

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 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009 ～ 2011

課題番号：21686031

研究課題名（和文） フォトニックナノ共振器を有するシリコンLEDの実現とその高効率化

研究課題名（英文） Realization of silicon LEDs with photonic nanocavities and improvement of their efficiencies

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

研究成果の概要（和文）：

フォトニック結晶およびフォトニック結晶ナノ共振器を有するシリコン発光ダイオード(LED)を初めて実現するとともに、フォトニック結晶構造のないシリコンLEDと比較して大きな発光強度が得られることを実証した。さらに、シリコンナノ共振器LEDの100MHz直接変調動作を実現した。

研究成果の概要（英文）：

Silicon light emitting diodes (LEDs) with photonic crystal (PhC) and PhC nanocavity were demonstrated for the first time. These LEDs exhibited much stronger electroluminescence (EL) than Si LEDs without PhC patterns. Moreover, direct modulation of the Si nanoacvity LED up to 100 MHz was demonstrated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,500,000	1,650,000	7,150,000
2010年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2011年度	1,900,000	570,000	2,470,000
総計	9,400,000	2,820,000	12,220,000

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：ナノ共振器、発光ダイオード、フォトニック結晶、シリコン、ナノビーム構造

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・高密度配線技術として期待される高密度光配線の実現を目指して、シリコン及び関連材料を用いてシリコン基板上に光回路を形成しようとするシリコンフォトニクス技術の研究が世界中で進められている。光導波路については、シリコン細線導波路やフォトニック結晶導波路を中心に伝播損失の低減が進み大きく発展している。一方、光機能性光デバイス、特に光源の研究については、いまだ発

展途上である。その理由は基本材料であるシリコンは間接遷移半導体であり、発光レートが非常に低く非発光再結合の影響により内部量子効率が極めて低いためである。この問題を克服するため、Siナノ結晶やGe量子ドット、Si中のErイオンなどを発光体として用いる研究が行われてきた。他方、シリコン自体で高効率な発光が実現できれば、材料・プロセスにおいてLSI技術との整合性がよく、安価にシリコンフォトニクス技術の光源を提供することができる。期待できる。

Fermiの黄金則によれば、自然放出発光レートは物質で決まる特性だけでなく発光体のおかれた輻射場の特性（真空電場強度や状態密度）にも依存する。フォトニック結晶構造を利用することでモード体積(V)が小さくQ値の高い共振器を実現でき、これにより発光レートの増大（パーセル効果）とそれに伴う量子効率の改善が可能となると期待できる。これまでにフォトニック結晶ナノ共振器を用いて、室温において300倍以上の強度のシリコンの間接遷移バンド間発光が報告されている。しかしながら、これらは光励起による基礎的実験であり、今後の応用のためには、利用が想定される電流注入型デバイスの実現が期待されるとともに、そこでのナノ共振器の有効性を示すことが重要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、フォトニック結晶ナノ共振器を有するシリコン発光ダイオード(シリコンナノ共振器 LED)を作製し輻射場制御による発光増強効果を実証するとともにその高効率化を目指す。具体的にはフォトニック結晶ナノ共振器を有するシリコン LED を実現し量子効率向上の実証を目指すとともに、プラズモニック共振器の導入によるシリコンナノ共振器 LED の更なる高効率化を目標とする。また、これらを通して将来のシリコン発光デバイスの可能性と課題を明らかにすることを旨とする。

3. 研究の方法

上記目的のために、まず、フォトニック結晶構造を用いてシリコン LED の作製技術開発を進める。作製した素子については、各種の電気的および顕微発光計測や時間分解分光などの光学的手法により、その特性を評価し、シリコン発光におけるフォトニック結晶およびナノ共振器の効果を議論する。その際には3次元電磁界解析などの計算技術も援用する。

4. 研究成果

ここでは、成果概要で述べた主要成果についてその詳細を述べる。この他の成果として、シリコン発光におけるフォトニック結晶ナノ共振器のサイズ効果に関する成果 (Appl. Phys. Lett.の表紙に採用) がある。

(1) フォトニック結晶シリコン LED の実現

まず、二次元フォトニック結晶構造を有する SiLED の作製プロセスを確立するため、ナノ共振器を有しない Si PhC LED の作製に取り組んだ。素子は、市販の SOI(Silicon On Insulator)基板に領域選択イオン打ち込み技術を用いて横型 p - i - n (厳密には p^+ - p - n^+)接合を

作製した構造で、発光部分となる $i(p)$ 領域に、フォトニック結晶構造を有するものである。作製した素子の概念図と中心部分の SEM 写真を図1に示す。発光層となる $i(p)$ 領域の幅は $\sim 5\mu\text{m}$ である。電流-電圧特性では明瞭なダイオード特性が得られた。

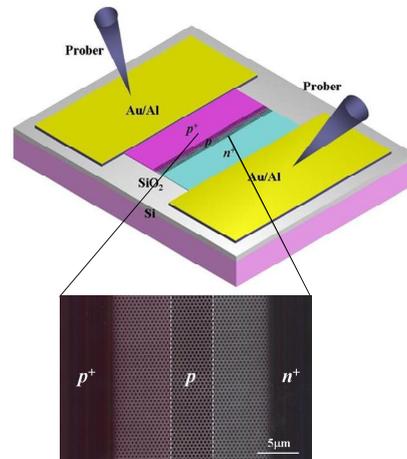


図1：フォトニック結晶シリコン LED の模式図と SEM 写真

作製した試料は、室温における顕微 EL 測定により評価した。フォトニック結晶の周期、円孔サイズなどのパラメータを変えた幾つかの素子を作製し評価した。図2は注入電流 10mA における各構造の発光スペクトルである。比較のためにフォトニック結晶構造を導入していない平面型 SOI-LED からの EL スペクトルもあわせて示した。フォトニック結晶 LED ではいずれも平面型 LED に比べて高い発光強度が得られている。特に、周期 $a = 750\text{nm}$ の試料について、10mA における積分発光強度は平面 LED の 14 倍であった。この増強は、主にフォトニック結晶構造の導入による光取り出し効率の増大によるものである。また、構造のパラメータによる強度やスペクトル形状の違いは、それぞれの構造に対するフォトニックバンド構造を考慮することで定性的に理解できる。

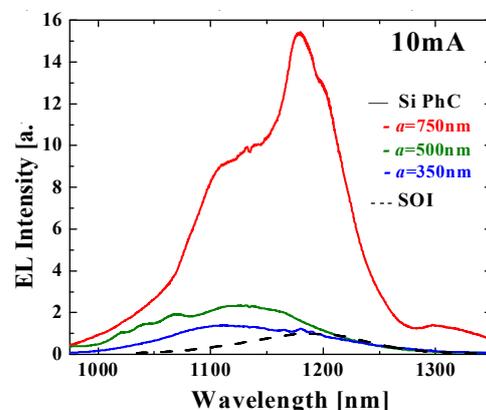


図2：Si PhC LED の室温 EL スペクトル。

SOIは平面 LED のスペクトルを示す

また、PhC の下部の BOX(Buried Oxide)層を除去したエアブリッジ型 Si PhC LED においては 1mA の注入電流において、平面 LED の 100 倍を超える高い発光強度が得られた。

これらの成果は、フォトニック結晶構造を有するシリコン LED を初めて実現したものである。

(2) シリコンナノ共振器 LED の実現

フォトニック結晶シリコン LED の作製をとおして確立したプロセス技術を用いて、ナノ共振器 LED を実現することに初めて成功した。共振器部分に効率的に電流を注入するために、二次元フォトニック結晶ではなくナノビーム型一次元フォトニック結晶ナノ共振器構造を採用した (図 3(a))。i 領域の長さは約 1 μ m である。また、放熱特性の観点から、エアブリッジ型ではなくシリコン酸化膜上に形成された L3 型ナノ共振器構造を用いた(図 3(b))。図 3(c)は数値計算により求めた共振器基本モードの電界分布である。共振器波長は \sim 1130 nm で、設計 Q 値は \sim 1,300 である。また、モード体積は $0.67(\lambda/n)^3$ である。

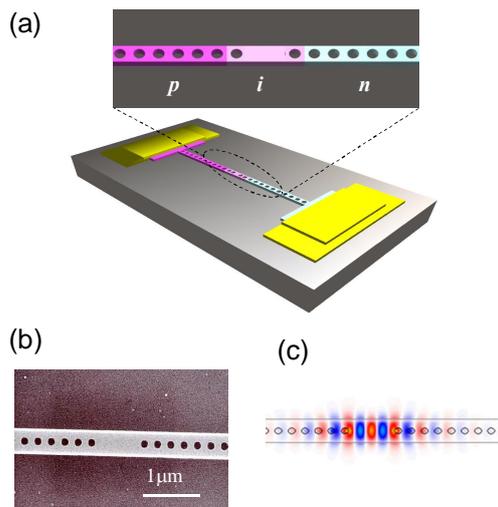


図 3: (a)Si ナノ共振器 LED のイメージ図、(b)共振器部分の SEM 写真、(c) 共振器モードの電界分布

図 4 には、順方向バイアスを印加して電流を流したときの様子を示す。素子中央部分 (この写真では 3 つの LED が同時に駆動されている) から発光が生じている様子がわかる。

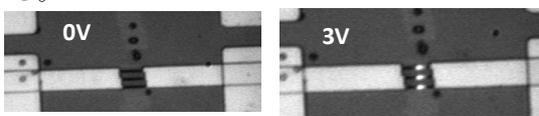


図 4: シリコンナノ共振器 LED の発光の様子

図 5 は注入電流 100 μ A におけるナノ共振器 LED および参照用に作製したナノビーム LED(図 3(b)で空気円孔のないもの)の顕微 EL スペクトルである。ナノ共振器 LED の発光スペクトルには、共振器モードに起因する明瞭なピークが観測されている。共振器の Q 値は 440 であった。この値と設計値との差異は、作製誤差などの影響によるものと考えられる。また、共振波長において、ナノビーム型 LED に比べて約 80 倍の検出光強度が得られた。この値は、これまでに DBR 構造を用いた微小共振器シリコン LED で報告されていた発光強度の増大比約 2 倍を大きく超える値である。数値計算に基づく取り出し効率および光学系への結合効率の解析から、ナノ共振器 LED ではナノビーム型 LED に比べて 5 倍程度の発光効率の改善が生じている可能性があることがわかった。この値は、室温におけるシリコンの位相緩和時間を 40fs と仮定して共振器のモード体積などから計算した期待される発光効率の改善率 3.4 倍と比較的良好一致を示している。

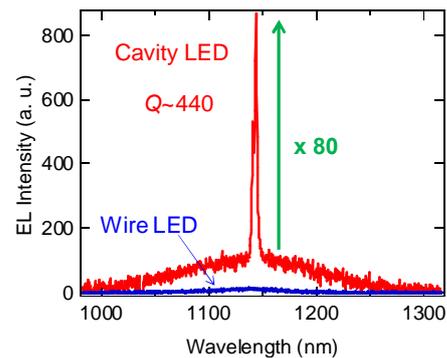


図 5: シリコンナノ共振器 LED(赤)と共振器構造を有しないナノビーム LED (青) の室温顕微 EL スペクトル

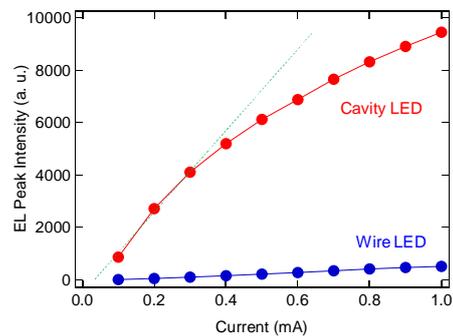


図 6: EL 強度の注入電流依存性。赤: シリコンナノ共振器 LED、青: ナノビーム LED

図 6 はナノ共振器 LED の共振器モードにおけるピーク EL 強度と、同じ波長におけるナノビーム LED の EL 強度の注入電流依存

性である。ナノ共振器 LED の EL 強度は線形に増加したあと、高注入電流領域では飽和する傾向がみられる。この領域では共振器モード波長の短波長シフトが観測されており、オージェ効果を含むキャリア誘起効果と関係する可能性が示唆される。また、更に電流値を増大させると、共振器波長は長波長シフトを示した。これは試料の温度上昇に起因すると考えられる。この波長変化量と屈折率の温度依存性から見積もった試料温度は 400K 程度であった。

(3) シリコンナノ共振器 LED の時間分解発光測定と直接変調動作

キャリア緩和過程に関する知見を得るため、光励起により、ナノビーム型一次元フォトニック結晶ナノ共振器について、時間分解発光測定を行った。図 7(a)は測定した共振器の室温顕微 PL スペクトルである。図 7(b)(c)は共振器波長 1128nm および非共鳴波長 1080nm における時間分解測定の結果をまとめたものである。また比較のために、共振器作製に用いた未加工 SOI 基板、共振器構造のないナノビーム構造に対する測定結果もあわせて示した。

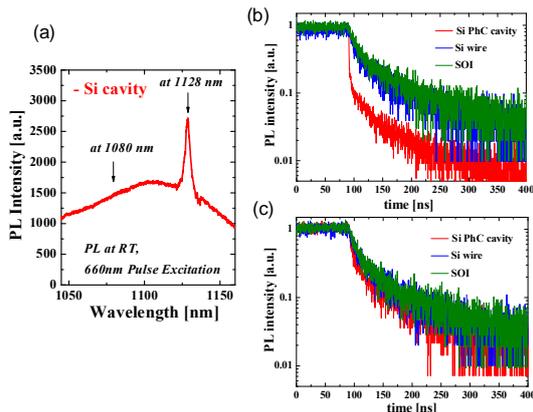


図 7：ナノビーム型一次元フォトニック結晶ナノ共振器の顕微 PL スペクトル(a)とその時間分解発光測定結果。(b)(c)は波長 1128nm、1080nm における結果をそれぞれ示す。

発光減衰時間はいずれも数 ns-数 10ns であり、キャリア緩和は非発光再結合過程で決まっていることがわかる。また、未加工 SOI とナノビーム構造における発光減衰時間がほぼ一致していること、非共鳴時には共振器構造における減衰時間もこれらの値に近いことから、フォトニック構造の加工自体による表面再結合等の影響は小さいと考えられる。さらに、共鳴波長においては、共振器構造からの発光減衰時間が他と比べて短くなる現象が明瞭に観測された。この物理的メカニズムについては今後の検討が必要である。

シリコンナノ共振器 LED についても同様

の測定と行ったところ、低バイアス時には減衰時間は数 ns であることが分かった。これは非発光過程で支配されているもの比較的高速なキャリア寿命を利用して LED の直接変調が可能であることを示している。実際に 100MHz の矩形波によりシリコンナノ共振器 LED を駆動して、高コントラストの変調動作を観測した (図 8)。また、高バイアス時には時定数の長い過程が観測されることなどが明らかとなった。

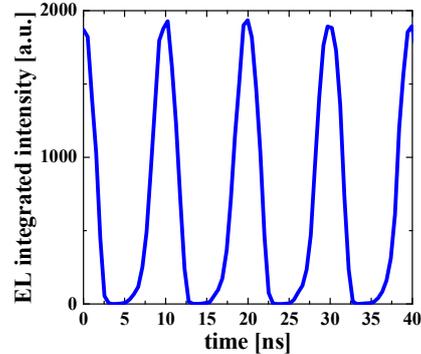


図 8：シリコンナノ共振器 LED の 100MHz 直接変調動作

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. Iwamoto and Y. Arakawa, δ Enhancement of Light Emission from Silicon by Utilizing Photonic Nanostructures (招待論文) δ , IEICE TRANSACTIONS on Electronics, 査読有, **E95-C**, 206 (2012).
- 2) S. Nakayama, S. Ishida, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, δ Effect of cavity mode volume on photoluminescence from silicon photonic crystal nanocavities, *Appl. Phys. Lett.*, 査読有, **98**, 171108 (2011).
- 3) S. Nakayama, S. Iwamoto, S. Ishida, D. Bordel, E. Augendre, L. Clavelier, and Y. Arakawa, δ Enhancement of photoluminescence from germanium by utilizing air-bridge-type photonic crystal slabs, *Physica E : Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 査読有, **42**, 2556 (2010).

[学会発表] (計 19 件)

- 1) 岩本敏、荒川泰彦(Invited), “フォトニックナノ構造による Si から発光制御”, 第 5 回超高速光エレクトロニクス研究会, 箱根 2012 年 12 月 9 日
- 2) S. Iwamoto (invited) and Y. Arakawa, “Enhanced light emission from silicon with photonic nanostructures”, *International Photonics ans*

- OptoElectronics Meetings, OEDI-43,
中国・武漢 2012年11月4日
- 3) 中山茂、岩本敏、加古敏、都木宏之、石田悟己、荒川泰彦, “シリコンフォトニック結晶ナノビーム共振器の室温時間分解発光測定”, 第59回応用物理学関係連合講演会、15a-GP1-2, 東京 2012年3月15日
 - 4) S. Nakayama, S. Iwamoto, S. Kako, S. Ishida, and Y. Arakawa, “Demonstration of silicon nanocavity LED with enhanced luminescence”, 2011 International Conference on Solid State Devices and Materials, I-8-2, Nagoya, 2011年9月30日
 - 5) S. Nakayama, S. Iwamoto, S. Ishida, and Y. Arakawa, “Demonstration of a silicon photonic crystal slab LED with efficient electroluminescence”, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials, D-4-3, Tokyo, 2010年9月23日

[産業財産権]

- 出願状況 (計0件)
- 取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

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