

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540571

研究課題名(和文) プラズマアンテナからのテラヘルツ電磁波エネルギー計測

研究課題名(英文) Measurement of Terahertz radiation from plasma antenna

研究代表者

湯上 登 (Yugami, Noboru)

宇都宮大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60220521

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)：ガス中の電極に高電圧を印加し、電極間に超短パルスレーザーを照射しプラズマを生成することによりプラズマアンテナを形成した。プラズマには電流が流れ、その立ち上がり時間はレーザーのパルス幅程度となり、その逆数は10の12乗のオーダーとなり、そこからはテラヘルツ電磁波の発生が期待できる。実験では、窒素ガスを用いレーザーのパルス幅が120 fs のとき0.08 THz の電磁波が観測された。また、レーザーのパルス幅を変化させ30 fs のとき0.3 THz の電磁波放射が観測された。このように、レーザーパルスを変化させたときの電磁波周波数依存性は理論の予測と一致した。

研究成果の概要(英文)：The plasma antenna forms by the ultra short laser pulse irradiation to the high-voltage applied electrodes in the gas. The current flows in the plasma and its rise time is expected to be same time scale of laser pulse. The emitted radiation frequency is estimated in the order of THz regime. In the experiments, we used nitrogen gas in the vacuum vessel, when laser pulse width is 120 fsec, we observed 0.08 THz radiation pulse in the frequency, moreover 0.3 THz radiation frequency was observed by using 30 fs laser pulse. The radiation frequency depends on the laser pulse width as expected by the theoretical model.

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：テラヘルツ レーザー プラズマ 電磁波 高電圧

1. 研究開始当初の背景

人類最後の電磁波と呼ばれている周波数が10の12乗ヘルツ近傍のテラヘルツ電磁波が注目を浴びている。テラヘルツ電磁波は、その透過性が高いことから数多くの応用が提案され、現在研究が進みつつある。テラヘルツ電磁波の発生には、光伝導アンテナ (Photo conductive Antenna; PC アンテナ) と呼ばれる素子が一般に広く用いられている。PC アンテナではバイアス電圧を印加した電極間に超短パルスレーザーであるチタンサファイアレーザーを照射し、電極間に急速に電流を流すことによってダイポールアンテナを形成し、1 THz 程度の電磁波を発生する。このアンテナは原理が単純で 1 THz 程度の周波数までは容易に発生できるが、バイアス電圧として印加することのできる電圧が小さいため、結果的に発生する電磁波の出力も小さくなるのが大きな欠点である。この欠点を克服するために、高電圧電極間にレーザーによって瞬時にプラズマを生成し、そこを流れるプラズマ電流によってテラヘルツ放射が起こることを申請者は考えた。

2. 研究の目的

一般にテラヘルツ電磁波の発生には、PC アンテナが用いられる。これは低温成長させたガリウム砒素基板上に対向させた電極を有する。電極間にバイアス電圧(30 V 程度)を印加し、その状態で電極間にチタンサファイアレーザーなどの短パルスレーザーを照射することにより、電極間には光伝導電流が流れる。この電流の立ち上がり時間がピコ秒オーダーとなるため、電磁波の発生周波数はテラヘルツ帯となる。このアンテナにより高繰り返し回のテラヘルツ波の発生も可能である。しかしながら、この PC アンテナには大きな欠点がある。初期の印加電圧を大きくできないため、電極間に流れる電流が制限され、結果的には大出力のテラヘルツ電磁波の発生は期待できない。この欠点を克服するために我々はプラズマアンテナを提案した。

これまでのレーザー生成プラズマを利用したミリ波からテラヘルツ波までの領域の実験では、プラズマのガス密度にかかわらず最大周波数が 0.2 THz である、それ以上の周波数の観測はできなかった。プラズマ物理学において特徴的な周波数はプラズマ周波数であり、発生する電磁波周波数も電子密度に強く依存することが予想されたが、プラズマ周波数に依存しなかった。ここ数年、何が最大周波数を決定するのかを探し求めて実験を行ってきた。その過程で、レーザーパルス幅に注目した。電磁気学が教えるところでは、電磁波の源(ソース)は、流れる電流の時間変化である。発生電磁波の電場を E とし、電流密度を J とするとき、 E と dJ/dt は比例の関係にあり、また、電流密度 J は、 $J=nev$ と書くことができることから、電流密度の時間微分は、密度の時間微分に比例する。つまり、レーザーによって生成される密度の時間変化に強く依存することになる。つまり、レーザーパルスの時間幅が発生する電磁波の周波数に強く依存すること

が予測される。

通常の実験ではガス密度やレーザー強度は実験パラメーターとして変化させることはできるが、レーザーのパルス幅はレーザー装置固有の値で変化させることはしていなかったが、それを変化させることによって、電磁波の周波数はコントロール可能であることが予測された。

3. 研究の方法

実験配置を図 1 に示す。レーザーはエネルギー 1 mJ、波長 800 nm、パルス幅 100 fs、繰り返し 1 kHz のチタンサファイアレーザーである。グレーティングペアを調節することにより、パルス幅を 300 fs まで伸長することができる。また、レーザーを中空ファイバー(直径 500 μm 、長さ 1 m)に通すことによって、スペクトルを広げ、さらにグレーティングで圧縮することによりパルス幅を 30 fs まで短くすることができる。これにより、レーザーパルスを 30 から 300 fs まで任意の幅に設定することが可能である。

このようにして作ったレーザーパルス二つに分け、一方をテラヘルツ発生のプラズマアンテナに照射し、他方はテラヘルツ電磁波の電場計測の PC アンテナに導かれる(PC アンテナはテラヘルツ電磁波発生にも用いられるが、ここでは計測用の受信アンテナとしても用いる)。

プラズマアンテナは、ギャップ間隙 1 mm の対向電極であり、大気中に置かれている。印加電圧は、最大 3 kV のパルス電圧であり、レーザーの繰り返し周波数 1 kHz に同期することができる。また、極性は正負の両方が可能である。プラズマアンテナから発生したテラヘルツ電磁波は、放物面鏡により PC アンテナ上に集光される。これにより、テラヘルツ電磁波の電場波形が計測され、FFT により電磁波周波数が求められる。

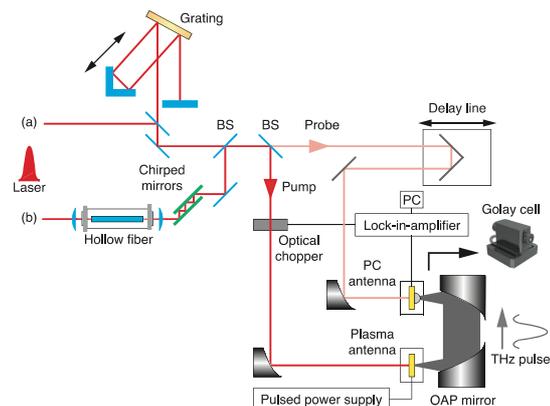


図 1 実験配置図。初期に 100 fs であるレーザーパルスをそのまま入射する場合と、フォロファイバーを用いてパルス圧縮し用いる。

4. 研究成果

実験は、大気中で行い、テラヘルツの検出には PC アンテナを受信アンテナとして用い、テラヘルツ電場を直接計測した。周波数への変換はその波形をフーリエ変換することに

よって得た。
実験結果を図 2 に示す。

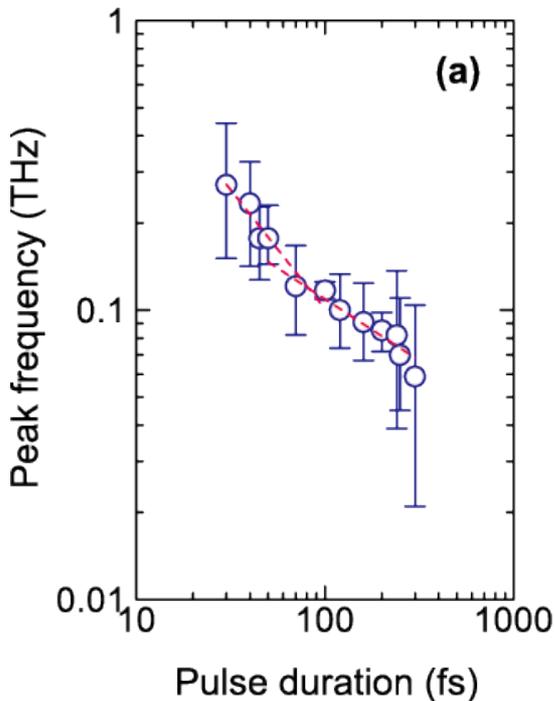


図 2 実験結果

レーザーのパルス幅は、予定通りフォロファイバーを用いることによって、最小 30 fs まで圧縮することができた。グラフを見て分かるように、レーザーパルスを短くすることによって、発生電磁波の周波数上昇が観測された。その依存性も、理論で予測された値に近い値となった。しかしながら、予測された最大周波数である 8 THz には一桁以上の開きがあり、それが現在の問題となっている。

周波数が予測より低かった点を調べるために、1次元の粒子シミュレーションコードを用いてその解析を行っている。その計算結果が図 3 である。レーザー電場(図中青で表示)によって、プラズマが生成されている(ズ中赤で表示)ことが理解できる。プラズマ生成の時間変化が電磁波の周波数に関係するので、プラズマ密度の時間微分(dn_e/dt)を示した図が、図 3 下である。パルス幅の減少にしたがって、微分値は大きくなるが、パルス幅が 100 fs 以下では上昇せず、一定値を取ることが分かった。これが実験で周波数が上昇しない原因であると考えられる。100 fs 以下でプラズマ密度の上昇が抑制される原因としては、レーザー照射初期に電極近傍でのシースの形成が不完全であり、シースを横切ってながれる電子電流が抑制される可能性がある。現在、このシース形成とプラズマ電流の関係についてのシミュレーションを実行中である。

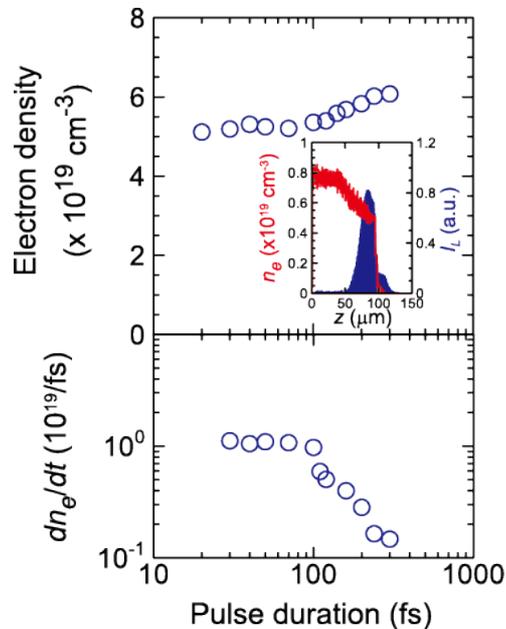


図 3 レーザーによるプラズマ生成のシミュレーション結果。レーザー電場(青)とともにプラズマ(赤)が生成されている。

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 21 件)

- 1) Takeshi Higashiguchi, Hiromitsu Terauchi, Takamitsu Otsuka, Mami Yamaguchi, Keisuke Kikuchi, Noboru Yugami, Toyohiko Yatagai, Wataru Sasaki, Rebekah D'Arcy, Pdraig Dunne, and Gerry O'Sullivan (Microdischarge extreme ultraviolet source with alkali metal vapor for surface morphology application, *Journal of Applied Physics*, **109**, 013301-1-013301-6 (2011).
- 2) Takeshi Higashiguchi, Mami Yamaguchi, Takamitsu Otsuka, Hiromitsu Terauchi, Noboru Yugami, Toyohiko Yatagai, Rebekah D'Arcy, Pdraig Dunne, and Gerry O'Sullivan (Spectral and temporal behavior of an alkali metal plasma extreme ultraviolet source for surface morphology applications", *Journal of Applied Physics*, **98**, 091503-1-091503-3

- (2011).
- 3) Hiromitsu Terauchi, Nadezhda Bobrova, Pavel Sasorov, Takashi Kikuchi, Toru Sasaki, Takeshi Higashiguchi, Noboru Yugami, and Ryosuke Kodama (Observation and numerical analysis of plasma parameters in a capillary discharge-produced plasma channel waveguide ,*Journal of Applied Physics* , **109** , 053304-1-053304-7 (2011).
 - 4) Shohei Sakai, Takeshi Higashiguchi, Nadezhda Bobrova, Pavel Sasorov, Jun Miyazawa, Noboru Yugami, Yasuhiko Sentoku, and Ryosuke Kodama (Properties of a capillary discharge-produced argon plasma waveguide for shorter wavelength source application , *Review of Scientific Instruments* , **82** , 103509-1-103509-4 (2011).
 - 5) Md. Kamal-Al-Hassan, Mikhail Strarodubtsev, Hitendra K. Malik, Noboru Yugami, and Yasushi Nishida, Ion Acoustic Wave Steamers Excited by a Resonantly Signal Biased Mesh Antenna in an Inhomogeneous Plasma, *IEEE trans. Plasma Sci.* **39**, 1927 (2011).
 - 6) Takamitsu Otsuka, Bowen Li, Colm O’Gorman, Thomas Cummins, Hao Tan, Deirdre Kilbane, Takeshi Higashiguchi, Noboru Yugami, Weihua Jiang, Akira Endo, Pdraig Dunne, and Gerard D. O’Sullivan (A 6.x nm beyond EUV source as a future lithography source , *Proceedings of SPIE* , 8322 (accepted for publication).
 - 7) A.Nishida, H.Kashiwazaki, S.Yoshida, T.Higashiguchi, N.Yugami, and R.Kodama, A tapered parallel plate waveguide for frequency up-conversion of terahertz radiation, *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 045104 (2012).
 - 8) A. Nishida, N. Yugami, T. Higashiguchi, T. Otsuka, F. Suzuki, M. Nakata, Y. Sentoku and R. Kodama Experimental observation of frequency up-conversion by flash ionization, *Applied Phys. Lett.* **101**, 161118 (2012).
- [学会発表] (計 31 件)
- 1) Masahiro Nakata, Takeshi Higashiguchi, Noboru Yugami, Yasuhiko Sentoku, and Ryosuke Kodama, “THz wave up-frequency turning by rapidly plasma creation”, *SPIE Optics and Photonics*, San Diego (2011)
 - 2) Fuminori Suzuki, Takeshi Higashiguchi, Hiroaki Anno-Kashiwazaki, Noboru Yugami, Yasuhiko Sentoku, Ryosuke Kodama, and Patric Muggli, “Tunable terahertz radiation from an ultrashort-laser-pulse-induced discharge in biased air”, *SPIE Optics and Photonics*, San Diego (2011)
 - 3) Akira Endo, Takeshi Higashiguchi, Takamitsu Otsuka, Noboru Yugami, Pdraig Dunne, Bowen Li, Thomas Cummins, Colm O’Gorman, Tony Donnelly, and Gerry O’Sullivan, “Scaling of laser produced plasma UTA emission down to 3nm for next generation lithography and short wavelength imaging”, *SPIE Optics and Photonics*, San Diego (2011)
- [図書] (計 0 件)
- [産業財産権]

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

湯上 登 (YUGAMI Noboru)

宇都宮大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：60220521

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし