

太赫兹片上系统和基于微纳结构的太赫兹超宽谱源的研究进展

左剑 张亮亮 巩辰 张存林

Research progress of super-continuum terahertz source based on nano-structures and terahertz lab on-chip system

Zuo Jian Zhang Liang-Liang Gong Chen Zhang Cun-Lin

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 65, 010704 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.010704

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.010704>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I1>

---

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

最小可分辨气体浓度的等效测试评价方法

[Equivalent-measurement evaluation method of minimum resolvable gas concentration](#)

物理学报.2015, 64(16): 160701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.160701>

慢波结构爆炸发射对高功率太赫兹表面波振荡器的影响

[Influence of slow wave structure explosive emission on high-power surface wave oscillator](#)

物理学报.2015, 64(15): 150702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.150702>

制冷型红外成像系统内部杂散辐射测量方法

[Internal stray radiation measurement for cooled infrared imaging systems](#)

物理学报.2015, 64(5): 050702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.050702>

近高超声速高温蓝宝石窗口下中波红外成像退化分析仿真与性能测试实验

[Method of imaging performance deterioration analysis and its experiment simulated high heating sapphire MW infrared window during near-hypersonic flight](#)

物理学报.2013, 62(23): 230702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.230702>

强流电子束阻抗对相对论速调管放大器注入及群聚特性的影响分析

[Influence of the strong beam impedance on injection and bunching features of the relativistic klystron amplifier](#)

物理学报.2013, 62(4): 040701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.040701>

综述

# 太赫兹片上系统和基于微纳结构的太赫兹超宽谱源的研究进展\*

左剑 张亮亮 巩辰 张存林†

(首都师范大学物理系, 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

(2015年10月13日收到; 2015年12月8日收到修改稿)

目前太赫兹辐射信号的功率不高, 辐射带宽也较窄, 这些对于生物化学、含能材料的太赫兹检测应用领域来说是一大限制因素, 因此如何获得宽谱高功率的太赫兹源对于太赫兹时域光谱系统的发展是非常重要的; 另一方面, 常规的太赫兹系统是在自由空间传输探测的, 测量过程需要在氮气或者干燥空气环境中进行, 以克服空气中水的吸收干扰, 同时自由空间中的光场与物质相互作用的模式又降低了物质检测的灵敏度, 这对于痕量物质检测来说构成了挑战. 面对这一问题, 太赫兹片上系统利用微纳结构中的局域场效应实现对物质的低浓度检测, 此方案有助于解决这一应用难题. 综上所述, 本文分成以下两部分阐述: 首先阐述了纳米金属薄膜作为新的太赫兹源, 它可以同时产生非相干的和相干的太赫兹信号, 其输出为超过 100 THz 的太赫兹-红外辐射, 功率高达 10 mW, 这种超宽谱和高功率现象主要是由于非相干的热辐射效应引起的; 第二, 阐述了基于不同传输线结构、不同基底材料的太赫兹片上系统结构设计和光谱应用. 基于共面带状线结构和聚合物材料基底的太赫兹片上系统有着较低的损耗, 能够实现超过 2 THz 带宽的测量和生物化学应用.

关键词: 太赫兹源, 太赫兹片上系统

PACS: 07.57.-c, 07.57.Hm, 42.79.-e, 84.40.Az

DOI: 10.7498/aps.65.010704

## 1 引言

太赫兹光谱和成像科学与技术已经发展了二十多年, 特别是最近十多年来, 随着太赫兹时域光谱系统、太赫兹电子学系统、太赫兹成像技术的发展、成熟以及商业化产品品牌的出现, 比如美国厂商 Zomega、德国厂商 TOPTICA 和 Menlosystems、日本厂商 Advantest 等, 使得太赫兹技术在很多应用领域得到普及与发展. 另一方面, 这些应用需求的深入研发又促进了太赫兹技术和测试设备的改进与发展, 比如很多药物分子材料、生物化学材料都需要通过宽谱、高功率的太赫兹源或者微型太赫兹系统才能得到更丰富的太赫兹指纹谱以获得这

些材料的分子内、分子间的相互作用力信息, 生物医学研究也常需要高功率的太赫兹源依照不同医学目的进行组织的辐射研究, 或者利用微型太赫兹系统进行神经元等微观组织的研究<sup>[1-3]</sup>. 而目前商业化的太赫兹产品技术常用的有低温砷化镓光电导天线、ZnTe 晶体、空气等离子体产生与探测等, 但是这些方法还存在带宽有限、功率低、灵敏度不高或者构成的太赫兹系统复杂不易调节等问题. 解决这些问题需要考虑新的器件构造和系统设计理念. 本文从基于微纳结构的太赫兹源以及太赫兹片上系统两方面展开了调研与研究, 将分为两部分阐述: 基于纳米金属结构的能产生超宽带和高功率的太赫兹-红外辐射源; 以及太赫兹片上系统的介绍和相应的发展概况.

\* 国家重大科学仪器设备开发专项 (批准号: 2012YQ140005)、国家自然科学基金 (批准号: 11204190, 11374007, 11274233) 和国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2014CB339806-1) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [cunlin\\_zhang@cnu.edu.cn](mailto:cunlin_zhang@cnu.edu.cn)

一方面,对于太赫兹源的研究来说,基于激光产生太赫兹辐射的方法包括非线性晶体的光整流<sup>[4-6]</sup>、光电导天线的瞬态电流<sup>[7]</sup>和激光诱导空气等离子体等<sup>[8-10]</sup>,然而这些技术存在着发射带宽窄或者转换效率不高、功率低的问题.针对这些问题,提出了使用飞秒激光照射纳米结构金属表面产生太赫兹辐射的解决方案,包括平面(渗滤)金属膜<sup>[11-14]</sup>、波纹膜(浅光栅)<sup>[15-18]</sup>和有序金属纳米颗粒的阵列等<sup>[19-21]</sup>.然而,太赫兹发射源的功率依旧提高不明显,带宽也有限.本课题组设计了一种随机排序的金属表面纳米结构,金属膜沉积在随机排列的纳米孔基板上,因此金属表面具有了纳米级的表面粗糙度,这将充分提高薄膜的光耦合效率,实现宽范围内波矢量的动量匹配<sup>[22,23]</sup>,而且表面粗糙特征也有助于形成表面等离子体现象<sup>[24]</sup>.飞秒激光脉冲照射薄膜表面之后,所吸收的激光能量的一小部分用来产生相干太赫兹信号,其他更多的激发能量则以热能的形式经由热传导消散在样品内部<sup>[25,26]</sup>.实验发现有相当数量的剩余能量受表面粗糙度、放热化学过程和环境气压效应的影响沉积在样品中<sup>[27]</sup>,这些剩余能量将使样品的温度增加,达到一定的热平衡后,薄膜样品将起到热辐射源的作用.通过实验,我们确认了这一强烈的太赫兹-红外热辐射信号,并优化了金属沉积参数实现毫瓦级辐射强度和超宽带频谱(高达150 THz).

另一方面,自由空间的太赫兹时域光谱系统是利用飞秒激光对光电导材料或电光材料进行激发,发射出的太赫兹脉冲被聚焦后照射到样品上,太赫兹脉冲会被样品调制,携带了样品信息的太赫兹脉冲再次聚焦到探测器上,通过控制探测光和抽运光的时间延迟来完成对整个太赫兹脉冲在时域上的相干测量,然后对绘制的太赫兹时域谱进行傅里叶变换,最后得到样品的频域信息.然而这种技术存在着许多局限性<sup>[28]</sup>,比如频谱分辨率不高、系统尺寸大无法实现便携探测以及难以克服水的吸收损耗问题.当然,水的损耗限制也是最为重要的限制,因为由于偶极振动的影响造成了水对太赫兹的强烈吸收引起了较大的能量损耗,这就对获得高灵敏度的水溶性生物样品的太赫兹光谱信号造成了困难.基于以上问题,提出了太赫兹片上系统(terahertz lab on-chip system,片上实验室)的研究思路,该系统主要集中在传输线结构和基底材料的选择和设计上,在样品的探测区主要依靠表面等

离子体效应实现太赫兹波和痕量样品之间的相互作用.

本综述也将从以上两方面出发阐述这些太赫兹领域的研究成果.

## 2 基于纳米金属薄膜的超宽带太赫兹-红外辐射

纳米结构的金属的光学性质是非常特别的,比如表面增强拉曼效应就是利用金属纳米颗粒的粗糙表面来增强拉曼信号直到6个数量级<sup>[29]</sup>.在超宽带太赫兹辐射的研究中,利用非周期结构的纳米金属薄膜产生超强、超宽的太赫兹辐射,这些纳米金属表面尺寸比直接作用在其表面上的激光的激发波长800 nm要小,因此粗糙的表面就能形成表面等离子体的局域场,极大地增强了激发光与金属薄膜之间的耦合,从而形成了很高功率的、带宽从太赫兹直到红外区域的超宽带辐射输出.研究表明,纳米金属薄膜在飞秒激光脉冲激发下产生的热辐射效应是形成这一超宽带、高功率辐射的主要原因<sup>[30]</sup>.

薄膜的基片选取具有约200 nm直径细孔的厚度为60  $\mu\text{m}$ 、直径为25 mm的阳极氧化铝(anodic-aluminum-oxide, AAO)膜,孔密度约为50%.通过磁控溅射将金属沉积在膜上,沉积金属膜具有从10 nm到300 nm不同的厚度值,并因为该AAO膜的贯通孔结构而显示出无规律的纳米级表面粗糙度.首先分析金属金(Au)作为对象的实验结果.图1给出了100 nm厚的Ru金属膜的扫描电子显微镜(SEM)图像.图1的左图是俯视的放大图像,图1的右图是截面图.不同金属膜的表面形貌差别不大.从这些图中可以看到金属膜的各种表面结构,包括纳米级的空隙和表面突起部分.

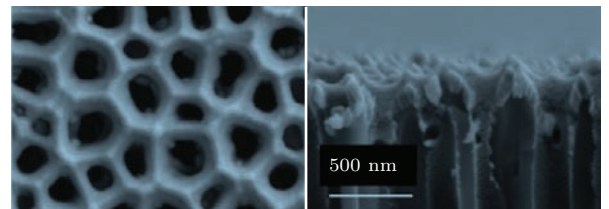


图1 金属薄膜的SEM图像

Fig. 1. SEM image of the metal film.

实验过程中搭建了傅里叶变换迈克耳孙干涉光路来测量样品发出的辐射光谱.如图2所示,激

发光中心波长 800 nm, 重复率 1 kHz 的钛蓝宝石激光放大器产生了脉冲持续时间为 100 fs、能量为 1.3 mJ 的脉冲. 该纳米结构金属样品置于如图 2 的光路中, 金属膜表面面向入射光束, 在样品背面收集发射信号. 光束集中在样品上的光斑直径约为 6 mm. 太赫兹红外辐射波段的分束镜由 0.4 mm 厚的高阻硅晶片构成. 配备 6 mm 直径的金刚石窗口的高莱探测器用来检测输出信号, 它在 0.1—150 THz 非常宽的光谱范围内有着近似的平坦响应, 同时来自探测器的电压信号被馈送至锁相放大器. 系统中充满干燥氮气以防止环境空气中的水蒸气吸收.

表面等离子体的吸收效应会导致金属纳米结构的粗糙表面可以吸收更多的激发光的能量. 由于热传导效应, 这部分热能会扩散到薄膜中, 并且能够作为堆积的热能保存在金属薄膜中, 这样薄膜温度肯定会升高, 高温下的薄膜就会构成一个新的热辐射源. 实验上发现不同激发功率或不同金属类型薄膜会产生不同带宽的太赫兹-红外辐射. 在不同的激发功率下, 金属薄膜展现出来的太赫兹-红外辐射带宽如图 3 (a) 上图所示. 可以看到当激发功率达到 2.3 W 时, 太赫兹-红外辐射的带宽能够达

到 150 THz, 激发功率越大, 辐射带宽越宽. 根据黑体辐射的普朗克定律, 频谱模拟结果如图 3 (a) 下图所示. 实验与模拟结果对照证实两点: 其一, 金属薄膜的辐射行为类似于黑体辐射现象; 其二, 由于金属薄膜表面的粗糙结构导致了高效的热辐射现象产生. 如图 3 (b) 所示, 利用红外热像仪得到了

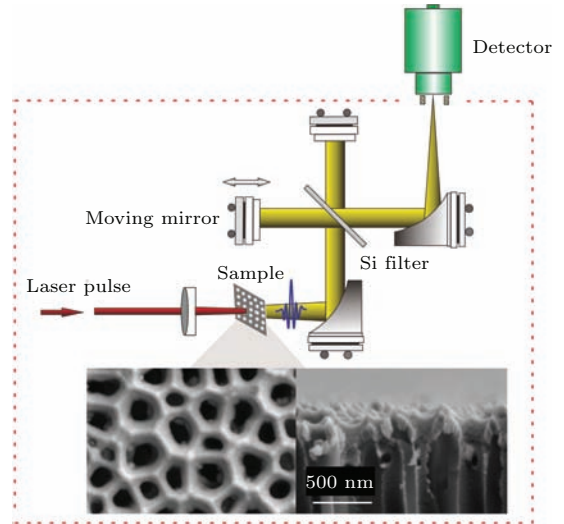


图 2 傅里叶变换迈克尔孙干涉光路图  
Fig. 2. Schematic of the Fourier-transform Michelson interferometer.

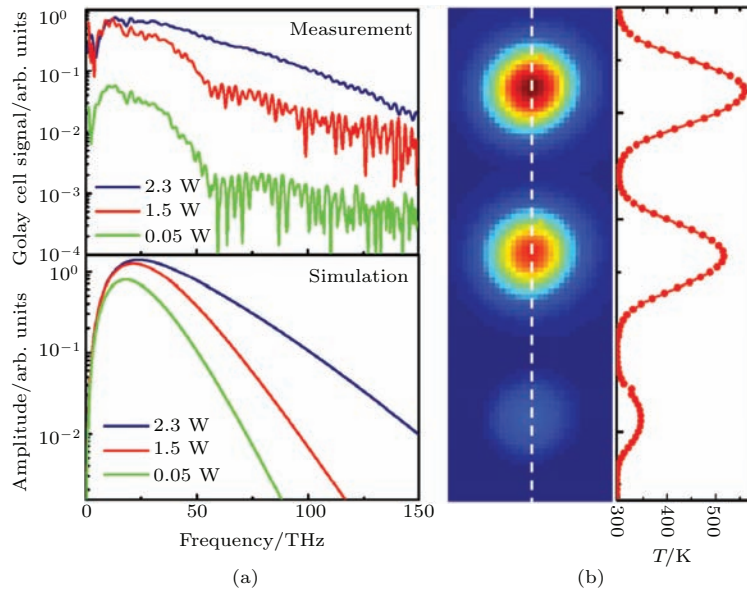


图 3 (a) 上图是实验测量得出的不同激发功率下的太赫兹-红外连续辐射, 下图是模拟得到的不同激发功率下的太赫兹-红外连续辐射; (b) 金属薄膜在不同激发功率下的表面温度分布图 (上图表示激发功率为 2.3 W 情形, 中图表示激发功率为 1.5 W 情形, 下图表示激发功率为 0.05 W 情形)  
Fig. 3. (a) Measured (top) and simulated (bottom) radiation frequency spectra under pump powers of 2.3 W (blue), 1.5 W (red) and 0.05 W (green); (b) Gaussian-shaped surface temperature distribution of the metallic film for pump power of 2.3 W (upper), 1.5 W (middle) and 0.05 W (below).

在不同的激发功率下的金属薄膜表面温度变化趋势, 可以发现薄膜表面温度场呈现高斯分布规律变化, 并且激发功率越强, 薄膜表面温度越高, 热辐射效应也就越强.

为了说明金属薄膜的增强效应, 一个光滑表面的金属薄膜作为实验对比对象. 结果发现当入射激光正入射到金属表面时, 平整表面引起的吸收只有40%, 而纳米金属薄膜能达到90%, 如图4所示. 另一方面, 改变入射激光的角度, 太赫兹-红外辐射的功率随着入射激光呈现s偏振还是p偏振而呈现规律性变化. 综合图4的结果, 进一步证实了金属薄膜对入射激光的吸收率越高, 从薄膜辐射出的太赫兹-红外热辐射的效率也就越高. 既然这是一个热辐射效应, 那么输出光束的空间分布情况也是太赫兹-红外辐射光束的重要参数之一. 实验上, 我们选取了距离样品位置后7 cm的光束位置点, 入射激光正入射在金属薄膜上, 测量得到的光束呈现高斯分布, 如图5所示.

那么哪些金属还能产生这样的超连续辐射的效应呢? 在研究中, 钌(Ru)、铂(Pt)、金(Au)分别用来构成金属薄膜, 各个薄膜产生的太赫兹-红外辐射如图6所示. 可以看到钌薄膜发射的太赫兹-红外辐射的带宽最宽, 而金薄膜发射谱最窄, 这一结果与利用黑体辐射普朗克公式模拟结果的趋势符合. 如图6(c)所示, 三个金属薄膜表面温度分布呈现高斯分布形式, 其中钌薄膜的表面温度最高, 这与其辐射的太赫兹-红外带宽最宽也是一致的. 以上的实验理论证实了三种金属薄膜可以看成是一个有稳定辐射的灰体. 在我们的实验条件下, 对于金属钌薄膜, 抽运光与太赫兹-红外辐射之间的能量转换效率达到了2.45%.

同时, 不同金属膜的较高的输出功率也通过实验和模拟得到了证实. 实验上, 通过高莱探测器获得了纳米金属膜的输出辐射随着抽运功率变化的功率曲线, 如图7(b)所示. 从图7(b)可以看到, 随着抽运功率的增加, 不同金属薄膜的输出功率也随着增加. 其中钌薄膜的输出功率达到了10 mW, 能量转换效率超过了2%. 我们利用玻尔兹曼定律对这一热辐射现象进行了理论模拟, 计算得到的输出功率值如图7(a)所示. 计算与实验结果发现各种金属薄膜的输出功率曲线呈现幂律变化, 而且实验得到的每种金属对应的曲线幂指数与理论模拟数值大致符合.

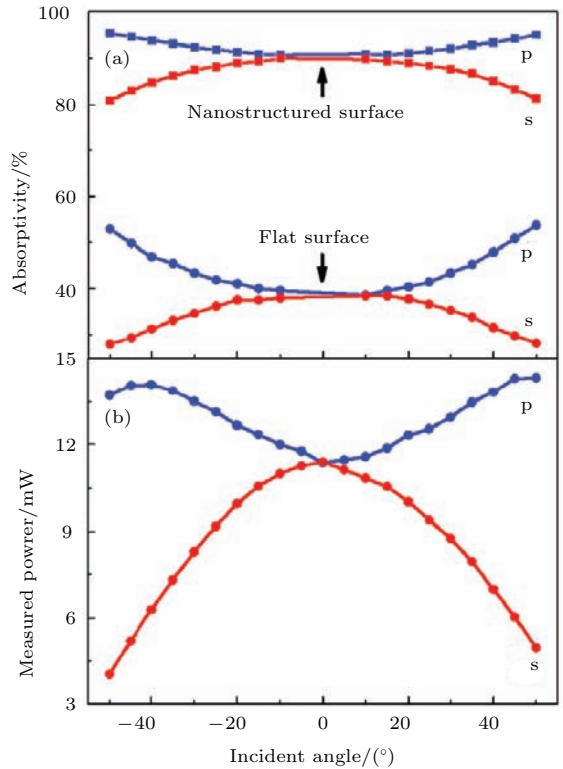


图4 (a) 在平整的金属表面和粗糙的纳米薄膜表面上, 入射激光的吸收值随着入射角度的变化; (b) 纳米结构金属薄膜辐射出的太赫兹-红外输出功率随入射角的变化; 其中, 蓝色数据表示入射激光为p偏振时的情形, 红色数据表示入射激光为s偏振时的情形

Fig. 4. (a) Absorptivity of the laser versus the incidence angle for the flat metal (dots) and nanostructured surfaces (squares); (b) measured THz-to-IR absolute power emitted from the nano-structure metal film versus the incidence angle. The blue data points represent the results for the p-polarized laser. The red data points are for the s-polarized laser.

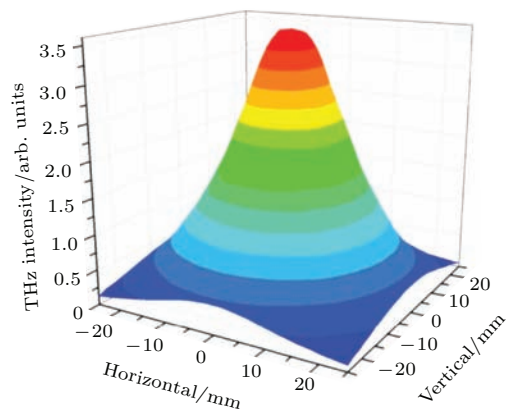


图5 呈现高斯分布的太赫兹-红外热辐射, 其中, 红色代表强度高, 蓝色代表强度低

Fig. 5. Gaussian shaped spatial distribution of the THz-to-IR thermal radiation. Red indicates high intensity, and blue denotes low intensity.

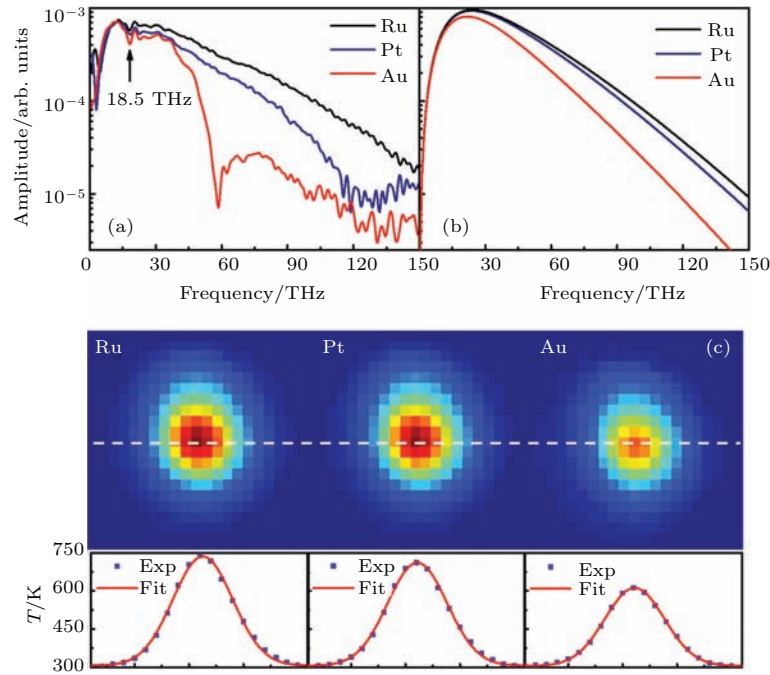


图6 (a) 100 nm厚的钌、铂、金薄膜的太赫兹-红外辐射光谱; (b) 对应于(a)的模拟光谱; (c) 上图为测量得到的三种薄膜的激光诱导表面温度场分布图; 下图中蓝色点表示实验值, 红色曲线对应的是高斯模拟值

Fig. 6. (a) Measured radiation spectra for 100 nm thick Ru, Pt and Au films; (b) simulated frequency spectra; (c) measured laser-induced surface temperatures of the samples; the bottom panel shows a cross section (white line) of the temperature distribution; blue squares denote the experimental data; red curves are Gaussian fits.

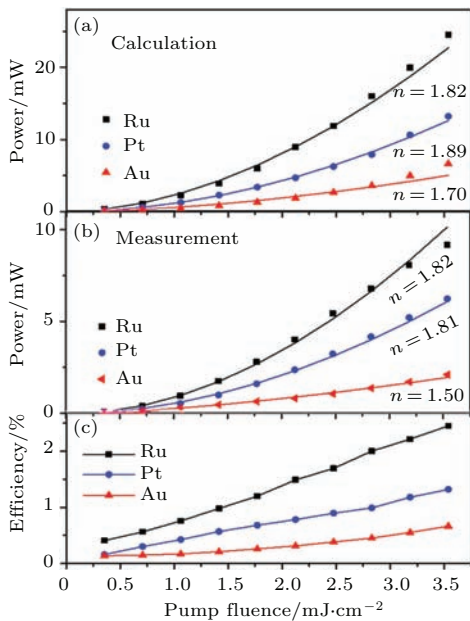


图7 (a) 钌、铂、金薄膜的输出功率随抽运功率变化的理论模拟图; (b) 利用高莱探测器得到的不同金属薄膜的输出功率随着抽运功率变化的实验值; (c) 抽运光的转换效率图

Fig. 7. (a) Total radiation power calculated for Ru (black squares), Pt (blue dots) and Au (red triangles) films; (b) radiation power measured using a calibrated Goly cell; (c) calculated pump to THz to IR energy conversion efficiency.

虽然超宽带高能量的太赫兹-红外辐射信号主要来自热辐射效应, 但是在这种纳米金属结构材料中也伴随着光整流效应产生的太赫兹信号. 我们搭建了太赫兹时域光谱测试光路, 采用了偏振敏感的电光取样的方法, 获得了100 nm厚的金薄膜辐射信号中相干成分即线偏振的太赫兹波时域信号(图8(b))和相应的频谱宽度到3 THz的频域信号(图8(c)). 针对太赫兹信号的线偏振特性, 图8(a)为在不同角度上测量的通过太赫兹线栅偏振器的透过式太赫兹功率谱, 实验发现相干太赫兹信号功率约占太赫兹信号的总辐射功率的6%, 也就是说相干太赫兹信号与热辐射信号共同构成了整个太赫兹-红外辐射信号. 同时, 随着抽运能量的增大, 图8(d)测量得到了太赫兹电场幅度的峰值的变化情况. 当抽运能量低于15  $\mu\text{J}$ 时, 由于薄膜表面的温度低于300 K, 因此热辐射输出可以忽略不计, 此时太赫兹信号主要是由相干产生的太赫兹信号主导, 太赫兹电场幅度随着抽运能量的增大而线性增长, 如图8(d)中的黑色圆点所示. 这一过程也证实了此时的信号是由光整流效应导致的. 当抽运能量超过15  $\mu\text{J}$ 时, 入射激光的高能量被金

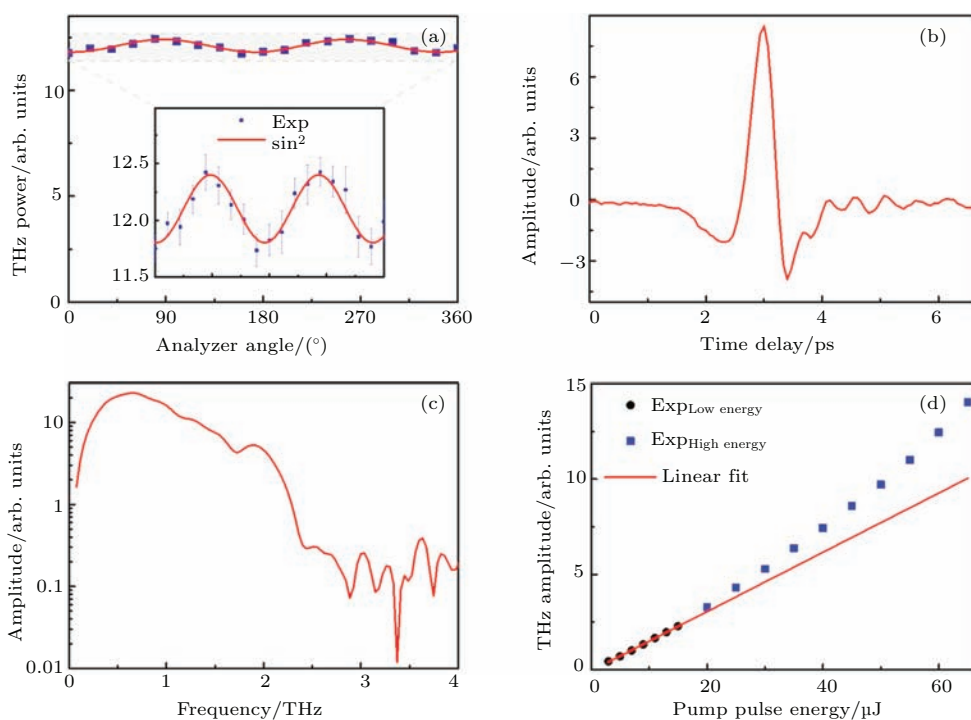


图8 相干太赫兹信号的测量结果 (a) 在不同角度测量的太赫兹输出功率, 插图放大显示了相干太赫兹信号的偏振状态, 蓝色点表示实验值, 红色线表示符合正弦平方关系的拟合曲线; (b) 相干太赫兹信号的时域波形; (c) 时域波形对应的频域谱; (d) 太赫兹峰值随着抽运能量的变化

Fig. 8. Polarization and detection of coherent terahertz signals: (a) Measured power of transmission as a function of the analyzer angle (inset shows an enlarged view of the terahertz polarization in the shaded area of the main panel; experimental data (blue squares) are fitted by a squared sinusoidal curve (red line)); (b) time-domain waveform of THz signal as detected by EO sampling; (c) corresponding frequency spectrum; (d) peak-to-peak amplitude of THz signals versus pump pulse energy.

属薄膜强烈吸收, 导致了薄膜表面温度迅速提高. 于是实验中测量得到的太赫兹电场幅度偏离了原先的线性变化规律, 如图8(d)蓝色方点所示. 这就说明了由于激光场诱导的薄膜吸收率的大幅度提高, 从激光场到太赫兹场的转换效率也得到了提高.

从上述的实验结果分析可以看到, 钪、铂、金薄膜产生了很宽的太赫兹-红外辐射带, 利用纳米金属薄膜方法产生的太赫兹-红外超宽带辐射信号同时包含了相干太赫兹信号与非相干太赫兹即热辐射信号两部分的贡献. 随着激光抽运能量的增大, 热辐射效应的贡献占主导, 而且金属薄膜的粗糙表面比平整表面更容易引起薄膜对激发光能量的吸收, 从而转化为更高效的热辐射信号产生. 相比较基于传统的相干探测方法得到的太赫兹宽带宽度也没有我们实验结果展示的那么宽<sup>[31-33]</sup>. 太赫兹-红外的超连续源将为材料指纹谱的获取(如图9所示)、生物医学研究, 比如强光

场辐射下的生物组织效应等方面提供了一种研究手段.

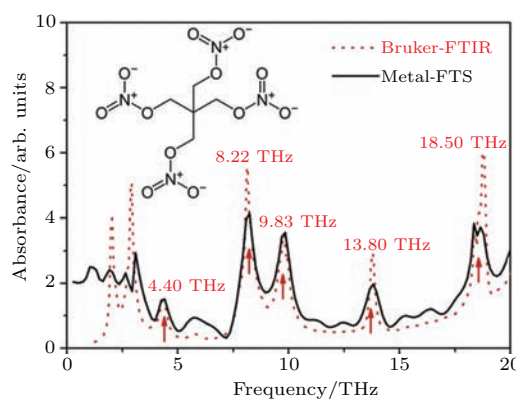


图9 基于金属薄膜产生的太赫兹源和傅里叶变换迈克尔孙干涉仪光路测量的PETN(季戊四醇四硝酸酯, 一种炸药成分)的吸收谱与基于傅里叶变换光谱仪Bruker测量得到的吸收光谱的对比图

Fig. 9. Comparison of absorption spectra of PETN measured using our Fourier-transform Michelson interferometer (black solid line) and a commercial Bruker FTIR (red dashed line).

### 3 太赫兹芯片系统

利用自由空间辐射的太赫兹时域光谱系统测量样品时,为了防止空气中的水蒸气产生的吸收损耗,需要在样品仓灌入氮气或者干燥空气.然而,这种系统结构设计伴随着下面的局限性<sup>[28]</sup>. 1) 频谱分辨率:光路中由于晶体、硅透镜会产生回波,在对太赫兹脉冲进行傅里叶变换时,主波与回波之间的距离限制了时间窗口的长度,从而影响到傅里叶变换后的频谱分辨率,使得对于物质的某些吸收峰由于频谱分辨率的降低而不易被发现. 2) 系统尺寸:一个典型的自由空间辐射的太赫兹时域光谱系统主要包括各种尺寸较大的透镜、反射镜等元件,这就使系统无法实现便携式测量的需求. 3) 水的吸收:这是最为重要的限制,由于水的偶极振动造成了水分子对太赫兹的强烈吸收,所以测试需要氮气或者干燥空气的环境,这也限制了系统的广泛应用.针对以上问题,英国、日本等研究小组提出了单片集成的太赫兹时域系统<sup>[34,35]</sup>.

区别于传统太赫兹时域光谱系统,单片集成太赫兹时域系统将太赫兹的产生与接收集成到同一基片上,在抽运区与探测区之间用金属波导连接,当波长800 nm的飞秒激光脉冲聚焦于抽运区的低温砷化镓光电导开关上激发出太赫兹脉冲,脉冲通过局域场效应与样品发生相互作用,并通过波导结构传输至探测区,从而完成对太赫兹脉冲的相干探测.样品置于波导传输线上方,通过待测样品与波导传输线的消逝场相互作用来完成频谱的测量<sup>[36]</sup>.因片上系统长度远低于衍射极限,所以对样品量要求极少.由于抽运与探测在同一芯片上,太赫兹光路的准直问题得到了极大的简化,而且缩小了仪器整体的尺寸,便于实现基于芯片式的便携式设备.

太赫兹时域光谱系统的单片集成开发始于Auston和Smith<sup>[37]</sup>的研究工作,他们首先完成了在多晶硅上制作太赫兹波导,随后Grischkowsky组<sup>[38]</sup>又提出了其他的波导形式,进一步拓展了可使用波导的范围.而里程碑的一步是由RWTH Aachen University (亚琛工业大学)<sup>[39]</sup>首先在低损耗介质上集成了低温砷化镓(LT-GaAs).

太赫兹时域光谱系统单片集成器件常见的一种方案是使用微带传输线作为金属波导传输太赫兹脉冲.它以硅作为衬底,其上溅射一层Au作为太赫兹微带线的底层,Au层上为低损耗介质材料苯并环丁烯(BCB),介质材料上用于产生及探测太赫兹脉冲的低温GaAs外延层.GaAs外延层上用于施加电场的Au电极及起到太赫兹传输的微带线.这种方案以Leeds大学的Cunningham小组为代表,如图10所示.但由于GaAs材料具有很高的介电常数,并且无法放置微带线的下极板,直接用它来做器件基底会使太赫兹波在微带线上的衰减严重,因此需将低温GaAs外延层剥离,转移键合到Si-Au-BCB基底上.测试样品不是采用传统的透射式或反射式放置,而是利用太赫兹微带线的消逝场,消逝场的场强在微带线上方几十微米范围内较强,当样品紧贴微带线时,微带线上方的消逝场直接作用于样品,则接收端可探测到样品的吸收谱信息.但该系统由于传输过程的损耗和色散影响较大,使得其在室温下仅能达到1 THz左右的带宽,且易受到回波反射的影响.以乳糖分子为样品,该片上系统获得了与自由空间系统同样的光谱特征,并且该光谱系统能够达到超过1.2 THz的光谱范围<sup>[40]</sup>,如图11所示.以DNA的测量为例,能够测量的最低浓度达到了毫微微摩尔的数量级,但是样品的需求量降低了5个数量级<sup>[41]</sup>.

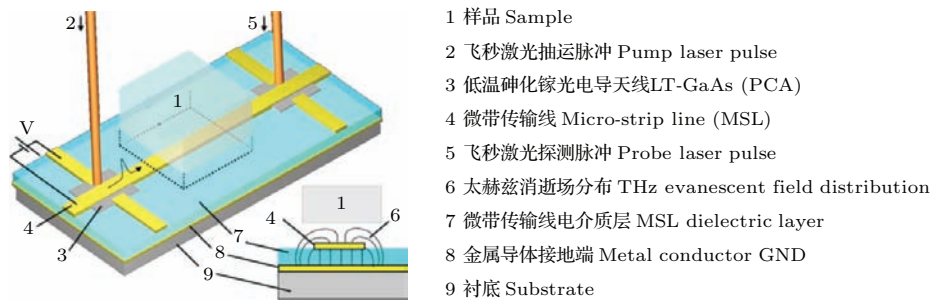


图10 太赫兹微带线波导结构图

Fig. 10. The structure of the terahertz micro-strip line (MSL).



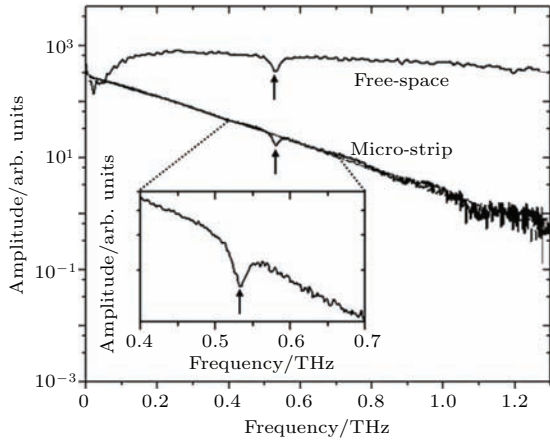


图 11 用自由空间太赫兹时域光谱系统获得的乳糖透射吸收光谱与用微带传输线获得的乳糖吸收光谱对比, 其中插图为乳糖共振吸收区的放大图

Fig. 11. Fourier transforms of the data of lactose absorption resonance magnified for clarity. Transmission data obtained using a free-space terahertz-TDS system and microstrip are also shown.

从以上分析可以看到, 片上传输线结构的设计和材料的选择是极其重要的, 因为它决定了系统的传输特性, 如特性阻抗、衰减色散等. 但由于太赫兹波必须通过电介质基板材料传播, 此时芯片上的几何结构将不支持 TEM 波. 同时基板在非零频率的相对介电常数较高, 因此脉冲传输时它们通常比自由空间波导表现出更高的衰减和色散. 解决这些问题可以通过设计更合理的传输线结构和低介电常数材料作为基底等方法实现. 几种用于太赫兹微带线介电层的材料已被相继使用, 其中包括有机材料苯并环丁烯 (BCB,  $\epsilon = 2.6$ ), 聚丙烯 ( $\epsilon = 2.35$ ) 和聚酰亚胺膜 (TORAY; SP483,  $\epsilon = 3.2$ ). 这些电介质材料在太赫兹频率具有非常低的介电常数, 1.0 THz 内的模式色散可以忽略不计, 因此宽带太赫兹脉冲可以在相当长 (几个毫米) 的距离内传输.

基于这些分析, 一些研究人员着眼于将半导体 Si 或 GaAs 与共面带状线结构相结合, 其制造方法简单, 与微带线相比它可以保持单模传输, 特性阻抗接近  $50 \Omega$ . 以广岛大学的 Kadoya 小组为代表采用了共面带状线的几何结构, 同时采用低介电常数的高分子材料作为基板 (例如聚合物材料作为共面带状线的基底材料), 解决了由于电磁波在基底中传播而产生的能量损耗较大的问题, 如图 12 所示 [42]. 在此基础上, 他们还研究了低温 GaAs 光电导天线的带宽随着退火温度变化的规律 (如图 13 (a) 所示), 发现退火温度能够影响天线的

带宽, 最佳性能的谱宽能达到并超过 3 THz, 然后通过测量粉末样品的光谱来证实天线的带宽的有效性, 如图 13 (b) 所示的 L-酪氨酸的光谱图与文献报道的指纹谱一致, 此次测量结果证实了光谱芯片具有 4 THz 的带宽.

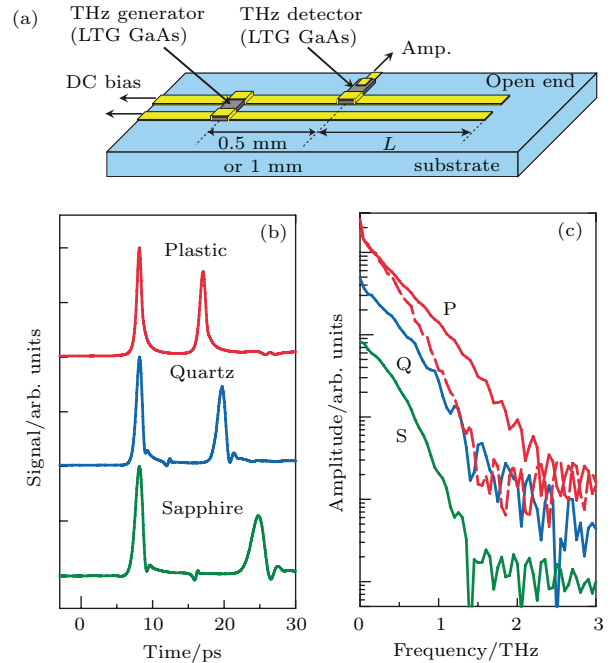


图 12 (a) 共面带状线单片集成器件示意图; (b) 延迟线长度  $L$  为 1 mm 的共面带状线结构上观察到的太赫兹信号的时域光谱图; (c) 实线表示图 (b) 中的第一个时域脉冲对应的频谱 (其中红色线表示塑料为基底材料 (P), 蓝色线表示石英基底材料 (Q), 绿色线表示蓝宝石基底材料 (S)), 虚线表示延迟线长度  $L$  为 3 mm 的塑料为基底材料的共面带状线单片集成器件上的第二个时域脉冲对应的频谱图

Fig. 12. (a) Schematic drawing of the CPS device; (b) time-domain spectroscopy of the observed signals in the CPSs with  $L = 1$  mm; (c) the solid curves are the amplitude spectra of the first pulses shown in (b) for the plastic (P), quartz (Q), and sapphire (S) CPSs, and the broken curve is the spectrum of the second pulse in the plastic CPS with  $L = 3$  mm.

综合上述方案, 首都师范大学联合中国科学院半导体研究所等单位对太赫兹时域光谱系统的单片集成的关键问题进行了研究, 提出了采用聚合物键合、共面带状线传输的方法, 突破低温 GaAs 外延层剥离、转移键合等关键问题和技术, 获取耦合电极、传输线的最佳结构. 最终将产生及探测太赫兹波的低温 GaAs 外延层、光电导天线、太赫兹波传输线集成到一个  $1 \text{ cm}^2$  左右的环烯烃共聚物基底上, 完成集成器件的制备. 其中, 低温 GaAs 是太赫兹芯片系统的重要器件. 低温 GaAs 在高电压激励下,

受到飞秒激光激发产生的载流子在电压的驱动下产生极快的电流振荡, 所对应的电磁频率可达到太赫兹数量级. 片上系统中低温 GaAs 天线有两个重要参数: 幅值与谱宽. 前者受限于电阻值与电压能

量转化, 后者受限于载流子寿命. 我们在优化低温 GaAs 的分子束外延生长过程中发现, 调节生长速度与原位退火温度, 可以优化这两个参数(图 14). 在目前搭建的测试系统中, 谱宽可以达到 2.5 THz.

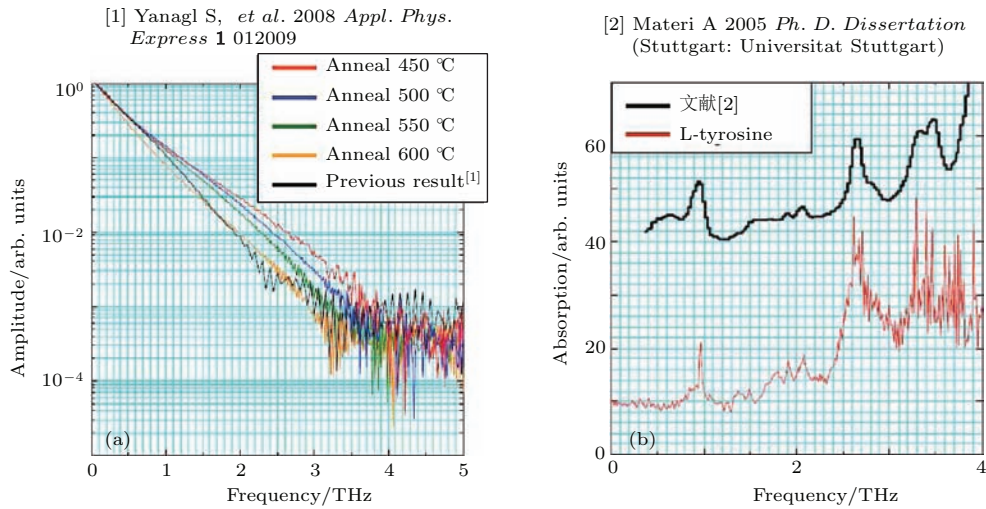


图 13 (a) 不同退火温度下的低温 GaAs 制成的共面带状线单片上器件的频域谱图; (b) 利用片上系统测量 L-酪氨酸的吸收光谱与文献发表数值的比较图

Fig. 13. (a) The frequency-domain spectrum from low temperature (LT) grown GaAs coplanar stripline on-chip system; (b) the comparison between the the absorption spectrum of L-tyrosine by on-chip system and that in the published literature.

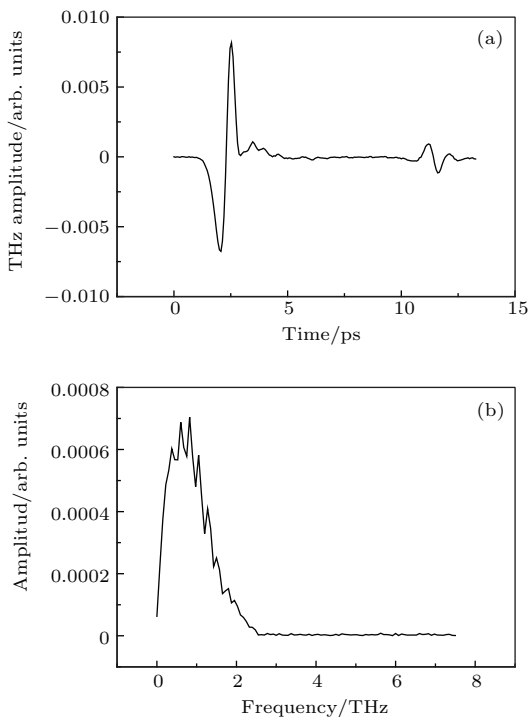


图 14 优化后低温 GaAs (a) 时域信号及其 (b) 频域图  
Fig. 14. (a) The time-domain spectrum and (b) the FFT spectrum of terahertz emission from home-build LT-GaAs.

低温 GaAs 生长完成后, 使用键合工艺转移薄膜到低介电损耗塑料衬底上(如图 15 所示), 再使用酸腐蚀减薄到在衬底上只保留一层低温 GaAs, 完成转移后的薄膜化. 键合完成后进行光刻, 首先对低温 GaAs 膜进行选择性地光刻, 仅保留发射和接收模块, 再光刻波导结构, 并蒸镀一层 Au, 最后采用 lift-off 技术完成金属剥离, 形成电极和共面带状线. 最后将基底固定在印制电路板上, 使用金丝球焊接出引线, 搭建太赫兹时域光谱测试系统进行应用测试. 目前, 我们即将完成光刻工作进行光谱测试.



图 15 低温 GaAs 键合聚合物基底  
Fig. 15. The bonding of LT-GaAs epilayers on the copolymer substrate.

太赫兹片上系统非常适合生物化学样品的痕量探测和分析. 佳能先进技术研究中心曾研发了用于无标记DNA杂交检测的片上太赫兹集成设备. 该设备由产生和检测太赫兹脉冲的两个光电导开关和微带传输线构成, DNA样品置于微带线上. 由于DNA结构的不同, 对太赫兹脉冲传播时间的延迟影响也不同, 从而达到获得样品的有效信号的目的. 该小组同时通过模拟和实验结果证明, 具有较窄结构的微带传输线器件具有更高的灵敏度<sup>[43]</sup>.

## 4 结 论

本文主要阐述了基于微纳结构为基础的超宽谱太赫兹源、太赫兹片上系统的研究状况、进展. 面对太赫兹系统发展的瓶颈以及特殊情境下的应用需求, 基于金属纳米薄膜的超宽谱太赫兹源提供了一种热辐射效应产生太赫兹-红外辐射为主的宽谱太赫兹源, 同时在这一宽带辐射中也有相干太赫兹信号的贡献. 该薄膜能提供高功率、高转换效率的宽谱太赫兹-红外辐射输出, 这些现象主要是由于金属薄膜的粗糙表面形成的局域场引起的热辐射效应造成的. 这种新源将有助于实现宽光谱范围内的生物化学物质检测、生物组织的热辐射研究. 虽然通过纳米结构材料的设计实现的宽带太赫兹源能拓展太赫兹系统的应用, 但是能够实现从大型化的太赫兹时域光谱仪系统走向微型芯片上的操作已然是太赫兹系统应用发展的关键. 太赫兹片上系统目前主要通过低温砷化镓材料实现太赫兹产生和信号探测, 低介电常数的高分子材料作介电层或基底材料以及微带线结构、共面带状线结构实现信号传输, 现在实现的最大带宽能够不低于2 THz. 片上系统比较适合用于探测较低摩尔量的固体物质或者液体分子.

## 参考文献

- [1] Müller A, Marschall S, Jensen O B, Fricke J, Wenzel H, Sumpf B, Andersen P E 2013 *Laser Photon. Rev.* **7** 605
- [2] Booske J H, Dobbs R J, Joye C D, Kory C L, Neil G R, Park G S, Temkin R J 2011 *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* **1** 54
- [3] Shumyatsky P, Alfano R R 2011 *J. Biomed. Opt.* **16** 033001
- [4] Yeh K L, Hoffmann M C, Hebling J, Nelson K A 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 171121

- [5] Stepanov A G, Bonacina L, Chekalin S V, Wolf J P 2008 *Opt. Lett.* **33** 2497
- [6] Hirori H, Doi A, Blanchard F, Tanaka K 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 091106
- [7] Park S G, Weiner A M, Melloch M R, Sider C W, Sider J L, Taylor A J 1999 *IEEE J. Quant. Electron.* **35** 1257
- [8] Cook D J, Hochstrasser R M 2000 *Opt. Lett.* **25** 1210
- [9] Xie X, Dai J, Zhang X C 2006 *Phys. Rev. Lett.* **96** 075005
- [10] Kim K Y, Taylor A J, Glowina J H, Rodriguez G 2008 *Nat. Photon.* **2** 605
- [11] Suvorov E V, Akhmedzhanov R A, Fadeev D A, Ilyakov I E, Mironov V A, Shishkin B V 2012 *Opt. Lett.* **37** 2520
- [12] Kadlec F, Kuzel P, Coutaz J L 2012 *Opt. Lett.* **29** 2674
- [13] Kadlec F, Kuzel P, Coutaz J L 2015 *Opt. Lett.* **30** 1402
- [14] Ramakrishnan G, Planken P C M 2011 *Opt. Lett.* **36** 2572
- [15] Welsh G H, Wynne K 2009 *Opt. Express* **17** 2470
- [16] Welsh G H, Hunt N T, Wynne K 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 026803
- [17] Garwe F, Schmidt A, Zieger G, May T, Wynne K, Müller U, Zeisberger M, Paa W, Stafast H, Meyer H G 2011 *Appl. Phys. B* **102** 551
- [18] Schmidt A, Garwe F, Hubner U, May T, Paa W, Zeisberger M, Zieger G, Stafast H 2012 *Appl. Phys. B* **109** 631
- [19] Polyushkin D, Hendry E, Stone E, Barnes W 2011 *Nano Lett.* **11** 4718
- [20] Ramakrishnan G, Kumar N, Planken P C M, Tanaka D, Kajikawa K 2012 *Opt. Express* **20** 4067
- [21] Gao Y, Chen M K, Yang C E, Chang Y C, Yin S, Hui R, Ruffin P, Brantley C, Edwards E, Luo C 2009 *J. Appl. Phys.* **106** 074302
- [22] Moskovits M 1985 *Rev. Mod. Phys.* **57** 783
- [23] Zabel H, Stroud D 1992 *Phys. Rev. B* **46** 8132
- [24] Aeschlimann M, Schmuttenmaer C A, Elsayed A H E, Miller R J D, Cao J, Gao Y, Mantell D A 1995 *J. Chem. Phys.* **102** 8606
- [25] Vorobyev A Y, Guo C 2011 *Nat. Sci.* **3** 488
- [26] Vorobyev A, Guo C 2006 *Opt. Express* **14** 13113
- [27] Vorobyev A, Guo C 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 011916
- [28] Cunningham J, Byrne M B, Wood C D, Dazhang L 2010 *Electron. Lett.* **46** 34
- [29] Le Ru E C, Blackie E, Meyer M, Etchegoin P G 2007 *J. Phys. Chem. C* **111** 13794
- [30] Zhang L L, Mu K J, Zhou Y S, Wang H, Zhang C L, Zhang X C 2015 *Sci. Rep.* **5** 12536
- [31] Vicario C, Monoszlai B, Jazbinsek M, Lee S H, Kwon O P, Hauri C P 2014 arXiv: 1407.7100 [physics. optics]
- [32] Li C Y, Seletskiy D V, Yang Z, Sheik-Bahae M 2015 *Opt. Express* **23** 11436
- [33] Luo L, Chatzakos I, Wang J, Niesler F B P, Wegener M, Koschny T, Soukoulis C M 2014 *Nat. Commun.* **5** 3055
- [34] Byrne M B, Cunningham J, Tych K, Burnett A D, Stringer M R, Wood C D, Dazhang L, Lachab M, Linfield E H, Davies A G 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 182904
- [35] Ohkubo T, Onuma M, Kitagawa J, Kadoya Y 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 212511

- [36] Byrne M B, Cunningham J, Tych K, Burnett A D, Stringer M R, Wood C D, Dazhang L, Lachab M, Linfield E H, Davies A G 2012 *Opt. Express* **20** 8466
- [37] Auston D H, Smith P R 1982 *Appl. Phys. Lett.* **41** 599
- [38] Ketchen M B, Grischkowsky D, Chen T C, Chi C C, Duling III I N, Halas N J, Halbout J M, Li G P 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 751
- [39] Heiliger H M, Vollebfiger B, Roskos H G, Heyt R, Ploogt K, Kurz H 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 2903
- [40] Russell C, Wood C D, Dazhang L, Burnett A D, Li L H, Linfield E H, Davies A G, Cunningham J E 2011 *36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz)* Houston, USA, October 2–7, 2011 p1
- [41] Baras T, Kleine-Ostmann T, Koch M 2003 *J. Biol. Phys.* **29** 187
- [42] Yanagi S, Onuma M, Kitagawa J, Kadoya Y 2008 *Appl. Phys. Express* **1** 012009
- [43] Kasai S, Tanabashi A, Kajiki K, Itsuji T, Kurosaka R, Yoneyama H, Yamashita M, Ito H, Ouchi T 2009 *Appl. Phys. Express* **2** 062401

## REVIEW

# Research progress of super-continuum terahertz source based on nano-structures and terahertz lab on-chip system\*

Zuo Jian Zhang Liang-Liang Gong Chen Zhang Cun-Lin<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

( Received 13 October 2015; revised manuscript received 8 December 2015 )

### Abstract

The terahertz applications of bio-materials and energetic materials are hindered by the low power-intensity of the terahertz output and the narrow band of terahertz emission. So the crucial part of the development of terahertz time-domain spectroscopy (TDS) systems is the new terahertz source with broadband frequency range and high power output. As to the free-space TDS system, the system is necessarily purged by dried nitrogen gas to remove the absorbed water vapor. In addition, the low detection sensitivity also exists because of the free-space interactions between the terahertz emission and the substances. To address these problems, terahertz lab on-chip system is proposed. The local field effect in the nano-structures of on-chip system can contribute to the detection of low concentration of the substance. The present paper is composed of two sections. Firstly, a new terahertz source based on the metal nano-film can produce an intense and broad-band terahertz-infrared emission, which is comprised of incoherent terahertz-infrared signals and coherent terahertz signals. This emission can cover more than 100 THz and has an output power of up to 10 mW. This optical phenomenon mainly arises from the incoherent thermal radiation effect. Secondly, the terahertz lab on-chip systems with different transmission lines and different substrates are clarified. There exists lower loss on the on-chip system with coplanar stripline structure and copolymer substrate. High sensitivity of biological detection in terahertz band of up to 2 THz can be achieved by using this system.

**Keywords:** terahertz source, terahertz on-chip system

**PACS:** 07.57.-c, 07.57.Hm, 42.79.-e, 84.40.Az

**DOI:** 10.7498/aps.65.010704

\* Project supported by the National Key Scientific Instrument and Equipment Development Project of China (Grant No. 2012YQ140005), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11204190, 11374007, 11274233), and the National Basic Research Program of China (Grant No. 2014CB339806-1).

† Corresponding author. E-mail: [cunlin\\_zhang@cnu.edu.cn](mailto:cunlin_zhang@cnu.edu.cn)