

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20340159

研究課題名(和文) 位相制御された大出力テラヘルツ光源の開発

研究課題名(英文) Development of high power THz source using phase control technique

研究代表者

湯上 登 (YUGAMI NOBORU)

宇都宮大学・工学研究科・教授

研究者番号：60220521

研究成果の概要(和文)：静電場を励起した大気中において、位相制御された超短パルス高強度レーザーにより誘起されるパルス放電プラズマからのテラヘルツ電磁波の発生を観測した。観測されるテラヘルツ電磁波のピーク周波数は、電離の立ち上がり時間に依存した。パルス幅 30 fs および 100 fs のレーザーを用いた場合のテラヘルツ電磁波の中心周波数は、それぞれ 0.3 THz と 0.1 THz であった。また、テラヘルツ電磁波と超短パルスレーザーにより生成されたプラズマの相互作用を用いてフラッシュ電離の原理実証実験を行った。フラッシュ電離とは、電磁波の周辺を瞬時にプラズマ化することによって、プラズマ周波数に依存し電磁波の周波数上昇変換が引き起こされる現象である。ZnSe 結晶にレーザーを照射することによって 0.35 THz からおよそ 3 THz への周波数上昇変換を観測した。

研究成果の概要(英文)：We have demonstrated that the phase-controlled terahertz radiation can be generate by the burst current produced by a laser created ionization front, which is induced an optical-field-induced ionization (OFI) in air with a pulsed electric field. The peak frequency of the radiation spectrum depends on the rise time of the OFI. The central frequencies of the radiation were observed to be 0.3 and 0.1 THz at the pulse durations of 30 and 100 fs (FWHM), respectively. We also have demonstrated the proof-of-principle experiment of flash ionization scheme using the interaction between a terahertz wave and plasmas created by an ultrashort laser pulse. When plasmas were instantaneously created around an electromagnetic wave, frequency of the wave up-converted to the frequency, which depended on the plasma frequency. We observed frequency up-conversion from 0.35 THz to 3 THz by the irradiance of the laser in ZnSe crystal.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2009年度	2,500,000	750,000	3,250,000
2010年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
年度			
総計	13,700,000	4,110,000	17,810,000

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：チャープ, テラヘルツ, 電離面, DARC, フラッシュ電離

## 1. 研究開始当初の背景

テラヘルツ波は光と電波の間にある電

磁波スペクトルである。この領域の電磁波は光(赤外光や可視光)よりも物質透過性が大

大きく、電波よりも波長分解能が高い。この特性を利用し、基礎化学分野、産業分野、農業分野、医療分野などへの応用が期待されている。しかしながら、現在利用されているテラヘルツ電磁波源は、変換効率が低く、出力が小さい。テラヘルツ電磁波の更なる応用研究の発展のためには、広帯域かつ高出力のテラヘルツ光源の開発が必要である。プラズマを用いた広帯域かつ高出力なテラヘルツ電磁波源の研究をしている。

## 2. 研究の目的

広帯域かつ高出力なテラヘルツ電磁波源の開発のために、本研究では、DARC (DC to AC radiation converter) と呼ばれる光源を用いた。この光源は、1990年代後半にマイクロ波からミリ波の領域で原理実証実験が行われており、周波数可変性、パルス整形、広帯域、高出力などの利点を有する。この光源をテラヘルツ電磁波の領域において原理実証し、最終的に位相制御されたレーザー光を用いて大出力テラヘルツ電磁波を発生させることが最終的な目的である。そこでまず、電極対を1対、つまりダイポールアンテナ状にして、テラヘルツ電磁波放射が可能かどうかの実験を行った。

また、伝搬している電磁波周辺を瞬時にプラズマ化することによる周波数上昇変換に関する理論が1980年代後半に提案され、2002年にはマイクロ波の領域で原理実証されている。この現象は、フラッシュ電離と呼ばれている。プラズマ周波数に依存し周波数上昇量が変化することから、フラッシュ電離をテラヘルツ電磁波の領域に適用できれば、テラヘルツ波の応用の幅を広げることが期待される。さらに、テラヘルツ電磁波の周波数帯域において、このフラッシュ電離による周波数上昇変換の原理実証は報告されていない。そのため、本研究では、フラッシュ電離によるテラヘルツ電磁波の周波数上昇変換の原理実証を目的とした。

## 3. 研究の方法

DARCからのテラヘルツ電磁波放射とフラッシュ電離によるテラヘルツ電磁波の周波数上昇を観測するために、ポンプ・プローブサンプリングシステムによってテラヘルツ電磁波の時間波形を観測した。用いたレーザーは、再生増幅器付きチタンサファイアレーザー（中心波長：800 nm、最大出力エネルギー：1 mJ/pulse、パルス幅：35~100 fs、繰り返し周波数：1 kHz）である。

DARCは、直感的にはレーザー誘起パルス放電によって流れる電流がダイポールアンテナを形成し、そのダイポールアンテナが光速で伝搬していると見なすことが出来る。そこで、電極を1対としてダイポールアンテナ

を形成し、テラヘルツ電磁波放射の観測を行った。レーザーシステムから出力されたレーザーパルスをパルス放電誘起用のポンプ光とテラヘルツ電磁波検出用のプローブ光に分けた。電極間にはレーザーと同期したパルス電圧（定格電圧：8 kV、パルス幅：200 ns、繰り返し周波数：1 kHz）を印加し、電極間にポンプ光を集光照射することにより超高速電離を誘起した。

レーザー誘起パルス放電により流れる電流から放射されたテラヘルツ電磁波は非軸放物面鏡を介して、光伝導アンテナにより検出される。光学遅延線路を介してプローブ光を光伝導アンテナに照射した。このとき、プローブ光の照射によりキャリアが生成され、伝搬してきたテラヘルツ電磁波の電界によりキャリアが加速されることにより、アンテナ間に電流が流れる。この電流をロックイン検出することにより、テラヘルツ電磁波の電界波形を観測した。放電誘起用レーザー光のパルス幅を変化させることにより、電極間から放射されるテラヘルツ電磁波の周波数特性を明らかにした。

フラッシュ電離によるテラヘルツ電磁波の周波数上昇の観測実験では、レーザーシステムから出力されたレーザーパルスを、瞬時生成プラズマのための電離用レーザーとテラヘルツ電磁波の発生・検出用のポンプ光およびプローブ光の3つに分けた。プラズマ媒質には、レーザーで励起することにより高密度キャリアを生成することができるZnSe結晶を用いた。テラヘルツ電磁波とプラズマの相互作用領域を増加させるために、テラヘルツ電磁波の光軸に対してZnSe結晶を斜めに配置し、結晶表面への電離用レーザーの入射角をブリュースター角（約68°）とした。ポンプ光は非線形光学結晶であるZnTe結晶に入射し、差周波発生によりテラヘルツ電磁波が放射される。放射されたテラヘルツ電磁波は非軸放物面鏡により平行光にされ、テラヘルツレンズによりZnSe結晶に集光される。このとき、電離用レーザーがテラヘルツ電磁波と同時にZnSe結晶に入射するように電離用レーザーに時間遅延を与えた。ZnSe結晶を通過したテラヘルツ電磁波はテラヘルツレンズおよび非軸放物面鏡によって、テラヘルツ電磁波検出用の光伝導アンテナに照射し、ロックイン検出することにより時間波形を観測した。パルス幅およびレーザー強度を変化させ、フラッシュ電離によるテラヘルツ電磁波の周波数上昇特性を明らかにした。いずれの実験においてもレーザーのパルス幅を100 fs以下とする時には、アルゴンガスが充填された中空ファイバーを用いて自己位相変調し、チャープミラーによって分散補償することによりパルス幅を圧縮した。一方、パルス幅を100 fs以上にすると、レ

レーザーシステム内の圧縮器の回折格子対を操作することによりパルス幅を伸張した。

#### 4. 研究成果

本節では、レーザー誘起パルス放電からのテラヘルツ電磁波放射と超短パルスレーザーを用いたフラッシュ電離によるテラヘルツ電磁波の周波数上昇変換について報告する。

レーザー生成ガスプラズマからのテラヘルツ放射実験において、ガス密度やレーザー強度を変化させてもピーク周波数の変化は観測されていない。発生するテラヘルツ電磁波の電界は、次式 (1) に示すように、放射電磁波の電界  $E(t)$  は電子密度の時間変化に依存する。

$$E_{\text{THz}}(t) \propto \partial J(t) / \partial t = ev_d \partial n_e(t) / \partial t \dots\dots (1)$$

このことから、レーザーパルスのパルス幅を変化させて電子密度の立ち上がりを変化させることにより、ピーク周波数が変化すると期待される。

図 1(a) は印加静電界強度が 28 kV/cm, レーザーエネルギーが 980  $\mu\text{J}$ , パルス幅が 100 fs のときに観測されたテラヘルツ電磁波の時間波形である。この放射電磁波の電界の時間波形をフーリエ変換することにより図 1(b) に示すような周波数スペクトルを算出した。このとき、ピーク周波数は 0.12 THz, 帯域幅は 0.1 THz であった。図 1(c) はレーザーのパルス幅が 30 fs のときに観測された放射電磁波の時間波形, 図 1(d) はその周波数スペクトルである。放射された電磁波のピーク周波数は 0.27 THz であった。これより、レーザーパルスのパルス幅を変えることによって、ピーク周波数の変化が観測された。図 2 はピーク周波数のレーザーパルス幅依存性である。プロット点はピーク周波数であり、スペクトルの半値幅すなわち帯域幅をエラーバーとした。点線は近似直線である。レーザーの短パルス化と共に放射されるテラヘルツ電磁波のピーク周波数は高周波化した。このとき、放射電磁波のピーク周波数はレーザーのパルス幅に反比例した。詳細に見ると、レーザーのパルス幅が 100 fs を境に依存性が変化した。このことを評価するために粒子 (particle-in-cell: PIC) コードを用いて、ガス媒質中を伝搬するレーザーパルスのダイナミクスとプラズマの電子密度およびその時間変化を計算した。このときの計算条件は、ガス圧力 1 気圧, つまり中性ガス密度  $2.5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  の窒素ガス中にレーザー強度  $4 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$  のレーザーパルスが入射するとし、ガス中を 200  $\mu\text{m}$  伝搬してきたときにレーザーパルスの背後に生成されるプラズマ電子密度の時間変化を評価した。

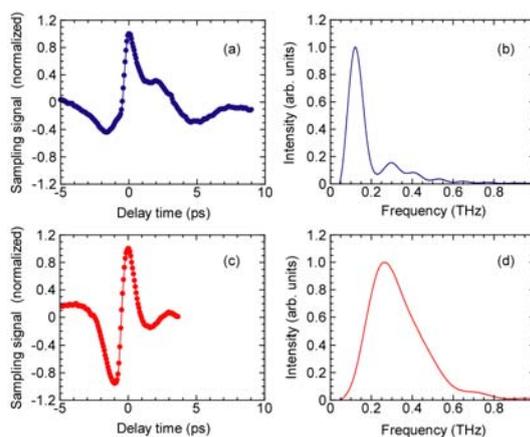


図 1. 観測された時間波形及び周波数スペクトル  
パルス幅 100 fs の時の (a) 時間波形及び (b) 周波数スペクトル, パルス幅 30 fs の時の (c) 時間波形及び (d) 周波数スペクトル

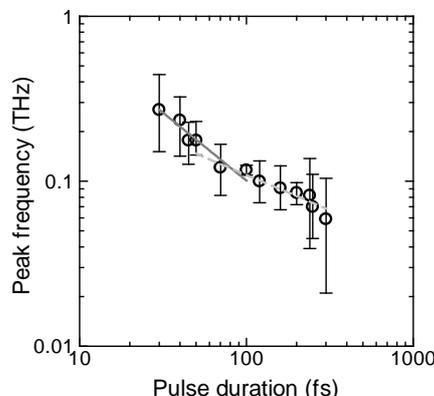


図 2. ピーク周波数のパルス幅依存性

図 3 は電子密度の時間変化量のパルス幅依存性である。レーザーのパルス幅が 100 fs を境にして電子密度の時間変化が異なることが計算された。このことより、図 2 のピーク周波数のパルス幅依存性における特性勾配の違いはこのように電離時間の違いにあると考えられる。

電子を生成するレーザーのパルス幅を変化させることにより、ピーク周波数の変化が観測された。このことの妥当性を評価するために、図 4 に示すようなプラズマシースモデルを検討した。超短パルスレーザーによってプラズマが生成された後、プラズマシースは陽極表面から膨張する。シース幅  $D(t)$  の膨張の時間スケールは、プラズマ周波数の逆数程度であり、実験パラメータから予測される膨張の時間スケールはピコ秒程度である。そのため、レーザーのパルス幅であるフェムト秒の時間スケールにおいては、外部電界はデバイ遮蔽されることはない。そのため、生成された電子は外部電界によって加速され、テラヘルツ電磁波を放射することになる。電子電流密度  $J_e(t)$  は、シースの膨張速度を  $dD(t)/dt$

とし、電子の対流速度を  $u_0$  とすると、

$$J_e(t) = en_e(t) [dD(t)/dt + u_0], \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここで、対流速度  $u_0 = 0$  とし、シースの厚み  $D(t)$  は次式に従うものと仮定する。

$$D(t) = D_0 [1 - \exp(-t/\tau)], \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $D_0$  はデバイ長、 $\tau$  はプラズマ周波数の逆数である。電子電流密度  $J_e(t)$  は、

$$J_e(t) = en_e(t) \frac{D_0}{\tau} [1 - \exp(-t/\tau)], \dots\dots\dots (4)$$

となる。ここで、 $\tau$  はレーザーのパルス幅よりも十分大きいいため、 $\exp(t/\tau)$  の項は、ほぼ 1 となる。従って、 $D_0$  及び  $\tau$  は一定であり、 $dD(t)/dt = D_0/\tau$  となる。従って、放射されるテラヘルツ電磁波の電界波形は、

$$E_{\text{THz}}(t) \propto \frac{\partial J(t)}{\partial t} = \frac{d}{dt} \left[ en_e(t) \frac{D_0}{\tau} \right] = e \frac{D_0}{\tau} \frac{dn_e(t)}{dt}, \quad (5)$$

となる。つまり、放射されるテラヘルツ電磁波の電界波形は、電子密度の時間変化に依存する。電界波形をフーリエ変換することにより得られる周波数スペクトルも電子密度の時間変化に依存する。電子密度の時間変化はレーザーのパルス幅に依存するため、放射電磁波のピーク周波数はレーザーのパルス幅

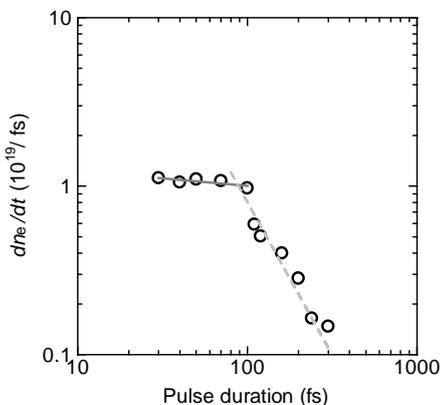


図 3. 電子密度の時間変化量のパルス幅依存性

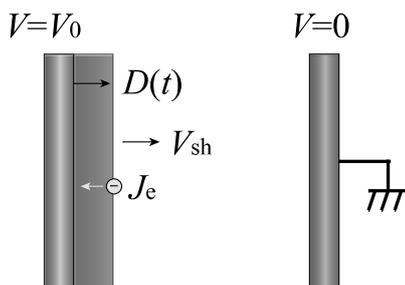


図 4. プラズマシースモデル

に反比例することになる。以上のことから、放射電磁波のピーク周波数がレーザーのパルス幅に反比例したことをこのプラズマシースモデルより説明できることが分かった。

フラッシュ電離とは、電磁波の周辺を瞬時にプラズマ化することによって、プラズマ周波数に依存し電磁波の周波数上昇変換が引き起こされる現象である。電磁波に対し屈折率の時間的变化を与えることによって、電磁波の波数が保持されたまま満たすべき分散関係が大気中からプラズマ中の分散関係に変化することに起因する。

フラッシュ電離を実証するためには、①周波数上昇させる電磁波の周期に対し、プラズマの生成時間が、十分短いこと、②プラズマサイズが、電磁波の波長よりも十分大きいこと、③電磁波に対し過密度プラズマを生成することの3つの条件を満たす必要がある。テラヘルツ電磁波とフェムト秒オーダーの超短パルスレーザーを組み合わせることで、これらの条件を満たすことが出来ると考えた。

図 5 は ZnSe 結晶に電離用レーザーとテラヘルツ電磁波が同時に入射している時刻において観測されたテラヘルツ電磁波の時間波形および周波数スペクトルである。破線は電離用レーザーがないとき、すなわちプラズマを生成していないときのテラヘルツ電磁波の時間波形および周波数スペクトル、実線は電離用レーザーによりプラズマが生成された場合のテラヘルツ電磁波の時間波形および周波数スペクトルである。周波数が 2.8 ~ 3.2 THz の領域に周波数が上昇した成分が観測された。この領域の周波数スペクトルを積分し、電離用レーザーの有無における放射出力を比較すると、電離後には約 4.3 倍に増加した。ここで、入射されたテラヘルツ電磁波のピーク周波数は 0.35 THz であるため、周期は約 3 ps である。電離に要した時間は 100 fs 以下であるため、フラッシュ電離で要求されている時間条件を満たしている。ここで、ZnSe 結晶に生成されるプラズマの大きさについて検討する。本実験では ZnSe 結晶表面上におけるテラヘルツ電磁波の集光径は約 5 mm であるが、電離用レーザーの集光径は約 10 mm であるため、半径方向のプラズマは十分な大きさである。次に ZnSe 結晶表面から生成されるプラズマの厚みについて考える。電離用レーザーの照射条件から予測される電離過程は多光子電離である。固体プラズマが生成される ZnSe のエネルギーバンドギャップは 2.7 eV である。電離用レーザーの中心波長は 800 nm であり、光子エネルギーは約 1.5 eV である。レーザー強度は多光子電離のレーザー強度であるため、二光子吸収による電離である。プラズマが生成されるレーザー光の吸収過程が二光子吸収のとき、ZnSe 結晶表面に生成されるプラズマの厚み

$\delta$  は、以下のように求めることができる。

$$\delta = \frac{1}{\beta I}, \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 $\beta = 3.5 \times 10^{-9} \text{ cm/W}$  は ZnSe 結晶の二光子吸収係数、 $I$  はレーザー強度である。レーザー強度が  $I = (1.0 \sim 8.0) \times 10^9 \text{ W/cm}^2$  のとき、生成されるプラズマの深さ  $\delta$  はおよそ  $0.3 \sim 3 \text{ mm}$  である。一方、テラヘルツ電磁波の周波数 ( $0.35 \text{ THz}$ ) の波長は約  $1 \text{ mm}$  である。このことから、テラヘルツ電磁波の伝搬方向にもテラヘルツ電磁波の波長程度の厚さのプラズマが生成されている。しかしながら、十分に大きなプラズマは生成されていないため、テラヘルツ電磁波とプラズマの相互作用領域を増加させることで、より顕著な周波数上昇が期待される。

結晶に生成されるキャリアの電子密度を変化させるためレーザーエネルギーおよびパルス幅を変化させた。これにより、テラヘルツ電磁波の周波数上昇量のレーザー強度依存性を明らかにした。

周波数上昇量のレーザー強度依存性を図 6 に示す。レーザー強度の増加と共にテラヘルツ電磁波の周波数上昇量も増加し、レーザー強度が約  $3.0 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$  以上ではテラヘルツ電磁波の周波数上昇量は飽和した。二光子電離過程では電子密度はレーザー強度の 2 乗に依存する。このことから、レーザー強度

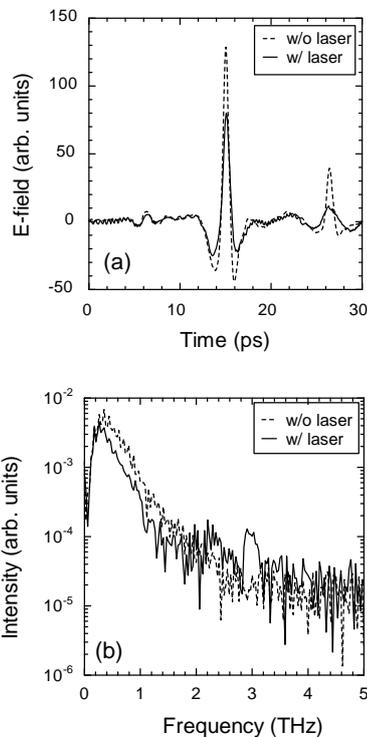


図 5. 遅延時間 0 ps 近傍における (a) 時間波形 (b) 周波数スペクトル

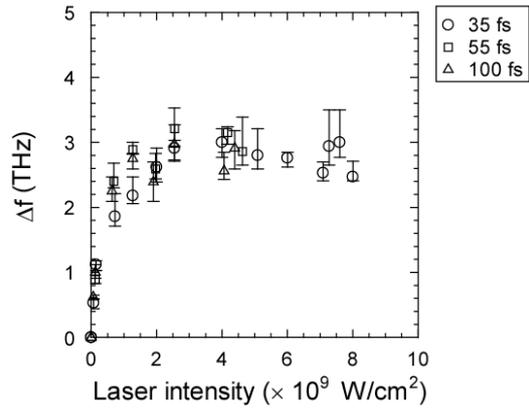


図 6. 周波数上昇量のレーザー強度依存性

の増加と共にさらに周波数が上昇すると予測される。しかしながら、本実験でも用いられた光伝導アンテナの検出感度は約  $3 \text{ THz}$  であるため、周波数が高いときは検出できずに見た目上の周波数上昇量が飽和したものと考えている。今後、電磁波を吸収した際の熱膨張や温度上昇を利用するゴーレイセルやボロメーターなどの検出器に変更して、干渉法などにより周波数を観測する予定である。

本研究では、超短パルスレーザーによりパルス放電を誘起し、テラヘルツ電磁波の発生を観測した。ピーク周波数は、レーザーのパルス幅に依存し、レーザーの短パルス化と共にピーク周波数は高周波化した。このことは、プラズマシースモデルより妥当であることが示された。今後、この単電極を配列し、正負交互にバイアスすることにより、DARC による新方式テラヘルツ放射源の原理実証実験を展開できるものと考えている。

テラヘルツ電磁波のフラッシュ電離による周波数上昇を観測し、周波数上昇量のレーザー強度依存性を明らかにした。テラヘルツ電磁波の周波数は  $0.35 \text{ THz}$  から約  $3 \text{ THz}$  に周波数が上昇し、周波数可変性も観測された。レーザー強度が  $3 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$  以上では周波数上昇量は飽和し、最大周波数は約  $3 \text{ THz}$  であった。しかしながら、本研究では過密度プラズマを瞬時に生成できているが、プラズマの厚さは十分ではなかった可能性が残されている。

## 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 5 件)

- [1] Takeshi Higashiguchi, Hiroaki Anno-Kashiwazaki, Takamitsu Otsuka, Noboru Yugami, and Ryosuke Kodama, "Terahertz radiation in an optical-field-induced ionization in air with a pulsed electrostatic field", Proceedings of The IRMMW-THz 2010, p. Th-P.40 (1-2), (2010.9).
- [2] Takamitsu Otsuka, Fuminori Suzuki, Masahiro Nakata, Takeshi Higashiguchi, Noboru Yugami, and Ryosuke Kodama, "Experimental observation of frequency up conversion of terahertz using laser produced plasmas", Proceedings of The IRMMW-THz 2010, p. Th-P.41 (1-2), (2010.9).
- [3] Makoto Nakagawa, Ryosuke Kodama, Takeshi Higashiguchi, and Noboru Yugami, "Generation of terahertz radiation via an electromagnetically induced transparency at ion acoustic frequency region in laser-produced dense plasmas", Physical Review E, Vol. 80, pp. 025402(R) (2009.8).
- [4] Noboru Yugami, Takeshi Higashiguchi, and Ryosuke Kodama, "Possibility of high power THz radiation via electromagnetically induced transparency at ion acoustic frequency region in laser-produced dense plasmas", Proceedings of SPIE, Vol. 7359, pp. 735911 (2009.5)
- [5] Takeshi Higashiguchi, Hideyuki Hasegawa, Hirofumi Nishimai, Noboru Yugami, and Patric Muggli, "Frequency Upshift and Radiation of the THz Electromagnetic Wave via an Ultrashort-Laser-Produced Ionization Front", AIP Conference Proceedings, Vol. 1086, pp. 701-706 (2009.1).

[学会発表] (計 6 件)

- [1] 湯上 登, 仲田 真大, 大塚 崇光, 鈴木 史典, 笠間 純一, 東口 武史, 千徳 靖彦, 兒玉 了祐, 「フラッシュ電離によるテラヘルツ電磁波の周波数上昇」, 日本物理学会, 2010 年秋季大会, 23pQJ-3, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス (大阪府堺市) (2010.9.23).
- [2] 東口 武史, 柏崎 宏明, 大塚 崇光, 宮澤 準, 大場 貴文, 鈴木 光騎, 湯上 登, 千徳 靖彦, 兒玉 了祐, 「超短パルスレーザー駆動パルス放電によるテラヘルツ放射」, 日本物理学会, 2010 年秋季大会, 23pQJ-2, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス (大阪府堺市) (2010.9.23).

- [3] 湯上 登, 東口 武史, 仲田 真大, 鈴木 史典, 大塚 崇光, 千徳 靖彦, 兒玉 了祐, 「瞬時電離によるテラヘルツ波の周波数上昇」, 2010 年秋季 第 71 回応用物理学会学術講演会, 16p-F-10, 長崎大学文教キャンパス (長崎県長崎市) (2010.9.16).
- [4] 東口 武史, 柏崎 宏明, 大塚 崇光, 宮澤 準, 大場 貴文, 鈴木 光騎, 湯上 登, 千徳 靖彦, 兒玉 了祐, 「超短パルスレーザー誘起放電大気プラズマからのテラヘルツ放射特性」, 2010 年秋季 第 71 回応用物理学会学術講演会, 16p-F-11, 長崎大学文教キャンパス (長崎県長崎市) (2010.9.16).
- [5] 湯上 登 (招待講演), 「ガスターゲットと高強度レーザーとの相互作用によるテラヘルツ放射」, 第 57 回応用物理学関係連合講演会, シンポジウム「レーザー駆動単色量子ビーム発生物理とその応用のフロンティア」, 18a-W-7, 東海大学 湘南キャンパス (神奈川県平塚市) (2010.3.18).
- [6] Noboru Yugami, Takeshi Higashiguchi, Makoto Nakagawa, and Ryosuke Kodama, "Possibility of high power THz radiation via electromagnetically induced transparency at ion acoustic frequency region in laser-produced dense plasmas", SPIE Europe, 7359-36 (invited), Prague Congress Centre (Prague Czech Republic) (2009.4.23)

[その他]

ホームページ等

<http://www.ee.utsunomiya-u.ac.jp/~photonics/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

湯上 登 (YUGAMI NOBORU)

宇都宮大学・工学研究科・教授

研究者番号：60220521

### (2) 研究分担者

東口 武史 (HIGASHIGUCHI TAKESHI)

宇都宮大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80336289

(H 2 1 年度まで分担者として参画)

萩行 正憲 (HANGYO MASANORI)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：10144429

(H 2 0 年度まで分担者として参画)