

学位論文題名

Study on Control of Radiation Field by Using
a Two-Dimensional Photonic Crystal
-Laser Action and Phase-Matched
Second Harmonic Generation-(2次元フォトニック結晶を用いた輻射場の制御に関する研究
-レーザー作用と位相整合第2高調波発生-)

学位論文内容の要旨

光の波長程度の格子定数を持つ二次元、三次元の周期誘電体構造、すなわちフォトニック結晶中の電磁波のエネルギーと波数(ω - k)に関する分散関係は一樣媒質中とは大きく異なり、結晶中の電磁波の固有モードはフォトニックバンドを形成する。また、結晶構造や誘電率差などの条件をふさわしく選ぶことにより、ある周波数領域に電磁波モードが存在しないフォトニックバンドギャップ(PBG)が生じる。従って、フォトニック結晶では輻射場の制御が可能となる。フォトニック結晶が提案されて以来、これまでに自然放出光の抑制、異常ラムシフトやギャップ内局在モードなどが理論的に予測され、その一部は実験で検証されてきた。これまでの研究では二、三の例外を除いて主にPBGに関する光学特性に研究の興味が集中してきた。しかしながら、PBGを持たない結晶においてもその ω - k の分散は依然として異常であり、結晶中に置かれた物質の光学応答は特異な現象を示すことが期待される。

本研究の目的は、この異常な分散に着目し、二次元フォトニック結晶を用いて結晶中に置かれた物質の光学応答を実験的に研究することである。理論的に計算されたフォトニックバンド構造から、結晶中の固有モードには異常に遅い群速度を持ったものが多数存在することがわかっている。この固有モードは、共振器としての Q 値は高いことが予想され、このモードを利用することにより外部共振器なしで容易にレーザー発振が起こせると予想される。また非線形光学における位相整合条件は逆格子ベクトル(\mathbf{G})の任意性によって容易に達成できると予想される。これらの予想に基づいて、レーザーと位相整合した第2高調波発生(SHG)の実験を行った。

この研究に用いた試料は、一樣な誘電体(PbOガラス)に円筒の孔(エアロッド)を周期的に互いに平行に開けた二次元エアロッド格子である。円筒軸に垂直な二次元平面は、孔が三角格子を形成し、それぞれの間隔(格子定数 a)は $1\mu\text{m}$ 程度である。

フォトニック結晶中でレーザー作用を起こすために、この試料のエアロッドに色素溶液を満し、それを外部から光励起した。試料のパラメータは、 $a=0.88\mu\text{m}$ 、ホール径 $d=0.66\mu\text{m}$ である。励起は、Nd:YAGレーザーのSHG光(パルス幅 $\sim 1.5\text{ns}$ 、繰り返し 10Hz)を底面からロッドに平行に照射して行った。二次元面に平行な面内からの発光を分光器を通してCCDカメラで検出した。観測した試料からの発光スペクトルは励起光強度の増大と共に顕著な変化を示し(図1)、自然放出光スペクトルのピーク近傍の波長(603nm)と長波長側(639nm)の両方がスペクトル先鋭化を起こすことを観測した。また、これ

らの波長領域(603nm, 639nm)での発光強度の、励起光強度依存性は非線形特性を示しており、ある励起光強度に達すると急激な発光強度の増大を示していた(図2)。これは、発振のしきい値の存在を示すものである。さらに発光の時間減衰特性は、しきい値の下の場合と比べて、しきい値の上では時間幅は著しく狭くなる(図3)。すなわち、後者の形状は誘導放射により支配されていることを示している。これらの現象は、フォトニック結晶中でレーザー作用が起こっていることを明確に示すものであり、この分野では最初の観測である。づついて、我々はこのレーザー作用の機構解明のための実験を行った。以下にその結果を示す。

1. 色素の種類と濃度を変えると、自然放出光によるスペクトル形状は相当変化し、ピーク波長もシフトする。それにもかかわらず、レーザー作用は常に 639 nm の波長で生じる。一方、短波長側(603 nm)のレーザーはピーク波長の位置にずれる。
2. 光励起面の顕微鏡観察から、レーザーの面内での方向性は Γ -X 方向[(1,1)面に垂直な方向]であった。
3. 溶媒の屈折率変化に対応して、長波長側のレーザー波長は系統的にシフトした。

図4に例として溶媒の屈折率が $n=1.48$ の場合のフォトニックバンドを示す。図4の矢印で示しているエネルギー位置で、 Γ -X 方向に分散がほとんど平らな固有モードが存在する。このエネルギー位置は観測された長波長側のピーク位置と対応する。溶媒の屈折率変化に対応して上記の固有モードは系統的にシフトし、観測された波長と対応した。このことから、長波長側のピークは群速度の遅延効果によるレーザー作用であると思われる。また、短波長側のピークに関してはこれまでの実験事実からは明確な機構解明には至っていない。これは現在の周波数領域では複数のモードが混在しているためと思われ、今後、実験手法と試料の改善が必要である。

次に、位相整合した SHG を観測するために以下の実験を行った。この実験に用いた試料のパラメータは $a = 1.02 \mu\text{m}$ 、 $d = 0.69 \mu\text{m}$ である。この試料を Γ -X 方向に厚みが約 $150 \mu\text{m}$ になるまで薄く研磨した。この試料中に対称中心を持たない有機微結晶を、フォトニックバンドに影響を与えない程度微量エアロッドに注入した。そして、この有機微結晶からの SHG 信号強度を入射波の周波数の関数として検出した。波長可変な光パラメトリック発振器を光源として、これを試料の Γ -X 方向に平行に入射した。基本波の波数ベクトル (k^ω) と SHG 信号の波数ベクトル ($k^{2\omega}$) が同一直線上になる配置に分光器を置き、SHG 信号強度を CCD カメラによって検出した。

基本波の電場と検出された SH 波の電場の両方がロッド軸に平行に振動する偏光 (E - E 偏光)の場合、SHG 信号強度はある特定の波長で著しい強度の増大が観測された(図5)。また、基本波が E 偏向、SH 波の電場がロッド軸に垂直な偏向 (E - H 偏光)の場合、 E - E 偏光とは異なる SHG 信号強度の増大が観測された。対応するフォトニックバンド構造を図6に示す。図5に見られる SHG 信号強度の増大は、位相整合条件 ($|\Delta k| = |2k^\omega - k^{2\omega} \pm G| = 0$) を満足する波長であることがわかった。

これらの実験事実は、異常に遅い群速度を持ったモードや ω - k の分散の異常性に原因がある。フォトニック結晶中のレーザー作用に関するバンドは Γ -X 方向にわたって非常に平らな分散を示しており、PBG とは無関係である。この固有モードは二次元、三次元の周期性によって形成されるものであり、誘電体多層膜のような一次元結晶では生じない。また、SHG において位相整合条件が逆格子ベクトルの任意性によって容易に達成されるという事実は、多くの非線形光学現象において重要な概念である。なぜならば、通常の媒質では誘電率の周波数依存性があるためにエネルギーと運動量の保存則を同時に満たすことは容易ではない。さらに一次元結晶では、その分散関係は単純であり位相整合条件を満足する周波数領域は限られる。これらの概念は全く新しいものであり、本研究で実験的にこれらの現象を観測したことはこの研究分野において非常に重要な意味を持つものである。

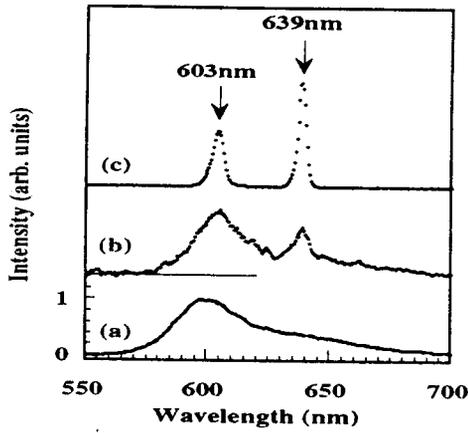


図1. 発光スペクトルの例。励起光強度は、(a) $24 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, (b) $0.3 \text{ mJ}/\text{cm}^2$, (c) $15 \text{ mJ}/\text{cm}^2$

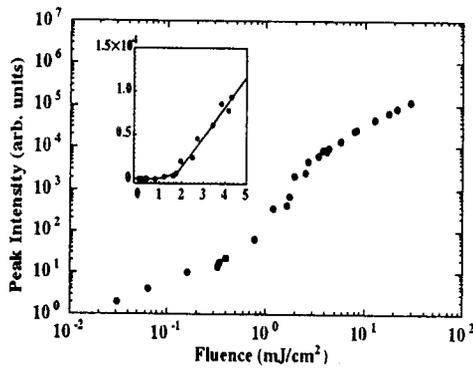


図2. 639 nmでの発光強度の励起光強度依存性。横軸は単位面積当たりの励起光エネルギー

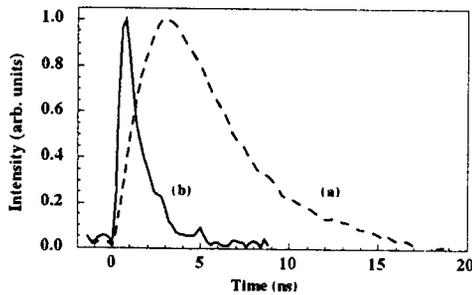


図3. 発光の時間減衰特性。励起光強度は、(a) $316 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, (b) $2.87 \text{ mJ}/\text{cm}^2$

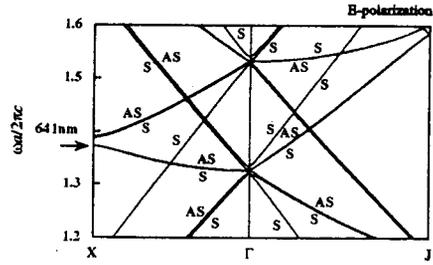


図4. 溶媒の屈折率が1.48の場合のフォトニックバンド構造。縦軸は格子定数を波長で割った規格化周波数、横軸は波数。A および AS は、対称モードと反対称モードを表す。

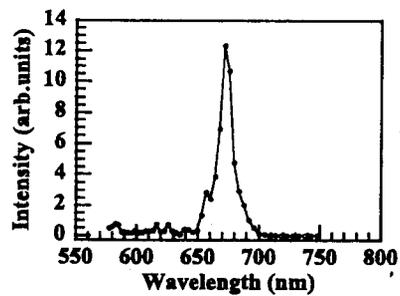


図5. E-E 偏光での SHG 信号強度の波長依存性。横軸は SHG 信号の波長をあらわしている。

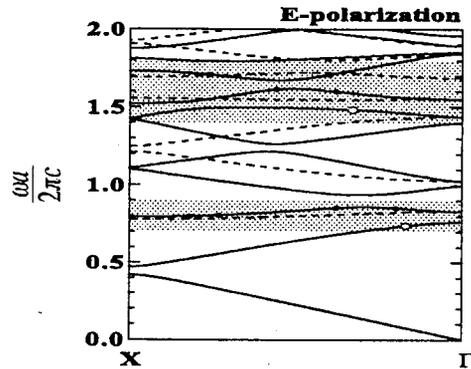


図6. 対応するフォトニックバンド構造。破線は非対称モードを表わしている。白丸と黒丸は位相整合条件をみたす点。白丸は図5.での670nm近傍のピークに対応している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 井 上 久 遠
副 査 助 教 授 川 端 和 重
副 査 助 教 授 迫 田 和 彰

学 位 論 文 題 名

Study on Control of Radiation Field by Using a Two-Dimensional Photonic Crystal -Laser Action and Phase-Matched Second Harmonic Generation-

(2次元フォトリック結晶を用いた輻射場の制御に関する研究
-レーザー作用と位相整合第2高調波発生-)

近年、フォトリック結晶、すなわち、光の波長程度の周期構造をもつ2次元、3次元の誘電体の人工結晶に関する研究が盛んに行われている。この結晶中の電磁波の固有モードはフォトリックバンドを形成し、また、エネルギーと波数に関する分散関係は、一様な媒質中と著しく異なる。特別な場合には、ある特定の周波数範囲で電磁波モードが存在しないようなフォトリックバンドギャップを生ずる。これらの特性から、理論的にはフォトリック結晶を用いて多様な輻射場の制御が可能になると期待されている。しかしながら、このような結晶試料を作製することはごく最近まで容易でなかったこともあって、上記の輻射場の制御に関する実験的研究は殆どなされていなかったのが現状である。

申請者は、鉛ガラスを用いて作製したキャピラリ型2次元エアロッド結晶を用いて、輻射場の制御に関する基礎的な実験研究、すなわち、1) レーザー作用の観測と、2) 位相整合した光第2高調波発生 (SHG) の研究を実施し、2次元フォトリック結晶の特性を反映した、これらの観測に世界で初めて成功し、詳しい実験と解析を行った。以下に主な成果を述べる。

1) の研究では、エアロッド中に色素溶液を満たした試料を、532nmの光パルスで励起することにより、2次元面でレーザー作用が生ずることを見いだした。すなわち、励起光強度がしきい値を越えると、幅の広い発光スペクトルから、ある特定の波長領域のスペクトルのみが急激に増大する事実、並びに、その時間減衰特性が誘導放出により急激に速くなる事実を明らかにした。また、フォトリック結晶の格子定数、色素の種類、溶媒の屈折率を変化させた場合の特性の変化に関する詳細なデータを得て、計算で求めたフォトリックバンド構造と比較した。その結果、レーザー作用は群速度の小さい特定なバンドの周波数で生ずることを明らかにし、新しいレーザー機構を見出したものである。

2) の研究は、同じく2次元結晶のエアロッド中にごく微量の有機微結晶を導入し、赤外波長可変レーザーで励起した場合の微結晶からのSHG信号強度の励起波長並びに偏光依存性を観測することによって行った。特定な励起波長で顕著な信号の増大が生ずることを見出し、

計算で求めたバンド構造との比較から、いわゆる位相整合条件を満たした場合にこの現象が起こることを明らかにした。また、SHG 信号強度が群速度の遅延効果により増大する事実も見いだした。前者は、フォトニック結晶の顕著なバンド分散効果と逆格子ベクトルの自由度により、ごく一般的に位相整合が容易に満たせることを示したものであり、この概念は他の多くの非線形光学現象にも適用可能なため、その意義は大きい。

このように、申請者の研究成果は物理学、特に量子光学の進歩に貢献するところ大である。

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