

レーザー生成プラズマからのテラヘルツ波発生

湯上 登

宇都宮大学大学院工学研究科先端光工学専攻

高強度超短パルスレーザーをガス中に集光することによりプラズマが生成され、そこから電磁波が発生する。発生する電磁波の周波数はテラヘルツ領域であり、放射方向はレーザー伝搬方向を0度としたとき、ある特定の角度をもって発生し(集光点を頂点とするコーン状放射)、高周波の発生角度は小さく、低周波では大きくなることを特徴としている。

レーザーパルスのポンデロモティブ力によってレーザー後方に誘起される電子プラズマ波はレーザー航跡場と呼ばれ、それに伴う振動電流が電磁波放射源である。レーザー航跡場の周波数はプラズマ周波数に等しく、結果的に電磁波の放射周波数はプラズマ周波数に等しい。生成されるプラズマは、空間的にガウシアン型のレーザーにより生成されるので径方向に密度分布を持つプラズマである。径方向に密度分布を持つプラズマから放射される電磁波は、電子密度の変化の目安となる特性長 L と skin depth $\sigma=c/\omega_p$ が $\sigma \gg L$ となるため、プラズマ中の空間的減衰から逃れプラズマ外部へ伝搬することが可能である。ここで、 ω_p はプラズマ周波数である。また、密度勾配が大きいほど特性長 L は小さくなるので、レーザー生成プラズマからの放射電磁波は空間強度分布を持つレーザー電離による径方向の急峻な密度勾配が重要である。放射周波数は径方向のプラズマ密度で決定されるので、最大プラズマ周波数よりも低い周波数の電磁波が放射される。航跡場中での振動はレーザー伝搬方向の振動であるので、発生する電磁波の放射方向は径方向であるが、航跡場には径方向の成分も持つため、電磁波の発生方向もそれに伴い変化する。

プラズマからの電磁波解析に2次元粒子シミュレーションを用いる。強度 2.7×10^{16} W/cm²、パルス幅 120 fs、波長 800 nm、集光径 40 μ m、z 偏光を持つガウシアンレーザーが x 方向に伝搬している。N₂ ガスを使用し、最大プラズマ周波数は 8.2 THz である。

Fig.1 (a) にプラズマ周波数 (solid line) 及び y 方向の密度勾配の大きさ (dotted line) の y 方向プロファイルを示す。横軸は y 方向の位置を示し、縦軸は左側がプラズマ周波数 (THz)、右側は電子密度勾配の大きさを示す。レーザーは径方向に空間強度分布を持つため、プラズマ周波数は径方向に対して密度分布を持つ。また障壁抑制電離に従い N₂ ガスは最大 4 価まで電離する。径方向の価数の変化する位置では密度変化が生じ、急峻な密度勾配が 4 箇所形成される。また、急峻な電子密度勾配の位置に対応するプラズマ周波数はそれぞれ 1.8, 4.7, 6.6, 7.8 THz である。

Fig.1 (b) に集光点から半径 200 μ m、角度 20° の N₂ ガス中で観測した放射電磁波 cB_z の周波数スペクトルを示す。横軸は周波数 (THz) を示し、縦軸は振幅スペクトル (V/m) を示す。放射電磁波の放射周波数は最大プラズマ周波数 8.2 THz よりも低い 4 つのピークを持ち、ピーク周波数はそれぞれ 2.2, 5.0, 6.4, 7.9 THz である。これらのピーク周波数は Fig.1 (a) の急峻な密度勾配の位置でのプラズマ周波数に対応している。

Fig. 2 に放射電磁波の周波数スペクトルの角度分布

を示す。1 THz 近傍の電磁波が 5~15° の方向に放射され、それより高い周波数である 1.8 THz 近傍の電磁波は、5~10° の方向、さらに高周波である 2.2 THz 近傍では 3~7° と、高周波になるに従い、放射方向がレーザー伝搬軸に近づくという、実験結果に従う結果となっている。

シミュレーション結果は、実験で得られている結果を説明できる結果であった。今後は実験で計測可能な 1 THz 以下の低周波領域での放射特性の解析を行う予定である。

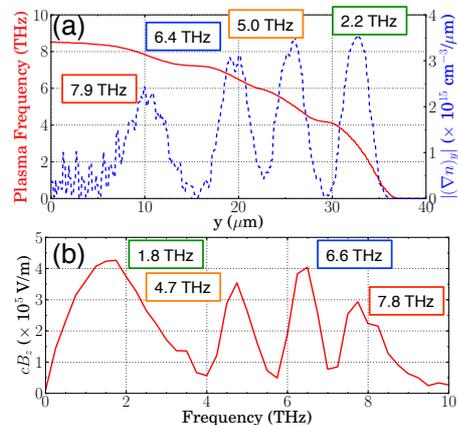


Fig.1 : Relationship between the plasma frequency at a steep density gradient and radiation frequency.

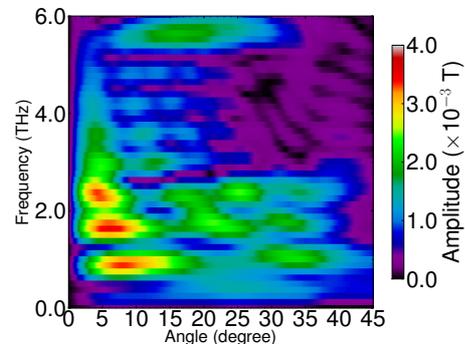


Fig.2 : Contour plot of radiation spectral intensity as a function of angle and frequency.