

## 飞秒等离子体间非线性作用对超高频电磁波影响的研究

赵 骥<sup>1</sup>, 杜晓琳, 聂秀丽<sup>1</sup>, 焦 美<sup>1</sup>, 李 燕<sup>1</sup>, 张亮亮<sup>2</sup>, 张存林<sup>2</sup>

- (1. 中国北方车辆研究所, 北京 100072;
2. 首都师范大学物理系, 北京 100048)

**摘 要:** 主要研究了飞秒等离子体间相互的非线性作用对超高频电磁波——太赫兹波产生的影响。国内外许多研究机构已经证实, 在太赫兹波产生的过程中, 等离子体间的相互非线性作用会对太赫兹波产生影响。笔者结合理论分析设计并搭建一种了双束等离子体重合产生太赫兹波的测试系统, 研究发现等离子体间相互非线性作用时, 会产生三阶非线性光学效应, 等离子体的折射率和相位发生变化形成非均匀场导致了太赫兹波辐射能量的降低, 并在实验测量研究中发现随着等离子体波长双束等离子体波长的增加, 等离子体密度增加, 导致太赫兹波的辐射能量的降低现象更加明显, 另外, 等离子体功率越大, 太赫兹波吸收越大。同时, 研究发现等离子体周围惰性气体分子质量影响太赫兹降低程度, 气体分子质量决定着飞秒激光聚焦空气电离出的等离子体所形成的电场强度, 分子质量越高, 所形成的电场强度越强, 双束等离子体重合时对太赫兹波降低的辐值越大。这些为研究等离子体间非线性作用对太赫兹波的影响提供了更加全面的理论支撑, 有助于推动太赫兹波技术在军事及民用领域的快速发展。

**关键词:** 太赫兹; 等离子体; 非线性作用

**中图分类号:** TN241      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20210108

## Influence of nonlinear interaction between femtosecond plasmas on ultra-high frequency electromagnetic waves

Zhao Ji<sup>1</sup>, Du Xiaolin, Nie Xiuli<sup>1</sup>, Jiao Mei<sup>1</sup>, Li Yan<sup>1</sup>, Zhang Liangliang<sup>2</sup>, Zhang Cunlin<sup>2</sup>

(1. China North Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China;

2. Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** The influence of the nonlinear interaction between femtosecond plasmas on the ultra-high frequency electromagnetic wave—terahertz (THz) wave was mainly studied in this paper. Many research institutions had confirmed that in the process of generating THz wave, the interaction between plasmas would affect THz wave. Combined theoretical analysis, a test system for generating THz wave due to the coincidence of two-beam plasmas was designed by the author. The study found that the nonlinear interaction between plasmas will produce a third-order nonlinear optical effect. The refractive index and phase of the plasma changed to form a non-uniform field, which led to a decrease in the radiant energy of the THz wave. In the experimental measurement research, it was found that with the increase of the plasma wavelength of the double beam plasma wavelength, the plasma density increased, resulting in a more obvious decrease in the radiation energy of the THz wave. In addition, the greater the plasma power, the greater the absorption of THz wave. At the same time, it was found that the mass of

收稿日期: 2021-01-26; 修订日期: 2021-03-29

基金项目: 国家自然科学基金 (11374007)

作者简介: 赵骥, 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为微波技术及电磁兼容技术。

inert gas molecules around the plasma affected terahertz reduction degree. The mass of gas molecules determined the intensity of the electric field formed by the plasma ionized by the femtosecond laser focusing on the air. The higher the molecular mass, the stronger the intensity of the electric field formed, and the greater the magnitude of the THz wave reduced when the two-beam plasma overlapped. The study provides more comprehensive theoretical support for influence of the nonlinear interaction between plasmas on the THz wave, which helps to promote the rapid development of THz wave technology in the military and civilian fields.

**Key words:** terahertz; plasma; nonlinear effect

## 0 引言

太赫兹辐射在电磁频谱中介于红外和微波之间,兼具二者的一些性质。太赫兹波最早的应用研究是在天文方面。使用太赫兹波可以对星系辐射、宇宙尘埃、气体星云波辐射等进行观测和分析。在安检中,由于太赫兹波可以穿透干燥、非金属和非极性物质,且由于太赫兹波的频谱宽度可以达到 10 THz 以上,基本覆盖了绝大多数物体的特征吸收峰,太赫兹波可以准确地探测出未知生物物体。太赫兹波辐射源是太赫兹波技术发展的关键环节,开发大功率、高效率的太赫兹波辐射源对太赫兹波的应用有着非常重要的价值<sup>[1-3]</sup>。太赫兹波的产生方法有很多种,其中光学方法产生太赫兹波已成为越来越多研究机构探索的方向<sup>[4-5]</sup>。在空气等离子体产生太赫兹波的过程中,将高强度激光脉冲聚焦到气体中,在焦点处形成的等离子体即可在有质动力的作用下向外辐射太赫兹脉冲。带电粒子在非均匀振荡的电场中所受到的非线性力为有质动力。由于自由电子和离子的巨大质量差异,这种力把它们分开,从而使得有质动力驱动的电场在远场辐射电磁波,而这种产生的等离子体又很可能会影响太赫兹辐射产生本身<sup>[6-8]</sup>。飞秒激光产生的等离子体击穿空气,通过四波混频产生太赫兹波,其中,等离子体是太赫兹产生的关键因素,由于等离子体间复杂的非线性作用,等离子体间的相互作用对太赫兹波产生会产生很大影响。研究等离子体间非线性作用对太赫兹的影响,有助于对太赫兹源的产生进行理论支撑。

文中利用飞秒激光器搭建了一种双束等离子体重合产生太赫兹波测试系统,通过研究发现等离子体间相互非线性作用时,会产生三阶非线性光学效应,使得等离子体的折射率和相位发生变化,从而使太赫

兹波辐射能量降低,并在实验测量研究中发现等离子体间非线性相互作用对周围惰性气体环境、双束等离子体波长十分敏感,是影响太赫兹波吸收程度的主要因素,这些为研究等离子体间非线性作用对太赫兹波的影响提供了更加全面的理论支撑。

## 1 双束等离子体产生太赫兹波测量系统

为了研究等离子体间非线性作用对太赫兹的影响,笔者设计了一套双束等离子体产生太赫兹波测量系统,如图 1 所示。利用钛蓝宝石飞秒激光器 Spifire-pro (Spectra-Physics Hurricane) 产生中心波长为 800 nm、重复频率为 1 000 Hz、脉宽为 50 fs 的入射激光,激光的空间分布为高斯分布。入射激光通过一个 50/50 的分光镜分成两束光,一束光通过一个加载在高精度移动平移台上的反射镜进行反射,移动平移台可以改变反射镜到分光镜的距离,然后通过焦距为 400 mm 的透镜聚焦在空气中形成等离子体光丝,该光路称为控制光路 ( $I_c$ );另一束光通过一个固定的反射镜反射,通过焦距同样为 400 mm 的透镜聚焦在空

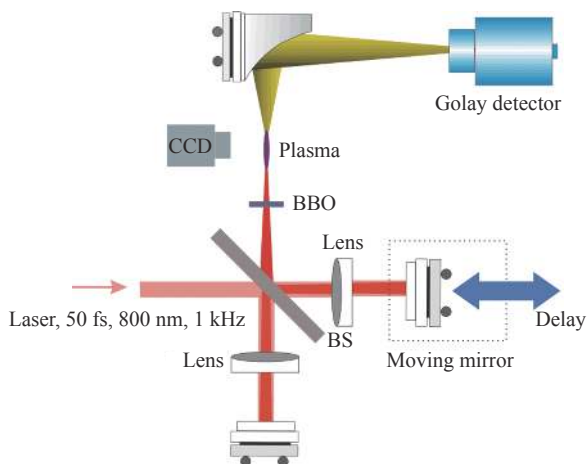


图 1 双束等离子体产生太赫兹波测量系统

Fig. 1 THz wave measurement system generated by double beam plasma

气中形成等离子体光丝,该光路称为信号光路 ( $I_s$ ),  $I_c$  光路和  $I_s$  光路中分别产生的等离子体光丝可以通过控制  $I_c$  光路的高精度移动平移台 (M-ILS100LM) 达到控制产生等离子体光丝的相对位置的目的。另外,在两束等离子体光丝聚焦之前,笔者加载了一个 BBO 晶体,用于倍频产生二次谐波。通过四波混频产生太赫兹波,产生得到的太赫兹波通过一个抛物面镜聚焦到高莱探测器 (Microtech SN: 220712-D) 中进行太赫兹波信号探测。在系统中,可以通过一个 CCD 相机观察等双束离子体丝的移动变化情况。

在双束等离子体产生太赫兹波的测量系统中,两束相同功率的飞秒激光通过焦距相同的透镜以及同一个 BBO 晶体聚焦在空气中形成双束等离子体,并通过四波混频产生太赫兹波。利用 CCD 相机可以观察到两束等离子体丝的运动情况,如图 2 所示,  $I_s$  光路产生的 Plasma 1 固定不变,  $I_c$  光路通过精密移动平移台控制 Plasma 2,使得两束等离子体丝经过分离—重合—分离过程。笔者观察了在此过程中产生的太赫兹波辐射强度的变化。

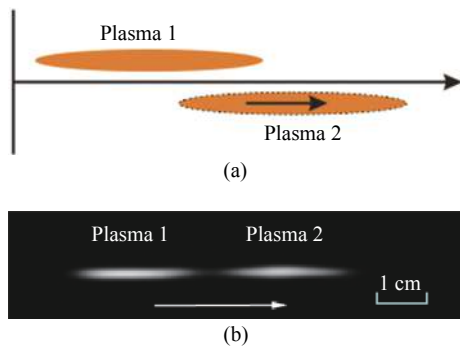


图 2 (a) 两束等离子体丝相对位置的示意图; (b) 实验过程中的双束等离子体丝 (利用 CCD 相机得到的图形)

Fig.2 (a) Schematic diagram of the relative position of the two plasma filaments; (b) Two plasma filaments during the experiment (graphics obtained by CCD camera)

笔者在双束等离子体产生太赫兹波的测量系统中发现,当两束等离子体重合时,利用高莱探测器得到的太赫兹波辐射强度时,发现太赫兹强度在 3.5 ps 时间内突然降低到原来的 1/3 左右,然后再次迅速恢复原来强度,如图 3 所示。笔者认为这种现象可能是由于双束等离子体间的非线性效应对太赫兹波强度产生了影响。

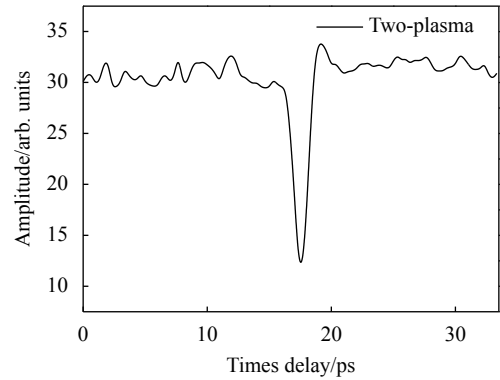


图 3 双束等离子体重合时太赫兹波辐射降低

Fig.3 THz wave radiation decreases when the double beam plasma coincides

## 2 双束等离子体间的非线性作用机理分析

当两束激光同时聚焦形成等离子体时,会产生三阶非线性光学效应,由洛伦兹力产生的非线性相互作用以及等离子体密度的急剧上升,导致了等离子体在轴方向上的散焦现象,这种现象引起等离子体的折射率和相位发生变化<sup>[9]</sup>:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{\text{plasma}} - \Delta\varphi_{\text{air}} \quad (1)$$

$$\Delta\varphi_{\text{air}} \approx 0 \quad (2)$$

这种引起的折射率的变化导致在等离子体的电子密度逐渐减弱的地方,形成一个对太赫兹吸收的非均匀场,在非均匀场中,电子在有质动力的作用下进行加速运动,在有质动力作用下,等离子体中的带电粒子进行无规则的运动,互相发生碰撞,等离子体粒子间相互碰撞形成不规则的简谐运动,使得部分粒子从低能级状态跃迁到高能级状态,此时,为了向跃迁能级提供所需要的能量,等离子体对太赫兹波能量进行吸收,使得太赫兹波辐射强度降低。在能级跃迁中,能级跃迁几率 ( $A_{i-f}$ ) 决定着等离子体对太赫兹波吸收的幅度大小:

$$A_{i-f} = \frac{2\pi}{2j_i + 1} \sum_{M_i} \sum_{M_f} (M_{if})^2 \quad (3)$$

式中:  $j_i$  为激发态能量;  $M_{if}$  为 激发态 (i) 向高能级态 (f) 跃迁所需要的能量。等离子体间非线性相互作用是导致太赫兹波幅度降低的主要因素,此时等离子体对太赫兹波的反射和散射作用十分微弱,可以忽略不计,待等离子体密度恢复原有密度时,这种散焦现象迅速消失,太赫兹能量恢复初始状态<sup>[10-11]</sup>。

### 3 等离子体波长对非线性作用影响

为进一步探究双束等离子体间的非线性作用,笔者研究了激发等离子体的激光波长对非线性作用影响,将理论和实验相结合研究了长波长下等离子体对太赫兹波的吸收状况,将光学参量放大器(TOPAS)放置在其中一路光束中,改变 Prelasma 光路的波长,以此研究等离子体在不同波长下太赫兹波的吸收作用。研究中,将  $I_s$  光路产生的 Plasma 1 等离子体(800 nm 波长)固定泵浦光功率为 330 mW。对于  $I_c$  光路产生的 Plasma 2 等离子体波长为 1 200~1 600 nm 的泵浦光,并且改变调制光功率,从 200~800 mW,间隔 100 mW。用高莱探测器测得了不同调制光功率下的双色场产生的太赫兹强度,并且计算出太赫兹吸收强度。得到了不同泵浦波长下,太赫兹吸收强度随 800 nm 等离子体功率的变化,如图 4(a)所示。之后将

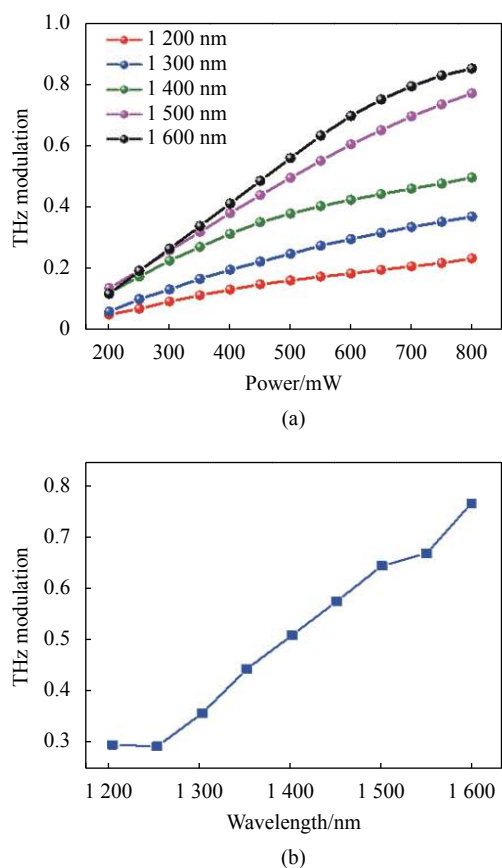


图 4 (a) 不同等离子体波长,太赫兹波吸收随 800 nm 等离子体功率的变化; (b) 太赫兹波吸收随等离子体波长的变化

Fig.4 (a) THz wave absorption varies with the plasma power at 800 nm for different plasma wavelengths; (b) THz wave absorption varies with the plasma wavelength

$I_c$  光路等离子体功率固定在 900 mW。记录了太赫兹波吸收强度,如图 4(b) 所示。从图中可以看出对于同一激发波长,等离子体功率越大,太赫兹波吸收越大。在相同的激光功率下,等离子体波长越长,太赫兹吸收越大。

笔者认为产生这种现象是由于等离子体波长使等离子体密度发生了改变,从而导致电子碰撞更加激烈,使得部分粒子从低能级状态跃迁到高能级状态时,等离子体对太赫兹波能量吸收更加明显。在双色光场产生太赫兹波辐射中,等离子体波长的相位差导致非线性作用逐渐增强,不同的等离子体波长导致的非线性效应也不同,这种非线性效应下的光电流模型可以表示为:

$$\frac{\partial J_x}{\partial t} + \frac{J_x}{\tau_c} = \frac{e^2}{m_e} N_e E_x - \frac{e}{m_e} \frac{J_z}{c} E_x \quad (4)$$

$$\frac{\partial J_x}{\partial t} + \frac{J_x}{\tau_c} = \frac{e^2}{m_e} \frac{J_z}{c} E_x \quad (5)$$

式中:  $e$ 、 $m_e$ 、 $N_e$  分别为电子电荷、电子质量和电子密度;  $\tau_c$  为碰撞时间;  $E_x$  为双色激光电场强度;  $J_x$  和  $J_y$  分别为电子电流密在脉冲传播方向上的水平部分和垂直部分。这种模型源于电子的动力学耦合的连续性方程。公式 (4) 和公式 (5) 等号右边的两项式包含了洛伦兹力和激光脉冲电场。假设脉冲电场强度  $E$  沿着  $x$  轴方向是线偏振的,电子的等离子体密度  $N_e$  是由光场电离产生的,这个过程涉及由中性原子(A)和分子(M)电离产生的电子密度  $N_{A,M}(r,z,t)$ <sup>[12]</sup>:

$$\frac{\partial N_{A,M}}{\partial t} = -W(|E|)N_{A,M} \quad (6)$$

由电荷守恒定律可知,电子密度  $N_{A,M}(r,z,t)$  为:

$$N_{A,M}(r,z,t) = N_0 - N_{A,M}(r,z,t) \quad (7)$$

这里,  $N_0$  表示激光脉冲到来前的中性原子或分子的电子密度。独立场电离率符合 Keldysh 公式。在这个模型中,有效的多光子隧穿机制包含依赖于多光子电离的波长参数。设  $z$  轴方向的二次谐波的偏振态平行于基频波的偏振态,双色光形成的电场可以写为:

$$E_x = E_\omega + E_{2\omega} \quad (8)$$

那么,泵浦光电流密度可以表示为:

$$J_x \propto \frac{e^2}{\omega m_e} N_e E_x \quad (9)$$

在隧穿电离中,横向电流正比于泵浦光波长。所以随着等离子体波长的增加,等离子体密度增加,导致电子碰撞更加激烈,太赫兹波的降低更加明显。

基于上述理论分析,图 5(a) 给出了在不同等离子体波长下,太赫兹吸收强度随 800 nm 等离子体功率的变化模拟结果。图 5(b) 中的红线为计算得出的太赫兹波吸收强度随泵浦激光波长的变化结果,蓝点为实验数据。基频波与二次谐波之间固定的  $\pi/2$  相位差,330 mW 的泵浦光功率,5% 的二次谐波倍频转换效率和 900 mW 的等离子体脉冲功率。从图中可以看出,计算出的太赫兹波吸收强度随等离子体功率的增加而增加,太赫兹波的吸收强度随激光波长的增加而增加,模拟结果与实验结果拟合良好。从图 5(a) 还

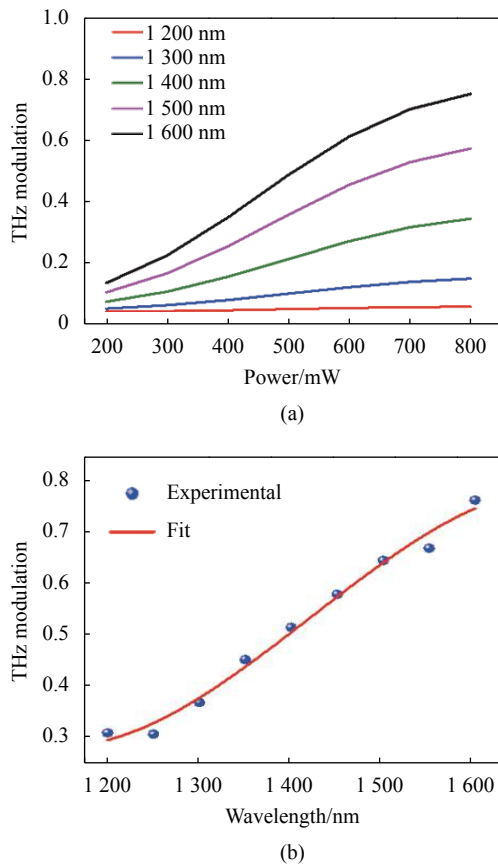


图 5 (a) 计算得出的太赫兹吸收强度与 800 nm 等离子体功率的函数关系; (b) 太赫兹波吸收强度随等离子体波长变化的模拟结果与实验结果对比

Fig.5 (a) Calculated terahertz absorption intensity as a function of the 800 nm plasma power; (b) Comparison between the simulated and experimental results of the terahertz absorption intensity as a function of plasma wavelength

可以看出:随着调制光功率的逐渐增加,太赫兹波调制深度增加的速度变慢,趋于饱和。这种饱和可以理解为在双色脉冲到达之前,空气中等离子体被 800 nm 的光脉冲完全电离。

#### 4 气体环境对等离子体非线性的特性

在双束等离子体间的非线性过程中,当两束等离子体光丝处于分离—重合—分离的过程中,周围不同气体环境会对等离子体的非线性作用产生影响,从而使得等离子体对太赫兹波能量的吸收发生变化。Jayashis Das 的研究团队在氮气  $N_2$  的实验环境下进行了相关研究认为,在双束等离子体重合时,含有  $N_2^+$  的离子首先和氮气  $N_2$  发生结合形成  $N_4^+$  粒子,然后再和电子  $e$  在氮气环境下快速地重组产生新的氮气  $N_2$ ,进而导致了等离子体电离的电子数量急剧下降,以此导致产生的太赫兹波辐射能量发生明显的降低<sup>[13]</sup>:

$$N_2^+ + N_2 = N_4^+ \quad (10)$$

$$N_4^+ + e = N_2(C^3\Pi_u) + N_2 \quad (11)$$

这里  $C^3\Pi_u$  表示氮气状态,其弛豫时间影响电子  $e$  与  $N_4^+$  相结合的概率。

但是通过研究发现,笔者认为等离子体吸收和周围气体中 N 离子的关系不大,为了验证分析,在双束等离子体产生太赫兹波辐射系统中将双色等离子体放置进一个气室,通过气阀和真空泵改变气室内的气体 (Ar 和氮气  $N_2$ ) 环境,结果表明,在氮气和氩气环境下,当两束等离子体丝重合时,太赫兹波辐射能量分别降低了 2.72 倍和 2.82 倍。在氮气和氩气环境下均可以观察到太赫兹波辐射能量的降低,表明 Jayashis Das 等人认为的电子  $e$  与  $N_4^+$  快速重组的过程并不是太赫兹波辐射能量降低的真正原因。

为了进一步研究该现象,测量了 4 种气体环境下双束等离子体产生的太赫兹波辐射的强度。图 6 为在氦气 (He)、氖气 (Ne)、氮气 ( $N_2$ ) 和氩气 (Ar) 下所测量的太赫兹波能量降低的幅值。结果表明,在氩气环境下太赫兹波降低的幅值最大,在氮气环境下太赫兹波降低的幅值最小。这是由于分子动力学理论中:

$$\frac{d\vec{v}(t)}{dt} + \frac{\vec{v}(t)}{\tau} = -\frac{e}{m}\vec{E}_{Loc}(t) \quad (12)$$

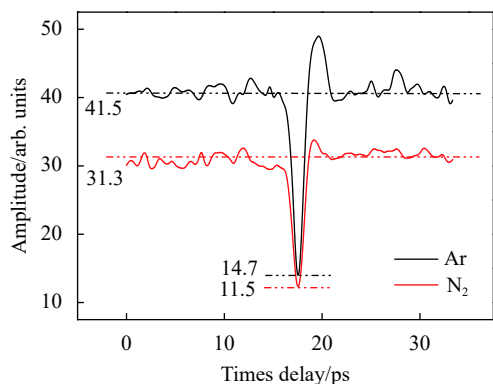


图 6 不同气体环境下得到的太赫兹波辐射强度变化 (黑色实线为在氩气环境得到的结果, 红色实线为在氮气环境下得到的实验结果)

Fig.6 THz wave radiation intensity changes obtained in different gas environments (the black solid line is the result obtained in an argon atmosphere, and the red solid line is the experimental result obtained in a nitrogen environment)

式中:  $v(t)$  为分子速度;  $m$  为分子质量。从公式可以看出, 气体分子质量决定着飞秒激光聚焦空气电离出的等离子体所形成的电场强度, 分子质量越高, 所形成的电场强度越强, 双束等离子体重合时对太赫兹波降低的辐值越大。图 7 为不同气体环境下太赫兹波降低的辐值。

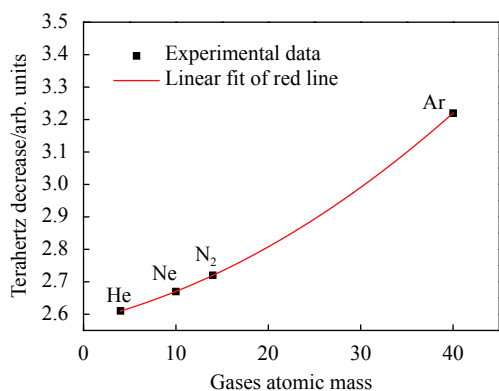


图 7 不同气体环境下太赫兹波降低的辐值

Fig.7 Reduced amplitude of THz waves in different gas environments

## 5 结束语

文中通过设计构建双束等离子体重合产生太赫兹波测试系统, 通过研究发现, 当两束等离子体重合时, 太赫兹波辐射强度会发生明显的降低, 从理论上分析了等离子体间相互非线性作用引起的等离子体

的折射率和相位的变化, 是导致了太赫兹波辐射能量降低的主要原因。而且, 研究发现等离子体波长可以影响太赫兹辐射能量降低, 随着等离子体波长双束等离子体波长的增加, 等离子体密度增加, 导致太赫兹波的辐射能量的降低现象更加明显。另外, 双束等离子体能量大小对等离子体非线性影响也十分敏感, 当等离子体能量增大时, 电子碰撞更加激烈, 使得等离子体的折射率增加, 导致太赫兹波的降低更加明显。同时, 在影响等离子体非线性因素的特性研究中发现, 等离子体间非线性相互作用同周围惰性气体的原子质量密切相关, 气体原子质量越大, 双束等离子体重合时太赫兹波降低的辐值越大。等离子体吸收太赫兹波的研究为太赫兹波雷达探测、等离子体隐身等技术提供了技术及理论支持, 有助于推动太赫兹波技术在军事及民用领域的发展。

## 参考文献:

- [1] Fu P, Hu S, Xiang J, et al. FTIR study of pyrolysis products evolving from typical agricultural residues [J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2010, 88(2): 117-123.
- [2] Cui Shanshan, Li Qi. De-noising research on terahertz digital holography based on wavelet transform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(6): 1836-1840. (in Chinese)
- [3] Xie Qi, Yang Hongru, Li Hongguang, et al. Explosive identification based on terahertz time-domain spectral system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 2392-2399. (in Chinese)
- [4] E Yiwen, Huang Yuanyuan, Xu Xinlong, et al. Polarization sensitive terahertz measurements and applications [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2017, 10(1): 98-113. (in Chinese)
- [5] Ito H, Ishibashi T. Photonic terahertz-wave generation using slot-antenna-integrated uni-traveling-carrier photodiodes [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(4): 1-7.
- [6] Zhang L, Chen Z, Zhang R, et al. Direct observation of charge injection of graphene in the graphene/WSe<sub>2</sub> heterostructure by optical-pump terahertz-probe spectroscopy [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(50): 47501-47506.
- [7] Wang Q, Li X, Chang T, et al. Nondestructive imaging of hidden defects in aircraft sandwich composites using terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2019, 97: 326-340.

- [8] Feng Shijia, Dong Liquan, Wu Tong, et al. Terahertz wave emission from water lines [J]. *Chinese Optics Letters*, 2020, 18(2): 023202.
- [9] Rosenbluth M N, Liu C S. Excitation of plasma waves by two laser beams [J]. *Physical Review Letters*, 1972, 29: 701-705.
- [10] Wang Y, Tang L, Xu D, et al. Energy scaling and extended tunability of terahertz wave parametric oscillator with MgO-doped near-stoichiometric LiNbO<sub>3</sub> crystal [J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 8926-8936.
- [11] Schlessinger L, Wright J. Inverse bremsstrahlung absorption rate in an intense laser field [J]. *Physical Review A*, 1978, 20(5): 1934-1945.
- [12] Wang T J, Chen Y, Marceau C, et al. High energy terahertz emission from two-color laser-induced filamentation in air with pump pulse duration control [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 131108.
- [13] Das J, Yamaguchi M. Terahertz wave excitation from preexisting air plasma [J]. *JOSA B*, 2013, 30(6): 1595-1600.