

文章编号: 1001-3806(2022)04-0499-12

激光诱导等离子体辐射特性的研究综述

王卫江¹, 贾 凯¹, 房瑞娜¹, 邢 昊¹, 黄 云², 张 滢¹, 马超群^{1,2}, 王 激^{1,2*}

(1. 西南技术物理研究所, 成都 610041; 2. 电子科技大学 基础与前沿研究院, 成都 610054)

摘要: 激光诱导等离子体作为一种宽光谱辐射源, 能够产生 X 射线、紫外、可见、红外、太赫兹以及微波波段的辐射, 可应用于天体物理、惯性约束核聚变、生物医学、材料科学、光谱分析、环境工程、信息技术、超快技术、光刻技术、成像技术、雷达技术、半导体技术等众多领域, 具有较高的实用价值。迄今为止, 有关激光诱导等离子体辐射特性的文献报道大多集中于描述激光与物质在单一波段的相互作用, 对辐射的产生机理还未完全掌握, 对完整光谱的研究综述依然比较缺乏。从电磁辐射光谱及其辐射机制的角度, 对激光诱导等离子体的辐射特性做出了系统的梳理分类, 对国内外相关团队的研究成果进行了总结和分析, 特别从不同视角探究了等离子体与光谱辐射之间的物理关系。介绍了激光诱导等离子体各个波段的辐射特点, 并讨论了影响辐射的相关因素。最后, 对红外波段和太赫兹波段的研究前景进行了展望。

关键词: 光谱学; 辐射光谱; 辐射机制; 激光诱导等离子体

中图分类号: O433 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2022.04.010

Review on radiation features of laser-induced plasma

WANG Weijiang¹, JIA Kai¹, FANG Ruina¹, XING Hao¹, HUANG Yun²,
ZHANG Ying¹, MA Chaoqun^{1,2}, WANG You^{1,2}

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Fundamental and Frontier Sciences, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: As a radiation source with the wide spectrum, laser-induced plasma can produce X-ray, ultraviolet, visible, infrared, terahertz, and microwave radiation. It has high practical value and can be used in astrophysics, inertial confinement fusion, biomedicine, materials science, spectral analyses, environmental engineering, information technology, ultrafast technology, lithography technology, imaging technology, radar technology, and semiconductor technology, etc. Up to now, most of the literatures about the radiation characteristics of laser-induced plasma concentrate on the interaction between lasers and matter in a certain wave band, while the mechanism of radiation production is not fully understood, and there is still a lack of comprehensive introductions of the researches on a wide spectrum. The radiation characteristics of laser-induced plasma are systematically classified from the point of view of both electromagnetic radiation spectra and radiation mechanisms in this review. The research results of relevant teams at home and abroad are summarized and analyzed, especially the physical relationship between plasma and spectral radiation is explored from different perspectives. The radiation characteristics of laser-induced plasma in various bands are introduced, and the related factors affecting the radiation are discussed. Finally, the research prospect of infrared band and terahertz band are prospected.

Key words: spectroscopy; radiation spectrum; radiation mechanism; laser-induced plasma

引 言

激光诱导等离子体(laser-induced plasma, LIP)又称激光等离子体,作为激光与物质相互作用的一种产

物,自激光诞生以后便进入了科技工作者的视野。激光等离子体的形成是一个快速而复杂的演化过程,所对应的物理特性十分繁杂。迄今为止,学者们对激光等离子辐射特性的研究呈现出层层深入的趋势。例如,2007年,BEILIS建立了激光等离子体的物理模型,给出了描述等离子体形成过程的方程组^[1];2012年,GIACOMO等人研究了环境条件对激光等离子体发射光谱的影响,预测了等离子体自身的膨胀是所有背景环境中对发射光谱影响最大的因素^[2];2013年,

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFB0405101)

作者简介:王卫江(1997-),男,硕士研究生,现主要从事新型固体激光技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail:youwang_2007@aliyun.com

收稿日期:2021-07-27;收到修改稿日期:2021-09-23

FREEMAN 等人进行了纳秒和飞秒激光在大气和真空条件下的等离子体光学辐射对比实验,发现纳秒激光所产生的等离子体发射光谱为连续谱且主要基于低电荷离子的发射,飞秒激光所产生的等离子体的发射光谱主要基于中性激发物质的发射^[3];2016 年,CHAUDHARY 等人对激光等离子体的形成过程及应用做了详细的报道^[4]。但是,这些文献报道基本集中于某一光谱范围内激光等离子体的辐射特性研究,几乎没有较宽光谱范围的激光等离子体辐射特性的综述。本文中将就激光与物质相互作用所产生等离子体的电磁辐射在较完整光谱上的研究状况进行综合性的概括和总结,对系统了解激光等离子体辐射及其应用有较好的参考价值。

强激光作用在样品表面时,物质的表面不仅会发生激发和电离,还会汽化成温度很高的蒸气羽状物。其构成主要包括核心区域、中间区域以及外围区域。由于各个区域的温度有所不同,粒子所处的状态也有较大不同。核心区主要呈高温和高密度的电离态,中间区主要表现为离子和中性物质持续电离和重组的状态,外层区主要以中性粒子为主,等离子体的辐射特性可能与等离子体的上述状态密切相关。因此,深入了解激光等离子体的形成过程对研究其辐射特性非常重要。迄今为止的研究发现,存在着很多影响激光等离子体辐射特性的因素,除激光等离子体自身的系列参量外,还包括输入的激光脉宽、激光能量以及外部的环境条件等因素。在过去几十年里,随着对激光等离子体辐射的深入研究,一些相关的技术也已广泛地运用到了生活、科研、工业、军事、航天等领域。例如,作为激光等离子体辐射应用之一的激光诱导击穿光谱技术,在物质元素分析和鉴别方面具有独特的优势,目前

已成为一种具有重大应用价值的技术手段。激光等离子体辐射可以作为 X 射线源、紫外光源、红外光源、太赫兹辐射源等光源,也可以应用于激光切割、激光推进、激光烧蚀等领域。但是,一些技术还存在着诸多不足,如激光诱导击穿光谱的灵敏度不高,激光等离子体辐射光源的输出光束不易控制等。本文中主要总结了 6 个波段的激光等离子体辐射特性的研究进展状况,展望了未来的发展趋势和应用方向。

1 X 射线波段

从 20 世纪开始,研究者们就开展了基于强激光与物质相互作用的等离子体 X 射线源的研究。1990 年,WANG 等人报道了利用激光等离子体所产生的 X 射线的辐射特性^[5]。1998 年,GIULIETTI 等人报道了基于激光等离子体产生 X 射线的机理和相应的应用,对 X 射线光谱进行了深入研究,发现了 X 射线的光谱主要由连续谱和线状谱组成,其中连续谱主要来源于韧致辐射和复合辐射,线状谱主要来源于原子谱系^[6]。2018 年,CANNAVÒ 等人分别采用纳秒和飞秒激光研究等离子体的辐射,发现了等离子体的辐射特性与等离子体密度、温度以及电荷粒子的加速运动等有关^[7]。通过总结激光等离子体 X 射线辐射特性的研究历程可以看出,早期研究主要集中于获得激光诱导等离子体的 X 射线光谱,后来过渡到探究外部环境对 X 射线辐射的影响,接着则是根据需求制备出满足条件的 X 射线源。以上过程折射出激光等离子体 X 射线从自然发现到实际应用的发展轨迹,这些研究对超快技术、光刻技术、天体物理、惯性约束核聚变、光谱分析等领域的发展促进较大。

表 1 是相关研究团队得到的激光等离子体 X 射

表 1 各研究团队得到的激光等离子体 X 射线辐射结果

物质	激光功率密度/(W·cm ⁻²)	激光脉宽/fs	光谱范围/nm	参考文献
碱金属卤化物	约 10 ¹⁵	1.58×10 ²	0.041~0.41	[8]
Mo	1.2×10 ¹⁴ ,2.6×10 ⁹	1.5×10 ⁵ ,1×10 ⁷	1~5	[9]
气溶胶	约 10 ¹⁴	1.1×10 ⁶ ~1.3×10 ⁶	2~5	[10]
Bi	1.5×10 ¹³ ,1.4×10 ¹⁴	1.5×10 ⁵	1~7	[11]
Hf,Ta	2.3×10 ¹⁴ ,1.8×10 ¹²	1.7×10 ⁵ ,1×10 ⁷	1~7	[12]
Gd,Tb	8.9×10 ¹⁵ ~3.8×10 ¹¹	1.5×10 ⁵	6~7	[13]
Pt	4.1×10 ¹¹ ~1.4×10 ¹³	1.2×10 ⁵ ~4×10 ⁶	1~8	[14]
Hf	1×10 ¹⁴	1.5×10 ⁵	1~8.5	[15]
Al,Cu	8.9×10 ¹⁵ ,3.8×10 ¹¹	4.5×10 ¹ ,6×10 ⁶	约 10	[16]
Si	约 10 ¹⁶	1.6×10 ²	2~14	[17]
元素周期表中第 6 号元素~第 79 号元素对应的材料	约 10 ¹⁴	2.5×10 ⁵	0.5~20	[18]
KAlSi ₃ O ₈	约 10 ¹⁶	4.80×10 ⁵	2~19	[19]
Al,Fe,Cu,W	5.6×10 ¹¹	8×10 ⁶	10~40	[20]

线的辐射结果。表中根据激光等离子体 X 射线辐射光谱的谱线大小进行了重新排序。由表 1 可见,很多物质与激光相互作用所产生的等离子体均能发射 X 射线,但这时激光应具有较高的功率密度和较短的脉冲宽度。通过归纳表 1 中参考文献[16]~参考文献[18]以及参考文献[20]可以发现,激光等离子体 X 射线的辐射强度与原子序数密切相关,且低原子序数靶的软 X 射线主要集中在长波区,而高原子序数靶的 X 射线集中于短波区,且 X 射线发射强度明显高于低原子序数靶的相应数值,这说明高原子序数靶材将激光能量转换为 X 射线的效率更高。同时还发现,光谱曲线的峰值位置随原子序数的不同而发生改变。还有报道指出,激光功率密度对低原子序数等离子体辐射的影响更为显著。另外,从原子壳层结构角度分析 X 射线光谱时,发现在电子温度与壳层离化能相匹配时谱带的辐射峰经常出现^[16-18]。其次,激光脉冲宽度也影响着等离子体 X 射线的辐射特性,研究发现,输入的激光脉冲越短,等离子体发出的 X 射线辐射的波长也越短,与纳秒激光相比,飞秒激光诱导的等离子体 X 射线峰值会向更短波长移动,如图 1 所示。而不同的输入激光脉冲宽度对应着不同的诸如等离子体的电离度和温度等参量,例如,对铝等离子体而言,飞秒激光诱导等离子体的电离度和温度均高于纳秒激光诱导的等离子体^[9,19]。

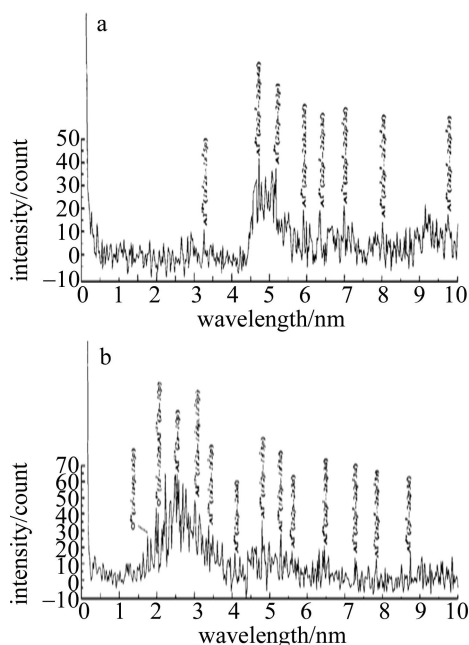


图1 铝激光等离子体 X 射线光谱^[16]

a—纳秒激光产生 b—飞秒激光产生

目前,激光诱导等离子体 X 射线辐射的研究呈现

出与之前不同的特点。2003 年,PHUOC 等人研究了强激光诱导等离子体中非线性汤姆逊散射所产生的 X 射线辐射^[21]。2016 年,LOKASANI 等人通过增加入射激光的数目研究了 X 射线发射的增强情况^[9]。2019 年,ZHAO 等人系统研究了高重频 X 射线源与金属的相互作用^[22]。2020 年,FILIPPOV 等人研究了强磁场约束下等离子体的辐射状况^[23]。同年,KRYGLER 等人研究了激光等离子体的连续 X 射线辐射的优化过程^[24]。由此可见,激光等离子体 X 射线辐射的研究还存在着广阔的发展空间。

2 紫外波段

激光等离子体可发出从极紫外(extreme-ultraviolet, EUV)到近紫外波段的辐射,不同波长的辐射对应着不同的应用。如光刻技术要求光源的波长越短越好(光刻光源的工作波长一般选择 13.5nm),物质的分析鉴别要求使用不同的激光与物质相互作用时发出的紫外辐射特征谱线,激光刻蚀加工则需要选择某些能量较高的紫外辐射波长。对于光刻的极紫外光源而言,以锡、锂、氙的等离子体作为研究对象的报告居多,其原因在于锡等材料能够产生高电荷离子和较高的转化效率,所产生的等离子体数量可控,在所需带宽内有很强的共振跃迁,VERSOLATO 曾专门对这些领域的现状进行了概述^[25]。

2012 年,WU 等人研究了二氧化碳激光与锡靶相互作用时所产生的等离子体紫外辐射特性,总结了极紫外光谱的形状随激光脉宽、入射脉冲能量和环境气压的变化规律,实验光路如图 2 所示。他们发现,激光能量在 30mJ~400mJ 范围内极紫外辐射光谱强度呈线性增加,脉冲能量为 425mJ 时有最高的转换效率,相应的光谱强度随背景气压的增大迅速下降,这都说明激光等离子体极紫外光谱具有饱和效应;另外,他们还发现,激光脉宽对光谱形状的影响不大^[26]。

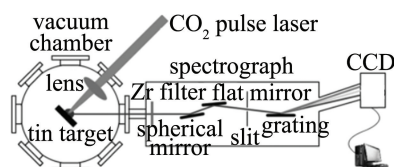


图2 实验装置示意图^[26]

2017 年,SU 等人基于辐射流体动力学模型研究了锡等离子体紫外辐射的演化过程,成功地模拟了等离子体的自吸收特性并做出了相应的解释^[27]。2020 年,WANG 等人研究了脉冲二氧化碳激光诱导锡靶放电等离子体的膨胀特性,他们通过控制放电电压

和激光能量,得到了不同条件下等离子体的时间分辨羽辉图像^[28]。2021 年,WANG 等人又分析研究了激光诱导钨等离子体的紫外辐射强度、能量转换效率以及等离子体中电子温度和密度随时间的变化关系,实验所用装置如图 3 所示^[29]。通过理论和实验相结合的方式,深入研究了激光诱导高原子序数材料所产生极短波长的辐射特性,其目的是为了获得更短波长和更加稳定的光刻光源,这将促进光刻技术的飞速发展。目前,高原子序数粒子的电离机制还未完全阐明,激光能量和辐射能量的转化效率还有待提高,更深的理论研究还有待完善。

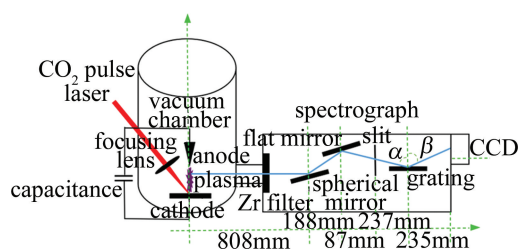


图3 激光诱导放电电极紫外光谱探测实验装置^[29]

2021 年,LI 等人研究了结构锡靶激光等离子体紫外辐射特性的研究,实验装置及辐射光谱如图 4 所示。他们发现了凹槽靶结构能抑制激光等离子体的膨胀,且激光光斑与凹槽宽度接近时产生的辐射强度最大^[30]。另外还有针对多激光束诱导锡等离子体^[31]的研究报道。这些研究工作对光刻、计量、生物成像等应用领域均有较高的参考价值。

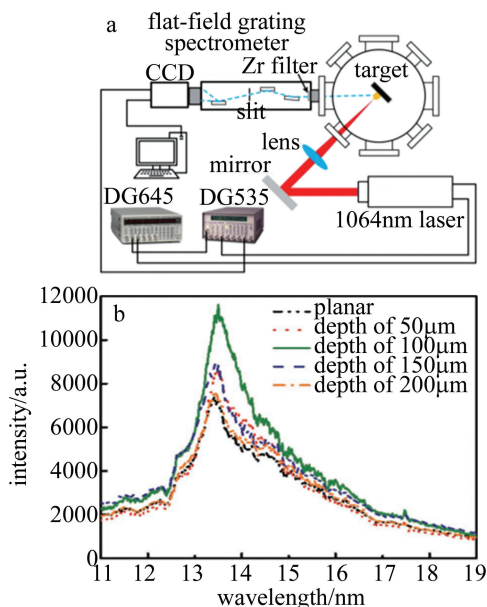


图4 激光辐照结构靶等离子体极紫外光源实验装置图和辐射光谱图^[30]

迄今为止,一些学者研究了能够产生激光等离子体紫外辐射的物质,这些物质主要是铜^[32]、铝^[33]、

铬^[34]、镉^[35]、碳^[36]、氩气、氙气^[37]等。2010 年,WU 等人在进行激光烧蚀铜靶产生紫外等离子体辐射的研究时发现,相应辐射光谱的范围主要集中在 180nm ~ 300nm,其光谱如图 5 所示^[32]。可以看到,其辐射光谱包括连续谱和线状谱,连续谱来源于自由电子韧致辐射和复合辐射,线状谱来源于原子光谱和离子光谱。铜的原子光谱线数目要比一价离子的多,其原子光谱的辐射强度也相对较大。

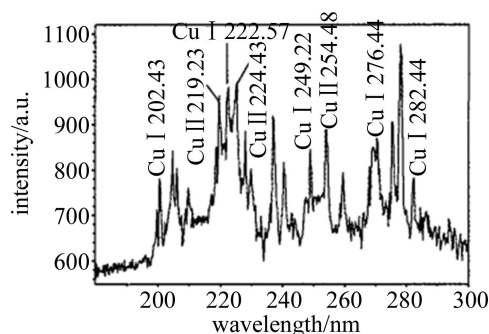


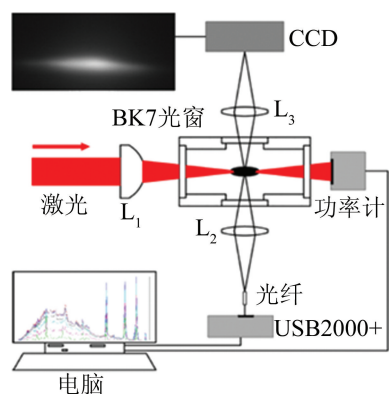
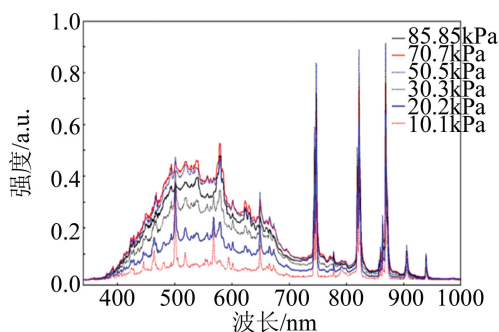
图5 激光诱导铜等离子体的辐射光谱^[32]

另外,激光等离子体辐射强度的大小对探测的影响很大,主要体现在微弱辐射无法被探测或很难被探测到,因此,微弱辐射不易得到广泛的应用。要想提高辐射强度,主要的办法是对微弱辐射进行放大和增强。1983 年,VINOGRADOV 等人报道了辐射增强的相关研究,他们发现,增加输入激光脉冲能量可以增强辐射,另外增大环境压强也可以增强辐射,这两种方法只是增强了辐射光谱的强度,但对谱线形状的改变却影响不大^[38]。另外,通过研究等离子体的空间分布、温度分布以及发射强度随时间变化特性,可进一步加深对激光等离子体物理特性的了解,也有助于得到更精确的激光诱导击穿光谱,甚至能够运用到诸如火星地质探测^[39]等地外星系研究中。

3 可见波段

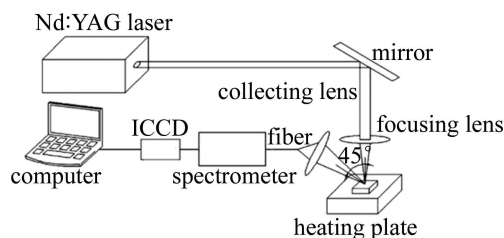
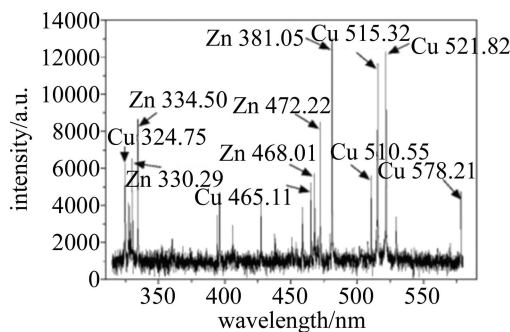
可见光作为人眼能够直接观察到的电磁波段,在激光等离子体所产生的辐射光谱中占有较大的比例。很多材料在红外激光的作用下都能发出可见光,这些材料包括大气或纯氮气、氧化物、金属以及石墨烯等。激光与物质相互作用产生可见光的过程同时也可被称为光致发光。有关学者进行了很多激光与气体相互作用产生等离子体可见光发射的研究。2004 年,LI 等人报道了在标准大气压下激光与纯氮、纯氧和空气等样品相互作用产生等离子体所发出的可见光谱^[40],他们通过光谱分析,研究了激光等离子体的相关物理特性,阐明了等离子体产生后的弛豫过程和复合机制。但以

上结果依然满足不了实际的应用需求,仍需要进一步深入对激光大气等离子体的各种物理机制的研究。2005年,LIN等人研究了激光击穿大气所产生等离子体的可见光谱时间特性^[41]。2013年,LIU等人采用图6所示的实验光路,研究了在低大气压下飞秒激光诱导氮气所产生等离子体的辐射特性,所得的激光等离子体光谱如图7所示。他们发现了飞秒激光诱导各种气体所形成的等离子体光谱均由连续光谱和线状光谱组成,其中线状谱主要集中在短波长附近,且短波长的辐射强度要大于长波长;另外,他们还发现,激光与气体相互作用易形成等离子体通道,且激光能量的损失主要来源于等离子体的散射^[42]。他们虽然充分地研究了在低大气压下飞秒激光等离子体的辐射特性,但并未总结出飞秒激光在激光等离子体辐射特性研究中的优势,还缺少激光脉宽影响等离子体辐射特性的相关实验。综上所述,这些研究均有力地促进了诸如白光激光雷达^[43]、物质分析、激光大气遥感、激光核聚变等实际应用的飞速发展。

图6 实验光路图^[42]图7 激光氮气等离子体光谱^[42]

除气体介质外,一些研究者也进行了激光与固体材料相互作用产生等离子体可见光发射的研究。HAFEZ等人^[44]于2003年以及WANG等人^[45]于2020年均报道了激光诱导铜等离子体的辐射特性,但后者的研究侧重于样品温度对黄铜等离子体辐射的影响,

且发现样品温度越高,谱线的强度就越强。图8是实验装置图,图9是所得到的等离子体发射光谱。2019年,FILHO等人报道了氧化镧和氧化铽的可见光辐射^[46];同年,ABBAS研究了大气中激光诱导铝和铜等离子体的可见光波段的光谱特性,发现了等离子体发射强度会随激光脉冲能量的增加而增加,而且原子和离子的光谱线取决于目标原子的电离能^[47]。

图8 实验装置图^[45]图9 样品温度为20℃时的发射光谱光谱^[45]

另外,2017年,TRAUTNER等人报道了高分子材料的激光击穿光谱,得到了不同粒子对激光等离子体辐射的贡献情况^[48]。同年,HARILAL等人对激光诱导气体等离子体的离轴光谱辐射特征做了深入研究^[49]。2020年,KAUTZ等人研究了环境气压在激光与物质相互作用过程中的作用,对激光等离子体羽流动力学和粒子约束等方面的问题提出了自己独特的见解^[50]。以上研究被公认为对元素检测等领域的应用有较大的促进作用。

4 红外波段

众所周知,凡是温度高于绝对零度的物体均能产生红外辐射,因此红外辐射又被称为热辐射。而激光与任何物质相互作用所形成的等离子体均处于高温状态,它们均具有丰富的红外辐射光谱,所以有必要对激光等离子体的红外辐射特性进行深入研究。

以前,国内外对激光等离子体的红外辐射特性的研究报道相对较少;但近年来,有关激光等离子体红外辐射特性的研究报道有所增加。一般,欲获得红外波段范围的辐射,通常需要使用气体、染料、半导体或固

体激光器去辐照靶标。2007年, RADZIEMSKI 等人采用激光诱导击穿光谱技术得到了激光诱导土壤和铀所产生的等离子体在 750nm~2000nm 波段的红外光谱^[51]。2016年, JELINKOVA 等人发现用硫代镓酸镉激光器发出的激光与物质相互作用能产生中红外区域的辐射^[52]。2017年以来, WANG 等人进行了纳秒激光诱导空气等离子体的研究, 实验装置如图 10 所示, 其研究范围包括激光能量和气体压强对等离子体辐射的影响、相应红外辐射的空间分布情况, 以及激光诱导空气等离子体红外辐射的产生机理, 得到了图 11 所示的 950nm~2400nm 波段范围的辐射光谱, 发现了激光等离子体的红外辐射光谱同样由连续谱和线状谱组成, 其中连续谱主要来源于轫致辐射, 而线状谱主要来源于氮和氧的中性原子谱以及氮分子的振动光谱; 此外, 他们还发现了激光能量的大小只会影响辐射强度, 对光谱形状的影响较小, 而空气压力的增加会增大辐射的强度, 延长辐射的衰减时间^[53-55]。上述结论有助于简单了解激光等离子体的红外辐射特性, 但是这些研究还处于表象的分析层面, 对激光等离子体内部演变过程及辐射产生的理论研究还不充分。

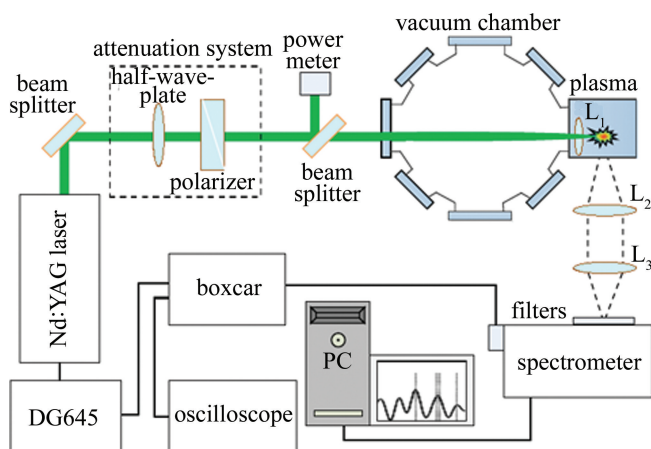


图 10 纳秒激光诱导气体等离子体近红外辐射实验装置^[54]

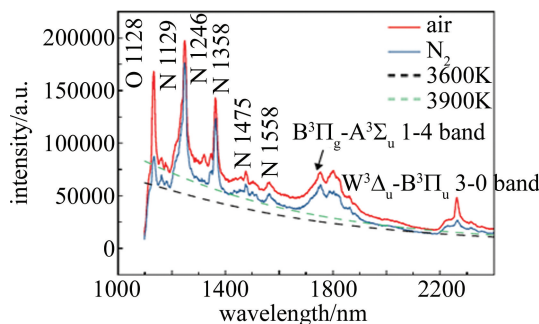


图 11 80kPa 气压下激光诱导氮气、空气等离子体光谱^[54]

以上研究表明, 在激光等离子体辐射特性的研究中, 红外辐射特性与 X 射线辐射、紫外辐射和可见光

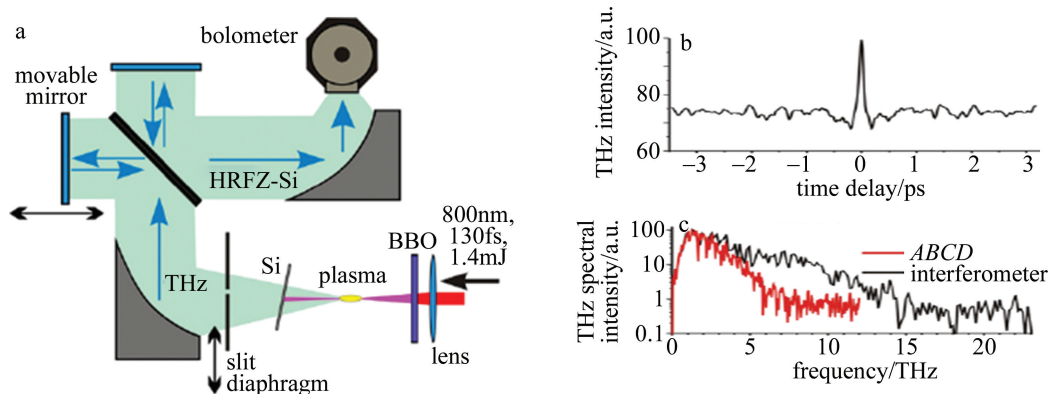
辐射特性较为相似, 因此借鉴 X 射线辐射、紫外辐射和可见光辐射特性的成熟研究方法来探究激光等离子体的红外辐射特性, 可快速填补该光谱范围内的空白。激光等离子体红外辐射的研究对象不仅包括了地球上的各种物质, 还包括了宇宙中的恒星、矮星或者是行星等天体^[56]。但红外光谱研究存在着一个较为明显的缺点, 即可用的原子线数目相比可见和紫外要少。

5 太赫兹波段

太赫兹 (terahertz, THz) 辐射的频率范围为 0.1THz~10THz, 该波段的辐射具有低能、高穿透等特点。太赫兹辐射的良好穿透性使它可用来实现对很多不透明物体的透视成像, 其低能性也同时使其不会对样品产生较为严重的损坏。一般来说, 太赫兹辐射的能量低于不同类型的化学键能, 不会引起任何有害的电离反应, 所以它相对于其它波段来说较为安全, 可用于人体和其它生物样本的安全检查。另外, 很多有机分子在太赫兹波段具有较高的吸收和色散系数, 这就使得部分有机分子的太赫兹辐射光谱中可能包含着很多独特的物理和化学信息, 因此, 可以把这些特性应用于生物医学工程、材料科学、信息科学与技术、天体物理、环境科学、光谱学与成像技术等众多领域之中。

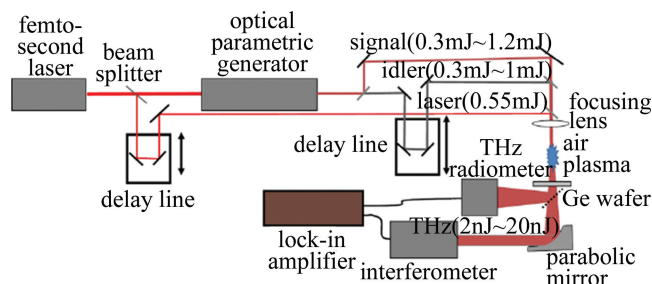
自 1993 年人们首次观测到激光等离子体的太赫兹波发射开始, 一些研究者便对激光等离子体的太赫兹辐射特性进行了较为深入的研究。2007 年, THOMSON 等人总结了飞秒激光脉冲诱导空气等离子体所产生太赫兹辐射的相关研究^[57]。2019 年, LIAO 等人总结了相对论激光诱导等离子体所产生太赫兹辐射的实验和模型, 提出了在等离子体中激光诱发产生太赫兹波的模型, 对太赫兹辐射的产生进行了较为全面的分析。太赫兹辐射的产生方式可分为 3 种: (1) 基于等离子体波产生太赫兹; (2) 基于电子传输产生太赫兹; (3) 基于电子发射产生太赫兹^[58]。由于激光等离子体相互作用过程比较复杂, 现阶段还不能明确太赫兹辐射产生的具体机理, 需要进行深入的探索。

以下从靶材种类的角度, 总结激光等离子体的太赫兹辐射特性。首先, 聚焦激光与固体样品相互作用产生太赫兹辐射的研究报道。2015 年, LI 等人研究了超短超强激光聚焦天线靶顶端所产生的太赫兹辐射特性, 以及激光脉冲长度与天线靶长度对所产生太赫兹辐射特性的影响, 其实验模型如图 12 所示^[59]。他们发现, 窄脉宽激光所激发的太赫兹辐射频率较高、方向性也较好, 使用较短天线容易得到连续的太赫兹频谱,

图 16 实验装置和太赫兹光谱^[67]

等人^[69]、2019 年 LUBENKO 等人^[70]以及 2021 年 USHAKOV 等人^[71]均研究了双色激光诱导空气所形成的等离子体丝,他们发现了单丝等离子体所产生的太赫兹辐射最强,等离子体丝的长度与太赫兹辐射呈线性关系,对等离子体丝施加电场能够增强太赫兹辐射。

虽然双色飞秒激光诱导气体等离子体产生太赫兹辐射的技术相对简单、有效且成熟,但产生效率较低。为解决该问题,2016 年,BAKHTIARI 等人提出了基于两束高斯激光阵列光束在电子中性碰撞时产生太赫兹辐射的方案,大幅地提高了太赫兹辐射的产生效率^[72]。还有一些研究者提出了用三色激光脉冲与空气作用来产生太赫兹辐射的方法^[73],如图 17 所示。经过实验,发现所产生的太赫兹频谱跨度可达 50THz,且太赫兹辐射的产生效率要比双色激光脉冲作用时高一个数量级,但其结构也更复杂一些。

图 17 实验装置示意图^[73]

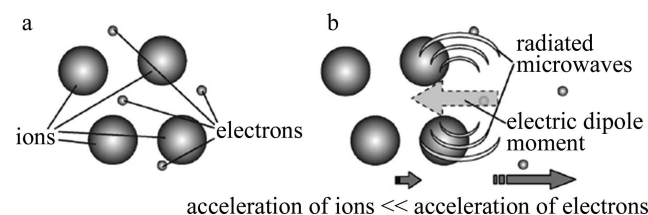
综上所述,利用超快超强激光与等离子体相互作用所产生强太赫兹辐射是近年来获取太赫兹的新方法,利用该方法产生太赫兹辐射的机理能否用等离子体波、电子传输和辐射理论来解释依然有待检验。目前,更准确的理论模型还在构建之中。

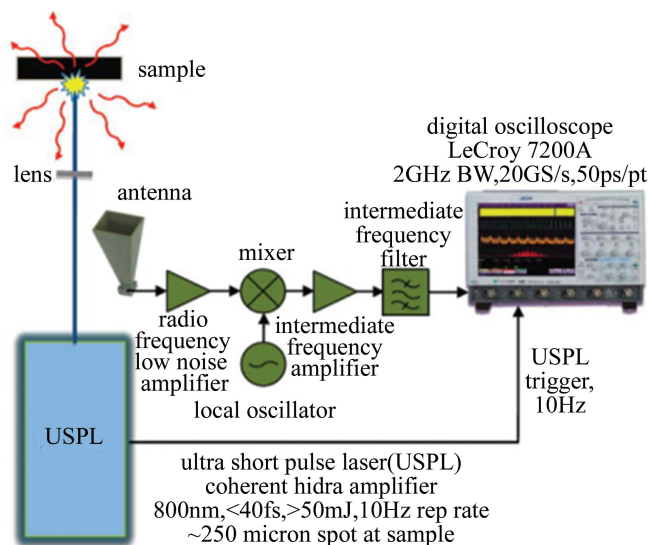
6 微波波段

微波的频率范围在 300MHz~300GHz,其波长一般小于 1m,在电磁波谱中介于红外和无线电波之间。

由于其能量较低,所以只能由激发分子的转动能级来实现跃迁。在激光诱导等离子体的过程中,通常能够产生时间为百纳秒量级、同时具有光学和电学性质的微波辐射。早在 1978 年就有人曾报道从激光烧蚀的目标中观察到了微波辐射的发射。目前国内外对激光诱导等离子体微波辐射产生机制的研究依然缺乏完善的体系架构。下面将主要介绍国内外的一些研究团队在激光等离子体微波辐射特性方面的研究情况。

2005 年,DORRANIAN 等人提出了用辐射理论计算辐射空间分布的方法,研究了基于太瓦-100fs 激光辐照气体样品所产生的微波发射特性^[74]。2009 年,NAKAJIMA 等人对激光等离子体的微波辐射机制做了简要阐明,其模型如图 18 所示。图 18a 中表示激光照射靶标物质并使其电离而产生等离子体,图 18b 中则表示所产生的电子和离子被热压加速到等离子体的外部。由于较轻的电子比较重的离子产生了更快的加速,这就导致了电子和离子膨胀速度的不同,进而引起了电荷的分离,从而产生了相应的电偶极矩,激发的电偶极矩将随电子和离子的复合而减小,在这个过程中就会产生微波辐射^[75]。2011 年,MIRAGLIOTTA 等人研究了超短脉冲激光与固体物质相互作用所产生的微波辐射特性,采用图 19 所示实验装置得到了 8GHz~12GHz 范围的频谱,他们发现,微波辐射的振幅随激光能量的增加而减小,且相应的发射特性与靶标和激光束焦点的相对位置有很强的关联,同时还发现用飞秒激光诱导等离子体所产生的微波辐射强度约为纳秒激

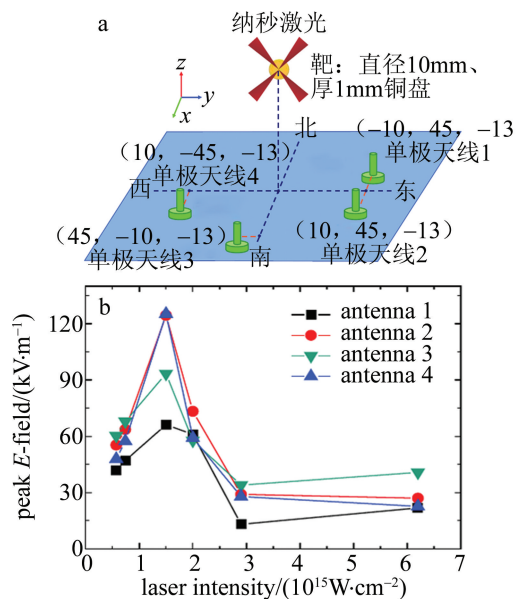
图 18 激光等离子体的微波辐射机制^[75]

图 19 实验示意图^[76]

光的 10 倍^[76]。

最近,在激光等离子体微波辐射领域提出了一些新的研究方法,例如,有团队报道了基于等离子体波导所进行的微波辐射特性的研究^[77],还有团队通过构建稳态射频激发等离子体波导研究了 2.8GHz~3.7GHz 频率范围的微波衰减和色散系数的变化情况^[78]。这些研究有助于揭示激光等离子体微波辐射的机制。

近年来,国内在此领域也发展较快。2011 年,CHEN 等人研究了脉冲激光辐照铜基箔靶的微波辐射机理,用强度为 10^{12} W/cm^2 、脉宽为 200ps 的激光入射到目标靶的表面,观测到了 0.5GHz~4GHz 的微波辐射,用对称极向电流分布产生的磁偶极辐射或电四极辐射解释了辐射的产生过程^[79]。2019 年,JIANG 等人用神光 II 高功率激光研究了入射激光的能量和强度变化对微波辐射的影响,其实验布局图以及在不同激光强度下 4 个方向上所测得的辐射电场峰幅值如图 20 所示。他们总结了不同激光强度下相关辐射场的时域波形和频谱特征的变化规律,发现在较低激光强度下微波的辐射强度随激光强度的增加先增加然后减小,时域波形呈连续振荡的特点,辐射频谱包含了高于和低于 0.3GHz 的两部分分量;在较高的激光强度下,相关的辐射强度随激光强度的增加而增加,辐射场时域波形表现为数十纳秒的单极性辐射,辐射频谱分布主要在 0.3GHz 以下,这说明在不同的激光强度作用下微波辐射的产生机制也有所不同:低激光强度下微波辐射主要由偶极辐射和靶上电子束的真空发射而产生,高激光强度下微波辐射主要由靶上电子束向真空的发射而产生^[80]。然而,影响微波辐射的物理因素远

图 20 实验布局图 and 不同激光强度下 4 个方向上对应的辐射电场峰幅值^[80]

不止激光的参量,人们想要得到正确而完整的微波辐射机制,还需要进行大量的理论计算和实验探索。

由于纳秒激光与等离子体相互作用的时间尺度对应于吉赫兹以下的频段,所以研究微波辐射的产生机制不仅有助于弄清电子逃逸等物理问题,还能够避免电磁干扰。在纳秒激光实验中,通常认为微波辐射主要来源于偶极辐射、电四极辐射、腔室充电后的振荡、接地金属靶杆上电流回流产生的辐射等。而激光能量对微波辐射的影响表现为在较高频率范围内微波辐射振幅随激光能量的增加呈下降趋势。另外,较长的等离子体对辐射信号的增强也十分有利。根据激光诱导等离子体可产生微波辐射的特性,孕育了诸如 G 型探地雷达^[74]、半导体开关^[81]等新型系统。

7 结束语

通过对激光等离子体 X 射线、紫外、可见、红外、太赫兹、微波等 6 个波段的辐射特性研究的归纳和总结,不难发现,从 X 射线到红外波段的辐射光谱均表现为连续谱和线状谱的叠加,其中连续谱主要基于轫致辐射和复合辐射,而线状谱主要基于原子谱;太赫兹辐射的机制则主要基于四波混频和瞬态光电流;微波辐射在低频范围以偶极辐射为主,在高频范围以电子向真空发射为主。6 个波段的辐射特性均表明,长波长的电磁辐射与电子、离子的关系更加密切。另外,输入激光的脉冲宽度越窄,等离子体的辐射波长就越短。若要获得某一波段范围的激光等离子体辐射,用对应

于该波长范围内的激光脉冲即可达到目的,如紫外激光可激发出紫外辐射,红外激光可激发出可见或红外等辐射……。激光脉冲能量对辐射光谱的强度也有较大影响,在一定范围内激光能量的增加会引起辐射强度的增加,而对光谱形状的影响较小。所以,要获得某一波段的辐射,不仅要考虑所使用样品物质的特性,还要考虑物质与激光之间的相互作用,只有合理选择适当的激光类型才有可能获得理想的结果。

另外,外部环境压强、辐射强度、能量转换效率、激光与物质作用过程等也会对辐射特性产生影响。从等离子体辐射的角度来看,一种物质所产生的等离子体辐射并非只限于一个波段,根据实验条件的不同有可能存在着多个波段的辐射。不同的物质在单一波段内的辐射光谱也有所不同,这一点可用于激光诱导击穿光谱技术。

对于本文中所总结的激光等离子体 6 个波段的辐射特性,可以认为,红外波段和太赫兹波段的研究和应用价值较高,具体的理由如下所述。

(1)安全方面。要产生 X 射线、紫外波段等较短波长的辐射,通常需要较高的输入激光能量,而高功率的激光器极容易造成元件损伤。另外,高功率激光诱导等离子体所产生的 X 射线和紫外辐射对人体而言属于有害辐射,不如红外和太赫兹辐射相对安全。

(2)应用价值方面。激光等离子体辐射特性的研究可分为激光等离子体辐射光谱特性的研究和激光等离子体所产生辐射的应用研究。激光等离子体所发出辐射的波段虽不尽相同,但各个波段的辐射光谱特性在某些场合下可能较为类似。另外,微波波段的激光等离子体辐射的信息不甚充分,而红外和太赫兹辐射却具有丰富的光谱信息,在鉴别物质领域用途广泛;在穿透成像领域,太赫兹波的低能性和高穿透性也能够用于取代对人体伤害较大的 X 射线。

(3)成本方面。产生 X 射线和紫外等短波长辐射常需要高功率的激光器,探测短波长辐射也需要相应的探测器,一般情况下,短波长的高功率激光器和辐射探测器的价格都比较昂贵,这将导致相关的应用成本很高。

综上所述,作者认为红外波段和太赫兹波段具有较大的潜在应用价值,值得投入资源进行深入而广泛的研究。

总的来说,目前仍缺乏系统而完善的理论体系来描述激光等离子体辐射特性的机制,尚不能清晰地描述辐射的全过程,更不能对激光等离子体辐射的

产生进行控制。期望在研究人员的不懈努力下,能够使激光诱导等离子体辐射得到更加深入而广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] BEILIS I I. Laser plasma generation and plasma interaction with ablative target[J]. *Laser and Particle Beams*, 2007, 25(1): 53-63.
- [2] GIACOMO A D, DELL'AGLIO M, GAUDIUSO R, *et al.* Effects of the background environment on formation, evolution and emission spectra of laser-induced plasmas[J]. *Spectrochimica Acta*, 2012, B78: 1-19.
- [3] FREEMAN J R, HARILAL S S, DIWAKAR P K, *et al.* Comparison of optical emission from nanosecond and femtosecond laser produced plasma in atmosphere and vacuum conditions[J]. *Spectrochimica Acta*, 2013, B87: 43-50.
- [4] CHAUDHARY K, RIZVI S Z H, ALI J. Laser-induced plasma and its applications [C]//*Plasma Science and Technology-Progress in Physical States and Chemical Reaction*. Durham, USA: Instrument Society of America, 2016: 259-291.
- [5] WANG X F, PACHTMAN A, XU Zh Zh, *et al.* Laser plasma X-ray emission from 5 to 200 [J]. *Acta Physica Sinica*, 1990, 39(6): 922-926(in Chinese).
- [6] GIULIETTI D, GIZZI L A. X-ray emission from laser-produced plasmas[J]. *Rivista Del Nuovo Cimento*, 1998, 21(10): 1-89.
- [7] CANNAVÒ A, TORRISI L, CECCIO G, *et al.* Characterization of X-ray emission from laser generated plasma[C]//*Plasma Physics by Laser and Application*. Paris, France: Edition Diffusion Press Science, 2018, 167:03004.
- [8] KOROLIOV A, REKLAITIS J, VARSOCKAJA K, *et al.* X-ray pulse emission of alkali metal halide salts irradiated by femtosecond laser pulses[J]. *Applied Physics*, 2020, B126(144): 1-7.
- [9] LOKASANI R, ARAI G, KONDO Y, *et al.* Soft X-ray emission from molybdenum plasmas generated by dual laser pulses[J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(19):194103.
- [10] WEGRZYNSKI Ł, BARTNIK A, WACHULAK P, *et al.* Laser-produced plasma soft X-ray source based on an aerosol target[J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27(7): 073102.
- [11] WU T, HIGASHIGUCHI T, LI B W, *et al.* Spectral investigation of highly ionized bismuth plasmas produced by subnanosecond Nd:YAG laser pulses [J]. *Journal of Physics*, 2016, B49(3): 035001.
- [12] LI B W, OTSUKA T, SOKELL E, *et al.* Characteristics of laser produced plasmas of hafnium and tantalum in the 1-7 nm region[J]. *The European Physical Journal*, 2017, D71: 278.
- [13] YIN L, WANG H Ch, REAGAN B A, *et al.* 6.7-nm emission from Gd and Tb plasmas over a broad range of irradiation parameters using a single laser[J]. *Physical Review Applied*, 2016, 6(3): 034009.
- [14] HARA H, ARAI G, KONDO Y, *et al.* Characteristics of the soft X-ray emission from laser-produced highly charged platinum plasmas [J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(6): 066201.
- [15] HE J, WU T, YANG L. Study on ultraviolet radiation characteristics of pulse laser-induced hafnium plasma[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(19): 191402(in Chinese).
- [16] ZHONG F Ch, DENG J, ZHANG Zh Q, *et al.* Characteristic of plasma X-ray emission generated by femtosecond and nanosecond laser pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, 19(3): 364-368(in Chinese).

- inese).
- [17] MURNANE M M, KAPTEYN H C, ROSEN M D, *et al.* Ultrafast X-ray pulses from laser-produced plasmas[J]. *Science*, 1991, 251(4993): 531-536.
 - [18] CHEN Sh Sh, LI Y L, XU Zh Zh, *et al.* Soft X-ray emission from 1.06 μ m laser plasmas and its atomic number dependence[J]. *Acta Optica Sinica*, 1992, 12(1): 27-32(in Chinese).
 - [19] RYAZANTSEV S N, SKOBELEV I Y, FILIPPOV E D, *et al.* Precise wavelength measurements of potassium He- and Li-like satellites emitted from the laser plasma of a mineral target[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2021, 6(1): 014402.
 - [20] GUO Y B, PAN Sh F. Study of soft X-ray pulses from a repetitively laser-produce plasma[J]. *Chinese Journal of Light Scattering*, 1997, 9(1): 17-23(in Chinese).
 - [21] PHUOC K T, ROUSSE A, PITTMAN M, *et al.* X-ray radiation from nonlinear Thomson scattering of an intense femtosecond laser on relativistic electrons in a helium plasma[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 91(19): 195001.
 - [22] ZHAO T Z, BATSON T, HOU B, *et al.* Characterization of hard X-ray sources produced via the interaction of relativistic femtosecond laser pulses with metallic targets[J]. *Applied Physics*, 2019, B125(8): 1-9.
 - [23] FILIPPOV E D, MAKAROV S S, BURDONOV K F, *et al.* Enhanced X-ray emission arising from laser-plasma confinement by a strong transverse magnetic field[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 8180.
 - [24] KRYGIER A, KEMP G E, COPPARI F, *et al.* Optimized continuum X-ray emission from laser-generated plasma[J]. *Applied Physics Letters*, 2020, 117(25): 251106.
 - [25] VERSOLATO O O. Physics of laser-driven tin plasma sources of EUV radiation for nanolithography[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2019, 27(7): 102923.
 - [26] WU T, WANG X B, WANG Sh Y, *et al.* Characteristics of extreme ultraviolet emission from tin plasma using CO₂ laser for lithography[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(7): 1729-1733(in Chinese).
 - [27] SU M G, MIN Q, CAO S Q, *et al.* Evolution analysis of EUV radiation from laser-produced tin plasmas based on a radiation hydrodynamics model[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 45212.
 - [28] WANG J W, WANG X B, ZUO D L. Investigation of plume of laser-induced discharge plasma[J]. *Laser Technology*, 2020, 44(2): 173-177(in Chinese).
 - [29] WANG J W, WANG X B, ZUO D L, *et al.* Characteristics of discharge and beyond extreme ultraviolet spectra of laser induced discharge gadolinium plasma[J]. *Optics and Laser Technology*, 2021, 138: 106940.
 - [30] LI Zh G, DOU Y P, XIE Zh, *et al.* Research on characteristics of extreme ultraviolet emission from laser produce plasma on structured Sn target[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(16): 1601005(in Chinese).
 - [31] SHIMADA Y, NISHIMURA H, NAKAI M, *et al.* Characterization of extreme ultraviolet emission from laser-produced spherical tin plasma generated with multiple laser beams[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(5): 051501.
 - [32] WU L Zh, SHEN R Q, XU J, *et al.* Ultraviolet spectroscopic study of laser-induced Cu plasmas[J]. *Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2010, 27(1): 117-122(in Chinese).
 - [33] ZHENG P Ch, LIU H D, WANG J M, *et al.* Study on time evolution process of laser-induced aluminum alloy plasma[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(10): 1015001(in Chinese).
 - [34] WU L, SU M G, MIN Q, *et al.* Analysis of extreme ultraviolet spectral profiles of laser-produced Cr plasmas[J]. *Chinese Physics*, 2019, B28(7): 075201.
 - [35] BAKHIET M, SU M G, CAO Sh Q, *et al.* Analysis of ion radiation characteristics in the middle and late stages of laser-produced Cd plasma evolution in vacuum[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative*, 2021, 263: 107535.
 - [36] BALKI O, RAHMAN M M, ELSAYED-ALI H E. Optical emission spectroscopy of carbon laser plasma ion source[J]. *Optics Communications*, 2018, 412: 134-140.
 - [37] BUTORIN P S, ZADIRANOV Y M, ZUEV S Y, *et al.* Absolutely calibrated spectrally resolved measurements of Xe laser plasma radiation intensity in the EUV range[J]. *Technical Physics*, 2018, 63(10): 1507-1510.
 - [38] VINOGRADOV A V, SHLYAPTSEV V N. Amplification of ultraviolet radiation in a laser plasma[J]. *American Institute of Physics*, 1983, 13(11): 1511-1514.
 - [39] RADZIEMSKI L, CREMERS D A, BENELLI K, *et al.* Use of the vacuum ultraviolet spectral region for laser-induced breakdown spectroscopy-based Martian geology and exploration[J]. *Spectrochimica Acta*, 2005, B60(2): 237-248.
 - [40] LI X Y, LIN Zh X, LIU Y Y, *et al.* Spectroscopic study on the behaviors of the laser-induced air plasma[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(8): 1051-1057(in Chinese).
 - [41] LIN Zh X, WU J Q, GONG Sh Sh. Spectroscopic study on the time-evolution behaviors of the laser-induced N₂ plasma[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2005, 3(1): 22-26(in Chinese).
 - [42] LIU X L, SUN Sh H, CAO Y, *et al.* Experimental study on the behaviors of femtosecond-laser-induced low-pressure N₂ plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(4): 045201(in Chinese).
 - [43] ZHANG L W, LIN Ch, XIN L, *et al.* New remote sensing system: White-light LiDAR[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(10): 1603-1608(in Chinese).
 - [44] HAFEZ M A, KHEDR M A, ELAKSHER F F, *et al.* Characteristics of Cu plasma produced by a laser interaction with a solid target[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2003, 12(3): 185-198.
 - [45] WANG L, ZHOU Y, GONG H, *et al.* Effect of sample temperature on radiation characteristics of laser-induced Cu plasma[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2020, 15(2): 110-116(in Chinese).
 - [46] FILHO C I S, OLIVEIRA A L, PEREIRA S C F, *et al.* Bright thermal (blackbody) emission of visible light from LnO₂ (Ln=Pr, Tb), photoinduced by a NIR 980nm laser[J]. *Dalton Transactions*, 2019, 48(8): 2574-2581.
 - [47] ABBAS Q A. Effect of target properties on the plasma characteristics that produced by laser at atmospheric pressure[J]. *Iraqi Journal of Science*, 2019, 60(6): 1251-1258.
 - [48] TRAUTNER S, JASIK J, PARIGGER C G, *et al.* Laser-induced optical breakdown spectroscopy of polymer materials based on evaluation of molecular emission bands[J]. *Spectrochimica Acta*, 2017, A 174: 331-338.

- [49] HARILAL S S, SKRODZKI P J, MILOSHEVSKY A, *et al.* On- and off-axis spectral emission features from laser-produced gas breakdown plasmas[J]. *Physics of Plasma*, 2017, 24(6): 063304.
- [50] KAUTZ E J, YEAK J, BERNACKI B E, *et al.* The role of ambient gas confinement, plasma chemistry, and focusing conditions on emission features of femtosecond laser-produced plasmas[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2020, 35(8): 1574-1586.
- [51] RADZIEMSKI L J, CREMERS D A, BOSTIAN M, *et al.* Laser-induced breakdown spectra in the infrared region from 750 to 2000nm using a cooled InGaAs diode array detector[J]. *Applied Spectroscopy*, 2007, 61(11): 1141-1146.
- [52] JELINKOVA H, DOROSHENKO M E, OSIKO V V, *et al.* Dysprosium thioallate laser: Source of mid-infrared radiation at 2.4, 4.3, and 5.4 μm [J]. *Applied Physics*, 2016, A122(8): 1-8.
- [53] WANG X Sh, SONG X W, GAO X, *et al.* The effect of air pressure on the IR spectral emission from laser induced air plasma[J]. *Optics Communications*. 2020, 456: 124603.
- [54] WANG X Sh, MA Y M, GAO X, *et al.* Near infrared characteristics of air plasma induced by nanosecond laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(2): 029502(in Chinese).
- [55] WANG X Sh, YUAN L X, LI X, *et al.* The IR radiation characteristics of nanosecond pulsed laser induced air plasma[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(9): 2698-2701 (in Chinese).
- [56] CIVIS S, FERUS M, KUBELIK P, *et al.* Potassium spectra in the 700-7000 cm^{-1} domain: Transitions involving f-, g-, and h-states [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 541(A125): 1-10.
- [57] THOMSON M D, KRE M, LOFFLER T, *et al.* Broadband THz emission from gas plasmas induced by femtosecond optical pulses: From fundamentals to applications [J]. *Laser & Photon*, 2007, 1(4): 349-368.
- [58] LIAO G Q, LI Y T. Review of intense terahertz radiation from relativistic laser-produced plasmas[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(6): 1-7.
- [59] LI X H, ZHOU H B, ZOU D B. Study of ultra-intense laser driven solid line emitting terahertz wave [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0314003(in Chinese).
- [60] PETROV G M, DAVIDSON A, ROCK B, *et al.* Broadband terahertz radiation from metal targets irradiated by a short pulse laser [J]. *Physics Plasmas*, 2020, 27(1): 013109.
- [61] WANG T Z, LEI H Y, SUN F Zh, *et al.* Experimental study of terahertz radiation driven by femtosecond ultraintense laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2021, 70(8): 085205(in Chinese).
- [62] HERZER S, WOLDEGEORGIS A, POLZ J, *et al.* An investigation on THz yield at relativistic laser intensities from laser-produced solid density plasmas[J]. *New Journal of Physics*, 2018, 20: 063019.
- [63] DAI J M, LIU J G, ZHANG X C. Terahertz wave air photonics: Terahertz wave generation and detection with laser-induced gas plasma[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2011, 17(1): 183-190.
- [64] SHKURINOV A L P, SINKO A S, SOLYANKIN P M, *et al.* Impact of the dipole contribution on the terahertz emission of air-based plasma induced by tightly focused femtosecond laser pulses [J]. *Physical Review*, 2017, E95(4): 043209.
- [65] WANG T J, MARCEAU C, YUAN S, *et al.* External focusing effect on terahertz emission from a two-color femtosecond laser-induced filament in air[J]. *Laser Physical Letters*, 2011, 8(1): 57-61.
- [66] LI N, BAI Y, LIU P. Frequency control of the broadband ultrashort terahertz source generated from the laser induced plasma by two-color pluses[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(11): 110701(in Chinese).
- [67] ANDREEVA V A, KOSAREVA O G, PANOV N A, *et al.* Ultra-broad terahertz spectrum generation from an air-based filament plasma[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(6): 063902.
- [68] THIELE I, MARTINEZ P G D A, NUTER R, *et al.* Broadband terahertz emission from two-color femtosecond-laser-induced microplasmas[J]. *Physical Review*, 2017, A96(5): 053814.
- [69] 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.
- [70] LUBENKO D M, PROKOPEV V E, ALEKSEEV S V, *et al.* Control of THz radiation divergence in laser filaments[J]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2019, 32(4): 430-433.
- [71] USHAKOV A, CHIZHOV P, BUKIN V, *et al.* Multiple filamentation effects on THz radiation pattern from laser plasma in air[J]. *Photonics*, 2021, 8(4): 1-8.
- [72] BAKHTIARI F, GOLMOHAMMADY S, YOUSEFI M, *et al.* Terahertz radiation generation and shape control by interaction of array Gaussian laser beams with plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23(12): 123105.
- [73] VAICAITIS V, BALACHNINAITE O, MORGNER U, *et al.* Terahertz radiation generation by three-color laser pulses in air filament [J]. *Journal Applied Physics*, 2019, 125(17): 173103.
- [74] DORRANIAN D, GHORANNEVISS M, STARODUBTSEV M, *et al.* Microwave emission from TW-100 fs laser irradiation of gas jet [J]. *Laser and Particle Beams*, 2005, 23(4): 583-596.
- [75] NAKAJIMA H, SHIMADA Y, SOMEKAWA T, *et al.* Nondestructive sensor using microwaves from laser plasma by subnanosecond laser pulses[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009, 6(4): 718-722.
- [76] MIRAGLIOTTA J A, BRAWLEY B, SAILOR C, *et al.* Detection of microwave emission from solid targets ablated with an ultrashort pulsed laser[J]. *Proceedings of the SPIE*, 2011, 8037: 1-8.
- [77] ZVORYKIN V D, LONIN A A, LEVCHENKO A O, *et al.* Directed transfer of microwave radiation in slidingmode plasma waveguides produced by ultraviolet laser in atmospheric air[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(31): 131-140.
- [78] STEPHAN K D, GARZA A E D L, HUA Y. Dispersion and attenuation characteristics of steady-state microwave plasma waveguide[J]. *AIP Advances*, 2020, 10(4): 045036.
- [79] CHEN Z Y, LI J F, LI J, *et al.* Microwave radiation mechanism in a pulse-laser-irradiated Cu foil target revisited[J]. *Physica Scripta*, 2011, 83(5): 055503.
- [80] JIANG W M, LI Y T, ZHANG Zh, *et al.* Effect of laser intensity on microwave radiation generated in nanosecond laser-plasma interactions [J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(12): 125201(in Chinese).
- [81] KULYGIN M, DENISOV G. Nanosecond laser-driven semiconductor switch for 70GHz microwave radiation[J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2012, 33: 638-648.