

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 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：2012～2014

課題番号：24360133

研究課題名(和文) 格子ひずみ制御によるシリコン上ゲルマニウム受発光デバイスの長波長動作

研究課題名(英文) Longer-wavelength operation of germanium-on-silicon light-emission and photodetection devices using lattice strain control

研究代表者

石川 靖彦 (Ishikawa, Yasuhiko)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60303541

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、波長が1.7 - 2.5ミクロンの近赤外光の長波長(LNIR)域で動作するSi上Ge受発光素子の実現に向け、Ge片持ち梁構造の弾性変形を用いた引っ張りひずみ導入および顕微フオトルミネセンス(PL)測定による直接遷移禁制帯幅の評価を行った。Ge単層から構成される片持ち梁構造を外力により弾性変形させることで、約2%の一軸性ひずみを誘起でき、PL発光ピークが1.57ミクロンから約1.85ミクロンに長波長化した。直接遷移禁制帯幅が減少したことを示している。Geへの引っ張りひずみの導入により、LNIR域で動作する光デバイスへ展開できることを示している。

研究成果の概要(英文)：In order to realize Ge-on-Si active photonic devices operating in the long-near-infrared (LNIR) wavelength range of 1.7 - 2.5 micron, cantilever structures of Ge were fabricated, and direct-bandgap energy was evaluated using micro-photoluminescence (PL) spectroscopy. A uniaxial strain as large as 2% was induced by applying a force to a cantilever structure composed of single layer of Ge, i.e., by elastically bending the structure. This led to a red shift in the PL peak position from 1.57 micron to ~1.85 micron, indicating the decrease of direct bandgap energy of Ge. The results suggest that photonic devices of strained Ge are expected, which operate in the LNIR range.

研究分野：半導体デバイス

キーワード：半導体物性 光物性 MBE、エピタキシャル 光源技術 電子・電気材料

1. 研究開始当初の背景

Si フォトニクスは、Si CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) プロセスをベースとして光デバイスを作製する技術である。Si は波長 1.1 μm 以上の近赤外域で透明であり、サブミクロン幅の Si 細線やリブ構造へ加工することで光通信波長帯 (1.3 - 1.6 μm) の単一モード光導波路として利用できる。近距離光通信向けの光送受信チップをはじめ、LSI 中に光配線を導入した超高速情報処理チップ、光学的な分子センサチップなどへの応用が期待される。しかし、Si は間接遷移型のため、Si 系材料による受発光素子の実現および集積化が重要課題である。

Ge は Brillouin 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 (図 1)、光通信波長の 1.55 μm に対応する 0.8 eV の直接遷移 (Γ 点) 禁制帯幅をもつ。研究代表者らが実証してきたように、Si 上に成長した低転位 Ge 層を用いて、光通信帯の受光器が実現できる。Si と同じ IV 族半導体であり、CMOS プロセスとの親和性も高い。

1.55 μm 帯で直接遷移発光を示すため光源応用の期待も高いが、間接遷移が支配的であり、発光の高効率化は容易でない。高効率発光の手法として引っ張り格子ひずみを導入することが考えられる。1%を超える二軸性引っ張り格子ひずみを導入すると、Ge が間接遷移型から直接遷移型に変わることが理論的に予想される (図 2)。直接遷移禁制帯幅は約 0.6 eV ($> 2 \mu\text{m}$ に相当) に減少し、波長 1.7 - 2.5 μm の近赤外長波長域 (long near-infrared: LNIR) における高効率受発光素子への応用が期待できる。光通信波長域を外れるが、分子振動 (倍音) の励起による光吸収が発生する波長域になり、環境センサや人の呼気分析などの医療用センサへ展開できる。

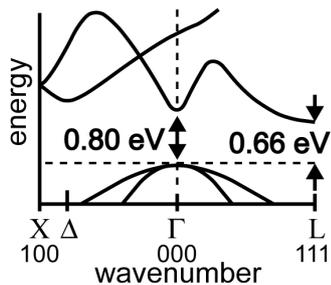


図 1 Ge のバンド構造 (分散関係)

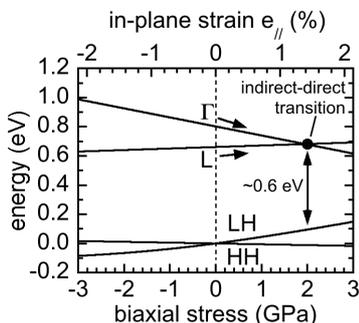


図 2 (001)面内での二軸性応力印加による Ge のバンド端エネルギーの変化

2. 研究の目的

本研究では、LNIR 域で動作する Si 上 Ge 受発光素子の実現に向け、以下の項目を検討した。

(1) Ge 片持ち梁構造の弾性変形を用いた引っ張りひずみ導入

1%以上の大きな引っ張りひずみを Si 上 Ge 層へ導入する方法として、片持ち梁構造の弾性変形 (図 1) を用いた。先端に力を加え弾性変形させ、根元周辺の上面に引っ張り応力・引っ張りひずみを導入する。構造の最適化を進め、Ge に導入されるひずみの最大化を行った。

(2) Si 上ひずみ Ge の発光特性の評価

ひずみが導入された Ge 層の発光スペクトルを評価し、LNIR 域の受発光素子としての可能性を検討した。

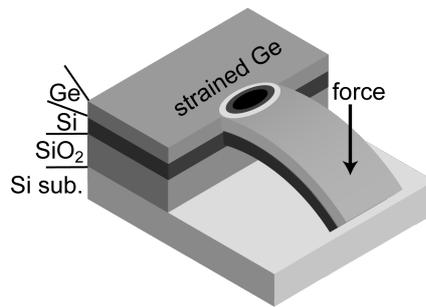


図 3 片持ち梁構造を用いたひずみ導入の模式図

3. 研究の方法

(1) 計算機シミュレーションによる理論予測

片持ち梁構造の弾性変形で誘起されるひずみは、ほぼ一軸性となることが予想される。図 2 のバンド端エネルギーの変化は二軸性応力を印加した場合であるため、一軸性応力の場合に同様なバンド端エネルギーの変化 (直接遷移化) が起こるかを変形ポテンシャル法により計算した。

また、有限要素法を用いて、片持ち梁構造に誘起される応力・ひずみの大きさおよび分布を計算した。

(2) Ge 片持ち梁構造の作製

図 4 に作製プロセスを示す。初期ウエハとして、光デバイスの集積化に適した SOI (Si-on-insulator) を用いた。上部 Si(001)層の膜厚は 250 nm、埋め込み SiO₂ の膜厚は 3000 nm である。まず、現有の超高真空化学気相堆積装置を用いて SOI ウエハ上へ Ge 層および保護膜となる薄い Si キャップ層をそれぞれ 250 nm、10 nm 成長した (図 4(a))。原料ガスには GeH₄ と Si₂H₆ を用いた。Ge (格子定数差: ~4%) の膜厚が臨界膜厚 (~1 nm) を超えるため、Ge は格子緩和し、転位が発生する。平坦で低転位密度の Ge を形成するため、二段階成長法 (370°C/600°C) を用いた。平坦な Ge 層 (rms 粗さ < 1 nm) が得られた。貫通転位密度は約 10⁹ cm⁻² であった。本研究では実施しなかったが、成長後の高温熱処理 (>

750)を行うことで転位密度を低減でき、キャリアの熱的発生や欠陥を介した再結合が抑制できる。実際の受発光素子応用では、高温熱処理の利用が効果的と予想される。

次に、フォトリソグラフィとエッチングにより、Si キャップ/Ge/Si の層構造を梁構造にパターン加工した(図 4(b))。オリエンテーションフラット([110]方向)から 45 度傾いた[100]方向に沿った梁構造とした。この方向が、最も効果的に禁制帯幅が変化することがわかったためである。梁構造の典型的な幅は 6 μm 、長さは 20 μm である。

最後に、HF 溶液により SiO₂ を等方性エッチングした。露出した SiO₂ と片持ち梁の下部の SiO₂ が除去され、Ge/Si の片持ち梁構造が得られる(図 4(c))。

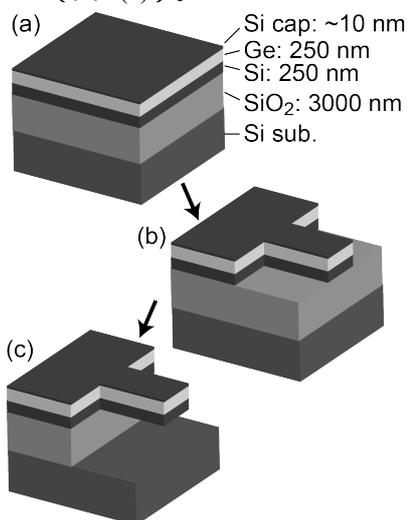


図 4 Ge 片持ち梁構造の作製プロセス

上記のような Ge/Si の二層構造(薄い Si キャップ層まで含めると三層構造)で構成される片持ち梁に加えて、Ge 単層で構成される片持ち梁構造も作製した。Ge/Si 二層構造では、曲げ応力印加時に容易に破断する問題が明らかとなったためである。Ge と Si で弾性定数(ポアソン比)が異なることに原因があると考え、Ge 単層からなる梁構造を作製した。まず、SOI ウエハ上へ Ge を結晶成長した。Ge の膜厚は 500 nm とした。その後、図 4(b) および図 4(c) と同様なプロセスにより、Ge/Si 二層構造を作製した。最後に、TMAH 溶液を用い、Si キャップ層および Ge 層下側の SOI 層を選択エッチングし、Ge 単層の梁構造を作製した。

(3) 顕微フォトルミネセンスによる発光スペクトル評価

図 5(a)に示したように、マイクロプローバを用いて機械的に梁構造を下方に曲げることで Ge 層に引っ張りひずみを導入した。さらに、図 5(b)のように、プローバを梁構造の根元側へ押し込む方法により、誘起されるひずみの増大を図った。梁構造の根元部分(ひずみ導入部)に励起レーザー光(波長 457 nm、直径 $\sim 2 \mu\text{m}$)を局所照射し、室温で顕微フォ

トルミネセンス(PL)測定を行った。PL 発光ピークから直接遷移禁制帯幅を評価した。従来までに、結晶成長により誘起される約 0.1 - 0.2%の引っ張り格子ひずみ(Si と Ge の熱膨張係数差に起因)によって、直接遷移禁制帯幅が 0.80 eV(波長 1.55 μm)から 0.77 - 0.79 eV(1.57 - 1.61 μm)に減少することを明らかにしている。本実験ではさらに直接遷移禁制帯幅が減少することが予想される。

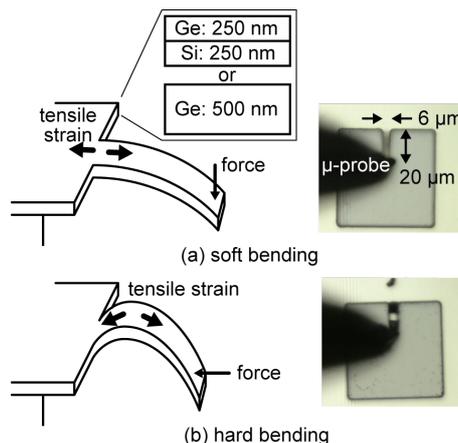


図 5 マイクロプローバを用いたひずみ導入

4. 研究成果

(1) 一軸性応力下での Ge のバンド端エネルギーの理論変化

一軸性応力下での Ge のバンド端エネルギーの変化を変形ポテンシャル法により計算した。図 6 に結果を示す。図 2 の二軸性の場合と同様な直接遷移化が起こる。直接遷移化に必要な引っ張りひずみ(応力印加方向)は、二軸性の場合の約 2 倍で 4%弱である。

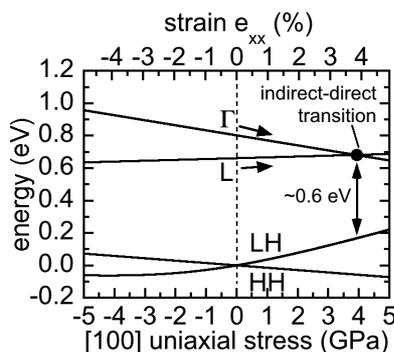


図 6 [100]方向への一軸性応力印加による Ge のバンド端エネルギーの理論変化

(2) 一軸性応力下での Ge 片持ち梁構造のひずみ分布の計算結果

有限要素法により、Ge/Si 二層構造および Ge 単層構造からなる片持ち梁のひずみ分布を計算した。図 7(a)は幅 6 μm 、長さ 20 μm の Ge 単層構造(Ge : 500 nm)の片持ち梁のひずみ分布を計算した結果である。なお、Ge/Si 二層構造(Ge 250 nm/Si 250 nm)でも同様な結果が得られる。

片持ち梁の先端に力を作用させ、3 μm 押し下げると、梁の根元部分の Ge 表面に 0.5% 程度の引っ張りひずみが導入される。さらに、図 7(b)のように梁構造を根元方向に押し込むことで、1%を超えるひずみを導入できる(図 7(b)の場合は約 2%)。直接遷移化には約 4%の引っ張りひずみが必要であるため、さらなるひずみ導入が必要であるが、根元付近で部分的に梁の幅を狭くするなどの工夫により達成できると考えられる。

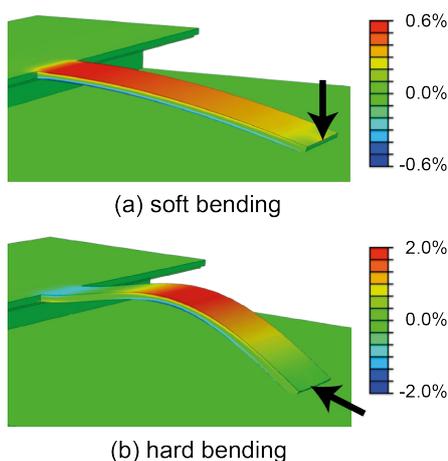


図7 Ge単層構造からなる片持ち梁に対するひずみ分布(長さ方向のひずみ)の計算結果

(3) 顕微 PL による発光スペクトル評価

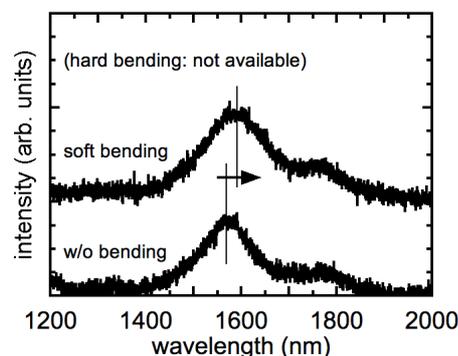
図 8(a)および図 8(b)は、Ge/Si 二層構造および Ge 単層構造に対して PL 発光スペクトルを評価した結果である。応力印加前は、いずれの片持ち梁構造も 1.57 μm 付近に直接遷移による発光ピークが観測された。

次に、マイクロプローバの押し下げによって一軸性ひずみを誘起した状態 (soft bending) で PL 測定を行った。発光ピークは約 1.61 μm となり、40 nm ほど長波長側へシフトした。約 0.5%の一軸性ひずみが誘起されたことと良く対応する。

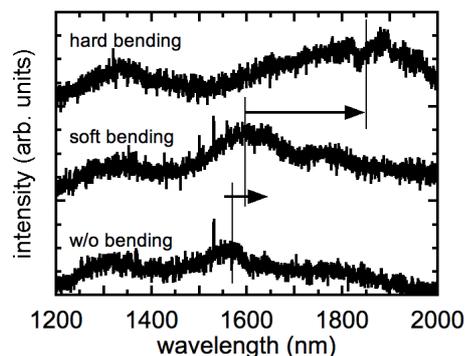
しかしながら、Ge/Si の二層構造からなる片持ち梁構造では、上記の押し下げによって構造が容易に破断してしまい、これ以上のひずみ導入は不可能であった。一方で、Ge 単層の片持ち梁構造では、マイクロプローバの押し込み (hard bending) 時にも破断が生じず、約 2%の一軸性ひずみを誘起できた。図 8(b)に示したように、PL 発光ピークが 1.85 μm 程度まで大きく長波長化した。

以上より、本手法によって Ge へ 1%以上の引っ張りひずみの導入が可能であること、および LNIR 域で動作する光デバイスへ展開できることが明らかとなった。一方で発光強度の増大は得ることができなかった。適切な表面不活性化を施し、表面再結合を低減する必要があることを示唆している。また、梁構造のような中空構造では、励起光の照射によって Ge が昇温し、最悪の場合、Ge が大気中で酸化され、Ge が消失 (恐らく Ge-O として蒸

発)する現象も見られた。放熱 (熱伝導) の促進も重要であることを示唆している。



(a) Ge/Si bilayer



(b) Ge single layer

図8 (a) Ge/Si 二層構造および(b) Ge 単層構造からなる片持ち梁の顕微 PL スペクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

- 1) Yasuhiko Ishikawa and Shinichi Saito: "Ge-on-Si photonic devices for photonic-electronic integration on a Si platform", IEICE Electron. Express 11 (24), 1 - 17 (2014), DOI: 10.1587/elex.11.20142008 [査読有]

〔学会発表〕(計8件)

- 1) Naoki Higashitarumizu and Yasuhiko Ishikawa: "Effect of excitation light intensity on micro-photoluminescence spectra for Ge: a comparison with Si, GaAs and InGaAs", The 7th Forum on the Science and Technology of Silicon Materials 2014, Hamamatsu (アクティビティ浜松: 静岡県浜松市), October 20, 2014.
- 2) Akinobu Fujimoto, Tatsuji Kaiwa, Gaku Hodoshima, Sho Nagatomo, and Yasuhiko Ishikawa: "Narrowing of direct bandgap in Ge induced by micro-mechanical stress", 33rd Electronic Materials Symposium, Laforet Izu, Shizuoka (ラフォーレ伊豆: 静岡県伊豆市), July 11 2014.
- 3) (Invited) Yasuhiko Ishikawa: "Si Photonics for Sensing Applications", 2014 CMOS

Emerging Technologies Research Symposium,
Grenoble, France, July 7, 2014.

- 4) 海和達史、石川靖彦、和田一実：「フォトルミネセンス測定による Ge 微細梁構造のバンドギャップ評価」、電子情報通信学会シリコン・フォトンクス時限研究専門委員会第 20 回シリコンフォトンクス研究会、東京工業大学（東京都目黒区）、平成 25 年 10 月 18 日。
- 5) (招待講演) Yasuhiko Ishikawa: “Germanium Active Photonic Devices on Si for Optical Interconnects”, 2013 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2013), Fukuoka (ヒルトン福岡シーホーク：福岡県福岡市), September 25, 2013.
- 6) 海和達史、堀江優、和田一実、石川靖彦：「微細梁構造を用いた Si 上 Ge のバンドギャップ制御」、第 60 回応用物理学会春季学術講演会、神奈川工科大(神奈川県厚木市) 平成 25 年 3 月 30 日。
- 7) Tatsuji Kaiwa, Kazumi Wada, Yasuhiko Ishikawa: “An Increased Red Shift in Near-infrared Light Emission from Ge Microbeam Strictures on Si Induced by an Externally Applied Uniaxial Stress”, Materials Research Society 2012 Fall Meeting, Boston, USA, November 27, 2012.
- 8) (招待講演) Yasuhiko Ishikawa: “Silicon/Germanium-Based Photonics for Information Technology and Sensing”, Collaborative Conference on Materials Research (CCMR) 2012, Seoul, Korea, June 25, 2012.

〔その他〕

ホームページ <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：6 0 3 0 3 5 4 1

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし