

縦型ヘテロ非線形フォトニック結晶による超小型・高効率 光非線形機能デバイスの研究開発 (072103011)

Ultra-compact high-efficiency nonlinear optical devices based on
vertical hetero nonlinear photonic crystal structure

研究代表者

井上振一郎 九州大学 先端物質化学研究所
(現 情報通信研究機構 未来 ICT 研究センター)

Shin-ichiro Inoue Institute for Materials Chemistry and Engineering, Kyushu University
(Present address: National Institute of Information and Communications Technology (NICT))

研究期間 平成 19 年度～平成 21 年度

概要

本研究開発では、フォトニック結晶機能と非線形光学結晶を融合させる新しい素子構造「縦型ヘテロ・非線形フォトニック結晶」を提案することにより、実用化・大量生産に適したナノインプリント技術を用いて高精度な非線形 2 次元フォトニック結晶の創製を行った。本非線形フォトニック結晶内において発現する非線形光学応答と特異な光分散関係(群速度等)との相互関係を定量的に検証することによって、波長変換素子や 2 光子吸収素子などの非線形光学デバイスの性能を劇的に向上させることに成功した。さらに本原理を用いて、高効率・コンパクトな深紫外コヒーレント波長変換素子の動作実証に成功した。

Abstract

The aim of this research project is to fabricate nonlinear two-dimensional (2D) photonic crystals (PhCs) using a low cost mass manufacturing nanoimprint technology by proposing a new vertical hetero nonlinear 2D PhC structure which combines PhC functions and highly nonlinear optical materials. We reveal a direct relationship between the observed nonlinear optical responses and the corresponding photonic band structure, and we show experimental evidence that the performance of nonlinear optical applications such as the wavelength conversion and two-photon absorption devices are dramatically improved in this structure. Moreover, by using this physical enhancement mechanism, we demonstrate the high-efficiency, compact deep-ultraviolet (DUV) coherent wavelength conversion devices.

1. まえがき

有機非線形光学ポリマーやニオブ酸リチウム結晶などの高非線形性光学材料は、極めて大きな非線形光学定数や超高速な非線形応答速度など優れた特徴をもっている。よって、これら材料のポテンシャルを極限まで利用し尽くすことは、将来の情報通信処理における爆発的な大容量化、高密度化、高速化の問題を解決していくうえで必要不可欠な重要課題である。しかしながらこれまで、その低屈折率性や、ナノ微細加工における難加工性、ダメージの問題などが原因で、ナノ微細領域でのアクティブな光機能性を内含した、ナノフォトニックデバイスへの自由な研究展開が阻まれていた。

本研究開発は、フォトニック結晶機能と高非線形性光学材料とを融合させる新しい素子構造(縦型ヘテロ・非線形フォトニック結晶)を実用化にマッチしたナノインプリント技術により創製し、フォトニック結晶内における波長変換(第 2 高調波発生)機能などの非線形光学応答と特異な光分散関係(群速度等)との相互関係を定量的に検証し、どのような光分散制御が従来性能限界を打破する新しい光非線形機能を発現させ高性能化につながるのか解明することによって、光非線形物質機能の新たな高度制御手法を確立することを目的とし研究を実施した。さらに本手法を活用し、これまでにない位相制御と低群速度を併せて活用した小型・高性能な未踏波長・集積型コヒーレント光源などの革新的な光非線形機能素子を実用化に適したプロセスで創出し、その動作実証を行うことを目標とした。

2. 研究内容及び成果

I. 縦型ヘテロ非線形フォトニック結晶素子の創製

高非線形性光学材料を用いたフォトニック結晶応用デバイスの定量的な実証研究が進んでいなかった最大の理由は、高非線形性材料の難加工性にあり、2 次元フォトニック結晶のようなナノレベルの極微細構造を高精度に作製することが困難であったためである。このため大きな期待が持たれながらも、光散乱等が激しく光測定における定量的な議論が不可能であった。またさらに、フォトニック結晶が本質的に抱える問題であるが、従来技術では、大掛かりな微細加工装置や、長時間を要するプロセス工程が必要など、コスト・効率性の面で実用化を意識した際の大きな障壁があり、この『生産効率性の問題をどう克服するか?』が将来の実用化、技術波及に向けた大きなハードルとなっていた。

これらの課題に対し本研究では、高非線形性光学材料の難加工性の問題を解決する、縦型ヘテロ・非線形光結晶型の新しい素子構造を提案することにより、実用化に適したナノインプリント法を用いて非線形 2 次元フォトニック結晶を作製することに成功した。本提案素子構造を用いることで、非線形光学ポリマーやニオブ酸リチウム結晶で構成された非線形 2 次元フォトニック結晶の作製を高精度且つダメージフリーで実現しただけでなく、ナノインプリント法を用いることで、既存の半導体リソグラフィ技術と比較し桁違いに高いスループットが得られることを立証し、将来の実用化へ向けて大きく前進した。

II. フォトニックバンド構造の直接観測手法開発

フォトニック結晶による光バンド分散制御を活用することで、非線形光学効果を著しく増大できる可能性があるが、この効果を実際のデバイスに對する確に適用していくためには、いかに精度良く光バンドを計測・操作し、狙いの光分散状態を実現するかが重要となる。しかし通常、ライトライン下側のモードは外部光と結合しないため、これまで外部から直接的に導波モードの光バンド構造を観測した例はなかった。本研究では、この問題を解決するため、分光角度分解プリズム結合技術により非線形 2 次元フォトニック結晶内部の導波モードを外部から直接観測する新たな手法を開発し、ブリルアンゾーン全域に亘って実験的な光バンド構造を正確に測定することに成功した。

III. 波長変換特性のエンハンスメント実証

最も代表的な高非線形性材料であり、且つ難加工性材料であるニオブ酸リチウムを使用して、縦型ヘテロ・非線形 2 次元フォトニック結晶を作製し、光バンド制御による第二高調波発生 (SHG) の明瞭なエンハンスメントの観測に成功した。スローライトバンドに共鳴させることで、バルク素子と比較し 300 倍以上の SHG 強度増大を観測した。非線形 2 次元フォトニック結晶中で実験的に実証された SHG のエンハンスメント効果は、波長変換効率を劇的に向上させるため、相互作用が弱く高効率な動作が従来困難であった波長領域 (深紫外光領域など) でも実用レベルの波長変換素子を実現できる可能性を示している。

IV. 2 光子励起蛍光デバイスの性能向上実証

3 次の非線形光学効果である 2 光子吸収励起過程は回折限界以下の解像度と 3 次元的な空間選択性が得られるため、次世代の超高密度な 3 次元光メモリや立体的な蛍光イメージング、3 次元ナノ・マイクロソグラフィなど、様々な応用分野でその利活用が期待されている。しかしながら一般的な 2 光子吸収材料の励起効率は極めて低く、広く実用化されるには至っていない。本研究において、高い 2 光子吸収断面積を有する bis(styryl) benzene 誘導体分子をドーブした非線形光学ポリマー材料を用いて、縦型ヘテロ・非線形 2 次元フォトニック結晶を作製し、人工的に物質内の群速度を制御することにより、光と物質の間の非線形相互作用を増強させ、2 光子吸収励起に伴う蛍光強度を 100 倍以上大きく増大させることに成功した。実験的な光バンド構造解析と角度分解 2 光子励起蛍光強度測定を組み合わせることで、2 光子吸収過程の増強効果

が光バンド共鳴及び低群速度効果に起因することを直接的に実証した。この 2 光子吸収効率の向上結果は、2 光子吸収断面積 $\sigma^{(2)}$ の値として 90000 GM という極めて大きな値に相当し、本素子が 2 光子吸収デバイスの大幅な高性能化に對し極めて有効であることを明確に立証した。

V. 深紫外・波長変換コヒーレント光源素子の開発

以上の検証結果を十分に活用し、深紫外領域における小型・高性能な波長変換コヒーレント光源素子の開発・動作実証を行った。深紫外波長領域で発光する半導体レーザーダイオードは技術的な困難さから未だ実現されていない。そのため、高集積化・低消費電力化が可能な深紫外・波長変換コヒーレント光源の開発実現が強く期待されている。本研究では、高非線形性ニオブ酸リチウム単結晶の 2 次元 $\chi^{(2)}$ 周期制御と縦型ヘテロ・非線形 2 次元フォトニック結晶構造とを組み合わせることで、位相整合させた面内導波型の高効率・波長変換素子を開発した。第二高調波発生 (SHG) の評価実験を行った結果、素子長 1.0 mm 以下の小型デバイスでも、深紫外波長領域 (325nm) で 10 %/W 以上の高い変換効率を得ることに成功し、蛍光体を使って肉眼ではっきりと視認できる強い深紫外コヒーレント光の発生を確認した。小型深紫外レーザを用いた光情報記録素子の高密度化など、新たな産業応用の開拓が期待される。

3. むすび

以上により、研究当初に掲げた目標は全て達成された。本研究により、高非線形性光学材料を用いた非線形 2 次元フォトニック結晶素子が実用化にマッチした手法で創製でき、且つ、本素子により波長変換デバイスや 2 光子励起蛍光デバイスなどの性能を大幅に向上できることが示された。高非線形性フォトニック結晶素子の創製実現、基礎原理実証から実用化技術の開発まで一貫した研究成果を得ることに成功した。

【誌上発表リスト】

- [1] S. Inoue and S. Yokoyama, "Enhancement of two-photon excited fluorescence in two-dimensional nonlinear optical polymer photonic crystal waveguides", Applied Physics Letters Vol.93 No.11 pp11110 1-3 (15 Sep 2008)
- [2] S. Inoue, S. Yokoyama, and Y. Aoyagi, "Direct determination of photonic band structure for waveguiding modes in two-dimensional photonic crystals", Optics Express Vol.16 No.4 pp2461-2468 (18 Feb 2008)
- [3] S. Inoue and S. Yokoyama, "Nonlinear optical responses in Two-dimensional photonic crystals", Thin Solid Films Vol.518 No.2 pp470-472 (10 Jul 2009)

【申請特許リスト】

- [1] 井上振一郎、梶川浩太郎、青柳克信、"フォトニック結晶"、日本、平成 19 年 6 月 18 日
- [2] 井上振一郎、梶川浩太郎、青柳克信、"フォトニック結晶"、日本、平成 19 年 3 月 19 日

【受賞リスト】

- [1] 井上振一郎、ICNME2008 Outstanding Poster Presentation Award, "Nonlinear Optical Responses in Polymer Two-Dimensional Photonic Crystals", 2008 年 12 月 18 日

【報道掲載リスト】

- [1] 「Research Highlight」"Molecular imaging: Exciting fluorescence", NPG (Nature Publishing Group) Asia Materials, 2008 年 11 月 25 日版

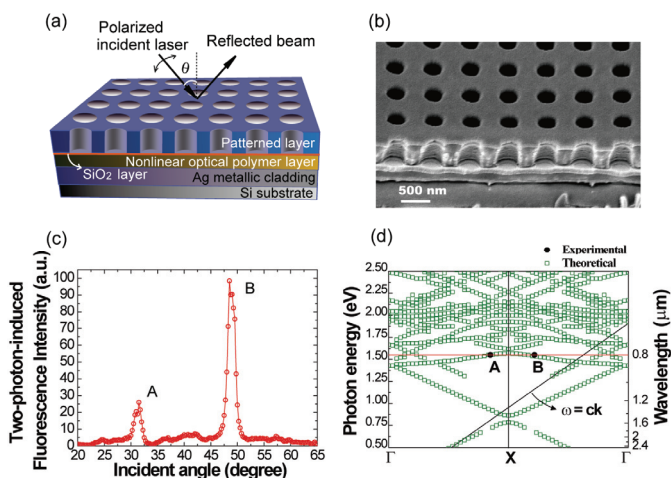


図 1 (a) 縦型ヘテロ非線形 2 次元フォトニック結晶構造、(b) 作製した素子の断面 SEM 像、(c) 2 光子励起蛍光強度の入射角依存性、(d) 同素子の対応する光バンド構造