

(LNS Experiment : #2452, #2468, #2496)

## フォトニック結晶からのスミス・パーセル放射と未解明放射の観測

神戸 亮<sup>1</sup>, 近藤泰洋<sup>1</sup>, 大原直人<sup>1</sup>, 清水俊明<sup>1</sup>, 宮寄博司<sup>1</sup>, 柴田行男<sup>2</sup>,  
伊師君弘<sup>2</sup>, 蔦谷 勉<sup>2</sup>, 日出富士雄<sup>3</sup>, 瀬川勇三郎<sup>4,5</sup>, 山本貴一<sup>4</sup>,  
堀内典明<sup>4</sup>, 渡辺良祐<sup>4</sup>, 大高一雄<sup>6</sup>, 山口修一<sup>7</sup>

<sup>1</sup>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)<sup>2</sup>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)<sup>3</sup>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)<sup>4</sup>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)<sup>5</sup>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)<sup>6</sup>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)<sup>7</sup>千葉大学工学部 (263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33)

## Observation of Smith-Purcell Radiation and Unknown Radiation from a Photonic Crystal

M. Kambe<sup>1</sup>, Y. Kondo<sup>1</sup>, N. Ohara<sup>1</sup>, T. Shimizu<sup>1</sup>, H. Miyazaki<sup>1</sup>, Y. Shibata<sup>2</sup>,  
K. Ishi<sup>2</sup>, T. Tsutaya<sup>2</sup>, F. Hinode<sup>3</sup>, Y. Segawa<sup>4,5</sup>, K. Yamamoto<sup>4</sup>,  
N. Horiuchi<sup>4</sup>, R. Watanabe<sup>4</sup>, K. Ohtaka<sup>6</sup>, and S. Yamaguchi<sup>7</sup>

<sup>1</sup>*Department of Applied Physics, Advanced School of Engineering, Tohoku University, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8579*<sup>2</sup>*Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University, 2-1-1 Katahira, Aoba-ku, Sendai 980-8577*<sup>3</sup>*Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, 1-2-1 Mikamine, Taihaku-ku, Sendai 982-0826*<sup>4</sup>*Photodynamics Research Center, The Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), 519-1399 Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-0845*<sup>5</sup>*Department of Physics, Graduate School of Science, Tohoku University, Aoba, Aramaki, Aoba-ku, Sendai 980-8578*<sup>6</sup>*Center for Frontier Science, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 982-0826*<sup>7</sup>*Graduate School of Science and Technology, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba 982-0826*

The normal and unknown Smith-Purcell radiation (SPR) from samples that were different in periods, edge structure, and number of layer has been studied. Comparing with theoretical calculation of photonic bands, it has been found that unknown radiation as well as SPR lies on the photonic bands. The intensity of unknown radiation is enhanced by increase of the number of sample layer. Therefore, this unknown radiation may be emissions from excited photonic band modes in the photonic crystal.

フォトニック結晶から放射されるスミス・パーセル放射 (SPR) と従来の理論では説明できない放射の起源を明らかにすべく、周期構造、端面構造、層数の異なるサンプルについて放射を観測した。理論計算との比較から正規のスミス・パーセル放射、未解明放射ともにフォトニックバンド上にあることがわかった。層数を増やすと未解明放射が増強することから、内部で特定のフォトニックバンドモードが励起されて放射されていると考えられる。

## §1. はじめに

スミス・パーセル放射 (以下 SPR と記す) は1953年、金属回折格子を用いて観測され、Smith と Purcell により報告された [1]。我々のグループは金属回折格子をフォトニック結晶に置き替え、フォトニックバンド構造の観測や効率の良い光変換への応用を視野にフォトニック結晶からのスミス・パーセル放射の基礎研究を進めてきた。前号 [2]、前々号 [3]において、本グループはフォトニック結晶からの SPR の観測に成功し、SPR ではない放射も観測されることについて述べた。特に今回は、この SPR ではない放射の起源がサンプルの撓みでないことを示した。また2層の実験から、理論的予測 [4] の通り、層が増えるとシャープで高強度な放射が得られるであろうことも示した。ただしこれまでは三角格子の1方向からしか測定してこなかった。そこで今回は周期構造、サンプルの端面、層数の異なるサンプルからのスミス・パーセル放射について報告する。

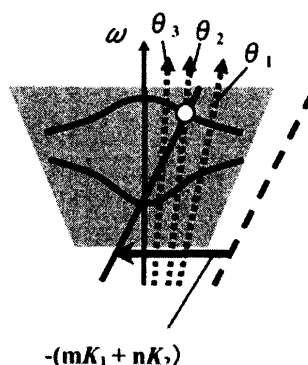
## §2. フォトニック結晶からの SPR と未解明放射ライン

フォトニック結晶からの SPR は、次の条件を全て満たしたものである。

1.  $(k, \omega)$  空間でライトコーンの内側にある。
2. フォトニックバンド上である。
3. 電子から放射される減衰波の分散線をフォトニック結晶の逆格子ベクトルの線形和だけシフトした分散線上にある。

1は観測可能な進行波に要請される条件である。2は、フォトニック結晶内にはフォトニックバンド上の光しか存在できないことによる制約である。これにより、フォトニックバンドを反映した SPR が得られることになる。

3は、ウムクラップ散乱によって減衰波がライトコーン内にシフトすることで観測可能な進行波になることである。これらを模式的に表したのが第1図である (詳細は [3, 4])。



第1図  $(k, \omega)$  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、 $H_{mmm}$  (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  $\theta$  を固定したときのスペクトルに相当する。

電子の速度  $v$  が光速  $c$  に近い場合 ( $v/c \sim 1$ ),  $H_{mm}$  分散線はほとんどライトコーンの境界線と平行になる。つまり、この条件で SPR を観測するとライトコーンの境界線と平行な  $H_{mm}$  分散線が等間隔ででてくると考えられる。この正規のラインを以降シフトの小さい順に  $H_1, H_2, H_3, \dots$  と呼ぶことにする。しかし、これまでの実験では、ライトコーンの境界線より緩やかな傾きの分散線も観測された。我々はその起源を探ってきて、サンプルの撓みによるものではないことは分かった。そこで、今回はこの SPR ではない放射の起源を考えるうえで、周期構造、端面構造、層数の効果に注目し放射ラインの振る舞いを追った。

### §3. 実験

測定系の基本構成は以下に示す改善点の他は前回、前々回の報告と同様である [2,3]。

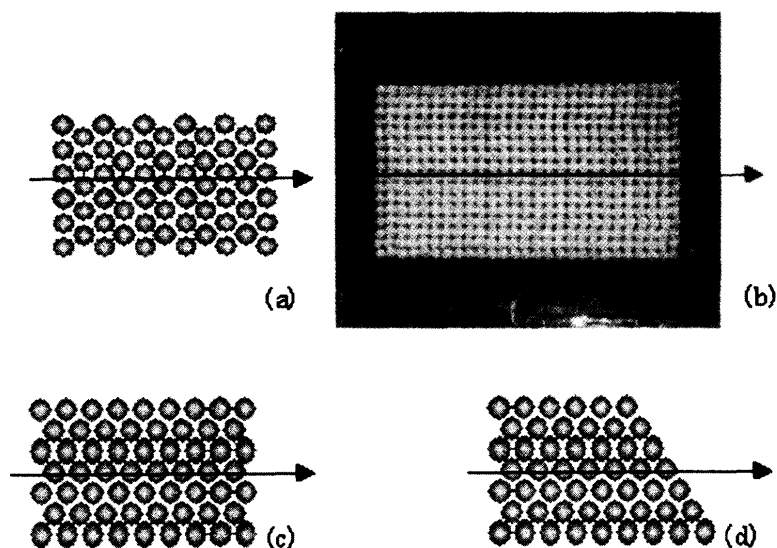
- ・チャンバーの内部にエコソープを貼り、迷光が発生しないようにした。これにより S/N 比が向上した。
- ・微弱信号検出を Box car 積分器で、A/D 変換を

Data Acquisition (DAQ) ボードで行なうようにし、測定時間を約 1/2 に短縮した。(以前は Lock-in Amp. とデジボルで行なっていた。)

フォトリソグラフィは直径 3.2mm のテフロン球 ( $\epsilon = 2.05$ ) を配列し、粘着テープで支持して作成した。多層サンプルの場合は 1 層サンプルを重ねて多層とした。測定したサンプルを第 1 表に示し、構造と電子の通る方位を第 2 図に示す。

第 1 表 測定サンプル一覧

サンプル形状	層数	ビーム入射方位
三角格子	1	$\Gamma - M$
三角格子	2	$\Gamma - M$
三角格子	4	$\Gamma - M$
三角格子	1	$\Gamma - K$
三角格子斜めカット	1	$\Gamma - K$
四角格子	1	$\Gamma - X$
四角格子	4	$\Gamma - X$



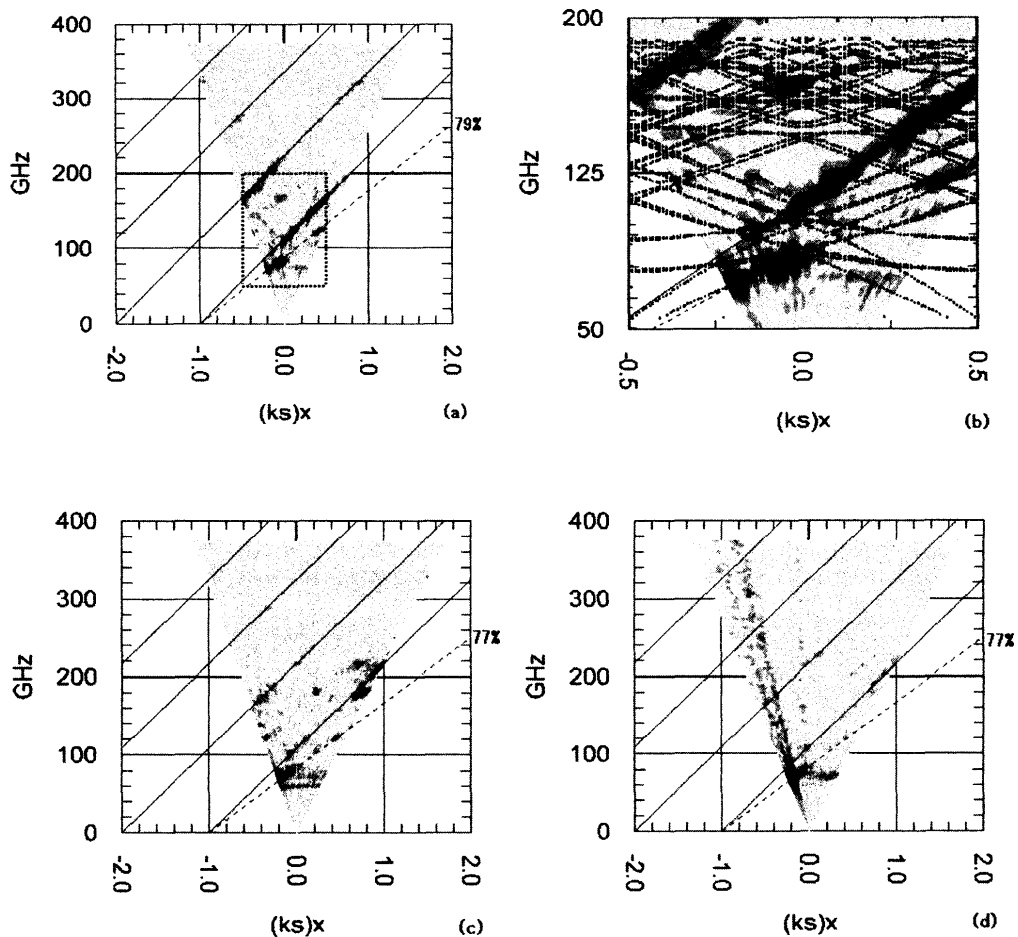
第 2 図 (a)三角格子  $\Gamma - M$  入射配置, (b)四角格子  $\Gamma - X$  入射配置, (c)三角格子  $\Gamma - K$  入射配置, (d)三角格子斜めカット  $\Gamma - K$  入射配置 (矢印は電子線の入射方向)。

### §4. 実験結果と考察

#### 4-1. 三角格子 $\Gamma - M$ 入射配置 1, 2, 4 層

第 3 図(a), (c), (d)に層数を変えて、SPR スペクトルを観測した結果を示す。これらより増強されるのは未

解明放射ライン上の特定の放射であることがわかる。第3図(b)に示した1層の場合のバンド計算との比較より、全ての放射ピークがバンドと $H_1$ ラインの交点であることが分かる。また、79%放射ラインのピークもバンドに乗ることが分かる。このことから、未解明放射もフォトニックバンドからの励起放射であると考えられる。



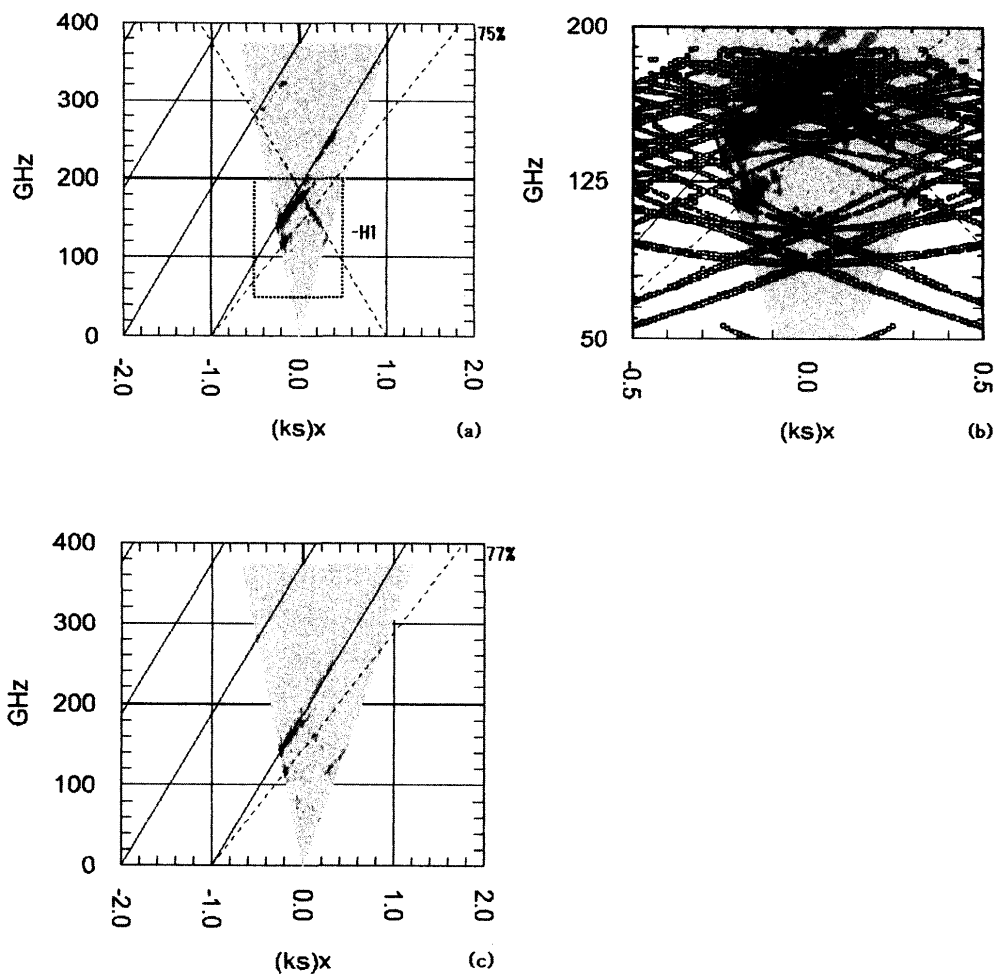
第3図 テフロン球 $\Gamma$ - $M$ 入射配置の角度依存スペクトル。(a)1層の測定結果, (b)1層の点線四角内部とバンド計算との比較, (c)2層, (d)4層の測定結果(横軸は逆格子ベクトルで規格化している)。

#### 4-2. 三角格子 $\Gamma$ - $K$ 入射配置

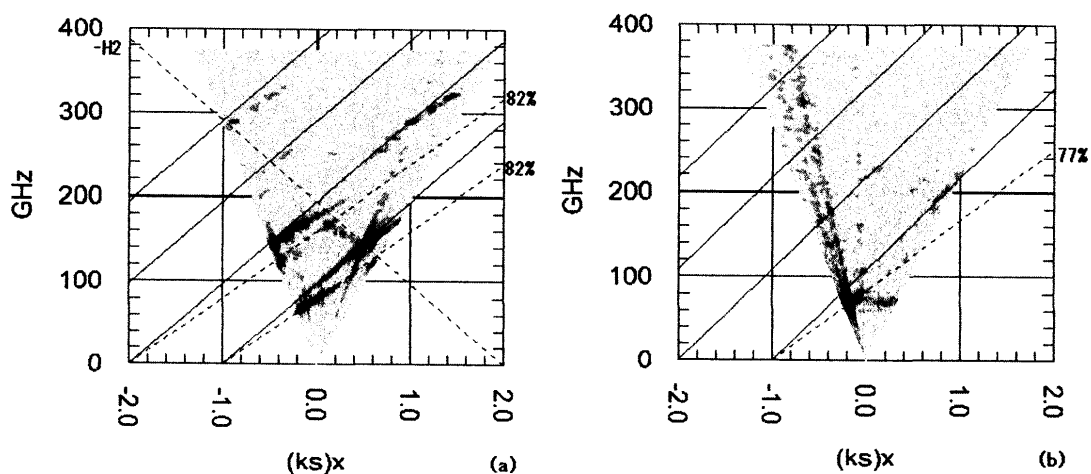
第4図(a)に示すように、 $\Gamma$ - $K$ 入射配置においては、これまで同様の未解明放射ラインとともに、理論上ありえない正負逆の傾きのライン(以下 $-H_1$ ラインと呼ぶこととする)に乗る放射が観測された。理論計算との比較が第4図(b)である。いずれの放射もバンドに乗っている。我々は先の $-H_1$ ラインに注目し、その起源を端面の反射と仮定し、端面を斜めに配列したサンプルでその効果を無くそうと試みた。その結果、第4図(c)のようにラインが消えたように見えた。しかし、ビーム条件の違い、サンプルサイズ短縮による放射強度の減少があるため端面による効果とは断定できない。また、次に示す四角格子の1層にも同様のラインが見られるようである。このことから、 $\Gamma$ - $K$ と $\Gamma$ - $X$ 入射配置に共通するテフロン球のビーム軸方向の連続性が原因ではないかとも考えられる。

#### 4-3. 四角格子 $\Gamma$ - $X$ 入射配置 1, 4層

$\Gamma$ - $K$ 入射配置でも言及したが、四角格子の $\Gamma$ - $X$ 入射配置でも $-H_2$ ラインに乗る放射が観測された(第5図(a))。また、4層にすると、他のサンプルと同様に未解明放射ラインの特定の放射のみが増強された(第



第4図 テフロン球 $\Gamma$ - $K$ 入射配置の角度依存スペクトル。(a) 1層の測定結果, (b) 1層の点線四角内部とバンド計算との比較, (c) 1層端面斜めカットの測定結果 (横軸は逆格子ベクトルで規格化している)。



第5図 テフロン球 $\Gamma$ - $X$ 入射配置の角度依存スペクトル。(a) 1層, (b) 4層の測定結果 (横軸は逆格子ベクトルで規格化している)。

5図(b)。こうして、未説明放射は層数 (バルクの割合) が増えると増強されることが示された。よって、内部で特定のフォトニックバンドモードが励起され放射していると考えられる。

## §5. まとめ

前回の報告でも触れたように、層を増やすと確かに強度は増すことが分かった。しかし増強されるのは正規のスミス・パーセル放射ではなく、未解明放射ラインの一部であった。すなわち、未解明放射ラインは内部で励起されるフォトニックバンドモードの放射であり、ゆえにバルクの割合が増えると増強すると考えられる。

## 参 考 文 献

- [1] S.J. Smith and E.M. Purcell : Phys. Rev. **92** (1953) 1069.
- [2] N. Ohara *et al.*: Research Report of LNS **36** (2003) 115.
- [3] K. Yamamoto *et al.*: Research Report of LNS **35** (2002) 90.
- [4] K. Ohtaka and S. Yamaguti : Optics and Quantum Electronics **34** (2002) 235.