

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料  
〔平成29年度研究進捗評価用〕

平成27年度採択分  
平成29年3月10日現在

Si-Ge系スーパーアトム構造のセルフアライン集積による光・  
電子物性制御

Formation of Self-Aligned Super-Atom-like Si-Ge based  
Quantum Dots and Characterization of Their Optical  
and Electrical Properties



課題番号：15H05762

宮崎 誠一 (MIYAZAKI SEIICHI)

名古屋大学・大学院工学研究科・教授

研究の概要

本研究は、価電子制御によりキャリア発光再結合効率を向上させたコア/シェル量子ドットを三次元規則配列するとともに、電流注入方向に自己整合的に積層したドットヘデルタドーピングすることで電流注入を高効率化しキャリア濃度を増大させることで、高効率・高輝度で発光するシリコン系エレクトロルミネッセンス材料を新たに創出する。

研究分野：電子・電気材料工学

キーワード：薄膜・量子構造

1. 研究開始当初の背景

Ge-Si系スーパーアトムを活性層に用いて、室温・低電圧(1V程度)で駆動できる極薄の高効率・高速エレクトロルミネッセンス(EL)デバイスが実現できれば、飛躍的な進歩を遂げているシリコンULSI技術をベースにSi系量子ドットトランジスタやフローティングメモリデバイスを組み合わせ、将来の少数電子・少数光子を使った大規模な高度情報処理へと発展する可能性が高い。

2. 研究の目的

Si-Ge系スーパーアトム(コア/シェル量子ドット)において発光強度を飛躍的に高めるための価電子制御手法を確立し、これを高密度・規則配列した三次元自己整合集積構造を形成することで、電流注入型レーザへ応用可能な高濃度キャリア注入と高効率キャリア再結合を実現できるSi系エレクトロルミネッセンス材料を創成する。

3. 研究の方法

申請者らのSi系量子ドットの自己組織化形成に関する実績・経験を踏まえて、コア/シェル構造、歪、不純物元素を導入することで直接遷移型に価電子制御したSi-Ge系スーパーアトムを自己整合的に高密度・規則配列した三次元集積構造を形成する。

4. これまでの成果

研究初年度および平成28年度の主な研究成果は下記の通りである。

【GeコアSi量子ドットのフォトルミネッセンス特性評価】

SiH<sub>4</sub>とGeH<sub>4</sub>のLPCVDにおいて、反応初期過程を交互に精密制御することによって、熱酸化膜上にGe核を有するSi量子ドットを自己組織化形成(面密度:~10<sup>11</sup>cm<sup>-2</sup>、平均ドット高さ:~8.0nm)し、フォトルミネッセンス特性を評価した結果、~0.7eVにピークを持つ信号が認められた。一方、同条件で測定したc-Ge(100)基板では、ピーク波長~0.67eVのスペクトルが観測されたことから、GeコアSi量子ドットにおけるPLは、Geコアの量子準位間での発光再結合であることが示唆される。また、波長領域900~1300nmにおいては、Siクラッドからの発光に起因したPL信号は認められなかった。また、真性ドットのPLスペクトルは、4成分(Comp.

1:~0.692eV, Comp. 2:~0.722eV, Comp.

3:~0.752eV, Comp. 4:~0.653eV)で分離することができるが、GeH<sub>4</sub>-CVD中にHe希釈1%PH<sub>3</sub>をパルス導入したP添加GeコアSi量子ドットでは、0.6~0.8eVのブロードなPLスペクトルが観測され、真性ドットの4成分に加え、他の成分よりも半値幅が狭い新たな成分(Comp. 5:~0.680eV)が認められた。これら

の成分は、72~300KでのPLスペクトルにおいても同様に認められるものの、いずれの成分にもエネルギー位置の温度依存性は認められなかった。これは、形成したGeコアSi量子ドットがSiおよびGeに比べ熱膨張率が小さいSiO<sub>2</sub>により内包されているためと解釈できる。各成分の積分強度の温度依存性をまとめた結果、Comp. 5は温度依存性が極めて弱く、熱消光過程における活性化エネルギーを算出した結果、Comp. 5の活性化エネルギーは~11meVであり、P添加に依らずComp. 1-4に比べて低いことが分かった。また、Comp. 1とComp. 5のエネルギー差がバルクGeにおけるPドナーのイオン化エネルギー(~12meV)と同程度であることから、Comp. 1-3はGeコアの量子準位間の発光再結合として、Comp. 5はGeコアの価電子帯の第一量子準位とPドナー準位間の発光再結合として解釈できる。また、Comp. 4のエネルギー位置はComp. 5より僅かに低エネルギーであることから、SiクラッドとGeコアの量子準位間の発光再結合であると考えられる。

#### 【GeコアSi量子ドット積層構造のEL特性】

p-Si(100)基板上に高密度GeコアSi量子ドット2層積層構造を形成した後、上部および下部Al電極を形成したLED構造において、順方向パルス電圧(1kHz, duty ratio:50%)を印加して基板裏面から室温ELを測定した結果、印加電圧3Vにおいて~0.85eV近傍に明瞭な発光ピークが認められ、印加電圧の増大に伴いEL強度が増大することが分かった(図1)。尚、印加電圧の増加による発光エネルギー位置の変化は認められなかった。これらの結果は、順方向バイアス印加によりAl上部電極からドットへの電子注入とp-Si(100)基板からGeコアへの正孔注入が同時に起こ

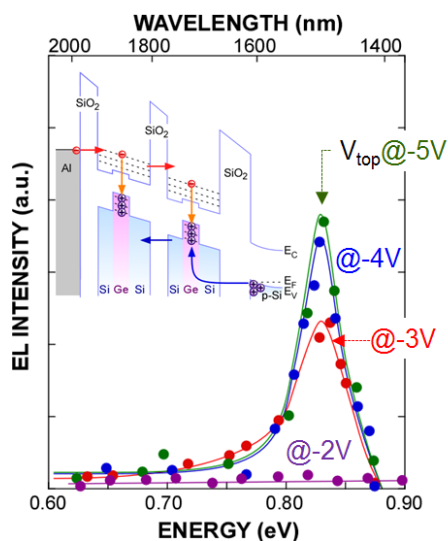


図1 GeコアSi量子ドット2層積層構造の室温ELスペクトルおよびエネルギーバンド図(挿入図)。

ることにより、Geコアの量子準位間で電子-正孔対が発光再結合したとして説明できる。また、ELスペクトルはPLに比べて高エネルギー側にシフトし狭帯化していることが分かる。これは、上部Al電極からドットに注入された電子が高次の量子準位を介して正孔と再結合した結果として解釈できる。

#### 5. 今後の計画

今後は下記2項目に力点を置いて、研究を推進することで、キャリア注入効率の増加と発光波長の狭帯化を実現し、高効率発光素子の開発を目指す。

1. 三次元規則配列したコア/シェル量子ドットの自己整合集積構造において、ドット内(コア或はシェル)に不純物(P或はB)をデルタドーブして、キャリア輸送特性および発光特性に及ぼす影響を定量的に評価する。
2. p型Si基板上に上層のドットを下層よりも大きくした自己整合集積構造を形成し、その上に上部電極としてn型アモルファスシリコン(a-Si)を形成したダイオード構造においてEL特性を評価する。

#### 6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. **[Invited]** S. Miyazaki, K. Makihara, A. Ohta, and M. Ikeda, Processing and Characterization of Si/Ge Quantum Dots, Technical Digest of Int. Electron Devices Meeting 2016, 826-830 (2016).
  2. **[Invited]** S. Miyazaki, D. Takeuchi, M. Ikeda, and K. Makihara, Formation and Characterization of Si Quantum Dots with Ge Core for Functional Devices, 2016 Int. Conf. on Solid State Devices and Materials (Tsukuba, Sep. 27-29, 2016), D-5-01.
  3. **[Plenary]** S. Miyazaki, High Density Formation of and Light Emission from Silicon Quantum Dots with Ge Core, 11th Workshop on Si-based Optoelectronic Materials and Devices (Nanjing, China, June 16-19, 2016), Plenary 1.
  4. K. Kondo, K. Makihara, M. Ikeda, and S. Miyazaki, Photoluminescence study of high density Si quantum dots with Ge core, Journal of Applied Physics 119, 033103 (5pages) (2016).
- 他、招待講演2件、論文4編、国際会議発表9件、国内学会発表8件、学生の受賞1件

ホームページ等

<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/miyazakilab/>