

(LNS Experiment : #2483)

フットニック結晶からのスミス・パーセル放射スペクトル測定

大原直人¹, 近藤泰洋¹, 神戸 亮¹, 宮寄博司¹, 柴田行男², 伊師君弘²,
葛谷 勉², 日出富士雄³, 瀬川勇三郎^{4,5}, 山本貴一⁴, 堀内典明⁴,
大高一雄⁶, 山口修一⁷

¹東北大学大学院工学研究科 (980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 08)

²東北大学多元物質科学研究所 (980-8577 仙台市青葉区片平 2-1-1)

³東北大学原子核理学研究施設 (982-0826 仙台市太白区三神峯 1-2-1)

⁴理化学研究所フォトダイナミクスセンター (980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉 519-1399)

⁵東北大学大学院理学研究科 (980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉)

⁶千葉大学先進科学教育センター (263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

⁷千葉大学工学部 (263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

Measurement of Smith-Purcell Radiation Spectrum from a Photonic Crystal

N. Ohara¹, Y. Kondo¹, M. Kanbe¹, H. Miyazaki¹, Y. Shibata², K. Ishi²,
T. Tsutaya², F. Hinode³, Y. Segawa^{4,5}, K. Yamamoto⁴, N. Horiuchi⁴,
K. Ohtaka⁶ and S. Yamaguchi⁷

¹*Department of Applied Physics, Advanced School of Engineering, Tohoku University, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579*

²*Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577*

³*Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, 1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai 982-0826*

⁴*Photodynamics Research Center, The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), 519-1399 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-0845*

⁵*Department of Physics, Graduate School of Science, Tohoku University, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578*

⁶*Center for Frontier Science, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 982-0826*

⁷*Graduate School of Science and Technology, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 982-0826*

When the electron beam of high energy (150MeV) passes near the surface of a photonic crystal at uniform velocity, optical radiation in a millimeter wave region is observed. It turns out that this light is converted from the evanescent wave emitted by the electrons into propagating waves through the photonic band modes in resonance. Since the previous measurements showed that a radiation peak appeared in out of region above the mechanism, the experiments for specifying the origin of this radiation was conducted. It was observed that intensity of the radiation increased for a 3D photonic crystal of double layers.

フォトニック結晶の表面近傍を高エネルギー（150MeV）の電子ビームが等速度で通過する時に、ミリ波領域の光放射が観測される。この光は、電子から放射されたエバネッセント波（減衰波）が進行波に変換されたものであり、フォトニックバンドモードを共鳴的に励起した際に放出される光であることがわかった。しかしそのメカニズムに対応しない放射ピークが出現したため、この光放射起源を特定するための実験を行った。また、2層の3次元フォトニック結晶を用いて放射強度を増幅させることに成功した。

§ 1. 序

電子線が金属回折格子の表面近傍を通過するとき光を放出する現象がある。この光放射現象は1953年に Smith と Purcell によって報告されスミス・パーセル放射と呼ばれている[1]。スミス・パーセル放射とは等速度で運動する電子から放射される減衰波が回折格子により散乱を受け、遠方でも観測可能な進行波が放射される現象である。前回の実験では金属回折格子の代わりにフォトニック結晶を用いてスミス・パーセル放射を発生させるという実験を行った。その結果、フォトニックバンドモードの共鳴励起による光放射を観測することができたが、このメカニズムに対応しない原因不明の放射ピークも観測され、その起源を特定することはできなかった[2]。したがって今回はその放射ピークの起源を特定するための実験をテフロン球で構成された2種類のフォトニック結晶（単層）を用いて行った。また、2層の3次元フォトニック結晶を用いた実験も行った。本稿ではこれらの実験結果について報告する。

§ 2. 光放射メカニズム

フォトニック結晶中では、その固有状態を励起する光だけが存在可能であり、それ以外の光は結晶中に存在することができない。さらに、運動量-エネルギー空間（ (k, ω) 空間）においてバンド中で真空中の光の分散関係 $\omega = ck$ であらわされるライトコーンの内側の光だけが進行波となり、遠方でも観測できる光となる（第1図）。従って、本実験ではライトコーンの内側のフォトニックバンドモードが共鳴的に励起された際に放出される光を観測している。その放射メカニズムについて以下に示す。

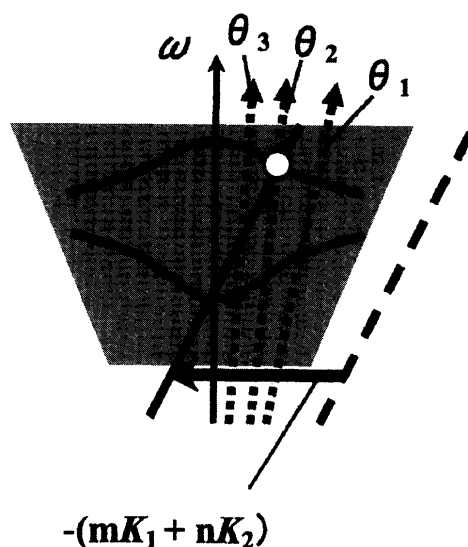
等速度で x 方向に運動する電子は電磁波を放射している。その波の波数ベクトルは以下の式で定義される。

$$k_i = (k_x, q_y, \Gamma_z) \quad (1)$$

ここでは、 x 軸を電子ビームの進行方向、 z 軸をフォトニック結晶と垂直な方向としている。電子から放射される光は、 (k, ω) 空間においてはその分散平面がライトコーンの外側に位置するため、遠方では観測できない減衰波である。しかし、減衰波がフォトニック結晶や回折格子のような周期構造物に入射すると、減衰波の波数ベクトルはウムクラップモーメントを得てライトコーンの内側へ逆格子ベクトルの線形和だけシフトする。その結果、減衰波が進行波へと変換され、遠方でも観測可能な光となる(第1図)。ウムクラップ散乱によって逆格子ベクトル (mK_1+nK_2) を受け取り、進行波となった波数ベクトルは

$$k_s = (k_x+mK_{1x}+nK_{2x}, q_y+mK_{1y}+nK_{2y}, \Gamma_{mn}) \quad (2)$$

と表される[2]。今後、 (mK_1+nK_2) だけシフトした減衰波の分散平面を H_{mn} 平面と呼ぶことにする。周期構造物が金属回折格子の場合は観測される光放射に特異性は無いが[3]、フォトニック結晶を用いた場合はフォトニックバンドによる分散を有するため、バンド分散線上で特異的な放射が観測される。実際、 (k, ω) 空間においてこの H_{mn} 分散線がフォトニックバンドを横切る際に励起が起こるため、鋭く高強度な放射ピークが観測される[4, 5]。

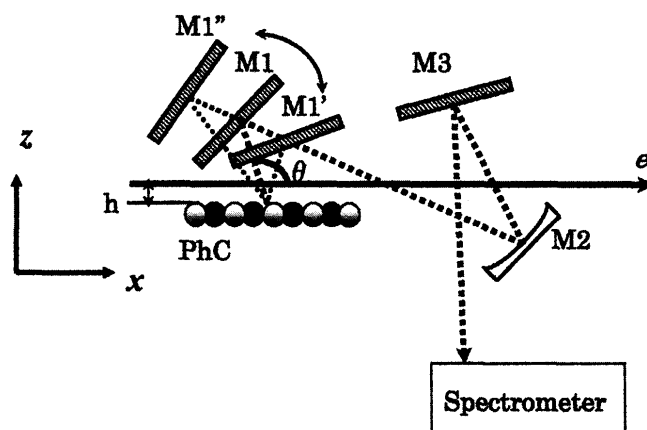


第1図 (k, ω) 空間における散乱過程の模式図。減衰波の分散直線（破線）がウムクラップ散乱をうけ、ライトコーン（影をつけた部分）の内部へシフトし、（実線）となる。実曲線はフォトニックバンドを模式的に表したもの。点線矢印は放射角度 θ を固定したときのスペクトルに相当する。

§ 3. 実 験

核理研に設置した測定系の概略を第2図に示す。フォトニック結晶の表面近傍を、電子線加速器から放出された電子ビーム（150MeV）が通過する。ビームの平均電流は $1.5\mu\text{A}$ 、電子ビームの断面は直径10mmの円形であり、ビーム高さはフォトニック結晶から10mm離れた位置に固定されている。フォトニック結晶から放射された光は、光学系の中を第2図の点線で示した経路を通って干渉分光計に導かれる。平面鏡 M1 は可動鏡になっており、干渉計への光学軸が変わらない設計になっている。M1 を動かすことで放射角度 θ 依存性を測定することができ、 θ は $50^\circ < \theta < 110^\circ$ の範囲で測定した。

実験では直径3.2mm のテフロン球（ $\epsilon = 2.05$ ）を六方最密構造で配列させたフォトニック結晶（PhC）を



第2図 実験に用いた光学系。M1, M3 : 平面鏡, M2 : 凹面鏡, h : ビーム高さ, θ : 放射角度。

用いており、単層の2次元 PhC と2層の3次元 PhC を用意した。なお、単層の2次元 PhC については、前回の実験で出現した H_{mn} 線に乗らない放射ピークの起源を調べるために2種類の試料を用意した。

§ 4. 実験結果と考察

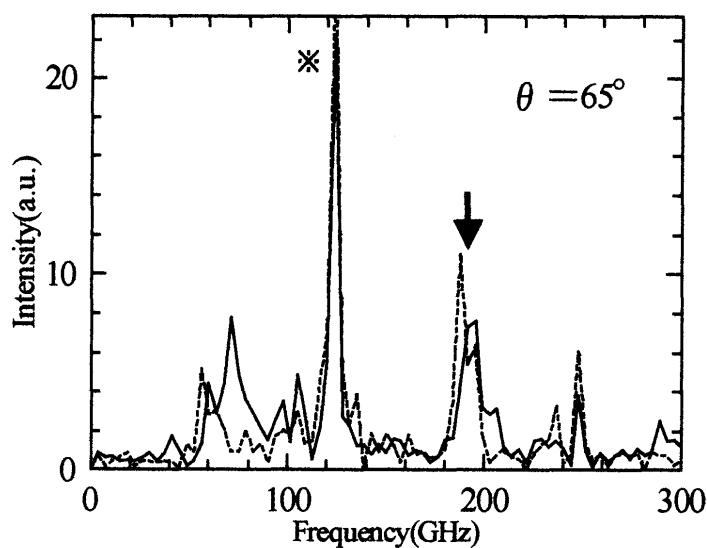
4-1 テフロン球 単層

原因不明の放射ピークを観測した前回の実験では、テフロン球を粘着フィルムで支えているフォトニック結晶を用いており、そのフィルムに撓みが生じていた。この撓みが原因不明の放射ピークを発生させる原因ではないかと予測し、十分撓ませたフォトニック結晶とテフロン球を平面上に配列させた撓みの無いフォトニック結晶についてその放射起源を特定するための実験を行った。十分撓ませた試料からの光放射スペクトルを第3図に示す。実線が今回のスペクトル、点線が前回のスペクトルであり、 H_{mn} ピーク (矢印) と原因不明のピーク (※印) とともに検出され、再現性の良い結果が得られた。第4図に十分撓ませた試料から放射された光のスペクトルの放射角度 θ 依存性を示す。図中の矢印で指しているピークは第2節で紹介したメカニズムによりフォトニック結晶からウムクラップ散乱を受けて生成された光であり、 H_{mn} 分散線上に分布するピークである。※印で指しているピークは原因不明の放射ピークに対応している。どちらのピークも鋭いピーク構造を持っており、強い角度依存性を有している。

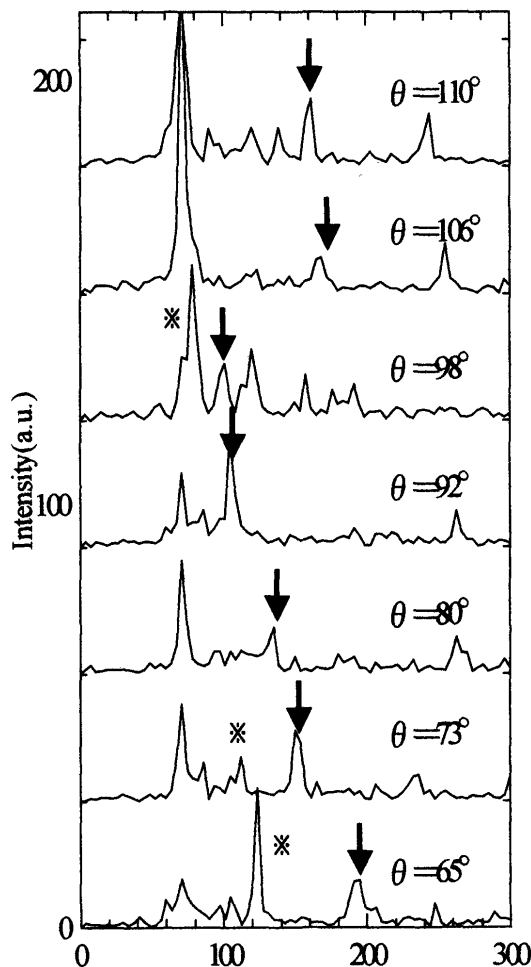
次に平面上に配列させた試料の (k, ω) 空間における光放射強度分布を第5図に示す。今回の実験では、放射角度 θ が $110^\circ \sim 50^\circ$ と、広範囲に及ぶ測定を行った。なお、横軸の $(k_s)_x$ は放射角度 θ を用い、以下の関係式により求めた。

$$(k_s)_x = \frac{\omega}{c} \cos \theta \quad (3)$$

H_{mn} [(-1,0), (-2,0), (-3,0)] 線上に分布している放射ピークは前号で報告したとおり、フォトニックバンドモードの共鳴的な励起により生成された光である。また、テフロン球を平面上に配列させた試料からも H_{mn} 分散線上に分布しない原因不明な放射ピークが観測されたため、その放射起源が撓みによる影響で



第3図 テフロン球単層の撓んだ試料からの光放射スペクトル (実線) と前回測定したスペクトル (点線)。矢印で示してあるピークは (k, ω) 空間で H_{mn} 線上に分布するピーク、※で示してあるピークが原因不明のピークである。



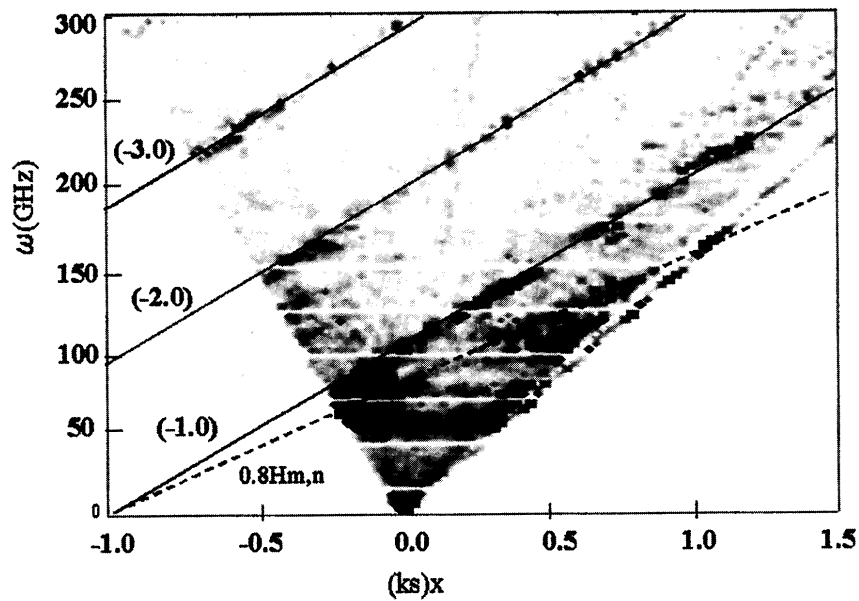
第4図 テフロン球単層の撓んだ試料からのスペクトルの放射角度依存性。

はないことがわかった。さらにこの放射ピークは、 (k, ω) 空間において H_{mn} 分散線の約0.8倍の傾きを持つ線上に分布していることがわかった。よって、今後この分散平面を $0.8H_{mn}$ 、その線上に分布する放射ピークを $0.8H_{mn}$ 放射ピークと呼ぶことにする。 $0.8H_{mn}$ 分散線上に分布するピーク構造は単色性と指向性という点で H_{mn} ピークと酷似しており、それと似た過程で何らかの物質から散乱を受け、生成された光である可能性が高い。散乱物としてはフォトニック結晶やそれを支持しているアクリル枠の端面、エコソープなどが考えられるが現時点でその原因を特定することはできなかった。

4-2 テフロン球 2層

2次元単層の試料を重ね、2層にしたフォトニック結晶について実験を行った。第6図は、2層フォトニック結晶の (k, ω) 空間における光放射強度分布である。2層の場合フォトニックバンドの密度が増すため、放射ピークは単層のときよりも多く観測される。第7図に単層と2層のスペクトルの比較図を示す。単層に比べ、2層のフォトニック結晶では放射強度が増大した。単層の場合、電子ビームから発生するエバネッセント波はフォトニック結晶の外側(下方)への漏出が大きい。だが、2層(多層)のフォトニック結晶では、1層目から漏出した光をその下層で受け取り、散乱が起ることでエネルギーの漏出が減り、効率よく光を生成することができる。その結果、共鳴的に放射強度が増幅される[5]。ただし、漏出した光の散乱は上層の数層においてのみ発生するため無闇に層を増やしても意味が無い。

なお、 $0.8H_{mn}$ 放射ピークについては2層のフォトニック結晶でも増強していることから、フォトニック結

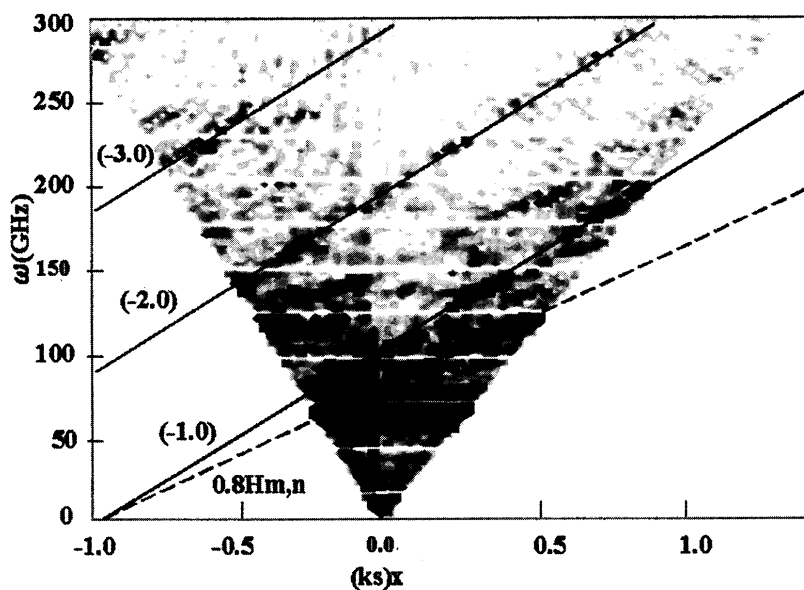


第5図 配列させた試料の (k, ω) 空間における光放射強度分布。実線がそれぞれ H_{mn} $[(-1,0), (-2,0), (-3,0)]$ 分散線に対応している。点線は $0.8H_{mn}$ 線である。

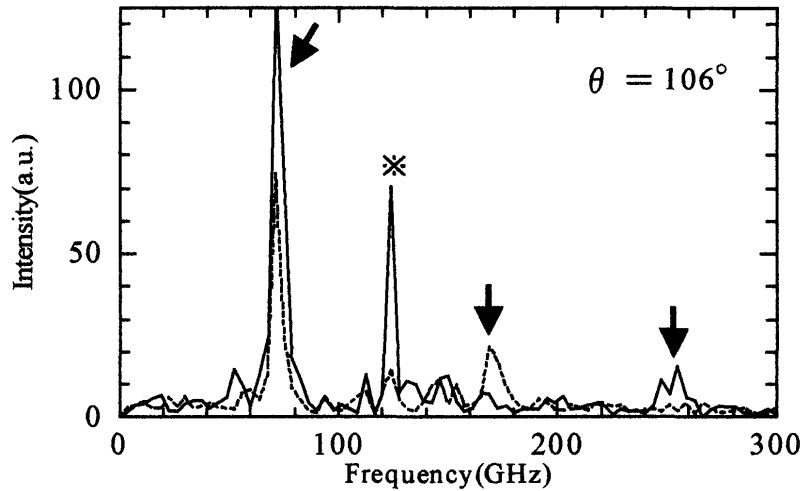
晶自身からの散乱が原因である可能性が高いと考えられる。

§ 4. まとめ

電子がフォトニック結晶の表面近傍を等速度で通過するときに、単色性に優れ、強い角度依存性を持つ特異な光放射が観測された。その他に光速 $0.8c$ に対応する $0.8H_{mn}$ 放射ピークが観測され、このピークの原因として試料の撓みが疑われていた。しかし、2種類の撓みの異なるフォトニック結晶を用いた実験により、



第6図 2層フォトニック結晶の (k, ω) 空間における光放射強度分布図。



第7図 2層（実線）と単層（点線）の光放射スペクトル。矢印で示すピークは H_{mn} 分散線上に分布する。 $0.8H_{mn}$ ピークを※で示す。

撓みによるものではない事がわかり、この放射ピーク発生の原因を特定することはできなかった。また、フォトニック結晶を2層にすることで単層の時よりもシャープで強い強度を持つ光を発生させることに成功した。

参 考 文 献

- [1] S.J. Smith and E.M. Purcell : Phys. Rev. **92** (1953) 1069.
- [2] K. Yamamoto *et al.*: Research Report of LNS, Tohoku University, **35** (2002) 90.
- [3] Y. Shibata *et al.*: Phys. Rev. E **57** (1998) 1061.
- [4] K. Ohtaka and S. Yamaguti : Optics and Spectroscopy **91** (2001) 506.
- [5] K. Ohtaka and S. Yamaguti : Optics and Quantum Electronics **34** (2002) 235.