

平成 21 年 6 月 3 日現在

研究種目： 若手研究 (B)
 研究期間： 2007～2008
 課題番号： 19760037
 研究課題名 (和文)
 Ge 自己形成量子ドットを有するフォトニック結晶微小共振器を用いた Si 系発光構造
 研究課題名 (英文)
 Si-based light emitting device based on Ge dots in photonic crystal microcavities
 研究代表者
 夏 金松 (Xia Jinsong)
 武蔵工業大学・総合研究所・助手
 研究者番号：00434184

研究成果の概要：

私達の研究において、異なる微小共振器を使用し、内部で共振させることにより Ge 量子ドットからの発光を増加させた。Ge ドットを有する Si フォトニック結晶共振器を SOI (Silicon-on-insulator) 基板上に作製し、室温にて波長 1.2～1.6 μm の領域に強く鋭い共振ピークを得ることができた。私達は電流注入型の微小共振器の作製に成功しました。4V を印加した時のスペクトルで、ブロードな F-P モードといくつもの鋭いピークが重なり合った発光が得られた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,200,000	0	2,200,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	330,000	3,630,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：

(1) Ge quantum dots (2) photonic crystals (3) Si-based light emitting devices (4) microcavity (5) photoluminescence

1. 研究開始当初の背景

電子デバイス分野において主要材料である Si(シリコン)は、近年、低コスト、確立された技術、大規模プロセス技術が利用可能等の理由から、発光デバイスの材料としてまず

まず注目を集めている。Si 系発光デバイスの魅力的な展望は、「光・電子スーパーチップ」であり、これは発光素子、変調器、光導波路、増幅器、受光素子さらにこの頃では電子制御回路も含む集積回路である。このように、電

子材料として優秀なシリコンであるが、間接遷移型であるため発光デバイスの分野では遅れをとってきた。この二つの問題を克服するため、世界中の多くの研究者が取り組んでいる。近年、Si ベースの光電子素子に劇的な変化が起こっている。2003年、Intelが CMOS 技術を用いて 1GHz を上回る帯域幅の変調器を実現させた。Si 系発光素子の実現に向けた実例は、間接遷移の克服のための Er(エルビウム)ドーピングやナノサイズ構造形成により量子効果を活用するなどがある。提案されてきた報告にも関わらず、Si 系発光デバイスにおいて必須の実用的な Si 発光素子はまだ得られていない。

2. 研究の目的

提案した計画の目的は、埋め込み型自己形成 Ge 量子ドットを有する 2 次元フォトニック結晶微小共振器を用いて、高い発光効率を持ち、鋭いスペクトル Q 値を持つ指向性を持った Si 系発光デバイスの開発である。

3. 研究の方法

自己形成 Ge 量子ドットは、作製が容易であることや、電気通信システムで使われている 1.3~1.6 μm の波長帯で発光するので多く用いられている。この波長において、シリコンは光を透過させる、この事は光回路にとって重要なことである。ハイゼンベルグの不確定性原理により、自己形成 Ge 量子ドットでは電子正孔発光再結合確率が高められる。しかし、現在の Si 系発光デバイス構造の主な問題は、(1)発光スペクトル純度が悪い(2)発光の指向性が悪い(3)発光効率が低い、の 3 点が挙げられる。発光体として、自己形成 Ge 量子ドットを SOI 基板にガスソース分子線エピタキシー(GSMBE)を用いて S-K モードで成長させた。成長条件は、1.3~1.6 μm で発光

する自己形成 Ge 量子ドットのために最適化を行ってきた。フォトニック結晶(PhC)微小共振器、マイクロディスクやマイクロリング共振器は、Ge ドットからの発光特性を大きく改善するために利用されてきた。PhC には光の禁制帯が存在する、この禁制帯では光の強い閉じ込め現象が起きる。この閉じ込めを利用して、多くの共振器で波長の選択性が可能となる。光の閉じ込めにより引き起こされる共振器内の光の共振により、特定の波長が連続スペクトルから選択され強められる。この時強められなかった波長では逆に発光が抑えられる。これは PhC 微小共振器内の量子ドットからの発光で、選択された波長のスペクトルと強度をより良くすることを意味する。さらに、発光を強め非発光再結合を抑制するパーセル効果によりキャリア寿命は減少する。特に、PhC 微小共振器は波長の選択性、指向性、発光及び取出効率が低いという長所があり、発光デバイスとして大いに期待できる。これらの理由から、我々は PhC 構造を使い自己形成 Ge 量子ドットからの自然放出光の閉じ込めと変調を行う。実験において、Ge 量子ドットを有する基板上に光共振器のパターンを描画するには、電子線描画装置を使用した。PhC パラメータによる発光依存性を詳細に調べるため、異なるパラメータの PhC は作られた。Ge/Si 層は反応性イオンエッチングでチッチングした。垂直方向の光閉じ込めの強化や構造の対称性を増すために、BOX 層を HF によりエッチングする事によりフリースタANDING型のシリコン PhC を形成した。作製したデバイスの発光特性を調べるため、マイクロフォトルミネセンス(μ -PL)と時間分解 μ -PL を用いた。電流注入型デバイスの特性は室温エレクトロルミネセンスによって調べた。

4. 研究成果

私達の研究では、発光層に自己形成 Ge 量子ドットが埋め込まれている。Ge 量子ドットはフル CMOS との互換性や作製が容易といった利点がある。Ge 量子ドットからの発光波長が 1.3-1.6 μm というのは有名である。しかし、未加工の Ge 量子ドットでは、特に室温において発光効率が悪い。

私達の研究において、異なる微小共振器を使用し、内部で共振させることにより Ge 量子ドットからの発光を増加させた。作製したデバイスは PL(フォトルミネセンス)と EL(エレクトロルミネセンス)を使い特性を評価し、以下の結果を得た。

Ge ドットを有する Si フォトニック結晶共振器を SOI (Silicon-on-insulator) 基板上に作製し、室温にて波長 1.2 ~ 1.6 μm の領域に強く鋭い共振ピークを得ることができた。これは Ge ドットからの発光がマイクロディスクによって強く増幅された結果である。格子間隔を変化させ共振させる波長を制御した。二次元フォトニック結晶の格子間隔を調整することにより、共振ピーク波長の制御性があることを示した。

Ge ドットを有する Si マイクロディスク共振器を SOI (Silicon-on-insulator) 基板上に作製し、マイクロディスクでは二種類の共振ピークを観測し、これらが Whispering-gallery mode による鋭い共振ピークと Fabry-Perot mode によるブロードな共振ピークであることが判明した。以上のフォトルミネセンス測定では Ge ドットの量子閉じ込め効果が Ge ドットを有するマイクロディスク内の再結合プロセスにおいて重要な役割を果たすことを示している。

発光デバイスにとっての品質を下げていく Fabry-Perot mode を除去するために、Ge ドットを有する Si マイクロリング共振器を

これまでより厚い埋め込み酸化膜をもつ SOI 基板上に作製した。マイクロリング共振器では共振器由来の Whispering-gallery mode に対応した鋭い共振ピークを観測することができたと同時に Fabry-Perot mode によるピークを除去することに成功した。この微小共振器の特性を表す Q 値は 2000 ~ 3000 となり、これは我々がこれまでに報告してきた値よりも非常に大きな値となった。この Q 値の増大は埋め込み酸化膜を厚くしたことに起因し、導波路と基板の間の結合が弱まったためであると考えている。

私達は電流注入型の微小共振器の作製に成功しました。Ge 量子ドット成長、ドーピング方法、電子線描画やエッチング条件の最適化後に、MBE 成長、電子線描画、イオン注入、エッチングや PECVD 等の典型的な CMOS プロセス技術を用いてデバイスを作製しました。作製の成功は重要であり次の Si ベース発光デバイスの研究に大いに役立ちます。室温において、マイクロディスク共振器をもつ Ge 量子ドットからのエレクトロルミネセンスを得た。4V を印加した時のスペクトルで、ブロードな F-P モードといくつもの鋭いピークが重なり合った発光が得られた。鋭いピークは WGM からのピークと思われる。電圧を大きくすると、発光強度が急激に強くなった。

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 5 件)

- ① Jinsong Xia, Ryuichiro Tominaga, Seiji Fukamizu, Noritaka Usami, and Yasuhiro Shiraki, "Generation and wavelength control of resonant luminescence from silicon photonic crystal microcavities with Ge dots", Jpn. J. Appl. Phys. 48, (2009), 022102, (15) 査読有
- ② J.S. Xia, R. Tominaga, N. Usami, S. Iwamoto, Y. Ikegami, K. Nemoto, Y. Arakawa, and Y. Shiraki, "Resonant

- photoluminescence from Ge self-assembled dots in optical microcavities”, J. Crystal Growth 311, (2009). 883-887, (15) 査読有
- ③ Jinsong Xia, Koudai Nemoto, Yuta Ikegami, Noritaka Usami, Yasushi Nakata, Yasuhiro Shiraki, “Room-temperature light-emission from Ge quantum dots in photonic crystals”, Thin Solid Films 57, (2008), 125-127, (15) 査読有
- ④ J. S. Xia, K. Nemoto, Y. Ikegami, N. Usami, Y. Shiraki, “Silicon-based light emitters fabricated by embedding Ge quantum dots in Si microdisks,” *Appl. Phys. Lett.* vol. 91, p.011104, 2007. 査読有
- ⑤ J. S. Xia, Y. Ikegami, K. Nemoto, Y. Shiraki, “Observation of whispering-gallery modes in Si microdisks at room temperature,” *Appl. Phys. Lett.* vol. 90, no. 14, p.141102, Apr. 2007 査読有

[学会発表] (計 8 件)

- ① 深水聖司, 夏金松, 富永隆一朗, 宇佐美德隆, 白木靖寛, “Ge量子ドットを有するマイクロディスク共振器からのエレクトロルミネッセンス”, 2009年春季第56回応用物理学関係連合講演会, 茨城県つくば市, 2009.3.31
- ② Jinsong Xia, Ryuichiro Tominaga, S. Iwamoto, Noritaka Usami, Y. Aragawa, and Yasuhiro Shiraki, “Ge Dots in Optical Microcavities--a Possible Direction for Silicon-based Light Emitting Devices” (Invited) the Third International SiGe, Ge, & Related Compounds Symposium, Honolulu Hawaii USA, 2008.10.16
- ③ 富永隆一朗, 夏金松, 深水聖司, 宇佐美德隆, 白木靖寛, “微小共振器を用いたSi系電流注入型発光デバイスの作製”, 2008年秋季第69回応用物理学学会学術講演会, 愛知県春日井市, 2008.9.2
- ④ Jinsong Xia, “Photoluminescence from Silicon Microring Resonators with Ge Self-Assembled Quantum Dots”, the Fourth International SiGe Technology and Device Meeting (ISTDM’08), Hsinchu Taiwan, 2008.5.13
- ⑤ J. S. Xia, Koudai Nemoto, Yuta Ikegami, Noritaka Usami, and Yasuhiro Shiraki, “Enhanced light emission from Ge quantum dots in microdisks,” Proceeding of the 20th IEEE/LEOS Annual Meeting (LEOS’07), WDD3, Lake Buena Vista, Florida, USA.
- ⑥ Jinsong Xia, Yasuhiro Shiraki, “Light emission from Ge self-assembled quantum dots in photonic crystals,” *Extended Abstracts of The 5th International Conference on Silicon Epitaxy and Heterostructures (ICSI-5), May 2007 Marseille, France, May 2007. (invited talk)*
- ⑦ Jinsong Xia, Koudai Nemoto, Yuta Ikegami,

Yasushi Nakata, Yasuhiro Shiraki, “Enhanced light-emission from crystalline silicon in microdisk resonators,” Proceeding of the 4th IEEE/LEOS Group Four Photonics Conference (GFP’07), WP10, Tokyo, Japan, 2007

- ⑧ K. Nemoto, J. S. Xia, Y. Ikegami, R. Tominaga, N. Usami, Y. Nakata, Y. Shiraki, *Extended Abstracts of The 68th Autumn Meeting, 2007, the Japan Society of Applied Physics (JSAP Autumn Meeting, 2007)*, 7p-R-15.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

夏金松 (Xia Jinsong)
 武蔵工業大学・総合研究所・助手
 研究者番号：00434184