

太赫兹波近场成像综述

刘宏翔^{1,2}, 姚建铨^{1,2}, 王与焜^{1,2*}, 徐德刚^{1,2}, 贺奕斌^{1,2}

(1. 天津大学精密仪器与光电子工程学院 激光与光电子研究所, 天津 300072;

2. 天津大学 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:太赫兹波成像作为可见光和微波成像等的拓展,在半导体材料表征、生物组织诊断、无损检测和安检等领域表现出许多独特的优点,得到了越来越广泛的关注.传统太赫兹波成像受长波长对应的衍射极限的限制,分辨率较低.而太赫兹波近场成像是目前突破该限制,获得亚微米甚至是纳米量级高分辨图像的研究热点之一.首先介绍了近场机制与成像的基本原理;其次总结了太赫兹波近场成像的几种常用方法及其对应研究进展和当前存在的问题,包括孔径型、针尖型、亚波长太赫兹源型和微纳结构调控型等;最后探讨了该方向的发展趋势.

关键词:太赫兹波;近场成像;衍射极限;隐失波;微纳结构

中图分类号:O441.4 **文献标识码:**A

Review of THz near-field imaging

LIU Hong-Xiang^{1,2}, YAO Jian-Quan^{1,2}, WANG Yu-Ye^{1,2*}, XU De-Gang^{1,2}, HE Yi-Xin^{1,2}

(1. Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: As the extension of optical and microwave imaging, THz imaging has now attracted broad attention and showed many unique advantages in areas such as characterizations of semiconductor materials, diagnoses of biological tissues, nondestructive tests and security inspections. According to the diffraction limit, traditional THz imaging is subjected to the shortcoming of its long wavelength that results in a low spatial resolution. However, THz near-field imaging is one of the research highlights to surpass the limit and obtain images with spatial resolutions up to sub-micrometer or even nanometer scale. In this paper, the schemes and basic principles of THz near-field imaging were introduced. Then, four kinds of typical methods, as well as their recent progress and existing problems, were reviewed in detail, including aperture based, tip based, sub-wavelength THz source based, and microstructure control based techniques. Finally, developing prospects were discussed.

Key words: THz wave, near-field imaging, diffraction limit, evanescent wave, microstructure

PACS: 07.57.-c, 07.79.-v, 42.25.Bs

引言

太赫兹波是指频率在 0.1 ~ 10 THz (1 THz =

10^{12} Hz), 或波长在 3 mm ~ 30 μm 范围内的一段电磁波谱区域, 其具有诸多优点: 如光子能量(毫电子伏特)低, 能够避免生物组织受辐射电离而损伤; 因

收稿日期: 2015-08-03, 修回日期: 2016-01-19

Received date: 2015-08-03, revised date: 2016-01-19

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(2015CB755403, 2014CB339802); 国家自然科学基金(61107086, 61172010, 61471257); 天津市自然科学基金(14JCQNJC02200); 天津市科技支撑项目(14ZCZDGX00030); 高等学校博士学科点专项科研基金(20120032110053); 中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金(CAEP THZ201304)

Foundation items: Supported by National Basic Research Program of China (2015CB755403, 2014CB339802); National Natural Science Foundation of China (61107086, 61172010, 61471257); Natural Science Foundation of Tianjin (14JCQNJC02200); Science and Technology Support Program of Tianjin (14ZCZDGX00030); Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (20120032110053); the CAEP THz Science and Technology Foundation (CAEP THZ201304)

作者简介(Biography): 刘宏翔(1990-), 男, 江西南昌人, 博士研究生, 主要从事激光与太赫兹技术研究. E-mail: liuhongxiang@tju.edu.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: yuyewang@tju.edu.cn

许多生物大分子振动与转动能级位于此频段,表现出很强的吸收和谐振,适合物质的“指纹性”鉴别;对许多在可见和红外波段不透明的非金属、非极性材料具有较强的穿透能力,但对水分吸收很敏感.太赫兹波成像^[1]是太赫兹科学技术最主要的应用之一,一定程度上可以获得较其它光源更丰富的信息,比如材料的折射率与空间密度分布、生物体的水含量与分布、隐藏物的辨别等,在生物医学成像、食品药品质检、材料无损检测、文物地质探测、反恐安全检查、目标雷达成像等领域具有重要意义.不过,传统太赫兹波成像受长波长对应的衍射极限的影响,分辨率低于可见光,只有几百微米数量级,远大于微纳结构材料或生物组织与细胞的尺度,无法满足高精度观测的需求.

近场成像是突破衍射极限,获得亚波长分辨图像的研究热点之一,自设想^[2]提出以来,陆续在微波^[3-4]、可见光^[5-8]、红外与太赫兹波^[9-14]等领域得到了验证.太赫兹波近场成像是在可见光等波段较为成熟的思想和方法上发展而来的,它既继承了后者对样品表面形貌进行高分辨无损扫描的功能,又具备对一些内嵌样品成像而获取亚表面信息的独特能力,在载流子浓度测量^[15-17]、微纳结构显微^[18-20]、晶体特性研究^[21-22]、生物医学成像诊断^[23]等领域颇具应用价值.该技术的实现主要得益于隐失波的产生和利用,性能的提升取决于太赫兹波的局域、增强或者增透程度,方法大致有四类:分别为利用亚波长大小物理孔径或虚拟孔径局域的太赫兹波、亚波长大小针尖局域和增强的太赫兹波、激光聚焦后产生的亚波长尺寸太赫兹辐射源、微纳结构材料局域和增透的太赫兹波进行近场成像.研究内容在理论上包括太赫兹波经微孔衍射和微纳结构传输、调控等过程模型的建立,样品表面近场太赫兹波电场与能流分布的求解,样品与针尖耦合系统的相互作用及其对太赫兹波探测信号影响的探究等;在实验上包括探针、微纳结构其材料和结构的选择与设计,近场条件的实现与稳定控制,基于探测方式改进和辐射源、探测器优选的成像性能优化等.关于辐射源,早期多借助相对成熟的太赫兹时域光谱系统,选用光电导天线法或光学整流法产生的脉冲太赫兹波作为光源.但是近年来,返波管^[24-25]、气体激光泵浦的太赫兹激光器^[15]、自由电子激光器^[26]、太赫兹参量振荡器^[27]、量子级联激光器^[28-29]、耿氏振荡器^[30]等产生的太赫兹波,也在该领域得到利用,便于输出功率的增加,频谱范围的扩展,结构的紧凑和成本的降低.

关于探测,基于光电导取样和电光取样的相干探测方法较为普遍,但基于热效应积累的辐射热计和高莱探测器也见诸报道,而且借助迈克尔逊干涉仪^[31]等还能提取太赫兹波的振幅和相位信息,提高系统的信噪比.关于成像方式,尽管现有报道多集中于逐点扫描这一较慢的方法,但是实时成像研究也正逐渐展开,如 Blanchard 等人^[32-34]以铌酸锂晶体倾斜波前激发产生的高功率太赫兹脉冲为光源,结合电光取样技术和 CCD 相机探测,设计而成的实时太赫兹波近场显微系统,可实现每秒 35 帧,空间分辨率达 $\lambda/150$ 的成像.

1 近场机制与成像基本原理

近场通常指距离在波长甚至是亚波长量级的区域.典型的太赫兹波近场成像多指扫描近场太赫兹波显微,即利用局域太赫兹波在样品近场区域进行二维网格状扫描,收集所有待测点处信息后,交由计算机处理和重构出最终图像,该过程所获图像分辨率不受波长限制,而主要取决于局域孔径或针尖的大小.根据海森堡测不准原理,为实现扫描平面方向上亚波长量级物体的分辨,该方向上的波数分量必须大于入射太赫兹波的波数,而垂直平面方向上的分量为虚数,这导致太赫兹波在其近场区域除存在传播分量外,还同时存在隐失分量.其中,传播场有能流传播,但不携带样品的细节信息,振幅与传播距离成反比;而隐失场虽无能流传播,但携带样品的细节信息,振幅随距离的增加而指数衰减.近场成像可以突破衍射极限正是因为对隐失波的获取、利用和探测,这与受到衍射极限限制的传统方法中,利用透镜等光学元件对太赫兹波聚焦来提高分辨率有着显著区别.

近场成像分为两种模式:近场照明和近场收集.两者区别在于用来获取或耦合转化隐失波的亚波长尺寸物体相对样品的位置不同.近场照明是利用微孔或针尖局域太赫兹波,近场照射样品;近场收集是近场直接探测受样品精细结构散射而得的隐失场,或远场探测其经近场微孔或针尖转化而成的传播场.前者的实用和推广需先解决信号的大小问题,即如何对太赫兹波进行有效局域和增强增透;后者伴随隐失场的衍射,故需解决近场距离的控制及太赫兹波的高效耦合与转化.根据太赫兹源与信号接收装置相对位置的不同,近场成像还分为透射和反射两种类型.透射成像通常只适用于薄且对太赫兹波透过率较高的样品;而反射成像虽可解决样品厚度

大、太赫兹波透过率低的问题,但多存在背景噪声及照明接收光路相互干扰等缺点,系统信噪比有待提高,分辨率普遍不及前者。

2 太赫兹波近场成像方法

2.1 基于孔径的太赫兹波近场成像

2.1.1 物理孔径

1998年, Hunsche等^[35]利用波长为 $220\ \mu\text{m}$ 的太赫兹波,对高阻硅基底上的金线成像,获得了 $50\ \mu\text{m}$ 的空间分辨率。这是太赫兹波近场成像的第一次实现,原理如图1(a)所示,属于典型的照明模式。太赫兹波经铝制探针锥形尖端通光孔局域后近场照明样品。由于传至远场光电导天线结构的透射信号可对取样光在其上激发的光生载流子运动调制,故二维扫描时探测到的光电流大小能反映样品每一点处太赫兹波的吸收特性并最终获得近场图像。照明模式下亚波长孔径对太赫兹波的局域作用可类比光通过厚的理想导电平板上宽度远小于波长量级的细缝^[36]进行分析,理论发现光在半缝宽范围内能基本保持直线传播,但超过这一距离时会迅速发散。故局域和近场是该方法成功与否的关键因素。关于前者,研究人员陆续设计和报道了多种用于太赫兹波局域的不同结构,如尖端呈顶部削平金字塔形的探针^[37]、平行平板波导^[38]、锥形平行平板波导^[39]、双金属耦合探针^[40]等;关于后者,结合原子力显微镜技术,利用压电陶瓷或石英音叉控制针尖或孔径到样品表面的间距,可以方便地控制近场条件。

针对照明模式下复杂的针尖设计和间距控制,2000年, Mitrofanov等^[41-42]设计了集成有亚波长孔径的光电导探测器,发明了基于收集模式的扫描近场太赫兹波显微术,并于 $0.5\ \text{THz}$ 处获得了 $7\ \mu\text{m}$ 的分辨率,原理如图1(b)所示。他们利用样品背部高折射率突起耦合受精细结构散射的太赫兹波,使其通过亚波长孔径传至正对面近场范围内的偶极天线结构进行探测。其中,隐失场振幅与孔径到天线的间距成反比^[43]。该间距太薄易使取样光通过微孔照射在样品上而改变样品的光学特性,太厚会使太赫兹波迅速发散而满足不了近场条件。由于入射太赫兹波在通过一定长度微孔波导时存在截止效应,而在通过一定厚度金属屏时,存在穿透距离的限制,故结构设计上,还应考虑微孔所在金属屏厚度对隐失场近场能流分布的影响,避免太赫兹波隧穿波导后的强度等于穿透金属屏后的强度,而失去孔径局域的作用^[44]。收集模式原理较为成熟,后续研究基本集

中于探测器结构的设计^[45-47],目前报道的图像分辨率最高可达 $3\ \mu\text{m}$,约合 $\lambda/100$ 。

总的来说,物理孔径型近场成像分辨率决定于局域孔的大小,且同时受到入射波偏振状态的影响^[48]。p偏振光虽然对应透过率较大,信号强度较强,但s偏振光对应的电场局域程度更高,故通常选择s偏振光进行成像,且方向同时与样品待分辨边缘平行以获得更高的分辨率。这种方法存在截止效应^[49]及孔径透过率低两个缺陷,前者限制太赫兹波的探测带宽,且波导厚度越大,截止效应越明显;后者源于微孔对太赫兹波衍射截面的限制。根据Bethe^[50]的推导,太赫兹波通过位于理想导电平板中直径小于波长量级的圆孔时,透射场振幅与孔径直径的3次方成正比。故孔径的减小虽然有利于更高分辨率的获取,但同时伴随着透过率的降低,从而导致灵敏度和信噪比的降低。

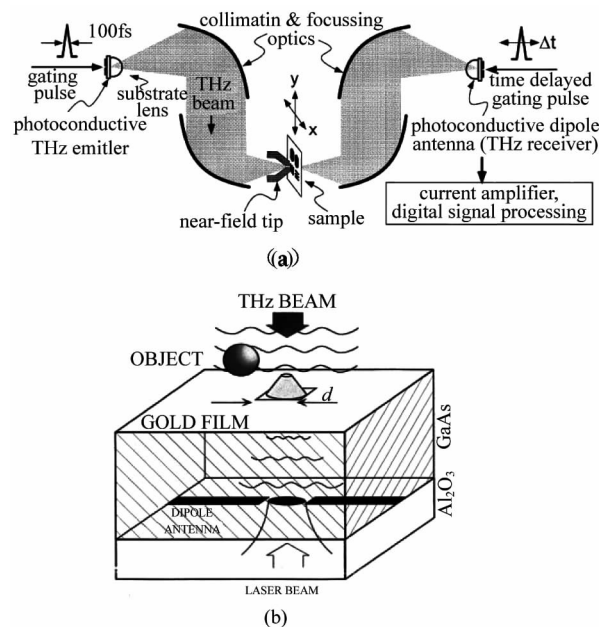


图1 物理孔径型近场成像(a)照明模式;(b)收集模式
Fig. 1 Aperture based THz near-field imaging (a) illumination-mode; (b) collection-mode

2.1.2 动态孔径

与物理孔径法类似,动态孔径法分辨率也取决于局域太赫兹波的孔径大小,只不过该孔径是通过飞秒激光在半导体材料上激发光生载流子形成的,并且受光路中聚焦透镜的位移而控制,产生陨灭或放大缩小。由于动态孔径的厚度取决于半导体材料对取样光的吸收深度,通常在几微米量级,因此,该方法能够避免物理孔径法中波导效应引起的探测带

宽减小问题.但是,其实现离不开半导体材料的选用以产生动态孔径,探测信号大小仍然受到孔径局域的限制,并叠加有较大的背景噪声.Chen 等人所在课题组^[51]于2000年起陆续报道了有关研究成果,具体原理如图2所示,太赫兹波与经斩波的取样光共线入射在半导体材料上,受后者激发产生的尺度小于太赫兹波聚焦光斑大小的高电导率动态孔径调制和局域.当样品位于半导体正面时,动态孔径收集样品散射的隐失波,分辨率较高,属于收集模式;当样品位于半导体背面时,动态孔径局域的太赫兹波经相当薄半导体晶片后,受轻微衍射效应影响地照射样品,分辨率较低,属于照明模式.实验中,取样光功率的设定除需考虑产生足够多自由载流子以形成动态孔径,还应避免对半导体材料和样品特性的破坏.半导体材料热积累造成的局部温度升高会改变相应位置处的复折射率,从而影响对太赫兹波的调制,这可通过增加动态孔径大小,降低取样光功率和重复频率来解决^[52].该方法目前报道的最佳分辨率达 $14\ \mu\text{m}$ ^[53].

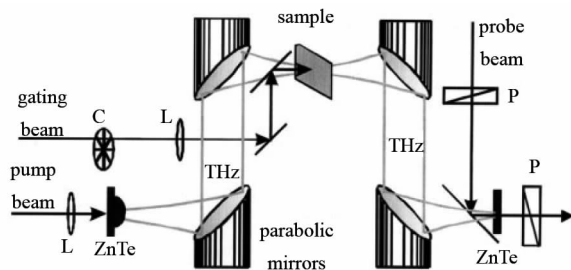


图2 动态孔径型近场成像

Fig.2 Dynamic aperture based THz near-field imaging

2.2 基于针尖的太赫兹波近场成像

2.2.1 远场测量针尖散射太赫兹波信号

根据偶极辐射理论,亚波长尺寸的针尖在太赫兹波的照射下能形成类似于孔径型方法中的局域太赫兹源,其近场照明样品,所得携带样品细节信息的隐失波经针尖耦合,可转化为传播波至远场进行探测,并获得决定于针尖尺寸的空间分辨率.据此,早在1994年,Inouye^[54]和Zenhausen^[55]等人便在可见光波段分别利用金属和硅制探针针尖,各自独立地报道了基于针尖散射的无孔扫描近场显微技术,特别是后者,得到了分辨率达 $3\ \text{nm}$ 的近场光学显微图像.类似的在太赫兹波段,Chen 等人^[56]随后按照图3(a)所示原理,利用中心频率为 $2\ \text{THz}$ 的太赫兹波获得了空间分辨率为 $150\ \text{nm}$ 的图像.而Moon等

人^[57]更结合原子力显微镜控制样品表面到针尖的间距,利用宽带太赫兹脉冲对内嵌在介质膜层中的金属光栅近场成像,获取了亚表面信息,实现了 $1\ \text{THz}$ 处对应 $90\ \text{nm}$ 的横向分辨率.该方法与孔径型方法相同的是,散射信号电场大小与针尖直径的3次方成正比;不同的是不仅避免了太赫兹波通过微孔时的传输损失,还存在一定程度的针尖增强效应^[58-59],即p偏振光入射时,受局域表面等离子共振效应、避雷针效应和基底镜像效应等的作用,针尖正下方电场能量密度增加,散射信号强度提高.

2.2.2 电光取样法近场直接测量太赫兹波电场

上述方法探测时多叠加有较多的背景信号,比较而言,van der Valk 和 Planken^[60-62]开展的电光取样法近场直接测量太赫兹波电场能够有效提高系统的信噪比,实验在 $0.1\sim 2.5\ \text{THz}$ 范围内测得的太赫兹波光斑最小达 $10\ \mu\text{m}$.原理如图3(b)所示,入射线偏振取样光在电光晶体中受共线传播太赫兹波电场的调制,发生场致双折射,其经 $1/4$ 波片和沃拉斯顿棱镜分解成的两个垂直分量,可由平衡光电探测器进行探测和获取光强差值,该差值正比于太赫兹波的电场大小.他们一方面利用铜制金属针尖对偏振平行于晶体表面的入射太赫兹波局域,并在针尖正下方几微米的近场区域内获得垂直电场分量.另一方面,选用晶向为(100)的磷化镓作为电光晶体,使取样光只受上述垂直分量的调制,而避免入射背景的干扰.2008年,该组^[63]进一步利用(100)和(110)晶向的磷化镓晶体测量了一些金属结构样品正下方近场电场的垂直分量和水平分量,空间分辨率达 $20\ \mu\text{m}$.此类方法只适合于较薄样品,因为样品厚度越大,针尖到晶体表面间距就越大,太赫兹波光斑也越大,会对局域效果产生负面影响.系统分辨率通常取决于针尖尺寸,当其大于取样光聚焦光斑时,太赫兹波光斑大小会随针尖直径的增加而增加;当其小于取样光聚焦光斑时,太赫兹波电场只对一部分取样光线偏状态进行调制,从而降低探测信号的强度.

2.2.3 针尖增强太赫兹波发射显微技术

2005年,Yuan等^[64]利用针尖调制太赫兹发射谱的方法,实现了 $1\ \text{nm}$ 纵向分辨率和约 $10\ \text{nm}$ 横向分辨率,原理如图3(c)所示.飞秒激光入射在半导体上激发产生的电偶极矩与针尖耦合会改变后者正下方的局域电场而调制辐射的太赫兹波.对受调制部分进行锁相探测,能够有效过滤半导体表面发射的背景信号,最终实现高分辨成像.实验中,对针尖

与半导体构成的系统施加直流和交流电压,若两者间距较大,相当于形成电容,通过交流电流;若间距减小到一定程度,通过隧道电流;若继续缩短到相互接触,则通过接触电流.故纵向分辨率可根据针尖趋近半导体表面时,电流及太赫兹波信号强度的变化确定.横向分辨率取决于针尖大小,图像对比度或受调制的太赫兹波信号强度则与针尖直径成正比,而非上述基于针尖散射远场测量方法中的三次方关系.该方法的缺点在于样品种类受限于太赫兹发射源的形成,飞秒激光功率受限于样品本身特性不被破坏.

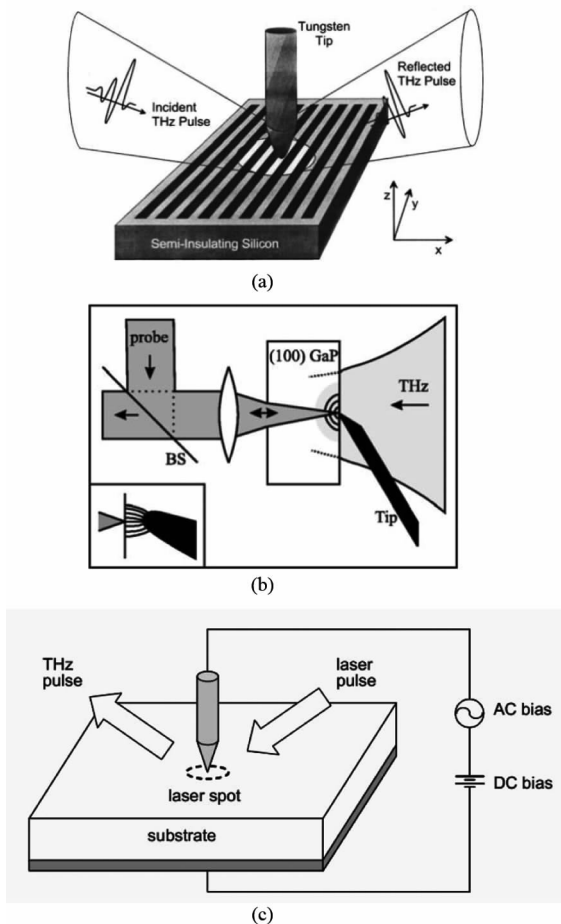


图3 针尖型太赫兹波近场成像(a)远场测量针尖散射太赫兹波信号;(b)电光取样近场直接测量太赫兹波电场;(c)针尖增强太赫兹波发射显微

Fig.3 Tip based apertureless THz near-field imaging (a) far field detection of scattered THz signals, (b) electro-optic detection of THz electric field in the near field of a metallic tip, (c) tip enhanced THz wave emission microscopy

模型构建与机理解释一直是针尖型无孔扫描近场太赫兹波显微技术的研究热点,代表模型主要有两种,一是基于点偶极子和线偶极子的球模型,二是

天线模型.关于前者,早在2000年左右,Knoll和Keilmann^[65]就描述了红外散射理论,该理论一定程度上也适用于太赫兹波段^[66].它是将入射场照射下的针尖等效为一个极化球,或进一步简化为点偶极子,在考虑表面束缚电荷对样品周围电场分布影响的情况下,与其在样品中的镜像偶极子共同构成电偶极矩.电场垂直于样品表面时,假设 a 、 d 、 ϵ_s 和 ϵ_t 分别代表球半径、球中心到样品间距、样品介电常数和针尖介电常数,则耦合系统在准静电近似条件下的有效电极化率可表示为

$$\alpha_{\perp}^{\text{eff}} = \alpha(1 + \beta) / \left[1 - \frac{\alpha\beta}{16\pi(a + d)^3} \right] \quad (1)$$

其中, $\alpha = 4\pi a^3 \frac{\epsilon_t - 1}{\epsilon_t + 2}$, $\beta = \frac{\epsilon_s - 1}{\epsilon_s + 1}$.当波长远大于针尖直径时,可由米氏散射理论计算系统对入射场的散射和吸收截面,公式依次如式(2)和式(3)所示.

$$C_{\text{sca}} = k^4 |\alpha_{\perp}^{\text{eff}}|^2 / 6\pi \quad (2)$$

$$C_{\text{abs}} = k \text{Im} \{ \alpha_{\perp}^{\text{eff}} \} \quad (3)$$

此时,吸收效果强于散射效果.传统点偶极子模型只考虑针尖单向地在样品中形成镜像偶极子,近年来, Moon 所在小组考虑太赫兹波的镜面反射以及针尖与样品间偶极子的相互激发和叠加,报道了自洽的散射理论^[66-67],并通过考虑更精确的系统表面静电边界条件,发展了自洽的线偶极子理论^[68-70],不断致力于模型的优化,完善对太赫兹波近场作用机理的解释.球模型存在一定缺陷^[71],如只考虑针尖尖端而忽略了针杆形状和长度等产生的影响;无法解释针尖对太赫兹波探测带宽缩减影响的问题;所模拟的局域电场增强程度较实际情况偏低等.对此,研究人员同时考虑了探针的形状以及电学特性,将其与样品表面构成的耦合系统等效为一个由电阻、电容、电感构成的电路,建立了天线模型^[72-74].入射场由于耗散和二次辐射等存在一定的损失,其程度可表示为

$$\eta = \frac{RZ_0}{4\pi \left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]} \quad (4)$$

其中, R 、 Z_0 、 L 、 C 分别代表电阻、阻抗、电感和电容.

当 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 时,即 $\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 时,产生共振吸收.

与探针相关的研究也非常丰富.首先,在于对背景信号的抑制.太赫兹波散射信号与针尖样品耦合系统及针杆同时有关,当针尖与样品间距未受调制时,探测信号主要受针杆影响,分辨率较低;当探针

按照一定参考频率振动,且后续利用锁相放大器进行探测时,探测信号主要受针尖部位影响,分辨率较高^[75],特别是对信号进行高次谐波探测还可获得更高的信噪比.其次,在于对宽带太赫兹脉冲探测带宽的影响.实验发现,测得近场电场的时域波形与入射场时间积分有相同形式^[76],且探测带宽较入射谱缩减 $1/\omega$ 倍,满足傅里叶变换关系,此现象可用偶极天线模型解释^[77].再者,在于探针的制作材料.传统方法多使用钨、铂、铜、铝等金属,但最新研究发现,介电常数足够大的电介质针尖,其场增强效果及散射信号强度与金属针尖实验时相当,也适用于针尖散射型近场成像,且瞬态响应较后者更快^[78].

2.3 基于亚波长太赫兹辐射源的近场成像

利用飞秒激光聚焦在非常小区域形成的亚波长太赫兹辐射源对近场样品进行扫描,是近场成像的另外一种方法,存在较多优势.首先,能有效避免太赫兹波局域后透过率低及近场探测困难等问题;其次,与动态孔径法相比,打破了半导体材料使用的限制;再者,由于分辨率理想情况下由聚焦后激发光斑大小决定,而非太赫兹波波长,亚微米分辨图像相对容易获取.

方法之一是利用飞秒激光在非线性晶体中光学整流产生的亚波长太赫兹辐射源近场成像.2002年,Zhang 所在课题组^[79-80]对源的获取及其用于近场成像的可行性分析开展了早期研究,实验装置如图4所示.这种方法辐射强度受激发光偏振方向、入射角、泵浦功率和晶体厚度、二阶非线性系数等因素影响,辐射效率与辐射源半径的平方成正比,电光晶体厚度需综合考虑:厚度越大,激发光与其相互作用长度越大,太赫兹辐射源尺寸因而越大;厚度越小,光整流效率越低,实用性在一定程度上会受到限制.由于晶体对激发光吸收深度只有微米量级,可以认为太赫兹辐射源只产生于晶体表层,因此当晶体厚度适中,且使得样品正好位于辐射源的近场区域时,就可以用激发光斑大小近似模拟辐射源尺寸.

激光太赫兹波发射显微是基于上述原理的一种较为常见的实用化方法,其采取的是近场发射和远场探测的工作模式.Yang 等人报道了基于光电导天线法探测的反射式太赫兹波发射显微^[81]和基于电光取样法探测的透射式太赫兹波发射显微^[82](分别如图5(a)、(b)所示),两者在 0.2 ~ 2.5 THz 范围左右的探测带宽内实现的空间分辨率达 30 μm 甚至更高.Lecaque 等人^[83, 84]则设计了能同时实现太赫兹和红外波段近场成像的显微镜(图5(c)所示),前者分辨率

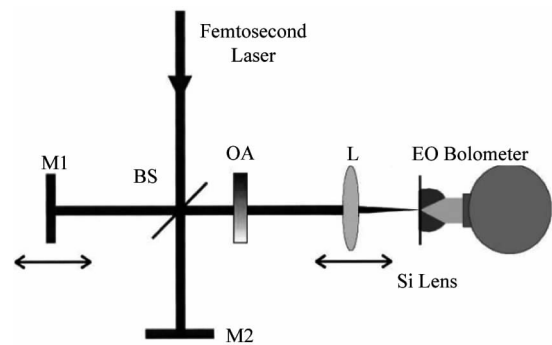


图4 光学整流方法产生亚波长太赫兹辐射源的实验装置
Fig.4 Experimental setup used to generate a sub-wavelength THz source by optical rectification

最佳可达 30 μm ,约 $\lambda/10$.由于采用了宽带光源,探测上,他们对 0.3 ~ 3 THz 范围采用辐射热计,对 20 ~ 37.5 THz 范围采用 HgCdTe 探测器.日本大阪大学 Murakami 等人所在课题组^[85-88]在此方面取得了众多成果.2008年,他们设计了自由空间型和扫描探针型激光太赫兹波发射显微镜,并利用光斑大小估算空间分辨率小于 2 μm .2012年,他们改进了扫描型激光太赫兹波发射显微系统,引入振镜使激光在非线性晶体 DASC 薄片上扫描,大大提高了成像速度.装置如图5(d)所示,其对一幅 512 \times 512 像素图的成像只需 47 s,系统分辨率达 27 μm (约 $\lambda/28$).基于上述或经优化的系统,该组近年来已陆续报道了对集成电路芯片、铁电畴结构、太阳能电池、超导电流密度分布、头发等近场成像的应用研究.

方法之二是利用飞秒激光在空气中形成的等离

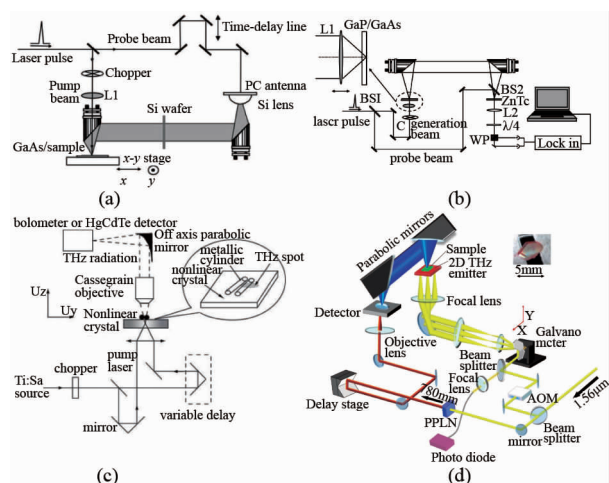


图5 激光太赫兹波发射显微(a)反射式;(b)透射式;(c)宽带光源型;(d)扫描型

Fig.5 Laser Terahertz emission microscopy (a) reflection-mode; (b) transmission-mode; (c) broadband source based; (d) scanning-type

子体细丝辐射的太赫兹波近场成像. 2014 年,南开大学 Zhao^[89] 等人据此对 PCB 板上的亚波长微孔成像, 实现了 20 μm , 约 $\lambda/38$ 的分辨率, 实验装置如图 6 所示. 该方法产生的太赫兹波场强非常高, 且由于是在光纤波导中传播, 位置可以方便的控制, 亚波长局域也很容易实现.

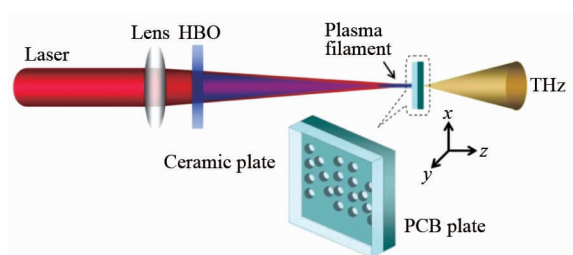


图 6 基于飞秒激光成丝太赫兹源的近场成像实验装置
Fig. 6 Experimental setup of THz near-field imaging by femtosecond laser filament

2.4 基于微纳结构调控的太赫兹波近场成像

探针制作、针尖到样品间距控制、成像光路搭建等存在一定的复杂性, 操作要求较高; 即便与原子力显微镜等联用, 从成本角度上考虑也不具有优势; 部分方法还受限于半导体或电光晶体等材料的使用, 不利于应用范围的扩展. 近年来, 有关人工微纳结构实现太赫兹波局域增强、位相调制及实时成像的设计和越来越丰富, 基于此的太赫兹波近场成像也随之得到相当大发展.

牛眼结构是其中一类型. 传统孔径型近场成像透过率较低, 而微孔在其周围同心环状金属周期凹槽构成的牛眼结构的辅助下, 经过微孔大小、槽宽槽深、周期长度等几何形状和尺寸参数的合理设计, 不仅能使太赫兹波与凹槽耦合并谐振激发产生表面等离子波, 实现太赫兹波的透射增强, 还能控制位相消除太赫兹波的衍射^[90, 91]. 太赫兹波偏振与金属边缘的相对方向影响成像分辨率, 使不同扫描方向上获得的分辨率存在一定差别. 当偏振方向平行于金属边缘时, 分辨率更高; 垂直于金属边缘时, 分辨率更低. 2005 年, Ishihara 等^[92] 利用中心为亚波长圆孔的牛眼结构近场成像, 获得了 50 μm , 约 $\lambda/4$ 的空间分辨率. 结构如图 7(a) 所示, 入射太赫兹波波长位置处出现有共振峰, 且透射强度最高 20 倍于普通孔径型成像方法中相同大小圆孔对应的数值. 2006 年, 他们^[27] 又制作了中心为领结型亚波长孔径的牛眼结构(图 7(b) 所示), 将空间分辨率进一步提升至 12 μm , 约 $\lambda/17$, 实验所获透射增强程度较中心

为相同直径圆孔对应的牛眼结构更高. 此后, Chen 等人按图 7(c) 所示原理, 利用对太赫兹波衰减较小的高弹性聚乙烯光纤^[93-95] 和聚甲基丙烯酸甲酯管^[96], 作为太赫兹波的传输波导及扫描探针, 对牛眼结构后载玻片上放置的无病理染色胸部、肝脏样品, 以及结肠组织样品近场成像, 在 300-320 GHz 获得了优于 $\lambda/4$ 的分辨率, 为牛眼结构的实用, 及太赫兹波成像在人类组织与器官病变诊断的应用提供了新的思路.

除牛眼结构外, 周期排列的亚波长孔径阵列也得到了相当多报道, 此类结构通常被用于太赫兹波的增透、成像速度的提升等. 2007 年, Silveirinha 等^[97] 设计了一种由纳米银棒周期排布构成的阵列结构(图 7(d) 所示), 并数值模拟了其实现亚波长成像的功能. 该结构在满足一定条件的情况下, 可使太赫兹波在纳米棒中以较低衰减传播相对长的一段距离而不受共振影响, 有利于近场图像信息的传递. 根据模拟结果, 30 THz 时分辨率达 $\lambda/10$, 纳米棒中传输距离达 0.6 λ . 2013 年, Szelc 等^[98] 设计了一种 4 \times 4 亚波长孔径阵列构成的太赫兹波空间调制器, 结构如图 7(e) 所示. 由于在透射成像时, 该结构可利用频分复用技术同时获取 16 个像素点的信息, 故成像速度较普通单孔提高 16 倍. 实验在波长为 118 μm 处对应分辨率达 $\lambda/4$.

基于各种微纳结构材料制成的非传统透镜在亚波长聚焦、隐失波放大以实现突破衍射极限的高分辨成像上具有重要意义, 不过相关研究成果目前多集中在可见光波段, 而太赫兹波段的研究较为新兴, 未来具有较大发展前景. 如基于超材料、光子晶体等设计的超透镜, 不仅能让携带样品细节信息的隐失波在其中传播时得到增强, 从而到达成像平面参与成像, 还因为是一种平面成像器件, 具备对大面积样品进行快速探测的能力, 较针尖型等点扫描方式成像速度更快. 针对超透镜这一共振成像器件工作频率较窄的缺点, Li 等人^[99] 设计了可用于宽带亚波长成像的石墨烯透镜, 它能够通过电压或化学掺杂等外部条件, 控制并连续调谐工作频率, 最终实现隐失场的非共振增强. 结构如图 7(f) 所示, 实验在使用双层石墨烯时获得了 $\lambda/7$ 的分辨率, 在使用多层石墨烯时获得了 $\lambda/10$ 的分辨率.

3 总结与展望

本文介绍了基于亚波长孔径、亚波长针尖、亚波长辐射源和微纳结构调控的几种太赫兹波近场成像

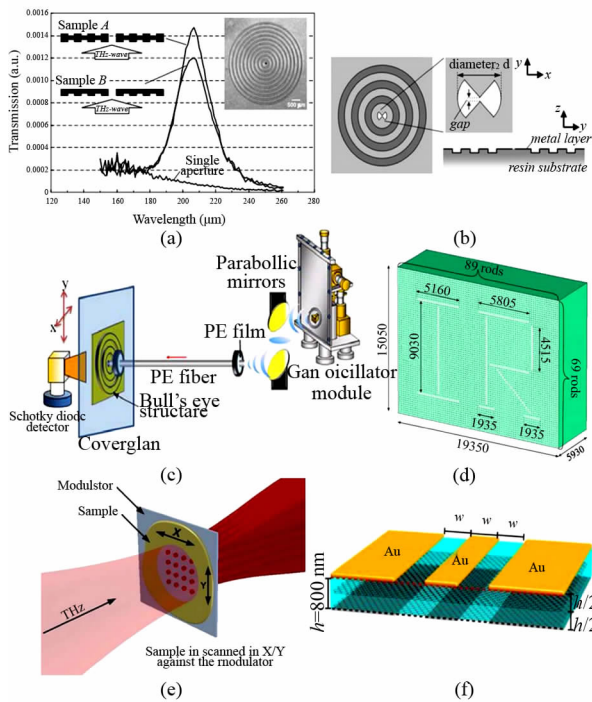


图7 微纳结构调控型太赫兹波近场成像 (a) 基于亚波长圆孔的牛眼结构; (b) 基于亚波长领结型孔径的牛眼结构; (c) 基于光纤探针扫描的太赫兹波近场显微; (d) 纳米银棒阵列几何结构; (e) 基于亚波长孔径阵列的太赫兹波空间调制器; (f) 可实现宽带亚波长成像的石墨烯透镜

Fig. 7 Microstructure control based THz near-field imaging (a) sub-wavelength circular aperture based bull's eye structure; (b) sub-wavelength bow-tie aperture based bull's eye structure; (c) fiber-scanning THz near-field microscopy; (d) geometry of the array of silver nanorods; (e) multiple sub-wavelength apertures based THz spatial modulator; (f) Tunable graphene-lens to realize broadband sub-wavelength imaging

方法,不难发现,亚波长波源的获取及无论照明还是收集模式下近场条件的满足,是突破衍射极限成像的核心.早期太赫兹波近场成像得益于太赫兹波段时域光谱系统和可见光波段扫描近场光学显微技术的发展,其入射场主要集中于飞秒激光产生的宽带太赫兹波源,应用基本局限于金属边缘对分辨率的测定,或以金属薄膜和凹槽等为代表的高对比度样品成像.该方向目前及未来的发展方向包括但不限于:1) 丰富太赫兹源种类,提升其输出功率,发展其宽调谐性能,同时优化相干的高信噪比、高灵敏度探测技术,以解决不同实验室及应用场合实验条件有别的问题,减小太赫兹波局域时透射或散射能量损失较多对最终成像结果的影响;2) 在现有基础上,继续构建合适的理论模型,探究不同方法的近场作用机理,解释近场太赫兹波分布与传输特性,以在选材、结构设计、近场间距控制等方面优化成像性

能;3) 深入研究传输波导或阵列、超透镜、双曲透镜等微纳结构对太赫兹波衍射传输、耦合增强、亚波长聚焦等的作用机制,以及石墨烯等新兴材料在太赫兹波隐失场非共振增强方面的应用前景,以实现近场成像装置的简单化、经济化和紧凑化;4) 引入压缩感知或 CCD 相机等技术和器件,或着力于扫描方式的改进,进一步发展太赫兹波近场实时与快速成像系统,以满足一些只能暴露于空气中较短时间的生物样品,和半导体器件载流子动态学的成像需求;5) 引入包括超分辨率重建在内更多的数字图像处理技术,以获得更高质量并满足现实分析需求的图像;6) 探寻太赫兹波近场成像在生物医学诊断、电路缺陷检测等更多领域的应用.

References

- [1] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves [J]. *Optics Letters*, 1995, **20**(16): 1716 - 1718.
- [2] Synge E H. A suggested method for extending microscopic resolution into the ultra-microscopic region [J]. *Philosophical Magazine*, 1928, **6**(35): 356 - 362.
- [3] Ash E A, Nicholls G. Super-resolution aperture scanning microscope [J]. *Nature*, 1972, **237**(5357): 510 - 512.
- [4] Bae J, Okamoto T, Fujii T, et al. Experimental demonstration for scanning near-field optical microscopy using a metal micro-slit probe at millimeter wavelengths [J]. *Applied Physics Letters*, 1997, **71**(24): 3581 - 3583.
- [5] Pohl D W, Denk W, Lanz M. Optical stethoscopy: Image recording with resolution $\lambda/20$ [J]. *Applied Physics Letters*, 1984, **44**(7): 651 - 653.
- [6] Reddick R C, Warmack R J, Ferrell T L. New form of scanning optical microscopy [J]. *Physical Review B*, 1989, **39**(1): 767 - 770.
- [7] Betzig E, Trautman J K. Near-field optics: Microscopy, spectroscopy, and surface modification beyond the diffraction limit [J]. *Science*, 1992, **257**(5067): 189 - 195.
- [8] Specht M, Pedarnig J D, Heckl W M, et al. Scanning plasmon near-field microscope [J]. *Physical Review Letters*, 1992, **68**(4): 476 - 479.
- [9] Palanker D V, Knippels G M H, Smith T I, et al. IR microscopy with a transient photo-induced near-field probe (tipless near-field microscopy) [J]. *Optics Communications*, 1998, **148**(4 - 6): 215 - 220.
- [10] Knoll B, Keilmann F. Near-field probing of vibrational absorption for chemical microscopy [J]. *Nature*, 1999, **399**(6732): 134 - 137.
- [11] Knoll B, Keilmann F. Infrared conductivity mapping for nanoelectronics [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **77**(24): 3980 - 3982.
- [12] Li P, Wang Tao, Böckmann H, et al. Graphene-enhanced infrared near-field microscopy [J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(8): 4400 - 4405.
- [13] Yuan T, Xu J Z, Zhang X C. Development of terahertz wave microscopes [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2004, **45**(5-6): 417 - 425.
- [14] Kawano Y. Terahertz sensing and imaging based on nano-

- structured semiconductors and carbon materials [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2012, **6**(2): 246–257.
- [15] Huber A J, Keilmann F, Wittborn J, *et al.* Terahertz near-field nanoscopy of mobile carriers in single semiconductor nanodevices [J]. *Nano Letters*, 2008, **8**(11): 3766–3770.
- [16] Wittborn J, Weiland R, Huber A J, *et al.* Quantitative, nanoscale free-carrier concentration mapping using terahertz near-field nanoscopy [C]// Reliability Physics Symposium (IRPS), 2011 IEEE International. IEEE, 2011: 5C.1.1–5C.1.7.
- [17] Nagel M, Safiei A, Pletzer T, *et al.* Active Terahertz near-field probes for high-resolution free-carrier density imaging applications [C]// 2012 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. IEEE, 2012: 1–2.
- [18] Bitzer A, Ortner A, Merbold H, *et al.* Terahertz near-field microscopy of complementary planar metamaterials: Babinet's principle [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(3): 2537–2545.
- [19] Blanchard F, Doi A, Tanaka T, *et al.* Near-field THz imaging of a split ring resonator matrix [C]// 2011 36th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. IEEE, 2011: 1–2.
- [20] Walther M, Bitzer A. Electromagnetic wave propagation close to microstructures studied by time and phase-resolved THz near-field imaging [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2011, **32**(8-9): 1020–1030.
- [21] Planken P C M, Rijmenam C E W M v, Schouten R N. Opto-electronic pulsed THz systems [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, **20**(7): S121.
- [22] Doi A, Blanchard F, Hirori H, *et al.* Near-field THz imaging of free induction decay from a tyrosine crystal [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(17): 18419–18424.
- [23] Kim J, Park H, Jung E, *et al.* Terahertz near-field imaging of biomolecular nanostructures [C]// 2008 33rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. IEEE, 2008: 1–1.
- [24] Mair S, Gompf B, Dressel M. Spatial and spectral behavior of the optical near field studied by a terahertz near-field spectrometer [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(7): 1219–1221.
- [25] Gompf B, Gebert N, Heer H, *et al.* Polarization contrast terahertz-near-field imaging of anisotropic conductors [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(8): 082104.
- [26] Schade U, Holldack K, Kuske P, *et al.* THz near-field imaging employing synchrotron radiation [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(8): 1422–1424.
- [27] Ishihara K, Ohashi K, Ikari T, *et al.* Terahertz-wave near-field imaging with subwavelength resolution using surface-wave-assisted bow-tie aperture [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(20): 201120.
- [28] Degl'Innocenti R, Montinaro M, Xu J, *et al.* Differential near-field scanning optical microscopy with THz quantum cascade laser sources [J]. *Optics Express*, 2009, **17**(26): 23785–23792.
- [29] Baragwanath A J, Freeman J R, Gallant A J, *et al.* Terahertz near-field imaging using subwavelength plasmonic apertures and a quantum cascade laser source [J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(13): 2393–2395.
- [30] CHEN Hua, WANG Xiao-Zhou, ZHAO Tian, *et al.* Diagnose human tumors by THz near-field imaging [C]// Twelfth International Conference on Photonics and Imaging in Biology and Medicine. SPIE, 2014: 923002.
- [31] Krenz P M, Olmon R L, Lail B A, *et al.* Near-field measurement of infrared coplanar strip transmission line attenuation and propagation constants [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(21): 21678–21686.
- [32] Blanchard F, Doi A, Tanaka T, *et al.* Real-time terahertz near-field microscope [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(9): 8277–8284.
- [33] Doi A, Blanchard F, Tanaka T, *et al.* Improving spatial resolution of real-time terahertz near-field microscope [J]. *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2011, **32**(8-9): 1043–1051.
- [34] Blanchard F, Doi A, Tanaka T, *et al.* Real-time, sub-wavelength terahertz imaging [J]. *Annual Review of Materials Research*, 2013, **43**(1): 237–259.
- [35] Hunsche S, Koch M, Brener I, *et al.* THz near-field imaging [J]. *Optics Communications*, 1998, **150**(1-6): 22–26.
- [36] Betzig E, Harootunian A, Lewis A, *et al.* Near-field diffraction by a slit: implications for superresolution microscopy [J]. *Applied Optics*, 1986, **25**(12): 1890–1900.
- [37] Klein N, Lahl P, Poppe U, *et al.* A metal-dielectric antenna for terahertz near-field imaging [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **98**(1): 014910.
- [38] ZHAN Hui, Mendis R, Mittleman D M. Superfocusing terahertz waves below $\lambda/250$ using plasmonic parallel-plate waveguides [J]. *Optics Express*, 2010, **18**(9): 9643–9650.
- [39] LIU Jing-Bo, Mendis R, Mittleman D M, *et al.* A tapered parallel-plate-waveguide probe for THz near-field reflection imaging [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **100**(3): 031101.
- [40] Mitrofanov O, Renaud C C, Seeds A J. Terahertz probe for spectroscopy of sub-wavelength objects [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(6): 6197–6202.
- [41] Mitrofanov O, Brener I, Harel R, *et al.* Terahertz near-field microscopy based on a collection mode detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **77**(22): 3496–3498.
- [42] Mitrofanov O, Brener I, Wanke M C, *et al.* Near-field microscope probe for far infrared time domain measurements [J]. *Applied Physics Letters*, 2000, **77**(4): 591–593.
- [43] Mitrofanov O, Lee M, Hsu J W P, *et al.* Collection-mode near-field imaging with 0.5-THz pulses [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, **7**(4): 600–607.
- [44] Mitrofanov O, Lee M, Hsu J W P, *et al.* Terahertz pulse propagation through small apertures [J]. *Applied Physics Letters*, 2001, **79**(7): 907–909.
- [45] Wächter M, Nagel M, Kurz H. Tapered photoconductive terahertz field probe tip with subwavelength spatial resolution [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(4): 041112.
- [46] Bitzer A, Ortner A, Walther M. Terahertz near-field microscopy with subwavelength spatial resolution based on photoconductive antennas [J]. *Applied Optics*, 2010, **49**(19): E1–E6.
- [47] Macfaden A J, Reno J L, Brener I, *et al.* 3 μm aperture probes for near-field terahertz transmission microscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **104**(1): 011110.
- [48] Novotny L, Pohl D W, Regli P. Near-field, far-field and imaging properties of the 2D aperture SNOM [J]. *Ultrami-*

- croscopy, 1995, **57**(2 - 3): 180 - 188.
- [49] Keilmann F. FIR microscopy [J]. *Infrared Physics & Technology*, 1995, **36**(1): 217 - 224.
- [50] Bethe H. Theory of diffraction by small holes [J]. *Physical Review*, 1944, **66**(7-8): 163 - 182.
- [51] Chen Q, Jiang Z, Xu G X, *et al.* Near-field terahertz imaging with a dynamic aperture [J]. *Optics Letters*, 2000, **25**(15): 1122 - 1124.
- [52] Chen Q, Zhang X C. Semiconductor dynamic aperture for near-field terahertz wave imaging [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2001, **7**(4): 608 - 614.
- [53] Zhang X C, Xu J Z. Introduction to THz wave photonics [M]. New York: Springer, 2010: 149 - 174.
- [54] Inouye Y, Kawata S. Near-field scanning optical microscope with a metallic probetip [J]. *Optics Letters*, 1994, **19**(3): 159 - 161.
- [55] Zenhausern F, O'Boyle M P, Wickramasinghe H K. Apertureless near-field optical microscope [J]. *Applied Physics Letters*, 1994, **65**(13): 1623 - 1625.
- [56] Chen H T, Kersting R, Cho G C. Terahertz imaging with nanometer resolution [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, **83**(15): 3009 - 3011.
- [57] Moon K, Park H, Kim J, *et al.* Subsurface nanoimaging by broadband terahertz pulse near-field microscopy [J]. *Nano Letters*, 2015, **15**(1): 549 - 552.
- [58] Bouhelier A, Beversluis M, Hartschuh A, *et al.* Near-field second-harmonic generation induced by local field enhancement [J]. *Physical Review Letters*, 2003, **90**(1): 013903.
- [59] Hayazawa N, Tarun A, Taguchi A, *et al.* Development of tip-enhanced near-field optical spectroscopy and microscopy [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2009, **48**(8S2): 08JA02.
- [60] van der Valk N C J, Planken P C M. Electro-optic detection of subwavelength terahertz spot sizes in the near field of a metal tip [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(9): 1558 - 1560.
- [61] van der Valk N C J, Planken P C M. Measurement of THz spot sizes with a $\lambda/200$ diameter in the near-field of a metal tip [J]. *Journal of Biological Physics*, 2003, **29**(2-3): 239 - 245.
- [62] van der Valk N C J, Planken P C M. Towards terahertz near-field microscopy [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2004, **362**(1815): 315 - 319.
- [63] Adam A J L, Brok J M, Planken P C M, *et al.* THz near-field measurements of metal structures [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2008, **9**(2): 161 - 168.
- [64] Yuan T, Park H, Xu J, *et al.* Field-induced THz wave emission with nanometer resolution [C]//Smart Materials, Nano, and Micro-Smart Systems. SPIE, 2005: 1 - 8.
- [65] Knoll B, Keilmann F. Enhanced dielectric contrast in scattering-type scanning near-field optical microscopy [J]. *Optics Communications*, 2000, **182**(4 - 6): 321 - 328.
- [66] Kim J, Park H, Lee K, *et al.* Self-consistent analytic scattering theory for apertureless THz near-field microscope [C]// Infrared and Millimeter Waves, 2007 and the 2007 15 th International Conference on Terahertz Electronics. IRMMW-THz. Joint 32nd International Conference on. IEEE, 2007: 496 - 497.
- [67] Moon K, Kim J, Han Y, *et al.* Iterative image method for apertureless THz near-field microscope [C]// 2008 33rd International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. IEEE, 2008: 1 - 2.
- [68] Moon K, Jung E, Lim M, *et al.* Terahertz near-field microscope: analysis and measurements of scattering signals [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2011, **1**(1): 164 - 168.
- [69] Moon K, Jung E, Lim M, *et al.* Quantitative analysis and measurements of near-field interactions in terahertz microscopes [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(12): 11539 - 11544.
- [70] Moon K, Do Y, Lim M, *et al.* Quantitative coherent scattering spectra in apertureless terahertz pulse near-field microscopes [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(1): 011109.
- [71] Adam A J, van der Valk N C, Planken P C. Measurement and calculation of the near field of a terahertz apertureless scanning optical microscope [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, **24**(5): 1080 - 1090.
- [72] Chen H T, Kraatz S, Cho G C, *et al.* Identification of a resonant imaging process in apertureless near-field microscopy [J]. *Physical Review Letters*, 2004, **93**(26): 267401.
- [73] Cho G C, Chen H T, Kraatz S, *et al.* Apertureless terahertz near-field microscopy [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, **20**(7): S286 - S292.
- [74] Li Y, Popov S, Friberg A T, *et al.* Rigorous modeling and physical interpretation of terahertz near-field imaging using SNOM techniques [J]. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 2009, **4**: 09007.
- [75] Planken P C M, van der Valk N C J. Spot-size reduction in terahertz apertureless near-field imaging [J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(19): 2306 - 2308.
- [76] Wang K, Barkan A, Mittleman D M. Near-field optical probe studied using terahertz pulses [C]// Lasers and Electro-Optics Society, 2003. LEOS 2003. The 16th Annual Meeting of the IEEE. IEEE, 2003, **1**: 328 - 329.
- [77] Wang K, Mittleman D M, van der Valk N C J, *et al.* Antenna effects in terahertz apertureless near-field optical microscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **85**(14): 2715 - 2717.
- [78] Kurihara T, Yamaguchi K, Watanabe H, *et al.* Dielectric probe for scattering-type terahertz scanning near-field optical microscopy [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(15): 151105.
- [79] Yuan T, Mickan S, Xu J Z, *et al.* Towards an apertureless electro-optic T-ray microscope [C]// Lasers and Electro-Optics, 2002. CLEO 02. Technical Digest. Summaries of Papers Presented at the. IEEE, 2002: 637 - 638.
- [80] XU J Z, Zhang X C. Optical rectification in an area with a diameter comparable to or smaller than the center wavelength of terahertz radiation [J]. *Optics Letters*, 2002, **27**(12): 1067 - 1069.
- [81] YANG Yu-Ping, YAN Wei, WANG Li. A reflected terahertz-emission microscopy [J]. *Chinese Physics Letters*, 2007, **24**(1): 169.
- [82] YANG Yu-Ping, YAN Wei, WANG Li. A transmitted terahertz-emission microscopy [C]// Photonics Asia 2007. SPIE, 2007: 68400G - 68400G - 9.

- [15] ZHANG Fei, BIAN Dong-Ming, ZHANG Geng-Xin. Design of a near perfect reconstruction prototype filter on flexible transponder for broadband satellite communications [J]. *Journal of Electronics and Information Technology* (张飞, 边东明, 张更新. 星载柔性转发器中一种近似精确重构原型滤波器的设计. *电子与信息学报*), 2013, **35**(03): 671–676.
- [16] Yang Z, Cao Z. Min-max criterion for global link budget analysis of digital channelized SATCOM system and classical transponder system [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, **48**(3): 2679–2689.
- [17] ZHU Hong-Bin, HONG Wei, TIAN Lin, et al. Design and fabrication of Ka-band broadband combined power amplifier based on flexible substrate integrated waveguide technology [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (朱红兵, 洪伟, 田玲等. 基于柔性基片集成波导技术的 Ka 波段功率放大器的设计和制作. *红外与毫米波学报*), 2010, **29**(3): 180–184.
- [18] Woldeesenbet Y G, Yen G G, Tessema B G. Constraint handling in multiobjective evolutionary optimization [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2009, **13**(3): 514–525.
- [19] Vieira D A G, Adriano R, Vasconcelos J A, et al. Treating constraints as objectives in multiobjective optimization problems using niched pareto genetic algorithm [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2004, **40**(2): 1188–1191.
- [20] Gong M, Jiao L, Du H, et al. Multiobjective immune algorithm with nondominated neighbor-based selection [J]. *Evolutionary Computation*, 2008, **16**(2): 225–255.
- [21] JIAO Li-Cheng, SHAN Rong-Hua, MA Wen-Ping, et al. Multi-objective optimization immune algorithm, theory and Application [M]. Beijing: Science Press (焦李成, 尚荣华, 马文萍等. 多目标优化免疫算法、理论和应用, 北京: 科学出版社), 2010, 10–15.
- [22] MA Xiu-Li, LIU Fang, JIAO Li-Cheng. Parameters optimization of synergetic neural network based on immunity clonal algorithm [J]. *J. infrared Millim. Waves* (马秀丽, 刘芳, 焦李成. 基于免疫克隆算法的协同神经网络参数优化. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(1): 38–42.
- [23] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, **6**(2): 182–197.
- [24] Coello C A C, Pulido G T, Lechuga M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2004, **8**(3): 256–279.
- [25] McGill R, Tukey J W, Larsen W A. Variations of Boxplots [J]. *The American Statistician*, 1978, **32**(1): 12–16.

(上接 309 页)

- [83] Lecaque R, Gresillon S, Barbey N, et al. THz near-field optical imaging by a local source [J]. *Optics Communications*, 2006, **262**(1): 125–128.
- [84] Lecaque R, Gresillon S, Boccara C. THz emission microscopy with sub-wavelength broadband source [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(7): 4731–4738.
- [85] Murakami H, Tonouchi M. Laser terahertz emission microscopy [J]. *Comptes Rendus Physique*, 2008, **9**(2): 169–183.
- [86] Serita K, Mizuno S, Murakami H, et al. Scanning laser terahertz near-field imaging system [J]. *Optics Express*, 2012, **20**(12): 12959–12965.
- [87] Murakami H, Serita K, Maekawa Y, et al. Scanning laser THz imaging system [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2014, **47**(37): 374007.
- [88] Serita K, Murakami H, Kawayama I, et al. Evaluation of human hairs with terahertz wave [J]. *Optical Engineering*, 2014, **53**(3).
- [89] ZHAO Jia-Yu, CHU Wei, GUO Lan-Jun, et al. Terahertz imaging with sub-wavelength resolution by femtosecond laser filament in air [J]. *Scientific Reports*, 2014, **4**(1): 3880.
- [90] Lezec H J, Degiron A, Devaux E, et al. Beaming light from a subwavelength aperture [J]. *Science*, 2002, **297**(5582): 820–822.
- [91] Heggie T J, Naylor D A, Gom B G, et al. Enhanced transmission and beam confinement using bullseye plasmonic lenses at THz frequencies; Proc. SPIE 8985, Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications VII, 2014 [C]. Bellingham: SPIE, 2014, 89851G.
- [92] Ishihara K, Ikari T, Minamide H, et al. Terahertz near-field imaging using enhanced transmission through a single subwavelength aperture [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, **44**(29): L929–L931.
- [93] CHIU Chui-Min, CHEN Hung-Wen, HUANG Yu-Ru, et al. All-terahertz fiber-scanning near-field microscopy [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(7): 1084–1086.
- [94] CHEN Hua, LEE Wen-Jeng, HUANG Hsin-Yi, et al. Performance of THz fiber-scanning near-field microscopy to diagnose breast tumors [J]. *Optics Express*, 2011, **19**(20): 19523–19531.
- [95] CHEN Hua, MA Shi-Hua, YAN Wen-Xing, et al. The diagnosis of human liver cancer by using THz fiber-scanning near-field imaging [J]. *Chinese Physics Letters*, 2013, **30**(3): 030702.
- [96] CHEN Hua, MA Shi-Hua, WU Xiu-Mei, et al. Diagnose human colonic tissues by terahertz near-field imaging [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2015, **20**(3): 036017.
- [97] Silveirinha M G, Belov P A, Simovski C R. Subwavelength imaging at infrared frequencies using an array of metallic nanorods [J]. *Physical Review B*, 2007, **75**(3): 035108.
- [98] Szalc J, Rutt H. Near-field THz imaging and spectroscopy using a multiple subwavelength aperture modulator [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2013, **3**(2): 165–171.
- [99] LI Pei-Ning, Taubner T. Broadband subwavelength imaging using a tunable graphene-lens [J]. *ACS Nano*, 2012, **6**(11): 10107–10114.