

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2023

課題番号：19K21871

研究課題名（和文）レーザーブレイクダウンを引き起こすラッキーな衝突に対する統計モデルの構築

研究課題名（英文）Statistical model for lucky collisions causing laser breakdowns.

研究代表者

加藤 進（KATO, Susumu）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・エレクトロニクス・製造領域・主任研究員

研究者番号：20356786

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では実験室系からレーザー電場によって電子が振動する系を用いる。この系の電子が振動する原子との衝突過程をモンテカルロ法を用いて計算することで、レーザー照射下での電子エネルギー分布関数を決定した。これまで提案されている微分散乱断面積モデルによって、電離係数が2桁以上異なる結果が得られた。この結果より、原子分子過程の基本となる微分散乱断面積、特に電離エネルギーの数倍程度以下の低エネルギー電子に対する微分散乱断面積のデータベースを慎重に考慮、選択が、集光条件やパルス幅に対するレーザーブレイクダウンのしきい値強度を正確に評価するには必須であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電場やレーザーによる絶縁破壊は、雷や蛍光灯など自然界や身近な存在だけでなく、レーザー誘起ブレイクダウン分光法やレーザー着火エンジンなど基礎科学や産業応用での基礎となっており、レーザーによる絶縁破壊（レーザーブレイクダウン）のしきい値を決めることは、基礎科学の精緻化や産業応用の高効率化に貢献できる。これまでの絶縁破壊研究では微分散乱断面積を散乱角について積分した全断面積が重要と考えられていたが、本研究の成果は基礎的な微分散乱断面積が重要であることを示しており、より基礎的な研究が必要であることを示唆している。

研究成果の概要（英文）：In this study, we used a system in which electrons are oscillated by a laser electric field from a laboratory system. The electron energy distribution function under laser irradiation is determined by calculating the collision processes of electrons in this system with oscillating atoms using the Monte Carlo method. The ionization coefficients differ by more than two orders of magnitude depending on the differential scattering cross section model proposed so far. the differential scattering cross sections, which is the basis for atom-molecule processes, especially for low-energy electrons below a few times the ionization energy, is crucial. From these results, it is shown that careful consideration and selection of the database of differential scattering cross sections is essential for the accurate evaluation of the threshold intensity of laser breakdown with respect to the focusing conditions and pulse duration.

研究分野：プラズマ科学

キーワード：電子散乱 逆制動輻射 モンテカルロ計算 電子エネルギー分布 電離過程

1. 研究開始当初の背景

電場やレーザーによる絶縁破壊は、雷や蛍光灯など自然界や身近な存在だけでなく、レーザー誘起レーザーブレイクダウン分光法やレーザー着火エンジンなど基礎科学や産業応用など様々な分野の基礎となっている。一般に、レーザーによる絶縁破壊(レーザーブレイクダウン)は、希ガスや空気の電離エネルギーに比べて十分小さい光子エネルギーのレーザー光によって引き起こされる。定性的には、多光子吸収で生成した電子が、逆制動輻射でエネルギーを吸収し、電離を繰り返し電子なだれに至ると理解されている[1]。しかし、現在でも実験結果の定量的な予測には至っていない。その原因は、電子なだれ、特にレーザーエネルギー吸収には本質的なゆらぎが内在し、その理解が不十分であると考えられる。

2. 研究の目的

レーザーブレイクダウンでは、電子は運動エネルギーと同程度のエネルギーを光から吸収し、そのエネルギーを多数回の衝突で失う前に、再び光子を吸収するラッキーな衝突を繰り返し、電子数が増大すると考える。レーザーブレイクダウンを引き起こす電子衝突電離に関与する電子は、バルクの平均的エネルギーを持つ電子ではなく、電離エネルギーを越える高エネルギーテールの電子である。理論およびシミュレーションモデルを用いてレーザー照射下での高エネルギーテール成分を持つ電子分布関数を決定することが、本研究の目的であり、その目的を補完する上で重要となる雷放電基礎およびランダム媒質における光吸収もその研究目的の一つとした。

3. 研究の方法

レーザー光における個々の電子の運動は、原子、イオン、電子との弾性および非弾性散乱によって決まる。実験室系ではレーザー電場によって電子は振動運動するが、本研究のシミュレーションでは、実験室系から電子がレーザー電場によって振動する系(図1)に変換したモデルを用いる。この変換手法は、Dawson&Obermanなどによるプラズマのレーザー吸収係数の決定で使われている[2]。電磁場中でのシュレディンガー方程式に対して用いられるKramers-Henneberger変換[3]と同等の変換である。

この振動系では電子は振動する原子との衝突によって、エネルギーをやりとりすることで、その定常的なエネルギー分布は決定される。電子エネルギー分布を決定するシミュレーション手法は、衝突過程を含んだ放電プラズマで用いられる標準的なモンテカルロ法[4]を原子が振動する系に適用した。モンテカルロ法で求めた電子エネルギー分布をボルツマン方程式の2項展開モデルからの結果[5]と比較することで、電離係数のモデル依存性について議論した。

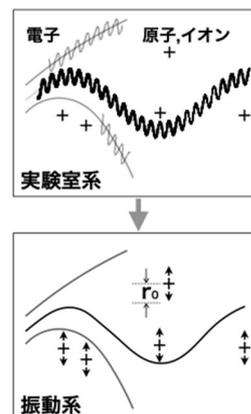


図1. 座標変換.

4. 研究成果

(1)アルゴンガス(数密度 $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$)に対して、レーザー波長 $0.5 \mu\text{m}$ 、強度(I_L)が $10^{11} \sim 10^{13} \text{W/cm}^2$ の範囲で計算を行った。電離を含む衝突が多数回十分起こるまでの時間を計算し、その時間積分から電子エネルギー分布関数や電離係数等を決定した。レーザー強度 $I_L = 10^{12} \text{W/cm}^2$ に対する計算の電子エネルギーの時間発展の一部を図2に示す。この計算では、電子-原子衝突は等方に散乱すると仮定した。

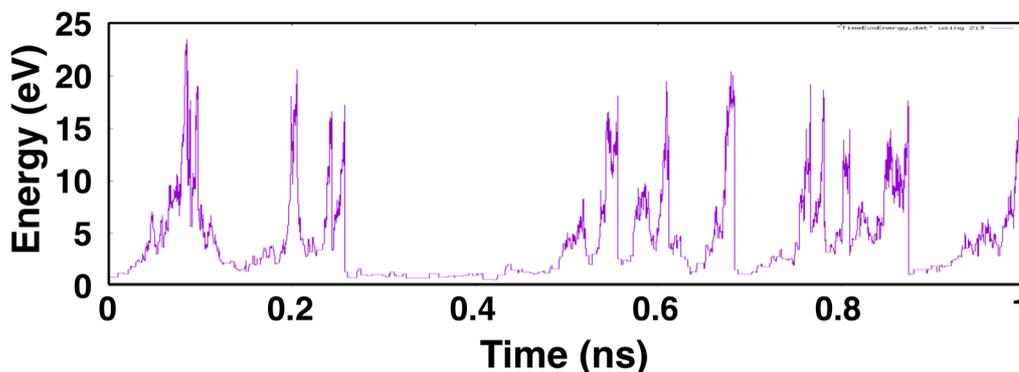


図2. 電子エネルギーの時間発展.

図3に、1回の衝突によって移行するエネルギーの発生頻度を示す。エネルギーを得る頻度が失う頻度より高いことはレーザー光を吸収していることを示している。レーザー強度が $5 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$ を超えると1回の衝突で10eVを超えるエネルギーを獲得する電子が現れている。

ボルツマン方程式に対する2項展開モデルでは微分散乱断面積を散乱角について積分した全断面積を通常用いるが、電子-原子衝突の散乱角が重要であるため、微分散乱断面積にいくつかのモデル[6,7]を適用して、そのモデルによる影響を調べた。微分散乱断面積のモデルによる電子エネルギー分布関数を図4に示した。

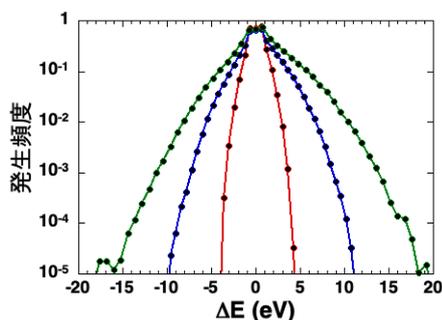


図3. 1回の衝突によって移行するエネルギーの発生頻度。赤、青、緑線は $I_L = 10^{12}, 5 \times 10^{12}, 10^{13} \text{ W/cm}^2$ に対応している。

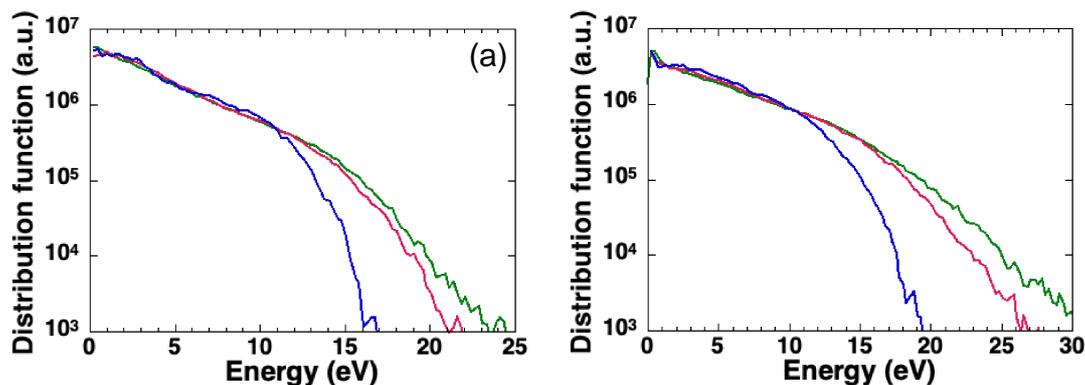


図4. 電子エネルギー分布関数(a) $I_L = 5 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$, (b) $I_L = 2 \times 10^{12} \text{ W/cm}^2$. 緑線は等方散乱, 赤線と青線は, Surendra[6]と Okhrimovskyy[7]が提案した微分散乱断面積モデルを表している。

電子エネルギー分布関数, 特に励起エネルギー(11.5 eV)以上の高エネルギー電子の数は微分散乱断面積モデルに非常に強く依存している。

図5にそれぞれのモデルと2項展開モデルから求めた電離係数を示す。ボルツマン方程式に対する2項展開モデルにはBolsig+[5]を用いた。

電離係数は電離エネルギー(15.8 eV)以上の電子エネルギー分布関数で決定されるため、モデルによりその値に大きな違いが生じている。2項展開モデルと等方散乱, Surendraの電離係数は、同程度の値であるが、Okhrimovskyyの微分散乱断面積モデルでは一桁以上小さい値となる。

このことより、原子分子衝突過程の基本である微分散乱断面積[8], 特に電離エネルギーの数倍程度以下の低エネルギー電子に対する微分散乱断面積の精度を慎重に考慮することが、集光条件やパルス幅に対するレーザーブレイクダウンのしきい値強度を正確に評価するには必須であることを示した。

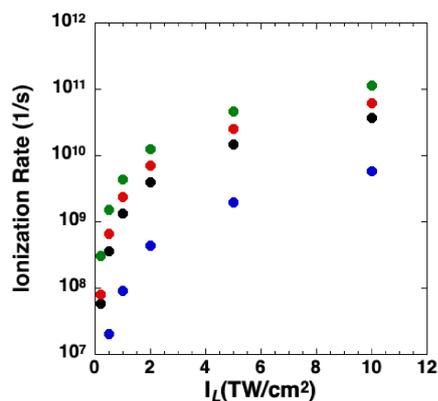


図5. 電離係数。2項展開モデルは黒点, 緑点は等方散乱, 赤点と青点は Surendra[6]と Okhrimovskyy[7]の微分散乱断面積モデルを表している。

参考文献

- [1] 山中千代衛監著, 「レーザー工学」コロナ社(1981)。
- [2] J.Dawson and C.Oberman, Phys. Fluids 5, 517-524 (1962), R.D.Jones and K.Lee, Phys. Fluids 25, 2307-2323 (1982), S.Kato, R.Kawakami, and K.Mima, Phys. Rev. A 43, 5560-5567 (1991)。
- [3] W.C.Henneberger, Phys Rev Lett 21,838-841 (1968)。
- [4] 南部健一, シミュレーション, 15, 239-247 (2003)。
- [5] G.J.M.Hagelaar and L.C.Pitchford, Plasma Sources Sci. Technol. 14, 722-733 (2005)。
- [6] M.Surendra, D.B.Graves, and G.M.Jellum, Phys. Rev.A 41, 1112-1125 (1990)。
- [7] A.Okhrimovskyy, A.Bogaerts, and R.Gijbels, Phys. Rev.E 65, 037402 (2002)。
- [8] E.Gargioni and B Grosswendt, Rev. Mod. Phys.80, 451-480 (2008)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|----------------------|
| 1. 著者名 Susumu Kato, Shota Ono, Atsushi Sunahara, Yuji Sato and Masahiro Tsukamoto | 4. 巻 35 |
| 2. 論文標題 Optical properties of liquid pure copper by density functional theory | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 J. Phys.: Condens. Matter | 6. 最初と最後の頁 324004 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1361-648X/acd21a | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Takahashi Eiichi, Kato Susumu | 4. 巻 3 |
| 2. 論文標題 Influence of DC electric field on Nd:YAG laser-induced breakdown in gases | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 OSA Continuum | 6. 最初と最後の頁 3030 ~ 3039 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OSAC.399530 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 E. D. Reyes, C. J. M. Payag, J.L.F. Gabayno, R. P. Gamag, N. Sarukura, A. Sasaki, S. Kato |
| 2. 発表標題 Analysis of Initiation and Propagation of Lightning in a Thundercloud Using a One-Dimensional Electric Circuit Model |
| 3. 学会等名 American Geophysical Union (AGU) 2023 fall meeting |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 E. D. Reyes, C. J. M. Payag, J.L.F. Gabayno, R. P. Gamag, N. Sarukura, A. Sasaki, S. Kato |
| 2. 発表標題 Reproducing inter-cloud and cloud-to-ground lightning using a one-dimensional electric circuit model |
| 3. 学会等名 41th Samahang Pisika ng Pilipinas (SPP) |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 加藤 進, 清水 鉄司, 榊田 創 |
| 2. 発表標題 準大気圧マイクロ波窒素プラズマにおける窒素原子数密度に関する理論的考察 |
| 3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第39回年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|--|----|
| 研究分担者 | 佐々木 明 (SASAKI Akira) (10215709) | 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・関西光科学研究所 光子科学研究部・専門業務員 (82502) | |
| 研究分担者 | 高橋 栄一 (TAKAHASHI Eiich) (90357369) | 日本大学・生産工学部・教授 (32665) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|