

文章编号: 2095-4980(2016)05-0661-07

太赫兹宽谱源的研究进展

李依凡^{1,2,3}, 王雪敏^{2,3*}, 曹林洪^{1,3}, 王新明², 熊政伟^{1,3}, 沈昌乐², 彭丽萍²,
赵妍², 黎维华², 邓青华², 吴卫东^{2,3}

(1.西南科技大学 材料科学与工程学院, 四川 绵阳 621010;

2.中国工程物理研究院 激光聚变研究中心 等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621999;

3.西南科技大学-中国工程物理研究院 激光聚变研究中心极端条件物质特性联合实验室, 四川 绵阳 621010)

摘要: 太赫兹宽谱源是指能够产生较宽频谱覆盖范围的太赫兹辐射源, 近年来其相关研究受到越来越多的关注。太赫兹宽谱具有能量低, 穿透性强和频谱覆盖范围宽等优点, 在生物和医学成像、安全检查、化学成分分析等领域具有很大的潜在应用价值, 因此研究太赫兹宽谱源对于推动上述领域的进步具有重要的科学意义。本文基于光学辐射源、电子学辐射源、热辐射源这3种太赫兹宽谱源, 从产生机理、研究进展以及未来发展趋势对这3种方法进行分析和总结, 对比了各自的优、缺点和应用范围。

关键词: 太赫兹; 光学; 电子学; 热辐射

中图分类号: TN911.72; O441.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201605.0661

Research progress of the broadband terahertz source

LI Yifan^{1,2,3}, WANG Xuemin^{2,3*}, CAO Linhong^{1,3}, WANG Xinming², XIONG Zhengwei^{1,3}, SHEN Changle²,
PENG Liping², ZHAO Yan², LI Weihua², DENG Qinghua², WU Weidong^{2,3}

(1.School of Materials Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China;

2.Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China; 3.Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties(Southwest University of Science and Technology-Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics), Mianyang Sichuan 621010, China)

Abstract: Broadband Terahertz(THz) source can generate a broad THz spectrum, which has been paid more and more attention in recent years. Broadband THz wave has the advantages of low energy, strong penetrability and broadband frequency, which indicates great potential applications in the fields of biological and medical imaging, security check, chemical analysis and so on. In this paper, three broadband THz sources of optical radiation source, electronics radiation source and heat radiation source are analyzed and summarized according to the mechanism of generation, research progress and future development trends. The advantages and application ranges are contrasted as well.

Key words: terahertz; optical; electronics; heat radiation

太赫兹波(THz Wave)是指频率在 0.1 THz~10 THz 范围内的电磁波, 波长在 30 μm ~3 mm 之间, 也称为亚毫米波, 见图 1^[1]。太赫兹波具有很多独特的性质, 比如低能性、高穿透性、宽带性、瞬态性、相干性以及吸水性等。太赫兹光子能量为 4.1 meV, 是 X 射线光子能量的几百万分之一, 因此太赫兹辐射不会导致物质光致电离而破坏被检测物, 非常适合于针对人体或其他活体物质进行检测。太赫兹波对许多介电材料和非极性物质具有良好的穿透性, 可对不透明物体进行透视成像, 是 X 射线成像和超声波成像的有效互补手段, 适合于安检和质检过程中的无损检测。单个太赫兹脉冲的脉冲宽度在皮秒量级, 其相应频带可以覆盖从几百 GHz 至几个 THz 的宽频率范围, 因此太赫兹光谱能够获得物质更丰富的光谱信息。太赫兹脉冲具有很高的时间分辨力, 可以进行瞬态

收稿日期: 2015-09-16; 修回日期: 2015-11-18

基金项目: 国防预先研究项目; 国家自然科学基金资助项目(11404302); 中国工程物理研究院发展基金资助项目(2015B0403095); 西南科技大学重点科研平台专职科研创新团队建设基金资助项目(14tdjk04)

*通信作者: 王雪敏 wangxuemin75@sina.com

光谱研究。太赫兹光谱相干测量技术能够直接测量太赫兹波的时域电场,通过傅里叶变换后能够同时确定太赫兹脉冲电场在频域的振幅和相位信息,对于材料光学性质的分析具有极大的帮助^[2]。

太赫兹宽谱源作为一种重要的太赫兹源,目前没有标准的定义。其研究进展在很大程度上决定了太赫兹技术的应用前景和发展潜力,因此研究太赫兹宽谱源很有意义。见图2,太赫兹宽谱源按产生机理不同可分为3类:a)光学辐射源是通过激光照射基底材料辐射太赫兹波,如光电导法、光整流法、非线性光混频法以及使用气体激光器、半导体激光器等,其特点是可得到频谱范围较宽的太赫兹辐射,但是所用设备体积较大,不便携;b)电子学辐射源是通过电子振荡辐射产生,如使用自由电子激光器、返波管、耿式振荡器以及肖特基二极管产生,其特点是所用设备一般体积较小,结构紧凑,但是辐射频率较低,多在1 THz左右;c)热辐射源是发光物体在热平衡状态下,使热能转变为光能的光源^[2],如白炽灯、汞灯、SiC棒和金属丝。此方法的特点是热辐射源易得,设备结构简单,便携,其产生的光谱范围在十几个THz,输出功率较低。

1 近十年太赫兹宽谱源的研究进展

1.1 产生太赫兹宽谱的光学辐射源

该部分主要从光学辐射源产生太赫兹宽谱的作用机理、目前的研究进展和未来发展趋势3个方面进行介绍。

1.1.1 光学辐射源的作用机理

目前,用于产生太赫兹宽谱的几类激光器工作原理是相同的,都是基于不同能级之间的跃迁。激光器系统包括增益媒质、激光腔和泵浦。不同的受激辐射过程决定了激光器的类型。受激辐射的跃迁速率 $w_{1 \rightarrow 2}$ 随入射光强 $I(\omega)$ 线性增大, c_2 为光速, E 为发射谱强度, ω 为角速度。光通过高反镜被束缚于激光腔内,由式(1)可知:光束束缚作用加速了受激辐射过程,从而导致腔内辐射强度的放大。

$$w_{1 \rightarrow 2} \propto |c_2^{(1)}|^2 \propto |E(\omega)|^2 \propto I(\omega) \quad (1)$$

飞秒激光器可产生超短光脉冲,利用飞秒激光脉冲激发不同的材料而产生太赫兹辐射发展最早且最成熟的2种机制是光电导和光整流。

在线性色散媒质中,太赫兹脉冲传播用高斯波形来表示。高斯脉冲电场在线性媒质中的瞬态强度为:

$$I(t) = \frac{1}{2} \epsilon_0 c n |E(t)|^2 = \frac{1}{2} \epsilon c n E_0^2 e^{-2a_0 t^2} \quad (2)$$

式中: ϵ_0 为自由空间的介电常数; c 为自由空间的光速; n 为媒质的折射率。

在非线性媒质中,假定太赫兹波在一个线性极化的光平面沿 z 轴传播,其场强度为:

$$E_T(z, t) = A l \left[1 - 4a \left(t - \frac{z}{v_0} \right)^2 \right] \exp \left[-2a \left(t - \frac{z}{v_0} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中: $E_T(z, t)$ 为场辐射强度; A 为常数; v_0 为传播速度; t 为传播时间; a 为参数。太赫兹场幅度正比于长度 l 。

对于一个厚度有限的媒质,在深度 l 的表面附近产生的辐射将存留下来,显然高效太赫兹产生要求非线性媒质必须具有长的走离长度,同时媒质厚度须短于走离长度^[1]。

1.1.2 光学辐射源的研究进展

光学辐射源目前常用的研究方法有光电导法、光整流法、非线性光混频法以及气体激光器、半导体激光器、自由电子激光器等。

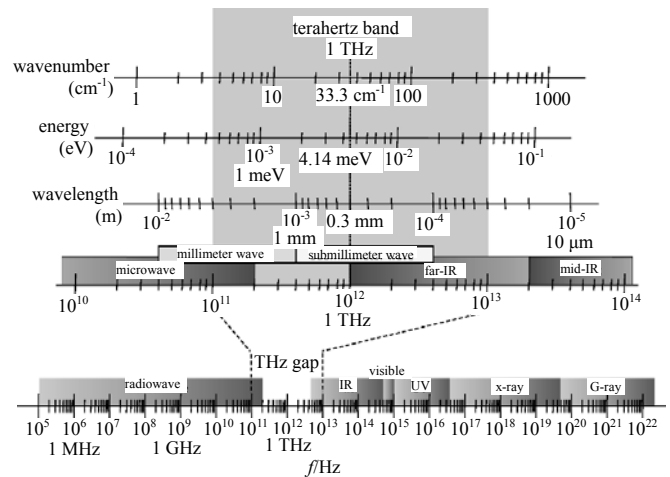


Fig.1 Terahertz band in the electromagnetic spectrum

图1 电磁频谱中的太赫兹波段

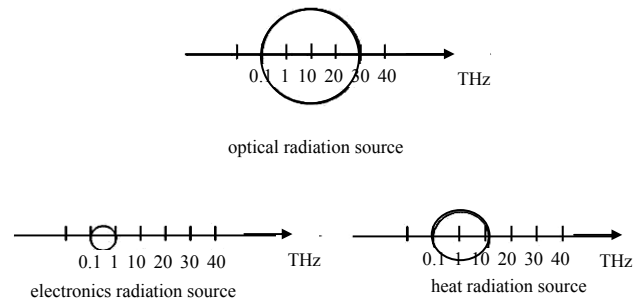


Fig.2 THz spectral bandwidth of different methods

图2 不同方法辐射太赫兹频谱范围

20 世纪 70 年代 AUSTON 等^[3]和 LEE 等^[4]分别利用高阻硅和半绝缘砷化镓做基底材料,实现样品的光电导开关化。光电导天线对太赫兹的辐射功率和调谐范围有很大的影响,而光电导天线的性能主要取决于基底材料、电极几何结构和激发光源^[5-6]。因此在光电导产生宽谱太赫兹的发展中主要是寻找更加优良的基底材料^[7-9],更加合理的电极结构^[10-13]和更有效率的激发光源^[14]。2003 年,LIU 等^[15]从理论和实验证明了低温的砷化镓可以辐射出频带更宽的太赫兹,这是因为晶体内部存在大量的缺陷,从而导致价带和导带之间形成大量的中空能带,缩短了载流子寿命,辐射出更宽频率的太赫兹。由此而引发了人们对缺陷晶体辐射太赫兹宽谱的思考,比如 2008 年和 2009 年,CHOU 等^[7]和 LI 等^[8]分别发现了通过掺杂、改变辐照条件和温度等方法来改善基底材料,使得辐射的频带宽度可以达到 30 THz。目前常用作基底材料的有 LT-GaAs, RD-SOS, Cr-GaAs, InP 和非晶硅^[16-19]。

基于非线性介质(如 ZnTe, GaAs, LiNbO₃, LiTaO₃ 和有机晶体 DAST)^[20-24]的光整流法也迅速发展。光整流法产生太赫兹辐射的能量直接来源于激光脉冲的能量,它的转换效率主要依赖于材料的非线性系数和相位匹配条件。S.KONO 等 2000 年在多种相位匹配角度下,利用 10 fs 脉冲激光作用在 90 μm 厚的 GaSe 晶体上产生了超宽太赫兹脉冲。小相位匹配角(θ 为 2° 和 25°)所产生的太赫兹频谱覆盖了 0.1 THz~40 THz 的宽频带范围,其中 6.4 THz 声子谐振附近的带隙约为 2 THz^[23]。为了提高转化效率,2006 年 DING 等利用 GaP 晶体相位匹配差频,产生波长调谐范围为 71.1 μm ~2 830 μm 太赫兹宽谱,其最高功率可达 15.6 W^[20,24]。然而为了产生频谱范围可调谐的太赫兹宽谱,2014 年 LI 等^[22]通过应用切伦科夫相位匹配模型,用表面型 MgO:LiNbO₃ 晶体产生 THz 辐射,通过改变入射波长和入射角度改变太赫兹的输出频谱范围。

半导体激光器的发展,克服了早期利用超短激光脉冲产生低功率、窄波段太赫兹辐射的问题。2005 年, MATTHA 等^[25]首次提出了在 InAs 表面利用 1 060 nm 的激光源产生太赫兹宽谱,此激光器使用的是抛物型光纤放大器,这种发射器使得所产生的太赫兹波段从 100 GHz 扩展到 2.5 THz。为了得到调谐频率范围更宽的太赫兹辐射,2012 年 SCHELLER 等^[26]设计了另一种新型的激光器,这种激光器的设计原理是基于腔内差频^[27-29]产生太赫兹辐射,结构是垂直外腔面发射,从而利用优质的内流通道,获得了更为高效的太赫兹宽谱。等离子激光器的发展,使获取可控频率范围的宽谱太赫兹辐射成为了可能。2012 年, JANG 等^[30]通过 PIC 仿真模拟确定产生强太赫兹辐射的可能性,并用激光驱动具有密度梯度的等离子体,控制输出光谱范围。

1.1.3 光学辐射源的发展趋势

光电导天线可用于产生超宽带太赫兹脉冲,然而可利用的频谱范围却小于光整流产生的脉冲频谱范围;相比于光电导法,光整流法产生的太赫兹频率较高,频谱宽度较宽,由于非线性晶体具有较高的吸收性,所以利用光整流法产生的太赫兹能量较弱^[31]。可以产生频率可调谐的宽谱太赫兹激光器,如量子级联激光器和等离子体激光器,已应用到研究中。目前,价格低廉,结构紧凑,输出频谱宽的太赫兹辐射源是研究的焦点。

1.2 产生太赫兹宽谱的电子学辐射源

该部分主要从电子学辐射源产生太赫兹宽谱的作用机理、目前的研究进展和未来发展趋势 3 个方面进行介绍。

1.2.1 电子学辐射源的作用机理

电子学辐射源是通过电子振荡产生太赫兹辐射,如电子加速器;反向波振荡器(Backward Wave Oscillator, BWOs),亦称作返波管。

1.2.2 电子学辐射源的研究进展

电子学产生太赫兹方法的研究开始于 20 世纪 60 年代, Gunn^[28]研究小组在砷化镓中发现了耿氏振荡,开启了电子学产生太赫兹的研究工作。随后,1971 年 MADEY 等^[29]利用周期磁场产生了电子的受激韧致辐射,自此电子学辐射源得到快速发展^[32-33]。电子加速器由于具有高亮度和宽可调度的特征,是一种极好的光源,然而目前电子加速器产生的太赫兹调谐范围较窄,输出功率也很低,所应用的范围有限,需要探索其他结构紧凑,成本低,输出频谱宽的太赫兹辐射源。

利用 BWOs 产生太赫兹辐射是另一种重要的电子学方法。2001 年, KOROLEV 等基于叉指慢波结构和多光束构造了 BWOs。然而,利用此方法产生的太赫兹辐射的输出功率仅有几个 mW。随着微加工技术的进步,太赫兹宽谱范围的新一代真空电子装置得到快速发展^[34-36]。2008 年, TUCEK 等利用一种微型折叠波导产生的太赫兹辐射频率为 650 GHz,辐射功率为 52 mW。为了研究折叠波导产生的作用机理,2010 年高鹏等^[37]通过对此系统的物理模型进行模拟和分析,对产生特定频率的太赫兹辐射提供了理论依据。一直以来,器件的功率容量和加工难度是 BWOs 所需要克服的难题。2013 年 TAKEYA 等^[38]和西北核技术研究所^[39]先后很好地解决了以上难题,他们采用表面波振荡器(Surface-Wave Oscillator)和过模结构来产生太赫兹信号。该结构产生了 0.34 THz 的辐射频率,功率高达 7.8 MW。总的来说,基于传统真空电子学方法的返波振荡器的应用仍然局限在低频太赫兹波段,

其主要的制约因素是极高的起振电流密度远远超过了现有阴极的电子注发射能力。为此, 2012 年电子科技大学的刘维浩等^[40]通过周期加载波导中的匀速带电粒子产生太赫兹辐射, 这一新方法避开了起振电流这一制约传统真空电子学太赫兹辐射源发展的首要障碍, 有望发展成为覆盖整个太赫兹频段的电磁辐射源。2010 年, OTSUJI 等^[41]实现了在半导体纳米异质结构中利用二维电子气产生宽谱太赫兹辐射。

1.2.3 电子学辐射源的发展趋势

利用电子学方法可得到高功率的太赫兹辐射, 但是辐射频率低, 一般在几个 THz 左右。反向波振荡器作为一种实验室型仪器, 相比于激光器辐射源结构紧凑, 体积小, 便携。目前通过改善波导管的结构产生频谱范围更宽的太赫兹辐射源是研究的重点, 然而由于技术原因, 限制了波导管内部的结构优化, 阻碍了宽谱太赫兹辐射的产生。因此, 电子学的方法更适用于高功率太赫兹辐射的应用和研究。

1.3 产生太赫兹宽谱的热辐射源

该部分主要从热辐射源产生太赫兹宽谱的作用机理、目前的研究进展和未来发展趋势 3 个方面进行介绍。

1.3.1 热辐射源的作用机理

由于太赫兹波段处于微波和可见光之间, 与红外波段重合, 可以利用热辐射源产生红外光再通过傅里叶光谱变换得到太赫兹波。傅里叶光谱法是利用干涉图和光谱图之间的对应关系, 通过测量干涉图并对干涉图进行傅里叶变换得到光谱图。任何发光物体都可作为光源探测太赫兹宽谱, 如太阳、白炽灯、钨灯、汞灯以及目前国内首次发现的金属丝。利用发光物体在热平衡下, 使热能转变为光能辐射电磁波, 对于各种光源的光谱辐射出射度由普朗克公式进行计算:

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left(\exp \frac{hc}{\lambda kT} - 1 \right)^{-1} \quad (4)$$

式中: h 为普朗克常量, $h=6.625\ 6\times 10^{-34}$ J·s; $c=2.997\ 925\times 10^8$ m/s; λ 为入射波波长; $k=1.380\ 54\times 10^{-23}$ J/K; T 为温度。

1.3.2 热辐射源的研究进展

目前国内外利用热辐射源探测太赫兹宽谱还相对较少, 通过热辐射源探测宽谱太赫兹设备简单, 易操作。美国研制出的一种电子控温光源系统, 可以产生波数覆盖 $400\text{ cm}^{-1}\sim 50\text{ cm}^{-1}$ 的太赫兹波。此系统主要包括发射光源、温度可控的光源汇聚镜以及分束器, 这 3 个部件保证了光源从发射开始的准直性到最终变换后得到高强度的宽谱太赫兹波。2013 年乔丽丽等^[42]通过在原有傅里叶变换光谱仪的基础上设计搭建了一套动镜自准直系统, 对超导 HEB(Hot Electron Bolometer)混频器进行测试, 测试结果与理论值相符, 与一般仪器相比测试结果更稳定, 信噪比提高了 45.2%。同年李宏光等利用黑体辐射产生太赫兹辐射, 文中指出太赫兹的辐射量与黑体温度成正比, 但与此同时信噪比也随着黑体的温度升高而增大, 因此选择适当温度的黑体辐射是产生太赫兹宽谱的关键, 当选择温度范围为 223 K~273 K, 黑体在 $100\ \mu\text{m}\sim 3\ 000\ \mu\text{m}$ 波段相对电压测试曲线与相对辐射量理论曲线变化趋势一致, 误差范围为 1%~2%^[43], 说明黑体辐射源产生了太赫兹宽谱。利用金属产生太赫兹辐射是近年来新发现的一种产生太赫兹宽谱的机制, 金属产生太赫兹辐射的具体机制和超连续谱产生机制一样, 没有明确的定论, 大多数解释金属材料产生太赫兹的关键因素是金属中的自由电子, 这是因为光与金属相互作用主要是光电场与金属的导带中自由电子之间的相互作用^[44-45]。近来, 实验发现 FeCrAl 合金丝可以产生太赫兹宽谱^[46], 将合金丝绕成环状, 通入电流, 加热灯丝使其发光, 通过傅里叶变换光谱仪可以探测到太赫兹频谱的覆盖范围为 $3\text{ THz}\sim 12\text{ THz}$ ^[47-49], 是国内首次利用金属丝产生太赫兹宽谱, 为今后的研究工作提供了很好的实验基础和理论依据。

1.3.3 热辐射源的发展趋势

利用热辐射源探测宽谱太赫兹的仪器简单, 易操作, 但该方法得到的光谱范围覆盖广, 太赫兹波段不易测得, 且测得的能量强度偏低。所以探测具有准直性、汇聚功能的光源, 以及使测得的太赫兹波段与其他波段分离的技术, 是热辐射源探测太赫兹宽谱今后研究的重点。

2 结语

本文对近十年来产生太赫兹宽谱的光学辐射源、电子学辐射源以及热辐射源的研究进展作了简要的分析和概述。结果表明: 在光学辐射源中, 如光电导和光整流机制克服了基底材料对脉冲能量的吸收, 并利用波导耦合效应提高了太赫兹辐射的转化效率。光学辐射源产生的太赫兹辐射具有宽的调谐频率, 较高的辐射强度, 其调谐范围为 $0.1\text{ THz}\sim 30\text{ THz}$ 。但由于该方法所用装置体积庞大、昂贵、功率消耗大等缺点, 其应用受到限制。电子

学辐射源由于技术条件限制,产生的太赫兹调谐频率只能达到几个 THz,由于其输出功率高,适合于高功率太赫兹辐射输出的研究。热辐射源产生的太赫兹辐射输出频率达到十几个 THz,比电子辐射源产生的太赫兹频谱覆盖范围广。但想要获得高功率的太赫兹宽谱辐射,需要克服光源的发散性、多色性以及能量散失性等缺点。利用热辐射源产生太赫兹宽谱所使用的设备简单,易操作,有望在化学成分分析、安全检查和通信等领域得到广泛应用。

参考文献:

- [1] LEE Yun-Shik. 太赫兹科学与技术原理[M]. 崔万照,译. 北京:国防工业出版社, 2012. (LEE Yun-Shik. Principles of Terahertz Science and Technology[M]. Translated by CUI Wanzhao. Beijing:National Defence Industry Press, 2012.)
- [2] 赵国忠. 太赫兹科学技术研究的新进展[J]. 国外电子测量技术, 2014,33(2):1-20. (ZHAO Guozhong. Progress on terahertz science and technology[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2014,33(2):1-20.)
- [3] AUSTON D. Picosecond optoelectronic switching and gating in silicon[J]. Applied Physics Letters, 1975,26(3):101-104.
- [4] LEE C. Picosecond optoelectronic switching in GaAs[J]. Applied Physics Letters, 1977,30(2):84-87.
- [5] 李福利,任荣东,王新柯,等. 太赫兹辐射原理与若干应用[J]. 激光与红外, 2006,36(B09):785-791. (LI Fuli,REN Rongdong,WANG Xinke,et al. The theory and some applications of terahertz radiation[J]. Laser & Infrared, 2006,36(B09):785-791.)
- [6] 程伟,王迎新,赵自然. 光电导太赫兹源新进展[J]. 激光与红外, 2011,41(6):597-604. (CHENG Wei,WANG Yingxin,ZHAO Ziran. New research progress of photoconductive terahertz source[J]. Laser & Infrared, 2011,41(6):597-604.)
- [7] CHOU Ronehwa,LIU Tzean,PAN Ciling. Analysis of terahertz pulses from large aperture biased semiinsulating and arsenic ion implanted GaAs antennas[J]. Journal of Applied Physics, 2008,104(5):1-7.
- [8] LI Tiejuan,LOU Caiyun,WANG Li. Terahertz wave generation with low-temperature-grown GaAs photoconductive antennas[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009,36(4):978-982.
- [9] 张成国,姚建铨,钟凯,等. 周期极化 GaAs 晶体中差频产生太赫兹辐射的研究[J]. 激光与红外, 2011,41(10):1154-1158. (ZHANG Chengguo,YAO Jianquan,ZHONG Kai,et al. Terahertz sources based on difference frequency generation in quasi-phase-matched GaAs[J]. Laser & Infrared, 2011,41(10):1154-1158.)
- [10] MASAHIKO Tani,YUICHI Hirota,QUE Christopher T,et al. Novel terahertz photo-conductive antennas[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006,27(4):531-546.
- [11] GABOR Matthaues,STEFAN Nolte,HOHMOTH Rico,et al. Microlens coupled interdigital photoconductive switch[J]. Applied Physics Letters, 2008,93(9):091110-1-091110-3.
- [12] SUEN J Y,LI W,TAYLOR Z D,et al. Characterization and modeling of a terahertz photoconductive switch[J]. Applied Physics Letters, 2010,96(14):141103-1-141103-4.
- [13] FUMIAKI Miyamaru,YU Saito,KOHJI Yamamoto,et al. Dependence of emission of terahertz radiation on geometrical parameters of dipole photo-conductive antennas[J]. Applied Physics Letters, 2010,96(21):211104-1-211104-3.
- [14] HUANG Zhen,YU Bin,ZHAO Guozhong,et al. Study on terahertz source of small-aperture bow-tie photoconductive antenna[J]. Laser & Infrared, 2009,39(2):183-193.
- [15] LIU Dongfeng,QIN Jiayin. Carrier dynamics of terahertz emission from low-temperature-grown GaAs[J]. Applied Optics, 2003,18(42):3678-3683.
- [16] SHIBUYA T,SUTSUI T,SUIZU K,et al. Efficient Cherenkov type phase-matched widely tunable THz-wave generation via an optimized pump beam shape[J]. Applied Physics Express, 2009,2(3):032302-1-032302-3.
- [17] CHIMOT N,MANGENEY J. Terahertz radiation from heavy-ion-irradiated In_{0.53}Ga_{0.47}As photoconductive antenna excited at 1.55 μm [J]. Applied Physics Letters, 2005,87(19):193510-1-193510-3.
- [18] SCHWAGMAMN A,ZHAO Z Y. Terahertz emission characteristics of ErAs:InGaAs-based photoconductive antennas excited at 1.55 μm [J]. Applied Physics Letters, 2010,96(14):141108-1-141108-3.
- [19] 贾婉丽,纪卫莉,施卫. 半绝缘 GaAs 光电导开关产生太赫兹波电场屏蔽效应的二维 Monte Carlo 模拟[J]. 物理学报, 2007,56(4):2042-2046. (JIA Wanli,JI Weili,SHI Wei. Two-dimensional Monte Carlo simulation of screening of the bias field in terahertz generation from semi-insulated GaAs photoconductors[J]. Chinese Journal of Physics, 2007,56(4):2042-2046.)
- [20] DING Yujie,DING J,SHI Wei. Efficient THz generation and frequency upconversion in GaP crystals[J]. Solid-State Electronics, 2006,50(6):1128-1136.
- [21] 祝德允. 基于飞秒激光的宽谱高能量太赫兹源的研究[D]. 北京:首都师范大学, 2013. (ZHU Deyun. Study of wide spectrum high energy terahertz source based on femtosecond laser[D]. Beijing:Capital Normal University, 2013.)
- [22] LI Zhongyang,BING Pibin,YUAN Sheng,et al. Investigation on terahertz generation at polariton resonance of MgO:LiNbO₃ by difference frequency generation[J]. Optics & Laser Technology, 2015,69(1):13-16.
- [23] JIANG Y,SHI W. Widely tunable monochromatic THz sources based on phase-matched difference-frequency generation in nonlinear-optical crystal:a novel approach[J]. Laser Physics, 2006,16(4):562-570.

- [24] 黄敬国,陆金星,周炜,等. 磷化镓高功率太赫兹共线差频源的研究[J]. 物理学报, 2013,62(12):120704-1-120704-5. (HUANG Jingguo, LU Jinxing, ZHOU Wei, et al. Investigation of high power terahertz emission in gap crystal based on collinear difference frequency generation[J]. Chinese Journal of Physics, 2013,62(12):120704-1-120704-5.)
- [25] MATTHA G, SCHREIBER T, LIMPET J, et al. Surface-emitted THz generation using a compact ultrashort pulse fiber amplifier at 1 060 nm[J]. Optics Communications, 2006,261(1):114-117.
- [26] SCHELLER Maik, YOUNG Abram G, YARBOROUGH Joe M, et al. Heterodyne detection of intracavity generated terahertz radiation[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2012,3(2):271-277.
- [27] GALLI I, BARTALINI S, BORRI S, et al. Ti:sapphire laser intracavity difference-frequency generation of 30 mW cw radiation around 4.5 μm [J]. Optics Letters, 2010,35(21):3616-3618.
- [28] GUNN J B. Microwave oscillations of current in III-IV semiconductors[J]. Solid State Communications, 1963,1(44):88-91.
- [29] MADEY J M. Stimulated emission of bremsstrahlung in a periodic magnetic field[J]. Journal of Applied Physics, 1971, 42(5):1906-1913.
- [30] JANG Dogeun, KIM Jinju, NAMA Inhyuk, et al. Controlling the spectrum of high-power terahertz radiation from a laser-driven plasma wave[J]. Current Applied Physics, 2012,12(5):1252-1255.
- [31] LI L L, NI J, XU W. Strong terahertz absorption in long-period InAs/GaSb type-II superlattices with inverted band structures[J]. Superlattices and Microstructures, 2015,80(2):1-10.
- [32] 吴岱,李鹏,柏伟,等. 高重复频率相干衍射辐射超宽谱太赫兹源[J]. 强激光与粒子束, 2013,25(7):1775-1778. (WU Dai, LI Peng, BO Wei, et al. High-repetition-rate ultra-broadband coherent diffraction radiation THz source[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013,25(7):1775-1778.)
- [33] ASGEKAR V. Interference effects in super-radiant THz sources[J]. Infrared Physics & Technology, 2014,64(2):26-32.
- [34] 祁春超,欧阳征标. 基于 600 nm~2 000 nm 抽运源的太赫兹相干光源的最新进展[J]. 物理学报, 2011,60(9):090704-1-090704-9. (QI Chunchao, OUYANG Zhengbiao. Latest advances in THz coherent light source pumped by 600 nm~2 000 nm waveband pumped source[J]. Chinese Journal of Physics, 2011,60(9):090704-1-090704-9.)
- [35] ZHANG Le, LI Jiusheng. Design and measurement of all-rod terahertz photonic crystal fiber with air-core[J]. Optics Communications, 2015,344(1):77-80.
- [36] 王亚军,颜胜美,陈樟. 0.22 THz 宽带折叠波导慢波结构的设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(1):14-18. (WANG Yajun, YAN Shengmei, CHEN Zhang. Design of slow-wave structure for 0.22 THz broadband folded waveguide[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(1):14-18.)
- [37] 高鹏, BOOSKE H John, 杨中海, 等. 太赫兹折叠波导行波管再生反馈振荡器非线性理论与模拟[J]. 物理学报, 2010,59(12):8484-8489. (GAO Peng, BOOSKE H John, YANG Zhonghai, et al. Physics and simulation of terahertz folded waveguide traveling wave tube regenerative feedback oscillators[J]. Chinese Journal of Physics, 2010,59(12):8484-8489.)
- [38] TAKEYA Kei, KOJI Suizu, HIRONOBU Sai, et al. Wide spectrum terahertz wave generation from nonlinear waveguides[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2013,19(1):8500212-1-8500212-12.
- [39] 李爽,王建国,童长江,等. 大功率 0.34 THz 辐射源中慢波结构的优化设计[J]. 物理学报, 2013,62(12):120703-1-120703-7. (LI Shuang, WANG Jianguo, TONG Changjiang, et al. Optimization of slow-wave structure in high power 0.34 THz radiation source[J]. Chinese Journal of Physics, 2013,62(12):120703-1-120703-7.)
- [40] 刘维浩,张雅鑫,周俊,等. 偏心电子激励周期加载波导角向非对称模衍射辐射[J]. 物理学报, 2012,61(23):234209-1-234209-10. (LIU Weihao, ZHANG Yaxin, ZHOU Jun, et al. Radiation from the unsymmetrical modes of the periodical waveguide structure excited by eccentric electron beam[J]. Chinese Journal of Physics, 2012,61(23):234209-1-234209-10.)
- [41] OTSUJI T, WATANABE T, El Moutaouakil A, et al. Emission of terahertz radiation from two-dimensional electron systems in semiconductor nano- and hetero-structures[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2011,32(5):629-645.
- [42] 乔丽丽,张鹤,姜寿禄,等. 应用于太赫兹波段的傅里叶变换光谱仪[J]. 低温物理学报, 2013,35(5):360-363. (QIAO Lili, ZHANG He, JIANG Shoulu, et al. Fourier transform spectrometer for THz applications[J]. Chinese Journal of Low Temperature Physics, 2013,35(5):360-363.)
- [43] 李宏光,杨鸿儒,袁良. 黑体的太赫兹辐射特性与测试方法[J]. 激光与光电子学进展, 2013,50(7):071202-1-071202-9. (LI Hongguang, YANG Hongru, YUAN Liang. Terahertz radiation characteristics of blackbody and test method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013,50(7):071202-1-071202-9.)
- [44] 熊伟,姚军,李伟,等. 复合型金属孔周期阵列的 THz 透射特性[J]. 红外与毫米波学报, 2013,32(1):32-35. (XIONG Wei, YAO Jun, LI Wei, et al. THz transmission investigation of composed rectangular hole array[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013,32(1):32-35.)
- [45] 马凤英,陈明,刘晓莉,等. 太赫兹波段微腔器件的设计及特性研究[J]. 物理学报, 2012,61(11):114205-1-4. (MA Fengying, CHEN Ming, LIU Xiaoli, et al. Design and characterization of a terahertz microcavity structure[J]. Chinese Journal of Physics, 2012,61(11):114205-1-4.)
- [46] WANG Xuemin, ZHAO Yan, WANG Xinming, et al. The spread into terahertz radiation using FeCrAl alloys wires[J]. Materials Letters, 2015,153(15):81-84.

- [47] MESEROLE C A, FISHER G L, HLITON D J, et al. Growth of thin Fe(0 0 1) films for terahertz emission experiments[J]. Applied Surface Science, 2007,253(17):6992-7003.
- [48] GRUHN W, KITYK I V, BENET S. Photoinduced optical second harmonic generation in Fe-Co metallic spin glasses[J]. Materials Letters, 2002,55(1):158-164.
- [49] 杨洋,姚建铨,张镜水,等.粗糙铜表面对低频太赫兹波的散射实验[J].红外与毫米波学报,2013,32(1):36-40. (YANG Yang, YAO Jianquan, ZHANG Jingshui, et al. Terahertz scattering on rough copper surface[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013,32(1):36-40.)

作者简介:



李依凡(1990-),女,石家庄市人,在读硕士研究生,主要研究方向为太赫兹宽谱辐射源.email:Liyifan_an@163.com.

王新明(1983-),男,山东省青岛市人,副研究员,主要研究方向为材料低温性能测试与分析.

沈昌乐(1981-),男,江西省宜春市人,副研究员,主要研究方向为太赫兹量子器件的研究.

赵妍(1983-),女,石家庄市人,副研究员,主要研究方向为功能薄膜相关研究.

邓青华(1973-),女,四川省资中市人,副研究员,主要研究方向为太赫兹相关成像研究.

王雪敏(1975-),男,四川省泸州市人,研究员,主要研究方向为太赫兹量子器件的相关研究、功能薄膜材料研究.

曹林洪(1971-),男,四川省自贡市人,教授,主要研究方向为功能材料的制备与性能研究.

熊政伟(1985-),男,成都市人,讲师,主要研究方向为纳米薄膜与器件.

彭丽萍(1979-),女,河南省开封市人,副研究员,主要研究方向为功能薄膜相关研究.

黎维华(1974-),男,重庆市人,副研究员,主要研究方向为太赫兹相关成像研究.

吴卫东(1967-),男,武汉市人,研究员,主要研究方向为薄膜的制备与性能研究.

(上接第 660 页)

作者简介:



蒋涛(1988-),男,安徽省黄山市人,博士,助理研究员,主要从事太赫兹科学与量子器件研究.email:tjiang1397@126.com.

吴卫东(1967-),男,武汉市人,博士,研究员,主要从事凝聚态物理方向研究.

邓青华(1975-),女,湖南省武冈市人,博士,副研究员,主要从事太赫兹成像和高功率激光技术研究.

楚卫东(1969-),男,山东省定陶市人,博士,副研究员,主要从事半导体低维受限体系的量子现象及低维结构的量子态设计.

湛治强(1990-),男,四川省资阳市人,大专,初级技工,主要从事半导体微纳器件加工.

王雪敏(1975-),男,四川省泸州市人,博士,研究员,主要从事功能薄膜材料与量子器件相关研究.

沈昌乐(1981-),男,江西省高安市人,博士,副研究员,主要从事太赫兹量子级联激光器研究.

杨宁(1980-),男,北京市人,博士,副研究员,主要从事低维纳米结构电子学特性、量子级联激光器电子结构和输运特性研究.

段素青(1963-),男,山西省朔州市人,男,博士,研究员,主要从事低维纳米系统的量子输运特性的理论研究以及材料物性的第一性原理计算.