

文章编号: 1005-5630(2020)06-0054-05

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2020.06.009

激光拉丝形状对太赫兹能量空间分布影响的研究

徐博伟

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 为了明确太赫兹能量空间分布的影响因素, 研究了激光拉丝形状对太赫兹能量空间分布的影响。采用柱面透镜替代传统球面透镜聚焦激光的方法改变激光拉丝的形状, 产生一个片状的激光拉丝体, 并采集该片状激光拉丝产生的太赫兹能量空间分布。研究表明, 激光拉丝形状的改变不仅会引起太赫兹能量空间分布的改变, 而且还会引起泵浦光偏振方向改变时使太赫兹能量空间分布发生改变。

关键词: 太赫兹波; 能量空间分布; 柱面透镜; 片状拉丝

中图分类号: O 437 **文献标志码:** A

Research on the influence of the shape of the laser plasma on terahertz energy spatial distribution

XU Bowei

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to understand and explain the influence factors of terahertz energy spatial distribution from the physical mechanism, the influence of the shape of the laser plasma on terahertz energy spatial distribution was studied. By using a cylindrical lens instead of a spherical lens to focus laser, a plasma sheet is produced, and the terahertz energy spatial distribution generated by the plasma sheet is collected. The results show that the shape of the plasma itself not only directly affects the spatial distribution of terahertz energy, but also affects the influence of pump laser's polarization changing to the spatial distribution of terahertz energy.

Keywords: terahertz; spatial energy distribution; cylindrical lens; plasma sheet

收稿日期: 2020-05-11

作者简介: 徐博伟(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为超快激光产生太赫兹波。

E-mail: 172390308@st.usst.edu.cn

引 言

太赫兹技术因其具有较低的电离能、较高的穿透性、大信息承载能力以及更好的光谱分辨能力等特点^[1-2],而被广泛应用于医学生物检测^[3-4]、太赫兹通信^[5-6]、太赫兹波导^[7-8]等领域。目前,产生太赫兹的常用方法主要有光整流法^[9-10]、光电导天线法^[11-12]和空气拉丝法^[13-14]等。其中,空气拉丝法因其具有无介质损伤阈值要求、产生的太赫兹波频谱极宽、更易通过改变激光参数和拉丝环境来实现对太赫兹波的调控等优点,而成为研究的热点。目前,以激光拉丝产生太赫兹波的研究主要还是围绕提高产生能量、扩展频谱等展开,而对太赫兹的能量分布还处于前期摸索阶段。

空气拉丝产生的太赫兹波通常呈现圆锥形辐射,因此其能量的空间分布呈圆环状。科研人员 Zharova 等^[15]和 Suvorov 等^[16]提出,太赫兹能量整体呈圆环状分布,但是与泵浦光偏振垂直方向上的能量会略强一点,他们认为光偏振引起的热压会对太赫兹能量的空间分布产生重要的影响。围绕这一观点,科研人员在此后也进行了许多的研究,得到了一些十分有意义的结果^[15-16],但都只是针对热压对单色场条件下太赫兹能量空间分布的影响,即没有进一步探讨是否存在其他影响太赫兹能量空间分布的因素,也没有在能量空间分布的基础上进一步做其他相关方面的研究。

You 等^[17]在研究中发现,在双色场拉丝条件下,远场太赫兹能量在空间整体基本呈对称的圆环状分布。虽然不同频率分量的太赫兹在同一探测平面上能量空间分布的圆环大小不同(高频太赫兹波能量分布圆环直径小,低频太赫兹波能量分布圆环直径大),但是整体始终呈现为对称的圆环状分布。而如果在此条件下改变泵浦光的偏振,太赫兹能量的空间分布基本不产生变化。

在此基础上,本文提出一种观点,即除了泵浦光偏振之外,激光拉丝形状也是影响太赫兹能量空间分布的重要因素之一。为此,在双色场条件下,使用柱面透镜代替普通的球面透镜聚焦激光,产生了一个片状的激光拉丝体(plasma sheet)。通过实验发现,片状的拉丝体,其本身会使得超过 70% 的太赫兹能量被集中至垂直于片状拉丝

体的方向上。此外,如果进一步改变泵浦光的偏振,垂直于片状拉丝方向上的太赫兹能量还会产生一个大约 20% 左右的明显偏移。

1 实验原理

实验在双色场条件下进行,为改变普通拉丝的形状,使用柱面透镜代替普通的球面透镜聚焦激光,从而产生了一个片状的拉丝体。结合泵浦光偏振方向的改变,研究拉丝的形状对太赫兹能量空间分布的影响。

实验采用的激光器为相干(Coherent)公司商业化钛蓝宝石飞秒激光,其主要参数指标为:水平线性偏振;中心波长 800 nm;半高全宽 10 nm;脉宽 130 fs;单脉冲能量 8 mJ;重复频率 1 kHz;初始出射光斑直径约 12 mm。实验装置如图 1 所示,泵浦激光经柱面透镜(CL)会聚后,在空气中形成片状等离子体(Plasma Sheet),在透镜焦点之前放入倍频晶体 BBO,用以产生 400 nm 激光,从而形成双色场拉丝。片状拉丝产生的太赫兹波被两面抛物面镜 PM1、PM2 收集后会聚并进入高灵敏度的热释电探测器 Bolometer(PM1、PM2 之间的银镜 AgM 作用仅仅是改变太赫兹传播方向,便于实验装置搭建),Bolometer 探测口上覆盖高阻硅片(Si)用于隔绝激光入射。柱面透镜前放置半波片($\lambda/2$)用以改变 800 nm 泵浦光的偏振方向。

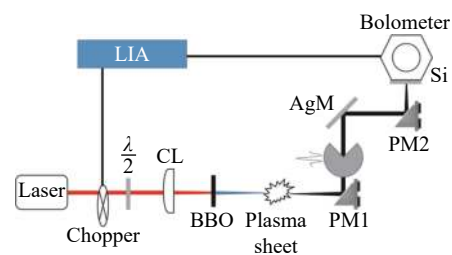


图 1 实验装置

Fig. 1 Experiment setup

在 AgM 与 PM1 之间放置一块四分之三象限太赫兹波挡板,如图 2 所示,挡板由厚铝箔片制成并被贴在旋转的可调镜架上,用以探测该平面位置处太赫兹波能量的空间分布。实验中,以泵浦光偏振为水平方向时为基准,找到产生的太

赫兹波的能量中心点(即太赫兹能量最强的位置),使该中心点与四分之三象限太赫兹波挡板的中心重合。此时,遮挡板会遮挡住空间中四分之三的太赫兹波,只让余下的、需要探测的四分之一太赫兹波通过并最终进入到探测器 Bolometer 中。采集所得信号由 Bolometer 输出到 SR830 锁相放大器(LIA)中,同时光学斩波器 Chopper 给锁相放大器提供外参考信号,信号采集由编写的 LabVIEW 控制软件完成。为提高信号信噪比,每一组信号采集 80 个数据然后取平均。通过旋转太赫兹波挡板,结合 Bolometer 作非相干探测,可以分别采集得到该空间平面上、下、左、右四部分的能量强度,而这四部分太赫兹波能量叠加组合即可理解为在该空间平面上完整的太赫兹波能量。将探测所得四个象限的太赫兹能量强度连线,即可得到太赫兹能量空间分布规律。



图 2 四分之三象限太赫兹波挡板示意图
Fig. 2 Three-quarter quadrant THz wave baffle.

2 实验结果及分析

首先,将图 1 所示实验装置中的柱面透镜(CL)替换成普通的球面透镜,用以产生普通的拉丝,并激发产生太赫兹波;然后,用图 2 所示的“四分之三象限太赫兹波挡板”分别探测此时上、下、左、右四个象限内的太赫兹能量,以供后续实验作对比。采集所得四个太赫兹能量空间分布如图 3 所示,图中实线为泵浦光为水平偏振时太赫兹能量分布情况,虚线为泵浦光为竖直偏振时太赫兹能量分布情况。

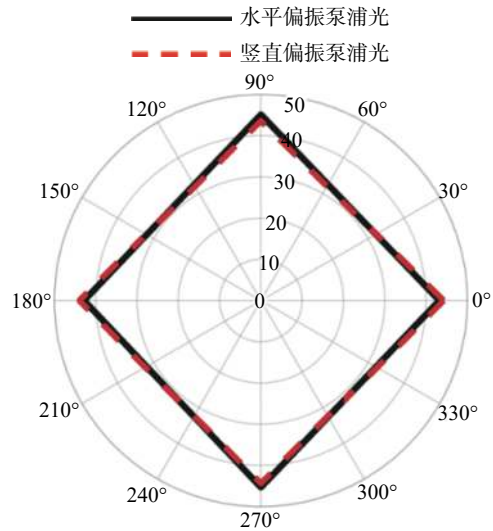


图 3 用球面透镜拉丝时太赫兹能量的空间分布
Fig. 3 The spatial distribution of terahertz energy when using a spherical lens to generate terahertz

由图 3 可知,经球面透镜拉丝产生的太赫兹能量在水平和竖直两个方向上的分布大致相同,且完全对称。这和 You 等指出的双色场拉丝产生的太赫兹能量空间分布呈完全对称的圆环状^[17]相符。此外,由图 3 还可以看出,无论泵浦光偏振为水平偏振(即图 3 中实线),还是泵浦光偏振为竖直偏振(即图 3 中虚线),太赫兹的能量空间分布并不随着偏振方向的改变而产生明显的变化。这说明,在双色场条件下用球面透镜拉丝产生的太赫兹波,其能量的空间分布并不受泵浦光偏振方向的影响。

将球面透镜换成柱面透镜(CL),本文以经柱面透镜会聚后产生的片状拉丝方向为水平方向进行研究。在此情况下,用不同偏振方向的泵浦光拉丝产生太赫兹波,并用图 2 所示的四分之三象限太赫兹波挡板分别探测上、下、左、右四个象限内的太赫兹能量。所得太赫兹能量空间分布如图 4 所示,图中实线为泵浦光为水平偏振时太赫兹能量分布情况,虚线为泵浦光为竖直偏振时太赫兹能量分布情况。

由图 4 可知:无论泵浦光偏振状态如何,片状拉丝为水平方向时,产生的太赫兹能量约有 70% 以上集中在竖直方向上;当泵浦光偏振为水平偏振时(即图 4 中实线),太赫兹能量的空间分布无论是上、下象限还是左、右象限都基本呈现对称分布;当泵浦光偏振为竖直偏振时(即

图 4 中虚线), 虽然太赫兹能量的空间分布左、右象限还是大致呈现对称分布, 但是其上、下象限的能量分布出现了约 20% 的向下偏移, 呈现出了十分明显的非对称分布现象。

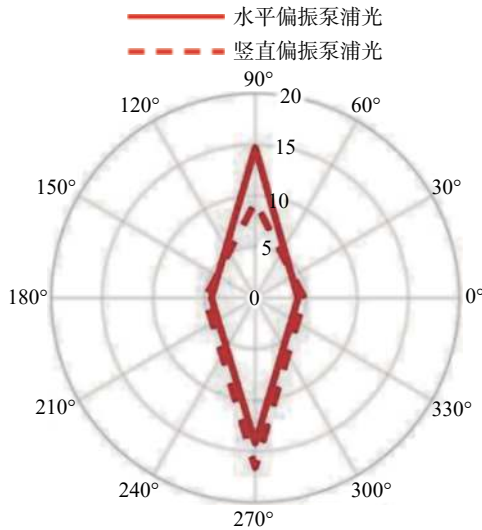


图 4 片状拉丝为水平方向时太赫兹能量的空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of terahertz energy with horizontal plasma sheet

由图 3 可知, 双色场条件下由球面透镜拉丝产生的太赫兹波, 其能量的空间分布在四个象限内都呈对称状, 且不受泵浦光偏振的影响。而图 4 显示, 使用柱面透镜改变拉丝形状后, 不仅使太赫兹波能量的空间分布规律发生了变化, 而且改变偏振方向后还会对其能量的空间分布产生影响。

产生上述现象的原因是, 经柱面透镜产生的片状等离子体拉丝可以等效理解为是许多并排在一起的细丝, 这些并排的等离子体拉丝均在向前辐射锥状太赫兹波。因此, 在空间中传播时, 这些太赫兹波就会发生相干叠加作用, 从而影响到太赫兹能量的空间分布。在与片状拉丝方向垂直的方向上, 太赫兹能量相干相长; 而在与片状拉丝方向平行的方向上, 太赫兹能量相干相消。因此使用柱面透镜会聚激光拉丝产生太赫兹时, 产生的太赫兹的能量空间分布不是一个均匀的对称分布, 有约 70% 以上能量集中在与片状拉丝方向垂直的方向上。

另一方面, 改变偏振方向会使太赫兹能量分布产生偏移, 其原因同样是由片状拉丝等效理解

为多丝叠加后的相干作用引起。球面透镜双色场拉丝产生的太赫兹能量空间分布原本就呈完全对称状, 因此改变泵浦光偏振方向, 对各方向上太赫兹能量空间分布的影响也一致, 等效于没有影响。而经柱面透镜会聚产生的片状等离子体, 由于相干叠加作用, 本身使得太赫兹能量空间分布集中在了与片状拉丝方向垂直的方向上, 在此基础上, 改变泵浦光偏振方向, 不同方向上的太赫兹能量也会产生不同的变化, 从而表现出了能量分布的偏移。

3 结 论

本文使用柱面透镜代替普通的球面透镜聚焦激光, 产生了一个片状的等离子体拉丝体。实验结果表明, 激光拉丝形状本身不仅会直接影响太赫兹能量的空间分布, 同时也会影响到泵浦光偏振改变对太赫兹能量空间分布的作用。验证了激光拉丝形状也是影响太赫兹能量空间分布的重要因素之一的观点, 可为进一步解释太赫兹能量空间分布的机理提供参考。

参考文献:

- [1] 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2007.
- [2] 刘抗, BUCCHERI F, 张希成. 微型等离子体的太赫兹科技探究 [J]. 物理, 2015, 44(8): 497 – 502.
- [3] LI T, MA H Y, PENG Y, et al. Gaussian numerical analysis and terahertz spectroscopic measurement of homocysteine[J]. Biomedical Optics Express, 2018, 9(11): 5467 – 5476.
- [4] HUMPHREYS K, LOUGHRAN J P, GRADZIEL M, et al. Medical applications of terahertz imaging: a review of current technology and potential applications in biomedical engineering[C]//Proceedings of the 26th annual international conference of the IEEE Engineering in medicine and biology society. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2004: 1302 – 1305.
- [5] JORNET J M, AKYILDIZ I F. Graphene-based plasmonic nano-antenna for terahertz band communication in nanonetworks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2013, 31(12):

- 685 – 694.
- [6] PETROV V, KOMAROV M, MOLTCHANOV D, et al. Interference and SINR in millimeter wave and terahertz communication systems with blocking and directional antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(3): 1791 – 1808.
- [7] CHEN D R, CHEN H B. A novel low-loss terahertz waveguide: polymer tube[J]. Optics Express, 2010, 18(4): 3762 – 3767.
- [8] 刘婧, 肖鸣飞, 沈京玲, 等. 太赫兹宽谱聚合物波导及其传感应用 [J]. 红外与毫米波学报, 2016, 35(5): 525 – 528.
- [9] HIRORI H, DOI A, BLANCHARD F, et al. Single-cycle terahertz pulses with amplitudes exceeding 1 MV/cm generated by optical rectification in LiNbO₃[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(9): 091106.
- [10] YEH K L, HOFFMANN M C, HEBLING J, et al. Generation of 10 μ J ultrashort THz pulses by optical rectification[J]. Applied Physics Letters, 2007, 90(17): 171121.
- [11] KOOHI M Z, NESHAT M. Evaluation of graphene-based terahertz photoconductive antennas[J]. Scientia Iranica, 2015, 22(3): 1299 – 1305.
- [12] BLANK V, THOMSON M D, ROSKOS H G. Spatio-spectral characteristics of ultra-broadband THz emission from two-colour photoexcited gas plasmas and their impact for nonlinear spectroscopy[J]. New Journal of Physics, 2013, 15(7): 075023.
- [13] LIU Y, HOUARD A, PRADE B, et al. Amplification of transition-Cherenkov terahertz radiation of femtosecond filament in air[J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(5): 051108.
- [14] FADEEV D A, MIRONOV V A. On the theory of the generation of terahertz radiation accompanying the optical breakdown of air by femtosecond laser pulses containing the second harmonic[J]. Journal of Optical Technology, 2010, 77(10): 615 – 616.
- [15] ZHAROVA N A, MIRONOV V A, FADEEV D A. Anisotropic effects of terahertz emission from laser sparks in air[J]. Physical Review E, 2010, 82(5): 056409.
- [16] SUVOROV E, AKHMEDZHANOV R, FADEEV D, et al. On the peculiarities of THz radiation generation in a laser induced plasmas[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011, 32(10): 1243 – 1252.
- [17] YOU Y S, OH T I, KIM K Y. Off-axis phase-matched terahertz emission from two-color laser-induced plasma filaments[J]. Physical Review Letters, 2012, 109(18): 183902.

(编辑: 刘铁英)