

日本学士院賞 受賞者 野の 田 進すすむ



専攻学科目 光子電子工学

生 年 月 昭和三五年 三月

略 歴 昭和五七年 三月

同 五九年 三月

同 五九年 四月

同 六三年 四月

平成 三年一月

同 四年 三月

同 一二年 五月

同 一八年 三月

同 二一年 四月

京都大学工学部電気工学科卒業

京都大学大学院工学研究科修士課程修了

三菱電機（株）中央研究所基礎研究部主員

京都大学工学部助手

博士（工学）

京都大学工学部助教授

京都大学大学院工学研究科教授（現在に至る）

ベルギー・セント大学名誉博士号

京都大学大学院工学研究科附属光・電子理工学教育研究センター長（併任、現在に至る）

博士(工学)野田 進氏の「フォトニック

結晶による光制御法の極限的開拓と半導

体レーザ高度化への応用」に対する授賞

審査要旨

計測・通信・照明・加工などの諸分野で、光は極めて重要な役割を果たしており、光波を高度に制御するための技術の開拓が内外で活発に行われてきている。そうした中で、野田 進氏は、フォトニック結晶と呼ぶ人工構造に関する研究を先導し、光波を極限的に制御する手法を開拓するとともに、これを半導体レーザの高度化に応用する先駆的・先導的研究を行ってきた。ここで、フォトニック結晶とは、光の波長程の周期で屈折率を空間的に変化させた構造のことであり、原子を規則的に並べた通常の結晶において電子波が制御され、種々の物性が生じるのと同様、光波の制御により、多様な機能の出現が期待されている。まず、野田氏は、理論的提案と解析に留まっていた「完全三次元フォトニック結晶」を初めて実現して、特定波長の光が全方向に伝搬不能となることを示し、この構造に発光体や人工的な周期性の乱れを適切に導入することにより、自然放

出光の抑制や増強、さらには三次元的な光伝搬制御ができることを実証した「主要論文1-8」。

野田氏は、この「完全三次元フォトニック結晶」の研究を、次の一つ低い「二次元フォトニック結晶」に発展させ、三次元フォトニック結晶を遥かに凌ぐ光制御が実現できることを示した「主要論文9-20」。具体的には、上下を自由空間に挟まれた厚さ数百nmの誘電体薄膜に対し、屈折率を二次元的に変化させた二次元フォトニック結晶を作り込み、その中に周期性を線状に乱した欠陥を作ること、光波を漏れなく導く導波路が形成でき、点状欠陥を作ること、光波の捕獲と閉じ込めの機能を持つ極微の共振器として働くことなどを示した。さらに、極微共振器の近傍において、屈折率変化をもたらし格子点の位置や大きさを巧妙に制御すれば、共振器に光が閉じ込められる時間が格段に長くなり、共振器のQ値(共振器内部での光波の往復回数)を高める基本指針を明らかにした。この種の工夫を加えた共振器は「Noda's cavity (共振器)」と呼ばれ、共振器電磁力学や量子光学などの基礎光学やレーザ応用において、共振器の基本構造として広く活用されている。最近では、一、〇〇〇万を超えるQ値を持つフォトニック結晶共振器が実現され、Siを素材とする極微のラマン型レーザの発振に活用されている。

野田氏は、フォトニック結晶を埋め込んだ半導体レーザの発明と

開発においても卓越した成果を達成した「主要論文21～35」。通常、半導体レーザーの大出力化には素子の発光面を大面積化する必要があるが、光波モード（振動状態）が多様になるため、ビーム品質が著しく劣化する難点があり、応用上のボトルネックとなっていた。野田氏は、半導体レーザーに二次元のフォトリック結晶を埋め込み、バンド構造の特異点（ Γ 点等）を活用することで、特定の振動状態での発振が支配的となって安定化でき、極めて大きな面積でもコヒーレントな動作が可能となることを示し、ビーム品質が高い高出力レーザー、すなわち、高輝度半導体レーザーを実現可能とした。特に、二つのフォトリック結晶を四分の一周期ずらして重ねた「二重格子フォトリック結晶」という独自構造により、直径が $0.5\mu\text{m}$ 級の大面積レーザーのコヒーレント動作を実現し、 10000 ワット級の高ビーム品質の半導体レーザーを世界で初めて誕生させた。

このフォトリック結晶レーザーは、高出力性に加え、高いビーム品質を備え、回折によるビームの広がりも抑制されるため、レンズ無しの高い分解能を持つ光測距システム（LIDAR）にも応用可能性が示されており、ロボットや自動運転システムの高性能化に大きく貢献すると期待されている。さらに、フォトリック結晶の格子点の孔径や位置を同時に変化させた「複合変調フォトリック結晶」という新たなフォトリック結晶構造の考案により、光ビームを電氣的に二

次元走査することや、顔認証などに使用される構造を持つ照明光の生成にも成功している。フォトリック結晶レーザーは、将来、CO₂レーザーやファイバーレーザーなど、他の大出力レーザーも凌ぐ性能が期待され、計測、加工、照明、通信、医療などの諸分野での貢献を通じ、超スマート社会の実現に資するものと期待されている。

さらに、野田氏は、フォトリック結晶レーザーの研究で得た知見を熱輻射や太陽電池の分野に展開し、新たな可能性を開拓している「主要論文36～40」。熱輻射はスペクトルが広く、応答速度が遅い課題があるが、野田氏は、エネルギーを損失することなく、熱輻射を特定の狭い帯域に集約し、高速変調も可能とする熱輻射制御の新概念を創り出している。

上述のように、野田氏は、完全三次元フォトリック結晶を世界で初めて実現するとともに、二次元フォトリック結晶による高度な光制御手法を創出・実証し、顕著な成果を達成した。さらに、フォトリック結晶を埋め込んだレーザーを発明・開発し、卓越した業績を挙げて、内外の研究を先導する役割を果たしてきており、フォトリック結晶を含む光学・光技術の発展に大きく寄与してきた。それらの成果は、今後の基礎科学の発展と光技術の社会的展開に大きく貢献することが期待される。これらの卓越した学術への貢献と実社会への寄与は真に顕著であり、日本学士院賞に相応しい業績である。

なお、野田氏の研究成果は、五〇〇件を超す学術論文や国際会議発表の形で発表されており、三万件を超す引用を受けるなど、大きな注目を集めている。また、米国光学会フラウンホーファ賞、米国電気電子学会ナノテクノロジーバイオニア賞、江崎玲於奈賞、紫綬褒章、応用物理学会業績賞など、多くの賞を授与されている。

主要論文

A. 完全三次元フォトリック結晶の実現およびそれによる光制御に関するもの

- [1] S. Noda, N. Yamamoto, M. Imada, H. Kobayashi, and M. Okano "Alignment and stacking of semiconductor photonic bandgaps by water-fusion", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 17, No. 11, pp. 1948–1955 (1999).
- [2] A. Chutinan and S. Noda "Highly confined waveguides and waveguide bends in three-dimensional photonic crystal", *Applied Physics Letters*, Vol. 75, No. 24, pp. 3739–3741 (1999).
- [3] S. Noda, K. Tomoda, N. Yamamoto, and A. Chutinan, "Full three-dimensional photonic bandgap crystals at near-infrared wavelengths," *Science*, Vol. 289, No. 5479, p. 604–606 (2000).
- [4] S. Ogawa, M. Imada, S. Yoshimoto, M. Okano, and S. Noda, "Control of light emission by 3D photonic crystals," *Science*, Vol. 305, No. 5681, pp. 227–229 (2004).
- [5] S. Noda, M. Fujita, and T. Asano, "Spontaneous-emission control by photonic crystals and nanocavities" (review paper), *Nature Photonics*, Vol. 1, No. 5479, pp. 449–448 (2007).

- [6] K. Ishizaki and S. Noda, "Manipulation of photons at the surface of three-dimensional photonic crystals," *Nature*, Vol. 460, No. 7253, pp. 367–370 (2009).
- [7] S. Takahashi, K. Suzuki, M. Okano, M. Imada, T. Nakamori, Y. Ota, K. Ishizaki, and S. Noda "Direct creation of three-dimensional photonic crystals by a top-down approach", *Nature Materials*, Vol. 8, No. 9, pp. 721–725 (2009).
- [8] K. Ishizaki, M. Kounmura, K. Suzuki, K. Gondaira, and S. Noda, "Realization of three-dimensional guiding of photons in photonic crystals," *Nature Photonics*, Vol. 7, No. 2, pp. 133–137 (2013).

B. 二次元フォトリック結晶による三次元結晶に勝るとも劣らない光制御に関するもの

- [9] S. Noda, A. Chutinan, and M. Imada, "Trapping and emission of photons by a single defect in a photonic bandgap structure", *Nature*, Vol. 407, No. 6804, pp. 608–610 (2000).
- [10] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda, "High-Q photonic nanocavity in a two-dimensional photonic crystal", *Nature*, Vol. 425, No. 6961, pp. 944–947 (2003).
- [11] B. S. Song, S. Noda, and T. Asano "Photonic devices based on in-plane hetero photonic crystals", *Science*, Vol. 300, No. 5625, p. 1537 (2003).
- [12] B. S. Song, S. Noda, T. Asano and Y. Akahane, "Ultra-high-Q photonic double-heterostructure nanocavity", *Nature Materials*, Vol. 4, No. 3, pp. 207–210 (2005).
- [13] M. Fujita, S. Takahashi, Y. Tanaka, T. Asano, and S. Noda, "Simultaneous inhibition and redistribution of spontaneous light emission in photonic crystals", *Science*, Vol. 308, No. 5726, pp. 1296–1298 (2005).
- [14] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda, "Fine-tuned high-Q photonic-crystal nanocavity", *Optics Express*, Vol. 13, No. 4, pp. 1202–1214 (2005).

- S. Song, J. Gellela, and S. Noda, "Double-lattice photonic-crystal resonators enabling semiconductor lasers with high-brightness and symmetric narrow-divergence beams", *Nature Materials*, Vol. 18, No. 2, pp. 121–128 (2019).
- [33] R. Sakata, K. Ishizaki, M. De Zoysa, S. Fukuhara, T. Inoue, Y. Tanaka, K. Iwata, R. Hatazuda, M. Yoshida, J. Gellela, and S. Noda, "Dually modulated photonic crystals enabling high-power high-beam-quality two-dimensional beam scanning lasers", *Nature Communications*, Vol. 11, paper 3487 (2020).
- [34] R. Morita, T. Inoue, M. De Zoysa, K. Ishizaki, and S. Noda, "Photonic-crystal lasers with two-dimensionally arranged gain and loss sections for high-peak-power short-pulse operation", *Nature Photonics*, Vol. 15, No. 4, pp. 311–318 (2021).
- [35] M. Yoshida, M. De Zoysa, K. Ishizaki, W. Kunishi, T. Inoue, K. Izumi, R. Hatazuda, and S. Noda, "Photonic-crystal lasers with high-quality narrow-divergence symmetric beams and their application to LiDAR" (review paper), *Journal of Physics: Photonics*, Vol. 3, No. 2, paper 022006 (2021).
- 光子結晶を用いた熱輻射制御 太陽電池応用に関する研究
- [36] M. De Zoysa, T. Asano, K. Mochizuki, A. Oskooi, T. Inoue, and S. Noda, "Conversion of broadband to narrowband thermal emission through energy recycling", *Nature Photonics*, Vol. 6, No. 8, pp. 535–539 (2012).
- [37] T. Inoue, M. D. Zoysa, T. Asano, and S. Noda, "Realization of dynamic thermal emission control", *Nature Materials*, Vol. 13, No. 10, pp. 928–931 (2014).
- [38] T. Asano, M. Suemitsu, K. Hashimoto, M. De Zoysa, T. Shibahara, T. Tsutsumi, and S. Noda, "Near-infrared-to-visible highly selective thermal emitters based on an intrinsic semiconductor", *Science Advances*, Vol. 2, No. 12, paper e1600499 (2016).
- [39] K. Ishizaki, M. De Zoysa, Y. Tanaka, S. Ieon, and S. Noda, "Progress in thin-film silicon solar cells based on photonic-crystal structures" (review paper), *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 57, No. 6, paper 060101 (2018).
- [40] T. Inoue, K. Ikeda, B.-S. Song, T. Suzuki, K. Ishino, T. Asano, and S. Noda, "Integrated near-field thermophotovoltaic device overcoming blackbody limit", *ACS Photonics*, Vol. 8, No. 8, pp. 2466–2472 (2021).