

平成30年6月15日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03760

研究課題名（和文）固体内部におけるレーザーアブレーションモデルの創成

研究課題名（英文）Creation of the laser ablation model in the solid

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） 14,800,000円

研究成果の概要（和文）：高出力連続レーザー光による固体内部におけるアブレーションは、誘電体の励起状態からプラズマ状態への遷移によって生じるものと考えられる。その励起状態の発生および消滅過程を記述するKineticモデルを構築し、熱伝導モデルによって温度上昇を評価し、実験的にモデルの基礎となる非線形光学結晶の吸収係数を決定した。そのモデルに基づくレーザー光の吸収を考慮した電磁波の伝播方程式と熱伝導モデルを結合することにより、非線形結晶としてタンタル酸リチウムを用いた第二高調波の増幅の条件を評価した。

研究成果の概要（英文）：The transition from excited states of the dielectric to plasmas is an important issue in the ablation in the solid by the high-power continuous-wave lasers. We proposed the kinetic model to describe the creation and annihilation of the excited states, evaluated the temperature increase in the dielectric by the heat conduction model, and experimentally measured the absorption coefficient of nonlinear optical crystal. The condition of the amplification of the second harmonics using lithium tantalate as a nonlinear crystal was evaluated by solving the heat conduction equation and the nonlinear wave equation including the absorption based on the model.

研究分野：プラズマ物理，非線形光学，非線形結晶，レーザー

キーワード：レーザーアブレーション 光絶縁破壊 励起状態 非平衡状態 熱緩和 熱輸送

1. 研究開始当初の背景

連続レーザー光は、光通信、ディスプレイ、加工など、広範囲の分野で利用されており、伝送や波長変換のために光ファイバや非線形光学結晶などの誘電体が多数利用されている。光通信の分野においては、最近のインターネットトラフィックの増大に伴い通信の大容量化が求められている。ファイバ敷設費用が高額な海底ケーブルなどの幹線系ファイバにおいては、波長多重による大容量化が必須である。多重化に伴いファイバ内の光密度が増大し、ファイバヒューズ現象が伝送容量を制限する要因になり、その対策が望まれている。

ファイバヒューズ現象とは、光ファイバ中を伝播する出力がワット級の連続レーザー光によって、optical breakdown(光絶縁破壊)とそれに伴いファイバ内部でアブレーションが生じ、発生したアブレーションプラズマがファイバ中を光源に向かって伝播する現象である。

ディスプレイ用緑色光源で利用される非線形光学結晶においてもファイバヒューズ現象と同様のアブレーション現象が発生し、装置の高出力化・小型化の障害となっている。

2. 研究の目的

パルスレーザー光を SiO₂ などの透明な誘電体内部に集光すると、誘電破壊が起こることは古くから知られており、その原因は気体の光絶縁破壊機構と同様に、多光子吸収などによる初期電子の発生に続くだれ過程による電離により、局所的かつ爆発的なアブレーションが起こり気泡やクラックが発生すると考えられている。

一方、本研究が対象とする「連続レーザー光による固体内部におけるレーザーアブレーション」では、連続レーザー光の強度は数 MW/cm² 程度で、パルスレーザー光に対する絶縁破壊しきい値強度数 GW/cm² 以上に比べて、3 桁以上低い強度で問題となっている。この様な、低い破壊しきい値強度で発生し、マイルドな絶縁破壊が入射軸上を光源に向かって準定常的にアブレーションプラズマが伝播する。このとき、軸と垂直方向への破壊はほとんど発生していない。この点が、爆発的に発生するパルスレーザー光によるアブレーションとは異なる。このアブレーションは高出力連続レーザー光が創る誘電体の励起状態からプラズマ状態への遷移によって生じるものと考え、その発生および維持機構を解明し、非線形光学結晶を用いた第二高調波発生方式による緑色レーザー光源への影響を評価することが本研究の目的である。

3. 研究の方法

高平均出力連続レーザー光によって誘電体が絶縁破壊する過程を記述する Kinetic モデルの構築、熱伝導モデルによる温度上昇の評価およびモデルの基礎となる非線形光学

結晶の吸収係数を実験的に決定する。

Kinetic モデルでは、誘電体に対して価電子帯と伝導帯間遷移による電子、ホール生成・消滅を取り扱う。その他の準位としてバンド間に存在するポーラロンを考慮する。この Kinetic モデルによってレーザー吸収源と吸収されるエネルギー量を評価し、熱伝導モデルと結合することで、誘電体中での温度上昇を予測する。

電磁波の伝播方程式と熱伝導モデルを結合することにより、第二高調波の増幅の条件を評価する。

出力 10W 緑色レーザーを用いて、光学吸収で発生する熱による非線形光学結晶の温度上昇の時間発展および散乱光を測定し、傾き合成法等によって吸収係数を求める。

4. 研究成果

(1) 第二高調波で使用されるニオブ酸リチウムに対して価電子帯と伝導帯間遷移による電子、ホール生成・消滅を取り扱う詳細な Kinetic モデルにおいて、励起状態を 3 種類のポーラロンに分類し、電子、ホール、励起状態間の遷移を考慮し、未定の反応速度等を推定することにより、励起状態の緩和に特徴的な引き伸ばされた指数分布(stretched exponential)を持つ過去に行われた実験データを再現した。

(2) 基本波と第二高調波の伝播方程式と熱伝導モデルを結合することにより、非線形光学結晶としてタンタル酸リチウムを用いた第二高調波の増幅の条件を評価した。

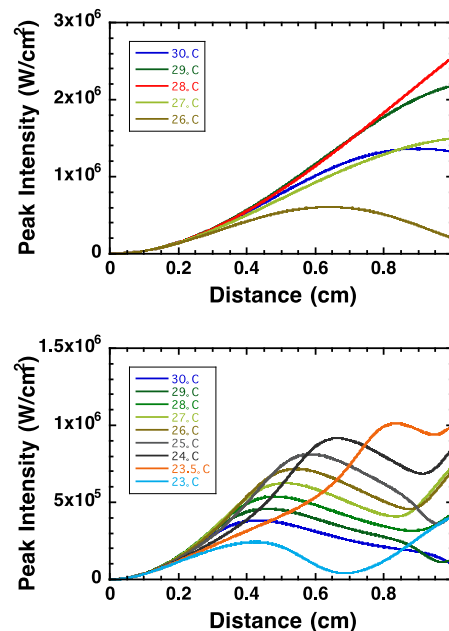


図. 第二高調波の出力と伝播距離の関係. ポーラロンによる吸収を考慮していない結果(上図)と考慮した結果(下図). それぞれの線は外壁温度が異なり、その温度は図中に記載している。

熱伝導モデルでは、熱伝導方程式を連続レーザー光の波長変換を想定して、定常解から空間の温度上昇を求めた。基本波と第二高調波の伝播方程式で用いる屈折率の空間変化は求めた温度から決定し、伝播方程式を数値的に解くことにより、第二高調波の増幅を求めた。

計算結果の一例を図に示す。この計算では、分極反転周期は温度 30 の時に位相整合条件を満足する設計とし、外壁の温度をパラメータとして計算した。基本波の入力が 75W の場合の第二高調波の出力と伝播距離の関係を図に示す。発熱が無視できる場合は、外壁温度が 30 の時に増幅は最大になる。ポーラロンによる吸収を考慮していない場合と考慮した場合で、発熱が大きく異なり、外壁温度の最適値に違いがみられた。

最適設計のためには、より詳細な発熱量すなわち吸収係数の評価が必要となることを示した。

(3) 緑色の連続光レーザーを用いたタンタル酸リチウム結晶の光学吸収で発生する発熱による温度上昇の時間発展を測定し、傾き合成法によって吸収係数を求めた。その吸収係数のレーザーパワー依存性から、線形吸収および非線形吸収係数を決定した。

(4) 開発した Kinetic モデルにより、誘電体からプラズマへの遷移過程に長寿命の励起状態の寿命特性が重要な役割を果たすことを示した。この Kinetic モデルを他の光学材料酸化物である酸化チタンに用いて、欠陥生成のレーザーパワー依存性の説明を行った。

また、大気圧希ガスプラズマにおける準安定状態の記述に用いて、準安定状態損失の補填と準安定状態からの電離により、低い放電電圧での放電維持機構を説明した。

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)

S. Kato, A. Sunahara, S. Kurimura, Kinetic model of optical damage in transparent crystals under continuous-wave laser irradiation, Proceedings Volume 10447, Laser-Induced Damage in Optical Materials 2017; 104471Z (2017), 査読無。

DOI:10.1117/12.2279957

S. Kato, S. Kurimura, N. Mio, Simulated beam propagation in nonlinear optical process for management of efficient

wavelength conversion, 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR) (2017), 査読無。

DOI:10.1109/CLEOPR.2017.8118891

S. Kato, S. Kurimura, N. Mio, Thermal effect in SHG of high-power CW lasers in periodically poled LiNbO₃-type crystals, Photonics and Fiber Technology 2016 (ACOFT BGPP NP), pp. JT4A.22, (2016), 査読無。

DOI:10.1364/ACOFT.2016.JT4A.22

S. Kato, S. Kurimura, and N. Mio, Rate-equation model of light-induced heating in LiNbO₃-type crystals under high-average-power laser irradiation, Optical Material Express 6, 396 (2016), 査読有。

DOI:10.1364/OME.6.000396

S. Todoroki, Quantitative evaluation of fiber fuse initiation with exposure to arc discharge provided by a fusion splicer, Scientific Reports 6, 25366 (2016), 査読有。

DOI:10.1038/srep25366

[学会発表](計 16 件)

加藤進, 砂原淳, 連続光レーザーによる光学結晶の損傷に関するカイネティックモデル, 日本物理学会第 73 回年次大会, 2018 年

石田智大, 加藤進, 栗村直, 三尾典克, 波長 532nm CW レーザーにおける傾き合成法を用いた PPMg:SLT の吸収および散乱光の測定, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 2018 年

加藤進, 砂原淳, 塚本雅裕, フェムト秒レーザー照射による TiO₂ 薄膜における点欠陥生成のカイネティックモデル, 第 28 回光物性研究会, 2017 年

石田智大, 三尾典克, 532nm 連続波レーザーを用いた PPMg:SLT の光学吸収測定, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 2017 年

S. Kato, A. Sunahara, S. Kurimura, Kinetic model of optical damage in transparent crystals under continuous-wave laser irradiation, SPIE Laser-Induced Damage in Optical Materials, 2017.

S. Kato, M. Fujiwara, H. Yamada, Y. Fujiwara, S. Kiyama, H. Sakakita, Kinetics of Neon Atmospheric Pressure Plasma Jets, International Conference on Phenomena in Ionized Gases, 2017.
S. Kato, A. Sunahara, M. Tsukamoto,

Kinetic Model of Color Center Formation in TiO_2 Film by femtosecond laser irradiation, 19th International Conference on Radiation Effects in Insulators (REI-19), 2017.

S. Kato, M. Fujiwara, H. Yamada, Y. Fujiwara, S. Kiyama, H. Sakakita, Sustaining mechanism of low energy atmospheric pressure plasma jets, 4th International Workshop on Plasma for Cancer Treatment (IWPCT-2017), 2017.

S. Kato, A. Sunahara, Kinetic model of defects generation in oxide crystals by intense radiation, 6th International Workshop on Mechanisms of Vacuum Arcs (MeVArc 2017), 2017.

加藤進, 栗村直, 三尾典克, 周期的分極反転 LiNbO_3 型結晶を用いた高平均出力レーザーの第二高調波発生における熱の評価, レーザー学会第 37 回年次大会, 2017.

S. Kato, S. Kurimura, Modeling of Laser Propagation in Nonlinear Optical Materials, 10th International Conference on Computational Physics (ICCP10) 2017.

S. Kato, S. Kurimura, N. Mio, Thermal Effect in SHG of High-Power CW Lasers in Periodically Poled LiNbO_3 -type crystals, OSA's Photonics and Fiber Technology Conference, 2016.

S. Kato, S. Kurimura, N. Mio, Dynamics of polarons in LiNbO_3 -type crystals under continuous-wave laser irradiation, International Conference on Defects in Insulating Materials (ICDIM 2016) 2016.

加藤進, LiNbO_3 結晶における光励起吸収の緩和に関するカイネティックモデル, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年.

S. Todoroki, Fiber fuse behavior veiled in its strong light emission, The 2nd International Workshop on Luminescent Materials, 2015.

S. Kato, S. Kurimura, and N. Mio, Rate-equation model of light-induced heating in LiNbO_3 -type crystals under high-average-power laser irradiation, Nonlinear Optics 2015.

6. 研究組織

(1) 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・電子光技術研究部門・主任研究員

研究者番号 : 20356786

(2) 研究分担者

三尾 典克 (MIO, Norikatu)

東京大学 大学院理学系研究科 (理学部)・

教授

研究者番号 : 70209724

轟 眞市 (TODOROKI, Shin-ichi)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構・機能性材料研究拠点・主席研究員

研究者番号 : 40343876

(3) 連携研究者

無し

(4) 研究協力者

無し