

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K18709

研究課題名（和文）極短パルスレーザーによる第二次高調波発生を用いた理想的な気体中電界計測手法の開発

研究課題名（英文）Development of an ideal method for measuring electric fields in gases using second harmonic generation by ultrashort pulsed lasers

研究代表者

熊田 亜紀子（Kumada, Akiko）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：20313009

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）：本研究は気体の分極の三次非線形感受率による電界誘起第二次高調波発生（E-FISHG）を利用し、ラプラス場ならびにポアソン場における電界のベクトル成分の三次元分布を非接触・非侵襲で高空間分解で測定できる理想的な電界計測法を実現することを目的としたものである。レーザー光をレンズで集光し第二高調波の発生に十分な強度にすることにより、SHGを発生させるが、レンズを平行移動しレーザー伝搬方向に焦点をずらしたデータ列を取得し、予め実測もしくは計算により把握しておいたレーザービーム形状情報をもとに、逆計算を行うことで、ビーム伝搬方向にも空間分解して電界計測を行える技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究においてはレーザー光のパルス幅・強度と、対象媒体への擾乱の大きさ、及び期待される感度の関係を、実験とシミュレーションを通じ、定量的に把握した。測定法としてもっとも重要な事案である、正確な測定が行える適用範囲と、各範囲において達成できるスペックを明確化することができた。非侵襲で高い分解能で電界を測定できる手法であることから、放電機構の解明、放電利用機器の一層の効率化、非線形絶縁材を用いた絶縁設計技術の確立に資するものである。

研究成果の概要（英文）：The aim of this study is to realise an ideal electric field measurement method that can measure the three-dimensional distribution of the vector components of the electric field in Laplace and Poisson fields non-contact, non-invasively and with high spatial resolution, using the electric field-induced second harmonic generation (E-FISHG) due to the third-order non-linear susceptibility of gas polarisation. The SH is generated by focusing a laser beam with a lens to a sufficient intensity, and a data sequence is obtained by translating the lens and shifting the focus in the direction of laser propagation, and then performing a reverse calculation based on the laser beam shape information that has been measured or calculated in advance, to spatially resolve the applied electric field in the beam propagation direction as well.

研究分野：電気電子工学

キーワード：電界計測 二次高調波 ラプラス場 逆計算 位相整合

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高電圧・高電界技術はあらゆる電気利用機器の信頼性・性能に直結した技術である。解析手法も近年進歩を遂げているが、放電に代表される非線形現象が付随した現象であるため、高電界現象に関わる物理現象、材料特性を把握していくうえで、電界分布を正確に高い時間、空間分解能で計測する技術が強く求められている。

非接触・非侵襲な電界測定法としては、申請代表者は被測定対象媒体である気体の持つ Kerr 効果(E-FISHG と同様に物質の $\chi^{(3)}$ に由来)を用いた測定法を世界で初めて実証したが、気体の $\chi^{(3)}$ は極めて小さく、この電界計測法は、感度と引き換えに時間・空間分解能を犠牲にしていた。そのような中、電界誘起第二高調波を気体中の電界計測に利用することに着目した。この E-FISHG 法は瞬間的な光電界を極めて強くすることで $\chi^{(3)}$ は小さくとも大きな分極の非線形項(すなわち高感度出力)が期待できるという手法であり、Kerr 効果では成し得なかった上記の要望を満たす理想的な電界計測技術を実現できるポテンシャルをもつ。

研究開始当初の時点では、一点、もしくは一次元の測定にとどまっているうえ、ポアソン場への適用可能性の検証、レーザプラズマによる擾乱の影響の議論はなされておらず、E-FISHG 法は電界計測という観点ではまだまだ粗削りな測定法であった。

2. 研究の目的

本研究では気体の分極の三次非線形感受率 $\chi^{(3)}$ による電界誘起第二高調波発生(E-FISHG)を利用し、ラプラス場ならびにポアソン場における電界のベクトル成分の三次元分布を非接触・非侵襲で高空間分解で測定できる理想的な電界計測法を実現することを目的とする。平行して未解明な点が多かった極短パルスレーザの大気伝搬時の非線形現象の特性を明らかにする。

3. 研究の方法

まず、ラプラス場の定量的な電界計測手法として確立させる。E-FISHG においてはレーザ光をレンズで集光し第二高調波の発生に十分な強度にすることにより、焦点近傍の電界が測定できる。レンズを平行移動しレーザ伝搬方向に焦点をずらしたデータ列を取得し、予め実測もしくは計算により把握しておいたレーザビーム形状情報をもとに、逆計算を行うことで、ビーム伝搬方向にも空間分解して電界計測を行える技術を開発する。

次に、ポアソン場の測定への適用可能性の検証を行う。本研究では、量子化学計算により各種気体分子、イオンの $\chi^{(3)}$ を導出し、各種気体に関してプラズマ状態においても電界を正確に計測することを可能とし、これを用いて各種絶縁ガス中におけるラプラス場ならびコロナ放電下の電界計測を行う。なお強い光電界によりレーザプラズマが生成する場合、その荷電粒子の影響を正確に見積もり補償する必要がある。レーザのパルス幅と強度をパラメータに、レーザプラズマの生成可能性と感度の関係、位相整合条件と分解能との関係を求め、さらにこれらを最適に調整し、高感度・高精度の電界計測の達成を目指す。

4. 研究成果

ラプラス場の計測手法に関しては、研究手法にて述べた通り、多点計測データから逆計算により電界分布を推定する手法を考案した。

逆計算においては、一對の無限に長い線電荷対から生成される SHG は、解析解があることに着目をした。光路上の電界分布は、光路を挟みこむように対象に配置された有限個数の線電荷対で表すことができる。そこで、有限個数の線電荷対配置し、それらの電荷量を未知数として、得られる SHG データ列を満足するような電荷量を求めるという連立方程式の解法問題に置き換えられる。線電荷対と、SHG の関係は、幾何学的な距離の関数としてあらわされる。なお、SH 光測定データには、SH の強度の情報は含んでいるものの、位相の情報は含んでいない。そのため、逆計算においては、SH 測定データ列の位相分布を平等電界下の分布に近い形を初期解と仮定して、電界分布の初期解を求め、それをもとに順方向に電界分布を繰り返し計算により推定することとした。本手法を用いて、比較的単純な系(球 球電極系、棒 棒電極系)に対して電界分布の逆算に成功した。

ポアソン場の測定への適用可能性として、直流コロナ放電場を対象に E-FISHG の適用を試みた。光路に沿って SHG 分布を測定する必要性から、定常的に生じている放電プラズマ(もしくは過渡現象としても、再現性のよいプラズマ)ということで、直流コロナ放電場を対象とした。E-FISHG により電界を測定するのみならず、レーザトリガ法にて同時に電界を測定し、両者を比較することとした。レーザトリガ法は、レーザ焦点付近にはレーザ光により電離が促され、焦点付近の空間に電子が生成供給されることから、その電子が、電界に沿って電子雪崩として成長し、ストリーマを誘導するまでの遅れ時間に着目することで、放電空間の電界を推定する手法である。焦点位置をギャップ方向に(光路とは垂直方向に)動かし、各点におけるレーザ入射(=初期電子の供給)から、ストリーマ誘導までの遅れ時間の変化に着目することで、電界強度分布を推定した。結果として、レーザトリガ法による電界測定値と、E-FISHG 法による電界測定値は充

分な測定精度をもって一致することを確認できた。

以上の測定は、レーザー光の強度やパルス幅をパラメータに実施した。フェムト秒パルスレーザーを利用した場合、出力を高めるとフィラメンテーション、レーザープラズマ生成が生じる。これらが生じると、レーザービーム形状が、初期状態から乱れ、電界分布の逆計算には看過できない悪影響を与えることがわかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Inada Yuki, Shioda Tatsutoshi, Nakamura Ryosuke, Maeyama Mitsuaki, Kumada Akiko, Nakamura Shin, Ono Ryo	4. 巻 55
2. 論文標題 Systematic 1D electric field induced second harmonic measurement on primary-to-secondary transition phase of positive streamer discharge in atmospheric-pressure air	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics D: Applied Physics	6. 最初と最後の頁 385201 ~ 385201
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6463/ac7b54	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 Sogame Masataka, Nakamura Shin, Sato Masahiro, Fujii Takashi, Kumada Akiko, Oishi Yuji	4. 巻 142
2. 論文標題 Electric-field-vector-profile Measurement in Gas using Electric-field-induced Second-harmonic Generation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 362 ~ 363
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.142.362	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 Nakamura Shin, Sato Masahiro, Fujii Takashi, Kumada Akiko	4. 巻 31
2. 論文標題 Optimization of beam shaping and error quantification of calibration approach using E-FISHG based electric field measurements	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Plasma Sources Science and Technology	6. 最初と最後の頁 115020 ~ 115020
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6595/aca4f1	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 S. Nakamura, M. Sato, T. Fujii, A. Kumada and Y. Oishi	4. 巻 Vol. 104, No. 5
2. 論文標題 Electric-field-profile measurement along a probing laser path based on electric-field-induced second-harmonic generation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review A	6. 最初と最後の頁 p. 053511
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevA.104.053511	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 Chihiro Tateyama, Takuto Kobayashi, Akiko Kumada and Kunihiro Hidaka	4. 巻 Vol. 28, No. 4
2. 論文標題 Conceptual Design and Feasibility Study of Flexible Gas-Insulated Transmission Line Using CF3I Gas Mixture	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation	6. 最初と最後の頁 pp.1424-1430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TDEI.2021.009605	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 Taisei Homma, Akiko Kumada, Takahi Fujii, Hiroya Homma, Yuji Oishi	4. 巻 Vol. 180
2. 論文標題 Depth profiling of surface degradation of silicone rubber composite insulators by remote laser-induced breakdown spectroscopy	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy	6. 最初と最後の頁 106206,
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.sab.2021.106206	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 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 S. Nakamura, M. Sogame, M. Sato, T. Fujii, A. Kumada, Y.Oishi
2. 発表標題 Electric-field-vector-profile measurement in gases based on electric-field-induced second-harmonic generation
3. 学会等名 2022 Gaseous Electronics Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. Fujii, T. Homma, A. Kumada, H. Homma, Y. Oishi
2. 発表標題 Portable laser-induced breakdown spectroscopy system for on-site diagnostics of composite insulators
3. 学会等名 LIBS2022 (12th International Conference on Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (国際学会))
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村 信, 十亀正考, 佐藤正寛, 藤井 隆, 熊田亜紀子
2. 発表標題 大気中における電界誘起第二高調波発生レーザーパルス幅依存性
3. 学会等名 令和4年電気学会基礎・材料・共通部門大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村 信, 十亀正考, 佐藤正寛, 藤井 隆, 熊田亜紀子
2. 発表標題 電界誘起第二高調波発生による大気圧中直流コロナ放電電界測定
3. 学会等名 誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 十亀正考, 中村 信, 藤井 隆, 佐藤正寛, 熊田亜紀子
2. 発表標題 E-FISHG法による電界3次元分布測定に向けたレーザーパラメータの最適化
3. 学会等名 誘電・絶縁材料/放電・プラズマ・パルスパワー/高電圧合同研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shin Nakamura, Masahiro Sato, Takashi Fujii, Akiko Kumada, Yuji Oishi
2. 発表標題 ELECTRIC FIELD PROFILE MEASUREMENT ALONG PROBING LASER PATH BASED ON ELECTRIC FIELD-INDUCED SECOND-HARMONIC GENERATION,
3. 学会等名 The 48TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PLASMA SCIENCE (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Akiko Kumada
2. 発表標題 Recent advance in optical measurement techniques for elucidation of high voltage phenomena
3. 学会等名 22nd International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Nakamura, M. Sato, T. Fujii, A. Kumada
2. 発表標題 Measurement method for electric field in streamer discharge based on electric field induced second harmonic generation
3. 学会等名 49th IEEE International Conference on Plasma Science (国際学会)
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	佐藤 正寛 (Sato Masahiro) (40805769)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・准教授 (12601)	
研究分担者	藤井 隆 (Fujii Takashi) (60371283)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・特任教授 (12601)	

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
---------	---------