

機関番号：14301

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2008 ~ 2010

課題番号：20760198

研究課題名 (和文) 光ナノ構造がシリコンからの発光に及ぼす効果の基礎研究

研究課題名 (英文) Effects of a photonic nanostructure on light emission of silicon

研究代表者

富士田 誠之 (FUJITA MASAYUKI)

京都大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：40432364

研究成果の概要 (和文)：

シリコンは電子デバイスに最も広く用いられている半導体であり、環境にやさしく豊富な材料である。しかし、シリコンからの発光は格子振動を介する間接遷移型であるため、一般に効率が低く、発光デバイスには用いられていない。本研究では、研究代表者らが世界に先駆けて発光制御の基本原理解明に成功してきたフォトニック結晶・光ナノ共振器といった光ナノ構造をシリコンへ導入した。その結果、光ナノ構造のない参照構造と比べ、数百倍程度のシリコンからの発光の増大が観察された。また、光ナノ構造を強く励起した際のシリコン特有の新たな発光増強のメカニズムの可能性および、表面処理による発光に競合する非発光過程の抑制と発光のさらなる増強も見いだされ、光ナノ構造がシリコンからの発光効率の改善に有用であることが示された。

研究成果の概要 (英文)：

We have introduced a photonic crystal (PC) into a silicon (Si) slab to manipulate the light emission. Our study demonstrates that the light extraction is improved by a factor of ~ 50 in a defect-free PC. In addition, introducing a nanocavity into the PC can enhance the emission by up to a factor of ~ 300 by improving also the objective coupling and the internal quantum efficiencies. We also found that phonon accumulation in the tiny space will be a key for enhanced light emission in addition to the cavity effect for photons. Finally, we propose and demonstrate the application of high-pressure water vapor annealing (HWA) to Si PC nanocavities for surface passivation. We found that HWA boosts light emission due to the reduction of surface recombination beyond simply using the cavity effect.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学，電子・電気材料工学

キーワード：シリコン，間接遷移型半導体，発光，光ナノ構造，フォトニック結晶

1. 研究開始当初の背景

科学技術の進展により、情報処理量・速度とエネルギー消費は増大し続けている。「発光」という物理現象を利用したデバイス技術も進展を続け、半導体材料を使った発光ダイ

オードやレーザは、ディスプレイ・光記録・光通信等に応用され、我々の生活に欠かせないキーデバイスとなっている。今後ますます使用規模が増大する発光デバイスの、既存の材料・概念で制限される発光効率への挑戦は、

爆発的な情報量増大やエネルギー問題への解決の糸口を与えるものであり、その重要性はきわめて高いといえる。シリコンは電子デバイスに最も多く用いられている半導体であり、環境にやさしく豊富な材料である。しかし、シリコンからの発光は格子振動(フォノン)を介在する間接遷移型であるため、一般に効率が低く、発光デバイスには用いられていない。もし、シリコンを材料本来の物理的制約を越えて効率的に発光させることができれば、資源・環境・エネルギー問題解決への一助になる。さらには、電気配線の遅延現象で速度限界が近づきつつある大規模集積回路との集積化によってシリコン光配線が実現されれば、電気信号の処理速度の限界を打破できる可能性がある。

ここで、発光現象の物理的起源である自然放出に立ち返ると、自然放出は通常、発光材料の電子物性で決定され、制御されていない状態にあり、それが発光デバイスの物理的限界を与えていると考えられる。研究代表者は、自然放出が電子物性だけでなく、発光材料の周りの屈折率環境で決定される光学モードにも依存するという量子力学的原理に着目してきた。フォトニック結晶と呼ばれる光ナノ構造は周期的な屈折率分布をもち、光のエネルギーに対するフォトニックバンドが形成され、設計しただけでは光が存在できないエネルギー状態であるフォトニックバンドギャップが生じる。発光可能な材料であっても、その材料がフォトニック結晶に導入されると、フォトニックバンドギャップ効果によりその発光が原理的に抑制され、材料本来の電子物性の制限を越えた発光現象の根本的制御が可能になると期待される。研究代表者は2次元フォトニック結晶を用いることで、フォトニックバンドギャップ効果による発光制御の基本原則を世界に先駆けて明確に実証することに成功してきた。この実験では発光材料として、発光デバイスに広く応用されている直接遷移型化合物半導体 GaInAsP を用いたが、シリコンでも同様にフォトニック結晶で発光制御ができる可能性があると考え、本研究の着想に至った。

2. 研究の目的

本研究では、光ナノ構造がシリコンからの発光現象に与える効果を明らかにし、光ナノ構造による発光の制御の可能性を探求することを目的とした。前述したように、研究代表者は直接遷移型半導体を用いて、光ナノ構造の一種であるフォトニック結晶による発光制御の基本原則を実証してきた。さらにフォトニック結晶中に人為的に結晶の周期性を乱した欠陥部分(光ナノ共振器)を導入することで発光の増強が起こるといった結果も得られてきており、本研究では、フォトニッ

ク結晶・光ナノ共振器構造をフォノンの介在という過程が発光に必要な間接遷移型半導体シリコンへ導入し、発光現象に及ぼす効果を明らかにすることを目的とした。また、光ナノ構造における発光に競合すると予想される非発光過程を抑制する方法も探求することで、発光ダイオードやレーザーといった将来のデバイス応用につなげることも目的とした。

3. 研究の方法

最も基本的な光ナノ構造のひとつである図1に示す円孔三角格子2次元フォトニック結晶スラブ構造と3個埋め点欠陥光ナノ共振器を主な対象とし、研究を進めた。その際、フォトニック結晶を最も特徴づけるパラメータである格子定数 a を系統的に変化させた試料をシリコン・オン・インシュレータ(SOI)ウエハから作製し、フォトルミネッセンス測定を行うことで、発光の増強効果の確認を進めた。

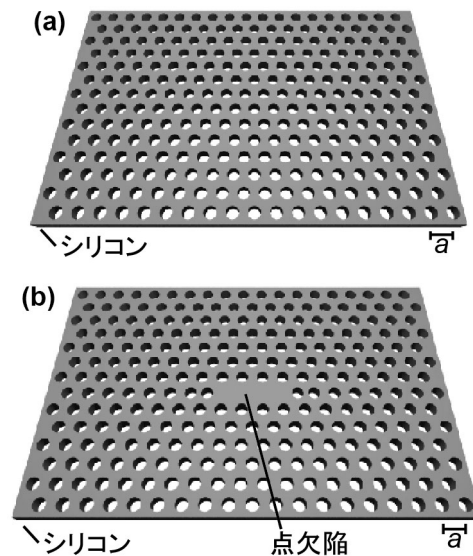


図1 (a)2次元フォトニック結晶スラブ (b)3個埋め点欠陥光ナノ共振器

ここで、本研究での光ナノ共振器においては、図2に示すように共振器 Q 値、モード体積、放射パターンが異なる複数のモードをも

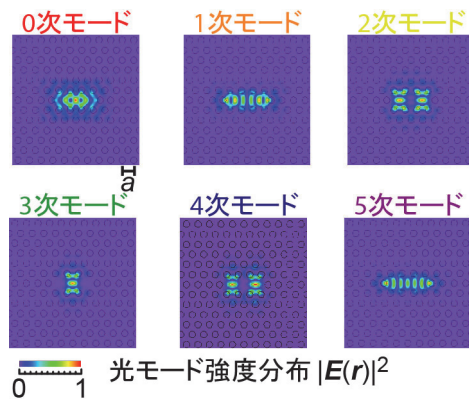


図2 光ナノ共振器中に形成される共振モード

つ. そのため, これらの効果を取り込んだ理論解析と発光スペクトルを比較することで, 発光増強にとって重要な要因の解明に取り組んだ. さらに, 測定パラメータ, 例えば, 励起強度を変化させることで, 発光増強の詳細なメカニズムを探求していった.

また, 光ナノ構造は多くの表面をもつ微小構造であり, 発光過程に競合する表面での非発光過程も増長されると予想できる. そこで, 本研究では, 光ナノ構造を形成したシリコンを時間分解フォトルミネッセンス評価することで非発光過程を調査したのち, 260°Cの比較的低い温度でシリコン表面に良質の酸化膜を形成することが可能な高压水蒸気アニール (HWA) 処理という, MPa 台の高い水蒸気圧力下でシリコンを加熱処理する方法を用い, シリコン光ナノ構造における表面処理方法の探索と非発光過程の低減および, 発光増強の観察を進めた.

4. 研究成果

本研究で得られた主な研究成果を以下にまとめる.

(1) フォトニック結晶構造導入によるシリコンからの発光増大現象の観察

フォトニック結晶の格子定数 a を媒質内波長に一致させたときには, 面内共振による発光の増強および面垂直方向の回折作用が同時に起こり, 格子定数に比例して, 発光ピーク波長が図3のように変化するという, フォトニック結晶特有の効果が観察された.

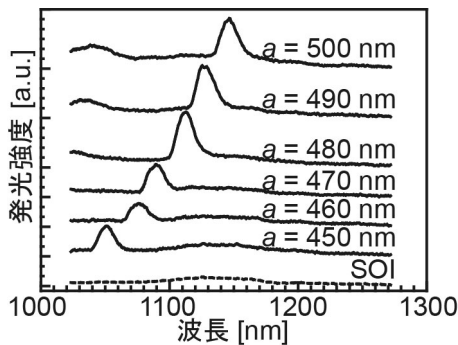


図3 格子定数の異なるシリコンフォトニック結晶スラブからの発光スペクトル

一方, 格子定数が波長よりも大きいときには, 多重回折効果でシリコンの外へ発光が効

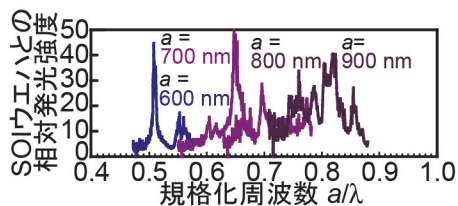


図4 格子定数の大きなシリコンフォトニック結晶からの発光スペクトル

果的に取り出され, シリコンのバンド間遷移にあたる波長 1.1 μm 帯の発光が, 数10倍以上増大することが, 図4のように観察された.

(2) 光ナノ共振器によるシリコンからの発光増大現象とその起源の探索

光ナノ共振器をシリコンスラブに導入すると, 共振器内でのシリコンと光の相互作用の増大等により, 発光特性の大幅に向上が期待される. 図5に示すようにフォトルミネッセンス測定で観察された共振モードにおいて, 光ナノ構造のない参照領域と比べ, 数百倍程度の発光増大が観察された.

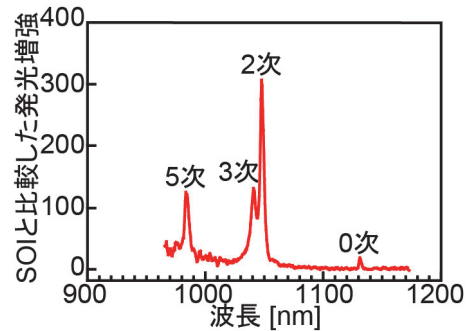


図5 光ナノ共振器によるシリコンからの発光増強スペクトル

各共振モードにおける共振器 Q 値, モード体積, 放射パターンと発光強度の振る舞いを詳細に調べた結果, 共振モードにおいて, 発光に競合する付加的損失に対して外部への結合が強く, 放射パターンが実験光学系へ効果的に結合できることが, 発光増大の主な起源となっていることが示された. これに関連して, 光ナノ共振器モードの外部からの結合の強さを調べるための反射測定法を確立した.

(3) 光ナノ構造による新たなシリコンからの発光増強メカニズムの可能性の見い

励起強度を変化させた際の特徴を調べたところ, 励起強度が増大するにつれ, 発光増強度がさらに増大することが図6のように見出された. ここで, シリコンをはじめ間接遷移型半導体で重要となるフォノンの影響を検出するため, 顕微ラマン分光測定を光ナノ

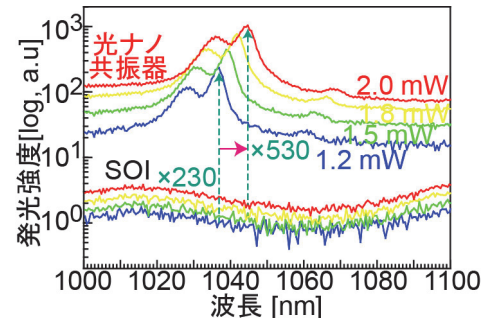


図6 励起強度を変化させた際のシリコン光ナノ共振器とSOI ウエハからの発光スペクトル

共振器に対して行ったところ、励起強度が増大するにつれて、図7のようにラマンスペクトルの線幅の増大が観察された。この結果から、顕微光励起に伴うシリコンの局所的な温度上昇に起因する局所歪の発生や表面状態の変化等により、シリコンの発光遷移を制限している波数選択則が緩和するため、シリコン光ナノ共振器からの発光強度が一層増大する、という新たな発光増強メカニズムの可能性を見出すに至った。

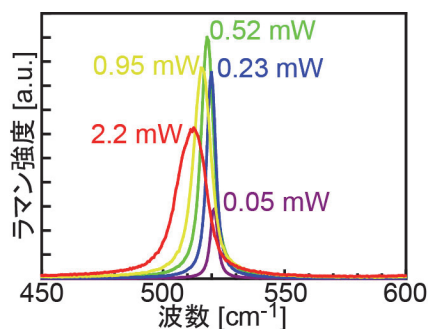


図7 励起強度を変化させた際のシリコン光ナノ共振器のラマンスペクトル

(4) 光ナノ構造シリコンでの表面処理法の探索と非発光過程抑制の有用性の実証

光ナノ構造を形成したシリコンの時間分解フォトルミネッセンスを評価したところ、そのキャリア寿命はナノ秒と短く、非発光過程が支配的であることが判明した。

そこで、光ナノ構造によるシリコンからの発光増大効果を一層有効に活かすべく、発光過程に競合する非発光過程の低減のための表面処理技術の検討を進めた。HWA 処理をフォトニック結晶へ適用した結果、圧力が 1.3 MPa のとき、表面粗さが発生せず、処理が可能であった。一方、3.9 MPa では約 4 nm の粗さが発生し、プロセス圧力が重要であることを見いだした。そして、シリコンフォトニック結晶へ HWA 処理を適用したところ、図8に示すように、発光強度が約6倍増大した。

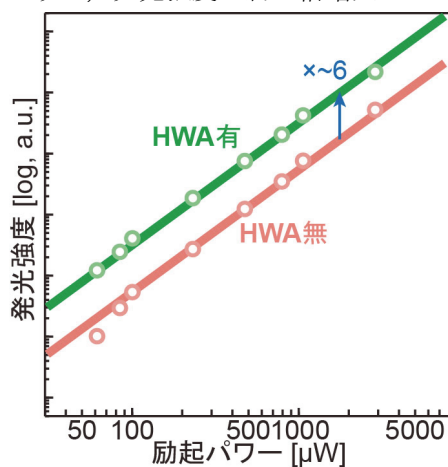


図8 HWA 処理の有無で生じたシリコンフォトニック結晶からの発光強度の差

その発光強度増大の起源を調べるため、様々な格子定数をもつフォトニック結晶を時間分解フォトルミネッセンス測定により、キャリアダイナミクス評価した結果、HWA 法による表面処理法が有効に働き、表面再結合速度 v_s が約 0.4 倍に低減したためである、ということが、図9のように確認できた。

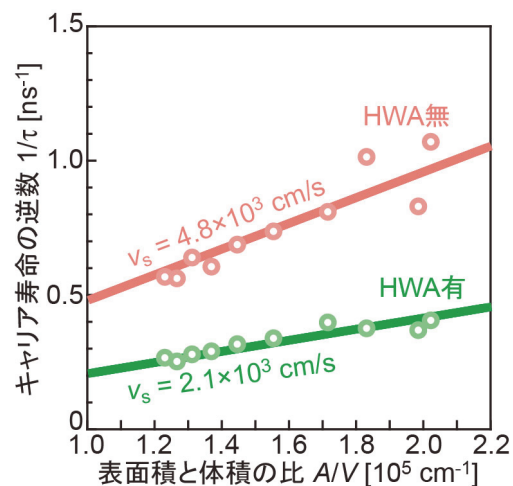


図9 高圧水蒸気アニールの有無でのシリコンフォトニック結晶の表面再結合速度の見積

また、別途実験を行った光ナノ構造をもつ発光ダイオードにおいても、非発光過程の抑制が発光効率の向上に対して、非常に有用であることが明らかになった。

以上のように本研究では、将来のシリコン発光デバイス応用にとって、光ナノ構造が有用であることを示すことができた。

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9件)

- ① M. Fujita, B. Gelloz, N. Koshida and S. Noda, “Reduction of surface recombination and enhancement of light emission in silicon photonic crystals treated by high-pressure water-vapor annealing”, Appl. Phys. Lett., vol. 97, no. 12, Art. No. 12111, 2010. (査読有)
<http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/130696>
- ② W. Stumpf, T. Asano, T. Kojima, M. Fujita, Y. Tanaka, and S. Noda, “Reflectance measurement of two-dimensional photonic crystal

nanocavities with embedded quantum dots”, Phys. Rev. B, vol. 87, no. 7, Art. No. 075119, 2010. (査読有)

- ③ 富士田誠之, 野田進, “フォトニック結晶発光素子=フォトニック結晶を利用した超高効率発光素子へ向けて=”, 光アライアンス, vol.24, no.4, pp.14-19 2010. (査読無)
- ④ 酒井恭輔, 田中良典, 富士田誠之, 野田進, “フォトニック結晶技術の最新展開”, 工業材料, vol.58, no.3, pp.41-45, 2010. (査読無)
- ⑤ S. Noda and M. Fujita, “Photonic crystal efficiency boost”, Nature Photon., vol. 3, no. 3, pp.129-130, 2009. (査読無)
- ⑥ 浅野卓, 山口真, 高橋和, 富士田誠之, 野田進, “フォトニック結晶による究極的な発光制御”, オプトロニクス2月号, vol. 28, no. 2, pp. 128-137, 2009. (査読無)
- ⑦ 富士田誠之, 田中良典, 野田進, “フォトニックナノ構造をもつシリコンからの発光現象=フォトニック結晶・ナノ共振器によるシリコンの発光制御=”, 光アライアンス, vol. 20, no. 1, pp. 8-13, 2009. (査読無)
- ⑧ 富士田誠之, 野田進, “フォトニック結晶を用いた発光制御”, 照明学会誌, vol. 92, no. 10, pp. 699-704, 2008. (査読無)
- ⑨ M. Fujita, Y. Tanaka and S. Noda, “Light emission from silicon in photonic crystal nanocavity”, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 14, no. 4, pp. 1090-1097, 2008. (査読有) <http://repository.kulib.kyoto-u.ac.jp/dspace/handle/2433/84557>

[学会発表] (計 20 件)

- ① M. Fujita, B. Gelloz, N. Koshida and S. Noda, “Reduction of surface recombination and enhancement of light emission in silicon photonic crystals treated by high-pressure

water-vapor annealing”, 7th International Conference on Group IV Photonics (GFP2010), Beijin, no. FB6, September, 2010.

- ② M. Fujita and S. Noda, “Light emission control by photonic crystals”, 15th Optoelectronic and Commun. Conf (OECC2010)., Sapporo, no. 7D-4-2, July, 2010. (invited).
- ③ 北川均, 須藤俊英, 富士田誠之, 浅野卓, 野田進, “活性層貫通型 GaInN フォトニック結晶のフォトルミネッセンスの温度依存性”, 第 57 回春季応物学会, 平塚, 19p-M-11, March, 2010.
- ④ 富士田誠之, Bernard Gelloz, 越田信義, 野田進, “高圧水蒸気アニール処理を行ったシリコンフォトニック結晶の発光特性”, 第 57 回春季応物学会, 平塚, 19-p-M9, March, 2010.
- ⑤ Wolfgang Stumpf, 浅野卓, 中村達也, 児島貴徳, 小島一信, 富士田誠之, 野田進, “ナノ共振器の Q 値の反射増強効果とそのモデル”, 第 70 回秋季応物学会, 富山, 9a-B-8, September, 2009.
- ⑥ 北川均, 須藤俊英, 小暮竜矢, 富士田誠之, 浅野卓, 野田進, “活性層貫通型 GaInN フォトニック結晶発光ダイオードの時間分解電流注入発光”, 第 70 回秋季応物学会, 富山, 8p-B-17, September, 2009.
- ⑦ 富士田誠之, 野田進, “光ナノ構造フォトニック結晶による発光制御”, ナノオプティクス研究グループ第 18 回研究討論会, 京都, July, 2009. (招待講演)
- ⑧ T. Kojima, W. Stumpf, T. Asano, K. Kojima, H. Inoue, M. Yamaguchi, T. Nakamura, M. Fujita, and S. Noda, “ Reflectance measurement of two-dimensional photonic crystal cavities including quantum dots”, 第 28 回電子材料シンポジウム (EMS28), 守山, J-16, July, 2009.
- ⑨ M. Fujita, H. Kitagawa, T. Suto, Y. Kurokawa, T. Asano and S. Noda,

- “Green GaInN photonic-crystal light-emitting-diodes”, 第28回電子材料シンポジウム (EMS28), 守山, J-8, July, 2009.
- ⑩ 富士田誠之, 田中良典, 野田進, “フォトニック結晶・ナノ共振器によるシリコンからの発光増大現象”, 第56回春季応物学会, つくば, 31p-ZT-5, March, 2009. (招待講演)
- ⑪ 北川均, 黒川要一, 須藤俊英, 富士田誠之, 浅野卓, 野田進, “活性層貫通型 GaInN フォトニック結晶発光ダイオードの電流注入動作”, 第56回春季応物学会, つくば, 31a-ZN-9, March, 2009.
- ⑫ W. Stumpf, T. Asano, T. Kojima, M. Fujita, Y. Tanaka, and S. Noda, “Q-factor evaluation and slab coupling effect of photonic crystal nanocavities via reflectance”, 2nd GCOE International Symposium on Photonics and Electronic Science and Engineering, Kyoto, March, 2009.
- ⑬ M. Fujita, Y. Tanaka, Y. Takahashi, T. Asano and S. Noda, “Manipulation of Photons by Silicon Photonic Crystals”, 1st International Conference on Silicon Photonics, Tokyo, January, 2009 (Invited).
- ⑭ M. Fujita, H. Kitagawa, T. Suto, Y. Kurokawa, Y. Tanaka, T. Asano and S. Noda, “Green GaInN photonic crystal structure with small surface recombination effect”, The 2nd IEEE Nanotechnology Materials and Device Conference 2008 (NMDC2008), Kyoto, no. MoC-I2, October, 2008.
- ⑮ M. Fujita, Y. Tanaka and S. Noda, “Enhanced light emission from silicon photonic crystal nanocavity”, 5th International Conference on Group IV Photonics (GFP2008), Sorrento, no. FA6, September, 2008.
- ⑯ Wolfgang Stumpf, 浅野卓, 児島貴徳, 富士田誠之, 田中良典, 野田進, “反射スペクトルによるフォトニックナノ共振器の評価”, 第69回秋季応物学会, 春日井, 3p-V-13, September, 2008.
- ⑰ 高橋和, 田中良典, 富士田誠之, 浅野卓, 野田進, “2次元フォトニック結晶ナノ共振器の顕微ラマン分光測定 (II)”, 第69回秋季応物学会, 春日井, 3p-V-10, September, 2008.
- ⑱ 富士田誠之, 田中良典, 高橋和, 野田進, “強励起条件におけるシリコンフォトニック結晶ナノ共振器の発光増強現象”, 第69回秋季応物学会, 春日井, 2p-V-11, September, 2008.
- ⑲ M. Fujita, H. Kitagawa, T. Suto, Y. Kurokawa, Y. Tanaka, T. Asano and S. Noda, “Green-emitting GaInN photonic crystal”, 第27回電子材料シンポジウム (EMS27), 伊豆, H-2, July, 2008.
- ⑳ M. Fujita, Y. Tanaka and S. Noda, “Light-emission properties in silicon photonic crystals and nanocavities”, 8th International Conference on Physics of Light-Matter Coupling in Nanostructures (PLMCN8), Tokyo, no. TuA-4, April, 2008.

〔図書〕 (計2件)

- ① 富士田誠之, 野田進, “フォトニックナノ構造の最近の進展 (分担, 第4編第3章「フォトニック結晶効果」)”, シーエムシー出版, 2011年3月発刊.
- ② 富士田誠之, 野田進, “ナノシリコンの最新技術と応用展開 (分担, 第1章2節「シリコンフォトニック結晶」)”, シーエムシー出版, 2010年6月発刊.

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.qoe.kuee.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

富士田 誠之 (FUJITA MASAYUKI)

京都大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号: 40432364