

研究報告書

「量子ドットを用いた単電荷・スピン・光機能融合デバイス」

研究期間：平成 20 年 10 月～平成 24 年 3 月

研究者：中岡俊裕

1, 研究のねらい

現在、ポストスケーリングと呼ばれる新原理に基づくデバイスの開発が求められている。これに向けた重要な技術として、超低消費電力のための「単電子制御技術」、超高速信号処理、伝送が可能な「光と電子の融合技術」、新原理動作を実現するための「スピン自由度の制御技術」といった3つの技術がそれぞれ活発に研究されている。本研究では、これらポストスケーリングにおいて重要な3つの機能を1つの素子において融合することにより、単電子素子、光通信技術、スピントロニクスといった異分野の架け橋となる、デバイスプラットフォームを提供することを目指す。

2, 研究成果

【概要】

光、単電子、スピン機能を組み合わせる得るボトムアップ型ナノ構造として、自己形成量子ドットに着目した。次世代デバイス、量子情報処理デバイスとしての有望性から、活発に研究されている。将来の集積可能性を持つ半導体素子であり、良好な光学特性、電子輸送特性、長いスピン保持時間を合わせもつ。しかしながら、単電子輸送デバイスにおいては、優れた光学特性を引き出せず、発光(光子発生)素子においては単電子輸送測定が困難であるというデバイス機能上のトレードオフが存在する。本研究では、このトレードオフを解消し、上記3自由度融合プラットフォームを担い得る、「横型素子」(図1)、と「縦型素子」(図2)を開発した。横型素子は単電子伝導と発光制御を両立させ、縦型素子は単一光子発生と電子制御を両立させることができることを実証した。

【横型素子】

横型素子は通常のLSIなどと同様、電流方向が面内(半導体成長方向に対し垂直)である。素子表面のナノスケールの間隔を持つ電極から量子ドットへ電子を注入し、その輸送を測定をできる。これまでの量子ドット横型素子はこのナノギャップ電極を直接量子ドットと接触させるもので、単電子輸送測定を可能とするが、発光特性はすぐれず、発光と単電子輸送を両立することが困難であった。

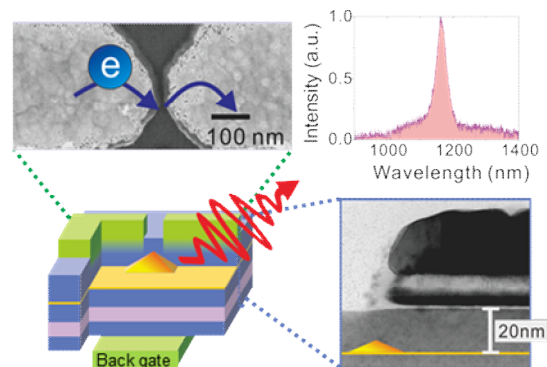


図1: 横型素子の模式図と発光スペクトル

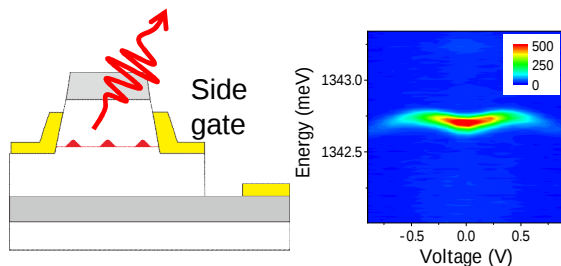


図2: 縦型素子の模式図と発光スペクトル

本研究では新しい微小金属拡散技術を開発し、この両立を達成した。発光効率を高めるため、量子ドットを通常の発光素子と同様バリア層中に埋め込んだ。この状態での電気コンタクトが課題であったが、適切な金属拡散状態により、量子ドット-電極間にトンネル接合を形成することに成功した。これにより、発光可能な量子ドットに対して単電子を注入し、そのトンネル電流をバックゲートにより制御することが可能となった。

図3に横型素子における電流測定結果を示す。白色の菱形部分がクーロン斥力によりトンネル伝導をブロックするクーロンブロック領域であり、そのゲート電圧依存性を明瞭に観測できた。個々のクーロンブロック領域内の電子数は一定であり、単電子トランジスタとして動作していることがわかる。観測されたクーロンダイヤモンドの大きさは、実験で用いた量子ドットのサイズからの見積もりと一致し、確かに量子ドットを介した単電子輸送であることがわかる。さらに、バリア層へ拡散させる金属材料を変えることにより、ゼロバイアス下での量子ドット内の初期電子数を変化させることに成功した。AuGe ベースの電極を用いることにより、図3(a,b)に示す基底準位が埋まった状態、Ti/Au ベースの電極を用いることにより図3(c,d)に示す空乏化状態を作り出すことができる。

本横型素子独自の特徴として、この単電子トンネル伝導素子からの良好な発光が挙げられる。本素子では発光観測時においても、ゲートにより量子ドット内の量子準位とフェルミ準位を相対的に制御できる。このため、トンネル電流だけでなく、発光強度、光電流もゲート電圧により制御、観測できる。発光スペクトルを図1に、発光強度 (PL) と光電流 (PC) のゲート電圧依存性を図4 (a,b) にそれぞれ示す。ゲート電圧が小さく量子準位がフェルミ準位よりもずっと上にある空乏状態では光励起キャリアは電極へのトンネル移動より早く発光再結合にするため、図4(b)に示す単光照射下の電子輸送のダイアグラムに大きな変化は現れない。しかしながら、ゲート電圧を上げていくとフェルミ準位が量子準位に近づき、電極—量子準位間のトンネル確率が増大する。このゲート領域では光励起による量子ドット内キャリアは発光再結合より早く電極へトンネルし、光電流として観測される。光励起キャリアが電極へトンネルする分、空乏状態に比べ発光強度は減少する。このように、発光とトンネルによる光電流を単電子輸送と同時に観測、制御できることがわかった。以上のように単電子輸送と発光制御との両立を横型素子を用いて実証した。

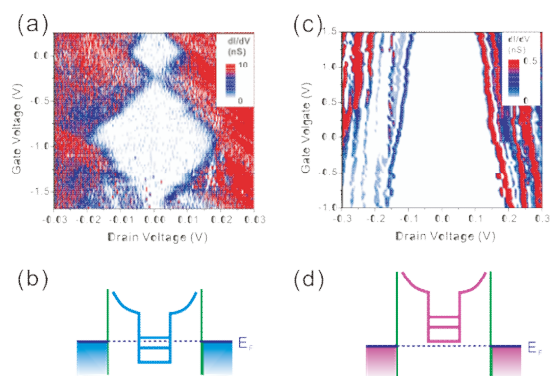


図3: (a)AuGe ベース横型素子の微分コンダクタンス (4 K)と(b)バンド模式図。(c)Ti/Au ベース横型素子の微分コンダクタンスと(d)とそのバンド模式図。

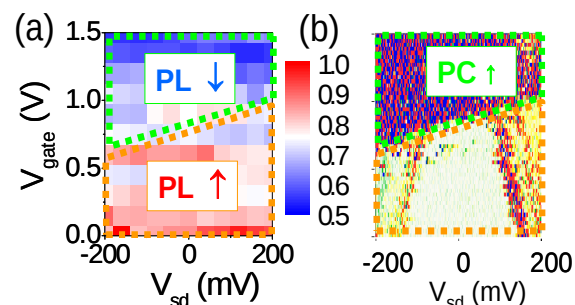


図4: (a)横型素子における発光強度(PL)のソースドレイン、ゲート電圧依存性。(b)光照射下の微分コンダクタンスと光電流(PC)のゲート電圧依存性。

【縦型素子】

縦型素子では、VCSEL などと同様、電流方向は結晶成長方向であり、サイドゲートにより電子状態を制御する。これまでこのような縦型素子において n-i-n 型の構造を用いた単電子素子が活発に研究されてきたが、本研究では、量子ドットを含む p-i-n 構造に同構造を応用した。横型素子で実現した単電子伝導と代わって電流注入発光を可能とし、より良好な発光を得ることができる。この発光をサイドゲートにより制御することで、単一光子発生と電子制御の両立を実現した。具体的機能としては、従来困難であった波長可変単一光子発生と横電場波動関数制御を達成した。

図 5 に縦型素子からの発光波長制御と単一光子発生を示す。本素子は、電流注入可能な構造であるが、まず光励起によって単一光子発生と制御の確認を行った。光子相関測定(同時計数測定)の結果から、サイドゲートによる発光波長制御下においても単一光子発生していることを示した。

また本縦型素子において、これまで困難であった面内電場による電子制御を実現した。情報を担う自己形成量子ドットは異方性を持っており、印加電場の方向は制御の自由度を確保する上で極めて重要である。本素子は初めて縦横双方への電圧印加を可能とするものである。

図 6 に横電場印加時の縦型素子からの発光スペクトルを示す。M 字型の特徴的なシフトは横電場印加特有のもので、今回初めて観測に成功した。図 7 に横電場印加時における量子ドット内の波動関数の二乗(電荷密度)を示す。特に正孔の波動関数が大きく局在し、この特徴的なシフトをもたらしていることがわかった。このような大きな波動関数の変化はスピンを含めた電子制御において重要である。以上のように、縦型素子によって波長可変単一光子発生と横電場電子制御を達成することができた。

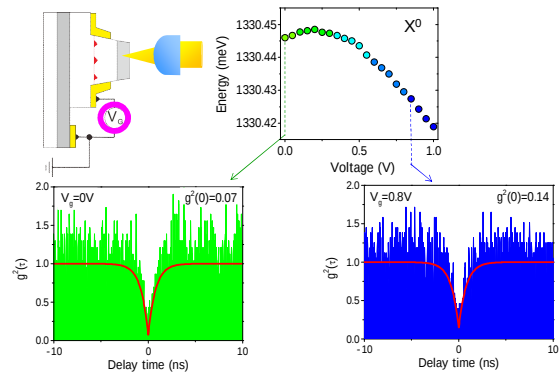


図 5: ゲート制御単一光子発生の素子図と発光波長シフト。図下は各ゲート電圧における光子相関ヒストグラム。

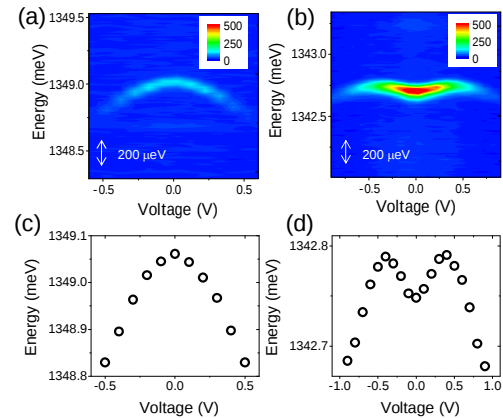


図 6: 縦型素子からの発光スペクトル。(a,c)典型的シュタルクシフトと(b,d)横電場特有の特異なシュタルクシフト。

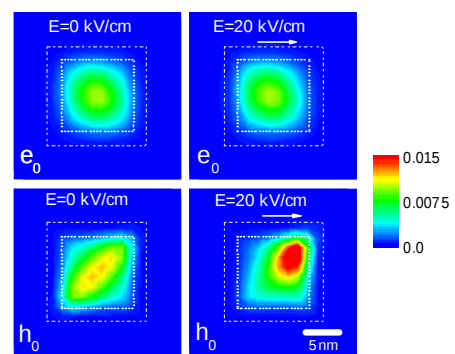


図 7: 縦型素子内量子ドットにおける電子、正孔の電荷密度の横電場依存性

3, 今後の展開

本さがけ研究では単電子、光子、スピンの融合を目指し、量子ドットの光電子ポテンシャルを引き出せる構造を開発した。光、単電子、スピン機能を組み合わせる素子として、単電子伝導と発光制御を両立させる横型素子、単一光子発生と電子制御を両立させる縦型素子を開発した。

開発できた現素子は特に量子情報の分野で広い応用が期待できる。例えば開発したサイドゲート制御型量子ドット単一光子素子は「(長距離)離れた 2 素子間の量子もつれ」生成素子へと応用できる。これは、量子情報通信の長距離化(量子中継)や量子計算機とのインターフェイスに不可欠な技術であるが固体素子では未だ実現していないものである。鍵となるのは、2素子間の2光子間量子干渉であり、干渉を実現する上で波長を一致させることが困難であったが、本素子は波長可変であるため、これを達成できる。今後、本素子を、取り出し効率の向上など高性能化し、これを実現したいと考えている。またスピントロニクス分野とのインターフェイスについては、本素子をベースとして、さらにスピン注入を始めとする機能追加を開拓し、ポストCMOS時代における情報の担い手候補の融合素子を実現したい。

4, 自己評価

単電子素子、光通信技術、スピントロニクスといった異分野の架け橋となる、デバイスプラットフォームを提供することを目指した。単電子と光子発生の融合素子としては新規かつ有望なものが開発できたと考えている。特に量子情報分野において広い応用が期待できる。一方、開発した素子は原理的にはスピン制御可能な素子であるが、現時点でスピンの直接的な制御には至っていない。当初の全目的達成に対しては道半ばではあるが、その糸口となるスピン分裂と思われる現象を観測しており、本研究で開発した素子の延長で達成できると考えている。以上、特に量子情報分野において有望な素子を開発でき、また全目的達成へも道筋は示すことができたと考えている。

5, 研究総括の見解

中岡研究者は、ポストスケーリング時代において重要な 超低消費電力のための「単電子制御技術」、 超高速信号処理、伝送が可能な「光と電子の融合技術」、 新原理動作を実現するための「スピン自由度の制御技術」という3つの機能を1つの素子において融合することにより、単電子素子、光通信技術、スピントロニクスといった異分野の架け橋となる、デバイスプラットフォームを提供するという大きな目標を掲げて研究に取り組みました。

このための材料として、自己形成量子ドット(基板半導体と格子定数の異なる半導体を気相成長するとき自己組織的に形成される nm サイズの直径をもつドット)に着目しました。中岡研究者は、従来の自己形成量子ドットで困難であった単電子輸送特性と光学特性を両立のために、単電子伝導と発光制御を両立させる横型素子、および単一光子発生と電子制御を両立させる縦型素子の 2 種類の素子を作製し、単電子特性と光学特性の両立を検証しました。

まず、横型素子においては、微小金属拡散技術によって電極とドットの間にトンネル接合をつくることで電流注入発光に十分な電流密度が得られ、**良好な発光特性を示す単電子トンネル伝導素子**の製作に成功しました。一方、縦型素子においては、単一光子発生を確認するとともに、サイドゲートにより発光波長が制御できることを確認しました。**単一光子発生と電子制御の両立**

を実現した画期的な成果です。

サイドゲート制御型量子ドット単一光子素子は「離れた2素子間の量子もつれ」生成素子に応用できます。量子情報通信の中継器には2素子間の2光子間量子干渉を使うのですが、これまで干渉を実現する上で波長を一致させることが困難であったのが、今回開発した波長可変素子によってこれが達成できるようになり、長距離量子情報通信に道を開きました。現時点では、当初めざした**スピンの直接的な制御**には至っていませんが、その糸口となるスピン分裂現象を観測しているので、近い将来、所期の3機能融合を達成できるものと期待しています。

プロジェクト途中で研究機関を移動するという困難な状況を克服して、所期の目標をほぼ達成したのは驚くべきことです。この業績が評価され平成24年度文部科学大臣表彰若手科学者賞を受賞しました。

6, 主な研究成果リスト

(1) 論文(原著論文)発表

- | |
|---|
| 1. T. Nakaoka, Y. Tamura, T. Miyazawa, K. Watanabe, Y. Ota, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Wavelength tunable quantum dot single-photon source with a side gate", Japanese Journal of Applied Physics vol. 51 no. 2 (2011), in printing. |
| 2. T. Nakaoka, Y. Tamura, T. Saito, T. Miyazawa, K. Watanabe, Y. Ota, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Competing influence of an in-plane electric field on the Stark shifts in a semiconductor quantum dot", Applied Physics Letters. 99, 181109/1-3 (2011). |

(2) 特許出願

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物等)

1. T. Nakaoka, Y. Tamura, T. Miyazawa, K. Watanabe, Y. Ota, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "Wavelength tunable single-photon source with a side gate", 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2011), J-6-4, Nagoya.
2. 中岡俊裕、渡邊克之、熊谷直人、荒川泰彦 "新規な微小金属拡散を利用した 埋め込まれた自己形成量子ドットへの 電気コンタクト"2011 年秋季 第 72 回 応用物理学会学術講演会, 2p-K-4.
3. 中岡俊裕、渡邊克之、熊谷直人、荒川泰彦 "ナノギャップ電極近傍のバンドベンディングによる量子準位制御", 2011 年春季 第 58 回応用物理学関係連合講演会, 26p-KV-10
4. T. Nakaoka, K. Watanabe, N. Kumagai, Y. Arakawa, "Lateral single electron transport in capped self-assembled quantum dots", The 14th International Conference on Modulated Semiconductor Structures (MSS14), M3e, Kobe.
5. 中岡俊裕、渡邊克之、熊谷直人、荒川泰彦, キャップ層を持つ静電結合 2 重 InAs 量子ドットの単電子輸送特性 ,2009 年春季 第 56 回応用物理学関係連合講演会. 31a-ZB-5.