

平成17年度科学研究費補助金（学術創成研究費）研究進捗状況報告書

ふりがな		の だ すすむ			所属研究機関 ・部局・職		京都大学・工学研究科・教授	
研究代表者 氏 名		野田 進						
研究 課 題 名	和文	フォトニック結晶工学の深化とその応用に関する研究						
	英文	Evolution of Photonic Crystal Engineering and Its Application						
研究経費 (直接経費) 18年度以降は内納額 単位:千円	平成15年度	平成16年度	平成17年度	平成18年度	平成19年度	総 合 計		
	61,200	63,800	73,600	70,900	68,900	338,400		
研究組織 (研究代表者及び研究分担者)								
氏 名	所属研究機関・部局・職	現在の専門	役 割 分 担 (研究実施計画に対する分担事項)					
野田 進	京都大学・工学研究科・教授	光量子電子工学	基本設計・理論・全体のとりまとめ					
浅野 卓	京都大学・工学研究科・講師	光量子電子工学	各種の光学測定					
今田昌宏	京都大学・工学研究科・助手	光デバイス工学	試料作製・構造評価					
<p>当初の研究目的 (交付申請書に記載した研究目的を簡潔に記入してください。)</p> <p>フォトニック結晶とは、その内部に周期的な屈折率分布をもつ新しい光ナノ構造で、ある特定の波長域において、光の存在そのものを許さないフォトニックバンドギャップをもつことを特長とする。この結晶に対して人為的な欠陥導入(欠陥エンジニアリング)や格子点の構造制御を行うことにより、光を極微小域で漏れなく直角に曲げたり、極微小点に光子を局在させたり、さらには発光現象の完全制御を可能とする等、自在な光子操作が可能になるものと期待される。本研究は、このようなフォトニック結晶による光の自在な制御を目指す新しい学問領域「フォトニック結晶工学」の深化・高度化を目指すものである。</p> <p>研究代表者は、この新しい「フォトニック結晶工学」の分野において、これまで、世界をリードする様々な成果を挙げてきた。例えば (1)世界で最も理想的な特性をもつ完全3次元フォトニック結晶の実現、(2)2次元フォトニック結晶への点・線欠陥導入に基づく極微小域での光子操作の初めての実現(線欠陥を伝播する光子が点欠陥によって捕獲され、自由空間に放射されるという新現象の初めての観察)、(3)フォトニック結晶を用いた全く新しい半導体レーザーの実現、等が挙げられる。本研究では、これらの研究代表者の成果を基礎としつつ、特に2次元フォトニック結晶に重点をおいて、さらなる新しい現象の創出や各種デバイスへの展開を目指す。これにより、「フォトニック結晶工学」の深化、体系化に必要な様々な知見(ナノ加工技術、新しい光子操作技術、新構造・新材料導入、非線形作用、超短パルス制御技術等)を得るとともに、今後の高度情報化社会を支える各種光機能デバイス展開への基礎を築くことを目的とする。</p>								

これまでの研究経過

本研究は、学術創成研究費の趣旨の3つの観点のうち、どの観点到主眼を置いて研究を行っているかについてお書きください。

「創造的・革新的・学際的学問領域を創成する研究」という観点到主眼を置いて進めている。前述のように本研究は、光の波長程度の周期的屈折率分布をもつフォトニック結晶を用いて、光子の自在な制御を目指す新しい学問領域「フォトニック結晶工学」の深化を目指している。フォトニック結晶工学は、従来の光エレクトロニクスとは、全く異なるアプローチ(すなわち、周期的な屈折率分布に基づくフォトニックバンドギャップの存在と、人為的な欠陥導入による光子の操作という全く新しいアプローチ)から光科学の発展に寄与することを目指すもので、まさしく「創造的」かつ「革新的」な学問領域の創成を目指すものと言える。さらに、本学問領域は、フォトニクス、ナノテクノロジー、量子光学、電磁気学、計算機科学、さらには、波及効果として、バイオ・センシング等の幅広い分野に関連する「学際的」な内容を含むものである。

研究の進捗状況について、必要に応じて図表等を用いながら、研究組織内の連携状況を含め、具体的に記入してください。

本研究においては、これまで擬3次元的な光の閉じ込めが可能な2次元フォトニック結晶スラブ(薄板)を主たる研究対象とし、ナノ加工技術から、光子操作技術の深化・高度化、さらには新構造・材料の導入等に至る様々な検討を行い、フォトニック結晶工学の深化・高度化とともに、各種のデバイス応用の基礎を築いてきた。研究は、代表者の野田を中心に、研究室の浅野講師、今田助手、さらにはポストドク、企業からの研究員、博士・修士学生が密接な連携のもとに推進してきた。進捗状況は以下のように纏めることが出来る。

(i) ナノ加工技術の高度化と構造揺らぎの影響の検討

フォトニック結晶工学の深化のためには、ナノ加工技術の確立と、構造揺らぎの影響の定量的な評価が不可欠である。本研究では、実験・理論両面からナノ加工に関する詳細な検討を進めてきた。本予算にて購入した高精度電子顕微鏡(ナノ構造マニピュレーションシステム)や、走査型プローブ顕微鏡等を駆使し、構造揺らぎの定量的な評価を行い、作製技術へのフィードバックを行った。その結果1nmという超高精度の結晶作製技術をほぼ確立にすに至っている。さらに、構造揺らぎが光学特性に与える影響についても定量的な検討を行い、例えば、線欠陥導波路中の光伝搬損失には、バンドギャップ効果の存在しないTMスラブモードへの漏れが主たる原因であることを突き止め、「TMスラブ・ライン」という新しい概念を提唱した。これらの損失を除去するために、 C_{3v} 対称性の格子点をもつ2次元完全結晶の実現が重要であることをも指摘した。

(ii) 光子操作技術の深化・高度化(極微小点への強い光閉じ込め、超短パルス伝搬制御等)

フォトニック結晶における点欠陥(共振器)は、極微小点への光子の閉じ込めを可能とする。また線欠陥(導波路)は、極微小域における光伝搬を可能とする。これら点および線欠陥、およびそれらの複合欠陥による光子操作は、フォトニック結晶工学の根幹をなすものである。本研究においては、まず、最も基本となる点欠陥に如何に強くかつ長く光を閉じ込めることが出来るかに関する検討を行った。その結果、「光を極微小点に強く閉じ込めるためには、逆に緩やかな光閉じ込めが重要である」という逆説的かつ重要な概念を見出すことに成功した。この概念は、英科学誌 *Nature* にも掲載されるとともに、掲載後1年余りの間に53件を超える引用を受けるなど、ナノ領域への光閉じ込めの基本概念が生み出されたと世界的に高く評価されている。

一方、線欠陥導波路における光伝搬を制御し、群速度を極限的に遅く出来れば、光バッファ等を始めとする重要なデバイス応用が期待出来る。本研究において、その重要な一歩となる線欠陥導波路中の光パルス伝搬特性の直接的測定に初めて成功し、真空中の光速の1/20程度以下にまで群速度を遅く出来ることを示した。

その他、線・点複合欠陥の光子操作効率の定量化等、光ナノデバイス実現にとって重要な様々な知見を得た。

(iii) 新構造・材料の導入(ヘテロ構造の概念、欠陥の3次元加工、量子構造の導入等)

半導体エレクトロニクスにおいては、ヘテロ構造は欠くことの出来ない概念となっているが、フォトニック結晶においても、ヘテロ構造が、極めて有用であることを世界に先駆け提唱した。特に、ヘテロ界面における光の振る舞いが、極限的な光閉じ込めやデバイス特性の向上にとって極めて重要であることを示した。

一方、2次元フォトニック結晶の上下方向に対しても、構造的自由度を与えることにより、光子操作の柔軟性が飛躍的に向上するものと期待される。本研究では、点欠陥部へのナノ加工を初めて試み、光放射パターンの制御など、より自由度の高い光の制御の可能性を示した。

以上に加え、本研究では、さらにフォトニック結晶中への量子井戸材料の導入にも踏み込み、光制御のさらなる高度化に向けた新しい試みも行っている。

その他

1. 研究代表者が議長となり、フォトニック結晶に関する国際シンポジウム(世界中のフォトニック結晶研究者300人以上が参加)を2004年3月7~11日に京都国際会議場にて開催した。その中で、本研究の成果を世界に向けて強くアピールした。
2. 2004年に行われたIEEE/LEOSのAnnual Meetingにおいて、500人を超える聴衆の前で基調講演を行い、大きな関心を集めることが出来た。
3. 研究代表者が応用物理学会光・量子エレクトロニクス業績賞(2005年3月)、大阪科学賞(2004年11月)、電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ賞(2004年9月)、IEEEのDistinguished Lecture Awardを受賞した。また、研究室の学生4名が応用物理学会講演奨励賞等を受賞した。
4. 本研究の成果は、*Nature*誌2編、*Science*誌2編(内1編は掲載予定)、*Nature Materials*誌1編に掲載された。さらに、*Nature Materials*誌においては、表紙を飾るという栄誉を得た。

特記事項

（これまでの研究において得られた、独創性・新規性を格段に発展させる結果あるいは可能性、新たな知見、学問的・学術的なインパクト等特記すべき事項があれば記入するとともに、推薦者の期待がどの程度達成されつつあるかについて記入してください。）

I. “TM スラブライン”という光の漏れを表す新しい概念の提唱

研究代表者は、2000年に、2次元フォトリック結晶の線欠陥導波路における無損失な光伝搬の条件を世界で初めて示していたが、本研究により、構造揺らぎが存在する場合には、さらに、TMスラブモードへの光の漏れが重要となることを世界に先駆け提唱した（論文リスト19）。さらに、このTMスラブモードへの光の漏れを抑制するためには、2次元完全結晶の実現が重要であることを指摘し、その実現には、 C_{3v} 構造の格子点をもつ結晶の作製が効果的であることを示した。以上は、無損失導波路の実現や、究極的に高いQ値をもつナノ共振器の実現にとって、極めて重要な知見を与えるものと位置づけられる。（ちなみに、論文19は、2003年の掲載以降22件を超える引用を受けている。）

II. 点欠陥共振器における究極の光閉じ込めの概念の提唱

「光の波長程度のナノ共振器に強く光を閉じ込めるためには、逆に緩やかな（最も理想的にはガウス関数的な）閉じ込め機構を持たせることが重要である」という逆説的かつ重要な概念を見出した。この概念のもと、ナノ共振器の端部に位置する格子点をわずかにシフトするというユニークな欠陥エンジニアリングを施すことにより、 $Q=45,000$ という従来の10~100倍の光閉じ込め効果をもつ、光ナノ共振器の実現に成功した。これらの成果は2003年英科学誌 *Nature*（論文リスト14）および2004年 *Nature*（同9）に掲載され、フォトリック結晶における光閉じ込めの本質を明らかにしたのものとして、世界に大きなインパクトを与えた。前頁でも述べたように、論文14は、掲載後すでに53件を超える多くの引用を受けるに至っている。このような非常に高いQ値をもつナノ共振器の実現は、上下方向への光の漏れの抑制効果をもつこと、光と物質の相互作用が極限的に強くなること、光の滞在時間が長くなること等により、光チップ、単一光子光源用共振器、強結合場の創出、量子情報処理の場の提供、光メモリ、超高感度センシングへの展開など、幅広い応用につながる重要な成果と位置づけることが出来る。

III. 線欠陥光導波路における超短パルス光伝搬の直接的測定と群速度制御

フォトリック結晶においては、上記IIで述べたように、極微小点に極めて強く光を閉じ込めることが可能になることに加え、線欠陥導波路を用いることにより、光の伝搬速度を自在に制御出来る可能性を秘めている。特に、導波路モードにおけるモード端に近づくこと、群速度が極限的に遅くなり、究極的には光を止めることも可能になると期待される。このような興味深い現象を実証するための重要な一歩として、本研究では、線欠陥導波路における超短光パルス伝搬を、世界に先駆けて測定し、光速の1/20以下という低群速度を実測することに成功した（論文リスト12）。この成果は、今後、光の遅延回路や、強い非線形効果をもつデバイスの実現等につながる重要な成果と位置づけることが出来る。

IV. 新構造・材料の導入と光子操作の高度化

光子操作の自由度を高め、かつ光子操作効率を大幅に向上させる構造として、フォトリック結晶におけるヘテロ構造の概念を提唱した。これは格子定数がわずかに（1nm程度）異なるフォトリック結晶を面内に接続した構造であり、これにより（i）欠陥間の結合状態を一定に保つことが出来、幅広い波長域で、最適なデバイス動作が可能になること、（ii）ヘテロ界面での光の反射を利用することで、デバイス特性の大幅な向上が実現出来ること等を理論的・実験的に示した。この成果は2003年米科学誌 *Science*（論文リスト15）に掲載され、フォトリック結晶におけるヘテロ構造・界面が極めて重要であることを初めて示した成果として、世界の注目を集めた。（ちなみに、論文15は、掲載後、既に30件以上という多くの引用を受けている。）さらに極最近、このヘテロ界面を2つ接続したダブルヘテロ構造を形成することで、上述の特記事項IIに示した光閉じ込めの概念をほぼ完全に満たす構造が実現出来ることを示し、実験的にも60万という驚異的なQ値を実現することに成功した。この成果は2005年英科学誌 *Nature Materials*（論文リスト4）に掲載され、世界の注目を集めた。さらに、この成果は、同誌の表紙を飾るという栄誉を得た。

以上に加え、本研究では、点欠陥部への3次元加工とそれによる光制御にも踏み込んだ。2次元フォトリック結晶は、通常、上下方向に対称な構造が用いられる場合が殆どであるが、上下方向に構造的自由度を与えることにより、光子操作の柔軟性が飛躍的に向上し、より高度な光制御が可能になるものと考えられる。本年度に入って、点欠陥部分への3次元加工を試み、点欠陥から自由空間への光放射パターンの制御に成功した。

さらに、本研究においては、2次元フォトリック結晶への各種材料の導入をもスタートしている。これは、フォトリック結晶による光制御のさらなる高度化にとって極めて重要である。極最近、結晶中への量子井戸の導入を行い、極めてユニークな発光制御（自然放出の抑制と再分配）の実証に成功した。この成果は、米科学誌 *Science*（論文リスト1）に近々掲載予定である。

以上のように、本研究により、ナノ加工技術から、光子操作技術の深化・高度化、新構造・材料の導入等に至る様々な研究を行い、学術的に極めて大きなインパクトをもつ成果を多数あげることが出来た。これらの成果は、当初の研究計画、すなわち、推薦者の期待を遙かに上回るものであると確信している。

研究成果の発表状況

この研究費による成果の発表に限り、学術誌等に発表した論文（掲載が確定しているものを含む。）の全著者名、論文名、学協会誌名、巻（号）最初と最後のページ、発表年（西暦）及び国際会議、学会等における発表状況について記入してください。

学術雑誌

- [1] M. Fujita, S. Takahashi, T. Asano and S. Noda: “Simultaneous inhibition and redistribution of spontaneous light emission in photonic crystals”, *Science* (2005) (in press).
- [2] H. Takano, B. S. Song, T. Asano, and S. Noda: “Highly efficient in-plane channel drop filter in a two-dimensional hetero photonic crystal”, *Applied Physics Letters* (2005) (in press).
- [3] B. S. Song, T. Asano, Y. Akahane, and S. Noda: “Role of interfaces in heterophotonic crystals for manipulation of photons”, *Physical Review B*, Vol.71, pp.195101, 1-5 (2005).
- [4] B. S. Song, S. Noda, T. Asano and Y. Akahane: “Ultra-high- Q photonic double-heterostructure nanocavity”, *Nature Materials*, Vol.4, pp.207-210 (2005).
- [5] Y. Akahane, T. Asano, H. Takano, B. S. Song, Y. Tanaka, and S. Noda: “Two-dimensional photonic-crystal-slab channel-drop filter with flat-top response”, *Optics Express*, Vol.13, No.7, pp.2512-2530 (2005).
- [6] B. S. Song, T. Asano, Y. Akahane, Y. Tanaka, and S. Noda: “Multi-channel add/drop filter based on in-plane hetero photonic crystals”, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol.23, No.3, pp.1449-1455 (2005).
- [7] 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).
- [8] T. Asano, W. Kunishi, M. Nakamura, B. S. Song, and S. Noda: “Dynamical wavelength tuning of channel-drop device in two-dimensional photonic crystal slab”, *Electronics Letters*, Vol.41, No.1, pp.37-38 (2005).
- [9] T. Asano and S. Noda: “Tuning holes in photonic-crystal nanocavities”, *Nature*, Vol.429, doi:10.1038, No.6988 (2004).
- [10] Y. Tanaka, T. Asano, R. Hatsuta, and S. Noda: “Analysis of line defect waveguide on Silicon-on-Insulator two-dimensional photonic crystal slab”, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol.22, No.12, pp.2787-2792 (2004).
- [11] B. S. Song, T. Asano, Y. Akahane, Y. Tanaka, and S. Noda: “Transmission and reflection characteristics of in-plane hetero-photonic crystals”, *Applied Physics Letters*, Vol.85, No.20, pp.4591-4593 (2004).
- [12] T. Asano, K. Kiyota, D. Kumamoto, B. S. Song, and S. Noda: “Time-domain measurement of picosecond light-pulse propagation in a two-dimensional photonic crystal-slab waveguide”, *Applied Physics Letters*, Vol.84, No.23, pp.4690-4692 (2004).
- [13] H. Takano, Y. Akahane, T. Asano, and S. Noda: “In-plane-type channel drop filter in a two-dimensional photonic crystal slab”, *Applied Physics Letters*, Vol.84, No.13, pp.2226-2228 (2004).
- [14] 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).
- [15] B. S. Song, S. Noda, and T. Asano: “Photonic devices based on in-plane hetero photonic crystals”, *Science*, Vol.300, No.5625, pp.1537-1537 (2003).
- [16] Y. Akahane, T. Asano, B. S. Song, and S. Noda: “Investigation of high- Q channel drop filters using donor-type defects in two-dimensional photonic crystal slabs”, *Applied Physics Letters*, Vol.83, No.8, pp.1512-1514 (2003).
- [17] T. Asano, B. S. Song, Y. Tanaka, and S. Noda: “Investigation of a channel-add/drop-filtering device using acceptor type point defects in a two-dimensional photonic crystal slab”, *Applied Physics Letters*, Vol.83, No.3, pp.407-409 (2003).
- [18] T. Asano, M. Mochizuki, S. Noda, M. Okano, and M. Imada: “A channel drop-filter using a single defect in a 2D photonic crystal slab - Defect engineering with respect to polarization mode and ratio of emissions from upper and lower sides -”, *IEEE/OSA Journal of Lightwave Technology*, Vol.21, No.5, pp.1370-1376 (2003).
- [19] Y. Tanaka, T. Asano, Y. Akahane, B. S. Song, and S. Noda: “Theoretical investigation of propagation loss of a line defect waveguide in a two-dimensional photonic crystal slab with tapered air holes”, *Applied Physics Letters*, Vol.82, No.11, pp.1661-1663 (2003).
- [20] Y. Akahane, M. Mochizuki, T. Asano, Y. Tanaka, and S. Noda: “Design of a channel drop filter by using a donor-type cavity with high-quality factor in a two-dimensional photonic crystal slab”, *Applied Physics Letters*, Vol.82, No.9, pp.1341-1343 (2003).

国際・国内学会などの発表状況

国際学会 70 件以上(基調講演・招待講演 33 件含む)、国内学会 130 件以上(内、基調講演・招待講演 33 件含む)、特許出願 38 件など、研究成果を国内外に向けて積極的に発表している。