

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 28 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2015

課題番号：24686043

研究課題名(和文) ナノビーム型光ナノ共振器を用いたゲルマニウムの発光制御とレーザ発振への挑戦

研究課題名(英文) Control of germanium light emission using nanobeam-type optical nanocavity and a challenge for lasing action

研究代表者

岩本 敏 (Iwamoto, Satoshi)

東京大学・生産技術研究所・准教授

研究者番号：40359667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,000,000円

研究成果の概要(和文)：ゲルマニウムフォトリック結晶ナノビーム共振器を作製し、発光強度の増大を室温で観測するとともに、L3型共振器で $Q \sim 1350$ を実現した。また、格子変調型ナノ共振器を用いて $Q \sim 1850$ を達成した。また、歪窒化シリコン膜とゲルマニウムフォトリック結晶ナノビーム共振器構造に接続されたパッド構造の効果を利用することで、光との相互作用が強くなるナノ共振器部分において、強い一軸性引張歪を誘起し、ゲルマニウムの伝導帯G点とL点のエネルギー差を小さくすることが可能であることを、歪分布の数値解析により示した。

研究成果の概要(英文)：We fabricated germanium photonic crystal (PhC) nanobeam cavities and observed enhanced photoluminescence at the cavity resonances at room temperature. We achieve the cavity Q s of 1,350 and 1,850 for a L3-type and a lattice-modulated PhC nanobeam cavities, respectively. We also numerically demonstrated that a strong uniaxial tensile strain in an air-suspended germanium PhC nanobeam cavity by combining the effects of a strained SiN film deposited on the top and of the pad structures that support the nanobeam. The induced strain reduces the energy difference between the conduction band minima of germanium at the G and L points inside the cavity region, where strong light-matter interaction is expected to take place.

研究分野：ナノオプトエレクトロニクス

キーワード：フォトリック結晶 ナノ共振器 ゲルマニウム

1. 研究開始当初の背景

次世代エレクトロニクスにおける高速・高密度信号伝送技術として期待される光配線技術の実現のため、シリコン(Si)及び関連材料を用いて Si 基板上に光回路を形成するシリコンフォトニクス技術の研究が各国で進められている。特に高効率 Si 系光源への期待は高く、その実現を目指してゲルマニウム(Ge)が注目を集めている。

Ge は間接遷移半導体でありながら、そのバンドギャップと直接遷移バンドギャップのエネルギー差が小さいため、2%程度の引張歪の印加により直接遷移化が可能と考えられている(参考文献①)。特に、2010年に Ge のレーザ発振が報告され大きな話題となった(参考文献②)。これは成膜時に導入される歪を利用したものであるが、その大きさは~0.2%程度と小さく、直接遷移発光を利用するため、高濃度の n 型ドーパにより間接遷移バンドを電子で埋める必要があった。今後のデバイス応用のためには、歪量を増大させることにより、低い電子濃度で効率よく直接遷移発光を実現することが重要である。機械的歪を印加することで大きくバンド構造を制御することが可能であることが示されているが(参考文献③④)、レーザ応用で不可欠となる高品質光共振器との組み合わせは検討されていない。

光共振器、特に、波長サイズの領域に強く光を閉じ込められるフォトニック結晶ナノ共振器等では、その輻射場特性を利用して物質の発光特性を改善できることが知られており、Ge 発光の高効率化を図るアプローチの一つとしても重要である。これまでに二次元フォトニック結晶共振器を用いた Ge の発光増強などが報告されているが(参考文献⑤⑥)、歪みを制御した Ge の直接遷移化と同時に共振器効果を利用したその効率化を目指した研究は進んでいないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、ナノビーム型フォトニック結晶ナノ共振器を用いて、歪による物性制御とナノ共振器による輻射場制御を融合することにより、ゲルマニウムの直接遷移発光の高効率化を実現することを目指す。具体的には、静電気力によるナノビーム構造の変形を利用し、ナノ共振器部分における機械的な歪とそれに依るゲルマニウムのバンドギャップ変化を制御する。これによりゲルマニウムの直接遷移発光を促進すると同時に、ナノ共振器におけるパーセル効果を利用して直接遷移発光の更なる高効率化を図る。また、時間分解発光測定などの各種分光技術を駆使し、ゲルマニウムの発光増強の物理過程を明らかにし、レーザ発振の可能性を探求する。

3. 研究の方法

まずナノビーム構造の静電気力による変形を利用した Ge への強い歪印加と発光特性

制御を実証するための基盤開発を進める。平行して歪・発光制御に適したナノビーム型ナノ共振器の設計・作製を進める。第2年度には、共振器導入による発光増強を実証するとともに、その物理を明らかにする。最終年度には、これらの知見に基づきレーザ発振に向けた課題抽出など、シリコンフォトニクス光源としての可能性と今後の課題を明らかにする。

4. 研究成果

(1) ナノビーム型フォトニック結晶の MEMS 制御

二重ナノビーム構造の形成とその電気機械的制御に取り組んだ。これは、Ge ナノビーム構造への機械的な歪を印加するための技術基盤構築の一部と位置づけられる。

ここでは、作製技術の蓄積がある GaAs を材料として使い、100nm の間隔で2つのナノビーム構造を作製した。ここでは、一方のナノビームのみにフォトニック結晶ナノ共振器を導入している。静電気力により構造を制御するため、ナノビーム構造は表面に金電極が蒸着された構造で中空に指示されている。対向電極として、それぞれのナノビームの支持構造と空気ギャップを隔てて設けられたパッド構造にも金電極を蒸着した。作製した試料の電圧印加前後の走査型電子顕微鏡(SEM) 写真を図1に示す。この実験では、SEM 像を撮影するために、20V 程度の高電圧を印加し、あえて電極間でスティッキングを起こさせている。

図から、二重ナノビーム構造の間隔が電圧の印加により明確に変化していることがわかる。この構造ではナノビームを一様に変位させるよう設計されているが、電極構造の一部を取り除くことなどにより、ナノビームの両端のみをパッド方向に引っ張ることがで

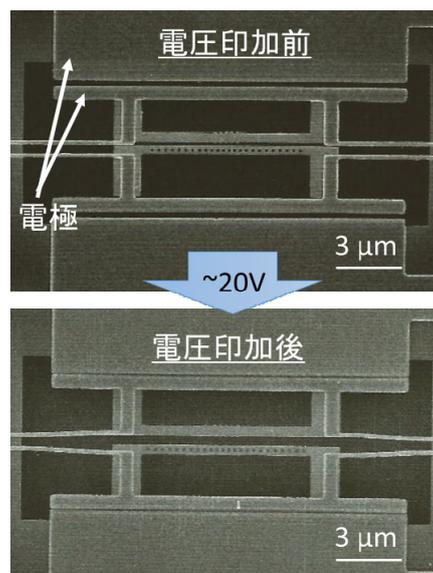


図1: 静電気力による構造制御機構を有する GaAs 二重ナノビーム構造の SEM 写真。上図は電圧印加前、下図は電圧を印加した後の写真

き、ナノビーム中央部への機械的歪の印加が可能になると考えられる。

なお、この実験では、GaAs 層の中央に埋め込んだ InAs 量子ドットの発光を利用して、電圧印加に伴うナノ共振器の特性変化の観測にも成功している。電圧印加に伴い2つのナノビームの間隔がひろがるにつれて、共振器波長の短波長化と Q 値の増大が見られた。これは、間隔が広がることにより、ナノ共振器周辺の平均屈折率が変化したこと、ナノ共振器からもう一本のナノビームへの光の漏れが抑制されたことに起因する。また、15V 程度の印加電圧であれば、電圧の大きさを制御することで、共振器特性が可逆的に変化することも確認している。

(2) 窒化シリコン膜を用いた高歪ゲルマニウムフォトニック結晶ナノビーム型共振器の設計

提案時には、Ge フォトニック結晶ナノビーム共振器を電気機械的に変形させることで歪を印加することを検討していたが、研究の過程で、MEMS 的構造を導入することなく窒化シリコン膜を利用することでフォトニック結晶ナノ共振器部分に大きな歪を導入できることを見出した。これは、2013 年に報告された、ゲルマニウムの製膜時の残留ひずみと大きなパッドに支えられたビーム構造を用いる手法(参考文献⑦)をヒントに、ゲルマニウムへの歪み印加法として知られている窒化シリコン膜(参考文献⑧)と組み合わせることを検討した結果である。

図2に検討した構造の模式図を示す。構造は SiO_2/Si 上に形成された Ge 層とその上に堆積された歪 SiN 膜からなる。フォトニック結晶ナノ共振器を含むナノビーム構造が左右の大きなパッドに接続されている。パターン作製後に SiO_2 膜を除去することで、SiN 膜の歪によりナノ共振器部分に一軸性の引っ張り歪が誘起され、Ge の伝導帯における Γ 点と L 点のエネルギー差 $\Delta E_{\Gamma L}$ が減少し、直接遷移に近づけることができる。

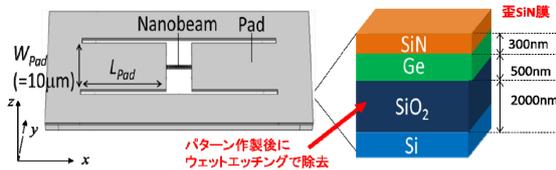


図2: 歪 SiN 膜とパッド構造を用いた高歪 Ge フォトニック結晶ナノビーム共振器の模式図

フォトニック結晶ナノ共振器として L3 型構造を導入した場合の歪分布の解析結果を図3に示す。この解析では、図2におけるパッド長 L_{pad} は $20\mu\text{m}$ 、SiN 膜の内部応力は $+3\text{GPa}$ を用いた。この構造に対しては、SiN 引張膜を用いた。この構成では、 SiO_2 の除去により、パッド部分が収縮に、ナノビーム中央の共振器部分では左右に引っ張られることとなる。その結果、 x 方向に一軸性の強い引

張歪が生じている様子がわかる。図4には図3の歪分布を元に計算した $\Delta E_{\Gamma L}$ の空間分布である。光強度が集中する共振器部分において、 $\Delta E_{\Gamma L}$ が小さくなっていることがわかる。別の解析から、 L_{pad} を大きくするほど印加される伸張歪が大きくなり、 $\Delta E_{\Gamma L}$ が小さくなることもわかった。この構造については、 $L_{\text{pad}}=100\mu\text{m}$ で、共振器中央部における $\Delta E_{\Gamma L}$ は 60meV 程度であった。

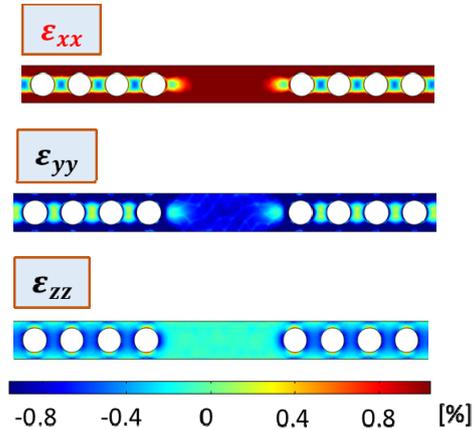


図3: L3型 Ge フォトニック結晶ナノビーム共振器の歪分布

$\Delta E_{\Gamma L}$: 伝導帯の Γ 点と L 点のエネルギー差

$L_{\text{pad}}=20\mu\text{m}$, SiN(3GPa)

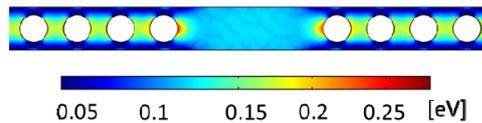


図4: L3型 Ge フォトニック結晶ナノビーム共振器における $\Delta E_{\Gamma L}$ の空間分布

L3 型共振器ではなく格子変調型ナノ共振器を用いた場合には、SiN 圧縮膜を用いることで、同様に共振器中央部分に強い一軸性歪(この場合は z 方向)を誘起することができ、共振器部分での $\Delta E_{\Gamma L}$ を小さくすることが可能であることもわかった。さらに、この構造ではナノビームの断面 (yz 断面) の歪分布の結果として、 Γ 点のキャリアに対して y 方向のポテンシャル閉じ込めが生じ得ることもわかった。これは発光に寄与するキャリアと共振器モードの重なりを高くできることを示唆するもので、Ge 発光と共振器の高効率な結合の実現に向けた重要な知見である。

(3) 高 Q 値ゲルマニウムフォトニック結晶ナノビーム共振器の実現

高歪 SiN 膜を有する構造を実現に向けて、その基盤となるゲルマニウムのフォトニック結晶ナノビーム共振器の作製技術の確立を進めた。作製には、標準的な電子線描画技術とフッ素系ガスを用いたドライエッチング技術を用いた。ドライエッチングの条件を最適化することで、エッチング面の荒れが抑制された垂直性の高いエッチングを実現することができた。図5に作製したゲルマニウ

ムフォトニック結晶 L3 型ナノビーム共振器の SEM 写真を示す。左上挿入図が、作製に用いた試料の層構造である。この実験では、SiO₂ の除去は行っていない。右下挿入図は、3 次元 FDTD 法で求めた共振器の基本モードの電場分布である。フォトニック結晶構造を特徴づける各種のパラメータは図 5 中で定義されている。

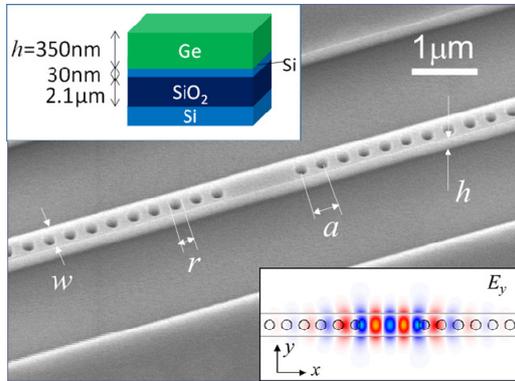


図 5: L3 型 Ge フォトニック結晶ナノビーム共振器の SEM 写真。挿入図 (左上) は試料の層構造、挿入図 (右下) は 3 次元 FDTD で求めた共振器基本モードの電場分布 (E_y 成分) を示す

作製した試料は室温における顕微発光分光により評価した。波長 740nm の CW レーザを励起光として対物レンズを通して試料に照射し、試料の発光を同じ対物レンズを通して分光器に導き、そのスペクトルを測定した。幅 $w=420\text{nm}$, $r/a=0.29$ で、フォトニック結晶の周期 a の異なる幾つかの試料における測定結果を図 6 に示す。この測定における励起パワーは 1mW である。いずれのスペクトルにおいても、共振器モードに起因するピーク状構造が現れていることがわかる。これらのピーク波長はフォトニック結晶の周期の増加とともに長波長化しており、数値計算で予想さ

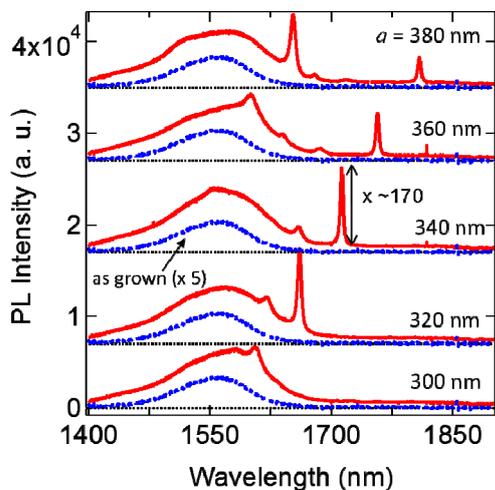


図 6: L3 型 Ge フォトニック結晶ナノビーム共振器の室温顕微 PL スペクトル (赤実線)。比較のため未加工 Ge 試料からの発光 (青点線) もあわせて示す。未加工 Ge 試料からの発光スペクトルは 5 倍に拡大されている。

れる結果とも定性的に一致する。これらのピークは共振器モードに由来するものであり、発光の空間分布を評価した別の実験では、共振外部では対応する発光ピークは観測されないことを確認している。

図 6 には、比較のために未加工の Ge 試料の発光スペクトルもあわせて示した。未加工試料の発光強度は、比較のため 5 倍されている。フォトニック結晶構造が加工された試料について、未加工試料に比べてスペクトル全体にわたって検出發光強度が大幅に改善されていることがわかる。このバックグラウンド発光の増大に加えて、共振器のピークでは更に大きな発光強度の増大が観測されている。ピーク強度から先に述べたバックグラウンド発光強度を引いた強度を共振器モード発光強度とすると、 $a = 340\text{nm}$ の試料の波長 $\sim 1700\text{nm}$ の共振器ピークについては、この共振器モード発光強度は、同じ波長における未加工 Ge の発光強度に比べて 170 倍ほどである。これは、主として発光の取り出し効率の改善に起因すると考えられる。

同じ共振器ピークについて、励起強度を変化させた時のスペクトルの変化を図 7 に示す。励起強度を下げるにしたがって、共振器モード波長が短波長化するとともに、その線幅も大幅に減少していることがわかる。現時点では、高い励起強度に対する共鳴波長の長波長化は試料温度の上昇が、線幅の増大は自由キャリア吸収が主な要因であると考えてい

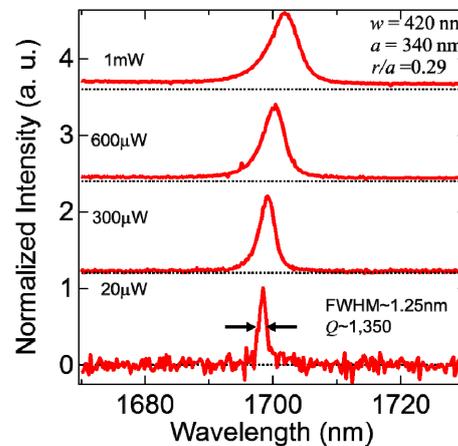


図 7: L3 型 Ge フォトニック結晶ナノビーム共振器の共振器モード発光の励起強度による変化

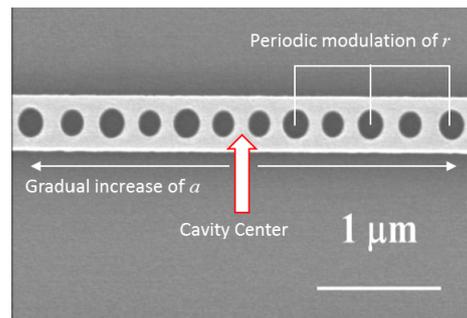


図 8: 格子変調型 Ge フォトニック結晶ナノビーム共振器の SEM 写真

る。本実験では、励起強度 $20\mu\text{W}$ において、共振器ピーク波長は 1698nm 、線幅 1.25nm であった。この結果から Q 値 ~ 1350 が得られる、この Q 値は 2次元 Ge フォトニック結晶共振器で報告されている Q 値に比べて 2.5 倍ほど高い値である。一方、共振器ピークの積分発光強度については、今回の励起強度 (2mW まで) の範囲では、線形的な増加しか得られなかった。今後、パルス励起での実験などの更なる検討が必要である。なお、L3 型共振器に代わって、格子変調型ナノビーム共振器 (図 8) では、 $Q \sim 1,850$ を実現した。この値は Ge フォトニックナノ共振器としては、現時点で最高の値である。

以上の結果は、フォトニック結晶ナノ共振器によるゲルマニウムの発光制御とその応用の基礎となるものである。

<参考文献>

- ① M. E. Kurdi, G. Fishman, S. Sauvage, and P. Boucaud, *J. Appl. Phys.* **107**, 013710 (2010).
- ② J. Liu, X. Sun, R. Camacho-Aguilera, L. C. Kimerling, and J. Michel *Opt. Lett.* **35**, 679 (2010).
- ③ M. E. Kurdi, H. Bertin, E. Martincic, M. de Kersauson, G. Fishman, S. Sauvage, A. Bosseboeuf, and P. Boucaud, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 041909 (2010).
- ④ P. H. Lim, S. Park, Y. Ishikawa, and K. Wada *Opt. Express* **17**, 16358 (2009).
- ⑤ T. -P. Ngo, M. E. Kurdi, X. Checoury, P. Boucaud, J. F. Damlencourt, O. Kermarrec and D. Bensahel, *Appl. Phys. Lett.* **93**, 241112 (2008).
- ⑥ S. Nakayama, S. Iwamoto, S. Ishida, D. Bordel, E. Augendre, L. Clavelier, Y. Arakawa, *Physics E* **42**, 2556 (2010).
- ⑦ M. J. Süess, R. Geiger, R. A. Minamisawa, G. Schiefler, J. Frigerio, D. Chrastina, G. Isella, R. Spolenak, J. Faist, and H. Sigg, *Nat. Photonics.* **7**, 466 (2013).
- ⑧ G. Capellini, G. Kozlowski, Y. Yamamoto, M. Lisker, C. Wenger, G. Niu, P. Zaumseil, B. Tillack, A. Ghrib, M. De Kersauson, M. E. Kurdi, P. Boucaud, and T. Schroeder, *J. Appl. Physics.* **113**, 013513 (2013).

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 S. Ishida, S. Kako, K. Oda, T. Ido, S. Iwamoto and Y. Arakawa, “Suspended germanium cross-shaped microstructures for enhancing biaxial tensile strain”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **55**, 04EH14 (2016). (査読有)
- ② S. Saito, F. Y. Gardes, A. Z. Al-Attili, K. Tani, K. Oda, Y. Suwa, T. Ido, Y.

Ishikawa, S. Kako, S. Iwamoto and Y. Arakawa, “Group IV light sources to enable the convergence of photonics and electronics” (Review Article), *Front. Mater.*, **1**, 15 (2014). (査読有)

- ③ R. Ohta, Y. Ota, H. Takagi, N. Kumagai, K. Tanabe, S. Ishida, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, “Electro-Mechanical Q Factor Control of Photonic Crystal Nanobeam Cavity”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **52**, 04CG01 (2013). (査読有)

[学会発表] (計 16 件)

- ① M. Kuroki, S. Kako, S. Ishida, K. Oda, T. Ido, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, “Germanium Photonic Crystal Nanobeam Cavity with $Q > 1,300$ ”, The Conference on Lasers and Electro-Optics and The Quantum Electronics and Laser Science Conference (CLEO/QELS 2015), SM3G.4, San Jose, California, USA (2015). 2015 年 5 月 11 日
- ② 黒木理宏, 加古敏, 石田悟己, 小田克矢, 井戸立身, 岩本敏, 荒川泰彦, “L3 型 Ge フォトニック結晶ナノビーム共振器における共振器モード ($Q > 1,300$) の観測”, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 13a-A10-7, 東海大学湘南キャンパス, 平塚, 神奈川 (2015). 2015 年 3 月 13 日
- ③ 黒木理宏, 加古敏, 石田悟己, 小田克矢, 井戸立身, 岩本敏, 荒川泰彦, “ゲルマニウムフォトニック結晶ナノビーム共振器の作製と光学評価”, 第 75 回応用物理学会学術講演会, 17p-C8-2, 北海道大学札幌キャンパス, 札幌, 北海道 (2014). 2014 年 9 月 17 日
- ④ S. Iwamoto (Invited) and Y. Arakawa, “Tailoring Optical Properties of Materials by Engineering the Environment”, The 16th Kavli Future Symposium: Nanomaterials Science in Asian Perspective, Seoul National University, Seoul, Korea (2014). 2014 年 6 月 20 日
- ⑤ 黒木理宏, 加古敏, 岩本敏, 荒川泰彦, “窒化シリコン膜を用いた高歪ゲルマニウムフォトニック結晶ナノビーム共振器の設計”, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 17p-E16-6, 青山学院大学, 相模原, 神奈川 (2014). 2014 年 3 月 17 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩本 敏 (IWAMOTO SATOSHI)
東京大学・生産技術研究所・准教授
研究者番号: 40359667