

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：基盤研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19360138

研究課題名 (和文) Er ドープ Si 量子井戸発光デバイスの開拓

研究課題名 (英文) Development of Er-doped Si Quantum Well Light Emitting Devices

研究代表者

石川 靖彦 (ISHIKAWA YASUHIKO)

東京大学・大学院工学系研究科・講師

研究者番号：60303541

研究成果の概要：室温動作する Si 系 1.5 μm 帯発光素子実現に向け、Er をドープした Si 量子井戸を作製し、発光特性評価を行った。検討した 2 種類の方法のうち、SiO₂ 上への Er ドープ Si 成長を利用する方法により、多結晶ではあるが Er ドープ Si 量子井戸の作製に成功した。フォトルミネセンス測定の結果、Er の内殻遷移による 1.54 μm の室温発光を得ることができた。Si の量子井戸化により温度消光が低減されるという本研究提案が実証できた可能性がある。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	10,900,000	3,270,000	14,170,000
2008 年度	3,400,000	1,020,000	4,420,000
年度			
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・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

高速の光通信を Si チップ上で実現するには、Si 材料による光技術-Si フォトニクスが必須である。光ファイバ通信域(1.3-1.6 μm)で Si は光吸収がないため、コアに Si(屈折率 $n\sim 3.5$)、クラッドに SiO₂($n\sim 1.5$)や大気($n=1$)を用いた光導波路を形成できる。コアとクラッドの屈折率差が大きいため、Si コアへの光閉じ込めが強い。サブミクロンサイズの導波路や曲率数 μm の曲げが可能であり、チップ上光通信へ適用できる。実際、導波路、二分岐、合分波器などの受動素子は、Silicon-on-Insulator(SOI)構造の微細加工によりプロトタイプ化されている。光変調器、受光素子といった能動素子開発も

進められているが、光源に関しては、Si 材料による高効率発光に難があり、研究が立ち後れている。

Si は間接遷移型半導体のため、バンド間遷移による発光($\sim 1.1\mu\text{m}$)が極めて弱い。Si 発光素子に向け、様々な方法が検討されているが、中でも Er ドープ Si は、Si 導波路で利用できる 1.5 μm 帯で発光する。Si 発光素子の有力候補であるが、高効率発光が 100K 程度の低温に制限され、室温で効率が低下する温度消光が問題である。このため、LED やレーザとして実用できていない。

Er による発光は、図 1(a)のように、
(1) Er-O 複合体の欠陥準位への電子の捕獲

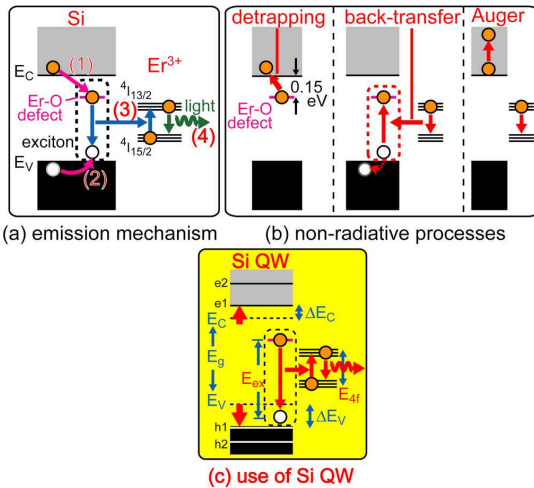


図1 (a)Si 中 Er からの発光メカニズム, (b)非発光過程, (c)量子井戸化

- (2) 励起子形成
- (3) 再結合時のエネルギー放出による Er^{3+} の 4f 内殻電子の励起
- (4) 基底準位への遷移による発光により生じる。

温度消光は次の原因による(参考: Taguchi 他, J. Appl. Phys. 83, 2800, '98 等)。

- (1) Er-O 欠陥準位に捕獲された電子の熱的放出: 図 1(b)左
- (2) 励起子状態(捕獲電子-ホール対)へ逆戻りするエネルギーバックトランスファー(後にホールは熱的に解離): 図 1(b)中央
- (3) **Si 中の自由**キャリアにエネルギーを与えるオージェ過程: 図 1(b)右

本研究では、温度消光抑制のため、極薄 Si 層における量子準位形成の利用を提案した。図 1(c)のように、量子井戸では伝導帯下端 E_C が上昇し(変化量 ΔE_C)、Er-O 欠陥準位から伝導帯が遠ざかると、捕獲電子放出を抑制できる。さらに、価電子帯上端 E_V の下降により、温度消光の支配要因とされるバックトランスファーが抑制できる。励起子の再結合エネルギー E_{ex} と 4f 電子の緩和エネルギー E_{4f} の差 $E_0 = E_{ex} - E_{4f}$ が、価電子帯下端 E_V の変化量 ΔE_V だけ増し、バックトランスファー発生に、より多くのフォノン吸収が必要となると予想される(参考: Taguchi 他, J. Appl. Phys. 79, 4330, '96)。実際、 E_0 が大きい GaAs では、室温でも高効率発光する(GaAs: $E_0 = 0.30\text{eV}$ [$E_g = 1.42\text{eV}$] に対し、Si: $E_0 = 0.13\text{eV}$ [$E_g = 1.12\text{eV}$])。以上の効果により、Er ドープ Si の室温発光の高効率化が期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、室温動作する Si/SiO₂ 系 1.5 μm

帯発光素子実現に向け、

- (1) Er をドープした Si 量子井戸を作製
 - (2) フォトルミネセンス測定により、Er ドープ Si 量子井戸の発光特性を評価
- の 2 点について検討した。Er ドープ Si は室温で発光効率が低いことが問題であるが、量子効果によるバンドエンジニアリングを利用した「室温高効率発光の実現」が期間内の目的である。

3. 研究の方法

(1) 理論予測

Si 量子井戸構造の採用により、発光強度が温度に対してどのように変化するかを理論的に検討した。

(2) 試料作製と評価

SOI ウエハを熱酸化により薄層化することで量子井戸の作製が可能である。これまでに、2~3nm の厚さの Si 量子井戸構造を実現している。Si 量子井戸へ Er をドープするため、SOI ウエハ上への Er ドープ単結晶 Si 成長とウエハ貼り合わせプロセス(図 2) SiO₂ 上への Er ドープ多結晶 Si 成長(図 3) の 2 種類の方法を利用した。

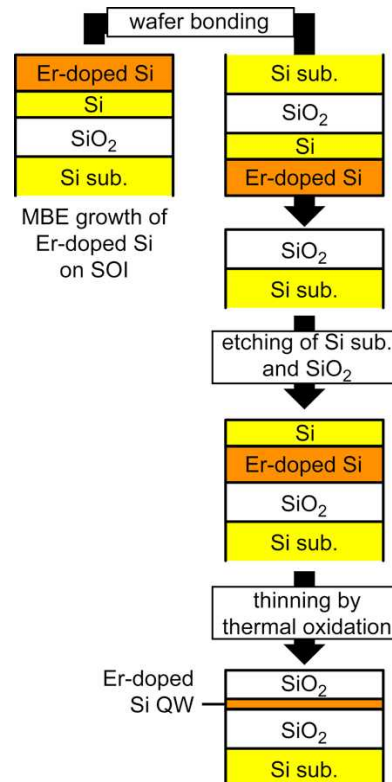


図2 Er ドープ Si 量子井戸の作製方法 1: SOI 上への Er ドープ Si 成長と貼り合わせ

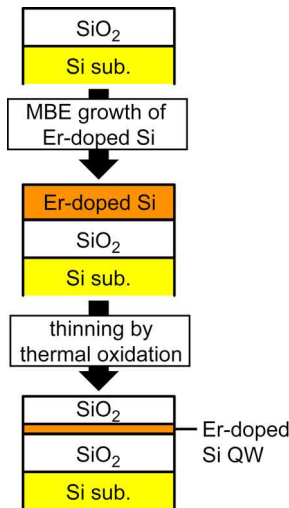


図3 Er ドープ Si 量子井戸の作製方法 2: SiO₂ 上への Er ドープ多結晶 Si 成長

の方法では、まず、SOI ウエハ上に単結晶の Er ドープ Si を分子線エピタキシ(MBE)法により成長する。成長層を SiO₂ 層が形成された Si ウエハに貼り合わせる。貼り合わせ後、元の SOI ウエハの Si 基板と SiO₂ 層を除去する。熱酸化により元の SOI ウエハの上部 Si 層を除去し、さらに MBE 成長した Er ドープ Si 層を熱酸化により薄層化する。これにより、単結晶の Er ドープ Si 量子井戸が得られる。Er が熱拡散されにくいいため、Er のドープされた単結晶 Si 量子井戸を作製するには、上記のような貼り合わせプロセスが必須である。

一方、の方法では、SiO₂ が形成された Si 基板上へ Er ドープ非晶質 Si 層を MBE 成長する。熱処理により多結晶化し、さらに熱酸化により膜厚を減少させることにより、Er ドープ Si 量子井戸が得られる。量子井戸は多結晶であり、非発光再結合中心となる欠陥が多結晶に比べて多いと予想されるが、に比べて作製が格段に容易というメリットがある。

試料は室温にてフォトルミネセンス(PL)により評価した。励起には 532nm のグリーンレーザ(38mW, スポットサイズ~1 μ m)を用いた。

4. 研究成果

(1) 理論予測の結果

図4に Er ドープ Si 量子井戸の発光強度の温度依存性の計算結果を示す。量子井戸の幅(膜厚)をパラメータとした。Er をバルク Si にドープした場合、室温での発光強度は極低温の 1/1000 に低下する。一方、量子井戸では、井戸幅が 10nm 以下で温度消光が抑制される。井戸幅を 2nm まで減少させると、発光強度の減少は 1/10 まで抑制できる。バルク Si の場合に比べて数 100 倍の発光効率が期待できる。

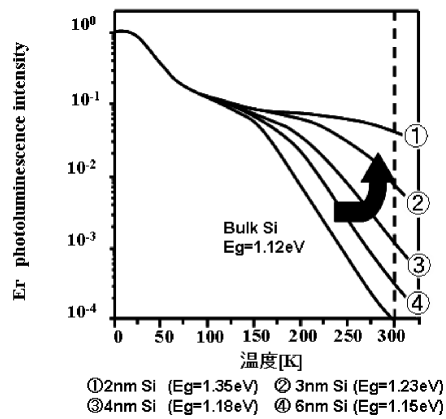


図4 PL 強度の温度変化の計算結果

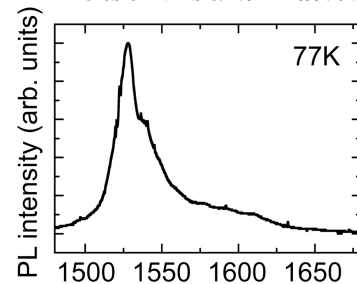


図5 Er ドープ単結晶 Si 層の 77K での PL スペクトル

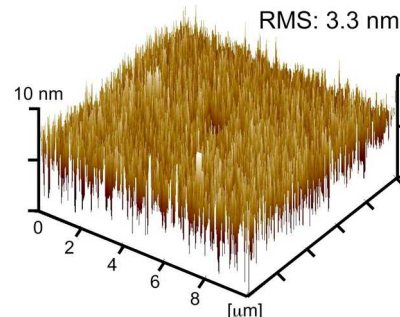


図6 Er ドープ単結晶 Si 層の AFM 像

(2) 試料作製結果と PL スペクトル

Er ドープ Si エピタキシャル成長とウエハ貼り合わせプロセス

バルク Si ウエハ上に成長した Er ドープ Si エピタキシャル層(Er: $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, O: $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$)の 77K における PL スペクトルの例を図5に示す。波長 1.53 μ m に Er の内殻遷移による発光がみられる。なお、室温ではこの発光は消失する。

図2の方法により量子井戸の作製を試みたが、ウエハの貼り合わせを実現できなかった。図6の原子間力顕微鏡(AFM)像に示すように、表面粗れが 3nm 以上と大きいことが起因している。表面粗れは Er が Si の表面拡散を阻害するために生じる。最表面に Er をドープしない Si キャップ層を 5nm 形成し、表面粗れを 1.2nm まで減少させることで、貼り合わせが可能となったが、1mm 以下の狭い領域に限ら

れたため、発光評価に至らなかった。表面粗れの低減が重要である。

SiO₂ 上への Er ドープ多結晶 Si 成長

図 3 の方法により、Er ドープ多結晶 Si 量子井戸を作製した。室温における PL 測定の結果、2.5nm 厚さの Si 量子井戸において、Er の内殻遷移による 1.54 ミクロンの室温発光を得ることができた。このような発光は、20nm の Er ドープ単結晶 Si 層では見られない。

図 8 に、多結晶 Si 量子井戸の厚さが 2.5nm と 10.5nm と異なる試料について比較した結果を示す。量子井戸幅が 2.5nm の試料がより強い発光を示した。Si の量子井戸化により温度消光が低減されるという本研究提案が実証できた可能性がある。しかし、井戸層の上の SiO₂ 中に存在する Er が発光を示した可能性もあり、検討が必要である。

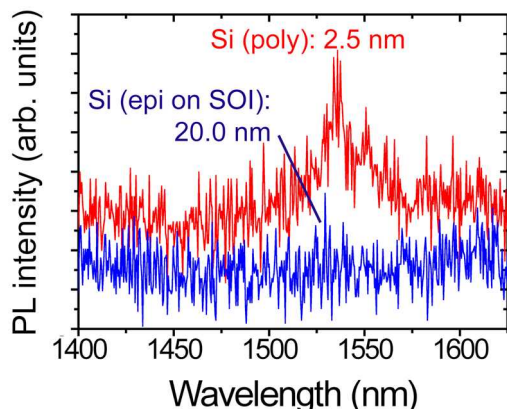


図 7 2.5nm の多結晶 Si 量子井戸(赤)と 20nm の Er ドープ Si 層(青)の PL スペクトル

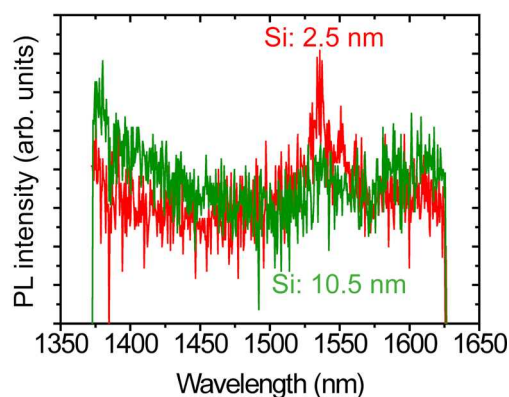


図 8 2.5nm の多結晶 Si 量子井戸(赤)と 20nm の Er ドープ Si 層(青)の PL スペクトル

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

大崎龍介、石川靖彦、山下善文、上浦洋一、和田一実:「熱酸化を用いた Si 量子井戸とエルビウム添加」、電子情報通信学会技術研究報告 OPE2008-138, pp. 11-16 (2008). 査読無

[学会発表](計 4 件)

大崎龍介、石川靖彦、山下善文、上浦洋一、和田一実:「熱酸化を用いた Si 量子井戸とエルビウム添加」、電子情報通信学会光エレクトロニクス研究会、東京、2008 年 12 月 19 日。

石川靖彦、和田一実:「Si 上 Ge 受光素子」、財団法人光産業技術振興協会「シリコンフォトニクス技術フォーラム」、東京、2008 年 3 月 10 日。

石川靖彦、和田一実:「シリコンフォトニクスとゲルマニウム受光デバイス」、平成 19 年度第二回フォトニックデバイス・応用技術研究会、東京、2007 年 7 月 26 日。

石川靖彦、和田一実:「シリコンフォトニクスと高速光デバイス」、電子情報通信学会超高速光エレクトロニクス時限研究会平成 19 年度第二回超高速光エレクトロニクス研究会「超高速光デバイスおよび材料の今後の展開 - 超 100Gbit/s 時代の到来に向けて -」、東京、2007 年 7 月 20 日。

[その他]

ホームページ:

<http://www.microphotonics.material.t.u-tokyo.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

石川 靖彦 (ISHIKAWA YASUHIKO)
東京大学・大学院工学系研究科・講師
研究者番号: 60303541

(2)研究分担者

(3)連携研究者

和田 一実 (WADA KAZUMI)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号: 30376511

上浦 洋一 (KAMIURA YOICHI)
岡山大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号: 30033244