

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23654197

研究課題名(和文)新機能性探求へ向けたプラズマフォトニック結晶内部の直接波動計測

研究課題名(英文)Direct measurement of a wave propagating inside a plasma photonic crystal for investigating a novel functional property

研究代表者

高橋 和貴 (Takahashi, Kazunori)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80451491

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、誘電率の周期的な構造から形成されるフォトニック結晶内部の電磁波を直接計測する実験系を構築することを目的としており、気体中に誘電率を発現可能な低気圧プラズマを用いて、マイクロ波周波数帯のフォトニックバンドギャップを発現させることに成功した。ここでは、ガス圧15Pa程度のアルゴン気体中に周期的構造を有した高電圧電極を設置し、400kHzの高周波放電により10の10乗程度のプラズマ周期的構造を形成した。結晶中にマイクロ波を導入した際の透過率計測により、周波数2-3GHz帯に周期構造に起因するバンドギャップが発現することが観測され、一次元モデルによりその理論的な解釈を与えた。

研究成果の概要(英文)：In order to directly measure the electromagnetic field of the waves propagating inside photonic crystals, the dielectric constant in the argon gas is spatially modified by the presence of the low-pressure discharge. The periodic plasma structure is successfully produced by locating the high-voltage electrode, which has a periodic structure and is biased by a 400 kHz radiofrequency power supply, the plasma density above 10^{10} cm⁻³ can be obtained. The microwave is also injected into the plasma photonic crystal and the appearance of the propagation band-gap is detected near the frequency of 2-3 GHz. The wave propagation in such periodic plasma structure is analyzed in one-dimensional model and the results are in fair agreement with the transmittance characteristic observed in the experimental plasma photonic crystal. This will provide important insights into the photonic crystal physics in linear and non-linear regime.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学・プラズマ科学

キーワード：プラズマフォトニック結晶 低気圧プラズマ マイクロ波 バンドギャップ

1. 研究開始当初の背景

誘電率の異なる媒質を周期的に配列したフォトニック結晶は、その結晶構造に起因するバンドギャップを利用したレーザー励起共振器、光波路、光ファイバー、負の屈折率媒体など、光・電磁波制御素子としての応用が研究・展開されている。フォトニック結晶では、構造サイズと波長の間比例則が成立するため、その構造やスケールで特性を変えることが可能となる。フォトニック結晶内部の電磁場に関しては理論研究が先行し、実験では透過法による計測が主である。線形波動の近接場計測が近年ようやく報告されつつある [M. Burrelli et al., Phys. Rev. Lett. 102, 033902 (2009)] が、結晶内部計測に関してはその空間スケールの小ささや固体誘電体内部に受信器を設置できないという問題から実現されておらず、非線形光学現象に関してもその報告例は無い。

一方で、大気圧マイクロプラズマを用いて、ミリ波帯のプラズマフォトニックバンドギャップが現れることが観測されその有効性が示されつつあるが [T. Sakaguchi et al., J. Appl. Phys. 101, 073305 (2007)]、結晶内部の電磁場の計測に関してはやはり実験が困難であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、フォトニック結晶内部を伝搬する波動電磁場の直接計測が可能な実験系を構築することでプラズマフォトニック結晶の有する新機能性現象の発現を探求可能な実験系を確立することを目的としている。今回の研究では、cm スケールのプラズマ周期構造を積極的に形成し、フォトニック結晶の特徴である周波数バンドギャップを発現させ、機能性探究に向けた研究展開を行うことを目的としている。

3. 研究の方法

(1) プラズマ周期構造形成法

図1にプラズマ二次元周期構造形成に用いた(a)実験装置概略図と(b)放電用の電極配置図を示す。60cm×45cm×35cmの角型真空容器に油拡散ポンプおよび油回転ポンプを接続し、背景真空度を 10^{-3} Pa以下まで減圧する。真空容器側壁からニードルバルブを介してアルゴンガスを導入し、容器内圧力が15Paになるように流量を調整する。容器内部には、図1(b)に示す高圧電極および設置電極を導入し、電極間に直流電圧または400kHzの高周波電圧を印加することでプラズマの生成が可能となっている。高圧電極は、図2(b)に示すように所望の周期構造を形成するために、電極上部に空孔を有した絶縁体および設置電極を設けており、空孔のみで放電が起こりプラズマ周期構造の形成を実現した。図2には、400kHz、100Wの高周波電力を投入した際の放電の様子であり、電極周期構造に応じたプラズマの濃淡が形成されていること

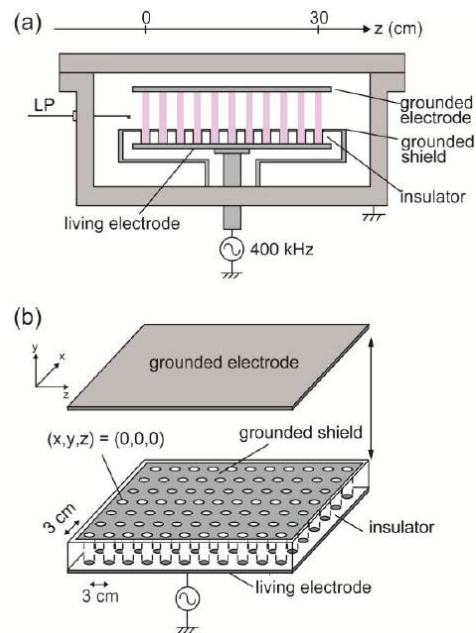


図1: プラズマ二次元周期構造形成のための(a)実験装置概略図および(b)電極配置図。



図2: 400kHz, 100W投入時のアルゴンプラズマ生成の様子。

が分かる。また1次元周期構造を形成するには、電極の形状を変更することで、図1中のz軸に沿ったプラズマの濃淡の形成を実現した。ここで形成されるプラズマパラメータの計測には、静電ラングミュアプローブを持ち、計測した電子温度とイオン飽和電流から算出を行い、後述するバンドギャップの数値計算で使用した。

(2) マイクロ波透過率計測によるバンドギャップ評価

図1(a)の真空容器のz軸両端から、中心周波数を4GHzとして設計した半波長ダイポールアンテナを挿入し、それぞれベクトルネットワークアナライザのポート1, 2へとセミリジッドケーブルを介して接続する。ここではネットワークアナライザの電気的保護のために、周波数DC-10GHzで動作が保証されているDCブロックを用いている。まず初め

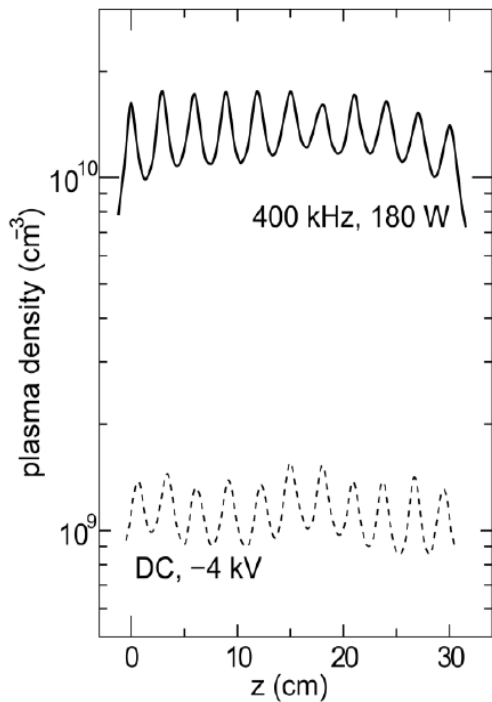


図 3: 直流放電および 400kHz 高周波放電時のプラズマ密度の z 軸方向分布.

にプラズマを生成しない状態でネットワークアナライザの S_{21} パラメータのキャリブレーションを行い、その後プラズマ生成時の S_{21} パラメータの計測を行った。これは投下的に次式で示される透過率の計測を行っていることに相当する。

$$T = \frac{S_{21 \text{ plasma on}}}{S_{21 \text{ plasma off}}}$$

ここで、 $S_{21 \text{ plasma on}}$ および $S_{21 \text{ plasma off}}$ はそれぞれ、プラズマ生成時、プラズマ非生成時のアンテナ間の透過係数を示している。

4. 研究成果

図 3 に、2 次元周期構造を有する高圧電極に直流電圧を印加した場合 (点線)、および 400kHz 高周波電圧を印加した場合 (実線) のプラズマ密度の z 軸方向分布となっている。図 3 から分かるように、両者のプラズマ生成方式において周期構造の格子定数に相当する 3cm 感覚でプラズマ密度の濃淡が形成されていることがわかる。また直流放電の際には、最大プラズマ密度が 10^9 cm^{-3} 程度であるのに対して、高周波放電を適用した場合には 10^{10} cm^{-3} の比較的密度の高いプラズマを生成可能であることが明らかになった。直流放電は安定でノイズの少ないプラズマの維持が可能である一方で、 10^9 cm^{-3} 程度のプラズマ密度ではプラズマ-波動の相互作用が少なく、マイクロ波周波数帯ではプラズマ誘電率が真空の誘電率と大差ないため、フォトニック結晶としての特性が発現しないと考えられる。そこで本研究におけるフォトニック結晶

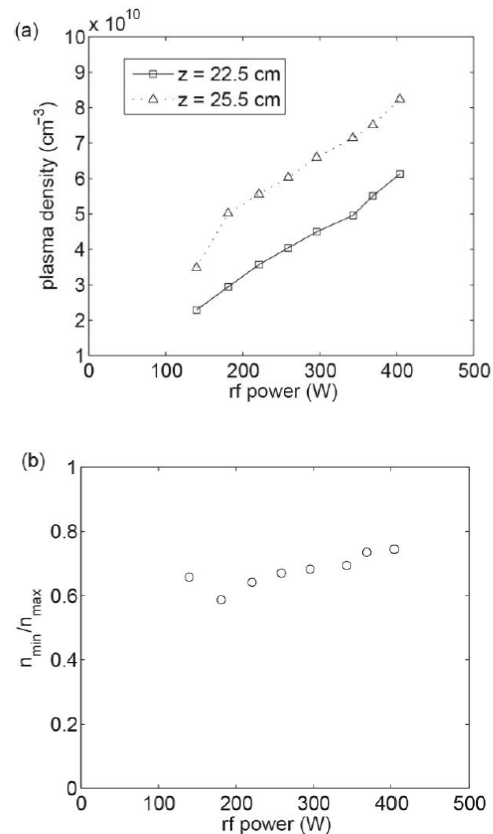


図 4: (a) $z = 25.5 \text{ cm}$ (Δ) および 22.5 cm (\square) におけるプラズマ密度の rf 電力依存性. (b) 最小 - 最大の密度比の rf 電力依存性.

に関する実験では、高周波放電方式を採用した。

図 4(a) には、1 次元周期プラズマ構造を形成した際の、最大密度となる $z = 25.5 \text{ cm}$ と最小密度となる $z = 22.5 \text{ cm}$ におけるプラズマ密度の rf 電力依存性を示す。rf 電力の増加に伴い、両者の位置でプラズマ密度がほぼ線形に増加していることがわかる。このことから、高周波電力を制御することで、プラズマの誘電率に直接関与するプラズマ密度を詳細に制御できることがわかる。本実験での動作パラメータ領域では、 $1-9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ の範囲で最大密度を制御することが可能であるといえる。また、図 4(b) にはこれらの密度比を算出した結果を示す。動作 rf 電力に拘わらず、密度比はほぼ 0.7 程度となっていることがわかる。本研究ではこの動作条件において、後述するプラズマフォトニックバンドギャップの計測と計算を行った。

図 5 には、上述のように生成したプラズマ周期的構造の両端にダイポールアンテナを設置して計測した、マイクロ波の透過率の計測結果を示している。図中点線で示すように、1-2GHz の周波数帯で大きな透過率の現象が観測され、プラズマ生成用の rf 電力の増加に伴い高周波側へとシフトしていることが分かり、この周波数帯域は電子プラズマ周波数と近い値を示している。さらに 2GHz-3GHz

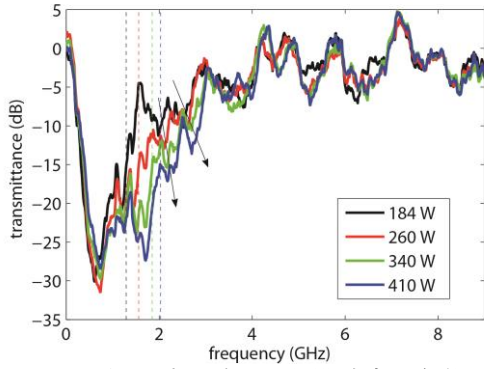


図 5: 1次元プラズマ周期構造内を伝搬するマイクロ波の透過率計測結果.

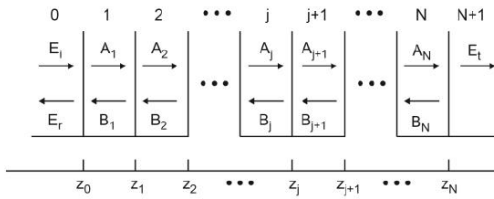


図 6: プラズマフォトニック結晶の一次元モデル図.

の帯域に-15dB および-10dB 程度の透過率の減少が起きていることが分かり、これらの周波数も図中矢印で示すように、rf 電力の増加、すなわち高密度化に伴い高周波側へとシフトすることが観測された。これらのバンドギャップの発現を理解するために、図 6 に示すように、単純な一次元モデルでの線形波動解析を行った。

誘電率の異なる媒質が図 6 のように配列されている際の、各媒質中の電場を図中のように定義する。この際に、各電場の関係は次式のように表される。

$$\begin{pmatrix} E_i \\ E_r \end{pmatrix} = M_0 \begin{pmatrix} A_1 \\ B_1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} A_j \\ B_j \end{pmatrix} = M_j \begin{pmatrix} A_{j+1} \\ B_{j+1} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} A_N \\ B_N \end{pmatrix} = M_N \begin{pmatrix} E_t \\ 0 \end{pmatrix},$$

ここで、行列 M_j は境界条件を考慮すると下記で与えられる。

$$M_j = \begin{pmatrix} \frac{k_j + k_{j+1}}{2k_j} \exp[-i(k_j - k_{j+1})z_j] & \frac{k_j - k_{j+1}}{2k_j} \exp[-i(k_j + k_{j+1})z_j] \\ \frac{k_j - k_{j+1}}{2k_j} \exp[i(k_j + k_{j+1})z_j] & \frac{k_j + k_{j+1}}{2k_j} \exp[i(k_j - k_{j+1})z_j] \end{pmatrix}.$$

これらの関係をまとめると次式が得られ、マイクロ波の透過率を理論的に求めることが可能となる。

$$\begin{pmatrix} E_i \\ E_r \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} E_t \\ 0 \end{pmatrix}, \text{ where } M \equiv M_0 M_1 M_2 \cdots M_N = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix}.$$

プラズマは高密度領域では誘電媒質として振る舞い、その誘電率は電子プラズマ周波数の関数として記述される。これをモデルに導入することで、プラズマ周期構造中を伝搬する電磁波の透過率を求めた。

図 7 に実験条件に相当するパラメータでの透過率計算結果を示す。実験結果と同様に、2GHz 近傍に大きな透過率の減衰が起こるこ

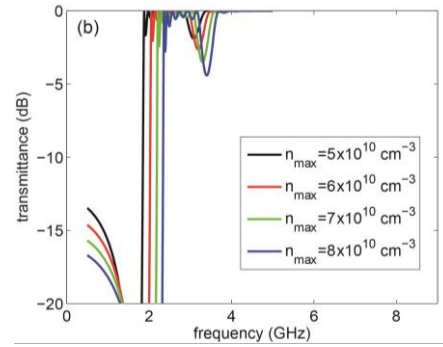


図 7: 1次元プラズマ周期構造内を伝搬するマイクロ波の透過率計算結果.

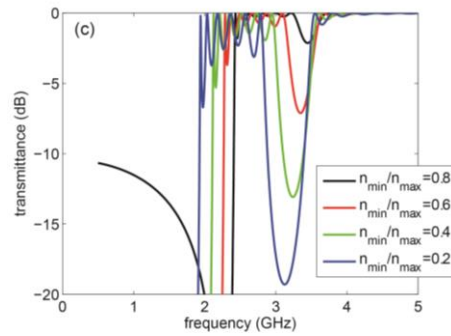


図 8: マイクロ波透過率の、密度比依存性.

とが分かり、これは電子プラズマ周波数に相当する電磁波の反射であると考えられるため、周期構造に起因していない。一方で 3GHz 帯に-5dB 程度の透過率減衰が起こることが図 7 で示され、高密度化に伴い高周波側へのシフトおよび減衰率の増大が起こっていることが分かる。これは図 5 に矢印で示した減衰率と定性的に一致していると考えられる。このことから実験的にも理論的にも観測された 2-3GHz 帯のバンドギャップは、プラズマの周期構造に起因して起きているものであると考えられる。一方で実験結果では二種類のバンドギャップが観測されている。これは真空容器側壁等の境界条件の存在に起因して、異なる二つの電磁波モードが装置内を伝搬しているためであると考えられる。

図 5 で示されたバンドギャップの減衰率は約-15dB 程度となっており、固体フォトニック結晶に比べてその値が大きいことが分かる。より優れたフォトニックバンドギャップを発現させるために必要とされるプラズマの条件を求めするために、実験結果と比較的良好一致を示した上記のモデルで、最大密度と最少密度の比を変化させて計算を行った。計算結果を図 8 に示す。図 8 を見ると、密度比の増加、すなわちプラズマ密度の濃淡をより顕著な状態にすることで周波数 3GHz 帯のバンドギャップの減衰率を大きくすることが可能であると考えられる。すなわち今後プラズマフォトニック結晶に関する理想的な系

を構築するためには、プラズマの拡散を抑制して濃淡の明確なプラズマを生成することがキーテクノロジーであることが示された。

上述のように本研究では、低気圧プラズマ中に cm 程度のプラズマ周期構造を有するプラズマフォトリック結晶の実現に成功し、誘電体内部の電磁場を計測可能な実験を構築することに成功したといえる。また実際に観測されたバンドギャップ構造に対して理論的な解釈を与えることに成功した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① Kazuaki Miyamoto and Kazunori Takahashi, Production of Periodic Plasma Structure by 400 kHz Capacitively Coupled Discharge, Fusion Science and Technology, 査読有, vol. 63, 401-403 (2013).
http://www.ans.org/pubs/journals/fst/a_16968
- ② Kazunori Takahashi and Kazuaki Miyamoto, Observation of a Microwave Bandgap in a One-Dimensionally Periodic Low-Pressure Plasma Structure, Journal of Physics: Conference Series, 査読有, vol. 441, 012011-1 - 6 (2013).
DOI: 10.1088/1742-6596/441/1/012011
- ③ 高橋和貴, 安藤晃, 一次元プラズマ周期構造形成によるマイクロ波バンドギャップ形成, 電気学会プラズマ研究会資料, 査読無, PST-13-140, 49-54 (2013).
- ④ Kazunori Takahashi, Toshihiro Terui, Hisashi Chiba, and Tamiya Fujiwara, Production of Periodic Plasma Structure for Basic Experiments on Plasma Photonic Crystals in Microwave Range, IEEE Transactions on Plasma Science, 査読有, vol. 39, 2504-2505 (2011).
DOI: 10.1109/TPS.2011.2140336
- ⑤ 照井利弘, 高橋和貴, 宮本和明, 藤原民也, プラズマ二次元構造による誘電率の空間変調, 電気学会プラズマ・パルスパワー合同研究会資料, 査読無, PST-114, 13-17 (2011).

[学会発表] (計 5 件)

- ① 高橋和貴, 安藤晃, 一次元プラズマ周期構造形成によるマイクロ波バンドギャップ形成, 電気学会プラズマ研究会, 2013 年 11 月 23 日, 名城大学.
- ② 宮本和明, 高橋和貴, 高木浩一, 安藤晃, 1 次元プラズマ周期構造中における GHz 帯バンドギャップ構造の観測と解析, 平

成 25 年度電気関係学会東北支部連合大会, 2013 年 8 月 22 日, 会津大学.

- ③ Kazuaki Miyamoto and Kazunori Takahashi, Production of two-dimensional periodic plasma structure by a 400 kHz capacitively coupled discharge, The 11th Asia Pacific Conference on Plasma Science and Technology, 2012 年 10 月 3 日, 京都大学.
- ④ Kazuaki Miyamoto and Kazunori Takahashi, Production of periodic plasma structure by 400 kHz capacitively coupled discharge, The 9th International Conference on Open Magnetic System for Plasma Confinement, 2012 年 8 月 28 日, つくば国際会議場.
- ⑤ 照井利弘, 高橋和貴, 宮本和明, 藤原民也, プラズマ二次元構造による誘電率の空間変調, 電気学会プラズマ・パルスパワー合同研究会, 2011 年 12 月 17 日, 東京工業大学.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 和貴 (TAKAHASHI, KAZUNORI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 80451491