

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21360163
 研究課題名（和文）シリコン上ゲルマニウムエピタキシャル層を用いた 1.5 μm 帯発光素子の開拓
 研究課題名（英文）Development of light emitting devices in 1.5 μm range using germanium epitaxial layers on silicon
 研究代表者
 石川 靖彦（ISHIKAWA YASUHIKO）
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授
 研究者番号：60303541

研究成果の概要（和文）：

Si 基板の上にエピタキシャル成長した Ge 層を用い、電流注入型 1.5 μm 帯発光素子を実現することを目的として、研究を実施した。Si 上 Ge-pin ダイオードにおいて、直接遷移による 1.5 μm 帯電流注入発光を観測した。発光の高効率化には、Ge の伝導帯 Γ 点へ電子を注入し、価電子帯 Γ 点の正孔と再結合させることが効果的である。Γ 点に伝導帯下端をもつ GaAs を電子注入に用いる n-GaAs / i-Ge / p-Si ダイオードの作製を進めた。

研究成果の概要（英文）：

Using Ge epitaxial layers on Si substrate, light-emitting devices were studied in the 1.55 μm range by a current injection. Light emission was observed in the 1.55 μm range due to the direct transition induced by a current injection into Ge pin diodes on Si. In order to increase the efficiency of light emission, it should be important to realize an injection of electrons into the conduction band at the Γ valley of Ge, followed by the recombination with holes in the valence band. A structure of n-GaAs / i-Ge / p-Si was investigated, where GaAs with the conduction band minimum at the Γ valley can be used for the electron injection.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	8,900,000	2,670,000	11,570,000
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電子デバイス・電子機器

キーワード：シリコンフォトンクス、ゲルマニウム、発光

1. 研究開始当初の背景

Ge はブリルアンゾーンの L 点に伝導帯下端をもつ間接遷移型半導体であるが、光通信波長の 1.55 μm に相当する 0.80 eV の直接遷移(Γ 点)バンドギャップをもつ。Si と同じ IV 族半導体であり、Si 上への Ge 層(格子定数差

～4%)の結晶成長技術進展により、Ge 中の直接遷移の光吸収を利用した Si 上 1.5 μm 帯発光素子として一部市販化が始まっている。一方、Si 上発光素子の実現は、Si フォトニクスにおける最重要課題である。Ge は、光励起により 1.5 μm 帯の直接遷移発光を示すが、通常

のpn接合を用いてキャリア注入を行った場合、電子がL点に存在するため、直接遷移発光の効率は低いことが予想される。電流注入型発光素子の実現には、伝導帯 Γ 点へ電子を注入し、価電子帯 Γ 点の正孔と再結合させることが効果的と考えられる

2. 研究の目的

本研究では、「Si基板上に成長したGeエピタキシャル層を用いた電流注入型1.5 μm 帯発光素子」の実現を目的とした。具体的には、以下の項目を検討した。

(1) Si上Ge-pinダイオードの作製と電流注入発光の評価

Si基板上に成長したGeエピタキシャル層を用い、Si上Ge-pinダイオードを作製する。電流-電圧(I-V)特性を評価するとともに、順方向電圧の印加により、電子および正孔をGeに注入し、1.5 μm 帯の直接遷移発光を評価する。

(2) Geの伝導帯 Γ 点への効率的な電子注入を実現する構造の検討

Ge中での直接遷移による1.5 μm 帯発光の高効率化には、Geの伝導帯 Γ 点へ電子を注入し、価電子帯 Γ 点の正孔と再結合させることが効果的であると予想される。 Γ 点に伝導帯下端をもつGaAsを電子注入に用いるn-GaAs / i-Ge / p-Si構造を作製することとした。

なお、当初は、電子を加速・高エネルギー化することで Γ -likeな電子を生成するn-i-n-Si_xGe_{1-x} / i-Ge / p-Si構造も検討し、有望な構造を選択する予定であった。研究初年度にSi上へ組成 $x = 35\%$ のSi_xGe_{1-x}層を形成することに成功したが、n-i-n-Si_xGe_{1-x} / i-Ge / p-Si構造はドーピング制御に時間を要すると判断し、2年目以降はn-GaAs / i-Ge / p-Si構造に絞って、研究を実施することとした。

(3) 微小光共振器を用いた発光増強

Γ 点へ電子注入を行っても、L点へエネルギー緩和する電子が存在すると、発光強度は減少する。電子注入制御以外の方法で、発光を増強する機構を導入することも重要である。従来までに、Si上Ge光共振器(リング)を作製し、1.5 μm 帯のフォトルミネセンス強度が増加することを確認している。ここでは、電流注入構造への応用が容易なディスク状の微小光共振器における発光増強を調べる。

3. 研究の方法

次の実験方法により研究を実施した。

(1) Si上Ge-pinダイオードの作製と電流注入発光の評価

① Si上Ge-pinダイオードの作製

所有している超高真空化学気相堆積(UHV-CVD)装置を用いて、 p^+ -Si(001)基板上に600 nmのアンドープGeエピタキシャル層を二段階成長(370 / 600 $^{\circ}\text{C}$)法により形成した。ソースガスには、Ar希釈のGeH₄ガスを使用した。引き続き、Si₂H₆ガスをソースガスとして、200 nmのSiキャップ層を600 $^{\circ}\text{C}$ で形成した。スッパタリング法により最表面に300 nmのSiO₂保護膜を形成した後、フォトリソグラフィと隣(P)の選択イオン注入により、Siキャップ層全体とGe層の上部100 nm程度をn型化した。最後に、Al電極を形成し、Si上Ge-pinダイオードを作製した。なお、従来に比べて、Siキャップ層へのPのイオン注入量を増加させることで接触抵抗を低下させ、順方向電圧印加下でダイオードへ注入できる電流の増大を計った。

② 電流注入発光の評価

上記のようにして作製したSi上Ge-pinダイオードのI-V特性を評価した。さらに、順方向電圧の印加により電子および正孔をGeに注入し、1.5 μm 帯の直接遷移発光を評価した。電流注入発光スペクトルの測定装置は、新たにセットアップした。

(2) Geの伝導帯 Γ 点への効率的な電子注入を実現する構造の検討

n-GaAs / i-Ge / p-Si構造の作製を行った。まず、UHV-CVD法によりGe/Si構造を成長した。次に、この構造上に固体ソースを利用した分子線エピタキシ(MBE)法によりGaAsを成長した。最終構造では、SiドーパのGaAs層を成長し、n-GaAs層とするが、最初にアンドープ構造で鏡面が得られることを確認後、n型化を実施することとした。

(3) 微小光共振器を用いた発光増強

Si上Ge微小ディスク構造の作製し、発光特性の評価を行った。作製手順は以下のとおりである。UHV-CVD法により、市販の(001)面をもつSOI(silicon-on-insulator)基板上に約130 nmのGe層、および約100 nmのSiキャップ層を形成した。電子ビーム露光とドライエッチングを用い、半径5 μm のディスク構造を作製した。1.5 μm 帯のフォトルミネセンススペクト

ルを測定し、パターン化しない場合との発光強度の違いを評価した。

4. 研究成果

以下に主な研究成果を述べる。

(1) Si上Ge-pinダイオードの作製と電流注入発光の評価

① Si上Ge-pinダイオードのI-V特性

図1に作製したSi上Ge-pinダイオードの典型的なI-V特性を示す。Siキャップ層へのPのイオン注入量を増加させた結果、順方向電圧(負電圧)印加下で、従来に比べて約3桁大きい10 mA以上の電流を流すことが可能となった。次に示すように、10 mAオーダー以上の電流を必要とする発光特性評価にとって、非常に有効であった。

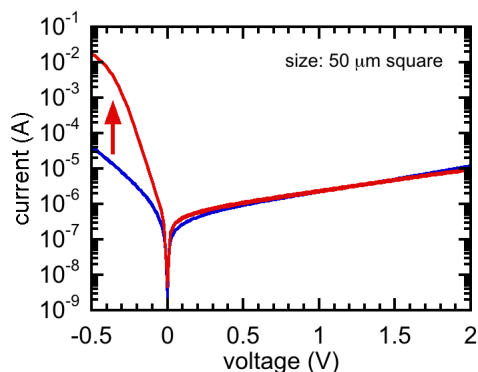


図1 作製したSi上Ge-pinダイオードの典型的なI-V特性(室温).

② 電流注入発光の評価

順方向電圧の印加により電子および正孔をGeに注入し、1.5 μm帯の直接遷移発光を評価した。図2に示したような直径20 μmの円形のダイオードを用いた。上部Al電極の中央には、直径10 μmのAl電極のない領域が形成しており、この部分から放出される光のスペクトルを測定した。

測定結果を図3に示す。注入電流が20 mA以下では、発光はほとんどみられなかったが、40 mAの電流を注入することにより、約1.57 μmにピークをもつ発光が観察できるようになった。さらに注入電流を増加すると、発光強度が増大していった。注入電流の増加により、伝導帯下端のL点だけでなく、Γ点へも電子が注入できるようになった結果、

Ge中で直接遷移による発光が生じるようになったと解釈される。しかしながら、観測された光強度は、直接遷移型半導体からの発光に比べて数桁小さいと見積もられ、効率を向上する機構を導入することが不可欠である。

なお、注入電流の増加に伴い、約1.8 μmにピークをもつ弱い発光もみられるようになった。間接遷移によるものと考えられるが、価電子帯のホールの増加により、間接遷移のレートも増大したためと考えられる。

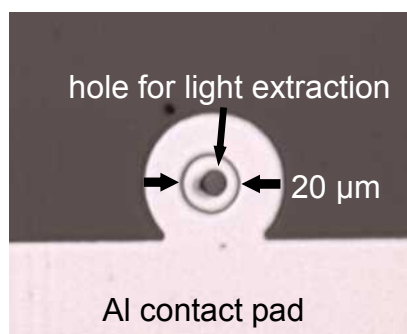


図2 電流注入発光測定に用いたSi上Ge pinダイオードの光学顕微鏡像.

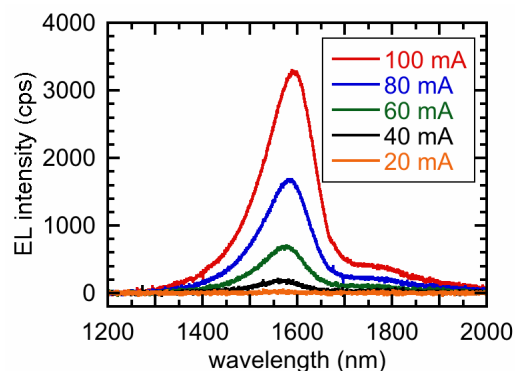


図3 典型的な電流注入発光スペクトル(室温).

(2) Geの伝導帯Γ点への効率的な電子注入を実現する構造の検討

伝導帯下端がΓ点にあるGaAsを電子注入に用い、発光の高効率化を目指す観点から、n-GaAs/i-Ge/p-Si構造の形成を試みた。UHV-CVD法によりGe/Si構造を成長後、MBE法によりGaAsを成長した。その結果、鏡面の成長層が得られた。原子間力顕微鏡観察により、表面粗さは2nm程度まで低減できていることがわかった。

さらに、フォトルミネセンス測定を行った。

波長 1 μm を超える長波長域に発光が見られたことから、バンドギャップ内の欠陥準位の存在が示唆されたが、GaAs のバンド間遷移による波長 870 nm の発光も明瞭に観測できた。

ダイオードへの応用が可能な GaAs 層が得られたものと判断し、Si ドープ GaAs の成長を行った。なお、Si 濃度は $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ として成長した。これ以上に Si 濃度を増加しても、電子濃度が $3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 程度で飽和することが知られているためである。Si ドープを行った場合にも、ほぼ鏡面の成長層が得られた。n-GaAs / i-Ge / p-Si 構造をダイオードへ加工するため、フォトリソグラフィ、エッチング、電極形成などのプロセス設計を行うとともに、フォトリソグラフィ用のマスクを製作した。ダイオードが完成し次第、Ge の伝導帯 Γ 点へ電子を注入する効果を明らかにできるものと考えている。

(3) 微小光共振器を用いた発光増強

半径 5 μm の Si 上 Ge ディスク構造を製作した。1.5 μm 帯のフォトルミネセンススペクトルを測定した結果を図4に示す。加工していない層構造に比べて、ディスク構造では約7倍の発光強度を示した。また、図中の矢印で示したような鋭いピークが重畳していることがわかる。これらの鋭いピークは、ディスクが光共振器として機能していることを示唆している。すなわち、ディスク光共振器を用いることで、発光を増強することが可能であることを示している。

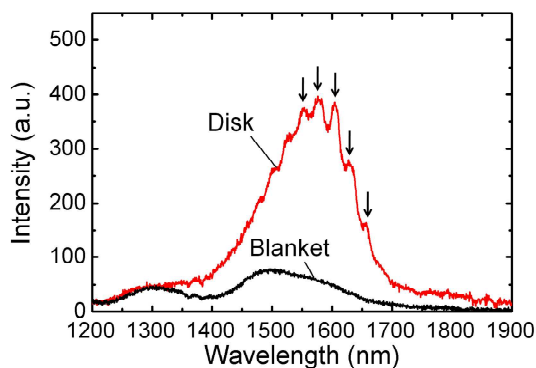


図4 SOI 上 Ge ディスク構造(赤)および加工していない SOI 上 Ge 層構造(黒)のフォトルミネセンススペクトル。

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3件)

- ① 石川靖彦:「シリコン・ゲルマニウムフォトニクス」, *Optronics* 350, pp. 110 - 116 (2011). [査読無]
- ② Yasuhiko Ishikawa and Kazumi Wada: “Near-Infrared Ge Photodiodes for Si Photonics: Operation Frequency and An Approach for the Future”, *IEEE Photonics Journal* 2 (3), pp. 306 - 320 (2010). [査読有]
DOI: 10.1109/JPHOT.2010.2046026
- ③ Yasuhiko Ishikawa and Kazumi Wada: “Germanium for silicon photonics”, *Thin Solid Films* 518 (6), Suppl. 1, pp. S83 - S87 (2010). [査読有]
DOI: 10.1016/j.tsf.2009.10.062

[学会発表] (計4件)

- ① 石川靖彦:「Ge を利用したシリコンフォトニクス用発光デバイス」、電子情報通信学会シリコン・フォトニクス時限研究専門委員会第16回シリコンフォトニクス研究会、調布、平成23年11月。
- ② Yasuhiko Ishikawa, Jiro Osaka and Kazumi Wada: “Light emission and detection using strained Ge layers on Si”, Symposium I: Transport and photonics in Si-based nanodevices, E-MRS 2011 Spring Meeting, Nice, May, 2011.
- ③ Ryota Suzuki, Kohei Yoshimoto, Laurent Décosterd, Yasuhiko Ishikawa, and Kazumi Wada: “Strained Ge-on-Si beam for tunable mid-infrared light source”, Symposium J: Si-based Nanophotonics, E-MRS 2010 Spring Meeting, Strasbourg, June, 2010.
- ④ Yasuhiko Ishikawa, Jiro Osaka and Kazumi Wada: “Ge Photodetectors in Silicon Photonics”, IEEE LEOS 2009 Annual Meeting, Belek-Antalya, Turkey, October, 2009.

[その他]

ホームページ等

<http://www.emat.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・准教授

研究者番号：60303541

(2)研究分担者

志村 考功 (SHIMURA TAKAYOSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：90252600

(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

近藤 高志 (KONDO TAKASHI)
東京大学・大学院工学系研究科・教授
研究者番号：60205557