

平成 30 年 4 月 26 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05361

研究課題名(和文) プラズマフィラメントを用いたDARCによる高強度テラヘルツ電磁波放射

研究課題名(英文) Generation of Intense Terahertz Radiation from DARC by using Plasma Filament

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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：新規性のある電磁波放射源DARCを用いてサブテラヘルツ領域の電磁波発生に成功した。用いたDARCの構造は、隣り合う電極間隔が2mm、電極のgapが1mm、2.5周期、最大50 kV/cmの電場を励起した。プラズマ生成に用いたレーザーはチタンサファイアレーザーで、波長800 nm、パルス幅100fs、最大エネルギー40mJである。電磁波の検出にはショットキーバリアダイオードを用い、最大周波数0.33 THzの信号が観測され、出力は20マイクロワットであった。印加電圧を変化させることによりテラヘルツ電磁波の出力は電圧の2乗に比例し、理論と一致した。

研究成果の概要(英文)：The operation of the DC-to-AC radiation converter (DARC) in the sub-THz region is confirmed. A relativistic ionization front which is created by a loosely focused of Ti:sapphire laser pulse propagating through a capacitor array of period  $d = 0.2$  cm with a gas pressure between 1 and 200 Pa. The maximum frequency of the generated emission is determined to be in the range of 0.1 to 0.3 THz by using several diodes.; The maximum frequency range observed is up to Y band (0.22-0.33THz), which is the highest frequency reported using the DARC with gas (to our knowledge). Theoretically, higher frequency can also be obtained with higher electron density. The maximum signal voltage as a function of the applied voltage. The maximum signal voltages increase with the increasing applied voltage.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：テラヘルツ レーザー プラズマ

1. 研究開始当初の背景

一般にテラヘルツ電磁波の発生には、PC(Photo conductive:光伝導)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し、瞬時にキャリアを生成し、電流を流すことによりテラヘルツ電磁波を発生させている。しかしながら、このPCアンテナは、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、原理的に大出力のテラヘルツ電磁波の発生は期待できない。テラヘルツ電磁波の応用を考えたとき、これは大きな欠点となる。また、周波数の制御もできないことも多様な応用を考えたときに問題となる。

2. 研究の目的

(1) 研究を行っている DARC(dc to ac radiation converter) は、プラズマ物理学を基礎とした大電力周波数可変な新規性の高い電磁波源である。コンデンサーアレイに正負交互に電圧を印加することによって、空間的に正弦的な静電場を励起する(図1参照)。その間に、レーザーを照射することによって、レーザーの群速度(ほぼ光速)で伝搬する電離面を形成する。このとき、電離面の表面には静電場の強度、向きに応じた電流が流れる。この電離面表面を流れる電流を実験室系で見たとき、光速で向かってくるダイポールアンテナと見ることができ、そこからの電磁波放射が観測されることになる。DARCの特徴としては、

1. 発生周波数は、静電場の波長と電離面のプラズマ密度に依存する(周波数可変)
2. 放射電磁波の電場は、励起した静電場の電場にほぼ等しい(大電力)
3. パルス幅はコンデンサー数に依存(パルス幅可変)

ことが上げられる。1. に関しては、構造上、静電場の波長はミリメートルオーダーとなり、現実的には自由度は少ないため、発生周波数はプラズマ密度に強く依存し、ほぼプラズマ周波数に等しくなる。つまり、1桁高い周波数の電磁波の発生には、2桁高いプラズマ密度が必要である。

(2) これまで DARC によりマイクロ波からミリ波の発生実験を行ってきた。発生周波数をテラヘルツ領域にするには、これまで以上に高密度なプラズマを作らなければならないのと同時に、長く作る必要がある。高密度のプラズマを生成するには高気圧のガスにレーザーを集光すればよいが、それでは集光点を過ぎると発散し、長いプラズマを作ることとは不可能である。DARC の構造から考えると、cm オーダーの長さが必要であり、通常のレーザー集光では、レーザ長程度(常識的には、数百マイクロメートル)であるのでそのままでは DARC には使えない。DARC による

テラヘルツ電磁波の発生には、高密度のプラズマを長く作ることが必要である。

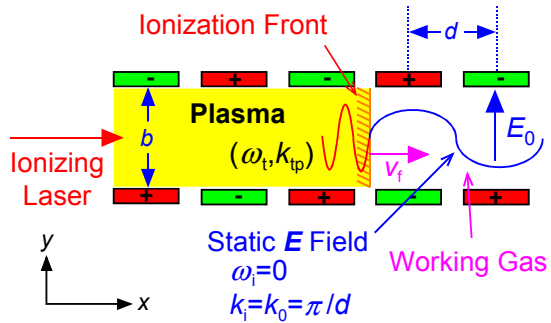


図 1 DARC

3. 研究の方法

(1) 本研究では、DARC からの放射周波数を 1 THz を達成することを第一の目標とする。また、発生電磁波の電場の直接計測を第二の目標とする。周波数計測は、これまで行ってきたショットキーバリアダイオードによる観測の他に、近年開発を行っているエシエロンによるテラヘルツ電場の直接観測を行う。これらにより、プラズマ密度により発生周波数が制御できることを示し、最大周波数 1 THz を目指す。その他にテラヘルツエネルギーをゴレイセルで計測を行い、発生した電磁波が応用研究に供するだけのポテンシャルを有するかを確認する。レーザーによる電離面の形成、電離面でのプラズマ電流、それによる電磁波発生シミュレーションを PIC code(粒子コード)を用いて行い、実験結果との比較検討を行う。

(2) 【実験計画】

基本的に、現在行っている実験を継続し、購入するショットキーバリアダイオードによってテラヘルツ電磁波の周波数を計測する。実験配置を図2に示す。用いるレーザーは、チタンサファイアレーザー(波長 800 nm、エネルギー 40 mJ、パルス幅 120 fs、繰り返し 10 Hz)である。入射レーザーはビームスプリッター(BS)によって3つに分けられる。そのエネルギーのほとんどは DARC に照射される。DARC は、ギャップ間隔が 1 mm、5 ペアのコンデンサー、つまり 2 周期の静電場が励起できるようにする。DARC には最大 30 kV まで印加できる大容量パルス電源が接続される。DARC で発生したテラヘルツ電磁波は、二つの OAP (軸外し放物面鏡)により集光される。照射レーザーと発生する電磁波は同じく前方に伝搬する。最初の OAP には穴が空いており、レーザーはこの穴を通して直進しテラヘルツ電磁波の計測の障害にならないようにしている。

(3) 分けられたレーザーの一つは、DARC の横方向からプラズマフィラメントに照射され、自発光によりフィラメント長を、影絵および干渉計測によりそれぞれプラズマ径とプラズマ密度をモニターすることが可能である。

分けられたもう一方のレーザーは、エシェロンに導かれ多数のパルス列を生成する。このパルス列はテラヘルツ電磁波が EO 結晶を通過する時間に照射され、テラヘルツ電磁波のシングルショット電場計測用に用いられる。その他の電磁波計測としては、従来通りのショットキーバリアダイオードやエネルギー計測にはゴウレイセルを用いる。

(4) これまでのデータから、このような実験配置でガス圧 100 Pa 程度するとき、プラズマ密度は  $10^{15} \text{ cm}^{-3}$  のオーダーとなり、周波数 1 THz 程度の電磁波が発生すると考えている。また現在得られている出力は mW 程度である。これは、広く使われている PC アンテナがマイクロワットオーダーであることを考えると、非常に高い。

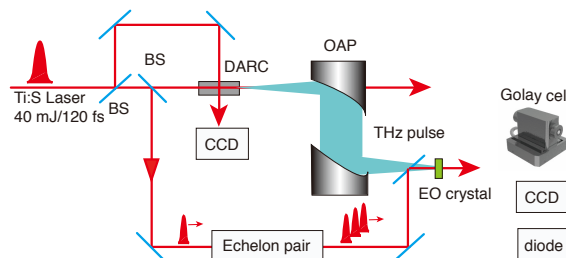


図 2 実験配置

#### (5) 【テラヘルツ計測】

発生したテラヘルツ電磁波強度が高い場合は、以下のような計測法も準備している。ZnSe のような電気光学結晶では、外部から電場が印加されると電場強度に比例して結晶の屈折率がポッケルス効果により変化する。このとき入射したプローブレーザー光は偏光面が角度  $\theta$  だけ回転する。このレーザー光の  $\cos \theta$  成分(または  $\sin \theta$  成分)を計測すれば、印加された外部電場を計測できる。この原理を用いてテラヘルツ電磁波を計測する場合、テラヘルツ電磁波とプローブレーザーのタイミングを遅延線路を用いて少しずつ変化させ、テラヘルツ電磁波の電場プロファイルを計測する。この方法では、長時間の走査が必要であり、長時間のレーザーの安定性が必要となる。これを克服するために、一本のプローブレーザー光を時間的遅延を与えた多数のビーム列(ビームレット)に分割し、それらを照射することによって、シングルショットでテラヘルツ電磁波の電場を計測する。

(6) 図 3 のように、階段状のミラー(エシェロンと呼ぶ)にレーザーを照射することによって、隣の段の光とは、行路差  $L$ (時間差  $L/c$ )の遅延が生じる。このようなエシェロンを二つ使って、四角のビームの中に、遅延が生じた  $ij$  個のビームレットに分解する。それらをテラヘルツ電磁波が通過する ZnSe 結晶に照射することによって、それぞれのビームレットが結晶を通過したときのテラヘルツ電磁波の電場の情報を持って、結

晶から CCD に導かれる。最終的には、CCD 画面上にテラヘルツ電場の時間変化が光の強度の変化となり、時間が空間に置き換わって投影される。図 3 右の写真は、2-color 法で発生したテラヘルツ電磁波の CCD 画像と電場波形である。この実験結果は、通常テラヘルツ電磁波の計測に用いられる光伝導アンテナによって較正されており、計測に十分使えることが確認されている。

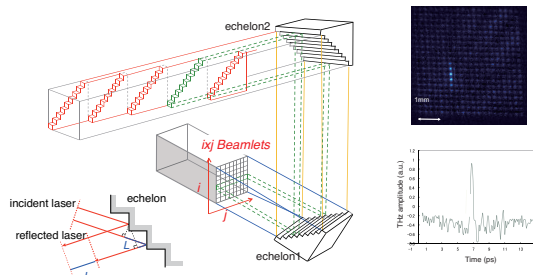


図 3 エシェロンペアによるテラヘルツ電場計測

#### 4. 研究成果

(1) 上記実験配置で実験を行った。レーザーエネルギーは、40 mJ、パルス幅 120 fs、繰り返しは 10 Hz である。DARC に印加した電場は最大 50 kV/cm である。実験に先立ち、窒素ガス圧を 1-100 Pa まで変化させた時のプラズマ密度をマイケルソン干渉法によって計測を行った。ガス圧 50 Pa(プラズマ密度  $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ )における検出されたサブテラヘルツ領域の波形を図 4 に示す。グラフは上から順番に Y バンド、G バンド、F バンドのショットキーバリアダイオードとホーンアンテナの組み合わせでの観測波形であり、それぞれ 0.09-0.14 THz, 0.14-0.22, 0.22-0.33 THz に感度を有する。赤は DARC に電圧を印加した時、青は電圧を印加しない時の波形である。電圧不印加時にもプラズマから発生する電磁波が観測されるが、電圧を印加することによって、優位な出力が観測されている。

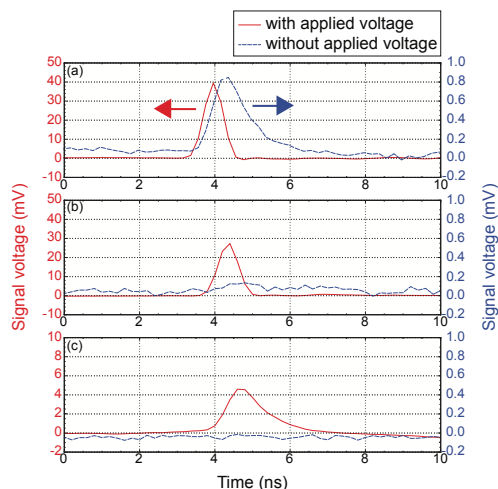


図 4 観測波形

(2) 図5はガス圧を1から100 Paまで変化させた時の各ディテクターの信号強度を表している。ある電子密度に対して、信号は広がって検出されている。周波数広がり $\Delta\omega$ はコンデンサーによって励起される静電場の周期数 $N$ に依存する。今回の実験では、 $N=2.5$ である。このとき、中心周波数を $\omega_0$ とすると、 $\Delta\omega=\omega_0/2$ と評価できる。また、パワースペクトルは、 $I(\omega)=[\sin[(\omega_0-\omega)\tau]/(\omega_0-\omega)]^2$ と評価できる。ここで、 $\tau=2\pi N/\omega_0$ であり、放射電磁波のパルス幅である。図中の点線はこの式から評価したものである。

(3) 図5は各ディテクターにおける出力信号強度の印加電場依存性である。電子密度は、 $(2-4)\times 10^{14}\text{ cm}^{-3}$ で実験は行った。信号強度は電圧に依存し、図中の点線はフィッティング直線であり、いずれも傾きが2程度である。この依存性は、DARCの出力 $P$ に関する理論式が $P\propto V^2$ で表されることによく一致している。

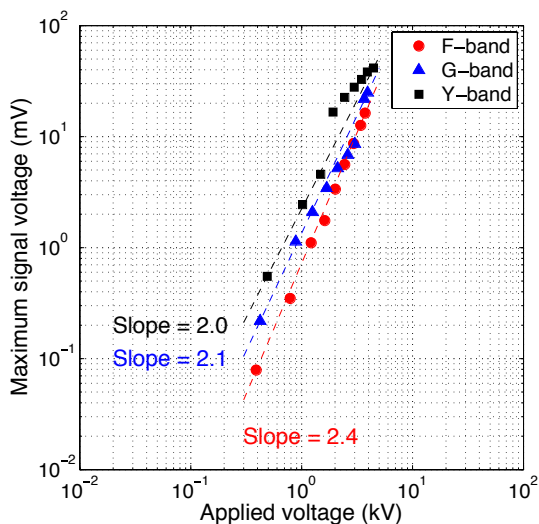


図5 テラヘルツ信号強度の印加電圧依存性

(4) 以上より、今回の研究によってDARCによって、サブテラヘルツ領域の電磁波の放射を観測し、理論と一致する放射電磁波の周波数広がりや信号強度の印加電圧依存性を確認することができた。

#### 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1件)

① Takamitsu P. Otsuka, Takeharu Hommyo, Yusuke Hyuga, Noboru Yugami, and Ryosuke Kodama, Generation of sub-terahertz radiation using the DC-to-AC radiation

converter, Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 56, 2017, p.110308

DOI:

<https://doi.org/10.7567/JJAP.56.110308>

[学会発表] (計19件)

① Y.Hyuga, M.Hideta, T.Hommyo, T.Otsuka and N. Yugami, "Generation of sub-Terahertz radiation using the dc to ac radiation converter", HEDS2015, Yokohama, Apr.24 2015.

(他、18件)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

湯上 登 (Noboru Yugami)

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

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：

(4) 研究協力者

( )