

文章编号: 1002-1582(2026)02-0199-04

双色场的相对相位对等离子体辐射 太赫兹波频谱特性的影响

赵泽华, 孙文峰*, 王新柯, 冯胜飞, 叶佳声, 韩鹏, 何泽浩, 张岩
(超材料与器件北京市重点实验室, 首都师范大学 物理系, 北京 10048)

摘 要: 双色飞秒激光脉冲驱动空气等离子体的太赫兹波辐射因其高辐射效率、超宽带及高损伤阈值等优势, 成为产生太赫兹波的重要手段之一。双色场中基频光与二次谐波之间的相对相位对辐射太赫兹波性能具有重要作用。通过改变倍频晶体与几何焦点之间的距离, 研究了基频光与倍频光之间的相对相位对辐射太赫兹波峰值频率的影响。实验结果表明, 太赫兹波峰值频率随倍频晶体与几何焦点之间的距离呈周期性变化规律, 在实验测量范围内其值在0.85~1.29THz区间内变化。基于光电流模型和ADK电离理论, 对相对相位与太赫兹辐射峰值频率之间的关系进行了分析, 理论模拟与实验结果符合较好。研究结果为构建无需额外相位补偿器的可调谐太赫兹源提供了新的技术途径。

关 键 词: 双色激光; 空气等离子体; 太赫兹辐射; 相对相位

中图分类号: O433; O437; O536; TN29

文献标识码: A

Effect of relative phase of two-color femtosecond pulses on terahertz spectral characteristics driven by plasma

ZHAO Zehua, SUN Wenfeng*, WANG Xinke, FENG Shengfei,
YE Jiasheng, HAN Peng, HE Zehao, ZHANG Yan

(Beijing Key Laboratory of Metamaterials and Devices, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 10048, China)

Abstract: Terahertz wave radiation driven by two-color femtosecond laser pulses in air plasmas has become one of the important ways for generating THz waves, owing to its high radiation efficiency, ultra-broadband characteristics, and high damage threshold. The relative phase between the fundamental and second-harmonic components of the two-color field plays a critical role in determining the performance of the emitted THz radiation. By adjusting the distance between the second-harmonic generation crystal and the geometric focus, this work investigates how the relative phase between the fundamental and second-harmonic lights influences the peak frequency of the emitted terahertz wave. Experimental results show that the peak frequency of the THz wave varies periodically with the distance between the second harmonic generation crystal and the geometric focus, ranging from 0.85 to 1.29 THz within the experimental measurement range. Based on the photo-current model and ADK ionization theory, the relationship between the relative phase and the peak frequency of THz radiation was analyzed. The theoretical simulation and experimental results are in good agreement. These findings provide a new technical approach for the development of tunable THz sources without the need for additional phase compensators.

Keywords: Two-color laser; air plasma; terahertz radiation; relative phase

收稿日期: 2025-12-19; 收到修改稿日期: 2025-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (62275175, 12574421); 北京市自然科学基金项目 (2252032)

作者简介: 赵泽华 (2000—), 男, 硕士研究生, 从事光学研究。18131484358@163.com

孙文峰 (1976—), 男, 副教授, 博士, 从事太赫兹光电子学研究。

* 通讯作者: wfsun@cnu.edu.cn

0 引 言

太赫兹 (Terahertz, THz) 辐射在光谱学、成像、生物检测和高速无线通信等领域具有重要应用价值^[1, 2], 其中, 高效率、宽带且可调谐的 THz 光源的研究备受重视。在众多的 THz 波产生机制中, 基于飞秒激光在气体中形成的等离子体源凭借其超宽带、耐高损伤阈值以及可在常温常压下工作的优势, 已成为近年来的研究重点^[3, 4]。利用基频与其二次谐波构成的双色飞秒激光场驱动等离子体产生 THz 辐射称为双色场等离子体辐射^[5, 6]。双色场通过在时域中引入非对称瞬态电离电流, 使得宽带 THz 辐射的产生效率得到提高, 成为 THz 波产生的重要手段^[5], 其辐射特性的调控主要依赖于双色场的相对相位、幅值比、偏振态以及空间形状等参数。在这些调控方式中, 基频光与二次谐波之间的相对相位是影响 THz 辐射性能的核心因素。已有研究表明, 相对相位决定双色电场的时域结构, 进而调制电离的瞬态过程以及非对称光电流的产生效率^[7]。在相关研究中, 基频光与二次谐波在空气中的传播会引入额外的相对相位变化, 该效应已在波长调谐和传播距离依赖的研究中得到验证^[8]。通过调节双色脉冲啁啾可以有效改变相对相位, 从而优化 THz 波产生效率^[9]。近年来, 研究人员通过交叉等离子体结构^[10]、外加电场或波形调控^[11]以及时空整形双色场^[12]等方式实现了 THz 波频谱调制, 但实验系统较为复杂。等离子体密度分布对 THz 波频谱具有显著影响^[13], 同时等离子体通道对低频 THz 波具有空间约束作用^[14]。从实际应用的角度来看, 实现高稳定性、连续可调且无需额外复杂光学器件的相位调节仍是一个重要挑战。研究人员发现, 通过调节硼酸钡晶体 (BBO) 与聚焦点之间的距离 (BBO-to-focus distance, BFD), 即可自然引入可控的相对相位变化, 从而引起 THz 波辐射特性的变化。

目前关于 BFD 对于 THz 波性能研究主要集中在 THz 辐射强度和谱宽^[7, 15], 然而对于 THz 波峰值频率与 BFD 关系的方面仍未见报道。由于 THz 波形与频谱对相对相位高度敏感, 相位差引起的双色场调制不仅影响瞬态电流的幅度, 也会显著改变其时间演化, 从而对 THz 波频谱结构产生影响。因此, 研究 BFD 对 THz 波峰值频率的影响, 不仅有助于加深对双色场电离机制的理解, 也为构建无需额外相位补偿器的可调谐 THz 源提供新的技术途径^[5, 16]。

1 实验结果

实验的系统装置示意图如图 1 所示。激光光源为中心波长 800nm、脉宽 50fs、重复频率 1kHz 的钛宝石放大器系统。波长 800nm 光束入射至可角度调节的 BBO 晶体, 通过二次谐波产生过程获得 400nm 光, 与 800nm 基频光构成共线双色脉冲。随后, 双色脉冲经 $f=125\text{mm}$ 透镜聚焦, 在空气中产生等离子体并辐射 THz 波。THz 辐射经离轴抛物面镜准直并聚焦至 ZnTe 晶体, 通过电光取样进行探测。探测光路中的机械延迟线用于太赫兹波的时域信号采样。因基频光与倍频光到达透镜的几何焦点处存在相位差, 所以 BFD 的变化会引起两者相对相位的变化。从而使双色光场产生时间非对称性。该非对称性进一步调制电离发生的时刻分布和电子加速, 导致瞬态光电流发生改变, 最终使太赫兹辐射的主振荡频率随 BFD 变化而变化, 改变 BFD 可周期性地调制双色相对相位。值得注意的是, 考虑到空气湿度对太赫兹波频谱的影响, 在实验中充入了干燥空气, 使实验环境中空气的湿度降至 10% 以下。

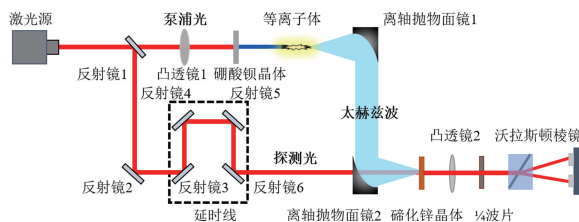


图 1 实验系统装置示意图

在实验中, 通过连续改变 BFD 的取值, 对不同 BFD 下产生的太赫兹时域信号进行了测量, BFD 的变化区间是 40~95mm, 间隔为 5mm。测得不同 BFD 条件下的太赫兹波时域信号, 如图 2 (a) 所示。从图中可以看到, 所有波形呈现出双极性特征, 主脉冲位置基本保持一致, 说明太赫兹辐射的产生位置和整体传播路径未发生明显变化。对太赫兹时域信号进行傅里叶变换, 频谱图如图 2 (b) 所示。为了更加直观的呈现峰值频率随 BFD 周期性变化的规律, 对不同 BFD 条件下的频谱按其最大值进行归一化处理。太赫兹辐射覆盖 0.1~3THz 的宽频范围, 其频谱形态受限于 ZnTe 晶体的探测带宽。在不同 BFD 下, 频谱整体形状相似, 但峰值频率的位置发生了明显漂移。为了更好的对比不同 BFD 下频谱图的峰值频率的差异, 将频谱强度分布各自归一化, 插图频谱峰值处放大图。可知 BFD 在 40~95mm 范围内, 出现在 0.85THz、1.02THz 和 1.29THz 三个稳定的峰值频率位置。在

0.85THz、1.02THz和1.29THz三个特殊位置往复出现,初步的分析认为可能是由电子密度的周期性变化所致,它由等离子体频率决定。为了更清楚地显示太赫兹峰值频率与BFD的关系,从图2(b)中抽取数据结果如图2(c)所示。图2(c)展示了不同BFD下太赫兹波信号幅值和峰值频率的变化曲线。可以发现,太赫兹峰值频率并非随BFD单调变化,而是在三个固定频率之间呈现周期性变化。这一结果表明,BFD的变化通过调制双色激光的相对相位,显著影响了等离子体瞬态电流的时间演化,从而导致太赫兹辐射频谱峰值位置的周期性变化。

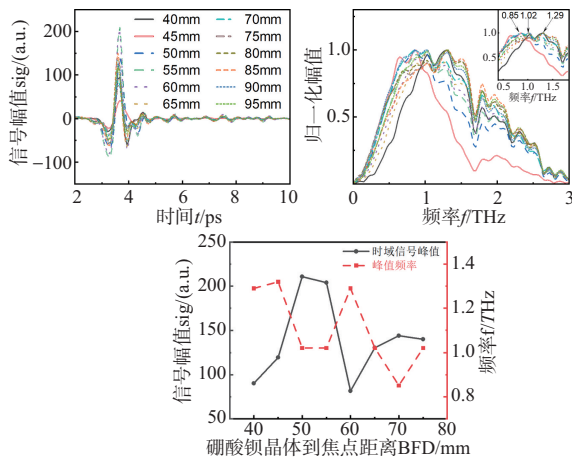


图2 不同BFD条件下的太赫兹时域信号图及对应频谱图

2 理论计算及讨论

双色等离子体THz辐射可通过瞬态光电离电流模型进行描述^[7],其波形和频谱特性与相位匹配条件密切相关^[17]。在双色激光场中,基频光与倍频光之间的相对相位为

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda_\omega} (n_\omega - n_{2\omega}) \cdot \text{BFD} \approx \frac{2\pi}{\lambda_\omega} \Delta n \cdot \text{BFD} \quad (1)$$

式中, $\Delta\phi$ 为相对相位; λ_ω 为基频光波长; n_ω 、 $n_{2\omega}$ 分别为基频光、倍频光折射率; Δn 为空气中基频光与二次谐波之间的折射率差。

THz辐射源于基频光(ω)与二次谐波(2ω)组合形成的双色飞秒激光场对空气分子的电离作用。双色电场可表示为

$$E(t) = E_\omega(t) \cos(\omega t) + E_{2\omega}(t) \cos(2\omega t + \Delta\phi) \quad (2)$$

式中, $E_\omega(t)$ 与 $E_{2\omega}(t)$ 为基频光与倍频光的包络函数。因ADK模型能够有效的描述强场条件下原子和分子随时间发生电离的过程,将上述的双色场代入ADK(Ammosov-Delone-Krainov)电离模型^[9],得到与时间相关的电离速率如下

$$W(t) \approx \left| E(t) \right|^{-1} \left(\frac{4\sqrt{2} I_p^{3/2}}{|E(t)|} \right)^{2Z/\sqrt{I_p}} \exp \left[-\frac{2\sqrt{2} I_p^{3/2}}{3|E(t)|} \right] \quad (3)$$

式中 $W(t)$ 为瞬时电离速率,单位为 s^{-1} ; $E(t)$ 为双色激光场的瞬时电场强度; I_p 表示空气分子的电离势; Z 为有效核电荷数。通过对电离速率的时间积分,可以求得电离后的空气等离子体的电子密度

$$N_e \approx N_0 \left[1 - \exp \left(- \int_{-\infty}^{+\infty} W(t) dt \right) \right] \quad (4)$$

式中, N_0 表示为中性气体的初始分子数密度, N_e 为等离子体电子密度,单位为 cm^{-3} 。由该式可得电子密度与相对相位差的对应关系。根据以上公式,选取相对相位差变化区间 $0 \sim 1.25\pi$,以 0.25π 为步长对不同双色相对相位条件下的激光场、电离速率以及电子密度演化过程进行了理论计算,计算结果如图3所示。图3(a)中从上到下依次展示了相对相位为0时,双色激光电场、对应的瞬时电离速率以及计算得到的电子密度随时间的演化结果。图3(b)、(c)的相对相位分别为 0.5π 、 0.75π 。其中,上部子图中蓝色曲线表示基频光(ω)的电场,红色曲线表示二次谐波(2ω)的电场。随着相对相位的改变,两者的叠加方式发生变化,使得总电场波形呈现出不同程度的时间非对称性。中部子图展示了由ADK模型计算得到的电离速率随时间的变化情况。从图中可以看到,电离速率主要集中在电场强度较大的时间区域,其峰值大小和持续时间对相对相位呈周期性相关。当双色场的非对称性增强时,电离速率峰值明显增大。下部子图为通过对电离速率进行时间积分得到的电子密度演化结果。结果表明,不同相对相位条件下电子密度的最终饱和值存在差异,并呈现出周期性变化趋势。

在空气等离子体中,THz波辐射主要来源于光场诱导的非对称瞬态电离电流。相对相位 $\Delta\phi$ 改变电场的时间对称性,从而影响电离速率与电子加速度,是调控THz波形与频谱结构的关键参数。由计算结果可知,电子密度在相对相位为 $0 \sim 1.25\pi$ 范围内周期性变化,与实验中观察到的太赫兹峰值调制规律一致。由此可以得出结论,双色激光相对相位通过调制电场的时间结构,改变了电离过程的瞬时性和累积效应,从而影响等离子体中的电子密度分布。

由电子密度进而可以得到等离子体频率

$$\omega_{pe} = \sqrt{e^2 n_e / (m_e \epsilon_0)} \quad (5)$$

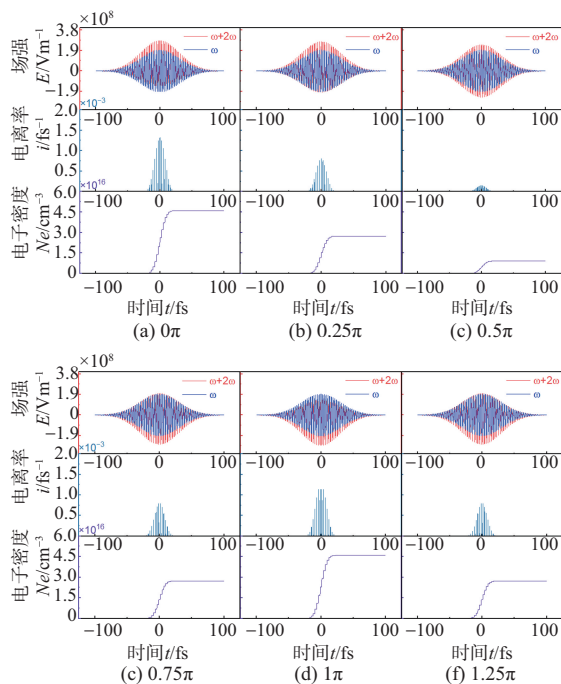


图3 不同相对相位双色场场强、电离率、
电子密度时间演化图

式中 ω_{pe} 为等离子体频率, n_e 为电子密度, m_e 为电子质量, e 为电子电荷, ϵ_0 为介电常数。等离子体对光电流的响应可用阻尼振荡模型进行描述, 其产生的太赫兹波的变化量可表示为^[18]

$$dE(t) = e^{-\nu t/2} \frac{\omega_{pe}^2}{\sqrt{\omega_{pe}^2 - \nu^2/4}} \sin\left(\sqrt{\omega_{pe}^2 - \nu^2/4} t\right) J(t) \quad (6)$$

式中, ν 为电子-中性粒子碰撞频率; $J(t)$ 是瞬态光电流, 在获得电流密度随相对相位变化关系的基础上, 将理论计算中的相位差转换为实验中可直接调节的参数BFD, 进一步分析 THz 波随 BFD 的变化规律, 并将其进行傅里叶变换, 便可得到 THz 峰值频率及幅值随 BFD 的变化曲线, 结果如图 4 所示。图 4 (a) 展示了峰值频率随 BFD 变化的计算结果, 其中曲线表示由计算得到的峰值频率。可以看到, 峰值频率随 BFD 呈现出稳定而规则的周期性变化现象, 变化周期约为 20mm。图 4 (a) 右上角的插图给出了更大 BFD 范围内的变化趋势。在该范围内, 峰值频率在 0.85~1.2THz 范围内变化, 理论计算得到的周期性变化与实验中太赫兹峰值频率和强度的变化趋势相符合。4 (b) 中实线为理论计算得到的太赫兹波峰值强度随 BFD 的变化曲线, BFD 的变化周期也为 20mm 左右。将实验中测得不同 BFD 下太赫兹波幅值 (如图 2 (c) 中点划线所示) 与之比较, 可知二者变化趋势及峰值出现位置符合较好。从图中可以发现, BFD 的周期性调制与太赫兹峰值幅度及峰值频率的周期变化密切相关。

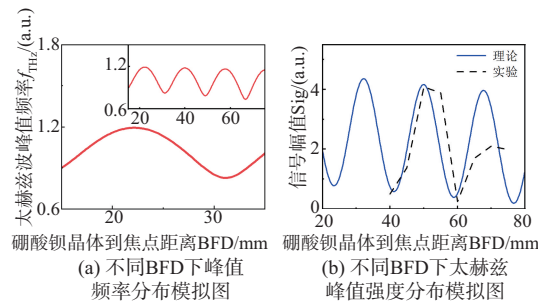


图4 等离子体频率及太赫兹强度
随BFD变化的理论计算结果图

3 结 论

本文系统研究了BBO 晶体到聚焦点距离变化对太赫兹辐射频谱特性的调制规律。实验结果表明, 随着BFD 的改变, 太赫兹时域波形及其频谱峰值位置呈现出显著的周期性变化。理论分析表明, BFD 的变化引起基频光与二次谐波光在传播过程中的相对相位变化, 从而影响瞬时光电流的非对称性及电子电离动力学过程。结合光电流模型与ADK 电离理论计算, 结果显示 THz 波峰值频率及幅度随相位呈现周期性演化。理论计算结果与实验观测在周期性变化趋势上相符合。上述研究表明, 通过调控双色激光相对相位可实现对太赫兹辐射频谱特性的有效调制, 为宽带太赫兹源的频谱调控与优化提供了物理机制与实验途径。

参考文献:

- [1] Sun W, Wang X, Zhang Y. Terahertz generation from laser-induced plasma[J]. Opto-Electronic Science, 2022, 1(8): 220003—1.
- [2] Zhang Z, Chen Y, Cui S, et al. Manipulation of polarizations for broadband terahertz waves emitted from laser plasma filaments[J]. Nature Photonics, 2018, 12(9): 554—559.
- [3] Zhao J, Zhu F, Han Y, et al. Light-guiding-light-based temporal integration of broadband terahertz pulses in air[J]. APL Photonics, 2023, 8(10): 106107.
- [4] Li H, Zhang Y, Sun W, et al. Contribution of the optical rectification in terahertz radiation driven by two-color laser induced plasma[J]. Optics Express, 2020, 28(4): 4810—4816.
- [5] Kress M, Löffler T, Eden S, et al. Terahertz-pulse generation by photoionization of air with laser pulses composed of both fundamental and second-harmonic waves[J]. Optics Letters, 2004, 29(10): 1120—1122.
- [6] Sørensen C, Guiramand L, Degert J, et al. Conical versus Gaussian terahertz emission from two-color laser-induced air plasma filaments[J]. Optics Letters, 2020, 45(7): 2132—2135.
- [7] You Y, Oh T, & Kim K. Off-axis phase-matched terahertz emission from two-color laser-induced plasma filaments[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(18): 183902.
- [8] Nguyen A, Kaltenecker K, Delagnes, et al. Wavelength scaling of terahertz pulse energies delivered by two-color air plasmas[J]. Optics Letters, 2019, 44(6): 1488—1491.

(下转第 210 页)