

学 位 論 文 題 名

Experimental Study of Optical Properties of Two-Dimensional AlGaAs-Based Photonic Crystal Slabs and Control of the Radiation Field

(アルミニウム・ガリウム砒素による 2 次元フォトニック結晶スラブの
光学特性と輻射場の制御に関する実験研究)

学位論文内容の要旨

誘電率が光の波長程度の周期で 2、3 次元的に変化する人工結晶を、フォトニック結晶(PC)と呼ぶ。近年、PC を用いた輻射場および光伝播の制御に関する研究が盛んに行われている。周期ポテンシャルを受けて運動する(通常の)結晶中の電子がエネルギーバンドを形成するのに類似して、PC 中の電磁場の固有モードは誘電率の周期性のためブロッホ波となり、いわゆるフォトニックバンドを形成する。フォトニックバンド構造には、2つの大きな特徴がある。一つは、固有モードの存在しない周波数領域、フォトニックバンドギャップ(PBG)が生じることである。たとえば、PBG に対応した遷移周波数をもつ電子準位間では光学遷移が起こらないので、光の自然放出は抑制される。また、誘電体周期構造に欠陥を導入すると PBG 内に大きな Q 値をもつ局在モードが現れる。もう一つの特徴は、群速度の遅い平坦なバンドが存在することである。これを利用すると、物質系と輻射場との相互作用時間が実質的に長くなるため、PC 中での様々な光学現象における信号の増強が期待される。このことは、物理的に非常に面白い特徴である。現実の試料でどの程度群速度が遅くなるのかが問題であるが、それを直接測定したのは 1999 年に報告された一例のみである。

PC の中で、光の波長程度の有限の厚さの半導体スラブに周期性をとり入れた構造を、スラブ型 2 次元フォトニック結晶という。これを用いた理論的・実験的研究がここ 1、2 年で急速に進展してきた。このことは、半導体微細加工技術を駆使すれば 3 次元結晶よりも容易に作製できること、スラブ内に光が閉じ込められるエネルギー領域では準 3 次元結晶と考えられること、微小光集積回路などのデバイスへの応用が期待されること、などの理由による。スラブ型フォトニック結晶の場合、バンド構造においてライトライン $\omega = ck/n$ (ω : 周波数、 c : 光速、 k : 波数、 n : スラブの上下の物質の屈折率)を境に導波モード(スラブ内に光が閉じ込められる)と放射モード(スラブの上下に光が放射される)に分類される。後者に関しては、各モードの Q 値によって光の放射ロス(RL)の度合いは異なるが、その定量的な見積もりはほとんどなされていない。また、スラブの上下の物質が空気であるエアブリッジタイプの PC では、半導体と空気の屈折率差が大きいため光の閉じ込めが最も強い。これは、理論的にも注目されているが、その基礎特性を実験的に調べた例は皆無である。そこで、本研究ではこれらのことを念頭におき、光の閉じ込めの強い系と弱い系のスラブ型フォトニック結晶を作製し、それらの光学特性を実験的に解明すること、また、均一性の良い PC を用いて群速度がどの程度遅れるのかを実験的に明らかにすることを目的とした。

本研究に用いた試料は、AlGaAs 半導体から成る 2 種類のスラブ型フォトニック結晶である。一つは、GaAs 基板上に $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ (クラッド、厚さ $d=2.0\text{ }\mu\text{m}$ 、 $n=3.30$)、 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ (コア、 $d=0.45\sim0.50\text{ }\mu\text{m}$ 、 $n=3.52$)を結晶成長させ、電子ビーム露光・ドライエッチングによりエアロツ

ドを三角格子状にできるだけ均一にかつ深く掘った半導体クラッド(SC)タイプであり、もう一つは、結晶成長させた $\text{Al}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{As}$ (クラッド、 $d=2.0\text{ }\mu\text{m}$ 、 $n=3.10$)、 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ (コア、 $d=0.27\text{ }\mu\text{m}$ 、 $n=3.52$)に同様にエアロッドを掘った後、選択ウェットエッチングによりクラッドを除去した

エアブリッジ(AB)タイプである。いずれの試料も PC の両側に、光の入出力用の導波路(幅 $3.0\text{ }\mu\text{m}$)を備えている。それぞれ、格子定数 a 、空気の占有率 f 、エアロッドの層数 N が異なる多くの試料を用意した。そして、波長可変チタン：サファイアレーザー(波長 $850\sim 1100\text{ nm}$)を光源とし、透過測定を行った。PC のある試料の透過光強度を PC のない導波路のみの透過光強度で規格化することによって、PC の透過率を求めた。AB タイプの PC ($f=0.52$ 、 $N=10$)では、TM 偏光(電場がロッドに垂直に振動)の光を入射した場合、約 3 桁の透過率の落ち込みを観測した。また、長波長(低周波数)側では透過率が約 100 % (RL ~ 0)に達した。バンド構造と比較した結果、前者は放射モードによる PBG、後者は導波モードの周波数領域に相当することが判明した。また、この場合の放射モードの Q 値は比較的大きいことも見出した。一方、TE 偏光(電場がロッドに平行に振動)の光を入射させた場合、全体的に透過率は低く、放射モードの Q 値は小さいことがわかった。これらの透過スペクトルは、時間領域差分法によって計算された透過率とも誤差 10 % 程度で定性的・定量的に非常に良い一致を示した。また、他のパラメータをもつ PC でも、導波モードに相当する周波数領域では透過率が約 100 %に達し、また導波モードによる PBG も観測された。以上のことから、AB タイプの PC の光学特性は大変優れていることを明らかにした。

一方、SC タイプの PC では、コアとクラッドの屈折率差が非常に小さいために導波モードは実質的に存在せず、光は多かれ少なかれクラッド側へ逃げている。多くの試料で透過率を測定した結果、 N 及び f の増加とともに急激に RL が大きくなることを見出した。しかし、 $N<10$ 、 $f<0.35$ の試料については、バンドが存在する波長領域では透過率が 30 %以上あること、かつ PBG に相当する波長領域で 3 桁以上の透過率の落ち込みも同時に観測されていることから、場合によってはこのタイプの PC でも輻射場の制御に役立つ可能性があるといえる。また、上記の透過率の落ち込みが PBG と大きな RL のどちらに起因しているのかを確かめるために、反射測定を行った。非常に小さな試料であると同時にフォトニック結晶の両側に導波路がついているために、PC だけからの情報を得るのは困難だったが、フェムト秒パルスを用いたタイム・オブ・フライト(TOF)法によって、導波路端面や PC からの反射パルスの時間分解を行うことでそれを克服した。そして、得られた各パルスの積分強度比からフォトニック結晶の反射率を求めた。その結果、透過率が大きく落ち込んでいる波長では反射率が 60 %以上と比較的大きい、つまり、この非常に小さな透過率は PBG に起因しているということを明らかにした。

さらに、透過率を測定して均一性が良いことを確認した PC (SC タイプ、 $f=0.46$ 、 $N=10$)を用いて群速度の直接測定を行った。この PC では TM 偏光の光に対して $860\sim 900\text{ nm}$ にわたって透過率が急激に小さくなる。光源としてモード同期チタン：サファイアレーザー(パルス幅 $\sim 200\text{ fsec}$ 、繰り返し 76 MHz)を使用し、反射測定に用いた TOF 法を改良して測定を行った。そして、PC を透過してきたパルスの時間遅れを観測すると同時に、スペクトルも観測した。参照試料として同一チップ内にある、PC なしの導波路(試料全体の長さは厳密に同じである)を用いた。その結果、バンド端に近づくにつれてパルスはより遅れるようになり、PC の長さ約 $3\text{ }\mu\text{m}$ に対して最大 $\sim 300\text{ fsec}$ の遅れを観測した。これは、群速度が光速に比べて約 $1/30$ になっていることに相当する。一方、PC の群速度分散によるパルスの広がりも顕著には観測されなかった。これは、PC の両側の導波路($\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$)自身の群速度分散が非常に大きいため、PC の群速度分散によるパルスの広がりが隠されてしまったからだと考えられる。始めに述べた通り、群速度の小さなバンドを用いると PC 中での様々な光学現象における信号の増強が期待される。また、新しい物理現象の発見にもつながる可能性がある。したがって本研究において、現実の試料で群速度が光速に比べて 2 桁近く遅くなることを観測したことは、物理的に非常に重要な意味をもつといえる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 井 上 久 遠
副 査 教 授 中 原 純一郎
副 査 教 授 伊 土 政 幸
副 査 助教授 迫 田 和 彰

学 位 論 文 題 名

Experimental Study of Optical Properties of Two-Dimensional AlGaAs-Based Photonic Crystal Slabs and Control of the Radiation Field

(アルミニウム・ガリウム砒素による 2 次元フォトリック結晶スラブの
光学特性と輻射場の制御に関する実験研究)

誘電率が光の波長の大きさ程度で周期的に大きく変化する人工結晶をフォトリック結晶という。フォトリック結晶中の光のモードは、その周期性に伴ってブリュアンゾーン内で記述され、光の周波数 ω と波数 k に関する分散関係、すなわちフォトリックバンド構造は、一様な媒質中のものと著しく異なったものになる。このため特に、2 次元、あるいは 3 次元の結晶を用いると、輻射場、並びに光の伝播特性を原理的には自在に制御できることになり、学問的にその重要性が脚光をあびている。1990 年代後半に入って、試料作製技術が進んできたことにより、フォトリック結晶の研究は現在、国際的に非常に活発化している。

申請者の提出論文は、屈折率の大きい AlGaAs 半導体を材料に用い、最新の半導体微細加工技術を駆使して準 2 次元のフォトリック結晶スラブ試料を設計・作製し、それらの光学特性およびフォトリックバンド構造を明らかにした研究である。均一な 3 次元結晶試料の作製の難しさに対して、厚さが 300~2000 nm のスラブ試料の作製は可能であること、また、このようなスラブでも多くの場合に輻射場の制御が可能であることに着眼したものである。この場合、スラブ面内に光が本質的、あるいは実質的に閉じ込められるかどうかの一つの大きな問題であった。以下に述べる 2 つのタイプの試料について詳しい研究を行った。

まず、上下のクラッド層を除いた、エアブリッジ・タイプの試料について、透過率の波長依存性の測定と計算によるバンド構造との比較から、このタイプのバンド構造を実験的に初めて解明した。同時に、いくつかの重要かつ、新しい事実を見い

出した。すなわち、1) 空気の屈折率 n によってきまるライトライン $\omega = ck/n$ (c ; 真空中での光速) の下側の導波モードでは透過率がほぼ 100% になること、2) ライトラインの上側の放射モードでも上下方向に放射する損失が小さいモードが存在すること、3) Γ -X 方向で光のモードが存在しないストップバンドが存在し、そのエネルギー範囲で 3 桁程度の大きな光の減衰が生ずること、さらに、4) 電界ベクトルが面に平行な光に対しては、共通なバンドギャップが存在すること、等である。これらの事実から、エアブリッジ・スラブは輻射場の制御に最適な構造の一つであるという重要な結論を得た。

一方、従来型試料、すなわち、コア層の厚さが 400 nm 程度で、上のクラッド層は空気、下のクラッド層の屈折率がコア層と僅かに異なった試料に関して、以下の結果を得ている。1) 穴の深さは 900 nm 程度であるが、有効屈折率を用い、かつスラブの厚さを無限大とした場合に計算した 2 次元フォトリックバンド構造により透過スペクトルがよく説明できること、2) 事実上、導波モードは存在しないが、透過率の減衰の大きいストップバンドが存在すること、3) 初めて導入した光パルス飛行法による反射率測定により、放射損失とストップバンドによる透過率の減衰を区別できること、4) 放射損失は、穴の空気占有率 f および、光の伝播方向の周期数 N が大きくなると共に著しく大きくなること、などである。その結果、 $f \leq 0.35$ でかつ、 $N \leq 5$ の試料でも輻射場の制御が事実上可能であることを結論として得た。

次に、上記の従来型試料の比較的に分散の小さいバンドを対照として、200fs の光パルスの試料中の伝播時間を相互相関測定法を用いて求めることにより、群速度を直接測定した。その結果、バンド端にエネルギーが近づくにつれて、パルスの伝播時間が遅れる事実、並びに、最大で 300fs の遅れが生ずることを明らかにした。後者は、遅速度が光速の 30 分の 1 になるのことを意味し、このような小さな群速度を初めて観測した意義は大きい。

以上をまとめると、この研究は、本格的測定法を初めて導入することにより、2 次元フォトリックスラブの基礎特性を測定し、これらが優れた光学特性を示すことを初めて明らかにしたものである。また、フォトリック結晶が小さな群速度を示すことも明らかにした。これらはいずれも重要な成果であり、当該学問分野の進歩に大きく寄与するものである。なお、これらの成果は既に、国際的に権威のある学術誌に 2 編の論文として公表している。

よって、提出者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格があるものと認める。