

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名 : 光量子位相制御・演算技術

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名

研究代表者

小森 和弘 ((独)産業技術総合研究所光技術研究部門 グループリーダー)

主たる共同研究者

菅谷 武芳 ((独)産業技術総合研究所光技術研究部門 主任研究員)

古屋 克己 ((独)産業技術総合研究所光技術研究部門 研究員)

山本 宗継 ((独)産業技術総合研究所光技術研究部門 研究員)

天野 建 ((独)産業技術総合研究所光技術研究部門 研究員)

鶴町 徳昭 (香川大学工学部材料創造工学科 助教授)

岡田 工 (東海大学短期大学部情報・ネットワーク学科 助教授)

3. 研究内容及び成果:

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た。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、以下の研究成果を得た。

励起子2キュービット量子論理ゲートの開発

2つの励起子qubit(キュービット)間に相互作用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2 qubit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。それを発展させて、縦方向電界印加型の励起子2 qubit量子論理ゲート素子構造および、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、結合状態の制御を可能にした。

励起子2 qubit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1 qubitの回転ゲート操作を達成した。

同素子での2 qubit制御回転ゲート実験を行い、1 qubit目(励起子状態)を制御した場合に限り、2 qubit目(励起子分子状態)の制御が可能な条件付の2 qubit制御ゲート操作(カスケード励起制御)が可能になった。

さらに、2qubit $|11\rangle$ 状態のラビ振動制御の実験を行い、2 qubit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2 qubit状態の形成(Bell状態の形成等)に利用可能である。しかし、2 qubit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、2 qubit制御での θ を π 以上回転可能にする技術開発は残された課題である。

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。

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(T_2 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示した。

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(10¹¹個/cm²、均一
幅22 meV)でかつ波長1.3 μm帯の量子ドット集合体材料の開発が可能になった。この技術をレーザ素子として
応用展開し、1.3 μm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
作製を行い、素子特性測定から良好な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を示した。

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 K)負性抵抗動作を達成した。さらに、細線
FETと同じ動作原理を用いて大電流化可能な、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、
実際に微細ゲート構造を有する素子の試作を行い、260 Kまでの近室温動作、発振素子としては十分な20 mA
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、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
抗素子は300 GHz超の超高周波発振が可能であることを示した。

4. 事後評価結果

4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

本研究の研究成果は論文発表46件(和文2、英文44)、口頭(ポスター含)発表102件(国内53/国際49)を
通じて公表されている。当該領域内の他の課題に比べ件数が少ないのは、前半高品質、高均一の量子ドット形
成の技術蓄積に時間をかけたことによる。しかしこの研究アプローチは後半での研究加速に生かされたことから
妥当と考えられる。特許(国内5件、海外5件)出願については、重要な実用化独自技術となる期待の大きいも
のに絞り込んだ結果であり評価できる。

これまで単一量子ドットを利用しての2 qubit制御の研究はあるが、本研究のように結合量子ドットを用いた2
qubitの研究は独自性が高く、半導体技術をベースにしていることから多ビット化に有利との期待が大きい。その
反面、半導体結合量子ドットの形成技術や光制御技術の困難性から、技術蓄積も十分とはいえ、世界の研究
人口もこのプロジェクト期間内では目だって増えていないのが実態である。そのような背景にあっても、本研究チ
ームは、多くの困難に立ち向かい技術課題をひとつずつクリアし前進させてきた結果、2つの励起子qubit間に
相互作用を有する結合量子ドットを用いた励起子2 qubit量子論理ゲートの基本素子構造として、縦方向電界印
加型および、横方向電界印加型の2つのタイプの素子構造を開発、電界による電子状態の制御、結合状態の
制御を可能にした点は評価できる。

次のステップとして、これらの量子論理ゲート素子を用いてまず1 qubitの回転ゲート操作を達成し、次に量子
論理素子として重要な2 qubitの光制御に取り組み、同素子での2 qubit制御回転ゲート実験を行い、1 qubit目
(励起子状態)を制御した場合に限り、2 qubit目(励起子分子状態)の制御が可能な条件付の2 qubit制御ゲート
操作(カスケード励起制御)が可能であることを、世界に先駆けて示すことができた点も評価できる。

次に、2 qubit |11>状態のラビ振動制御の実証において、2 qubit制御回転ゲートでの回転角度θがπ以下の
操作を可能にし、回転角度θがπの場合は、特殊な2 qubit状態の形成(Bell状態の形成等)には利用可能で
あることを示したことは、応用上の観点からは評価できるが、2 qubitの万能ゲート(CROT万能ゲート)として利用
するためにはθ=0~2πの回転を任意に制御する必要があり、2 qubit制御でのθをπ以上回転可能にする技
術開発はチームの保有する光制御技術の高度化によって早期の実証が待たれる課題として残った。

新しい研究展開として、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や、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(T_2 フリー)新しい制御法を提案など、興味深い成果を上げたことは高く評価される。

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($T=260$ K)で負性抵抗動作を達成し、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、260 Kまでの近室温動作、発振素子としては十分な20 mAクラスの大電流動作を達成したことは、今後に期待が高まる成果である。

当初計画には明確にあげていなかった成果として、精緻化された量子ドット作製技術を駆使して、1.3 μm 帯量子ドットレーザとしての最高クラスの高利得発振動作の実現や、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など、量子ナノ構造の産業利用に役立つ技術の底上げがなされたことは、特化した重点課題に挑戦した結果として生まれた成果として評価できる。

4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

情報処理・通信技術の限界突破のひとつの方向として、光と量子状態の位相制御技術が期待されている。本研究の提案の本質は従来、光の強度項制御であったものに、コヒーレンス項をあらたに制御項に加えることで、超並列、超高速を実現するというコンセプトにある。このコンセプトの立証に向けて実証モデルを二つのタイプに絞り込んだことで自己形成量子ドットの励起子での2 qubit 操作といった有望なスケールビリティを持つ系の実現の確認に迫る準備は完了したと考えられる。

また、本研究の主要課題の解決を目指した遂行課程において開発、蓄積された半導体ナノ構造形成技術、光制御技術は半導体ナノエレクトロニクスの技術蓄積のポテンシャルを高めることにも貢献した。量子ドットの製造ばらつきを容認した制御法は今後実証される過程で、重要な実用化特許も生まれることが期待され、日本の将来の量子デバイスのものづくりにとって望まれる方向性を示す貢献である。研究開始当初は必ずしも表面化していなかった、安全・安心社会の構築に向けた重要技術となる新しい動作原理に基づく小型テラヘルツ発振機器につながる半導体素子構造の提案は、今後の研究でぜひ市場まで橋渡しされることを期待したい。

4-3. その他の特記事項(受賞歴など)

本チームは一拠点(産業技術総合研究所、光技術研究部門)に2つのグループを構成し研究者が常に課題を共有化できる環境で遂行され、提案の骨格である光量子位相制御・演算技術を広く展開しうる、知見や技術蓄積に加えて研究インフラも整備された。これまでのCRESTの成果をさらに発展させ、他の競合する量子制御・演算技術に伍して競争優位に展開されていくことを期待する。