

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540570

研究課題名(和文) マイクロプラズマ散逸ソリトンの安定生成とプラズマフォトリック結晶

研究課題名(英文) Generation of stable microplasma dissipative soliton and plasma photonic crystal

研究代表者

向川 政治 (MUKAIGAWA, Seiji)

岩手大学・工学部・准教授

研究者番号：60333754

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、マイクロギャップ誘電体バリア放電を用いて、空間対称性を有し局在性の高い自己組織構造である散逸ソリトンを生成し、この安定性の向上について研究を行い、以下の成果を得た。

1. バリア容量の調整によってフィラメントの六角構造の格子定数を制御することができた。2. 複数放電セルの放電開始タイミング制御をPICマイコンによって行い、正味の放電維持時間を長くすることを可能にした。3. 珪酸ビスマス結晶を用いて誘電体バリア表面の電荷を測定し、自己組織構造生成時の表面電荷密度分布の時間発展の観測が可能となった。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have generated dissipative solitons which are highly localized self-organized structure having spacial symmetry, improved its stability. We have obtained following results.

1. Lattice constant of the hexagonal structure of the filaments can be controlled by regulating the barrier capacitance. 2. The net generation time for the self-organized structure in one cycle was increased by using PIC microcomputer which controls the discharge start timing of multiple discharge cells. 3. We have measured the surface charge of dielectric barrier using bismuth silicate crystal, and the technique is useful for observation of the time evolution of surface charge density distribution at the time the self-organized structure generated.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：プラズマ科学

キーワード：プラズマ 自己組織化 プラズマフォトリック結晶

1. 研究開始当初の背景

マイクロプラズマの性質を独創的に応用したプラズマフォトニック結晶デバイスが京都大の研究グループから提案されて以来、プラズマフォトニック結晶をマイクロプラズマで実現することは放電プラズマ研究者にとってチャレンジングなテーマとなっている。マイクロギャップ誘電体バリア放電の形態には、空間的対称性の高い自己組織構造が存在するので、これをプラズマフォトニック結晶とみなすことが考えられる。大気圧放電の自己組織化の研究については、実験・理論の両面からの体系的な研究として、ドイツの H.-G. Purwin らのグループが精力的に行っている。平行平板型の短ギャップ放電はチューリングモデル(反応拡散方程式)として記述され、また、均一構造から自己組織構造が発現するとき、例えば、グロー放電からフィラメントの二次元的配列(六角構造)やストライプ構造へ転移するときは、チューリング型の不安定性が物理的なメカニズムとして背後にあることが知られている。特に、局在性の高いフィラメント(スポット)の自己組織構造は、散逸ソリトンと呼ばれており、チューリング型の不安定性によって発生することが知られている。

マイクロギャップ誘電体バリア放電における自己組織パターンについては、本研究の代表者が自己組織構造の発現条件を詳細に調査して相図を作成した。先行研究(若手B)においては、ストライプ形状の放電など、一見スポットを成していない構造も、フィラメントが高速運動しているものが数多くあることや、チューリング構造の固有波数 k を大きくする手立てがわかっていた。

プラズマフォトニック結晶が固体のフォトニック結晶に対する利点は、アクティブ動作が可能であること、すなわち、プラズマを駆動する電源スイッチの on-off でフォトニック結晶が現れたり消えたりすることである。しかし、誘電体バリア放電方式は、原理的に交流でなければ動作しないことから、放電は半周期に一度乃至数回おこるが、明白な散逸ソリトン構造は放電電流 1 パルスの立ち上がりのフェーズにおいてしか現れず、1 周期の合計でも高々 1 マイクロ秒程度の持続時間しか得られず、安定生成される典型的な周波数である 100kHz では on 時でも 1 周期の 10% 程度の時間しか散逸ソリトン構造が存在しないことになる。

2. 研究の目的

本研究では、マイクロギャップ誘電体バリア放電を用いてマイクロプラズマの散逸ソリトンを生成し、プラズマフォトニック結晶の実現に向けて散逸ソリトンを安定生成し、その構造を制御することを試みる。また、この構造による電磁波制御の効果を検証する。マイクロプラズマ散逸ソリトンをプラズマフォトニック結晶として応用するためには、

散逸ソリトンの電子密度が十分高いこともさながら、アクティブ動作を可能とするため on 時の散逸ソリトンの存在時間をできるだけ長くし、所望の期間持続させなければならない。散逸ソリトンの持続時間を長くするための方法としては、次の 3 つが考えられる。

- (1) 電流 1 パルスの維持時間を長くする。
- (2) 単位時間あたりの放電回数を増やす。
- (3) 複数のマイクロギャップを並列化し、放電の無い時間を互いに補うことで正味の維持時間を長くする。

本研究ではこれらの条件を実現する方法を実験的に検証する。また、六角構造の観測技術の向上や実験的な制御を行い、構造の成り立ちの原理を理論的に検証する。

3. 研究の方法

マイクロプラズマ散逸ソリトンを安定生成するため、(1)プラズマの高密度・フィラメント高集積化、(2)電流 1 パルスの維持時間を長くすること、および単位時間あたりの放電回数を増やすため誘電体表面への MgO 層の導入、(3)複数のマイクロギャップを並列化し、放電の無い時間を互いに補うことで正味の維持時間を長くする方法として、マイクロギャップの放電開始のタイミングの外部回路による制御、を行う。また、自己組織現象の理解の深化のため、(4)BSO による誘電体表面電荷密度の測定の精度向上に関する実験、(5)フィラメントの六角構造の格子定数の制御をバリア容量と動作圧力の変化によって行い、これに関する機構を数値計算で検証する。また、電磁波を散逸ソリトン構造に導入し、散逸ソリトンの持続時間が禁制帯のあらわれ方に及ぼす影響などを実験的に調べる。

4. 研究成果

(1) プラズマの高密度・高集積化については、誘電体バリアの静電容量を誘電体の厚さで制御することで、プラズマへの投入エネルギー密度の増加を試みた。ギャップ長 140 μm のマイクロギャップヘリウムプラズマでは、プラズマへの投入エネルギーは誘電体厚の減少に伴って増大し、誘電体厚 530 μm から 140 μm への減少に対し、電子密度は $2.4 \text{ cm}^{-3} \sim 9.2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ と増加した。また、このときに現れる六角パターンは、フィラメントの直径にはほとんど変化がないが、誘電体厚の減少に伴ってフィラメント間の距離が減少し、構造は微細化することがわかった。

(発表(11)(19)(23)(26))

(2) 電流 1 パルスの維持時間を長くし、放電回数を増やすことを目的に、誘電体表面に MgO (酸化マグネシウム) 層を導入した。当初のもくろみ通り、MgO の導入によって放電開始電圧は低下し、放電電流のピーク値は減

少した。また、電流波形の1パルスの幅の増加と、半周期における放電電流波形のマルチピーク化が期待され、事実この通りになった。これは、駆動電圧の半周期におけるバリア間の移動電荷量は変わらなかったことと、放電への投入エネルギーが変わらなかったこととも整合性があるので、当初の目的は達成できたかのように思えたが、放電様相の時間発展をICCDカメラで追跡した結果、六角構造は放電領域全体には現れず、気流の下流側から上流側に向けて発光領域が徐々に移動していく様子が観測され、1フィラメントあたりの維持時間が必ずしも増加していないことがわかった。これについては、今後の課題である。

(発表(3)(16))

(3) 外部回路による放電タイミング制御の実験では、ギャップ長140 μm のマイクロギャップを2つおよび3つ導入し、並列駆動を試みた。それぞれの回路の電流制御にはMOSトランジスタとPICマイコンを用い、複数並列放電セルの時間差制御を行った。PICマイコンの出力パルスの時間差を0.6 μs としたところ、それぞれの回路には1周期(10 μs)においてパルス幅0.59 μs の放電電流が流れるとともに六角構造が現れ、これらの電流ピークの時間差は0.44 μs となり、2放電セルの正味の生成時間は1.18 μs に増加した。また、散逸ソリトンのプラズマ密度を高くすると正味の維持時間を長くすることを目的に、周波数を100~300kHzに変化して単一放電セルを用いて自己組織放電の生成を行ったところ、駆動周波数の変化によって自己組織構造に大きな変化はなく、1サイクルあたりの放電維持時間は約0.6 μs である。したがって、高周波化によってデューティ比は増大する。また、放電フィラメントの電子密度は、印加電圧の変化に対し大きな変化はなく、また駆動周波数が高いほど大きくなる。

(発表(4)(17))

(4) BSOによる誘電体表面電荷密度の測定では、広く用いられている電荷密度の計算方法を再検討した。被測定レーザー光と参照光の扱いと、誘電体表面の電荷が発する電気力線の構造を適正に評価することで、表面電荷の時間発展波形と放電電流波形の間の整合性は高まり、両実験に基づく電荷密度の絶対値は良い一致を示すようになった。また、BSOを用いた誘電体表面電荷の測定における、結晶の厚さに起因する時間・空間分解能の違いを検討し、電界の数値計算とBSO結晶による干渉効果を比較することで、放電フィラメントの大きさの定義の妥当性を議論した。測定には厚さ300 μm と700 μm のBSO結晶を用いた。空間的に均一なグロー放電を生成し最大放電電流を20mAの固定値とした場合、BSO結晶の厚さが300 μm の表面電荷密度の最大値は4.70 nC/cm² 最小値は-4.21 nC/cm²

であるのに対し、BSO結晶の厚さが700 μm のときの表面電荷密度の最大値は5.05 nC/cm² 最小値は-4.71 nC/cm²を示し、空間的に均一なグロー放電下では、BSO結晶の厚さによる表面電荷密度の値に有意な差は認められない。他方、フィラメント(スポット)状放電ではBSO結晶の厚さの違いによって得られる電荷像が異なり、BSO結晶厚さ300 μm のときのフィラメント直径は0.342mm、厚さ700 μm のときは0.379mmと、フィラメントは結晶の厚い場合に大きく観測される。この直径の大小関係は、フィラメント直径の定義が適切であるときはその仕方によらない。上記の直径の値は、最大輝度を示すフィラメント中央から最大輝度の20%に低下する位置までをフィラメントと定義している。電界と透過光強度の較正実験により、最大輝度の10%以下では電界と透過光強度の線形性が失われることがわかったので、これ以下のレベル値を本測定方法におけるフィラメントの直径とすることは適切でない。

(発表(1)(9)(10)(20)(21)(25)(29))

(5) 自己組織構造の数値計算では、実験で観測される六角構造パターンとグロー放電構造間の相転移を、単一の放電系反応拡散モデルで記述することについて議論した。その結果、放電開始電圧が反応拡散モデルと実験値で一致させられることがわかり、六角構造-グロー放電構造の相転移を模擬できたと考えられる。また、放電構造の制御性の検証として、誘電体容量の変化、および動作圧力の変化に伴う六角構造の変化について、放電の空間分布のシミュレーションを行い実験との整合性を検討した。上記(1)の実験的に得られた放電構造と同様に、誘電体容量の変化によるフィラメントの直径の変化はなく、誘電体容量の減少に伴ってフィラメント間距離は減少し、構造は微細化した。これにより、六角構造の格子定数は誘電体容量によって制御することが可能であることがわかった。また、動作圧力の変化については、実験ではこの変化に伴って六角構造は変化した。典型的な例では、大気圧下では格子間隔Lが0.86mm、単位面積当たりのフィラメントの個数nが130.9cm⁻²を示す系は、減圧下450Torrでは格子間隔Lは1.02mm、単位面積当たりのフィラメントの個数nは115.7cm⁻²を示し、圧力の減少に伴い格子間隔は大きくなり、フィラメントの個数密度は小さくなる。この実験に対応する計算機シミュレーションを反応拡散方程式に基づいて行ったところ、同様の傾向を全て模擬することができた。これにより、圧力を制御することで六角構造の制御が可能であることがわかった。また、低圧化において誘電体容量を変化させる場合は、大気圧下における傾向と同様に、誘電体容量の増大とともにフィラメントの個数密度は大きくなる。

(発表(2)(5)(6)(14)(28))

(6) 本研究では、自己組織構造への電磁波の導入を試みたが、マイクロ波計測系の構築が不十分であったことなどにより、電磁波制御の可能性について議論することはできなかった。これについては今後の研究で継続していくことにする。

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 1 件)

- (1) S. Mukaigawa, H. Matsuda, H. Fue, R. Takahashi, K. Takaki, T. Fujiwara, Surface-charge measurements in microgap dielectric barrier discharge using bismuth silicon oxide crystals, Journal of Physics: Conference Series, **441**, 査読有、2013, 012012

〔学会発表〕(計 30 件)

- (1)高橋諒太、藤田直樹、向川政治、高木浩一、自己組織化マイクロギャップバリア放電とBSO結晶を用いた表面電荷分布測定の空間分解能、第28回光源物性とその応用研究会、2014.3.21、神奈川工科大学(神奈川県)
- (2)向川政治、藤原一延、小田桐諒、佐藤友彦、亀山拓也、高木浩一、藤原民也、DBDマイクロプラズマにおける自己組織化の数値計算と六角構造の制御、第28回光源物性とその応用研究会、2014.3.21、神奈川工科大学(神奈川県)
- (3)S. Tada, Y. Kubota, K. Fujiwara, T. Kameyama, S. Mukaigawa, K. Takaki, Generation of self-organized structure of microgap dielectric-barrier discharge with MgO surface layer, 8th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP)/ 31st Symposium on Plasma Processing (SPP), 2014.2.5、福岡国際会議場(福岡県)
- (4)Y. Kubota, T. Kameyama, S. Tada, K. Fujiwara, S. Mukaigawa, K. Takaki, Parallelization and discharge timing control of microgap barrier discharge at atmospheric pressure, 8th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP)/ 31st Symposium on Plasma Processing (SPP), 2014.2.4、福岡国際会議場(福岡県)
- (5)Kazunobu Fujiwara, Takuya Kameyama, Sizuka Tada, Yuki Kubota, Seiji Mukaigawa, Koichi Takaki, Simulation of Self-Organization in DBD Micro Plasma and Control of Hexagonal Pattern Structure by Pressure Change, 8th International Conference on Reactive Plasmas (ICRP)/ 31st Symposium on Plasma Processing (SPP), 2014.2.4、福岡

国際会議場(福岡県)

- (6)藤原一延、亀山拓也、多田静香、久保田悠揮、向川政治、高木浩一、DBD型マイクロプラズマにおける自己組織現象のシミュレーションと圧力変化による六角パターン構造の制御、第68回応用物理学会東北支部学術講演会、2013.12.5、山形大学工学部米沢キャンパス(山形県)
- (7)金谷淳史、高橋祥大、山下寛人、向川政治、高木浩一、誘電体バリア放電型RFプラズマへの水分子の導入と高分子材料表面処理、第68回応用物理学会東北支部学術講演会、2013.12.5、山形大学工学部米沢キャンパス(山形県)
- (8)大上智紀、村上裕貴彦、角田祥、向川政治、高木浩一、LiNbO₃チップを用いた模擬雷電流周囲の電界測定、第68回応用物理学会東北支部学術講演会、2013.12.5、山形大学工学部米沢キャンパス(山形県)
- (9)高橋諒太、向川政治、高木浩一、BSO結晶を用いた自己組織化マイクロギャップ誘電体バリア放電の表面電荷測定、第68回応用物理学会東北支部学術講演会、2013.12.5、山形大学工学部米沢キャンパス(山形県)
- (10)高橋諒太、松田紘和、亀山拓也、向川政治、高木浩一、藤原民也、BSO結晶を用いた自己組織化マイクロギャップ誘電体バリア放電の表面電荷密度測定、第74回応用物理学会秋季学術講演会、2013.9.19、同志社大学京田辺キャンパス(京都府)
- (11)亀山拓也、久保田悠揮、多田静香、藤原一延、向川政治、高木浩一、藤原民也、誘電体バリア放電の自己組織現象における誘電体厚さの影響、平成25年度電気関係学会東北支部大会連合大会、2013.8.22、会津大学(福島県)
- (12)高橋祥大、金谷淳史、山下寛人、向川政治、高木浩一、藤原民也、He/O₂混合ガスを用いた大気圧RFプラズマによる高分子材料表面処理、平成25年度電気関係学会東北支部大会連合大会、2013.8.22、会津大学(福島県)
- (13)山下寛人、金谷淳史、高橋祥大、向川政治、高木浩一、藤原民也、メッシュ浮遊電極が高周波大気圧誘電体バリア放電に及ぼす影響、平成25年度電気関係学会東北支部大会連合大会、2013.8.22、会津大学(福島県)
- (14)小田桐諒、佐藤友彦、藤原一延、久保田悠揮、多田静香、向川政治、高木浩一、藤原民也、反応拡散モデルによるマイクロギャップDBDのシミュレーションと六角パターンの制御、第30回プラズマプロセッシング研究会(SPP-30)、2013.1.21、浜松研修交流センター(静岡県)
- (15)佐藤拓也、金谷淳史、山下寛人、向川政治、高木浩一、藤原民也、湿度制御環境における高周波大気圧プラズマによる高分子表面のOH終端、第30回プラズマプロセ

- シング研究会 (SPP-30)、2013.1.21、浜松研修交流センター(静岡県)
- (16)多田静香, 久保田悠揮, 藤原一延, 小田桐諒, 向川政治, 高木浩一, 藤原民也、自己組織化マイクロプラズマの生成とMgO層の効果、応用物理学会東北支部第67回学術講演会、2012.12.6、東北大学(宮城県)
- (17)久保田悠揮, 多田静香, 藤原一延, 小田桐諒, 向川政治, 高木浩一, 藤原民也、大気圧マイクロギャップ放電の放電タイミング制御と並列化、応用物理学会東北支部第67回学術講演会、2012.12.6、東北大学(宮城県)
- (18)山下寛人, 金谷淳史, 佐藤拓也, 向川政治, 高木浩一, 藤原民也、誘電体バリア放電型高周波大気圧プラズマにおけるメッシュ電極の効果、応用物理学会東北支部第67回学術講演会、2012.12.6、東北大学(宮城県)
- (19)S.Mukaigawa, T. Sato, R. Odagiri, K.Fujiwara, Y.Kubota, S. Tada, K. Takaki, T.Fujiwara, Structure Control Of Hexagonal Patterns In Microgap Dielectric Barrier Discharge、11th Asia Pacific Conference on Plasma Science and Technology (APCPST)/ The 25th Symposium on plasma Science for Materials (SPSM)、2012.10.2、京都大学(京都府)
- (20)H. Matsuda, R. Takahashi, H. Fue, S.Mukaigawa, K. Takaki, T.Fujiwara, Surface Charge Measurement In Micro-Gap Dielectric Barrier Discharge Using Bso Crystals、11th Asia Pacific Conference on Plasma Science and Technology (APCPST)/ The 25th Symposium on plasma Science for Materials (SPSM)、2012.10.2、京都大学(京都府)
- (21)高橋諒太, 松田紘和, 向川政治, 高木浩一, 藤原民也、BSO結晶を用いた誘電体表面電荷密度測定の精度向上と時間・空間分解能、平成24年度電気関係学会東北支部大会連合大会、2012.8.31、秋田県立大学(秋田県)
- (22)金谷淳史, 佐藤拓也, 山下寛人, 向川政治, 高木浩一, 藤原民也、大気圧RFプラズマを用いた高分子材料表面処理におけるバリア容量の効果、平成24年度電気関係学会東北支部大会連合大会、2012.8.31、秋田県立大学(秋田県)
- (23)佐藤友彦, 笛宏行, 向川政治, 志田寛, 高木浩一, 藤原民也、プラズマフォトリック結晶へ向けたプラズマ自己組織構造の微細化、応用物理学会東北支部第66回学術講演会、2011.12.1、いわて県民情報交流センター(岩手県)
- (24)平野隆大, 佐藤拓也, 向川政治, 高木浩一, 藤原民也、誘電体バリア放電型高周波大気圧プラズマにおける浮遊電極の動作、応用物理学会東北支部第66回学術講演会、2011.12.1、いわて県民情報交流センター(岩手県)
- (25)笛宏行, 松田紘和, 向川政治, 高木浩一, 藤原民也、大気圧マイクロギャップバリア放電における誘電体表面電荷の時間発展、
- 応用物理学会東北支部第66回学術講演会、2011.12.1、いわて県民情報交流センター(岩手県)
- (26)渡部 博, 佐藤友彦, 志田 寛, 向川政治, 高木浩一, 藤原民也、Effect of Gas Flow at Atmospheric Pressure Microgap Dielectric Barrier Discharge、平成23年度電気関係学会東北支部大会連合大会、2011.8.25、東北学院大学(宮城県)
- (27)平野隆大, 佐藤拓也, 向川政治, 高木浩一, 藤原民也、誘電体バリア放電型高周波大気圧プラズマの電子密度と浮遊電極の影響、平成23年度電気関係学会東北支部大会連合大会、2011.8.25、東北学院大学(宮城県)
- (28)小田桐 諒, 佐藤友彦, 向川政治, 高木浩一, 藤原民也、マイクロプラズマにおける自己組織化のシミュレーション、平成23年度電気関係学会東北支部大会連合大会、2011.8.25、東北学院大学(宮城県)
- (29)松田紘和, 笛 宏行, 向川政治, 高木浩一, 藤原民也、BSO結晶を用いた表面電荷測定系の感度向上、平成23年度電気関係学会東北支部大会連合大会、2011.8.25、東北学院大学(宮城県)
- (30)佐藤拓也, 平野隆大, 向川政治, 高木浩一, 藤原民也、高周波大気圧プラズマを用いた高分子材料表面処理における湿度の効果、平成23年度電気関係学会東北支部大会連合大会、2011.8.25、東北学院大学(宮城県)

6. 研究組織

(1)研究代表者

向川 政治 (MUKAIGAWA SEIJI)
 岩手大学・工学部・准教授
 研究者番号：60333754