作を行なう。具体的には励起子 a が0の時に励起子 b を励起する(図2の $|00\rangle \Rightarrow |01\rangle$)のに必要なエネルギーが X_b なのに対して、励起子 a が1の時に励起子 b を励起する(図2の $|10\rangle \Rightarrow |11\rangle$)場合は、励起子 a と励起子 b の相互作用エネルギー (ΔE) 分だけエネルギーが減少して $X_{b'} (= X_b - \Delta E)$ になることを利用し、 $X_{b'}$ のエネルギーの光を照射して、励起子 a が1の時に限り選択的に b の状態を0から1(または1から0や重ね合わせた状態)に反転させる制御回転ゲートの動作を行う。

この励起子 2qubit 量子論理ゲート用の結合量子ドット構造としては、スケーラビリティは低いですが相互作用が大きい強結合型の構造[1]とスケーラビリティの点で優れている弱結合型の構造[2]を考えている。弱結合、強結合の双方に対応可能な結合量子ドット構造として、層厚方向に結合した結合量子ドット構造の開発を重点化した。

層厚方向に結合した量子ナノ構造として、MBEによるSK自己形成法とInフラッシュ法の双方を用いて、層厚の設計精度が高く、上下の量子ドットのエネルギーが近接したInAs/GaAs共鳴結合量子ドット構造の作製が可能になった(図1b)。

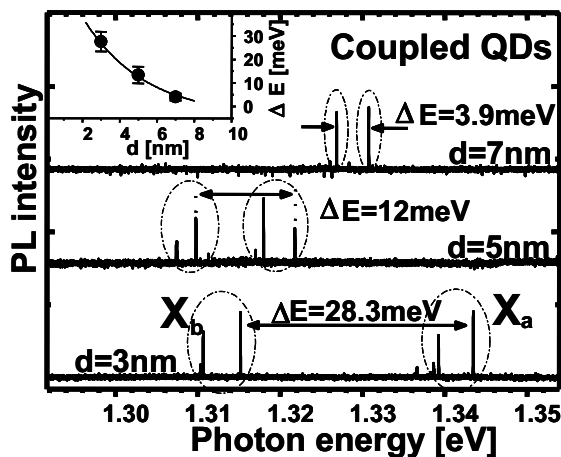


図3 障壁層厚 (d) がそれぞれ、7nm、5nm、3nm の結合量子ドットのPL特性

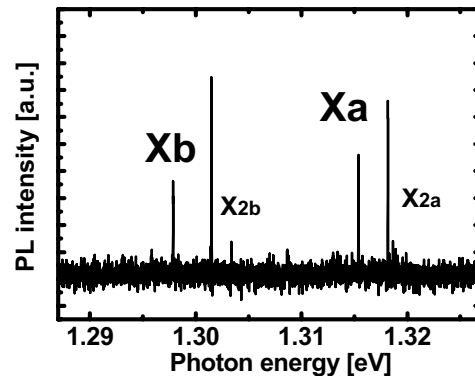


図4 励起子 a からの発光 Xa と励起子 b からの発光 Xb , X2b と X2a はそれぞれホールの励起状態に起因する励起子からの発光。Xa (または X2a) , Xb (または X2b) を制御 qubit、標的 qubit として利用。

低密度の結合量子ドットと、微小窓 (直径 $0.2 \mu\text{m}$) を有するメタルマスク (または微小ピラー構造) を組み合わせることによって一対の結合量子ドット構造の発光分光 & 光制御が可能になった。障壁層厚 (d) を 7nm、5nm、3nm に変えた一対の共鳴結合ドット構造の発光特性を調べたところ結合準位 Xb と反結合準位 Xa の発光ピーク群が現れ (図3)、その結合分裂エネルギーは障壁層厚を薄くするにつれて拡大し、一対の結合量子ドットの結合効果を確認した [3], [4]。

図4には、障壁層厚 5nm の強結合型の量子ドット対の PL 発光特性を示す。Xa は擬反結合ライクな準位の発光であり Xb は擬結合準位に起因する発光である。また X2a、X2b のピークはホール励起準位に起因するピークである。

A-2. 電界印加型素子構造の開発

外部電界により励起子量子論理ゲートの電子状態および qubit 間結合状態を制御することを目的にして縦方向電界印加型の結合量子ドット素子構造を開発した。また、励起子量子論理ゲートのスケーラビリティの向上の為に、横方向電界印加型の弱結合量子ドットを用いた励起子量子論理ゲート素子構造の開発を行った。縦方向電界印加素子は当チームが独自提案した構造であり、横電界印加素子に関しては、後述するように Biollati らの理論提案例があるが実験例はほとんどない。

A-2-1. 縦方向電界印加型素子構造の開発

励起子 2qubit 量子論理ゲートで、実際に量子演算を行うには、各々の qubit を個別に制御する場合と、2つの qubit 間に相互作用を生じさせて 2qubit ゲート操作を行う場合を任意に行える系の構築が要求される。したがって、qubit 間の相互作用をオン・オフする技術、すなわち qubit 間の相互作用を外部制御する技術が必要不可欠である。

縦電界印加構造を用いて量子ドットに外部から電界を印加することにより、量子ドットの電子状態とドット間の相互作用を制御する技術の開発を目的として、縦方向電界効果型の 2qubit 励起子結合量子ドットデバイスを作製し、その電界効果特性の測定を行った。

(縦方向電界印加型量子ドットデバイスの構造)

結合量子ドットとしては、分子線エピタキシー成長法により作製された自己形成 InAs/GaAs 結合量子ドット構造を用いた [3]。

図5にデバイス構造を示す。n⁺-GaAs 基板の上に i-GaAs バッファ層 (200nm)、結合量子ドット層 (障壁層厚は 7nm)、i-GaAs キャップ層を成長した。バリア層の界面の揺らぎを抑制するため、各ドット層の成長後、インジウムフラッシュ法による平坦化を行った [3]。成長後、試料表面に電子ビーム描画法により円形パターンを作製し、Ti/Au (100/800nm) 蒸着およびリフトオフを行うことにより、微小開

口(0.2 μm)メタルマスクの作製を行った。これは光学測定におけるレーザー光および発光の窓となり、約100個/μm²の面内密度で分布する量子ドットの中から1組の結合量子ドットのみを抽出して測定することができる。メタルマスク作製後、フォトリソグラフィおよびドライエッチング(Cl₂)によるメサ構造の作製、絶縁膜(SiO₂)の形成および電極形成により、縦方向電界印加型の2qubit励起子結合量子ドットデバイスを作製した。

(測定系)

作製した試料をクライオスタット(温度: ~4K)に固定し、連続波波長可変 Ti: Sapphire レーザからのレーザー光を50倍の対物レンズで集光して試料に照射した。試料面でのビーム直径は約2 μmであった。反射方向に放出された試料からの発光を50倍の対物レンズを通して分光器に入射させ、液体窒素冷却 CCD で検出した。

(発光特性の電場依存性)

図6に(a)作製された試料の (a)各電界強度におけるフォトルミネッセンス(PL)スペクトル, (b)PLピークエネルギーの電界依存性および (c)PLピーク強度の電界依存性を示す。励起光のエネルギーは、ウェットティング層の吸収帯にあたる1.409eVとした。0kV/cmにおいて、結合ドットによる2本の発光が観測された[5]。それらの発光ピークのエネルギーは電界の変化に伴って滑らかに変化した。電界の変化に伴って、PLピークの不連続なシフトが観測されなかったことから、n⁺ドープ基板からの余剰電子の流入によるドットの帯電はないと考えられる[6]。これは、基板と量子ドット間のバッファ層が十分厚いためであると考えられる。また、電子の波動関数の結合に伴うPLピークの反交差が観測されなかったことから[7]、結合ドット内に生成された励起子は、それぞれのドットに閉じ込められており、ドット間での電子のトンネルは少ないと考えられる。電界によるPLピークエネルギーのシフトは、量子閉じ込めシュタルクシフトの関係:

$$E = E(0) + pF + \beta F^2 \quad (1)$$

によく一致した(図6(b)中の実線)。ここで E(0)は電界がない場合の基底状態の遷移エネルギー、pは自己分極、βは分極率である。式(1)によるフィッティングのパラメータから、測定した量子ドットの自己分極の大きさは約0.01nm程度であることが明らかになった。

本試料では、PLピーク強度に特異な現象がみられた(図6(c))。2つの発光ピーク強度の総計は-50~20kV/cmの間ではほぼ一定なのにも関わらず、それぞれのピーク強度はトレードオフな関係になった。この弱結合量子ドット(障壁層厚7nm)の系では、量子力学的な相互作用は小さく、双極子間相互作用が支配的な系であるため[2]、双極子間相互作用を介してそれぞれのドット内に閉じ込められた励起子が結合していると考えられる。したがって、電界を印加したことで結合量子ドット内の電子状態および結合状態が変化したことにより、AとBの2つの間で状態が変化しているものと考えられる。

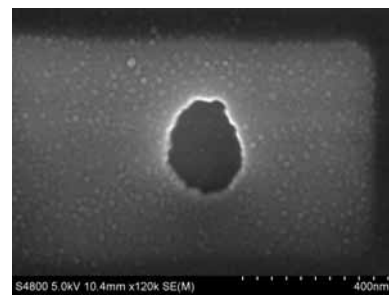
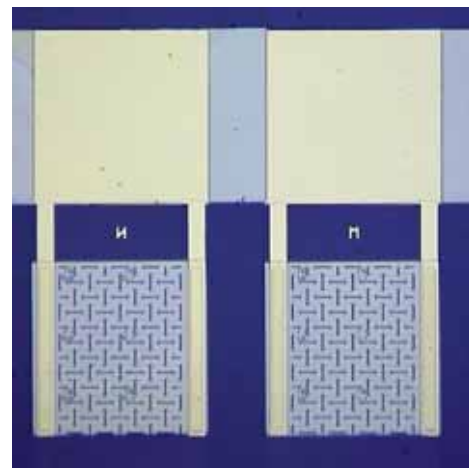
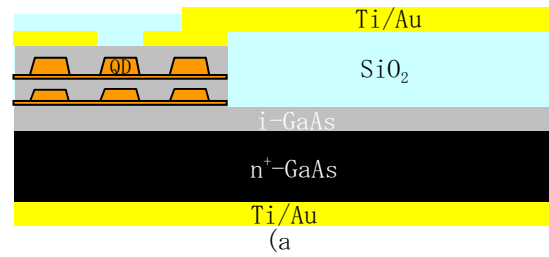


図5 縦方向電界印加型結合量子ドットデバイス: (a)デバイス断面図, (b)デバイス写真, (c)微小開口のSEM写真

以上より、本研究では、結合量子ドット中の電子状態および結合状態を制御する技術の開発を目的とし、縦方向電界印加型の 2qubit 励起子量子ゲート素子構造を開発を行った。その結果、2つの量子ドットが双極子間相互作用によって結合した弱結合量子ドット系において、結合した励起子に起因する 2 本の PL 発光ピークの強度が相関的に変化することが見出された。これにより、電界印加によって電子状態および結合状態の制御が可能となった。

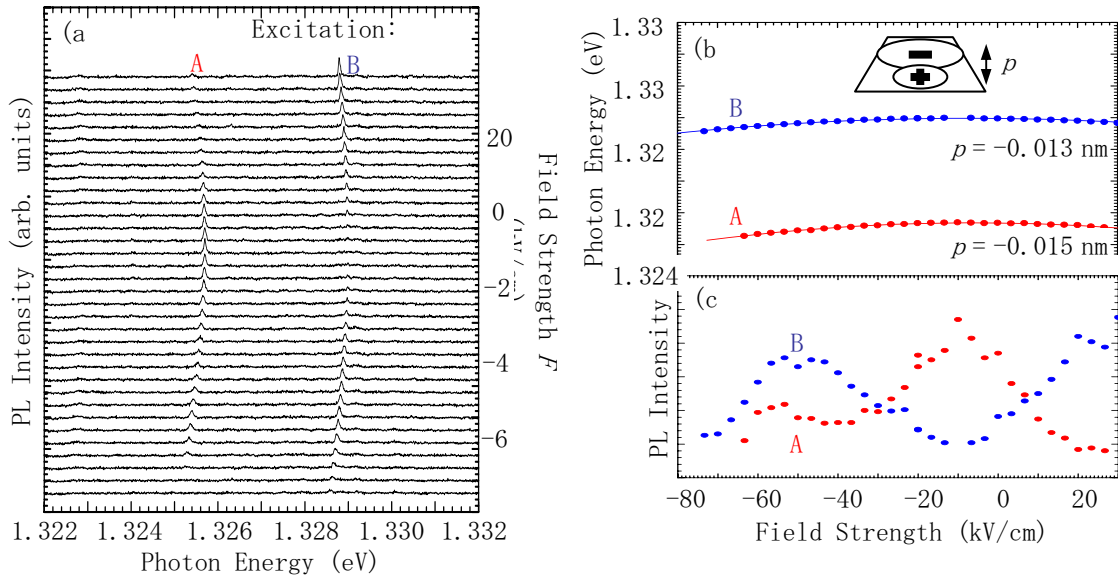


図6 弱結合ドットの PL 発光の電界依存性: (a)各電界強度における PL スペクトル, (b)PL ピークエネルギーの電界依存性, (c)PL ピーク強度の電界依存性

A-2-1. 横方向電界印加型素子構造の開発

量子演算を行うためには、近接する各 QD 内励起子の量子状態を独立に励起することができ、且つ各 QD が同時に励起されたときにだけ新たに生成されるエンタングルド状態を有していなければならない。このエンタングルド状態は半導体 QD ベースの量子演算素子では励起子間の双極子相互作用によって得られるとされている。しかし、複数個の QD 間で演算をおこなうためには、独立に励起できるという条件とあわせて、大きな相互作用エネルギーが必要である。Biollati[8]らはこの大きな相互作用を得るために、近接する 2 つの GaAs QD を配置し、その横方向から電界を印加した構造を提案した。本研究では Biollati らの提案をもとに、近接する 2 つの InAs QD を用いた場合について理論的な検証をおこなった。さらに、単一 QD の横方向から電界を印加し電子と正孔がどの程度変位するかを実験的に検証した。

(理論)

Biollati らの提案では GaAs QD を用いている。しかし、近接構造を実現できるメリットをもつ InAs 量子ドットは[9]、そこに生成される電子のボーア半径が大きく 30nm にも及び、これは実際に自然形成される InAs QD の底辺よりも大きい。このことは電子が強く閉じ込められ、横電界の影響を受けにくいことを意味する。そのため、InAs の物性パラメータを用いて近接する InAs QD 間の相互作用エネルギーを

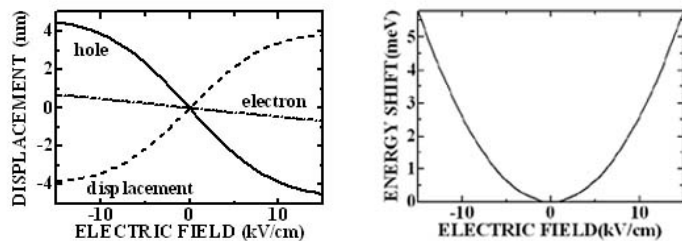


図7 電界を考慮した井戸型ポテンシャルによる計算結果。右図は電子と正孔の変位とその両者の間の距離、左図はそのときの励起子共鳴エネルギーのシュタルクシフト

見積もることが重要である。

計算をできるだけ簡単化するため、この理論計算ではQDの横方向のポテンシャル構造は量子井戸構造であるという仮定をおこなった。この段階でQDは直方体であるという近似が暗に行われている。QDの底辺を20nmとし(実際に電子顕微鏡(SEM)で観察された大きさである)、電界によるポテンシャルの傾きを考慮し、QD内の電子-正孔間距離の電界依存性を計算した[10]。その結果を図7に示す。得られた電子正孔間距離から二つのQD間の双極子相互作用 ΔE を次式(1)で計算できる。 ΔE は2励起子状態と束縛された励起子分子状態のシフトエネルギー、 ϵ はQDの誘電率、 r はQD間距離、 d が電子正孔間距離である。(1)式から10kV/cmの電界で、観測に十分な300 μ eV程度のシフト量が得られることがわかった。

$$\Delta E = \frac{1}{2\epsilon} \frac{e^2 d^2}{r^3} \quad (1)$$

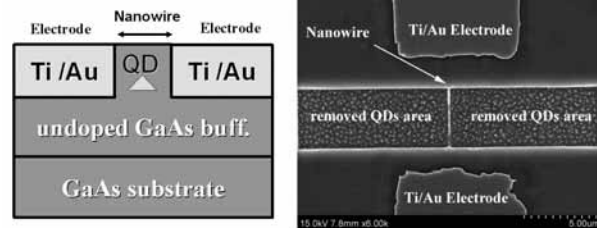


図8 試料断面模式図(右図)と試料表面のSEM観察像(左図) 量子細線の幅は約150 nmであり、電極の深さは量子ドットの深さにあうように調整されている。

(半導体プロセス)

自己形成InAsQDは分子線エピタキシ(MBE)法によってGaAs基板の上に結晶成長された。InAsQDのまわりあるいは上部はGaAs障壁層を形成されており、3次元量子閉じ込め構造を実現している。限られたInAs量子ドットだけを光学励起するために、量子ドットの存在しない二つの領域を、EB描画およびドライエッチングプロセスにより作製した。図8に断面模式図と上面SEM図を示す。二つの領域の間の細線状の構造を励起することにより、10~20個の限られたQDを励起できる。その後、横電界を印加する目的で埋め込み型のTi/Au電極を作製した。この電極はキャパシターとして機能し、その電極間にある細線内の電界 E は $E=V/d$ で与えられる。 V は印加する電圧であり、 d は電極間の距離でこの試料では5 μ mある。低温(4K)でのこの構造の電気特性を調べた結果、両端の電圧が60Vまで、もれ電流は確認されず、120kV/cmの強い電界が印加できる構造になっている。

(単一QD内励起子状態の横電界依存性)

低温での顕微フオルミネッセンス(PL)分光をおこない、単一QDの励起子状態の横電界依存性を調べた。この実験の目的は発光の印加電界によるシュタルクシフトを測定し、電子と正孔がどの程度変位するかを見積もることにある。

試料はクライオスタット内に設置され4K極低温下で保持された。光学励起には波長可変Tiサファイアレーザーを用い、レーザーの波長をウェットティング層に共鳴するように調整した。対物レンズを用いて励起レーザーをビーム系2 μ mまで集光し、細線にスポットをあわせることによって細線内だけのQDを励起した。発光は励起した対物レンズと同じ対物レンズで集光され(反射配置)、64cmのトリプル分光器で分光され、マルチチャンネル検出器で検出された。

4Kでの顕微PLスペクトルの電界依存性を図9(左:波長940nmのサンプル、右:980nmのサンプル)に示す。図9の左上図には横電界を0Vと48V印加した際のスペクトルが示されている。0Vと48Vの各発光線から見積もられるシュタルクシフトは0.5meV程度であった。図9右上図に示す波長980nmの単一QD内励起子のシュタルクシフトの測定から最大で3meVのシュタルクシフトが得られた。

また、図9の下図のマッピングには、この系のシュタルクシフトの特徴が現れている。理論の節でみたように、井戸型ポテンシャルモデルをもとにした計算ではシュタルクシフトは電界に対して放物線状になる。しかし、この系では25Vの電圧(電界50kV/cm)までシュタルクシフトは観測されなかった。この原因は図10のようなポテンシャル構造を仮定すると説明することが可能である。QD内の電子はそのボーア半径がQDの底辺の大きさに匹敵する($a_B \sim 30$ nm)と考えられる。そのため、電界を

印加した際におこるシュタルクシフトの原因は正孔の変位が支配的である。また、文献[11]によれば、In、Gaの相互拡散を考慮したポテンシャル構造をもとに量子状態を計算すると、電子がQDの底辺に、正孔がQDの頂点近傍に位置することがありうるということが示されている。もし、このようなポテンシャル構造であれば、電界が小さいときの電子は電界の効果を受けにくいいため変位しない。一方で、正孔もQDの頂点付近に存在するため狭いポテンシャルが原因で変位することが困難である。結果として図10のIの状態をある電界まで維持するため、シュタルクシフトが観測されない。電界が中程度になると動きやすい正孔がQDのポテンシャルのふちに沿う形でQDの底辺に変位し、そこではじめてシュタルクシフトが観測される。さらに電界強度を増加すると、電子も正孔もQDの底辺付近に局在し、広いポテンシャルを感じるため連続的なシュタルクシフトを観測することができると考えられる。

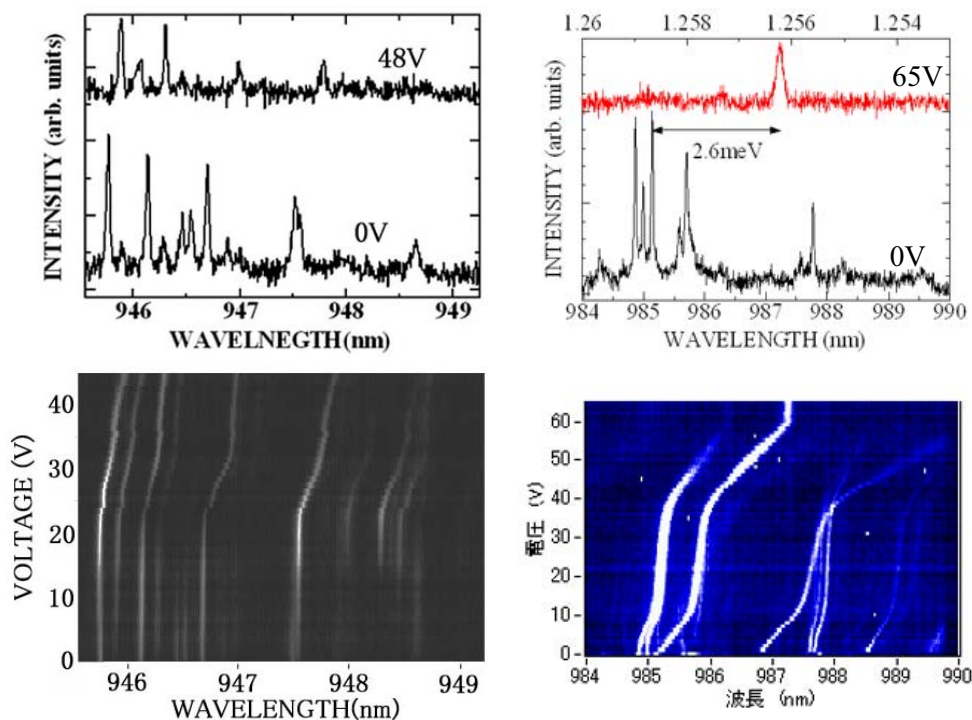


図9 横電界印加時の顕微PLスペクトル（上図）と電圧 vs 波長の顕微PL強度マッピング（下図）
左図は、946～949nmの量子ドット、右図は984～990nmの量子ドット

この結果は図9に示されているQDだけではなく多くのQDで同様の振る舞いが観測されている。しかし、QDの状態ごとにシュタルクシフトをはじめる閾値電圧は異なっている。統計的な観点も視野に入れてQDのポテンシャルの形状が明らかにできればよいと考えている。

以上より、デバイス構造を工夫することによって単一QDの励起状態を電界によって大きく変化させることができた。

実験で得られたシュタルクシフト 3meVと、電場を考慮した井戸型ポテンシャルモデルによる簡単な計算から、結合QDでの束縛エネルギー

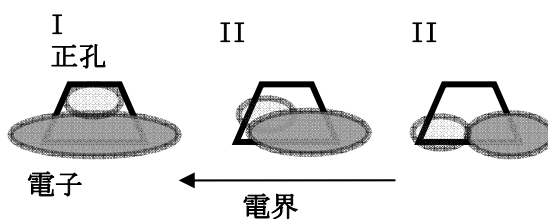


図10 電界に対する電子と正孔の動き（模式図）。I: 電界がない状態、II 中間的な電界強度の状態、III 電界が強い状態

一は $300 \mu\text{eV}$ 以上が期待でき、この横電界印加構造は、励起子 2qubit 素子でのビット間相互作用の形成&制御に利用可能であることが明らかになった。同様の QD で結合 QD を作製した場合には、励起子状態と QD 間励起子分子状態(量子もつれ状態)を区別することができ量子演算素子として機能することが期待できる。今後は、二つの近接する量子ドットに横電界を印加した場合のシタルクシフトの測定と、両方の QD を励起した場合と片方の QD を励起した場合とを比較してクーロン結合によるエネルギーシフトを測定することが課題である。

A-3. 励起子 2qubit 量子論理ゲートでの2励起子間の「量子もつれ」形成

2qubit 量子論理ゲートの条件としては、図11左図に示すように2つの励起子状態の組である4状態 $|00\rangle, |10\rangle, |01\rangle, |11\rangle$ を独立に形成できることと、2つの励起子間に「量子もつれ」を有することが必要である。特に後者については、2つの励起子間に相互作用を生じさせ、それによって ΔE だけエネルギーシフトした $|11\rangle$ 状態を形成できることが重要である。その場合は、2qubit 状態 ($|00\rangle, |10\rangle, |01\rangle, |11\rangle$ の4状態)は、2組の1qubit 状態 ($|0\rangle, |1\rangle$ の2状態)の積にならない(Factorize されない)ので、2つの励起子間に「量子もつれ」を有する4状態として利用可能になる。そのために、2つの励起子状態 $|01\rangle, |10\rangle$ を独立に光励起する技術と、2励起子が生成された場合にエネルギーが1励起子状態からシフトした新しい励起子分子状態 $|11\rangle$ を生成する技術の開発を行った。

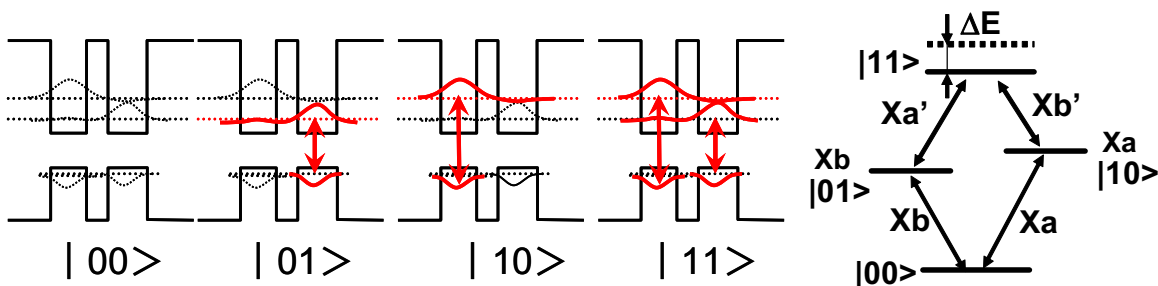


図11 結合量子ドットでのそれぞれの量子ドットに閉じ込められた2つの励起子を利用した4状態 $|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle$ の形成と、エネルギーバンド図。2つの励起子間に相互作用を生じさせることによって ΔE だけエネルギーシフトした状態 $|11\rangle$ が形成できる。エネルギーシフトがある場合は、4つの2qubit 状態は、2組の1qubit 状態にはFactorize できない。すなわち相互作用 ΔE によって、2つの励起子間に「量子もつれ」を有する4状態の形成が可能になる。

結合ドット構造を用いた励起子 2qubit 量子論理ゲートでは、図11に示すように、それぞれの量子ドットに閉じ込められた励起子を量子ビットにして、4つの状態を形成する。すなわち、両方のドットA, Bに励起子が無い場合(結晶基底状態)が $|00\rangle$ 状態、片方のドットAのみに励起子が存在する状態が $|10\rangle$ 状態、片方のドットBのみに励起子が存在する状態が $|01\rangle$ 状態、両方のドットA, Bに励起子が存在して、励起子分子を形成している状態が $|11\rangle$ である。

ここで、ドット間の距離が近い強結合ドット(障壁層厚が5nm程度)の場合は、励起子を構成するホールはそれぞれの各ドットA, Bに局在しているので、それによって量子ビット a, b を指定する。

一方、励起子を構成する電子に関しては、波動関数が一部隣の量子ドットに染み出している擬結合準位 Xb と擬反結合準位状態 Xa を利用する。この擬(反)結合状態とは、2つの量子ドットはエネルギーがわずかに異なり、完全対称な(反)結合状態ではないために、図11左図に示すように電子はA, Bどちらか片方のドットに偏在している状態を示している。

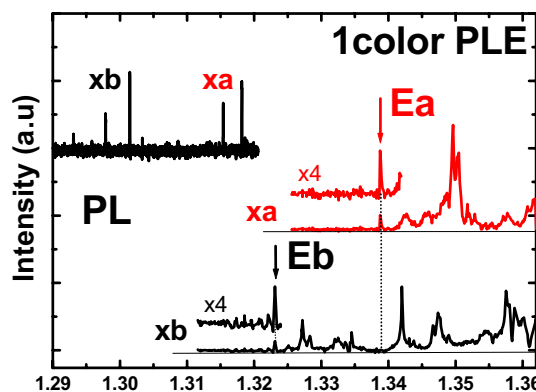


図12 Xa 準位と Xb 準位のPLE特性。 Ea , Eb のエネルギーを利用すると Xa と Xb をそれぞれ独立に励起できる。

「量子もつれ」を形成するための量子ビット間の相互作用に関しては、強結合ドットの場合は、2つの励起子間に働く励起子分子相互作用を利用する。これによって、図11右図に示すように、2つの励起子が一つずつ生成された場合は、2つの独立した励起子のエネルギーの合計に対して ΔE だけ低エネルギーにシフトした励起子分子状態 $|11\rangle$ を形成する。

単一ドット中の励起子と励起子分子を利用した4状態の報告例があるが、結合ドット中の擬結合準位、擬反結合準位の励起子を用いた4状態の提案は、我々独自のものである。この方法の利点は、単一ドットの場合と違って、量子ビット数の拡張(多ビット化)が可能であることである。よって、この方法を用いれば2qubit以上の量子論理ゲートの構成も可能である。

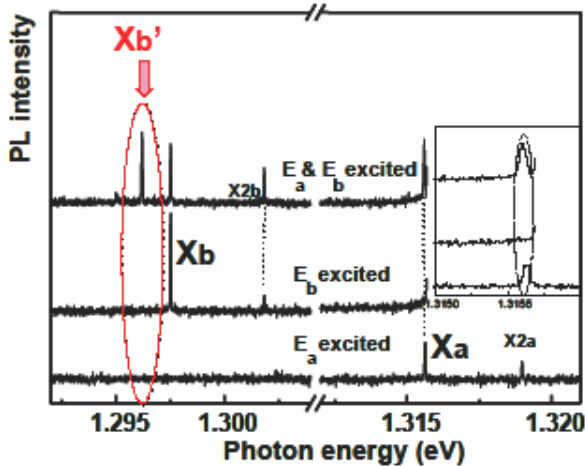


図13 Xa または Xb のみ励起子を生成した場合(中段、下段) 2つの励起子を生成した場合(上段)、励起子分子による新しいピークが存在する

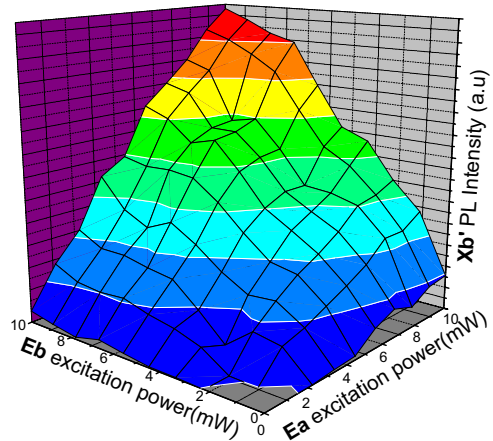


図14 Xa または Xb の励起子パワーに対する、励起子分子 X b' の発光強度。Xa と X b をそれぞれ励起した場合に限り、励起子分子が生成される。

まず図12のバリア厚 5nm の結合量子ドットの PL では、量子力学的結合によって擬結合準位によるピーク(Xb)と擬反結合準位(Xa)の2つのグループからの発光が確認された。次に、図12の PLE に着目すると、Xb と Xa の電子状態の間には、それぞれの準位に独立に励起できる準位(Ea と Eb)がある事が確認できる。すなわち、Xa 系列の励起準位である Ea ピークのエネルギーは、Xb 系列にはピークが存在していない。また逆に、Xb 系列の Eb ピークのエネルギーでは、Xa 系列にはピークは存在していない。

このような固有の PLE ピークを利用すると、それぞれの励起子状態を独立に励起して $|00\rangle$, $|10\rangle$, $|01\rangle$, $|11\rangle$ の4状態を作る事ができる。具体的には、Ea ピークを選べば、Xa 系列のみにキャリアを作る事ができ、状態 $|10\rangle$ を作る事ができる。また Eb ピークを選べば Xb 系列のみにキャリアを作る事で状態 $|01\rangle$ を作る事ができる。

次に我々は、2つの励起光源を用いて、Xb 系列と Xa 系列にキャリアを作ったときの PL 発光特性を調べた。その測定例を図13に示す。

図13の一番下には Ea を励起した際の PL 特性を示す。この場合は、Xa 系列のみの発光が確認されるが、Xb 系列の発光は無い事が分かる。真ん中の図は、Eb を励起した場合の PL 特性を示す。Xb 系列は発光しているが Xa 系列は発光していない事が確認できる。

最後に、一番上の PL は Xa 系列と Xb 系列の両方にキャリアを作った場合である。この場合は、Xa と Xb の発光が確認される事はもちろんであるが、その他に、Xb ピークの 1.3meV 低エネルギー側に新しいピーク(Xb')が現れた。これは、Xa と Xb の2つの励起子が結合した事による励起子分子からの発光の可能性が考えられる。そこで、このピークの起源について調べた。

まず初めに、新しく出現したピーク(Xb')の励起強度依存性の測定結果から、Xb' は励起子ではなく、励起子分子による発光であることが明らかになった。しかしながら、結合ドット中の励起子分子の場合は、2つの可能性が考えられる。一つは、Xa と Xb の2つの励起子による励起子分子、

もう一つは Xb 自身の励起子分子の可能性である。

これを明らかにする為、2波長励起強度依存実験を行った。この実験方法は、2つの励起光源を Ea と Eb の励起準位にセットして、それぞれの励起強度を変化させたときの Xb' の発光強度を観測する方法である。その実験結果を図14に示す。もし、励起子分子 Xb' が Xb 自身の励起子分子であるならば、Eb の励起強度のみに依存するはずであろう。また、Xa と Xb の励起子による励起子分子であるならば、Ea と Eb の両方の励起強度に依存すると考えられる。図14から明らかなように、Xb' の発光強度は、Ea と Eb の双方を同時に励起した場合に強くなり、特にEaとEbの励起強度が同じときに最も強くなる事が分かった。この事から、Xb' の起源は、Xa と Xb の励起子が結合する事によって生成した励起子分子である事が証明された。よって、このエネルギーがシフトした |11> 状態(Xb')の形成が可能になり、我々が提案している励起子2qubit 量子論理ゲートにおける4状態の生成が可能になった。また、2つの励起子 qubit 間の相互作用エネルギーは、光制御法による2qubit 演算を行うための必要なエネルギー間隔(0.2~0.4meV)に対しては十分な大きな 1.3 meV 以上の値が得られた。

以上のA-1~A-3を通して、2つの励起子 qubit 間に相互作用と、「量子もつれ」を有する励起子2qubit 量子論理ゲートの基本素子構造の開発に成功した[1]

A-4. 1qubit の回転ゲート操作

量子論理ゲートでは、1qubit の回転ゲート操作と2qubit の制御回転ゲートの基本素子の組み合わせで全ての量子演算が実行可能である。そこで、A-1 節~A-3 節で述べた素子構造の開発と共に、素子の動作実証を目指して量子論理ゲートの光制御技術(1qubit の回転ゲート操作と2qubit の制御回転ゲート操作)の開発を行った。

まず、単一の量子ドット中の励起子を用いた 1qubit 回転ゲート操作は、InGaAs 及び AlGaAs 材料系ではすでに報告例があるが、励起子の閉じ込め効果が大きく、コヒーレンス時間が比較的長い InAs/GaAs 半導体量子ドット系や結合量子ドット系では、未だ報告されていない。我々はこの材料系に着目し、単一量子ドット、結合量子ドット中の励起子を用いた量子制御・演算技術の開発を目指した。ここでは、InAs 単一量子ドット、結合量子ドット中の励起子を用いた 1qubit の操作に相当するラビ振動の光パルス面積制御と、さらに光パルス列を用いた高精度コヒーレント量子制御について述べる。

(単一量子ドットの PL 及び PLE)

はじめに我々は、単一量子ドットの電子状態を詳しく調べた。図15左は Wetting 層吸収帯を励起したときの発光スペクトル(PL)を観測したものである。一本の非常に鋭い励起子の発光スペクトラム(発光線幅約 20 μ eV)が観測された。これはゼロ次元励起子の特徴を非常によく表している。

この単一量子ドットの電子状態を調べるために、フォトルミネッセンス励起スペクトラム(PLE)の測定を行った。図15右はこの単一ドットの発光スペクトルに対する励起フォトルミ(PLE)を示す。横軸は、PL の発光エネルギーと励起エネルギーの差(ΔE)を示している。PLE からゼロ吸収領域の中に $\Delta E=8.5\text{meV}$ と 14meV の 2 つの鋭い吸収ピークが確認された。それぞれ第一励起準位(e1)と

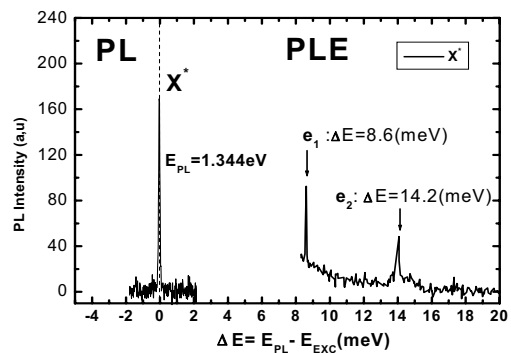


図15 単一量子ドットの励起子発光特性 (PL,PLE)

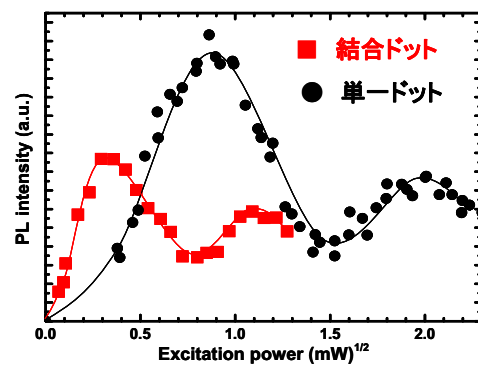


図16 結合量子ドット中の励起子および単一量子ドット中の励起子の平均励起パワー密度の 1/2 乗に対する発光強度変化 (ラビ振動の観測)

第二励起準位(e_2)である。

(単一量子ドットおよび結合ドット中の励起子のラビ振動観測)

ラビ振動について簡単に述べる。 $|0\rangle$ 状態(結晶基底状態)と $|1\rangle$ 状態(励起子状態)で表せる理想的な2準位系モデルを仮定する。この2準位間のエネルギー差に等しいコヒーレントな光を照射すると $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の間の遷移確率は単調に増加するのではなく正弦波関数で周期的に吸収と放出を繰り返す。これがラビ振動である。量子コンピュータ用の量子ゲートでは照射する光のパルス面積(パルス時間幅×光強度)を制御することにより任意に存在確率を変化させて1qubitの回転ゲートとして利用する。図16に示した単一ドットのデータは、図15に示した $\Delta E=8.6\text{meV}$ の e_1 励起準位にピコ秒パルスレーザを合わせて、パルス面積を変化させたときの発光強度を観測した結果である。横軸は照射したパルスレーザの平均パワーの1/2乗(パルス面積に相当)、縦軸には発光強度を示している。パルス面積を増加させていくと、発光強度は振動している様子が分かる。この振動は、正弦波関数に良く一致しており、単一量子ドットのラビ振動のパルス面積による制御に成功した。照射する光パルス面積の正確な制御を行うことで、量子コンピュータへの1qubitの回転ゲート操作を実現することができる。すなわち、存在確率を $|0\rangle$ から $|1\rangle$ に または $|1\rangle$ から $|0\rangle$ にシフトさせることができる。また、InAs 量子ドット励起子のラビ振動周期より算出できる遷移双極子モーメントは32 デバイであり、InGaAs 材料系による量子ドットとほぼ同じ大きさである事が分かった[12]。

さらに、結合ドット中の2つの励起子状態間(図11右図の $|00\rangle \leftrightarrow |01\rangle$ 励起状態 e)において励起子の存在確率をパルス面積によって制御する1qubit回転ゲート操作に相当するラビ振動制御に関する実験を行った。その実験結果の一例を図16に示し、上記の単一量子ドット励起子の制御実験例と比較した。2つの状態間($|00\rangle \leftrightarrow |01\rangle e$)のエネルギーに共鳴する光パルス(パルス幅5psec)を照射し、パルス励起強度(パルス面積)を増加していくにつれて、観測準位 $|01\rangle$ 基底状態 g からのPL発光強度は正弦波的に振動を繰り返してラビ振動していることが測定された。発光強度振動の最初のピークは π パルス励起、また発光強度振動の底の部分は 2π パルス励起に相当する。このことから結合量子ドット構造において位相回転角 3.5π までの回転ゲート操作(ラビ振動の制御)が可能になった。振動周期から計算した結合量子ドット中の励起子の遷移双極子モーメントは単一量子ドットの値よりも大きい値であることがわかった[13]。

(単一量子ドット中の励起子のコヒーレント量子制御)

量子論理ゲートで複数回の1qubitゲートを実行するためには、ラビ振動に加えて制御光パルス列間の位相を含めた制御(コヒーレント量子制御)を行う必要がある。ここでは、高精度マイケルソン干渉計と顕微分光系を用いた単一量子ドット中の励起子のコヒーレント量子制御について述べる。

コヒーレント制御の実験では、ダブルパルスの位相差を任意の値で固定をする必要があるが、音や空気の揺らぎによる振動や熱ドリフトによるステージ位置の変化などの影響により、長時間位相を固定することは非常に難しかった。そこでレーザ距離計を用いて超高速パルス対の位相安定システムを制作した。図17にレーザ距離計を用いた高精度マイケルソン干渉計の内部の模式図を示す。実線が超高速パルス光の光路であり、点線はレーザ距離計の光路である。超高速パルス光はマイケルソン干渉計の内部に入射し、ハーフミラーによって2つに分けられる。この光はパルスモータステージとピエゾアクチュエータステージに取り付けられた各々のレトロフレクターによって反射し、再びハーフミラーに入射し、ダブルパルスのレーザ光が生成される。レーザ距離計には、2波長He-Neレーザが用いられており、ドップラー効果を利用して距離を直読している。超高速光パルスと同じ光路を通過しているのでリアルタイムでの2つのレトロフレクターの距離の差を測定できる。

この距離の差はダブルパルスにおける位相差であり、距離計は位相差を直読している。位相安定システムを制御した時におけるレーザ距離計の値の変化は、 $\pm 3.7\text{nm}$ 以内と非常に安定化させることに成功した。これは900nmの光パルスで約 1.5° 以下の位相制御が可能であり、約12アト秒(as)の制御が可能となった。さらにこのパルス列を用いて、発光分光法を用いた単一量子ドット中の励起子の光制御実験を行ったところ、図18に示すように光パルス間の位相差に応じて励起子密度の振動が見られその位相誤差は、 1.5 度以内であった。

以上より、高精度マイケルソン干渉計にレーザ距離計を組み合わせることで、位相誤差 1.5 度以下の高精度なコヒーレント量子制御が可能になった[14]。

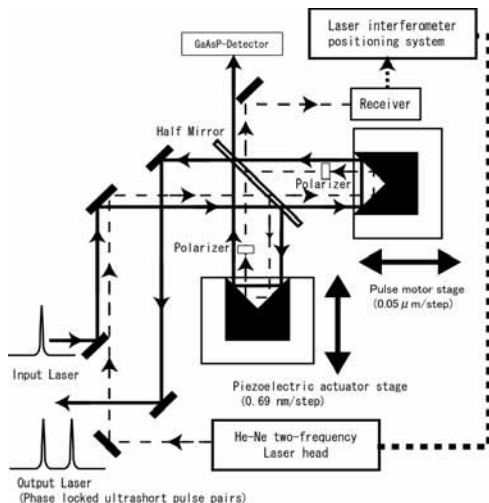


図 1 7 レーザ距離計を用いた高精度
マイケルソン干渉計

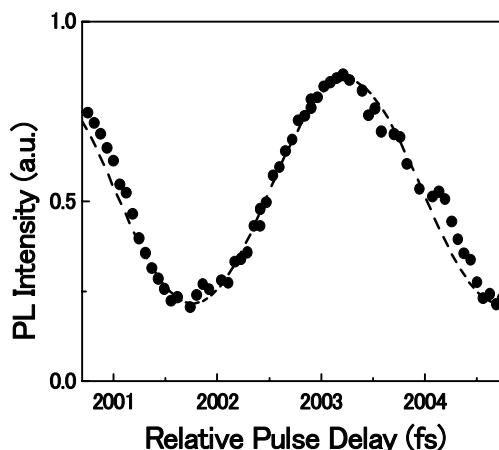


図 1 8 コヒーレント制御実験結果
(1.5° の高精度・高安定制御)

A-5. 2qubit の制御回転ゲート操作

A-3 節では、2qubit 量子ゲートに必要な2つの励起子間に「量子もつれ」を有する 4 つの状態 $|00\rangle$ 、 $|01\rangle$ 、 $|10\rangle$ 、 $|11\rangle$ を励起子と励起子分子を用いて作り出せる事を示した。この4状態を光制御し、各状態のキャリアが緩和する際のPL発光をモニターすることによって、量子論理ゲートとしての演算と演算結果の観測を行うことができる。

ここでは、励起子2qubit量子論理ゲートの動作実証を目的として、 $|01\rangle$ 状態を形成した場合に限り $|01\rangle \Rightarrow |11\rangle$ の光制御を行うという条件付2qubit制御ゲート操作(カスケード制御)と、 $|01\rangle$ 状態を形成した場合に限り $|01\rangle \Leftrightarrow |11\rangle$ の回転 (θ) 制御を行うという条件付き2qubit回転ゲート(条件付ラビ振動制御)操作の2つステップで研究を進めた。

まず、条件付2qubit制御ゲート操作(カスケード制御)に関しては、 $|00\rangle$ 、 $|01\rangle$ 、 $|10\rangle$ 、 $|11\rangle$ の4状態に関して、パルスタイミング同期した2波長パルスレーザー(シンクロロック2波長ピコ秒レーザー)を用いて、 $|00\rangle \Rightarrow |01\rangle$ と、 $|01\rangle \Rightarrow |11\rangle$ の2つの励起パスを光制御し、励起子分子 $|11\rangle$ からの発光 Xb' と、励起子 $|01\rangle$ からの発光を測定することによって、励起子 $|01\rangle$ 状態を生成した場合に限り、 $|01\rangle \Rightarrow |11\rangle$ の励起子分子を生成する条件付2qubit制御ゲート操作(カスケード制御)が可能かを調べた。

2波長パルスの時間間隔 Δt を変化させて、励起子状態 $|01\rangle$ からのPL発光 (Xb) と励起子分子状態 $|11\rangle$ からのPL発光 (Xb') を測定することで、2波長パルスの励起順番、励起時間間隔に応じて、励起直後の状態の測定が可能になる。この測定結果を図 19 に示す。図の横軸は2つのタイミング同期パルスの時間差を示す。 Δt が負の領域は、 Xb 系列励起子の励起光パルスを先に照射してその後 Δt 遅れて Xa 系列励起子の励起光パルスを照射している事を示す。また逆に Δt が正の領域では、 Xa 系列励起子の励起光パルスを先に照射して、その後に Xb 系列励起子の励起光パルスを照射する事を意味している。 Xb の励起子の発光ピークは $\Delta t = 0$ 付近で減少するのに対して、励起子分子 Xb' の発光ピークは逆に増加している事が分かった。これは、励起子 $|01\rangle$ の存在確率が減少するのに対して、励起子分子 $|11\rangle$ 状態の存在確率が増加していることを意味している。また、 $\Delta t < 0$ 領域と $\Delta t > 0$ 領域では、発光ピークの傾きが時間軸に対して非対称である事が分かった。これらの一連の現象は、結合ドット中の励起子 $|01\rangle$ と励起子分子 $|11\rangle$ の間でカスケードな過程 ($|00\rangle \Rightarrow |01\rangle \Rightarrow |11\rangle$) が成立していると考えられる事ができる。励起子分子のカスケード過程について述べる。励起子分子は励起子が2つ結合した状態である。よって励起子分子が生成される為には、必ず励起子が1個生成された状態の過程を通らなければならない。今回の実験によって明らかになった結合ドットの励起子分子カスケード過程をバンド図 20 を用いて説明する。 $\Delta t < 0$ 領域での状態について説明する。このときは、2つの励起パルスの順番が Xb 系列 \Rightarrow Xa 系列である。よって一番目の励起パルスは Xb 系列の励起子を生成し状態 ($|01\rangle$) を作る。次に2番目の励起

パルスは、Xa 系列(Xa'系列含む)を励起し、 $|01\rangle$ 状態から、励起子分子の状態 ($|11\rangle$) を生成する。 $\Delta t = 0$ 付近で、励起子 Xb の存在確率が減少し、励起子分子 Xb' の存在確率が増加するのは、カスケードな過程 ($|00\rangle \Rightarrow |01\rangle \Rightarrow |11\rangle$) によって、励起子分子が生成されている事を示している[15]。以上より、2波長光パルス励起法によって、この素子での条件付の2qubit 制御ゲート操作 ($|01\rangle$ が生成されている場合に限り $|11\rangle$ の生成) が可能であることが示された。

次に、A-1節~A-4節の個々の要素技術(単一量子ドット(1qubit)ラビ振動制御、コヒーレント量子制御、励起子2qubit 素子での量子もつれを有する4つの2qubit 状態の形成、結合ドットにおけるラビ振動制御、結合ドット中の励起子分子のカスケード生成過程)を用いて 2qubit 制御回転(CROT)量子論理ゲートの動作実証の初期実験を行った。

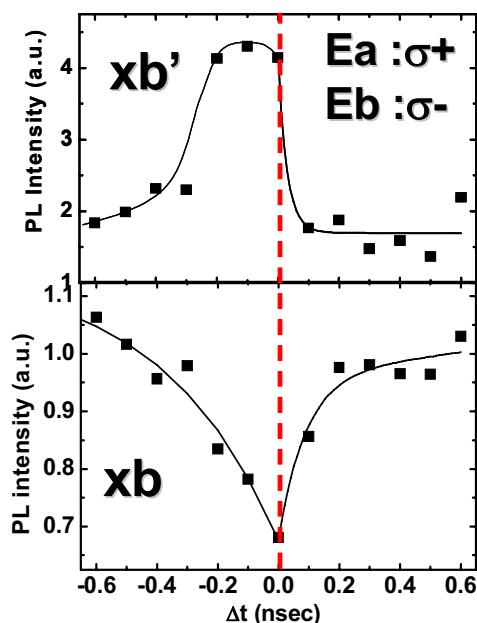


図19 条件付2qubit制御ゲート操作(カスケード制御)の実験結果。2波長タイミング同期光パルスで①、②のパスを光励起する際のパルス間の時間差に対する励起子、励起子分子のPL発光強度の変化。2波長パルス励起が①⇒②の場合に、励起子分子 Xb' の発光強度の増加が見られた。

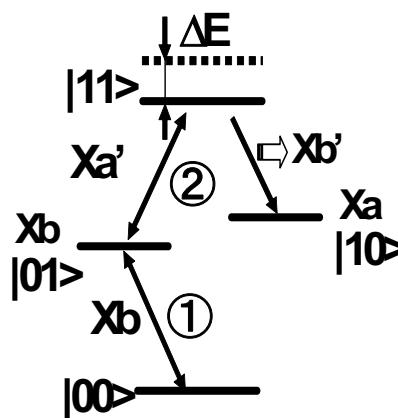


図 20 カスケードプロセス $|00\rangle \Rightarrow |01\rangle \Rightarrow |11\rangle$ での状態遷移図。カスケード遷移①⇒②を2波長のタイミング同期光パルスで制御して、励起子分子発光 Xb' によって $|11\rangle$ 状態の存在確率をモニターする。励起子分子 $|11\rangle$ を生成するために2波長光パルスの偏光はそれぞれ $\sigma+$ 、 $\sigma-$ に選んだ。

2量子ビットの制御回転ゲート操作実験では、図21右図に示すように、4つの2qubit状態の内、あらかじめ $|01\rangle$ 励起子を作っておき、 $|01\rangle \Leftrightarrow |11\rangle$ 状態間をラビ振動させる事ができれば制御回転(CROT)ゲート動作が可能である。そのために、パルスタイミング同期した2波長のピコ秒パルスを用いて、光パルス1で、あらかじめ $|01\rangle$ 状態励起子を作り、次に $|01\rangle \Leftrightarrow |11\rangle$ のエネルギーに相当する光パルス2で励起子分子 $|11\rangle$ 状態の存在確率をパルス面積制御した。 $|11\rangle$ から $|10\rangle$ への発光再結合によるPL(Xb')を測定することによって $|11\rangle$ 状態の存在確率をモニターした。その結果を図21左図に示す。2qubit状態(励起子分子)の存在確率(発光強度)はパルス励起強度(パルス面積)に対して、回転角度 θ が π 以下の操作に相当する増加&飽和特性が得られた。以上より、2qubit制御回転ゲートでの回転角度 θ が π 以下の操作が可能になった。応用上は、回転角度 θ が π の場合は、特殊な2qubit状態の形成(Bell状態の形成等)には利用可能である。しかし、2qubitの万能ゲート(CROT万能ゲート)として利用するためには $\theta = 0 \sim 2\pi$ の回転を任意に制御する必要があり、2qubit制御での θ を π 以上回転可能にすることは、今後の課題である。

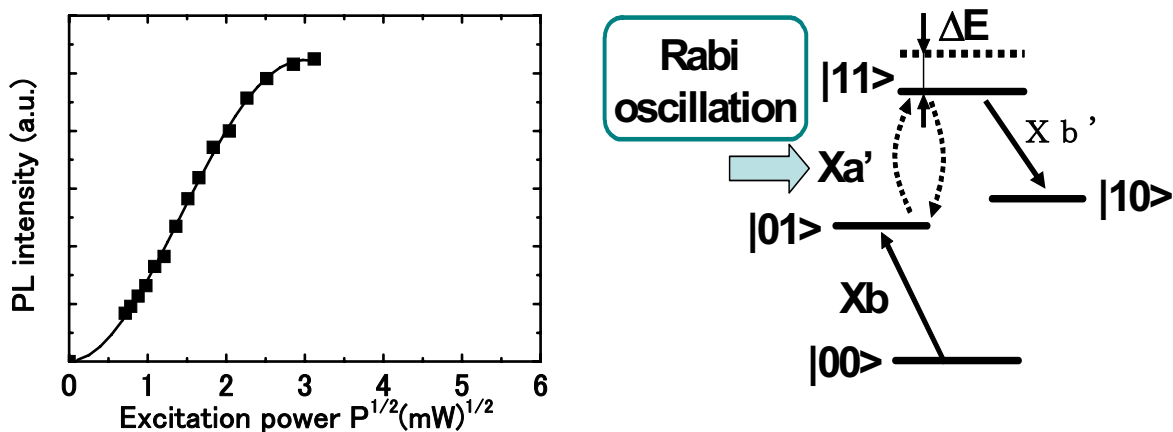


図 21 2qubit 制御回転(CROT)ゲート操作の初期実験結果。左図：励起光パルス面積に対する 2qubit 状態 $|11\rangle$ からの発光強度変化 ($|01\rangle \leftrightarrow |11\rangle$ 間のラビ振動制御実験結果) ■：実験結果、実線：正弦波関数フィッティング、右図：2qubit 制御回転ゲート操作実験の説明図。光パルス 1 で $|01\rangle$ 状態励起子を生成して、次にタイミング同期した光パルス 2 で $|01\rangle \leftrightarrow |11\rangle$ 状態間の存在確率を光制御する。 $|11\rangle$ 状態の存在確率は、 $|11\rangle$ から $|10\rangle$ への発光再結合に伴う PL (Xb') 発光を通してモニターする。

A-6. 新しい研究展開：結合量子ドット構造からの2波長の単一光子発生

励起子 2qubit 量子論理ゲートでは、 $|01\rangle$ 状態の励起子と $|10\rangle$ 状態の励起子との間の「量子もつれ」を利用すると、相関を有する2波長の単一光子光源としての応用が期待される。また、この2つの励起子からの単一光子発生過程を調べることで、逆に、ドット間の相互作用の状態や励起子間の「量子もつれ」の状態が測定できる。

そこで、時間相関単一光子係数法によって結合量子ドット系の単一光子放出過程とドット間の相互作用(電磁気学的相互作用)について調べた。相関光子実験は量子ドットの光子放出過程を調べる有効な手段として知られている[16]。

我々が用いた試料は分子線エピタキシャル成長法によって作製された GaAs 結晶中の InAs 自己組織化量子ドットである[2][4]。本研究で用いた結合量子ドットにおけるドット間のバリア厚は 7 nm であり[図22(a)]、キャリア移動が無視出来るほど十分に量子力学的結合が抑制されている[4]。単一結合ドットの観測は試料表面に施された金属マスクの細孔を通して成された。

図22(b)は単一結合ドットの顕微発光スペクトである。結合ドットを構成する2つの量子ドットからの発光が明瞭に観測されている。本研究において、これらの量子ドットはそれぞれ固有の励起準位を持ち、ドット間のキャリア移動が無視出来る事から、2台の励起光源レーザーを用いて2のドット(QD1, QD2)を独立に励起できる[2]。我々はこの特質を利用して2つの量子ドットを個別あるいは同時に励起し、結合量子ドットの光子放出過程とドット間相互作用について調べてきた[2]。本稿では、時間相関単一光子係数法による評価結果を紹介する。

光子相関実験系は一般的な Hanbury-Brown-Twiss setup である[16]。光路中には2つの分光器が置かれており、任意の量子ドット(QD1 or QD2)を選択して後段の単一光子検出器にて検出す

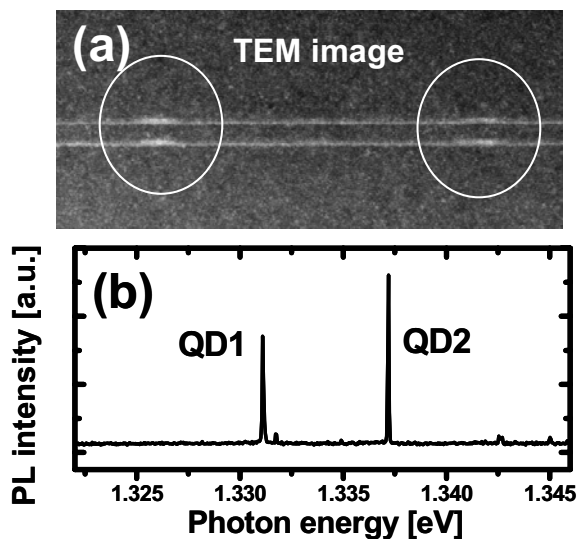


図 22 (a) 結合量子ドットの断面透過電子顕微鏡写真。(b) 単一結合量子ドットの発光スペクトル。

る。検出器からの信号は時間相関係数ボードの Start, Stop 信号として入力され、係数ボードは2次の光子相関スペクトルを出力する:

$$g_{\alpha\beta}^{(2)}(\tau) = (I(t)I(t+\tau)) / (I(t)(I(t+\tau)))$$

ここで、添え字の α (β) は Start (Stop) 信号として選択された量子ドットを意味する。

まず初めに結合ドットからの単一光子放出を確認する。図23(a-b)は1波長励起時の QD1, QD2 の自己光子相関スペクトルである。ここで、2つのドットはそれぞれの励起準位で個別に励起されている。スペクトルは遅延時間=0sec に anti-bunching 構造を有しており、結合ドットを構成する2つの量子ドットが単一光子を放出している事が分かる。次に、2つのドット間の光子相関を観測する。図24(a)は QD1 と QD2 間の相互光子相関スペクトルである。驚くべき事に、相互相関では4~5 nsec に及ぶ長い anti-bunching が見られた。図24(b)の遷移図を用いて考察すると、相互光子相関測定では $|1\rangle|1\rangle \rightarrow |0\rangle|1\rangle \rightarrow |0\rangle|0\rangle$ の遷移過程が観測される。ここで、Stop 信号の検出すなわち QD2 を検出する時は QD2 はドット間相互作用の無い状態で単独発光する事と成る。この場合、QD2 は自らの緩和時間でバンド内エネルギー緩和を起こす為、遅延時間=0sec での発光検出確率が小さくなり anti-bunching を起こす。そして、エネルギー緩和の進行によって徐々に発光を回復するため長い回復時間を経ると考えられる。すなわち、電磁気学的なドット間相互作用が有る場合と無い場合の差が光子相関スペクトルの anti-bunching として観測されているのである。

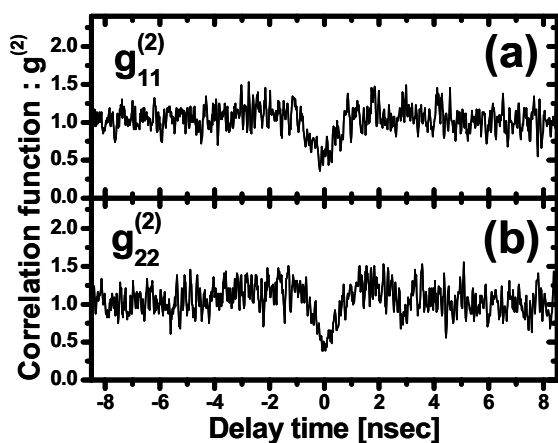


図23 結合量子ドットの自己光子相関スペクトル:(a) QD1, (b) QD2.

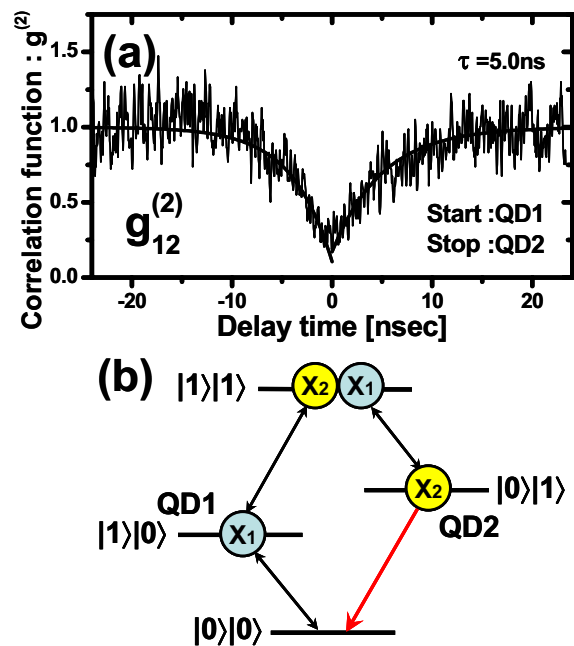


図24 (a) 結合量子ドットの相互光子相関スペクトル (b) 光学遷移ダイアグラム

以上では、結合量子ドットの光子放出過程とドット間相互作用について議論した。結合ドットを構成する2つの量子ドットがそれぞれ単一光子を放出している事が確認された。相互光子相関スペクトルで長い anti-bunching が観測され、ドット間の電磁気学的相互作用によるエネルギー緩和時間の変調が示唆された。

これまで、量子力学的に結合した強結合ドット中の励起子対を同時励起した際のフォトン発生過程の計測は、B. D. Gerardot らによって報告されたが[17]、それぞれのフォトンの発生を独立に制御できない。本成果は、2つのフォトン発生を独立に制御することが可能な、電磁気学的に結合した弱結合量子ドットからの相関を有する2波長フォトン発生 of 最初の実験例である。

課題A: 参考文献

- [1] K. Goshima, S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi and T. Sugaya, , Appl. Phys. Lett., Vol.87, 253110-1 (2005) K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, A. Shikanai, T. Sugaya, Inter. quantum electronics conf. (IQEC and CLEO-PR 2005) 2005/7/12
- [2] S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi, K. Goshima, T. Sugaya, , Appl. Phys. Lett. vol.87, 182103 (2005).
- [3] S. Yamauchi, K. Komori, T. Sugaya and K. Goshima: Jpn. J. of Appl. Phys. vol. 43, no4B, 2083 (2004)
- [4] S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi, K. Goshima and T. Sugaya, , J. Appl. Phys., Vol.99, 033522-1, (2006)
- [5] S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi, K. Goshima, T. Sugaya, Jpn. J. Appl. Phys. 44, 2647 (2005).
- [6] M. Baier, F. Findeis, A. Zrenner et al., Phy. Rev. Lett. 64, 195326 (2001).
- [7] E. A. Stinaff, M. Scheibner, A. S. Braker et al., Science 311, 636 (2006).
- [8] E. Biolatti, et al., Physical Review Letters 85 5647(2000)
- [9] Q. Xie, A. Madhukar, P. Chen, and N. P. Kobayashi Phys. Rev. Lett. 75, 2542(1995)
- [10] G. Bastard, E. E. Mendez, L. L. Chang and L. Esaki, Phys. Rev. B 28 3241(1983)
- [11] W. Sheng and J. P. Leburton, Phys. Rev B63 161301(R), Physica E17 50-55(2003)
- [12] K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, A. Shikanai, and T. Sugaya, , Jpn. J. of Appl. Phys., Vol.45, No.48, 3625, (2006)
- [13] K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, T. Sugaya, SSDM. A-2-4 (2006)
- [14] T. Okada, K. Komori, K. Goshima, S. Yamauchi, I. Morohashi, T. Sugaya, O. Yamazaki, M. Ogura and T. Hattori, , Jpn. J. Appl. Phys., vol.43, no.9A (2004)
- [15] K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi and T. Sugaya. CLEO/QELS. QThH5 (2006)
- [16] Single Quantum Dots, edited by P. Michler (Springer, Berlin, 2003).
- [17] B. D. Gerardot *et al.*, Phys. Rev. Lett. 95, 137403 (2005).

A-7. 成果のまとめ

課題Aの成果のまとめを次に示す。

1. 励起子2qubit 量子論理ゲートの開発

2つの励起子 qubit 間に相互作用と「量子もつれ」を有する結合量子ドットを用いた励起子2qubit 量子論理ゲートの基本素子構造の開発に成功した。それぞれの量子ドット中の励起子 qubit の独立制御と励起子間に大きな相互作用を有する2qubit 状態 $|11\rangle$ の形成が可能になった。

縦方向電界印加型の励起子2qubit 量子論理ゲート素子構造の開発を行い、縦方向電界印加により励起子2qubit 素子での電子状態およびの結合状態制御が可能になった。スケーラビリティの点で優れた横方向電界印加型の素子構造を提案し、理論解析を通して素子の条件を明らかにした。横方向電界印加素子の試作を行い、電界による電子状態の制御が可能になった。また、細線構造を導入することによって、横電界素子としては他の材料系の報告例よりも大きな最大 3meV の電子状態の制御(シュタルクシフト)が可能になった。

2. 励起子 2qubit 量子論理ゲートの光制御技術の開発

励起子量子論理ゲートでのラビ振動制御実験を通して同素子での1qubitの回転ゲート操作は達成された。次に、同素子での2qubit制御回転ゲート実験を行い、1qubit目(励起子状態)を制御した場合に限り、2qubit目(励起子分子状態)の制御が可能条件付の2qubit制御ゲート操作(カスケード励起制御)は可能になった。さらに、2qubit $|11\rangle$ 状態のラビ振動制御の実験を行い、2qubit制御回転ゲートでの回転角度 θ が π 以下の操作が可能になった。応用上は、回転角度 θ が π の場合は、特殊な2qubit状態の形成(Bell状態の形成等)には利用可能である。しかし、2qubitの万能ゲート(CROT万能ゲート)として利用するためには $\theta = 0 \sim 2\pi$ の回転を任意に制御する必要があり、2qubit制御での θ を π 以上回転可能にすることは、今後課題に残された。

また、新しい研究展開として、励起子 2qubit 量子論理ゲート素子での $|01\rangle$ 状態の励起子と $|10\rangle$ 状態の励起子との間の「量子もつれ」を利用することによって相関を有する2波長の単一光子光源の開発を行った。各々の量子ドットから単一光子の発生と、2つの量子ドットからの相関を有する2波長の単一光子の発生(片方のドットがフォトンが発生した時刻では、もう一方のドットからのフォトン発生は抑制される。)が可能になった。

次に、課題Aの成果の位置づけと類似研究との比較を示す。

本研究では、プロジェクト開始当初の2001年から、結合ドット中の励起子対を用いる励起子2qubit量子論理ゲートの提案を行ってきた。ほぼ同時期に横電界印加型の結合ドットを用いたBiolattiらの理論提案[8]が報告されたが、電界印加が不必要な強結合量子ドットを用いた2qubit量子論理ゲート素子構造、縦方向電界印加型の2qubit量子論理ゲートについては当チーム独自の提案である(特願2001-298076, 2002-265898, US特許6924501, US6974967, [1])。また、Biolattiの理論提案に関しては、現時点においても他機関からの素子実現の報告例はない。一方、プロジェクト開始当時は、他の量子ビットの有力な候補である、超伝導量子ビットについても1qubitの素子の報告例しかない状況であった。

2003年8月になって、単一ドット中の励起子対を用いた2qubitゲートの初期実験がミシガン大学のグループから初めて報告されたが、多ビット化が原理的な不可能な素子構造での2qubit演算の可能性を示すだけに留まり、多ビット化が可能な励起子量子論理ゲート構造は、皆無であった。一方で、2003年10月にNEC, 理研のグループから超伝導電荷量子ビットを用いた素子での2qubit演算実証の初期実験が初めて報告された。

当チームでは、プロジェクト前半には、量子ドット材料、励起子量子ゲート素子構造の開発、光制御技術の開発等の要素技術開発を進め、1qubit素子の開発と1qubit光制御を達成し、励起子qubit間に相関を有する2qubit素子の開発にも成功した。プロジェクト後半からは励起子qubit間に大きな相互作用を有する2qubit素子の開発と2qubit量子論理ゲートの初期動作実証の研究を重点化した。

2005年に、当チームでは、励起子ビット間に大きな相互作用を有し、かつ多ビット化が可能な

結合量子ドットを用いる励起子2qubit論理ゲートの基本構造の開発に成功した[1]。多ビット化が可能な素子構造(結合ドット構造)での2qubit状態(異種励起子が結合した励起子分子状態)の光励起制御&形成は、本報告が初めてである。

2006年には、当チームでは励起子2qubit量子論理ゲート素子の初期動作実証研究を進め、条件付きの2qubit光制御(2qubit状態のカスケード光励起制御)の実験に成功した[15]。多ビット化が可能な結合ドット構造中の励起子量子ビットを用いた2qubit制御に関しては初めての報告例である。また、2qubit状態 $|11\rangle$ のラビ振動制御技術の開発を行い、回転角度が π 以下の条件付の2qubit制御回転動作が可能になった。応用上は、回転角度 θ が π の場合は、特殊な2qubit状態の形成(Bell状態の形成: 励起子量子ゲートでは報告例は皆無)には利用可能である。

(2)研究成果の今後期待される効果

1) 励起子 2qubit 量子論理ゲートに関しては、回転角度が π 以下の2qubit 制御回転ゲートの初期実験までは可能になった。今後の課題としては、a) 結合ドット中のコヒーレンスの良い励起子状態を選ぶこと、b) デコヒーレンスが少ない光制御・観測法の選択、 によって、回転角度 2π 以上の回転ゲート操作を実現し、万能制御回転ゲート(CROT)を完全動作させることが課題である。

その後は、3ビット以上にビット数を拡張させて、固体素子としては初の小規模な量子アルゴリズムの動作実証研究へ展開することが期待される。また、量子通信への応用としては、小規模な量子演算回路を作製して、量子エラー訂正等へ応用することが期待される。

2) 励起子量子論理ゲートの多ビット化に関しては、本報告の層厚方向結合した縦結合量子ドット構造では、Biolattiらの提案(文献[8])の多ビット化の手法を用いれば数~10ビットまでの多ビット化が可能である。具体的には、隣接した量子ビット間に結合(相互作用)を有し、層厚方向に1列に配置した結合量子ドットアレイ(量子ビット間相互作用は固定)を用いて、各演算ステップ毎に、光励起のエネルギーを選択して、量子ビット*i,j*の結合状態、非結合状態を選択して光制御することで多ビットの演算を行う。

一方、それ以上の多ビット化については、サイズ 100nm くらいの大きな量子ドットが2次元面内に結合した横結合量子ドット構造を開発し、演算ステップ毎に電界印加(または光励起)によって、隣接した励起子量子ビット間の結合(相互作用)を超高速制御(量子ビット間結合は可変)することによって行う。その為には、光電気変換(または光励起)によって形成した超短電気パルス(または光キャリア)による励起子量子ゲートの動的な制御(量子演算ステップ毎に量子ビット間の結合制御)を行うことが次の課題である。

3) 励起子2qubit 素子での量子もつれを有する励起子からの単一フォトン発生については、ドット間結合状態の最適化によって、量子暗号通信の長距離化に必須な、量子中継用の「 χ 型」の量子もつれ光子源研究への展開が期待される。さらに、励起子中のスピン状態を、フォトンの偏光状態に転写することが可能な量子メディア変換等への応用が期待される。

3.2 ナノ構造デバイス研究（産業技術総合研究所 超高速光制御研究グループ） (1)研究実施内容及び成果

プロジェクト前半に開発した要素技術を発展させてデバイステクノロジーへのインパクトが大きい課題として(1) 量子ドット集合体を用いた超高速光制御・演算素子(2) 結合ナノ構造を用いた負性抵抗 FET の開発とテラヘルツ帯発振素子への応用を推進した。次に、それぞれの課題での成果を示す。

B-1. 量子ドット集合体を用いた超高速光制御・演算素子

量子ドット集合体を用いた超高速光制御・演算素子に関しては、「量子ドット集合体用のコヒーレント量子制御法の開発」、「高密度、高均一量子ドット集合体の開発と光デバイス応用」、「集積型光制御素子(波形整形素子)の開発」に分けて研究を進めた。

B-1-1. 量子ドット集合体用のコヒーレント量子制御法の開発

半導体ナノ構造体における励起子の超高速コヒーレントダイナミクスの研究は全光型スイッチング素子や量子演算素子など幅広い応用が期待されている。とりわけ、半導体量子ドットは、3次元方向への量子閉じ込めに起因した離散的エネルギー準位によって強い光非線形性と長い位相緩和時間(T_2)を示すため、新しい光学素子の材料として近年ますます注目を浴びている。たとえば、極低温下において単一量子ドット中の励起子の位相緩和時間は数100psを越えるため、サブピコ秒の超短パルスを用いた励起子のコヒーレント制御法を適用する絶好の系となる[1,2]。この方法により励起子の寿命による演算時間の制限を打破した超高速非線形光学素子の実現が期待される。

通常、半導体を光励起して生成される励起子には光周波数と同一の分極振動が誘起される。この分極振動が持続している間、すなわち位相緩和時間内に最初の光パルスと位相同期した第二の光パルスを照射することによって半導体中の励起子密度を自由に制御することができる。第二パルスの位相が第一パルスと同位相のときは励起子密度が増加し、逆位相のときは励起子密度を減少させる。この位相同期パルス対を用いた励起子のコヒーレント制御法によって、寿命より早い時間内に強制的に励起子を消滅させることができる。この様子を示すために量子ドットを単純な2準位系とし、光と2準位系の相互作用を表す光学ブロッホ方程式に従い数値計算を行なった。図 1(a)は単一量子ドットのような均一広がり系に対して通常のコヒーレント制御法を適用した時の励起子分布数の時間変化を示している。励起子の寿命を $T_1=200\text{ps}$ 、位相緩和時間を $T_2=100\text{ps}$ と仮定し、パルス幅は 100fs として計算を行なった。第一パルスと相対位相 π だけ異なる

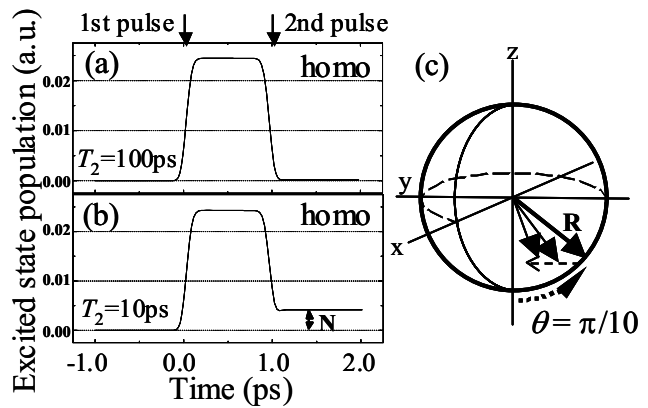


図 1 均一系において従来のコヒーレント制御法を適用した際の励起子分布数の時間発展。位相緩和時間が (a) 100ps と (b) 10ps の場合。(c) はブロッホベクトルモデル

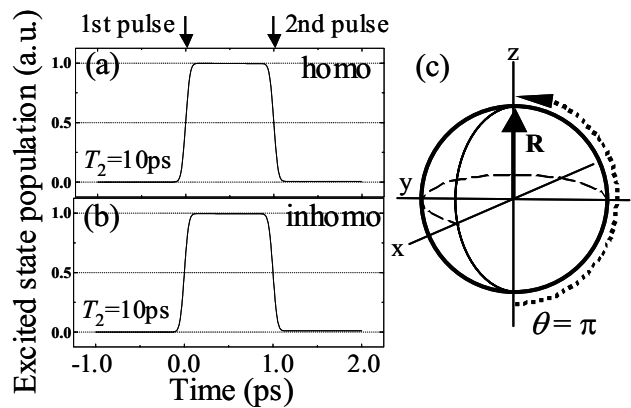


図 2 新しいコヒーレント制御法を適用した際の励起子分布数の時間発展。(a) 均一系と (b) 不均一系の場合。 T_2 はともに 10ps。(c) はブロッホベクトルモデル。

第二パルスを時間間隔 $\tau=1\text{ps}$ だけ遅らせて入射した場合、励起子分布数は第二パルス後に完全に第一パルス入射前の状態に戻っている。つまり T_1 よりも早い時間応答を得ることができる。一方、量子井戸や環境温度の高い場合を想定し、 $T_2=10\text{ps}$ と仮定した時の励起子分布の時間発展を図1(b)に示す。この場合、第二パルス後にも系は完全には初期状態に戻っていないので、励起子のコヒーレント制御が困難であることを示している。これは図1(c)に示したブロッホベクトル \mathbf{R} のようにコヒーレンス成分 (x, y) が位相緩和時間で減衰するためである。すなわちコヒーレント制御のためには位相緩和時間が長いことが必要であり、この時間が短い物質および環境下では励起子分布数の制御は極めて困難となる。

そこで、我々は従来のコヒーレント制御法とは異なり、入射光パルスのパルス面積を考慮した新しいコヒーレント制御法の提案を行なった。ラビ周波数 Ω とパルス幅の積をパルス面積 Θ として、入射光パルス対のパルス面積を $\Theta=\pi$ (π パルス) とした時のコヒーレント制御について考える。図2(a)は単一量子ドットのような均一広がり系であり、位相緩和時間を $T_2=10\text{ps}$ と仮定した場合の励起子分布数の時間発展を示している。図1(b)で示したように $T_2=10\text{ps}$ の時、 $\Theta=\pi/10$ の位相同期パルス対を用いた従来のコヒーレント制御では第二パルス後に残留励起子があるために、完全なコヒーレント制御が不可能であったが、 $\Theta=\pi$ の場合には1ps後にはほぼ完全に励起子分布数は初期状態に戻り、コヒーレント制御が可能であることが示されている。これは図2(c)に示すように第一の π パルス励起によってブロッホベクトル \mathbf{R} を 180° 回転させるためブロッホベクトルのコヒーレンス成分 (x, y) の減衰が分布数成分 (z) に影響を及ぼさないためである。このことは蓄積フォトンエコーにおけるポピュレーション記憶効果に類似の現象である。このパルス面積 π のパルス対を用いた新しいコヒーレント制御法適用すれば、固体素子化に有利な量子ドット集合体においても励起子分布数の制御が可能となる。図2(b)は量子ドット集合体のような不均一広がりのある系に面積制御した π パルス対を入射した時の系の時間発展である。不均一広がりとして不均一幅20meVのガウス型を仮定している。一般に量子ドット集合体の場合、その光学スペクトルはドットサイズのゆらぎに起因した不均一幅をもつ。このような系では不均一幅の逆数で定義される極めて速いディフェージング効果によってコヒーレンスは短時間のうちに失われるため、通常のコヒーレント制御法の適用は不可能である。しかし、図2(b)からもわかるように、 π パルス対を用いることによって、不均一広がりのある系に対しても励起子を強制的に消滅することができ、コヒーレント制御法の適用が可能となる。

一方、不均一系に対する同様の問題を解決するために面積制御した3パルス列 ($\pi/2-\pi-\pi/2$) を用いたコヒーレント制御法が当チームの鶴町らによって提案された[3]。これはよく知られた2パルスフォトンエコー現象を応用したコヒーレント制御法であり、不均一広がりによるディフェージング効果をフォトンエコー現象のリフェージング効果で相殺し巨視的な分極を復活させ、励起子を強制的に消滅させるものである。図3には面積制御した3パルス列と $\pi-\pi$ パルス列によるコヒーレント制御法における励起子分布数の時間変化の比較を示す。図3(a)、(b)は3パルス列制御法による系の時間発展、図3(c)、(d)は $\pi-\pi$ パルス列制御法による系の時間発展である。全ての計算においてエネルギー緩和時間 $T_1=500\text{ps}$ 、位相緩和時間 $T_2=20\text{ps}$ 、不均一幅 $\sigma=20\text{meV}$ としている。

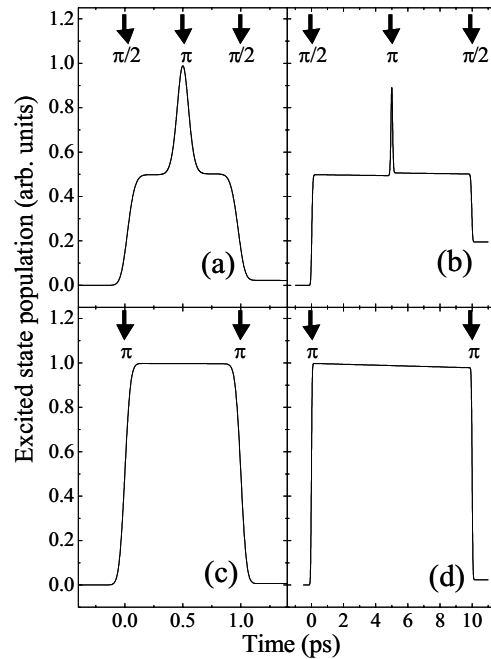


図3 3パルス列(上)と $\pi-\pi$ パルス列(下)コヒーレント制御法による励起子分布数の時間変化の比較。左側の図は最初の励起パルスと最後の励起パルスの時間間隔が $\tau=1\text{ps}$ であり、右側の図は $\tau=10\text{ps}$ である。

図3(a)、(c)はどちらも最初の励起パルスと最後の励起パルスの時間間隔が1psであり、3パルス列制御法と $\pi - \pi$ パルス列制御法のどちらの場合においても1ps後には系は初期状態に戻っている。一方、図3(b)、(d)はパルスの時間間隔が10psであり、この場合、3パルス列制御法では制御パルス照射後でも完全には系が初期状態に戻っていない。すなわち、3パルス列制御法は、パルス間隔よりも十分に長い位相緩和時間をもつ材料にしか適用することが出来ない。図4では励起子分布数の回復率 γ を $\gamma = (N_0 - N)/N_0$ と定義し、3パルス列制御法と $\pi - \pi$ パルス列制御法におけるパルス間隔に対する γ の比較を示す。ここで N_0 は第一光パルスにより生成された励起子分布数、 N は残留励起子分布数である。図4の○と■はそれぞれ3パルス列制御法と $\pi - \pi$ パルス列制御法による励起子分布数の回復率を示している。3パルス列制御法における γ が位相緩和時間 T_2 の指数関数で減衰するのに対して、 $\pi - \pi$ パルス列制御法では T_2 には制限されず励起子の寿命 T_1 の指数関数で減衰することが示された。

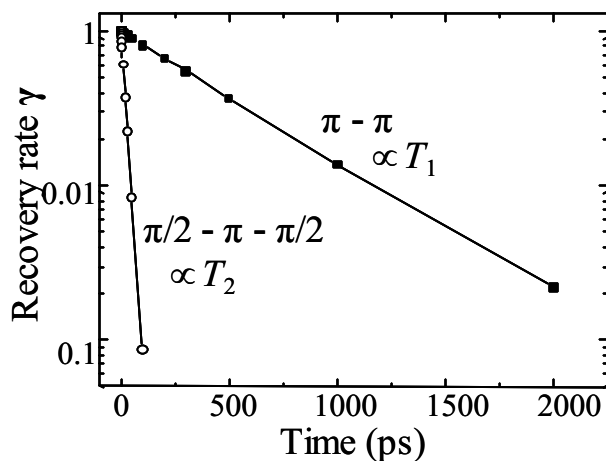


図4 パルス時間間隔に対する励起子分布数の回復率 γ ($\gamma = (N_0 - N)/N_0$)の比較。■は $\pi - \pi$ パルス列制御法、○は3パルス列制御法を適用した場合を表す。

本研究では、面積制御パルス列を用いた新しいコヒーレント制御法の提案を行なった。光学ブロッホ方程式による計算結果から、 π パルス列を用いることによって位相緩和時間に制限されないコヒーレント制御が可能であることが示された。このことは固体素子化に有利な量子井戸や量子ドット集合体などの材料、あるいは、より室温に近い温度領域においても励起子分布数の制御が可能であることを示唆し、今後は、室温動作の超高速光学素子への応用が期待される。

さらに、T2フリーのコヒーレント量子制御を実証するために、 π パルス形成に必要な励起光強度の低減化が可能な長軸直径60~80nm、短軸直径30nmの巨大量子ドットを開発し、それを用いた発光分光法による光計測・制御の実験を行った。しかし、非対称な形をした量子ドットの光学特性は調べることができたが、T2フリーのコヒーレント量子制御の実験的検証は今後の課題に残された。

B-1-2. 高密度、高均一量子ドット集合体の開発と光デバイス応用

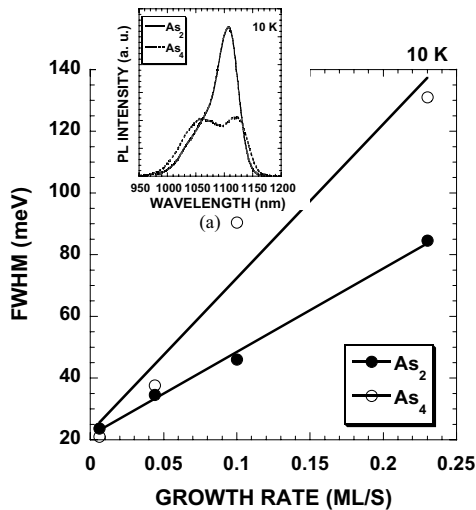
超高速光制御・演算素子のためのナノ構造集合体としては、不均一広がりが小さく高均一でかつ高密度な量子ドット集合体が必要不可欠である。そこで、MBE成長を用いて高均一、高密度の量子ドット集合体の開発を行った。さらに、半導体レーザ素子化してその特性を調べた。

量子ドットの高密度化に関しては、Sb系の新材料や量子ドットの下地層を用いた報告例がある[4-7]。しかし、新材料といった事で難しい課題も多く残るため、本研究では従来の材料系で、微小なドットを数多く作り高密度化するというシンプルな考え方で高密度化の実現を目指している。本稿ではまず本研究オリジナルであるAs₂分子線の効果に関して説明し、1.3 μ m帯の高密度かつ高均一な量子ドットに関して議論する。さらにこの量子ドットを用いた半導体レーザに関して報告する。

これまで、InAs量子ドット製作の研究は、MBEの場合主にAs₄分子線を用いて行われ、またAs₂分子線を用いた例においても、As₄の場合と系統的に比べた例はなかった。本研究において、As₂及びAs₄分子線をそれぞれ用いてInAs量子ドットを製作したところ、特に高成長速度(高密度)領域において、量子ドットの光学的特性が改善されることを見出した[8-10]。

図5(a)は、As₂及びAs₄分子線を用いて成長したInAs量子ドットのPLスペクトルである。成長速度は0.1 ML/s、ドット密度はAs₂で成長したものが 7.8×10^{10} 個/cm²、As₄の場合が 9.4×10^{10} 個/cm²であった。図から分かるように、As₂で成長した方が、半値幅、発光強度共に改善されていることがわかる。図5(b)は、成長速度に対するInAs量子ドットのPL発光半値幅をAs₂及びAs₄で比べたもので

ある。As₂で成長したほうが、特に高成長速度の場合、発光半値幅が狭くなっている様子が見取れる。発光強度に関しても同様に、As₂分子線によって特に高成長速度領域において発光強度が増加した。高密度のInAs量子ドットを成長した場合、量子ドットが合体して転位等が入った巨大ドット(コアレスドット)を形成し、発光特性に悪影響を及ぼすことが知られている。図6は、コアレスドット密度をAs₂及びAs₄で比したものである。図から、As₂で成長したほうが、コアレスドット密度が小さいことがわかる。これらの実験結果は、As₂及びAs₄分子線下において、In原子の拡散長や表面構造が異なるためと思われる。以上のように、As₂分子線を用いることにより、高密度・高均一のInAs量子ドットが成長できることを明らかにした。



(b)

図5 PL半値幅の成長速度依存性

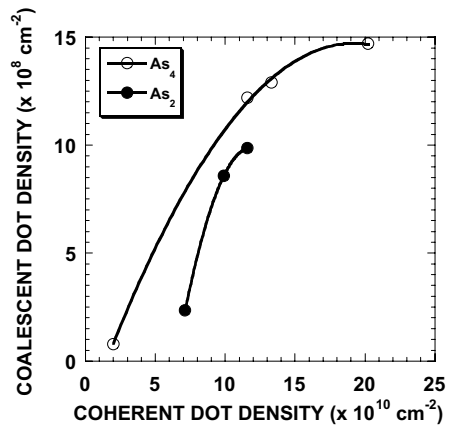


図6 As₂及びAs₄成長におけるコアレスドット密度

(高密度かつ高均一な量子ドットとその半導体レーザへの応用)

As₂分子線を用いることで高密度かつ高均一な量子ドットの製作が可能となった。しかし、そのままでは発光波長は1.2 μmほどであり、通信波長帯である1.3 μmから100 nm以上短波長となってしまふ。本研究ではInGaAs組成歪み緩和層を用いることで、1.3 μm帯への長波長化を実現している。今回、組成傾斜歪み緩和層にはInAs界面での組成In_{0.25}Ga_{0.75}As層を2.5 nm用いている。In組成がInAs界面から離れるに従って減少するようになっており、材料歪みの減少を実現している。このために結晶劣化を起こさずに歪み緩和による長波長化が実現できる。この室温PL測定結果とSEMによる面密度測定結果を図7に示す。室温PL測定から通信波長帯1.3 μm帯での発光と狭い発光半値幅である22.3 meVを確認した。また、SEM測定により、1 x 10¹¹ cm⁻²の高密度化も確認している。本研究では高密度(1 x 10¹¹ cm⁻²)と高均一(22.3 meV)を同時に満たす1.3 μm帯量子ドットが世界で唯一製作可能となった。

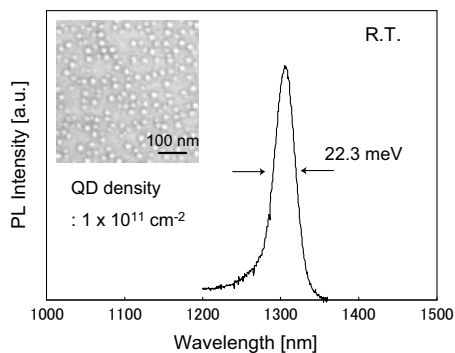


図7 1.3 μm帯高密度量子ドットのPL測定

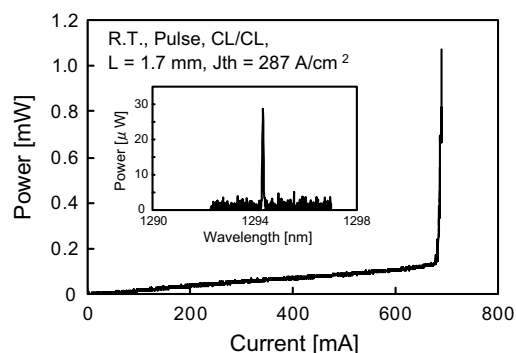


図8 量子ドットレーザの発振特性

次にこの高密度かつ高均一な量子ドットを活性層に用いた半導体レーザを製作した。活性層構造は1.3 μm 帯高密度量子ドット ($8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$)を3層に重ねた構造(3QD)となっている。基板構造は上部クラット層にはp-AlGaAs, 下部クラット層にはn-AlGaAs, 導波路層にはGaAsをそれぞれ用いている。この成長基板を用いて高反射ミラーなしのブロードエリアレーザを製作した。室温パルス条件にて測定を行った。共振器長1.7 mmの3QDレーザの発振特性を図8に示す。発振波長は基底準位である1.294 μm を得た。さらにしきい値電流は682 mAの値を得ている。高反射ミラー無しという弱い光閉じ込めにもかかわらず、基底準位での発振を実現している。

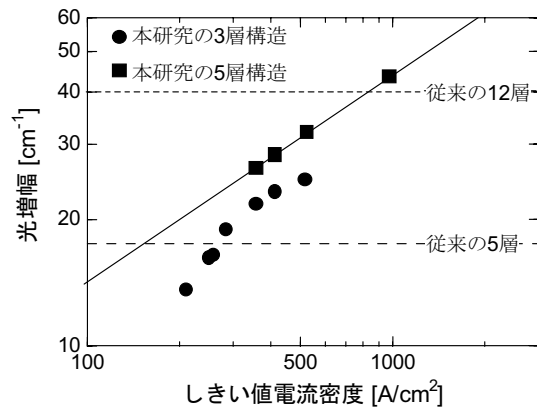


図9 しきい値電流密度に対するモード利得特性(光増幅利得 cm^{-1})

この結果は高密度化により、容易な基底準位発振が実現できたことを意味している。図9に3層および5層の量子ドットレーザのモード利得特性を示す。横軸が基底準位発振のしきい値電流密度、縦軸がしきい値モード利得(全損失)となっている。レーザに多くの損失を与えた時、高い電流密度が発振に必要となり、いずれ発振できなくなる。この特性からモード利得を求めた。3層構造では、しきい値モード利得は25 cm^{-1} に達しており、高密度化による利得の向上を確認した。また、5層構造では、トップクラスのモード利得43 cm^{-1} が得られた。1層当たりのモード利得は8~8.6 cm^{-1} となり、この値は通常の3~4倍の高い値である。

以上より、As₂材料と組成傾斜歪み緩和層を用いることで、1.3 μm 帯で発光する量子ドットの高密度化($1.0 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$)が実現できた。併せて発光半値幅22 meVの均一化も実現した。この量子ドットを活性層に持つ半導体レーザを製作し、1.3 μm 帯基底準位発振を得た。高密度化が実現されたことから、1層当たり8~8.6 cm^{-1} の大きなモード利得特性を実現した。今後、さらに高密度化と多層化を行うことで、高出力で高速変調動作が可能な量子ドットレーザが実現できると共に、他分野への応用デバイスも実現可能になると考える。

B-1-3. 集積型光制御素子(波形整形素子)の開発

従来のコヒーレント量子制御素子では、制御光として2連光パルスが必要であり、その形成のために、複数のレンズ・プリズムなどの光学素子を組み合わせた波形整形装置または、マイケルソン干渉計といって非常に大きな装置を用いていたために、コヒーレント制御素子本体に比較して非常に巨大であり安定性も欠くという問題があった。

そこで、本プロジェクトでは、量子ドット集合体を用いた超高速光制御・演算素子のモノリシック集積化を目指して、2次元スラブ型フォトニック結晶による波形整形部(2連パルス発生素子部)と、方向性結合器スイッチ部(量子ドット集合体スイッチ素子部)からなる素子構造を提案した。プロジェクト後半からは、主に、2連パルスを発生するための波形整形部の設計と動作実証を重点的に行った。ここでは、フォトニック結晶を用いた2連パルス発生素子の試作と動作特性評価について報告する。

2連パルス発生素子の構成模式図を図10に示す。入射パルスをY-BRANCHで二つに分離し、光路長の違う二つの経路PATH1, PATH2 通過後、もうひとつのY-BRANCHで合波させることに1つのパルスを2連パルスに変換する。この光回路を、円孔三角格子配列2次元スラブフォトニック結晶中に形成する。InAs/GaAs量子ドットによる量子演算素子への一体集積を目指しているため、材料としてはGaAsを用いた。今回の試作では作動波長域を1500nm帯と定めたが、フォトニック結晶の周期を変えてスケールリングすることによって1.3 μm 帯の光回路の作製も可能である。厚さ0.19 μm のGaAs薄膜上に格子定数 $a = 455\text{nm}$, 半径 $r = 0.29a$ の円孔配列からなるフォトニック結晶中に欠陥一列抜き導波路を基本とした光回路を形成することとした。

各光路の長さは、PATH2 を $700a = 318.5\mu\text{m}$ に固定した上で、PATH1 を $750a = 341.25\mu\text{m}$, $800a = 364.0\mu\text{m}$ としたもの別途用意し、 $50a = 22.75\mu\text{m}$, $100a = 45.5\mu\text{m}$ の光路長差をもつデバイスの試作を行った。

さらに、Y分岐形状として、図11 (a), (b) に示す 2 種類を用意した。図11(a)に示す構造では全方向が等価である。このため、PATH1 から OUTPUT へ向かう条件と PATH2 へ向かう条件が同一になり、周回モードなどの発生が予想される。一方、図11(b)の構造[11]は、一部円孔を取り去り、大きさの違う円孔を追加することにより、構造に非対称性を持たせている。このことにより、PATH1 から PATH2 への回り込みの抑制が期待される。

構造作製手順を図 1 2 に示す。(i) フォトニック結晶形成用 GaAs 層、犠牲層としての AlGaAs 層を持ったエピタキシャルウエハ上に、(ii) 電子ビーム露光装置でフォトニック結晶パターンを描画後、(iii) ICP ドライエッチング装置で GaAs 層にパターンを転写し、最後に(iv) HF による選択エッチングで AlGaAs 層を除去することにより、上下を空気で挟まれた GaAs フォトニック結晶スラブ構造を実現した。

(特性評価)

CW 光源による透過特性評価を行った。その結果を図13に示す。図13(a), (b) は単純Y分岐(図13(a))で形成された構造であり、それぞれの光路長差は $50a$, $100a$ である。また、図13(c), (d)は変形型 Y 分岐(13 (b))で形成された構造であり、それぞれの光路長差は同様に $50a$, $100a$ である。単純 Y 分岐で構成された素子のスペクトルは光路長差 $50a$, $100a$ 共に多数のピークが存在し、複雑な形状をしている。一方、変形 Y 分岐の場合、光路差 $50a$ では 2 つのピーク、光路差 $100a$ では 4 つの大きなピークが現れている。両者を比較してみると、単純 Y 分岐のスペクトルもほぼ変形型 Y 分岐と同様に 2, 4 つのピークに分裂していることがわかる。

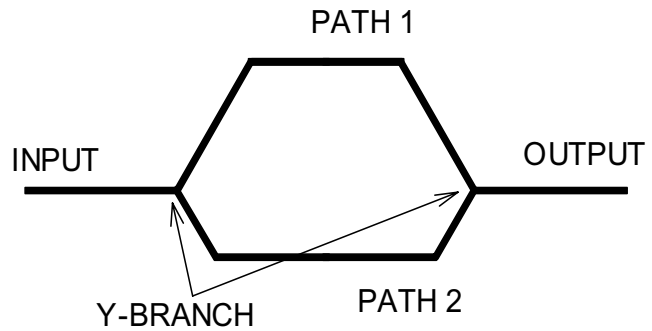


図 10 フォトニック結晶 2 連パルス発生素子の模式図

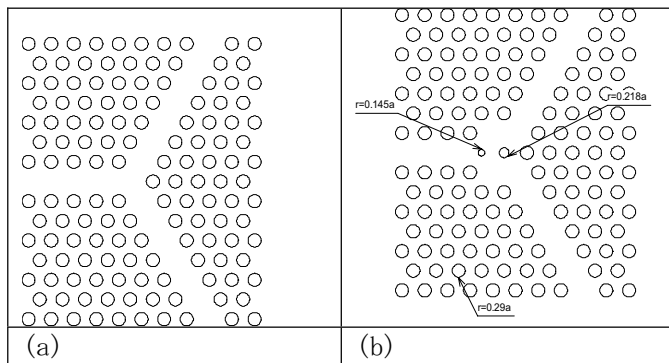


図 11 Y分岐形状。(a)単純Y分岐、(b)変形Y分岐

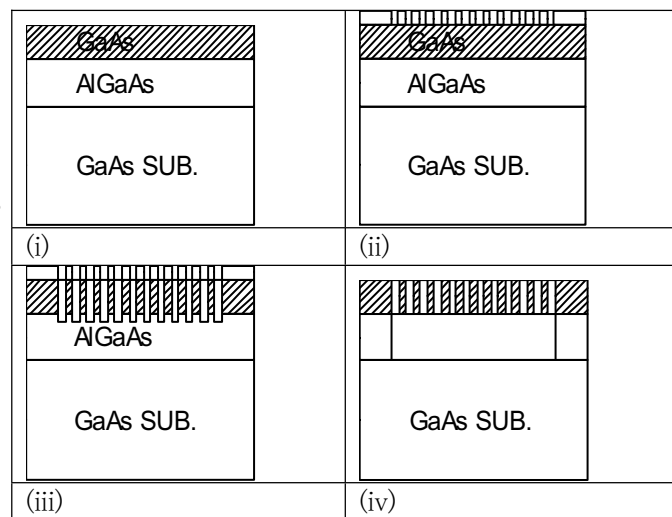


図 12 作製手順。(i) GaAs(フォトニック結晶形成層)/AlGaAs(犠牲層)を持ったエピタキシャルウエハを用意。(ii)EB リソグラフィ。(iii)ドライエッチングでパターン転写。(iv)レジスト除去後 HF による AlGaAs 層エッチングで GaAs フォトニック結晶スラブを形成。

(考察)

INPUT から入射した光が Y 分岐で PATH1, PATH2 に完全に 50%ずつ分岐し、各光路を通過後、全ての光が OUPUT 側に伝搬する場合、出力光強度 I は

$$I \propto 1 + \cos(\omega\Delta t) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 ω は光の角周波数、 Δt は各パス間の伝搬時間差である。また、各周波数に対する群速度は一定であると仮定している。波長と伝搬時間差の関係は、

$$\Delta t = -\frac{\lambda^2}{c\Delta\lambda} \quad (2)$$

と表される。ここで、 $\Delta\lambda$ は透過スペクトルのピーク間隔である。

図13(c)より、各ピークの波長をガウスフィッティングで求めると、それぞれ 1495.97nm, 1516.74nm である。これらのピーク間の波長域における平均的なディレイタイムは式(2)を用いると、0.364ps という値が得られる。

また、図13(d)の各ピークはそれぞれ 1487.1, 1497.4, 1506.7, 1517.0nm である。これより求めた平均ディレイタイムは、0.756ps となる。これは図13(c)より求めた値の約 2.07 倍と光路長差に比例している。このことから、図13(c), (d)の透過スペクトルの振動は、2 連パルス発生素子として機能していることに起因しているといえる。また、このディレイタイムより求められるフォトニック結晶導波路の平均群速度は $0.204c$ である。

次に単純 Y 分岐に関して考察する。2 節で述べたようにこの分岐では全ての導波路が等価である。そのため、PATH1 を通った光は OUTPUT と PATH2 に同等に伝搬する。同様に PATH2 を通った光は OUTPUT と PAHT1 に同等に伝搬する。そのため、PATH1, PATH2 をつなぐ周回モードが励振され、消光比の悪化や複雑なスペクトル形状に反映していると考えられる。よって、2 連パルス発生素子としては変形 Y 分岐構造を用いることが妥当であるといえる。

また、変形 Y 分岐構造を用いたものでも各ピークに細かい振動が重畳している。これは曲がり部分での反射によるファブリペロー共振に起因するものと考えられる。

以上より、2次元スラブ型フォトニック結晶導波路を用いた2連パルス発生デバイスの試作を行い、CW 光での特性評価を行った。光路を二つに分ける Y 分岐形状を調整することにより、周回モードの発生を抑制し良好な 2 連パルスが発生している状況を表す透過スペクトルが得られることがわかった。今後は実時間での測定により詳細な特性評価を行う。

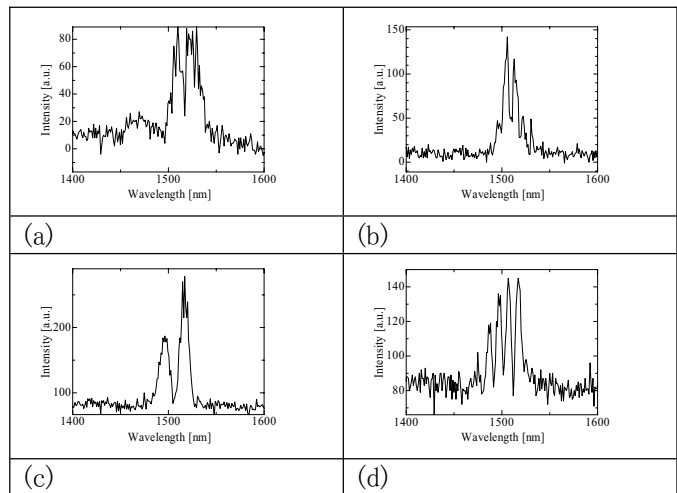


図 13 透過特性評価。単純 Y 分岐で光路差(a) 50a, (b) 100a。変形 Y 分岐で光路差(c) 50a, (d) 100a。

B-2. 結合ナノ構造を用いた負性抵抗 FET の開発とテラヘルツ帯発振素子への応用

本プロジェクトでは、半導体量子ナノ構造(量子細線、量子ドット構造)中で顕著に現れる物理現象を利用することにより、革新的な電子・光デバイスの実現を目指している。この課題では、高品質量子細線中、高品質結合量子井戸で顕著に現れる負性抵抗特性を利用する革新的な超高周波デバイスの開発を目指して研究を行った。具体的には、量子細線をチャンネルとする負性抵抗 FET 素子、また、その新しい物理現象(キャリアのサブバンド間遷移)を利用した結合量子井戸をチャンネルとする新型の負性抵抗素子の提案を行い、実際に素子の作製を行い、キャリアのサブバンド間遷移を利用した新しい三端子負性抵抗素子の開発に成功した[12-20]。また、負性抵抗の超高速応答性を利用した超高周波発振素子の理論的検討を行い、本負性抵抗素子がサブテラヘルツ以上の動作速度の超高周波発振素子として応用可能であることを明らかにした。

(トレンチ型量子細線FET)

量子細線構造において、電子散乱が抑制される効果は理論的には受け入れられるが、実験的な証拠を明示することは容易ではない。これは、細線断面を縮小するにつれ、界面の凹凸や不純物電荷の影響が大きくなるためである。本CREST研究に先立って、我々は、MBE選択成長技術を用い、 As_2 分子線や原子状水素を利用することにより、横方向閉じ込め効果が極めて大きく、かつ均一性に優れた $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 量子細線の作製に成功していた[12]。図14は、 $InP(311)A$ 基板上に作製した $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ 量子細線の断面TEM写真である。25nm×10nmという極めて幅の狭いトレンチ型量子細線が形成されている。本研究において、この量子細線が優れた一次元電子伝導性を示すことを見出した[13]。

トレンチ型量子細線をチャンネルとするFETを作製すると、図15に示すように、オンセット電圧わずか0.17Vにおいて、ピークバレイ比13.3の顕著な負性抵抗特性を示す[14]。これは、高移動度の量子細線基底準位から、低移動度の側面量子井戸(細線の高次サブバンドに相当)に、キャリアがサブバンド間遷移することによるものである[14-16]。この素子の負性抵抗特性は、230K程度まで観察された。また、細線層としてさらに高移動度の $In_{0.8}Ga_{0.2}As$ 弾性歪量子細線層を用いると、より高温(260K)まで負性抵抗特性を維持することがわかった[17,18]。以上のように、高品質な低次元伝導チャンネルのサブバンド間遷移を利用して、顕著な負性抵抗を示す三端子素子を初めて実現した。

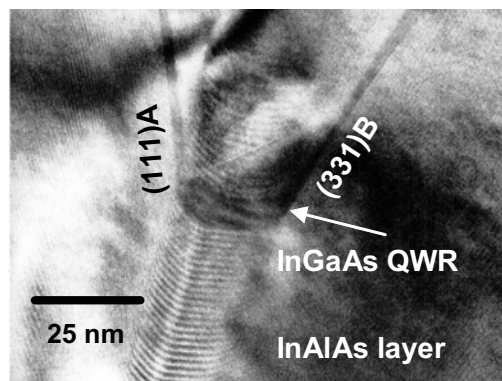


図14 トレンチ型量子細線の断面 TEM 像

(デュアルチャンネル負性抵抗FET)

上記の量子細線を利用した負性抵抗素子は、細線一本をチャンネルとするため動作電流が小さく、また加工基板を用いるため作製が難しいという点で問題がある。そこで $InP(001)$ 基板上に、移動度の異なる二つのチャンネルの結合構造を作製し、低移動度チャンネルが結合構造の高次サブバンドを形成するように設計した。図15にその模式図を示す。結合チャンネルの基底準位は高移動度チャンネル中に存在し、第二励起準位は低移動度チャンネルに存在する。そのエネルギー差は0.37Vである。この結合デュアルチャンネル構造をFETに応用したところ、図16のような負性抵抗特性を示した[19,20]。オンセット電圧0.38Vは、サブバンド間隔とよく一致する。温度特性としては、220Kまで負性抵抗が観察された。この素子はチャンネル幅 $1.0\mu m$ の素子であり、動作電流は $80\mu A$ 程度と小さいが、チャンネル幅を $60\mu m$ と広げることにより20mAの動作電流を確認している。また、高移動度チャンネル層の In 組成を0.8とし、高移動度弾性歪層を利用することによりサブバンド間隔も大きく出来るため、現在動作温度も室温近くまで上昇している。以上のデュアルチャンネル負性抵抗素子は、構造が簡単で作製しやすくまた高出力であるため、超高周波発振素子等への応用が期待される。

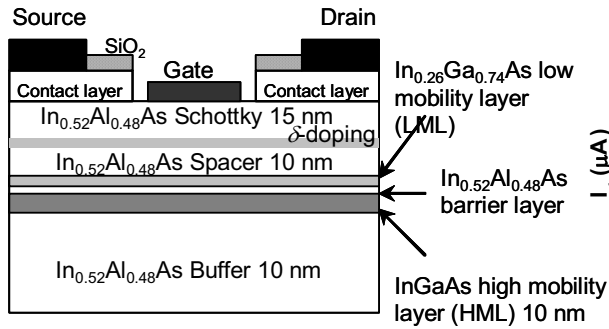


図 15 デュアルチャネル FET の模式図

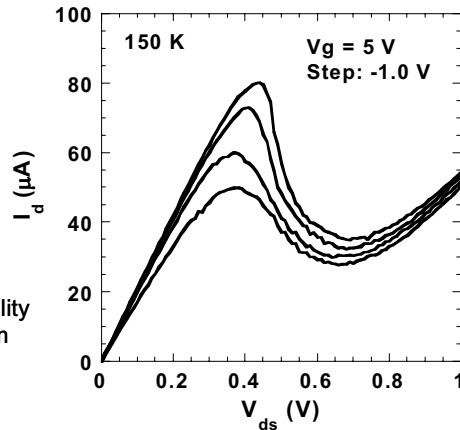


図 16 デュアルチャネル FET の I-V 特性

(発振周波数の解析)

上記負性抵抗素子を、イメージング等への応用が期待されるテラヘルツ帯(ここでは 100GHz～1THz)発振素子として利用するため、オンウェハでアンテナ一体型の微小な電子励起型超高周波発振素子としての初期的な理論検討を行った。

発振素子は、デュアルチャネルFETの直近に、パターンニングされた金属薄膜をFET電極兼外部共振回路兼アンテナとして作製し、デバイス全体で所望の発振機能を実現するものである。負性抵抗素子のパラメータとしては、接触抵抗と同容量、チャネル抵抗、Gate下の電子のデュアルチャネル間の遷移により発現する容量と負性抵抗を含む等価回路を仮定し、その解析についてはRTDを用いたTHz発振デバイス[21]と同様の手法を用いた。外部共振器(アンテナ)特性の導出には、有限要素法による3次元電磁界解析ツールであるアンソフト・ジャパン(株)のHFSSを用いた。

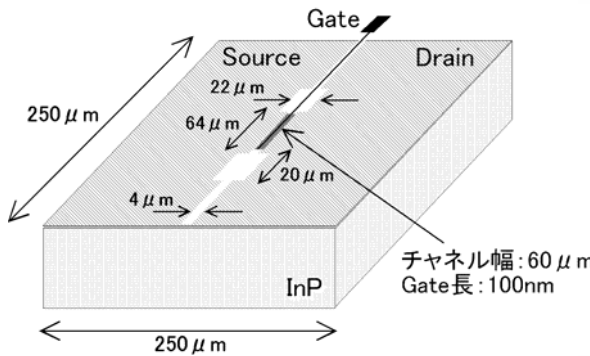


図 17 超高周波発振デバイス

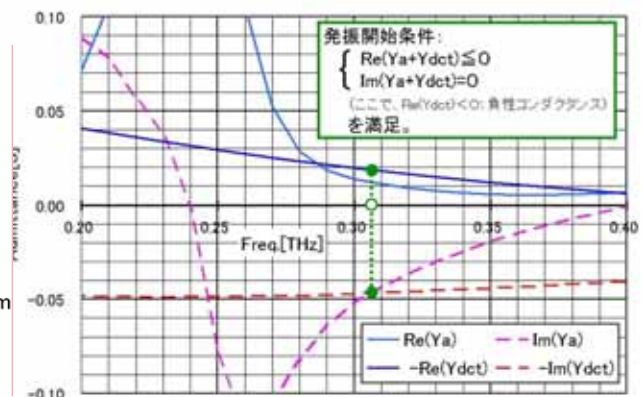


図 18 負性抵抗 FET とアンテナのアドミタンス

解析に用いたデバイス全体の概要図を図17に示す。デュアルチャネル FET とアンテナのアドミタンスを、それぞれ Y_{dct} , Y_a とすれば、上記により、これらが導出できる。図18にこれらの周波数特性を示す。300GHz 付近で発振可能条件が満足され、デュアルチャネル FET を用いてテラヘルツ帯での発振が可能であることが分かった。本素子は、原理的には、ゲート長にほぼ反比例して発振周波数を増大できるので、現状の材料および、設計値では、ゲート長200nm、100nm、50nm、25nmの素子でそれぞれ基本発振周波数150GHz、300GHz、600GHz、1.2THz発振が期待される。また、負性抵抗を用いた非線形素子であるために、外部回路、逡倍器を接続する必要なく、動作条件を選ぶことによって発振器自体で高調波発振が可能である。基本周波数600GHzの素子では、2逡倍1.2THz、3低倍1.8THzのテラヘルツ帯での発振が期待される。

一方、従来型の3端子トランジスターであるInP系HEMT、HBTを用いた発振器も超高周波発振器としては有望な候補として考えられる。これらの素子を用いてトランジスター発振器を構成する場合の基本波発振周波数の上限は、トランジスターの最大発振周波数 f_{max} (電力増幅率が1になる周波数)のおおよそ1/2程度であり[22]、これまでのところ、S. E. RosenbaumらによるHEMT発振器 (f_{max} : 400GHz)での213GHzの基本波発振が報告[23]されているが基本波300GHz超の発振器の報告例はない。トランジスター発振器でテラヘルツ帯発振を得るためには、 f_{max} が2THz以上のHEMT、HBTが必要になる。たとえばHEMTの場合は、ゲート長10nmクラスの素子を実現する必要がある[22]、それにはかなりの時間を要すると考えられる。これらのことから、本提案の3端子負性抵抗素子は、外部回路を接続することなく素子(アンテナ一体素子)単体でテラヘルツ帯の周波数可変発振器を構成できることが特徴である。

以上のように、結合した量子ナノ構造をチャネルとし、顕著な負性抵抗を示すFETの開発に成功した。これは、サブバンド間遷移を利用した全く新しい三端子負性抵抗素子である。また、負性抵抗FETを用いたアンテナ一体型超高周波発振器を新たに提案し、等価回路モデルとアンテナの数値解析により、THz帯での発振の可能性を確認した。今後は、アンテナ一体素子のTHz発振動作実証を行う予定である。

課題B: 参考文献

- [1] A. P. Heberle *et al.*, Phys. Rev. Lett. **75** 2598 (1995)
- [2] P. Borri *et al.*, Phys. Rev. Lett. **87** 157401 (2001)
- [3] N. Tsurumachi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **84** 29 (2004)
- [4] P. G. Eliseev, H. Li, A. Stintz, G. T. Liu, T. C. Newell, K. J. Malloy, and L. F. Lester, *Appl. Phys. Lett.*, **77** (2000) 262.
- [5] K. Yamaguchi and T. Kanto: *J. Cryst. Growth*. **275** (2005) e2269.
- [6] S. K. Park, J. Tatebayashi, T. Nakaoka and T. Sato, Y. J. Park and Y. Arakawa: *Jpn. J. Appl. Phys.* **43** (2004) 2118.
- [7] R. Oshima, A. Ohmae, and Y. Okada, *J. Cryst. Growth*. **281** (2004) 11.
- [8] T. Amano, T. Sugaya and K. Komori, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, (2005) L432.
- [9] T. Sugaya, K. Komori, S. Yamauchi and T. Amano, *J. Vac. Sci. Technol.* B **23** (2005) 1243.
- [10] T. Sugaya, T. Amano, and K. Komori, *J. Appl. Phys.*, **100**, 063107 (2006).
- [11] R. Wilson, T. J. Karle, I. Moerman and T. F. Krauss, *J. Opt. A: Pure and Appl. Opt.* **5** S76 (2003).
- [12] T. Sugaya, K. Matsumoto, K. Yonei, M. Ogura, and Y. Sugiyama, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 76 (2001).
- [13] T. Sugaya, K.-Y. Jang, T. Wada, A. Sato, M. Ogura, and K. Komori, *J. Crystal Growth*, **251**, 843 (2003).
- [14] T. Sugaya, K.-Y. Jang, C.-K. Hahn, M. Ogura, K. Komori, A. Shinoda, and Y. Yonei, *J. Appl. Phys.* **97**, 034507 (2005).
- [15] K.-Y. Jang, T. Sugaya, C.-K. Hahn, M. Ogura, K. Komori, A. Shinoda, and Y. Yonei, *Appl. Phys. Lett.* **83**, 701 (2003).
- [16] K.-Y. Jang, T. Sugaya, C.-K. Hahn, M. Ogura, K. Komori, A. Shinoda, and Y. Yonei, *J. Vac. Sci. Technol.* **B 22**, 1523 (2004).
- [17] T. Sugaya, T. Yamane, M. Ogura, K. Komori, K. Yonei, *Superlattices and Microstructures*, **34**, 479 (2003).
- [18] T. Sugaya, T. Yamane, M. Ogura, K. Komori, K. Yonei, *J. Cryst. Growth*, **278**, 94 (2005).
- [19] T. Sugaya, K. Komori, T. Yamane, S. Hori, and K. Yonei, *Appl. Phys. Lett.* **88**, 142107 (2006).
- [20] T. Sugaya, T. Yamane, S. Hori, K. Komori, and K. Yonei, *J. Phys. Conf. Ser.*, **38**, 108 (2006).
- [21] N. Orihashi, S. Hattori, S. Suzuki and M. Asada, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **44**, 7809 (2005).
- [22] 佐野栄一, "テラヘルツ発振を目指したデバイス技術の展望," 信学会論文誌, **J87-C**, no.5, pp. 413-423 (2004)
- [23] S.E. Eosenbaum, B.K. Kormanyos, L.M. Jelloian, M. Matloubian, A. S. Brown, L.E. Larson, L.D. Nguyen, M.A. Thompson, L.P.B. Katehi, and G. M. Rebeiz, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* **43**, no.4, pp.927-932 (1995)

B-3. 成果のまとめ

課題Bの成果のまとめを次に示す。

1. 量子ドット集合体を用いた超高速光制御・演算素子

量子ドット集合体用のコヒーレント量子制御法として不均一広がりの影響が少なく、位相緩和時間制限がない(T2フリー)新しい制御法を提案し、理論シミュレーションを通して、エネルギー緩和時間以内では超高速光制御が可能になることを明らかにした。

量子ドット集合体の開発では、As₂分子線と傾斜歪緩和法を用いることで、高密度、高均一(10¹⁹個/cm²、均一幅22meV)でかつ波長1.3μm帯の量子ドット集合体材料の開発が可能になった。レーザ素子として応用したところ、1.3μm帯量子ドットレーザとしては最高クラスの高利得発振動作を実現した。

コヒーレント量子制御用の集積型波形整形素子として、2次元フォトニック結晶を用いた2連パルス発生素子の作製を行った。素子特性の測定から良好な2連パルスの発生している状況を表す透過スペクトルが得られ、集積型の波形整形(2連パルス発生)素子として利用可能であることが示された。

以上の不均一幅を有する量子ドット集合体のコヒーレント制御法、T2フリーのコヒーレント制御法については、報告例は皆無であり、初めての提案例である。

高均一、高密度を両立する量子ドット集合体の開発は、従来の同レベルの均一性での量子ドットの密度は1~3e10/cm²であり、これに比べて、我々の22meV, 10e11/cm²は、約3~10倍の最高密度を実現している。また、量子ドットレーザとしたときの利得は、従来報告の12層40dBに対して、5層での利得43dB(一層当たり8.6dB)は、量子ドットレーザの利得に関して最高である。

集積型の光制御素子としては、類似研究として2次元スラブ型フォトニック結晶導波路を用いる研究の報告例があるが、本研究で開発した方向性結合器スイッチや波形整形素子(2連パルス発生素子)の開発を行っているところはない。

2. 結合ナノ構造を用いた負性抵抗FETの開発とテラヘルツ帯発振素子への応用

量子細線中のキャリアトランスポートを利用するナノデバイスとして、MBE法によるトレンチ溝形状極微細線構造を用いた量子細線FETの開発を行ない、初めて近室温(T=260K)負性抵抗動作を達成した。細線FETと同じ動作原理を用いて大電流化が可能な、結合量子井戸デュアルチャネル負性抵抗FETを新たに提案した。実際に微細ゲート構造を有する素子の試作を行い、260Kまでの近室温動作、発振素子としては十分な20mAクラスの大電流動作を達成した。超高周波発振素子として応用するために、テラヘルツ帯アンテナと負性抵抗素子から構成されるアンテナ一体素子構造を提案した。3次元有限要素法電磁波解析シミュレータを用いた発振動作条件解析から、本負性抵抗素子では、ゲート長100nmの場合に300GHz超の超高周波発振が可能であることが示された。さらに、ゲート長を短縮化すること、高調波発振を利用すること等によって1THz超のテラヘルツ帯での発振が期待される。

以上の量子細線負性抵抗FET, デュアルチャネル負性抵抗FETは、当チームの独自提案の素子である。量子細線構造または、結合ナノチャネル構造を用いて、明瞭な負性抵抗を示す三端子電界効果トランジスタを世界で初めて開発した。負性抵抗のメカニズムは結合ナノ構造中におけるキャリアのサブバンド間遷移によるもので、ドレイン電圧によって加速された電子が、高移動度層から低移動度層にサブバンド間遷移することにより、その移動度差から生じる。このような三端子負性抵抗素子を開発したのは世界初めてであり、構造が簡単で作製しやすいため、超高周波発振素子や論理素子等への応用が期待される。

負性抵抗を示す電子デバイスは、ガンダイオード、共鳴トンネルダイオード等が有名であるが、これらはいずれも2端子素子であり、3端子の負性抵抗素子はほとんど存在しない。実空間遷移による3端子負性抵抗素子の報告例があるが、これはキャリアの遷移時間が遅い等の問題があり、高周波発振素子としては数十GHz程度の発振周波数にとどまっていた。本開発の素子はサブバンド間遷移という超高速現象を利用しているため、サブテラヘルツでの発振が期待される。具体的には、本負性抵抗素子の直近に、パターンニングされた金属薄膜をFET電極兼外部共振回路兼アンテナ

として作製し、デバイス全体で所望の発振機能を実現する発振素子を提案した。負性抵抗のパラメータから等価回路を仮定し、外部共振器(アンテナ)特性の導出のために有限要素法による3次元電磁界解析を行った結果、300GHz付近で発振可能条件が満足され、本負性抵抗素子を用いてテラヘルツ帯での発振が可能であることが分かった。

次に、本負性抵抗素子の位置づけ(他の電子励起型の超高周波発信器との比較)について述べる。

本素子の理論解析では、ゲート長100nmの素子で基本波発振周波数300GHzが得られた。原理的には、ゲート長にほぼ反比例して発振周波数を増大できるので、現状の材料および、設計値では、ゲート長200nm、100nm、50nm、25nmの素子でそれぞれ基本発振周波数は、150GHz、300GHz、600GHz、1.2THzが期待される。また、負性抵抗を用いた非線形素子であるために、外部回路、逡倍器を接続する必要なく、動作条件を選ぶことによって発振器自体で高調波発振が可能である。基本周波数600GHzの素子では、2逡倍1.2THz、3低倍1.8THz発振が期待され、テラヘルツ帯での発振が可能である。さらに、3端子素子の特徴を利用して、外部回路をつけることなくゲート電圧を可変することで、高速に発振周波数可変が可能になる。

負性抵抗を用いた素子として、共鳴トンネルダイオード(RTD)等の2端子素子がある。RTD素子では、300GHz超発振が可能であり、東工大のグループによって3逡倍で1.02THzの発振が報告されている。その他、2端子のIMPATTダイオード、TUNNETダイオードにおいてそれぞれ300GHz、392GHzの発振の報告がある。しかし2端子素子であるために外部回路を用いないで素子単体での周波数可変は困難である。

一方、従来型の3端子のトランジスターであるInP系HEMT、HBTでは、富士通らのグループによってゲート長25nmのHEMT素子で電流利得遮断周波数 f_t (電流増幅率が1になる周波数)562GHzが報告されている。また、W. Hafezらによって f_t が710GHzのHBT素子が報告されている。これらの素子を用いてトランジスター発振器を構成する場合の基本波発振周波数の上限は、トランジスターの最大発振周波数 f_{max} (電力増幅率が1になる周波数、電流利得遮断周波数の1/2乗にほぼ比例)のおおよそ1/2程度であり、発振器として利用するには、電流利得遮断周波数 f_t よりも最大発振周波数 f_{max} が重要になる。トランジスター発振器での基本波発振周波数の上限としては、S. E. RosenbaumらによるHEMT発振器(f_{max} : 400GHz)での213GHzの基本波発振が報告されている。これらのことから、トランジスター発振器でテラヘルツ帯発振を得るためには、 f_{max} が2THz以上のHEMT、HBTが必要になる。たとえばHEMTの場合は、ゲート長10nmクラスの素子を実現する必要があり、それにはかなりの時間を要すると考えられる。

以上より本提案の3端子負性抵抗素子は、外部回路を接続することなく素子(アンテナ一体素子)単体でテラヘルツ帯の周波数可変発振器を構成できることが特徴である。

(2)研究成果の今後期待される効果

1. 量子ドット集合体を用いた超高速光制御・演算素子

新しいコヒーレント量子制御技術の研究に関しては、パルス面積を π と設定した光パルス列を用いることによって励起子の位相緩和時間(T_2)に制限されない超高速光-光スイッチ素子への応用が可能となる。特に、室温での量子ドット材料のように T_1 時間は長い、 T_2 時間は非常に短い材料系への適用が可能であり、コヒーレント制御の高温動作(室温動作化)が期待される。すなわち、室温付近で動作が可能なフェムト秒クラスの超高速光-光スイッチング素子への応用が期待される。

高密度、高均一量子ドット集合体の研究に関しては、上記の T_2 フリーのコヒーレント制御の条件を満たす量子ドット集合体が開発できたので、超高速光-光スイッチ素子に応用する予定である。また、これまでの技術では困難であった高密度、高均一化を両立した量子ドット集合体の実現でき、これにより量子井戸を凌ぐ性能が期待できることから、量子井戸を置き換えることが可能な高性能な光デバイスへの応用が期待される。半導体レーザとしては、長波長帯のチャープフリー、温調フリーの高速(10G~40G)直接変調光源に応用可能である。その他、高出力半導体レーザ、モー

ド半導体同期レーザとして、固体レーザの置き換え用の光源としての応用も期待される。以上より、本研究で実現された半導体レーザは光通信に適した発振波長であり、産業への応用が大いに期待できる。

フォトニック結晶集積素子に関しては、超高速光スイッチの波形整形部(制御光パルス発生素子)としての応用を予定している。フォトニック結晶自体の研究としては超小型光集積回路実現の可能性が期待されているが、未だ単独素子の基本動作実証の段階でとどまっている。本研究では中規模な2次元光集積素子の構成が可能な技術を開発した。これにより光回路の小型集積化の実現へ寄与したものとする。

2. 結合ナノ構造を用いた負性抵抗FETの開発とテラヘルツ帯発振素子への応用

今後は、本プロジェクトで開発した三端子負性抵抗素子を用いたアンテナ一体のテラヘルツ発振素子の超高周波発振動作実証を目指す。新開発の負性抵抗素子による小型で安価なテラヘルツ発振素子の実現できれば、テラヘルツシステム全体の大幅なコストダウンが可能となり、様々な分野での応用が期待される。現在のテラヘルツシステムは固体レーザを用いた定盤サイズのものしかなく、また価格も数千万円であり、コストや大きさ等問題点が多い。本開発の負性抵抗素子の実用化されれば、その実現によって様々な場所でイメージング等が可能となり、半導体素子やICカード、郵便物等の非破壊検査や、生体への安全性からX線に変わる医学分野への応用など、幅広い分野でその応用が期待される。

4 研究参加者

≪2(2)の研究グループ別に、研究参加者を漏れなく記載してください。≫

重要:個人情報保護法対処のため、掲載対象者の全てに、公開資料に掲載する旨を予め同意して頂きますようお願いいたします。

① 量子ナノ構造・量子制御グループ

(高品質量子ナノ構造の作成と超高速光物性、量子論理素子研究への応用の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
小森和弘	産総研・光技術	研究グループリーダー	チーム代表&G代表	平成13年12月～ 平成18年11月
菅谷武芳	産総研・光技術	主任研究員	量子細線・ドット作製	平成13年12月～ 平成18年11月
諸橋功	CREST	CREST研究員	縦電界印加型素子の 開発	平成13年12月～ 平成18年11月
鹿内周	CREST	CREST研究員	横電界印加型素子の 開発	平成16年2月～ 平成18年11月
五島敬史郎	CREST	CREST研究員	励起子量子ゲートの 光制御技術開発	平成14年5月～ 平成18年11月
山内掌吾	現：住友化学(株)	現：客員研究員 旧CREST研究員	結合量子ドット構造 作製と光物性	平成14年7月～ 平成18年11月
岡田工	東海大短大	客員研究員	微小領域分光・制御、 コヒーレント制御	平成13年12月～ 平成18年11月
秋本良一	産総研・ 超高速光信号処理 デバイス研究ラボ	主任研究員	スピン分光・光制御	平成13年12月～ 平成18年11月
河島整	産総研・ 超高速光信号処理 デバイス研究ラボ	主任研究員	微小領域分光・光制御	平成13年12月～ 平成18年11月
王学論	産総研・ ナノテクノロジー	主任研究員	MOCVD・量子ナノ 構造作製	平成15年10月～ 平成18年11月
堀聡一郎	芝浦工業大学	芝浦工業大学大学院 工学研究科	量子細線・ドット作製	平成18年4月～ 平成18年11月
山根孝史	芝浦工業大学	芝浦工業大学大学院 工学研究科	量子制御装置開発	平成17年8月～ 平成17年10月
小倉睦郎	産総研・ ナノテクノロジー	グループリーダー	MOCVD・量子ナノ 構造作製	平成13年12月～ 平成17年3月
山崎修	筑波大学	筑波大学大学院 理工学研究科	顕微分光	平成14年5月～ 平成16年2月
張起連	産総研・光技術	科学技術特別研究員	デバイスプロセス	平成13年12月～ 平成15年4月

韓哲九	筑波大学	ポスドク	超高速光制御	平成13年12月～ 平成15年3月
篠田明人	芝浦工業大学	芝浦工業大学大学院 工学研究科	M B E 量子ナノ構造 作製	平成14年5月～ 平成14年12月
劉興権	筑波大学	ポスドク	M O C V D 量子ナノ 構造作製	平成13年12月～ 平成14年4月

② 超高速光制御研究グループグループ

(光量子位相制御技術の開発と光制御・演算素子への応用の研究)

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
菅谷武芳	産総研・光技術	主任研究員	ナノF E T素子開発	平成13年12月～ 平成18年11月
古屋克己	産総研・光技術	主任研究員	ナノF E T発振器の 設計と理論解析	平成14年4月～ 平成18年11月
山本宗継	産総研・光技術	研究員	フォトニック結晶集 積デバイス開発	平成13年12月～ 平成18年11月
古江重紀	C R E S T	C R E S T 研究員	コヒーレント量子制 御技術開発	平成16年4月～ 平成18年11月
鶴町徳昭	香川大学	客員研究員	コヒーレント量子制 御技術開発	平成13年12月～ 平成18年11月
天野建	産総研・光技術	研究員	量子ドット集合体デ バイス開発	平成16年4月～ 平成18年11月
板谷太郎	産総研・光技術	主任研究員	A F M加工・観察	平成13年12月～ 平成18年11月
渡辺正信	産総研・光技術	部門長	量子位相制御理論	平成13年12月～ 平成18年11月
森雅彦	産総研・光技術	主任研究員	波形整形技術	平成13年12月～ 平成18年11月
杉坂純一郎	筑波大学	筑波大学大学院 数理物質科学研究科	フォトニック結晶集 積デバイス開発	平成18年4月～ 平成18年11月
青木重典	筑波大学	筑波大学大学院 数理物質科学研究科	量子ドット集合体 デバイス開発	平成18年4月～ 平成18年11月
市川心人	湘南工科大学	湘南工科大学大学院 工学研究科	超高速分光	平成16年3月～ 平成17年3月
小川徹	筑波大学	筑波大学大学院 数理物質科学研究科	フォトニック結晶集 積デバイス開発	平成16年4月～ 平成17年3月
安平哲太郎	産総研・光技術	主任研究員	超高速分光・光制御	平成13年12月～ 平成16年4月
櫻間光雄	慶応義塾大学	慶応義塾大学大学院 理工学研究科	波形整形技術	平成14年9月～ 平成16年2月

5 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Prof. Deveaud (スイス工大・教授)	CREST-QNN 国際会議招待、研究協力	淡路国際会議場	2003. 7. 20 ～ 1 週間
Prof. Woggon 独・ビュルツブルグ大・教授)	CREST-QNN 国際会議招待、研究協力	淡路国際会議場 産総研ゲストハウス	2003. 7. 20 ～ 1 週間
Dr. Sellin、Prof. Bimberg 代理 独・ベルリン工科大学・講師)	CREST-QNN 国際会議招待、研究協力	淡路国際会議場	2003. 7. 20 ～ 1 週間

6 成果発表等

(1)原著論文発表 (国際誌 44 件、国内誌 2 件)

【2001 年】

1) I. Morohashi, K. Komori, T. Hidaka, T. Sugaya, X. L. Wang, M. Ogura, T. Nakagawa and C. S. Son, “ Terahertz electromagnetic wave generation from quantum nanostructure”, Jpn. J. of Appl. Phys. vol. 40, Part 1, no. 4B, pp. 3012–3017, 2001/04

【2002 年】

1) K.Komori, G.R.Hayes, B.Deveaud, X.L.Wang, M.Ogura, “ Ultrafast phase-locked spectroscopy of excitons in quantum nanostructures”, Physica status solidi, (a), Vol. 190, No.3, pp.855–859, 2002/4

2) K.Komori, G.R.Hayes, D.Deveaud, X.L.Wang and M.Ogura, “Ultrafast coherent control of exciton and exciton-polaritons in quantum nano-structure”, Jpn. J. of Appl. Phys., Vol.41, No. 4B, pp.2660–2663, 2002/4

3) I.Morohashi, K. Komori, X.L.Wang,T.Hidaka and M.Ogura, “Wavelength dependence of terahertz electromagnetic wave generation from quantum wire” Jpn. J. Appl. Phys., Part1.No.4B, Vol.41, pp.2710–2713, 2002/4

4) I.Morohashi, K. Komori, H.Shimura, T.Hidaka, H.Ikeda, S.Tsujikura, M.Yamamoto, and Y.Okamoto, “Terahertz wave generation from multi-quantum well with transverse electric field”, Ultrafast Phenomena XIII (Proceedings of the conference on Ultrafast Phenomena), pp.256–258, 2002/5

5) T. Sugaya, K-Y. Jang,T. Wada, M. Ogura and K.Komori, “V-grooved InGaAs quantum-wire field-effect transistor fabricated under As₂ flux in Molecular beam epitaxy” Proc. of. 2002 International Conference on Molecular Beam Epitaxy(2002MBE), ISBN:0-7803-7581-5, pp.133~134, 2002/9

6) Kee-Youn JANG, T.SUGAYA, A.SHINODA, Cheol-Koo HAHN, K.YONEI, M.OGURA, and K.KOMORI, “Negative transconductance in trench-type InGaAs/InAlAs quantum wire FET”, Proc. of 14, IPRM'02(Indium Phosphide and Related Materials), ISSN:1092-8669, pp581-584, 2002/9/11

7) T. Yasuhira, K. Komori, R. Akimoto, X. L. Wang, M. Watanabe, M. Ogura, “Exciton formation dynamics in crescent shaped quantum wires”, Appl. Phys. Lett. , Vol.81, No.19, pp3624-3644, 2002/11

【2003 年】

1)T. Sugaya, K-Y. Jang, T. Wada, A. Satou, M. Ogura and K. Komori, “V-grooved InGaAs quantum-wire FET fabricated under As₂ Flux in molecular beam epitaxy”, J. of Crystal Growth, Vol.251, pp.543-847, 2003/2/4

2)諸橋功, 小森和弘, 板谷太郎, 志村恒, 日高建彦, 渡辺正信, 池田博一, 辻倉伸弥, 山本正

美, 岡本恭典, “横方向電界印加型多重量子井戸からのテラヘルツ波発生”, 電子情報通信学会論文誌 C, Vol.J86-C, No.4, pp. 476-477, 2003/4

3) K-Y. Jang, T. Sugaya, C-K. Hahn, M. Ogura, K. Komori, A. Shinoda and K. Yonei, “Negative differential resistance effects of trench-type InGaAs quantum wire field effect transistor with 50 nm gate-length”, Appl Phys Lett, Vol.83, No.4, pp701-703, 2003/7

4) K-Y. Jang, T. Sugaya, C-K. Hahn, M. Ogura, K. Komori, A. Shinoda and K. Yonei, “Negative differential resistance effects of trench-type InGaAs quantum wire field effect transistor with 50 nm gate-length”, Appl. Phys. Lett., Vol.83, No.4, pp701-703, 2003/7

5) T. Yasuhira, K. Komori, R. Akimoto, Xue-Lun Wang, M. Watanabe and M. Ogura, “Femtosecond Pump-Probe Spectroscopy of GaAs Crescent Quantum Wires”, Jpn. J. of Appl. Phys. Vol.42, No.8, pp4919-4923, 2003/8

【2004年】

1) N. Tsurumachi, K. Komori and T. Hattori, “Coherent control of inhomogeneously broadened system by area-regulated pulse sequence”, Appl. Phys. Lett, Vol.48, No. 13, pp2235-2237, 2004/3/29

2) N. Tsurumachi, C.-S. Son, T. G. Kim, K. Hikosaka, K. Komori, and M. Ogura, “Time-resolved photoluminescence spectra of high-density InGaAs/AlGaAs quantum wire structures”, Physica E, vol.21 pp.300-303, 2004/3

3) N. Tsurumachi, K. Komori and T. Hattori, “Ultrafast coherent control of inhomogeneously broadened system by an area-regulated pulse sequence”, Jpn. J. of Appl. Phys, Vol.43, No.4B, pp.2023-2026, 2004/4

4) N. Tsurumachi, N. Watanabe, K. Hikosaka, Xue-Lun Wang, K. Komori, T. Hattori and M. Ogura, “Femtosecond pulse propagation through a quantum wire optical waveguide observed by cross-correlation frequency-resolved optical gating spectroscopy”, Jpn. J. of Appl. Phys, Vol.43, No.4B, pp.2002-2005, 2004/4

5) I. Morohashi, K. Komori, T. Hidaka, Xue-Lun Wang, M. Ogura and M. Watanabe, “Investigation of ultrafast carrier dynamics in quantum wire by terahertz time-domain spectroscopy”, Jpn. J. of Appl. Phys, Vol. 43, No. 4B, pp.2125~2127, 2004/4

6) K. Furuya, N. Yamamoto, Y. Watanabe and K. Komori, “Novel ring waveguide device in a 2D photonic crystal slab - transmittance simulated by finite-difference time-domain analysis”, Jpn. J. of Appl. Phys, Part 1, Vol. 43, No. 4B, pp.1995-2001, 2004/4

7) S. Yamauchi, K. Komori, T. Sugaya and K. Goshima, “Optical characteristics of InAs/GaAs double quantum dots grown by MBE with the Indium-flush method”, Jpn. J. of Appl. Phys, Vol. 43, No.4B, pp.2083-2087, 2004/4

8) K-Y. Jang, T. Sugaya, C-K. Hahn, M. Ogura, K. Komori, A. Shinoda and K. Yonei, “Photoconductive characteristics in a trench-type InGaAs quantum-wire field effect transistor”, J. of Vacuum Science & Tech. B, Vol.22, No.3, pp.1523-1525, 2004/6

9) T. Sugaya, T. Yamane, M. Ogura, K. Komori and K. Yonei, Shibaura Institute of Technology, "Pseudomorphic InGaAs quantum-wire FETs with negative differential resistance", superlattices and microstructures 34, pp.479-484, 2004/7

10) T. Okada, K. Komori, K. Goshima, S. Yamauchi, I. Morohashi, T. Sugaya, O. Yamazaki, M. Ogura and T. Hattori, "Coherent control of exciton in a single quantum dot using high-resolution Michelson interferometer", Jpn. J. of Appl. Phys, Vol.43, No.9A, pp.6093-6096, 2004/9

11) K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, A. Shikanai, T. Sugaya, "Observation of bonding states in single pair of coupled quantum dots using Micro-spectroscopy", Solid State Devices and Materials (SSDM 2004), Tokyo, Japan, Jpn. J. of Appl. Phys, Vol.44, No. 4B, 2005, pp. 2684-2687, 2004/9/16

12) T. Sugaya, K. Komori, S. Yamauchi and T. Amano, "1.3 μ m InAs quantum dots grown with an As₂ source using molecular beam epitaxy", Proc. of North American Conference on Molecular Beam Epitaxy (NAMBE 2004), pp79-80, 2004/10

【2005年】

1) T. Sugaya, K. Jang, C. Hahn, M. Ogura and K. Komori, "Enhanced peak-to-valley current ratio in InGaAs/InAlAs trench-type quantum-wire negative differential resistance field-effect transistors", Jpn. J. of Appl. Phys, vol. 97, 034507-1 -5, 2005/2/11

2) N. Yamamoto, Y. Watanabe, K. Komori, "A Design of the photonic crystal directional coupler with a high extinction ratio and a short coupling length", Jpn. J. of Appl. Phys, Vol.44, No.4B, P2575-P2578, 2005/4

3) S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi, K. Goshima and T. Sugaya, "Electronic structures and carrier correlation in single pair of coupled quantum dots" Jpn. J. of Appl. Phys, Vol.44, No. 4B, 2005, pp2647-2651, 2005/4/21

4) K. Goshima, S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi, A. Shikanai and T. Sugaya, "Observation of bonding states in single pair of coupled quantum dots using micro-spectroscopy", Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 44, No. 4B, 2005, pp2684-2687, 2005/4/21

5) N. Yamamoto, Y. Watanabe, and K. Komori, "A Design of photonic crystal directional coupler with high extinction ratio and small coupling length", Jpn. J. of Appl. Phys, Vol.44, No. 4B, pp2575~pp2578, 2005/4/21

6) T. Sugaya, T. Yamane, M. Ogura, K. Komori, K. Yonei, "Negative differential resistance of pseudomorphic InGaAs quantum-wire FETs", CRYSTAL GROWTH, pp94~pp97, 2005/5/1

7) S. Ichikawa, I. Morohashi, T. Hidaka, M. Watanabe and K. Komori: "横方向電界印型多重量子井戸構造テラヘルツ波発生素子の放射特性", 電子情報通信学会 和文和文誌, Vol. J88, No.7, pp578~pp579, 2005/5/11

8) T. Sugaya, K. Komori, K. Amano, S. Yamauchi, "1.3 μ m InAs Quantum Dots Grown with an As₂ Source using Molecular Beam Epitaxy", Journal of Vacuum Science & Technology B, Vol.23, No.3, pp1243~

pp1246, 2005/6/9

9) Morohashi, K. Komori, N. Tsurumachi, H. Shimura, T. Hidaka and M. Watanabe, “Terahertz wave generation device using multi-quantum well with transverse electric field,” Jpn. J. of Appl. Phys, Vol.44, No.9A, pp6425~pp6428, 2005/9/8

10) K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, A. Shikanai, and T. Sugaya, “Pulse Area Control of the Exciton Rabi Oscillation in InAs/GaAs Single Quantum Dot”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.45, No.48, pp3625~pp3628, 2006/4/25

11) S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi, K. Goshima, T. Sugaya and T. Takagahara: “Observation of Interdot Correlation in Single Pair of Electromagnetically Coupled Quantum Dots”, Applied Physics Letters Vol. 87, pp182103-1~pp182103-3, 2005/10/24

12) S. Sugaya, T. Yamane, S. Hori, K. Komori, K. Yonei, “Negative differential resistance of InGaAs dual channel transistors”, Journal of Physics: Conference Series, 2005/12/05

13) K. Goshima, S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohash and T. Sugaya, “Observation of Exciton Molecule Consisting of Two Different Excitons in Coupled Quantum Dots”, Applied Physics Letters, Vol.87, pp253110-1~pp253110-3, 2005/12/15

14) K. Goshima, S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohash and T. Sugaya, “Observation of Exciton Molecule Consisting of Two Different Excitons in Coupled Quantum Dots”, Applied Physics Letters, Vol.87, 2005/12/19

【2006年】

1) S. Yamauchi, K. Komori and T. Sugaya, “Optical characteristics of self-aligned InAs quantum dots on GaAs oval strain”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.45, No.2A, pp1030~pp1032, 2006/2/8

2) S. Yamauchi, K. Komori, I. Morohashi, K. Goshima and T. Sugaya, “Electronic Structures in Single Pair of InAs/GaAs Coupled Quantum Dots with Various Interdot Spacings”, Journal of Applied Physics, Vol.99, pp033522-1~pp033522-8, 2006/2/15

3) T. Sugaya and K. Komori, “InGaAs dual channel transistors with negative differential resistance”, Applied Physics Letters, Vol 88, pp142107-1~pp142107-3, 2006/4/5

4) T. Sugaya, T. Amano and K. Komori, “Improved optical properties of InAs quantum dots grown with an As₂ source using molecular beam epitaxy”, Journal of Applied Physics, Vol. 100, pp.063107-1~pp.063107-4, 2006/9/26

5) T. Amano, S. Yamauchi, T. Sugaya, and K. Komori, “Control of subband energy levels of quantum dots using InGaAs gradient composition strain-reducing layer”, Applied Physics Letters, Vol 88, pp261110-1~pp261110-3, 2006/6/30

6) T. Amano, T. Sugaya, K. Komori, “Characteristics of 1.3 μ m quantum-dot lasers with high-density and high-uniformity quantum dots”, Applied Physics Letters, Vol. 89, no.17, pp.171122-1~171122-3, 2006/10/27

7) S. Furue, K. Komori, T. Okada, N. Tsurumachi, S. Nakanishi, and H. Itoh, "Phase-relaxation-time free coherent control using area regulated pulse sequence", Applied Physics Letters, 2006/10/31 投稿 (投稿中)

① 招待講演 (国際会議 1 件、国内会議 6 件)

国際会議

【2006 年】

1) K. Komori, "Quantum logic gates using excitons in coupled quantum dots", The 4th National Institute for Materials Science (NIMS) International Conference on Photonic Processes in Semiconductor Nanostructures, O-16, Tsukuba, Japan, 2006/3/9, (招待講演)

国内会議

【2005 年】

- 1) 小森和弘, "半導体量子ドットを用いた量子ビット, 量子ゲート", 春季日本物理学会第 60 回 年次大会, 25pXP-5, 2005/3/9 (招待講演)
- 2) 天野建、菅谷武芳、小森和弘 "高密度量子ドットの製作とその半導体レーザへの応用" 次世代ナノ技術に関する研究専門委員会、(東京、機械振興会館)、2005. 6. 24 オーラル、国内、日本語、(招待講演：学協会)
- 3) 菅谷武芳、小森和弘、天野建、小倉睦郎、米井健治 (芝浦工大) "As₂ 分子線を用いた量子細線・量子ドットの形成とデバイス応用" 応用物理学会秋季講演会 (立命館大、びわこ) 2006. 8. 30、国内、日本語、オーラル、招待講演 (学協会)
- 4) 菅谷武芳、小森和弘、天野健, "As₂ 分子線と組成傾斜歪み緩和層を用いた高密度 InAs 量子ドット形成", 東京大学ナノエレクトロニクス連携研究センタープロジェクト公開シンポジウム, 2005/9/28 (招待講演)
- 5) 天野建、菅谷武芳、小森和弘 "As₂ 分子線と組成傾斜歪み緩和層を用いた高密度量子ドット" 量子ナノ材料セミナー (NICT)、2005. 10. 3、オーラル、国内、日本語、(招待講演)
- 6) 菅谷武芳、小森和弘、小倉睦郎、山根孝史、堀聡一郎、米井健治 (芝浦工大) "サブバンド間遷移を用いた InGaAs 負性抵抗トランジスタ" 量子構造サブバンド間遷移の応用と物理に関する研究会 (情報通信研究機構小金井)、2006. 6. 16、国内、日本語、オーラル、招待講演 (学協会)

② 口頭発表 (国際会議 26 件、国内会議 52 件)

国際会議

【2002 年】

- 1) I.Morohashi, K.Komori, H.Shimura, T.Hidaka, H.Ikeda, S.Tsujikura, M.Yamamoto, and Y.Okamoto, “Terahertz wave generation from multi-quantum well with transverse electric field” 13th International Conference on Ultrafast Phenomena 2002, ThD2-1-2, pp444~445, Vancouver, Canada, 2002/5/16
- 2) T.Yasuhira, K.Komori, R.Akimoto, X.L.Wang, M.Watanabe, M.Ogura, “Ultrafast exciton dynamics of crescent shaped GaAs/AlGaAs quantum wires”, FST2002, Tsukuba Japan, 2002/6/27-28
- 3) T. Sugaya, K-Y. Jang, T. Wada, M. Ogura and K.Komori, “V-grooved InGaAs Quantum-Wire FET fabricated under an As₂ flux in Molecular Beam Epitaxy” 2002 Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy(MBE2002), San Francisco,USA, 2002/9/17
- 4) T. Yasuhira, K. Komori, R. Akimoto, X. L. Wang, M. Watanabe, M. Ogura, “Ultrafast exciton dynamics in GaAs crescent-shaped quantum wires”, 2002 International Conference on Solid State Devices and Materials(SSDM2002), Nagoya Congress Center, Nagoya, 2002/9/19

【2003 年】

- 1) N.Tsurumachi, C.S. Son, T.G. Kim, K. Komori and M. Ogura, “Photoluminescence properties of High-Density InGaAs/AlGaAs Quantum Wire Structures on Submicron Grating”, The 11th International Conference on Modulated Semiconductor Structures-MSS11, Nara, Japan, 2003/7/14
- 2) C.S.Son, Youn Ju Park, K. Komori and M. Ogura, “One-dimensional InAs quantum dots on V-grooves”, FST2003, Makuhari, Japan, 2003/7/16
- 3) K. Komori, T. Sugaya, K. Furuya, M. Mori, M. Ogura, T. Yasuhira, N. Tsurumachi, I. Morohashi, K. Goshima, S. Yamauchi, T. Okada, M. Sakurama, and O. Yamazaki, “Ultrafast coherent quantum control technology for novel nano devices”, CREST&QNN’03 Joint International Workshop, Awaji Westin Hotel(Hyogo, Japan), 2003/7/21
- 4) M. Ogura, Y. Nagamune, X.L. Wang, Y. Takasuka, C.K. Hahn “3-dimensional design of compound semiconductor nanostructures on patterned substrates for optical and electronic devices”, CREST&QNN’03 Joint International Workshop, Awaji Westin Hotel(Hyogo, Japan), 2003/7/21
- 5) C.S.Son, I.H.Choi, S.I.Kim, Y.T.Kim, Youn Ju Park, K. Komori and M. Ogura, “Self-organized one-dimensiona InAs quantum dots on V-grooves”, CREST&QNN’03 Joint International Workshop, Awaji Westin Hotel(Hyogo, Japan), 2003/7/21
- 6) Katsumi Furuya, Noritsugu Yamamoto, Yoshinori Watanabe and Kazuhiro Komori, “A study of the 4-ports directional coupler for input or output of a novel ring defects waveguide device on 2D photonic crystal slab”, CREST&QNN’03 Joint International Workshop, Awaji Westin

Hotel(Hyogo, Japan), 2003/7/21

7) Noriaki Tsurumachi, and Kazuhiro Komori, Toshiaki Hattori, “Coherent control in self-assembled InAs quantum dots by area-regulated pulse train”, CREST&QNN’03 Joint International Workshop, Awaji Westin Hotel(Hyogo, Japan), 2003/7/22

8) Katsumi Furuya, Noritsugu Yamamoto, Yoshinori Watanabe and Kazuhiro Komori, “Proposal of a novel ring waveguide device of 2D photonic crystal slab- The transmittance simulated by FDTD analysis “, 2003 International conference on Solid State Devices and Materials (Tokyo), 2003/8/30

9) K-Y. Jiang, T. Sugaya, A. Shinoda, C-K.Hahn, M. Ogura and K.Komori “Photoconductive characteristics in a trench-type InGaAs quantum wire”, 2003 North American Conference on Molecular Beam Epitaxy (NAMBE 2003), Keystone, Colorado, USA, 2003/9/29

10) Noriaki Tsurumachi, Naoki Watanabe, Kazunori Hikosaka, Xue-Lun Wang, Kazuhiro Komori, Toshiaki Hattori, and Mutsuo Ogura, “Linear and nonlinear femtosecond pulse propagation through a quantum nano-structure optical waveguide observed with XFROG spectroscopy”, 2003 International Conference On Solid State Devices and Materials (SSDM2003) Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, 2003/9/18

11) Noriaki Tsurumachi, Kazuhiro Komori, and Toshiaki Hattori, “Coherent control in inhomogeneously broadened quantum dots ensemble and its coherent transient phenomena”, 2003 International Conference On Solid State Devices and Materials (SSDM2003) Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, 2003/9/18

12) T. Sugaya, T.Yamane, K-Y. Jiang, M. Ogura, K.Komori and K. Yonei, Samsung Co. Ltd., “Pseudomorphic InGaAs QWR-FETs with negative differential resistance”, 6th Int. Conf. on New Phenomena in Mesoscopic Structures & 4th Int. Conf. on Surfaces and Interfaces of Mesoscopic Devices (NPMS-6, SIMD-4), Hawaii, USA, 2003/12/4

【2004 年】

1) N. Yamamoto, Y. Watanabe, K. Kazuhiro, “A Design of the Photonic Crystal Directional Coupler with a High Extinction Ratio and a Short Coupling Length”, Solid State Devices and Materials (SSDM 2004), Tokyo, Japan, 2004/9/16

2) I. Morohashi, S. Yamauchi, K. Goshima, T. Sugaya and K. Komori, “Stark Shift of a Quantum Dot with Electric field”, 2004 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2004), Tokyo, Japan, 2004/9/17

3) S. Yamauchi, K. Komori, T. Sugaya, I. Morohashi and K. Goshima, “Carrier correlations in single pair of coupled quantum dots”, Solid State Devices and Materials (SSDM 2004), Tokyo, Japan, 2004/9/17

【2005 年】

1) S. Yamauchi, K. Komori, T. Sugaya, I. Morohashi and K. Goshima, “Interdot Correlation in Single Pair of Coupled Quantum Dots”, (IQEC and CLEO-PR 2005), Tokyo, Japan, 2005/7/12

2)K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, A. Shikanai, T. Sugaya, “Measurement of Two-Qubit States Consisting of Two Different Excitons in Coupled Quantum Dots”, (IQEC and CLEO-PR 2005),Tokyo,Japan 2005/7/12

3)K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, A. Shikanai, and T. Sugaya, “Pulse Area Control of the Exciton Rabi Oscillation in InAs/GaAs Single Quantum Dot”, SOLID STATE DEVICES AND MATERIALS 2005, Kobe,Japan 2005/9/14

4)T. Amano, T. Sugaya and K. Komori, “1.3 μ m High density Quantum Dots Laser with Short Cavity and Cleaved Facet”, IEEE LEOS 2005 Annual Meeting, No.WS2, Sydney(Australia) 2005/10/26

【2006年】

1)Keishiro Goshima, Kazuhiro Komori, Shohgo Yamauchi, Isao Morohashi and Takeyoshi Sugaya, “Two exciton correlation in a coupled quantum dots”, Quantum Electronics and laser science conference, USA, 2006/5/25

2)K. Goshima, K. Komori, S. Yamauchi, I. Morohashi, T. Sugaya, “Exciton Rabi Oscillation in InAs/GaAs Coupled Quantum Dot”, 2006 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2006), Yokohama,Japan, 2006/9/13

3)S. Yamauchi, A. Shikanai, I. Morohashi, S. Furue, K. Komori, T. Sugaya, T. Takagahara, “Photon Statistics in a Thick Barrier Coupled Quantum Dot”, 2006 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2006),Yokohama,Japan, 2006/9/13

国内会議

【2001年】

1)張起連, 菅谷武芳, 篠田明人, 韓 哲九, 小倉睦郎, 小森和弘, “トレンチ型 InGaAs/InAlAs 量子細線 FET での量子化コンダクタンス特性”, 2001 年春季応用物理学会, 東海大学, 2001/3

【2002年】

1)前田進一, 小森和弘, 安平哲太郎, 日高健彦, “超高速光一光制御の為の位相同期極超短パルス列の形成”, 2002 年春季 第 49 回応用物理学会連合講演会, 東海大学(湘南校舎), 2002/3/27

2)諸橋功, 志村恒, 小森和弘, 板谷太郎, 日高建彦, 池田博一, 辻倉伸弥, 山本正美, 岡本恭典, “横電界印加型テラヘルツ電磁波発生素子の励起波長依存性”, 第 49 回応用物理学関係連合講演会, 東海大学(湘南校舎)、2002/3/29

3)安平哲太郎, 小森和弘, 秋本良一, 王学論, 小倉睦郎, 渡辺正信, “三日月形状 GaAs/AlGaAs 量子細線における超高速ポンプ・プローブ分光”, 第 49 回応用物理学会連合講演会, 東海大学(湘南校舎)28a-p4-18, 2002/3/29

- 4) 張起連, 菅谷武芳, 篠田明人, 韓哲九, 小倉睦朗, 小森和弘, “トレンチ型 InGaAs/InAlAs 量子細線 FET での量子化コンダクタンス特性”, 2002 年春季 第 49 回応用物理学会, 東海大学 (湘南校舎), 2002/3/29
- 5) 篠田明人, 菅谷武芳, 張起連, 米井健治, 小森和弘, “InP(311)A-V 溝基板上へのトレンチ型 InGaAs 量子細線の成長特性”, 2002 年春季 第 49 回応用物理学会, 東海大学 (湘南校舎), 2002/3/29
- 6) 河島整, 小森和弘, 挾間寿文, “誘電体微小球固有モードにおける位相オフセット”, 第63回応用物理学会学術講演会, 2002/09/24
- 7) 諸橋功, 小森和弘, 安平哲太郎, 秋本良一, 王学論, 日高建彦, 小倉睦郎, “三日月形状量子細線の白色ポンププローブ分光”第63回応用物理学会学術講演会, 新潟, 2002/09/27
- 8) 張起連, 菅谷武芳, 篠田明人, 韓哲九, 米井健治, 小倉睦郎, 小森和弘, “トレンチ型 InGaAs 量子細線 FET でのゲート長変化に対する負性抵抗特性”, 第63回応用物理学会学術講演会, 新潟, 2002/9/27
- 9) 篠田明人, 菅谷武芳, 張起連, 米井健治, 小倉睦郎, 小森和弘, “InP(311)A-V 溝基板上へのトレンチ型量子細線の作製”, 第63回応用物理学会学術講演会, 新潟, 2002/9/27

【2003 年】

- 1) 山内掌吾, 菅谷武芳, 小森和弘, 岡田工, 五島敬史郎, “MBE による InAs 結合量子ドットの作製と光学特性” 2003 年春季 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学 (横浜市), 2003/3/28
- 2) 諸橋功, 小森和弘, 板谷太郎, 日高建彦, 池田博一, 辻倉伸弥, 山本正美, 岡本恭典, “横方向電界印加型 MQW からの THz 波発生特性”, 2003 年春季 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学 (横浜市), 2003/3/29
- 3) 鶴町徳昭, 小森和弘, 服部利明, “不均一広がりのある系のコヒーレント制御”, 日本物理学会 第 58 回年次大会, 東北大学川内キャンパス (宮城県), 2003/3/29
- 4) 張起連, 菅谷武芳, 篠田明人, 韓哲九, 小倉睦郎, 小森和弘, “トレンチ型 InGaAs 量子細線 FET でのサブバンド遷移による負性抵抗効果”, 2003 年春季 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学 (横浜市), 2003/3/29
- 5) 古屋克己, 山本宗継, 渡辺慶規, 小森和弘 “フォトニック結晶光リングデバイス (1) 入力用結合器の数値解析による設計”, 2003 年春季 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学 (横浜市), 2003/3/29
- 6) 菅谷武芳, J.P.Bird, D.K.Ferry, 張起連, 篠田明人, 小森和弘, 小倉睦郎, “25nm トレンチ型及び 600nm エッチング型 InGaAs 量子細線の磁気抵抗特性”, 2003 年春季 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学 (横浜市), 2003/3/29
- 7) 五島敬史郎, 小森和弘, 岡田工, 山内掌吾, 菅谷武芳, “InAs 単一量子ドットの顕微分光 (1) PLE 特性” 2003 年春季 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学 (横浜市), 2003/3/29

8)岡田工, 小森和弘, 五島敬史郎, 山内掌吾, 菅谷武芳, 山崎修, 服部利明, “高精度マイケルソン干渉計を用いた単一量子ドット励起子のコヒーレント制御”, 2003 年春季 第 50 回応用物理学関係連合講演会, 神奈川大学(横浜市), 2003/3/29

9) 古屋克己, 山本宗継, 渡辺慶規, 小森和弘, “階段状線欠陥導波路を用いたフォトニック結晶方向性結合器”, 電子情報通信学会, 光エレクトロニクス/レーザ・量子エレクトロニクス研究会 機械振興会館, 2003/7/4(発行日 6/27)

10)張起連, 菅谷武芳, 山根孝史, 小倉睦郎, 小森和弘, 米井健治, “トレンチ型 InGaAs 量子細線 FET のフォトコンダクティビティ特性”, 応用物理学会, 福岡大学, 福岡, 2003/8/30

11)古屋克己, 山本宗継, 渡辺慶規, 小森和弘, “フォトニック結晶光リングデバイス(2) - 階段状線欠陥導波路を用いた方向性結合器”, 応用物理学会, 福岡大学, 福岡, 2003/9/2

12)岡田工, 小森和弘, 五島敬史郎, 山内掌吾, 菅谷武芳
“高精度マイケルソン干渉計による超高速パルス対の位相安定システム”電気学会 フィジカルセンサ研究会, 2003/9/19

【2004 年】

1)五島敬史郎, 山内掌吾, 諸橋功 小森和弘, “InAs 結合量子ドットの顕微分光(PLE 特性)” 2004 年春季応用物理学関係連合講演会, 東京工科大学(八王子市), 2004/3/28

2)諸橋功, 山内掌吾, 山本宗継, 五島敬史郎, 岡田工, 小森和弘, “極微小ピラー状・開口構造の作製と単一量子ドット分光”, 2004 年春季応用物理学関係連合講演会, 東京工科大学(八王子市), 2004/3/30

3) 山根 孝史, 菅谷 武芳, 小森 和弘, 小倉 睦郎, 米井健, “トレンチ型 In_{0.8}Ga_{0.2}As 弾性歪量子細線 FET の Id-V_{ds} 温度特性”, 第 51 回応用物理学関係連合講演会(2004 年春季応物), 東京工科大学, 2004/3/31

4)菅谷武芳, 山内掌吾, 山根孝史, 小森和弘, 米井健治, “As₂分子線による 1.3・μm 帯自己組織化 InAs 量子ドットの作製”, 第 51 回応用物理学関係連合講演会(2004 年春季応物), 東京工科大学, 2004/3/31

5)山本宗継, 渡辺慶規, 小森和弘, “フォトニック結晶方向性結合器の結合長短縮と消光比の改善”, 電子情報通信学会, ISSN0913-5685, (信学技報 Vol.104 No.161, pp67-70), 2004/7/2

6)五島敬史郎, 山内掌吾, 諸橋功, 小森和弘, “一対の InAs 結合量子ドットの顕微分光(結合準位の発光特性)”, 応用物理学会秋季大会、東北学院大学, (6/10 投稿) 2004/9/2(発表)

7)山内掌吾, 諸橋功, 五島敬史郎, 小森和弘, 菅谷武芳, “一対の結合量子ドットにおけるキャリア相関”, 2004 年応用物理学会秋季大会, 東北学院大学, 2004/9/2

8)五島敬史郎, 小森和弘, 山内掌吾, 鹿内周, 諸橋功, 岡田工, “InAs/GaAs 単一量子ドットのラビ振動の制御”, 第 11 回量子情報技術研究会(QIT11), 京都大学, 2004/12/6-7 発表

9)山内 掌吾, 小森 和弘, 五島 敬史郎, 諸橋 功, 菅谷 武芳, “結合量子ドット中の励起子を

用いた量子論理ゲート～結合量子ドット系における電子状態とキャリア相関～”，第 11 回量子情報技術研究会 (QIT11)，京都大学，2004/12/6-7(発表)

【2005 年】

1) 山内掌吾，高河原俊秀，諸橋 功，小森和弘，五島敬史郎，菅谷武芳，“InAs/GaAs 単一結合量子ドットにおける2波長励起分光”，春季日本物理学会第 60 回年次大会，2005/3/25

2) 五島敬史郎，山内掌吾，諸橋 功，鹿内 周，小森和弘，“単一の結合量子ドットのキャリア相関(2)” 春季第 52 回応用物理学関係連合講演会，埼玉大学，JSAP Catalog Number: AP051110-03, No.3, P1570, 31a-V-7, 2005/3/31

3) 五島敬史郎，鹿内 周，山内掌吾，諸橋 功，小森和弘，“nAs/GaAs 単一量子ドットのラビ振動のパルス面積制御” 春季第 52 回応用物理学関係連合講演会，埼玉大学，JSAP Catalog Number: AP051110-03, No.3, P1569, 31a-V-6, 2005/3/31

4) 諸橋功，山内掌吾，五島敬史郎，鹿内 周，山本宗継，小森和弘，“電界印加型結合量子ドット 2-qubit 素子の試作”，春季第 52 回応用物理学関係連合講演会，埼玉大学，JSAP Catalog Number: AP051110-03, No.3, P1570, 31a-V-8, 2005/3/31

5) 古江重紀，鶴町徳昭，小森和弘，“量子ドット集合体におけるコヒーレント制御”，応用物理学会学術講演会，埼玉大学，JSAP Catalog Number: AP051110-03, No.3, P1571, 31a-V-10, 2005/3/31

6) 市川心人，諸橋功，小森和弘，日高建彦，“横方向電界印加型多重量子井戸を用いた THz 波発生素子の開発とイメージングへの応用”，春季第 52 回応用物理学関係連合講演会，2005/3/31

7) 山本宗継，渡辺慶規，小森和弘，“フォトリック結晶方向性結合器の結合長短縮と消光比の改善”，電子情報通信学会，ISSN0913-5685, (信学技報 Vol.104 No.161, pp67-70), 2004/7/2

8) 天野健，菅谷武芳，小森和弘，“5 層の高密度量子ドットを用いた 1.3 μm 帯量子ドットレーザの発振特性”，秋季第 66 回応用物理学会学術講演会，2005/9/7

9) 菅谷武芳，小森和弘，天野健，諸橋功，“As₂ 分子線によるInAs量子ドット発光特性の改善”，秋季第 66 回応用物理学会学術講演会，2005/9/9

10) 天野健，菅谷武芳，小森和弘，“As₂ソースと組成傾斜歪み緩和層を用いた 1.3 μm 帯高密度量子ドットの強度増強”，秋季第 66 回応用物理学会学術講演会，2005/9/9

11) 天野健，菅谷武芳，小森和弘，“高 In 組成の組成傾斜 InGaAs 歪み緩和層を用いた 1.3 μm 帯高密度量子ドットの多層化”，秋季第 66 回応用物理学会学術講演会，2005/9/9

12) 五島敬史郎，小森和弘，鹿内 周，山内掌吾，諸橋 功，“結合量子ドット中の異種励起子による 2-qubit 状態の観測”，秋季第 66 回応用物理学会学術講演会，2005/9/9

13) 山根孝史，菅谷武芳，堀聡一郎，小森和弘，小倉宗郎，米井健治，“InGaAs速度変調トランジスタのId-Vds特性”，秋季第 66 回応用物理学会学術講演会，2005/9/11

14) 天野健，小森和弘，菅谷武芳，“As₂ 分子線と組成傾斜歪み緩和層を用いた高密度量子ドット

ト”，量子ナノ材料セミナー，2005/10/3

【2006年】

- 1)五島敬史郎 小森和弘，諸橋功，鹿内周，山内掌吾，“結合量子ドット中の励起子対を用いた量子ゲート(1) 励起子間の相関”，春季 第53回応用物理学関係連合講演会，2006/3/24
- 2)諸橋功，山内掌吾，鹿内周，五島敬史郎，小森和弘“電界印加型結合量子ドットを用いた2-qubit素子の光学特性”，春季 第53回応用物理学関係連合講演会，2006/3/24
- 3)菅谷武芳，古江重紀，天野健，小森和弘，“MBEによる高均一InGaAs量子ドットの作製”，春季第53回応用物理学学会学術講演会，武蔵工業大学，2006/3/25
- 4)山本 宗継，岡野誠，杉坂純一郎，鄭 錫煥，小森 和弘，“広帯域・短スイッチング長フォトニック結晶方向性結合器スイッチ 平坦バンドの由来”，第67回応用物理学学会，2006/8/29
- 5)菅谷武芳，天野建，小森和弘，小倉睦郎，米井健治，“As₂分子線を用いた量子細線・量子ドットの形成とデバイス応用”，第67回応用物理学学会，2006/8/30
- 6)天野建，菅谷武芳，青木重典，小森和弘，“高密度かつ高均一な量子ドットを用いた1.3 μm帯半導体レーザの発振特性”，第67回応用物理学学会，2006/8/30
- 7)天野建，菅谷武芳，小森和弘，“歪み緩和層を用いた量子ドットの高次エネルギー準位の制御”，第67回応用物理学学会，2006/8/31
- 8)古屋克己，菅谷武芳，小森和弘，浅田雅洋，“負性抵抗デュアルチャネルトランジスタを用いたテラヘルツ発信器の解析”，電子情報通信学会2006年ソサイエティ大会，2006/9/21

③ ポスター発表（国際会議 23 件、国内会議 1 件）

国際会議

【2002 年】

- 1) K-Y. Jiang, T. Sugaya, C-K. Hahn, A. shinoda, K. Yonei, M. Ogura, and K. Komori, "Negative transconductance in trench-type InGaAs/InAlAs Quantum Wire FET", 14th IPRM'02(Indium Phosphide and Related Materials), Stockholm (Sweden), pp.581 ~ 584, 2002/5/15
- 2) T. Okada, K. Komori, K. Goshima, X.L. Wang, M. Ogura, "Micro-spectroscopy of crescent-shaped quantum wire", International Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures & Nanoelectronics '02(QNN02), TuP-17, p.161~162, Tsukuba, Japan, 2002/9/10
- 3) I. Morohashi, K. Komori, T. Hidaka, X.L. Wang, M. Ogura, and M. Watanabe, "THz wave generation from crescent-shaped GaAs/AlGaAs quantum wire" Second International Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures & Nanoelectronics '02, TuP-18, p.163-164, Tsukuba, Japan, 2002/9/10
- 4) I. Morohashi, K. Komori, H. Shimura, T. Hidaka, H. Ikeda, S. Tujikura, M. Yamamoto and Y. Okamoto, "Terahertz wave generation from multi-quantum well with transverse electric field", The 9th International Workshop on Femtosecond Technology (FST2002), TC-29, p.125, Tsukuba, Japan, 2002/6/28
- 5) K-Y. Jiang, T. Sugaya, C-K Hahn, Akito SHINODA, Kenji YONEI, M. Ogura, K. Komori, "Electron transport in trench-type InGaAs/InAlAs Quantum Wire FET" 2nd Int. Workshop on Quantum Nonplanar Nanostructures & Nanoelectronics '02, Tsukuba Japan, 2002/9/10

【2003 年】

- 1) Morohashi, K. Komori, T. Hidaka, H. Ikeda, S. Tsujikuda, M. Yamamoto and Y. Okamoto, "Characteristics of Terahertz wave generation from multi-quantum well with transverse electric field", The 10th International Workshop on Femtosecond Technology (FST2003), WP-45, p. 139, Tsukuba, Japan, 2003/7/16
- 2) K. Goshima, K. Komori, T. Okada and S. Yamauchi, "Excitation density dependence on photoluminescence properties of Single InAs Quantum Dot", CREST&QNN'03 Joint International Workshop, Awaji Westin Hotel(Hyogo, Japan), 2003/7/21
- 3) S. Yamauchi, K. Komori, T. Sugaya and K. Goshima
"Photoluminescence of InAs/GaAs double quantum dots grown by MBE with Indium-Flush method", CREST&QNN'03 Joint International Workshop, Awaji Westin Hotel(Hyogo, Japan), 2003/7/21
- 4) M. Mori and K. Komori, M. Sakurama and F. Kannari, Keio Univ., "Three dimensional control of femto second light pulse", CREST&QNN'03 Joint International Workshop, Awaji Westin Hotel(Hyogo, Japan), 2003/7/21
- 5) T. Okada, K. Komori, K. Goshima, S. Yamauchi, T. Sugaya, O. Yamazaki, T. Hattori, Tokai University Junior College, "Micro-spectroscopy of a single quantum dot using a

high-resolution Michelson interferometer ”, CREST&QNN’03 Joint International Workshop, Awaji Westin Hotel(Hyogo, Japan) 2003/7/21

6) K-Y.Jiang, T. Sugaya, M.Oura and K.Komori, “Negative differential resistance of trench-type InGaAs QWR-FET based on inter-subband transition”, CREST&QNN’03 Joint International Workshop, Awaji Westin Hotel(Hyogo, Japan), 2003/7/21

7) Morohashi, K. Komori, X. L. Wang, M. Ogura, M. Watanabe and T. Hidaka, “Measurement of Ultrafast Carrier Dynamics in Quantum Wire by Terahertz Spectroscopy”, CREST&QNN’03 Joint International Workshop, Mp-7, p. 37, Awaji Westin Hotel(Hyogo, Japan), Hyogo, Japan, 2003/7/21

8) T. Okada, K. Komori, K. Goshima, S.Yamauchi, T.Sugaya, O. Yamazaki, T. Hattori, Tokai University Junior College, “Coherent control of exciton in a single quantum dot using a high-resolution Michelson interferometer”, 2003 International Conference On Solid State Devices and Materials (SSDM2003) Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, 2003/9/17

9) Morohashi, K. Komori, T. Hidaka, X. L. Wang, M. Ogura, and M. Watanabe, “Investigation of Ultrafast Carrier Dynamics in Quantum Wire by Terahertz Spectroscopy”, 2003 International Conference on SOLID STATE DEVICES AND MATERIALS (SSDM2003), P8-8, Tokyo, Japan, 2003/9/17

10) S. Yamauchi, K. Komori, T. Sugaya and K. Goshima, ”Optical characteristics of InAs/GaAs double quantum dots grown by MBE with Indium-Flush method”, 2003 International Conference On Solid State Devices and Materials (SSDM2003) Keio Plaza Hotel, Tokyo, Japan, 2003/9/18

11) N.Tsurumachi, N.Watanabe, T.Hikosaka, X.L.Wang, K.Komori, T..Hattori and M/Ogura , “Ultrashort pulse propagation through quantum nano-structure optical waveguide observed by XFROG spectroscopy”, Joint Meeting of the 2nd International Symposium on “Future-oriented Interdisciplinary Materials Science” and the 1st International Tsukuba-Symposium on “ NanoScience ” , Tsukuba, Japan, 2003/11/17

12) T. Sugaya, T. Yamane, K-Y.Jiang, M. Ogura, K. Komori and K. Yonei, “Pseudomorphic InGaAs QWR-FETs with negative differential resistance”, 6th Int. Conf. on New Phenomena in Mesoscopic Structures & 4th Int. Conf. on Surfaces and Interfaces of Mesoscopic Devices (NPMS-6, SIMD-4), Hawaii, USA, 2003/12/4

【2004年】

1) I. Morohashi, S. Yamauchi, A. Shikanai, K. Goshima, T. Sugaya, N. Yamamoto, K. Komori, “Electric field Dependence of Photoluminescence in Coupled Quantum Dots”, International Symposium on Quantum Dots and Photonic Crystals 2005 (ISQDPC2005), P-32, P 53, Tokyo, Japan, 2005/3/8

2) Shigenori Furue, Noriaki Tsurumachi, and Kazuhiro Komori, “Ultrafast Coherent Control in Semiconductor Quantum Dot Ensemble”, International Symposium on Quantum Dots and Photonic Crystals (ISQDPC), P-25, P46, Tokyo, Japan, 2005/3/8

3) K. Furuya, Y. Watanabe, N. Yamamoto and K. Komori “Design of small optical switch with 4-port directional coupler in two-dimensional photonic crystal slab”, International Symposium on Photonic and Electromagnetic Crystal Structures V (PECS-V), Kyoto, Japan, 2004/3/11

4) T. Sugaya, T. Yamane, M. Ogura, K. Komori and K. Yonei, “Negative differential resistance of pseudomorphic InGaAs QWR-FETs”, Int. Conf. Molecular Beam Epitaxy (MBE 2004), Edinburgh, U.K, 2004/8/26

5) T. Sugaya and K. Komori, “1.3 um InAs Quantum Dots Grown with an As₂ Source using Molecular Beam Epitaxy”, 2004 North American Conference on Molecular Beam Epitaxy (NAMBE), Banff, Canada, 2004/10/11

【2005年】

1) T. Sugaya, T. Yamane, S. Hori, K. Komori, and K. Yonei, “Velocity modulation transistors with InGaAs dual channel structures”, Seventh International Conference on New Phenomena in Mesoscopic Structures, Fifth International Conference on Surfaces and Interfaces of Mesoscopic Devices, USA, 2005/11/29

国内会議

【2003年】

1) 古屋克己, 渡辺慶規, 山本宗継, 小森和弘, 小川 徹, 谷田貝豊彦, “2次元フォトニック結晶方向性結合器型光スイッチの小型化のための理論的検討”, 第51回応用物理学関係連合講演会(2004年春季応物), 東京工科大学, 2004/3/30

(4)特許出願

① 国内出願 (CREST 3件、関連 2件)

【CREST特許】

1) 鶴町徳昭、小森和弘、「超高速非線形光学素子」、特願 2003-73271、出願日:2003/3/18
特許登録日:2006/8/25

2) 古屋克己、小森和弘、「フォトニック結晶欠陥導波路、フォトニック結晶欠陥デバイス」、特願 2003-80916、出願日:2003/3/24

3) 菅谷武芳、小森和弘 「負性抵抗電界効果素子及び高周波発振素子」、特願: 2005-250526、出願日:2005/8/31(出願中)

4) 古江重紀、小森和弘、鶴町徳昭、「位相緩和時間に制限されない新しいコヒーレント制御法」、特願 2006-292461、出願日 2006/10/27(出願中)

【関連特許】

1) 小森 「励起子を用いた量子論理素子」
特願:2001-298076、出願日:2001/9/27
特許登録: 特許第 3837485 号 平成18年8月11日

2)小森「励起子を用いた量子論理素子および量子論理演算方法」
特願:2002-265898, 出願日:2002/9/11

② 海外出願 (CREST 1 件、関連 4 件)

【CREST特許】

1) 古屋克己、小森和弘、山本宗継、渡辺慶規「フォトニック結晶結合欠陥導波路及びフォトニック結晶デバイス」、特願:2004-58536、出願日:2004/3/3(米国特許出願中)

【関連特許】

1) 米国特許 小森「励起子を用いた量子演算素子および量子論理演算方法」“Quantum logic gate and quantum logic operation method using exciton”
出願番号:10/254808、出願日 2002/9/26(2005/4/22)

2) 米国特許 小森「励起子を用いた量子演算素子および量子論理演算方法」,
出願番号:11/147358, 出願日:2005/6/8(2005/8/3)

3) 米国特許 小森「励起子を用いた量子素子および量子論理演算方法」,
6924501 特許登録日:2005/8/12

4) 米国特許 小森「励起子を用いた量子素子および量子論理演算方法」,
6974967 特許登録日:2005/12/13

(5)受賞等

① 新聞報道

1) 菅谷武芳、小森和弘『新しい負性抵抗ナノトランジスタの開発に成功』産総研プレスレク、
2004.11.24

2) 小森 “光量子位相制御・演算技術”, 「週間ナノテク 9月26日号」, 取材日: 2005年8月30日, 産業タイムズ社

3) 天野 取材日:2005年10月19日, 『高密度かつ高均一な量子ドットを用いた半導体量子ドットレーザの開発』, 産総研プレスレク、2005.10.20, ①“高密度量子ドット開発”「日刊工業新聞」(2005/10/20), ②“量子ドット活用”「日経産業新聞」(2005/10/24), ③“高密度・高均一な量子ドット 産総研、製造に成功”「電波新聞」(2005/12/30)

4) 小森, 五島 『量子コンピュータに向けた光制御型の基本素子構造の開発に成功』 産総研、科学技術振興機構共同プレスレク、2005.12.16, ①“超高速の量子計算機実現へ 産総研素子の多ビット化に成功”「フジサンケイビジネスアイ」(2005/12/17), ②“光制御型基本素子多ビット化可能に産総研が量子計算機用開発”「日刊工業新聞」(2005/12/19), ③“量子コン現実へ前進 光制御型の量子演算素子 世界初の2ビット化に成功”「科学新聞」(2006/1/13) ④“産総研多ビット素子開発 光制御の量子計算機に道”「日経産業新聞」(2006/1/18), ⑤“超高速演算可能な2量子ビット演算素子”「半導体産業新聞」(2006/2/1)

7 研究期間中の主な活動

(1)ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
2003.7.11	CRESTプロジェクト 内部発表会	産総研	20人	2002年12月～2003年7月 までの進捗報告会
2003.7.21-23	CREST&QNN'03 JointInternational Workshop	兵庫県淡路島 淡路夢舞台 国際会議場	約300人	ナノスケール科学技術分野 において、各国で活躍中の 研究者を招待し講演を依 頼。同時にCRESTプロジェ クト発足からの成果発表。
2003.12.8	CRESTプロジェクト 内部発表会	産総研	約20人	2003年7月～2003年12月 までの進捗報告
2004.2.18	ナノテクノロジー分野 別バーチャルラボ 全体発表会	日本科学 未来館	約300人	ナノバーチャルラボにおけ る、産総研小森チームの研 究紹介。
2004.10.4	第一回領域シンポジウ ム	アルカディア 市ヶ谷	12人	① 領域シンポジウム参加 ② ポスター発表
2005.6.27	CRESTプロジェクト 内部発表会	産総研	11人	2005年1月～2005年6月ま での進捗報告会
2005.12.9	平成17年度領域会議	機械振興会館	約10人	① 中間評価を受けてのゴール の設定(重点化、当初 計画との相違点) ② 推進計画とそのポイント ③ 中間評価以降現在まで の進捗 ④ ゴールまでの主要課題 と見通し ⑤ ゴールの自己評価(基 礎科学、デバイステクノロ ジーへのインパクト)
2005.12.19	CRESTプロジェクト 内部発表会	産総研	20人	2005年7月～2005年12月 までの進捗報告会
2006.7.3	CRESTプロジェクト 内部発表会	産総研	16人	2006年1月～2006年6月ま での進捗報告会
2006.10.30	CRESTプロジェクト 内部発表会	産総研	12人	① 2006年7月～2006年 10月までの進捗報告会 ② CRESTプロジェクト5年 間の成果
2006.11.9	CREST平成13年度 採択課題 終了シンポジウム	主婦会館 プラザエフ	約100人	2001年12月～2006年11 月までの成果発表

8 結び

本プロジェクト全体の成果のまとめと達成度を以下に示す。

A: 量子情報デバイス研究

1. 励起子2qubit量子論理ゲートの開発

2つの励起子qubit間に相互作用と「量子もつれ」を有し多ビット化が可能な結合量子ドットを用いた励起子2qubit量子論理ゲートの基本素子構造の開発に世界で初めて成功した。産総研&JST共同プレス発表(達成度100%)

縦方向電界印加型の励起子2qubit量子論理ゲート素子構造の開発および、横方向電界印加型の素子構造の開発を行い、電界による電子状態の制御、結合状態の制御が可能になった。ただし、励起子2qubit量子論理ゲートに応用して電界による励起子ビット間の結合制御を実証することについては進捗中である。(達成度80%)

2. 励起子2qubit量子論理ゲートの光制御技術の開発

励起子量子論理ゲートでのラビ振動制御実験を通して同素子での1qubitの回転ゲート操作は達成された。(達成度90%)

次に、同素子での2qubit制御回転ゲート実験を行い、1qubit目(励起子状態)を制御した場合に限り、2qubit目(励起子分子状態)の制御が可能な条件付の2qubit制御ゲート操作(カスケード励起制御)は可能になった。これは世界初の成果である。(達成度90%)。

さらに、2qubit $|11\rangle$ 状態のラビ振動制御の実験を行い、2qubit制御回転ゲートでの回転角度 θ が π 以下の操作が可能になった。応用上は、回転角度 θ が π の場合は、特殊な2qubit状態の形成(Bell状態の形成等)には利用可能である。しかし、2qubitの万能ゲート(CROT万能ゲート)として利用するためには $\theta = 0 \sim 2\pi$ の回転を任意に制御する必要があり、2qubit制御での θ を π 以上回転可能にする技術開発は進捗中であり、プロジェクト終了後も研究継承して推進する予定である。(達成度80%)

新しい研究展開として、励起子2qubit量子論理ゲート素子の応用として、 $|01\rangle$ 状態の励起子と $|10\rangle$ 状態の励起子との間の量子もつれを利用する相関を有する2波長の単一光子光源の開発を行い、各々の量子ドットから単一光子の発生と、2つの量子ドットからの相関を有する2波長の単一光子の発生(片方のドットが光子を発生した時刻では、もう一方のドットからの光子発生は抑制される。)が可能になった。(当初計画にない新展開)

B: ナノ構造デバイス研究

プロジェクト後半からの選択と集中化によって、課題Aを重点化、課題Bを副重点化したことによって、課題Bに関しては、それぞれの要素技術毎にデバイステクノロジーに関してインパクトがある成果を出すことを目標にして推進した。

1. 量子ドット集合体を用いた超高速光制御・演算素子

量子ドット集合体用のコヒーレント量子制御法として不均一広がりの影響が少なく、位相緩和時間制限がない(T2フリー)新しい制御法を提案し、理論シミュレーションを通して、エネルギー緩和時間以内では超高速光制御が可能になることを明らかにした。(達成度80%)

量子ドット集合体の開発では、As₂分子線と傾斜歪緩和法を用いることで、高密度、高均一(10¹⁹個/cm²、均一幅22meV)でかつ波長1.3 μ m帯の量子ドット集合体材料の開発が可能になった。レーザ素子として応用したところ、1.3 μ m帯量子ドットレーザとしては最高クラスの高利得発振動作を実現した。産総研プレス発表(達成度100%)

コヒーレント量子制御用の集積型波形整形素子として、2次元フォトニック結晶を用いた2連パルス発生素子の作製を行った。素子特性の測定から良好な2連パルスの発生している状況を表す透過スペクトルが得られ、集積型の波形整形(2連パルス発生)素子として利用可能であることが示された。(達成度80%)

2. 結合ナノ構造を用いた負性抵抗FETの開発とテラヘルツ帯発振素子への応用

量子細線中のキャリアトランスポートを利用するナノデバイスとして、MBE法によるトレンチ溝形状極微細線構造を用いた量子細線FETの開発を行ない、初めて近室温 ($T=260\text{K}$) 負性抵抗動作を達成した。細線FETと同じ動作原理を用いて大電流化が可能な、結合量子井戸デュアルチャネル負性抵抗FETを新たに提案した。実際に微細ゲート構造を有する素子の試作を行い、260Kまでの近室温動作、発振素子としては十分な20mAクラスの大電流動作を達成した。産総研プレス発表**(達成度100%)**

超高周波発振素子として応用するために、テラヘルツ帯アンテナと負性抵抗素子から構成されるアンテナ一体素子構造を提案した。3次元有限要素法電磁波解析シミュレータを用いた発振動作条件解析から、本負性抵抗素子では、ゲート長100nmの場合に300GHz超の超高周波発振が可能であることが示された。さらに、ゲート長を短縮化すること、高調波発振を利用すること等によって1THz超のテラヘルツ帯での発振が期待される。一方、アンテナ一体型超高周波発振素子の試作と動作実証に関しては進捗中である。**(達成度80%)**