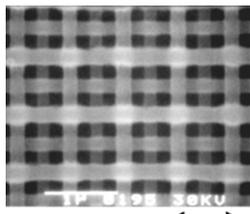


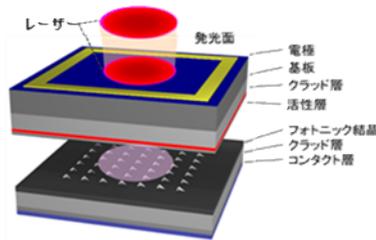
成果の進展が特筆される研究として、トピックス的にフォトニック結晶の状況について聴取・議論を行ったところ、以下のとおり。

## はじめに

- フォトニック結晶とは、屈折率が異なる物質を光の波長と同程度の間隔で並べた、ナノ周期構造を持つ人工結晶。光が内部に閉じ込められたり、侵入できなかつたりする現象が起きる。自然界の蝶や宝石の一種が、キラキラ輝く構造色を持つことと同様の原理
- ナノテク・半導体技術で実現され、様々な応用可能性のある光技術デバイスとして活用する研究が近年加速度的に進展。



3次元フォトニック結晶



フォトニック結晶レーザーの構造  
(2次元フォトニック結晶を間に挟む)



野田進教授 (京都大学)

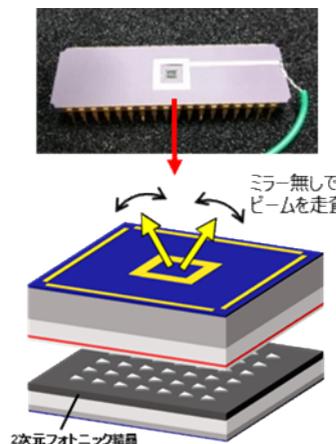
フォトニック結晶レーザー (応用例) :  
フォトニック結晶を用いて、光を内部に閉じ込め、共振させつ外部に取り出すという、これまでにない原理に基づいた、高輝度で高出力な半導体レーザー

## 研究の状況

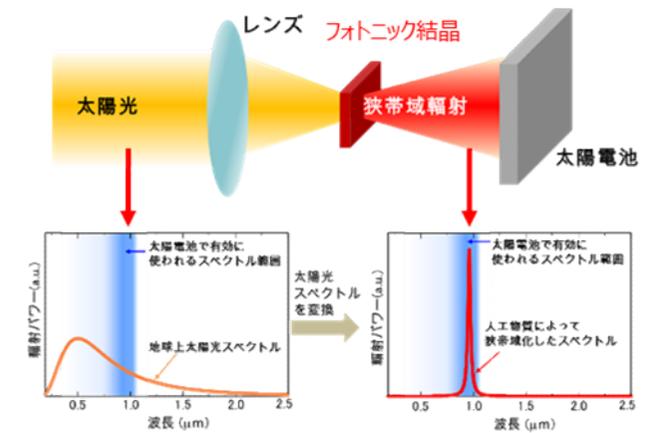
- 1990年代後半まで作製が極めて困難だったが、2000年に我が国の研究者が世界初のフォトニック結晶を実現。それをブレークスルーとして、次々と応用可能性も開拓。  
 ・結晶内に「欠陥」的構造を入れる → 欠陥部のみに光が集まる ⇒ 多彩な光の「制御」が可能に  
 ・欠陥構造を繋げてトンネルを作る → 光が伝播する「導波路」となる  
 (応用展開例: 光メモリや光スイッチ等の光回路デバイスと量子コンピュータ等の量子情報処理・通信の革新)
- 日本、欧州、米国、豪州、中国、韓国など世界で30以上の研究機関が研究を進める中、現在でも我が国のプレゼンスは高い。

## 今後の展開可能性

- フォトニック結晶レーザーは、我が国発の独創的な技術として産業化の段階に入りつつある。既存の加工用レーザーを置き換える可能性があり、製造現場のレーザー加工における我が国産業競争力の強化が期待される。  
 世界の製造業で汎用されるレーザー加工機の市場規模は1兆円を超え、欧米勢のシェアが高まっているが、小型のワンチップで通常の高出力レーザーと同等の10~100W級 (更に合波により1kW級) まで高出力化すること等で、これらを置き換える可能性
- さらに、小型で高速で故障に強い電子的2次元ビーム走査が可能であり、自動運転等に用いられる車載ライダーやレーザーセキュリティセンサといった市場を開拓する可能性が指摘される。
- また、幅広いスペクトルに渡る光のエネルギーを、狭いスペクトルに損失なく変換 (狭帯域化) できる特異な機能があり、50%を超える、これまでになく革新的に高効率な太陽光発電につながる可能性が指摘される。



電子的2次元ビーム走査



高効率の太陽光発電への展開

## フォトニック結晶の現状と今後の展開可能性について

平成29年5月30日

科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会

量子科学技術委員会

21世紀の科学技術進展と我が国の競争力強化の根源となり得る量子科学技術の推進について検討している当委員会において、成果の進展が特筆される研究として、トピックス的にフォトニック結晶の状況について聴取・議論を行った。

量子科学技術特有の研究の進展や今後の可能性について示唆があり、国民・社会にとっても研究の状況が見えるよう可視化しておくことは意義があるとの観点から、現状と今後の展開可能性を以下にまとめた。

### 1. はじめに

フォトニック結晶とは、屈折率が異なる物質を光の波長と同程度の間隔で並べたナノ周期構造の人工結晶であり、光が内部に閉じ込められたり、侵入できなかつたりする現象が起きる。自然界の蝶の羽や宝石の一種が、見る方向によって光沢が変わりキラキラ輝く構造色を持つことが知られているが、これは自然界で形成されたナノ周期構造による光の侵入阻止効果によるもので、フォトニック結晶と同様の原理によっている。この基本原理は古くから知られていたが、ナノ周期構造を人工的に、かつ三次元又は二次元的に作製することが極めて困難だったことから、1990年代後半までは現実的なフォトニック結晶は存在しなかった。

このフォトニック結晶を、ナノテクノロジー・半導体技術によって実現するとともに、光の閉じ込めや侵入阻止といった現象を利用して、様々な応用可能性のある光技術デバイスとして活用する研究が近年加速度的に進展しており、我が国の研究者が国際的にリードしている。

例えば、フォトニック結晶を用いれば、光を内部に閉じ込め、大面積で共振させつつ外部に取り出すという、これまでにない原理に基づいた、高輝度で高出力な半導体レーザーを実現することができる。世界の製造業で汎用されるレーザー加工機の市場規模は1兆円を超えるが<sup>1</sup>、フォトニック結晶レーザーは、将来的に既存の加工用レーザーを置き換える可能性が指摘されている。さらに、独特の光の制御により実現され得る応用可能性が広く、我が国の大きな強みとなり得る光技術と言える。

### 2. 研究の状況

#### (経緯)

フォトニック結晶のようなナノ周期構造によって光の侵入が阻止されるといった光の「制御」の基本原理は、上述のように前世紀から知られていたが、三次元的又は二次元的なナノ周期構造の作製には高度な結晶作製技術が必要であり、かつ光の侵入阻止以外の幅広い応用可能性も開拓されていなかった。そのような中、1990年代初頭から、我が国の研究者に

<sup>1</sup> 2016年時で126億ドル。OPTTECH CONSULTING, “Global Market for Laser Materials Processing Systems Grows 6.8% in 2016” (2017年3月)より。

より、50ナノメートル以下の精度で積み木細工のようにナノ構造を並べる結晶作製技術が開拓されたことで、特定の波長の光の侵入を全方向に対して禁止する世界初の三次元フォトニク結晶が2000年に実現された。更に同年、二次元的構造を有する薄膜形状の結晶を用いた展開も進み、デバイスとしての応用可能性が更に広がり得る二次元フォトニク結晶でも三次元結晶と同様の光の制御が可能であることが見出され、様々な光の制御の実現に向けた基礎が築かれることとなった。

フォトニク結晶による光の制御は、侵入阻止効果にとどまらない。例えば、結晶内に周期構造から外れた「欠陥」的構造を導入すると、その欠陥部のみに光が集まり（共振し）、そこに発光体を導入すると強い発光を示す。同様に欠陥構造を繋げて結晶内にトンネルのような構造を作ると、そのトンネル部を光が伝播する「導波路」となる。

さらに、「欠陥」の大きさを変えると、集まる光の波長を変えることができ、マイクロオーダーという超小型の分光器の機能を持たせられる。「欠陥」の周辺の構造配列をナノオーダーで調整することでは、集まった光をより鋭く共振させる共振器（高Q値<sup>2</sup>ナノ共振器）の機能が発揮され、減衰が少なく一定時間、光を閉じ込められる。「導波路」と「欠陥」を組み合わせると、光パルスを導波路で伝播させ、欠陥のナノ共振器で光パルスを捕獲・放出するといった光メモリや情報処理デバイスの機能が拓かれ得る。また、フォトニク結晶により光を大面積で共振させることができることも、別途見出された。このように、2000年来、フォトニク結晶による多彩な光の制御とその利用を開拓する研究が次々と進展することとなった。

量子科学技術はこのように、一旦、ブレークスルーが起きれば、それを起点に、想定されなかったような多様で多彩な機能や応用可能性が拓かれるポテンシャルを有すると言え、また、そのブレークスルーが、我が国の培ってきたナノテクノロジー・半導体技術や光学技術の強みに裏打ちされている点が特筆される。

### **（現状と世界的な競争）**

フォトニク結晶は、現在では、日本をはじめ、欧州、米国、豪州、中国、韓国など30を超える研究機関により全世界的に研究が進められているが、我が国研究者により2000年に発表されたブレークスルーが一つのきっかけになったと言える。なお、総論文数、高インパクト論文数（Nature、Science 及びその姉妹誌）ともに上位10名の中に我が国の研究者が3名ずつ入るなど現在でも我が国のプレゼンスは高い。

様々な応用可能性が研究されているが、前述のフォトニク結晶レーザーは、産業化の段階に入りつつあり、2014年に我が国の大学研究者との連携により民間企業で実用化・販売され始めた。

製造業におけるレーザー加工では、従来、我が国企業の炭酸ガスレーザーを用いるものが多くのシェアを占めていたが、近年、欧米勢のファイバーレーザーのシェアが上回るようになってきている。フォトニク結晶レーザーは、二次元結晶の面内に閉じ込められた光が面全体で鋭く共振（面内光結合による共振効果）し、面と垂直方向にレーザー発光するが、コヒーレンス（光の波の位相がそろっていること）が高いためビーム品質が高く、面的に発光するためレンズを用いなくても一定範囲にレーザーを照射できるとの特徴を持つ。

<sup>2</sup> Q値：Quality Factor。光閉じ込め部分の共振の鋭さを表す値で、どのくらい長く光を閉じ込めることができるかの目安になる。値が大きいほど、より長く光を閉じ込めることができる。

高いビーム品質を持つフォトニック結晶レーザーを、小型のワンチップで、通常の高出力レーザーと同等の10～100W級（さらには複数のレーザーを集合させる合波により1kW級）まで高出力化することができれば、レーザー加工機で用いられている既存のレーザーを置き換えることが可能と考えられ<sup>3</sup>、その実現可能性も見えてきている。現在、実験では1W級が実現されており、まずは10Wを目指した高出力化の研究開発が進められている。

加えて、フォトニック結晶レーザーでは、ミラー等の機械的機構を使わず電子的にレーザーのビーム方向を変化させることが可能であり、ライダーやセンサ応用を視野に入れた2次元ビーム走査技術についても2013年に発表されている。

### 3. 今後の展開可能性

フォトニック結晶には、学術的にも興味深い多彩な光の制御に基づく機能が発見されており、様々な展開可能性が見出される。現時点で見通せるものとしては以下の通りであり、研究の進展等によっては更なる展開可能性が拓かれうる。

#### ● フォトニック結晶レーザーの産業展開

ビーム品質が高いレーザー発生原理として、我が国発の独創的な技術であり、高出力時もビーム集束性・等方性が維持される。高出力化や微細加工での利用が進めば、1兆円を超える市場規模とされる製造現場のレーザー加工における我が国産業競争力の強化が期待される。また、高品質で小型のレーザー源であることから、レーザー加工に限らず、眼科や歯科といった医療分野や脱毛治療器といった分野における新規技術利用、パワーレーザー等の高出力レーザーを用いた研究での利用といった展開が考えられる。さらに、小型で高速で故障に強い電子的2次元ビーム走査が可能であることから、自動運転等に用いられる車載ライダーやレーザーセキュリティセンサといった市場を開拓する可能性が指摘される。

#### ● 太陽光発電の革新的な高効率化

現在の太陽電池では、太陽の光の成分が紫外から赤外に至る非常に幅広い波長に渡っていること（幅広いスペクトル）に対して、一部の帯域の波長成分（狭いスペクトル）からしか電気エネルギーを取り出せていないという課題があり、発電効率の限界を与えている。

フォトニック結晶には、幅広いスペクトルに渡る光のエネルギーを、一旦熱エネルギーに変えたうえで熱輻射<sup>4</sup>し、損失なく狭いスペクトルに変換（狭帯域化）できる特異な機能（熱輻射制御機能）があり、これを用いれば、これまでになく50%を超える革新的に高効率な太陽光発電<sup>5</sup>につながる可能性が指摘される。

#### ● 光回路デバイスと量子情報処理・通信の革新

<sup>3</sup> 例えばレーザー発振器の容積を見ると、出力1kW級の小型炭酸ガスレーザーで約270リットル、ファイバーレーザーで約60リットルの製品がある。フォトニック結晶レーザーを用いると、ファイバーレーザーから更に1/10程度以下に、レーザー発振器をコンパクト化できる可能性がある。

<sup>4</sup> 熱輻射（ねつぷくしゃ）：熱せられた物体から内部エネルギーが電磁波として放出される現象。電磁波が周囲の物体に吸収されると、熱が伝わったことになる。

<sup>5</sup> 家庭用として最も普及している結晶シリコン太陽電池では、モジュール変換効率約20%（セル変換効率約23%）の製品が近年販売されているが、一般にそのような単接合太陽電池の変換効率は、理論的に約30%が限界と考えられている（NEDO再生可能エネルギー技術白書 第2版（2014年2月）より）。フォトニック結晶を用いる場合、光のエネルギーを一旦熱エネルギーに変換するなどの損失はあるが、これを十分に上回るセル変換効率を実現できる可能性がある。

フォトリソグラフィを用いて人工的に作った「欠陥」や「導波路」により、光パルスの伝播や捕捉・放出、光の波長変換、離れた場所での光の自在なやりとりなどの特異な光の制御が実証されている。これら技術や集積化が進むことで、光メモリや光スイッチ等の超小型の光回路デバイスや情報処理デバイスが実現され、量子コンピュータや超高速光通信技術など量子情報処理・通信技術の革新に貢献することが期待される。

#### **4. おわりに**

フォトリソグラフィでは、我が国の培ってきたナノテクノロジー・半導体技術等の強みが発揮され、現実的な結晶が作成されるというブレークスルーが起こり、多様で多彩な機能や応用可能性が示されるとともに、将来の経済・社会にインパクトを及ぼす可能性が見出されている。最先端でありながら、将来の産業シーズとして産学の対話や連携が進んでいる点も特徴的である。量子科学技術特有の研究進展と展開可能性を示す典型例と言えよう。今後の量子科学技術の推進にあたっての示唆とするとともに、フォトリソグラフィの研究進展や展開の注視及び更なる産学対話や連携を含む時宜に応じた推進を図ることが重要と考えられる。