

# 究極的シリコン系発光デバイスの研究開発 (121803012)

Research and development of ultimate light emitting devices based on group IV materials

## 研究代表者

丸泉琢也 東京都市大学

Takuya Maruizumi Tokyo City University

## 研究分担者

徐学俊 野平博司 澤野憲太郎 白木靖寛

Xuejun Xu Hiroshi Nohira Kentarou Sawano Yasuhiro Shiraki

東京都市大学

Tokyo City University

研究期間 平成 24 年度～平成 26 年度

## 概要

シリコンフォトニクス研究で喫緊の課題となっている通信波長帯、室温高効率発光を可能とするシリコン系発光デバイスの開発を進めた。具体的には、発光源に分子線エピタキシー技術により形成したゲルマニウム (Ge) 量子ドット、高ドーピング Ge、Ge/Si<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub> 多重量子井戸等のシリコン系発光材料を、フォトニック結晶、マイクロディスク (リング) などの微小共振器と組み合わせた電流注入発光デバイスを開発し、高い Q 値と世界最高の Ge 光学利得を達成した。

## 1. まえがき

光信号伝送技術と半導体信号処理技術のかけ橋となるシリコンフォトニクス研究では、変調器、導波路、光検出器などの基本部品に関しては高性能なものが開発済であるが、通信波長帯、室温高効率発光を可能とする発光デバイスの開発が最後の課題として残されている。現状は、化合物半導体を光源とするハイブリッドシリコンフォトニクスの研究開発が進んでいるが、間接遷移型半導体であるシリコン系材料を用いた発光源が開発できれば、CMOS 電子回路作製プロセスの中で光信号伝送系を同一チップ上に実装可能となり理想的な光インターコネクションが実現できる。そこで、本研究では、Ge 量子ドット、高ドーピング Ge などのシリコン系材料を用いた究極的な発光デバイスの開発を目指し、材料、プロセス、デバイス、新材料・新デバイス構造探索の観点から研究を進めた。

## 2. 研究開発内容及び成果

本研究プロジェクトでは、間接遷移型半導体である Ge を量子ドット、歪み基板、Ge/Si<sub>x</sub>Ge<sub>1-x</sub> 多重量子井戸の形態で利用し、フォトニック結晶、マイクロディスクなどの微小共振器と組み合わせた発光デバイスの試作、改良を進め、主要な研究開発成果として、以下の 5 項目を達成した。

- 1) シリコン系発光材料の研究開発では、二段階 (低温・高温) 成長法と SOD (Spin on Dopant) 法の組み合わせにより、ピーク波長 1.695 μm で、化合物半導体に匹敵する 5300cm<sup>-1</sup> もの高ピーク利得を持ち、利得帯域も 300nm と極めて広い特性を示す歪み GeOS (Ge on Silicon) 基板の開発に成功した (図 1)。この Ge の光学利得の値は、MIT からの報告に比べ 4 倍となる世界最高の値である。
- 2) 上記 GeOS 基板を用い、より高い光閉じ込め効果が期待できる歪み GeOI (Ge on Insulator) 基板を世界に先駆けて開発し、SOD プロセスによる P 高濃度ドーピング (1×10<sup>20</sup> cm<sup>-3</sup>)、CMP 法による表面平坦化と大面積化を達成した。
- 3) Ge 量子ドットを発光源材料とする導波路結合マイクロディスク型電流注入室温発光デバイスを試作し、発光スペクトルでは高 Q 値 2800 を観測した。より精密な計測が可能となる透過率測定から、発光波長 1.537 μm での発光は、研究開発目標 Q 値に迫る Q 値 5100 を持つことが判

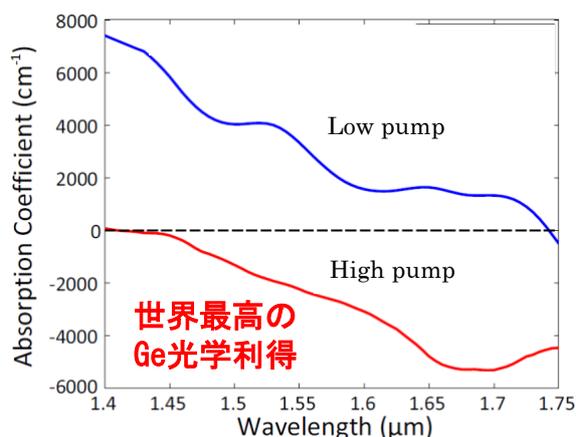


図 1 高ドーピング GeOS 基板の光学利得スペクトル : 高エネルギーポンピング時、世界最高の利得を観測

明した (図 2 にデバイス構造、図 3 に電流注入時の発光特性図を示す)。

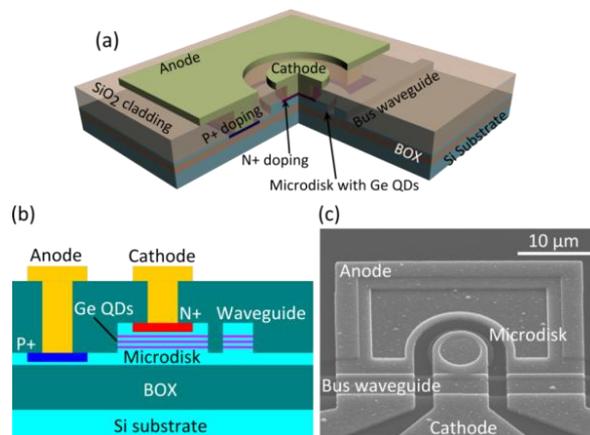


図 2 Ge 量子ドットを発光材料に用い、導波路と結合したマイクロディスク型室温発光デバイス : (a) 3次元構造モデル、(b)断面構造モデル、(c)実デバイス SEM 像

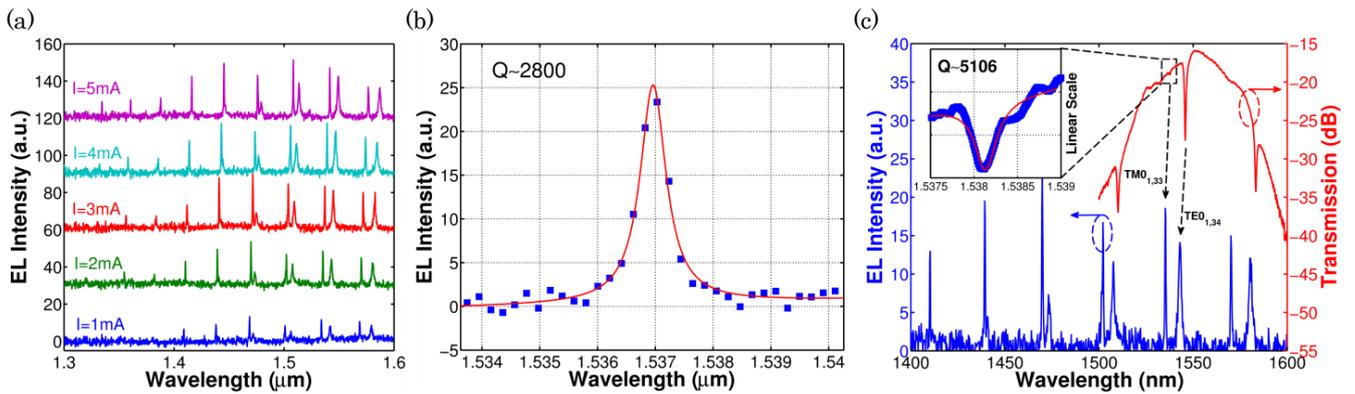


図3 導波路結マイクロディスク型デバイスの室温電流注入時の近赤外発光特性：(a) 注入電流値による発光特性の変化、(b) 1.537 $\mu$ mピークの拡大図 (I=2mA)、(c) ELスペクトルと透過率測定結果の比較

4) 高ドーピング GeOS 基板を用いたマイクロディスク型デバイスはバンドギャップを超える短波長域にファブリペロ共振ピークを持ち、レーザ発振の前段階となる光学的ブリーチングを示すことがわかった(図4)。

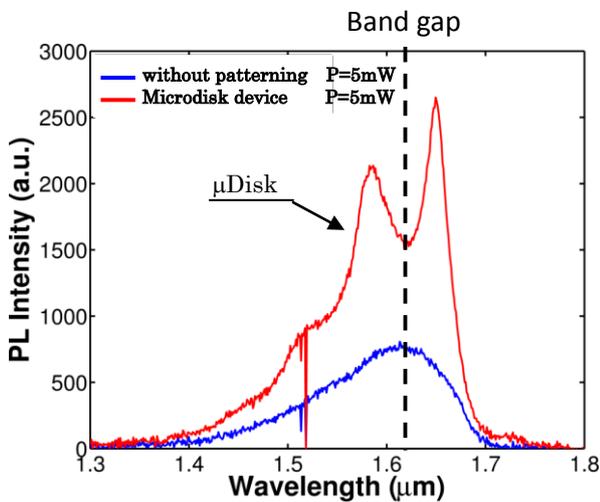


図4 GeOS 基板を用いたマイクロディスク型発光デバイス(R=2 $\mu$ m)のフォトルミネッセンス発光

5) 新規構造デバイスとして両持ち梁構造(ビーム)、クロスブリッジ構造デバイスを試作し、SiGe/Ge-QDを用いたビーム構造デバイスでは、従来比3桁以上の発光強度増大を達成した。

### 3. 今後の研究開発成果の展開及び波及効果創出への取り組み

本研究開発では、室温高効率近赤外 LED を開発できた。1.7  $\mu$ m を超えた長波長域でのレーザ発振が期待される状況にあり、当初対象分野と考えてきたシリコンフォトニクス用オンチップ光源への応用が第一に挙げられ、シリコンフォトニクス産業への波及効果は極めて高い。一方、共振器構造により発光が近赤外より中赤外領域へとシフト可能であり、簡便な物質検知センサーへの直接的な応用が可能になると考えている。また、両持ち梁構造を持つマイクロブリッジ型発光デバイスは、NEMS 構造を有していることから、Optomechanical 素子への活用が可能であり、量子情報処理素子をはじめとする新機能素子探索のモデルデバイスとして今後のデバイス研究を牽引してゆくものと考えている。

### 4. むすび

本プロジェクトの開始時、研究開発目標として「シリコ

ン系発光材料を用い、微小共振器と組み合わせることにより、高 Q 値で発光する究極的シリコン系発光デバイスを開発し、そのレーザ発振を実証する」を掲げ、研究開発をスタートした。プロジェクト2年次、3年次の継続申請では材料、デバイス対象を見直すことで、目標 Q 値に迫る Q 値 5100 を示す導波路結合型室温電流注入発光デバイスを開発し、さらに高ドーピング GeOS 基板では世界最高の光学利得を観測し、これを用いたデバイスでは、レーザ発振の前段階となる光学的ブリーチングを観測できた点、ほぼすべての項目に関して目標を達成できたと考えている。

#### 【誌上发表リスト】

- [1] X. Xu, X. Wang, K. Nishida, K. Takabayashi, K. Sawano, Y. Shiraki, H. Li, J. Liu, and T. Maruizumi, "Broadband and ultralarge transient optical gain from tensile-strained Ge on Si doped by spin-on dopant diffusion", Applied Physics Express Vol.8 No.9 pp092101(4 頁) (2015 年 8 月 18 日)
- [2] X.Xu, T. Maruizumi, Y. Shiraki, "Waveguide-integrated microdisk light-emitting diode and photodetector based on Ge quantum dots", Optics Express, Vol.22 No.4 pp3902-3910 (2014 年 2 月 24 日)
- [3] K. Nishida, X. Xu, K. Sawano, T. Maruizumi, Y. Shiraki, "Highly n-doped, tensile-strained Ge grown on Si by molecular beam epitaxy", Thin Solid Films Vol.557 pp66-69 (2014 年 3 月 30 日)

#### 【受賞リスト】

- [1] 西田圭佑(徐学俊、澤野憲太郎、白木靖寛、丸泉琢也)、応用物理学会結晶工学分科会発表奨励賞、「n 型ドーピング Ge を用いたマイクロディスク共振器の作製と光学特性の評価」、2013 年 11 月 7 日
- [2] 徐学俊、第 6 回応用物理学会シリコンテクノロジー分科会研究奨励賞、「Waveguide-integrated microdisk light-emitting diode and photodetector based on Ge quantum dots」、2015 年 3 月 13 日

#### 【報道掲載リスト】

- [1] "ゲルマニウム使い近赤外線 レーザ素子安価に作製"、日経産業新聞、2015 年 8 月 20 日
- [2] "知の明日を築く 東京都市大学シリコンナノ科学研究センター"、日本経済新聞社、2013 年 6 月 13 日
- [3] "Si 半導体に集積可能な発光素子東京都市大が開発"、日経エレクトロニクス、2012 年 5 月 28 日

#### 【本研究開発課題を掲載したホームページ】

<http://www.goto-ikuei.ac.jp/01topics/2015/2015-0824-1000-14.html>