

機関番号：14301

研究種目：若手研究 (A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20686007

研究課題名 (和文) フォトニック結晶とサブバンド間遷移の融合による熱輻射制御の研究

研究課題名 (英文) Thermal radiation control based on photonic crystals and intersubband transitions

研究代表者

浅野卓 (ASANO TAKASHI)

京都大学大学院 工学研究科・准教授

研究者番号：30332729

研究成果の概要 (和文)：本研究ではフォトニック結晶による光の制御と量子井戸のサブバンド間遷移による電子の制御とを融合させ、両者の相互作用の有限性を考慮した検討を行うことにより、所望の波長帯域においてのみ発光する効率的な熱輻射光源を実現した。作製したデバイスは電流注入動作時に、同一入力パワーにおいて同様の構造の黒体試料と比較して2倍のピーク強度の輻射を示した。

研究成果の概要 (英文)：We have achieved a very narrow band and strong thermal radiation peak in a design wavelength by using intersubband transitions in quantum wells and two-dimensional photonic crystals. The fabricated device shows twice the spectral peak intensity of the reference blackbody sample under the same input power condition.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2009年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2010年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
年度			
年度			
総計	14,800,000	4,440,000	19,240,000

研究分野：光量子電子工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用工学・量子光工学

キーワード：フォトニック結晶、熱輻射

1. 研究開始当初の背景

熱輻射光源は照明用白熱電球、加熱用光源、光学分析用光源等、様々な分野で広く利用されている発光デバイスであり、蛍光灯や発光ダイオード等と比較して簡便にかつ広い波長域の光を生成することができるという利点をもつ。しかし、その広い発光波長帯域は逆に不必要な波長成分をも多く含むことを意味するため、エネルギー利用効率の低さが問題点になっている。ここで、最初から所望の波長帯域のみで発光する効率的な熱輻射光源が実現できれば、例えば可視光のみを発する照明用光源やターゲットの分子の吸収波長のみを輻射する分析用光源等、その応用

可能性は非常に大きいと考えられる。

熱輻射を抑制するアイデア自体は既に1989年に最初の提案がなされている。(J. F. Waymouth, *J. Light & Vis. Env.*, **13** (1989) 51.)。これは「理想的な熱輻射光源である黒体の輻射スペクトルが光の状態密度とボース・アインシュタイン分布関数の積で与えられるのであるから、微小な空洞共振器を用いて共振器の寸法よりも長波長側の光の状態密度を制限すれば、長波長域の熱輻射を抑制できるだろう」というものであった。その後、実験的にも検討が進められ、片端が解放された金属製空洞共振器 (例えば F. Kusunoki, ..., T. Kobayashi, *JJAP*, **43** (2004)

5253.)、金属製 3 次元フォトニック結晶 (例えば S. Y. Lin, ..., I. E-Kady, APL, **83**(2003) 593.) 等の研究結果が報告されていた。これらの報告では熱輻射スペクトルに光の状態密度に起因すると考えられるスペクトル構造が観測されているものの、熱輻射を実用的に十分なほど制御できているとは言えず、また理論の面において定量的な検討が十分とは言えない状況だった。

2. 研究の目的

上述の背景のもと、研究代表者はこれまでの研究の問題点は、微細構造をもつ熱輻射光源をその理想極限である黒体として扱い、輻射スペクトルが光の状態密度によってのみ決まると仮定していたことにあったと考えた。理想状態である黒体とは異なり、実際の微細構造をもつ熱輻射光源では、構造の微細さ故に光の外部への漏れが無視できず、物質と光子が相互作用できる時間は有限と考える必要がある。これを考慮すると、黒体のように共振器内部の光モードが全波長帯域において物質と熱平衡状態にあると考えることはできない。一般に両者の相互作用は波長によって異なるので、相互作用が強かつ相互作用時間が長い波長ほど光子は電子との熱平衡状態に近づき、逆の状況では熱平衡状態から遠くなる。さらに輻射強度は共振器モードの平均光子数と相互作用時間(=光子寿命)の逆数との積で決まるため、相互作用強度・時間と輻射強度は密接な関係を持つと考えられる。微小な熱輻射源を考える上で、この点を無視して黒体を仮定しては、物理現象を正確に把握できず、その結果、熱輻射特性の制御を行うことも困難であると言える。また、この相互作用の波長依存性を積極的に利用すれば光の状態制御の側からだけでなく、物質の状態制御の側からも熱輻射を制御でき、より制御の自由度が広がると考えられた。そこで、この相互作用の強度・および時間を最適に制御することにより、エネルギー利用率の高い熱輻射光源を実現することを目的に本研究は提案・遂行された。

3. 研究の方法

このような背景のもと、本研究では物質側と光子側の両方に人工的な制御を行い、両者の相互作用の有限性を考慮した最適化を行って熱輻射を強力に制御することを試みた。具体的には、(A)熱輻射源の構成材料としてサブバンド間遷移を生じる半導体量子井戸を用い、(B)その半導体量子井戸自体を積層したスラブを 2 次元フォトニック結晶に加工して微小共振器を形成した。サブバンド間遷移は特定の波長に集中したローレンツ型の強い吸収スペクトルを示し、か

つ量子井戸の幅や障壁の高さによって遷移波長を制御できるため、必要な波長でのみ光との相互作用が強くなるように物質側の状態を制御するのに最適である。またフォトニック結晶により、広い波長で光と相互作用する金属を用いることなく光を閉じ込めることが可能になり、量子井戸を用いた物質側の制御の効果を減らすことなく、共振器を形成して共振波長、共振器体積、光子寿命、光放射パターン等の光子側の状態を制御できる。さらに、物質と光の相互作用の有限性を考慮した熱輻射特性の解析理論を構築し、それに基づいてサブバンド間遷移およびフォトニック結晶を用いた二方面からの制御を最適化することも試みた。実験的には、第一段階として外部ヒータによる加熱によって作製した狭線幅の熱輻射デバイスの特性を測定することを試み、最終的には電流注入による発光を狙った。

4. 研究成果

(1) 2008 年度は基本理論を構築し、またサブバンド間遷移のみによる熱輻射制御特性を明らかにすることを目指して研究を行った。

①サブバンド間遷移を多数の 2 準位電子系で近似し、これらがフォトニック結晶によって作り出される単一光モード (共振器モード) と相互作用し、かつ 2 準位電子系は半導体結晶の格子振動をモデル化した熱浴 A と相互作用し、共振器モードはフォトニック結晶外の多数の自由空間光モード (熱浴 B) と相互作用するモデルとした。これに対して量子ランジュバンの手法を用いて解析を行い、熱輻射率スペクトル $\varepsilon(\omega)$ を表す方程式を得た。

$$\varepsilon(\omega) = \pi \frac{\omega_{cav}}{\omega} \frac{\gamma_{cav}\gamma_{abs}}{(\omega - \omega_{cav})^2 + (\gamma_{cav} + \gamma_{abs})^2}$$

ここで γ_{cav} は共振器の光が外部空間へ放射されることによる共振器内光振幅の減衰定数、 γ_{abs} は共振器の光が 2 準位電子系によって正味吸収 (誘導吸収と誘導放出の差) されることによる減衰定数、 ω_{cav} は共振器の共振周波数である。これにより、共振器と 2 準位電子系を用いて熱輻射の線幅や強度を制御できることが理論的に確認され、また $\gamma_{cav} = \gamma_{abs}$ のとき最大のピーク輻射率 $\pi/4 \approx 0.8$ が得られることが分かった。

②n 型 AlGaAs/GaAs 量子井戸を用いてサブバンド間遷移の熱輻射制御特性を実験的に調べた。AlGaAs 障壁層の Al 組成は 0.3 程度とし、GaAs 井戸層の幅を 9nm から 4.5nm まで変化させた。試料の吸収スペクトルと 100°C 程度に加熱した際の発光スペクトルをフーリエ変換赤外分光計を用いて観測した (図 1)。その結果、半値幅 10~20meV の狭い単一ピーク

クの吸収に対応した発光スペクトルが得られ、またそのピーク波長は井戸幅に応じて $12\ \mu\text{m}$ から $7\ \mu\text{m}$ まで変化することが分かった、これにより、サブバンド間遷移を用いた電子の遷移スペクトルの制御を通して、熱輻射スペクトルの制御が可能であることが実証された。

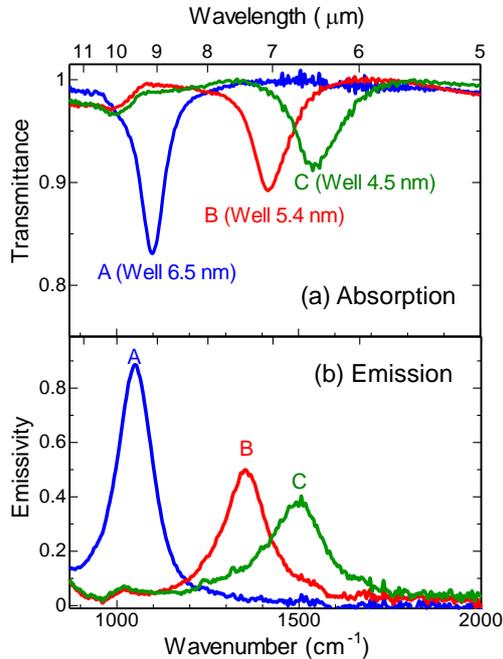


図 1: 量子井戸サブバンド間遷移による吸収 (a) と熱輻射 (b) の実験結果

(2) 2009 年度はサブバンド間遷移を示す量子井戸を含むウェハーにフォトニック結晶を形成して狭線幅の熱輻射を実現することを目指して研究を行った。

① 波長 $9.7\ \mu\text{m}$ のサブバンド間遷移を示す n 型 AlGaAs (46ML) / GaAs (24ML) 量子井戸 64 層からなるウェハ (基板を含む厚さ $650\ \mu\text{m}$) の表面に、格子定数 $2\sim 16\ \mu\text{m}$ の三角格子フォトニック結晶を形成した試料を作製し、試料を 90°C に加熱して垂直方向に放射される輻射のスペクトルを測定した。その結果、フォトニックバンド構造の 2 次と 3 次の Γ 点が重なる領域において強い発光が得られることが分かった。(図 2、3) しかし、この構造では基板が厚いためにマルチモードとなり、発光線幅の制御ができなかった。

② 上述のウェハーの量子井戸部分に 2mm 角のフォトニック結晶を形成し、その後、フォトニック結晶下部の基板部分をウェットエッチングによって除去することにより、厚さ約 $1.8\ \mu\text{m}$ の薄板フォトニック結晶を作製した。この構造では伝搬モードがシングルモードになる。上と同様に試料を加熱して垂直方向の熱輻射スペクトルを測定したところ、モードが一つしかないことを反映して 2 次の Γ 点

に相当する狭い線幅のピークが得られた。その線幅は元々のサブバンド間発光の線幅の半分以下であった。(図 4)

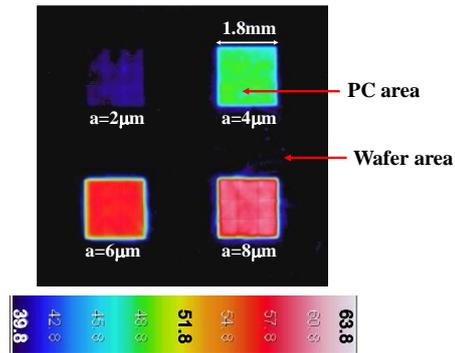


図 2: 基板付フォトニック結晶の熱輻射像

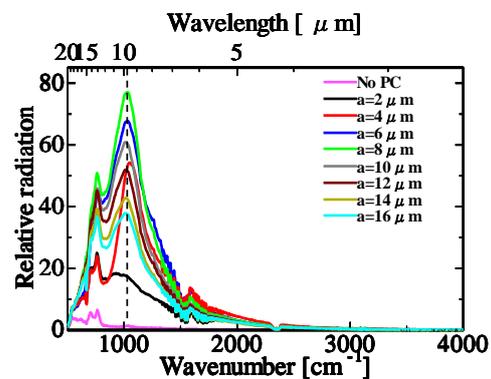


図 3: 基板付フォトニック結晶の発光スペクトル

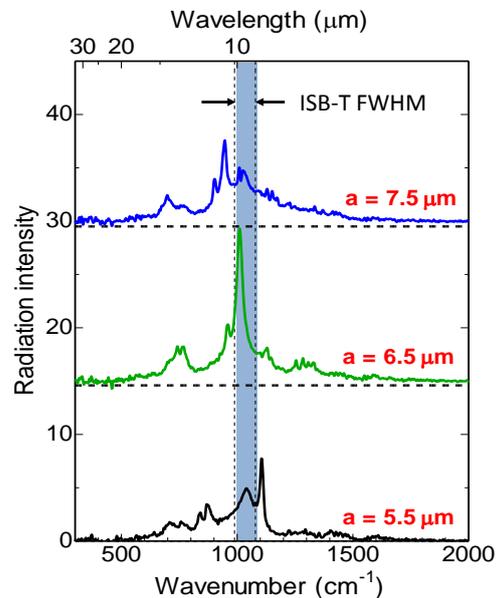


図 4: フォトニック結晶スラブからの熱輻射スペクトル

(3) 2010 年度はデバイス構造の最適化と電流注入デバイスの実現、そして放射パターン測定を行うことを目指して研究を行った。

①電流注入による発光を実現するべく、昨年度実現したサブバンド間遷移を示す量子井戸ウエハにフォトニック結晶スラブ(2.4mm角、厚さ1.8 μm)を形成したチップ(3mm角)の枠部分に2カ所の電極を形成し、2本の金属ワイヤーを用いてチップを空中につり下げる構造のデバイスを作製した。金属ワイヤーを細長くして熱伝導損失を抑制し、またデバイス周辺を真空にして対流による損失を抑制した。またスラブを支える枠部分および電極部分を小さくして余分な輻射損失を低減した(図5)。これにより、同一注入電力において同様の構造の疑似黒体試料の2倍のピーク輻射強度を示す狭帯域(中心光子エネルギー128meV、線幅4.5meV)の熱輻射光源の実現に成功した(図6)。これは、本デバイスは余分な帯域での輻射が抑制されているため、同一の注入電力に対して黒体試料よりも高温(黒体が88 $^{\circ}\text{C}$ に対して、本試料は174 $^{\circ}\text{C}$)になったためであり、同じ温度の黒体強度を超えているわけではない。つまり、不要な帯域の輻射で失っていたエネルギーを必要な帯域に集中できたといえる。

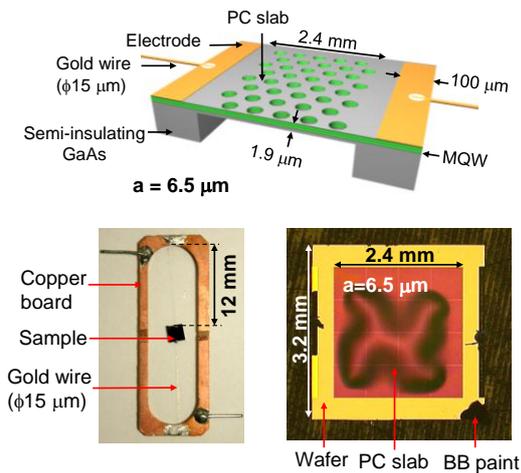


図5: 電流注入デバイスの構造

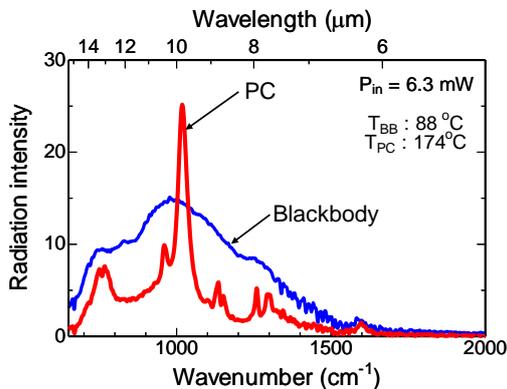


図6: 電流注入デバイスの発光スペクトル

②上述のデバイスの放射角度特性を測定するため、集光角の小さなレンズ($\sim 10^{\circ}$)を用いて FTIR 分光器に発光を取り込む光学系を構

築し、デバイスの角度を変えながら発光スペクトルを測定した。その結果、デバイスからの熱輻射がフォトニック結晶のバンド構造を反映していることを観測することに成功した。また輻射ピーク強度の角度依存性を評価したところ、強度が半分になる角度全幅が 22° と非常に狭いことが分かった。つまり、不必要な方向への熱輻射を抑制できていることが確認できた。

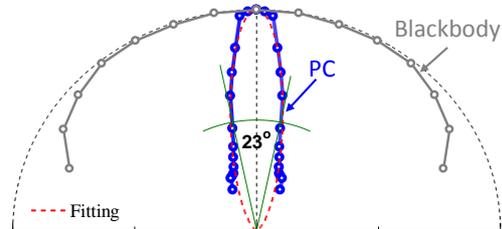


図7: 輻射率の角度依存性

③別種のフォトニック結晶構造の可能性を探るため、サブバンド間遷移の偏光方向である TM 偏光モードに対してバンドギャップの開く三層積層型のフォトニック結晶を検討し、その作製に成功した。

以上、本研究では3年間の成果として当初の目標であった電流注入型の狭帯域、狭出射角の高効率な熱輻射光源を実現することに成功した。これは物体の持つ熱エネルギーを必要な帯域のみからなる熱輻射に変換する技術の基礎を確立したと言え、エネルギーの有効利用の観点から非常に有用な成果と言える。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 14 件)

- ① Y. Tanaka, T. Asano and S. Noda: "Design of Photonic Crystal Nanocavity with Q-factor of $\sim 10^9$ ", IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology, Vol. 26, No. 11, pp. 1532-1539 (2008) (invited) (proceedings).
- ② M. Yamaguchi, T. Asano, M. Fujita, and S. Noda: "Theoretical analysis of light emission from a coupled system of a photonic nanocavity and a quantum dot", Physica Status Solidi c, Vol. 5, No. 9, pp. 2828-2830 (2008).
- ③ Y. Takahashi, Y. Tanaka, H. Hagino, T. Asano, and S. Noda: "Higher-order resonant modes in a photonic heterostructure nanocavity", Applied Physics Letters, Vol. 92, No. 241910, pp. 1-3 (2008).
- ④ M. Yamaguchi, T. Asano, and S. Noda: "Photon emission by nanocavity-enhanced quantum anti-Zeno effect in

- solid-state cavity quantum-electrodynamics”, *Optics Express*, Vol.16, No.22, pp.18067–18081 (2008).
- ⑤ J. Upham, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: “Dynamic increase and decrease of photonic crystal nanocavity Q factors for optical pulse control”, *Optics Express*, Vol.16, No.26, pp.21721–21730 (2008).
- ⑥ H. Hagino, Y. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: “Effects of fluctuation in air hole radii and positions on optical characteristics in photonic crystal heterostructure nanocavities”, *Physical Review B*, Vol.79, pp.085112–1–085112–8 (2009).
- ⑦ B. S. Song, T. Nagashima, T. Asano, and S. Noda: “Resonant-wavelength tuning of a nanocavity by sub-nanometer control of a two-dimensional silicon-based photonic crystal slab structure”, *Applied Optics*, Vol.48, No.26, pp.4899–4903 (2009).
- ⑧ Y. Takahashi, Y. Tanaka, H. Hagino, T. Sugiya, Y. Sato, T. Asano, and S. Noda: “Design and demonstration of high-Q photonic heterostructure nanocavities suitable for integration”, *Optics Express*, Vol.17, No.20, pp.18093–18102 (2009).
- ⑨ T. Asano, K. Mochizuki, M. Yamaguchi, M. Chaminda, and S. Noda: “Spectrally selective thermal radiation based on intersubband transitions and photonic crystals”, *Optics Express*, Vol.17, No.21, pp.19190–19203 (2009).
- ⑩ M. Yamaguchi, T. Asano, K. Kojima, and S. Noda: “Quantum electrodynamics of a nanocavity coupled with exciton complexes in a quantum dot”, *Physical Review B*, Vol.80, No.15, pp.155326–155335 (2009).
- ⑪ Y. Tanaka, S.-I. Takayama, T. Asano, Y. Sato, and S. Noda: “A Polarization Diversity Two-Dimensional Photonic-Crystal Device”, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol.16, No.1, pp.70–76 (2010).
- ⑫ J. Upham, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda: “On-the-fly Wavelength conversion of photons by dynamic control of photonic waveguides”, *Appl. Phys. Exp.*, Vol. 3, Art. No. 062001(1–3) (2010).
- ⑬ W. C. 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. 82, no. 7, Art. No. 075119 (2010).
- ⑭ H. Kitagawa, M. Fujita, T. Suto, T. Asano, and S. Noda: “Green GaInN photonic-crystal light-emitting diodes with small surface recombination effect”, *Applied Physics Letters*, vol.98, issue 18, art. no. 181104 (2011).
- [学会発表] (計 13 件)
- ① T. Asano and S. Noda: “New Trends in Photonic Crystals”, UK Semiconductor 2009, Sheffield University, Sheffield, United Kingdom, Jul. 1–2 (2009) (Plenary).
- ② M. De Zoysa, T. Asano, and S. Noda: “Control of thermal radiation using intersubband transitions in quantum wells”, The 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18) and the 14th International Conference on Modulated Semiconductor structures (MSS-14), Tu-mP38, Kobe International Conference Hall, Kobe, Jul. 19–24 (2009) (poster).
- ③ T. Asano and S. Noda: “High-Q Nanocavities in Two-Dimensional Photonic Crystal Slabs and their Dynamic Control”, International Workshop on Microcavities and Their Application, Seoul University, Seoul, South Korea, Aug. 25–28 (2009) (Invited).
- ④ M. De Zoysa, T. Asano, Y. Minato, and S. Noda: “Control of Thermal Radiation by Intersubband Transitions in Quantum Wells and Two-Dimensional Photonic Crystals”, The Conference on Lasers and Electro-Optics and the International Quantum Electronics Conference 2010, CTuH4, San Jose McEnery Convention Center, San Jose, California, USA, May 16–21 (2010).
- ⑤ T. Asano, J. Upham, Y. Tanaka, and S. Noda: “Pulse selection by on-the-fly wavelength conversion in 2D photonic crystals”, 2010 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM2010), D-4-2, University of Tokyo, Tokyo, Japan, Sep. 22–24 (2010).
- ⑥ T. Asano and S. Noda: “Dynamic control

of photonic crystals”, Photonics Global Conference 2010 (PGC2010), 3-1C-2, Suntec City, Singapore, Dec. 14-16 (2010).

- ⑦ De Zoysa Menaka, 望月敬太, 浅野卓, 野田進: “量子井戸のサブバンド間遷移と2次元フォトリック結晶スラブによる熱輻射の制御”, 2008年秋季第69回応用物理学学会学術講演会, 2pV7, 中部大学, 愛知県春日井市, 2008年9月2日.
- ⑧ De Zoysa Menaka, 浅野卓, 野田進: “量子井戸のサブバンド間遷移と2次元フォトリック結晶による熱輻射の制御- (2)”, 2009年春季第56回応用物理学関係連合講演会, 1aZ1, 筑波大学, つくば市, 2009年4月1日.
- ⑨ M. De Zoysa, T. Asano, and S. Noda: “Intersubband transitions in quantum wells for controlling thermal radiation spectrum”, 第28回電子材料シンポジウム, J-15, ラフォーレ琵琶湖, 守山, 日本, Jul. 8-10 (2009) (poster).
- ⑩ De Zoysa Menaka, 湊康明, 浅野卓, 野田進: “量子井戸のサブバンド間遷移と2次元フォトリック結晶による熱輻射の制御(3)”, 2009年秋季第70回応用物理学関係連合講演会, 9pB11, 富山大学, 富山県富山市, Sep. 8-11 (2009).
- ⑪ De Zoysa Menaka, 湊康明, 浅野卓, 野田進: “量子井戸のサブバンド間遷移と2次元フォトリック結晶による熱輻射の制御-(4)”, 2010年春季第57回応用物理学関係連合講演会, 19pM13, 東海大学, 平塚市, 2010年3月19日.
- ⑫ De Zoysa Menaka, 浅野卓, 湊康明, 野田進: “電子系・光子系の状態制御に基づく高効率熱輻射光源を用いた熱光発電”, 2010年春季第57回応用物理学関係連合講演会, 19pM16, 東海大学, 平塚市, 2010年3月19日.
- ⑬ De Zoysa Menaka, 湊康明, 浅野卓, 野田進: “量子井戸のサブバンド間遷移と2次元フォトリック結晶を用いた電流注入型熱輻射光源の開発”, 2010年秋季第71回応用物理学学会学術講演会, 17p-J-7, 長崎大学 文教キャンパス, 長崎市, 2010年9月17日.

[図書] (計1件)

- ① シーエムシー出版: フォトリックナノ構造の最前線 (監修: 野田進) 第2章の1および第7章

[産業財産権]

○出願状況 (計1件)

名称: 2次元フォトリック結晶熱輻射光源
発明者: 野田進、望月敬太、浅野卓、北川均

種類: 特許

番号: 特開 2008-53134

出願年月日: 2006年8月28日

国内外の別: 国内

○出願状況 (計1件)

名称: 2次元フォトリック結晶

発明者: 野田進、浅野卓、望月敬太

種類: 特許

番号: 特開 2008-241891

出願年月日: 2007年3月26日

国内外の別: 国内

○取得状況 (計0件)

[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

浅野 卓 (ASANO TAKAHI)

研究者番号: 30332729

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし