

文章编号: 2095-4980(2017)02-0178-05

基于太赫兹片上系统微带线的设计与仿真

张 聪^{a,b,c}, 苏 波^{a,b,c*}, 范 宁^{a,b,c}, 张盛博^{a,b,c}, 张存林^{a,b,c}

(首都师范大学 a.北京市教育部太赫兹波谱与成像重点实验室; b.太赫兹光电子学重点实验室;
c.北京成像技术高精尖创新中心, 北京 100048)

摘 要: 太赫兹片上系统是一种将太赫兹产生和探测装置以及波导传输装置集成在同一基片上的设计, 应用于晶体材料的共振吸收以实现太赫兹时域光谱的探测。太赫兹产生与探测装置都由光电导天线构成, 波导传输装置由微带线构成。微带线是一种能够传输高频电磁波的波导结构, 但相比于自由空间波导具有高损耗和散射特性。为了研究微带线的结构参数对太赫兹波传输损耗的影响, 采用模拟仿真的方法, 得出了传输损耗随着传输长度和频率的增加而增加, 随着微带线金属层厚度与介质层厚度的增加而减少的规律, 从而证明了传输损耗的减少能够通过合理设计微带线结构来实现。

关键词: 太赫兹片上系统; 太赫兹波; 微带线; 损耗; 仿真

中图分类号: TN817

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201702.0178

Design and simulation of microstrip line based on an on-chip terahertz system

ZHANG Cong^{a,b,c}, SU Bo^{a,b,c*}, FAN Ning^{a,b,c}, ZHANG Shengbo^{a,b,c}, ZHANG Cunlin^{a,b,c}

(a.Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging; b.Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education;
c.Beijing Advanced Innovation Center for Imaging Technology, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: On-chip terahertz system is a design which integrates terahertz generation device, detection device and waveguide transmission device on to the same substrate. It is utilized to measure the spectral absorption of crystal materials to achieve the function of terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) system. The terahertz generation device and detection device are photoconductive antennas and the waveguide transmission device is Microstrip Line(MSL). MSL can transmit high frequency electromagnetic waves, but it also shows a higher attenuation and dispersion compared with the free-space waveguide. In order to study the influence of the structural parameters of microstrip lines on the transmission loss of terahertz wave, simulation is performed to show that the transmission loss increases with the increase of transmission length and frequency. At the same time, with the increase of the thickness of metal layer and dielectric layer, the transmission loss reduces gradually, thus proving that the reduction of transmission loss can be achieved through the rational design of microstrip line structure.

Keywords: on-chip terahertz system; terahertz wave; microstrip line; loss; simulation

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz(波长在 30~3 000 μm)之间的电磁波, 其波段位于微波和红外之间, 是处于由宏观电子学向微观光子学过渡的特殊位置。近十几年来超快激光技术和半导体材料科学与技术的迅速发展, 为太赫兹脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源, 推动了太赫兹应用系统的发展, 促进了太赫兹在光谱学和成像技术方面的广泛应用^[1]。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产生太赫兹脉冲, 通过太赫兹脉冲与样品的相互作用携带样品信息, 并利用相干探测原理得到样品频域信息的装置。该系统已经能够对大量的物质进行频谱分析, 在半导体、药品和生物分子等领域的研究分析中发挥着重要作用^[2]。尽管太赫兹时域光谱系统应用广泛, 但由于采用此系统对样品进行频谱分析时, 所需样品量太大, 光谱分辨率较低, 水对太赫兹强烈的吸收作用以及系统尺寸太大无法实现便携等缺点^[3], 使得该系统的进一步应用发展被限制。有鉴

收稿日期: 2016-09-22; 修回日期: 2016-12-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61575131; 61675138)

*通信作者: 苏 波 email:su-b@163.com

于此, 提出了一种太赫兹时域光谱系统的片上集成器件即太赫兹片上系统, 该系统不但解决了传统太赫兹时域光谱系统的空间占用问题, 而且省去了样品测量之前太赫兹波的准直调节, 使样品测量步骤更加简洁。但是从发表的文献上来看, 目前在国外分别有 2 所大学对该系统进行了研究, 在国内对于这方面的研究报道还很少。究其原因主要在于微结构的加工, 整体器件结构设计以及传输波导的设计与制作等难点问题。就微带线而言, 多数文献是对微带线的单一结构进行理论研究, 很少将微带线与其他结构集成到一个芯片上进行研究。本文主要阐述了太赫兹片上系统的工作原理, 并通过理论分析和仿真模拟, 研究了微带线在太赫兹频率范围内的传输损耗与微带线结构的关系, 为下一步工作打下坚实的基础。

1 太赫兹片上系统工作原理

区别于传统太赫兹时域光谱系统, 太赫兹片上系统将产生太赫兹脉冲的泵浦区与接收太赫兹脉冲的探测区集成在同一基片上, 在泵浦区与探测区之间用金属波导连接, 见图 1。当波长 800 nm 的飞秒激光脉冲聚焦于泵浦区的低温砷化镓 3 上时, 在低温砷化镓 3 表面会瞬间产生大量的光生载流子。由于光电导开关两侧接有电极 2 使得自由载流子会在电场的作用下加速运动, 从而形成瞬变的光电流, 最终这种快速的、随时间变化的电流会辐射出太赫兹脉冲^[4], 这些脉冲被耦合进入波导 4 并被传输至探测区。当太赫兹脉冲传输至被测样品后, 通过微带线周围的太赫兹脉冲消逝场与样品的相互作用使得太赫兹脉冲携带有被测样品的信息。在探测区, 飞秒激光脉冲直接打在低温砷化镓 3 上, 在低温砷化镓 3 表面会产生大量的光生载流子, 而此时同步到达的携带有被测样品信息的太赫兹脉冲作为加载在金属电极 2 两端的偏置电场, 使得光生载流子向两金属电极 2 运动形成光电流。然后通过金属电极 2 相连的电流探测器来测量这个与太赫兹脉冲瞬时电场成正比的光电流, 由此完成对于携带有样品信息的太赫兹脉冲的探测^[5]。因其器件长度远远低于衍射极限, 所以对样品量要求极少。由于泵浦与接收在同一芯片上, 这样不仅不用对太赫兹光路进行准直而且还可以很大程度上缩小整体仪器的尺寸并减轻质量, 从而实现设备的小型化。

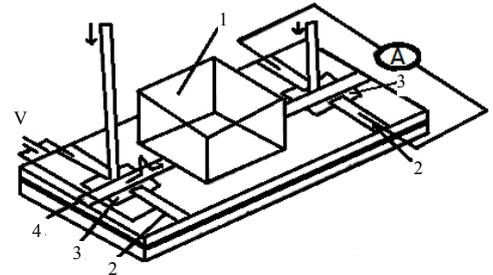


Fig.1 Schematic diagram of on-chip THz system
图 1 太赫兹片上系统示意图

2 微带线结构尺寸设计

微带线是 20 世纪 50 年代发展起来的一类微波传输线, 具有体积小、质量轻、频段宽、可集成等优点, 其主要由金属材料带状线、介质层和金属材料的接地平面构成^[6], 如图 2(a)所示。图 2(b)是微带线的电场分布示意图, 从微带线中的场分布可以看出, 电场大部分存在于介质基片中, 还有一小部分处在空气介质中。因而微带线中的介质是由空气层和介质层组成的混合介质, 该混合介质的介电常数定义为有效介电常数^[7]。

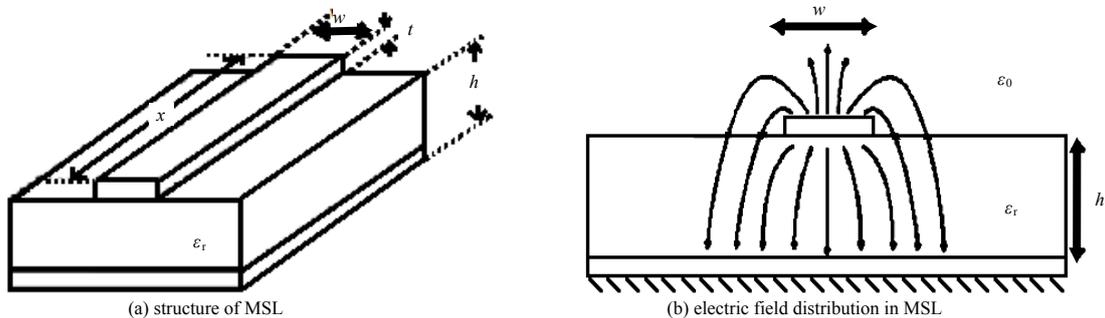


Fig.2 Structure of MSL and the electric field distribution
图 2 微带线结构图及电场分布示意图

导体带状线的宽度 w 和介质层厚度 h , 以及介质层的介电常数 ϵ_r 都会影响该混合介质的介电特性, 如式(1), 有效介电常数 ϵ_{eff} 可表示为:

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{12h}{w}}} \tag{1}$$

微带线的特性阻抗 z_0 可表示为:

$$z_0 = \begin{cases} \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} \ln \left(\frac{8h}{w} + \frac{w}{4h} \right), & \frac{w}{h} \leq 1 \\ \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} \left[\frac{w}{h} + 1.393 + 0.667 \ln \left(\frac{w}{h} + 1.444 \right) \right]}, & \frac{w}{h} > 1 \end{cases} \quad (2)$$

介质损耗是实际介质在交变电场作用下, 介质分子交替极化和晶格来回碰撞而产生的介质热损耗, 可表示为^[8]:

$$\alpha_d = 27.3 \frac{\epsilon_r (\epsilon_{\text{eff}} - 1) \tan \delta}{(\epsilon_r - 1) \sqrt{\epsilon_{\text{eff}}} \lambda_0} \quad (3)$$

式中 $\tan \delta$ 是介质损耗角的正切值。导体损耗是高频趋肤效应引起的导带和接地板上非理想导体的欧姆损耗^[8], 可表示为:

$$\alpha_c = \frac{8.686 \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\sigma}}}{1000 z_0 w} \quad (4)$$

式中: σ 和 μ_0 分别为金属电导率和自由空间磁导率; f 是传输频率。传输线总损耗为: $\alpha = \alpha_c + \alpha_d$ 。微带线的最大传输频率由截止频率决定, 可表示为:

$$f_c = \frac{c_0 z_0}{2 \eta_0 h} \quad (5)$$

式中: η_0 为自由空间特性阻抗; c_0 为真空中的光速。

为了最小化相对介电常数和总的介质损耗, 介质层的介电常数需要相对较低, 同时为使微带线整体结构更牢固, 介质层的材料与金属材料要有很好的粘附性。苯并环丁烯(BCB)作为介质材料的首选, 原因在于当频率为 400 GHz 时, 其相对介电常数低至 2.57, 并且与金属的粘附性非常好。考虑到为了扩大传输的太赫兹波频率范围, 介质层的厚度应保持在最小, 并且该介质材料可以被旋涂在接地金属平面上, 且能够形成所需要的厚度。当介质层厚度为 6 μm , 带状导体的宽度为 30 μm 时, 微带线的特性阻抗约为 30 Ω , 恰好使得太赫兹波截止频率在 2 THz 时达到最大。

由传输线总损耗公式可知, 当介质损耗较小时, 总损耗由导体损耗决定。为了最小化导体损耗, 导体厚度应等于传输频率下透入深度的 3 倍^[9], 透入深度可表示为:

$$\delta_s = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \sigma}} \quad (6)$$

由于 1 THz 时太赫兹波在金属内的透入深度为 78.6 nm, 所以导体厚度约为 250 nm。

3 微带线的仿真

本文主要采用 HFSS 仿真软件, 研究了微带线的长度、介质层和导体层的厚度, 对太赫兹波在微带线中传输性能的影响。

首先在软件操作界面绘制微带线模型, 见图 3, 其结构为: 一个厚为 250 nm, 宽为 30 μm , 长为 1 mm 的金金属材料带状导体置于一个厚为 6 μm , 宽为 500 μm , 长为 1 mm 的 BCB 介质层之上, 最下面为一个厚为 250 nm, 宽为 500 μm , 长为 1 mm 的金金属材料接地板。然后在微带线两侧分别设置一个宽为 330 μm , 高为 60 μm 的波端口用于太赫兹波的导入和导出, 并且设置一个长方体辐射边界, 使其完全包裹住微带线结构。最后将扫描频率设置为 0.1~1 THz, 再设置扫描参数, 如传输长度、金属层厚度和介质层厚度。

太赫兹波在微带线中的传输参数用 S 曲线即散射参数表示, 这是微波传输中的一个重要参数。其中仅用正向传输系数即 S_{21} 曲线来表示太赫兹波在微带线中的增益。其中, 太赫兹波在微带线中的传输损耗与传输长度的关系见图 4(a), 随着传输长度和传输频率的增加, 3 条曲线都呈下降趋势, 并且数值都为负值。这就说明太赫兹波在微带线中的传输是存在损耗的, 同时随着传输长度和传输频率的增加, 太赫兹波的损耗越来越多。图 4(b)为已知文献中太赫兹波在微带线中的传输损耗与传输长度的关系, 可看出 2 幅关系曲线图趋势是一样的, 由此可证明仿真结果的准确性。

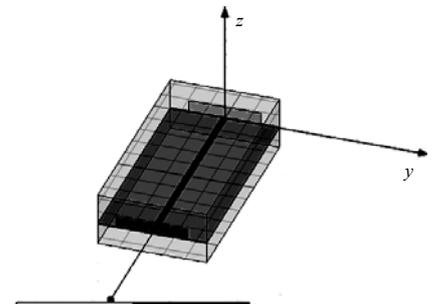


Fig.3 Model of MSL
图 3 微带线模型

太赫兹波在微带线中传输损耗与金属层厚度的关系见图 5, 在微带线中金属层厚度在 $0.228\sim 1.228\ \mu\text{m}$ 范围内, 随着金属层厚度的增加, 太赫兹波在微带线中的传输损耗减小。由此可知, 当金属层厚度为 $0.228\ \mu\text{m}$ 时, 太赫兹波在微带线中的传输损耗最大。

太赫兹波在微带线中的传输损耗与介质层厚度的关系见图 6, 在微带线中介质层厚度在 $2\sim 12\ \mu\text{m}$ 的范围内, 介质层越厚, 太赫兹波的损耗越小。由此可知当介质层厚度为 $12\ \mu\text{m}$ 时, 太赫兹波在微带线中的传输损耗最小。

4 结论

将太赫兹产生、太赫兹探测以及传输波导集成到同一芯片上的太赫兹片上系统, 弥补了传统太赫兹时域光谱系统分辨率低、占用空间大、样品消耗多的不足。通过 HFSS 仿真软件研究了所设计微带线的尺寸参数对太赫兹波传输损耗的影响。仿真结果表明, 微带线中的传输损耗随着传输长度和频率的增加而增加, 随着微带线金属层厚度与介质层厚度的增加而减少。总之, 基于太赫兹时域光谱技术的小型化目前还处于初级阶段, 从长远来看, 微带线与金属波导相比具有体积小、质量轻、使用频段宽、可靠性高和制造成本低等特点, 使其易于与太赫兹其他组件集成, 实现太赫兹时域光谱系统的小型化, 这都为未来太赫兹技术的发展提供了方向。

参考文献:

- [1] 闵碧波, 曾嫦娥, 印欣, 等. 太赫兹技术在军事和航天领域的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014, 12(3): 351-354. (MIN Bibo, ZENG Change, YIN Xin, et al. Application of terahertz techniques in military and space[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014, 12(3): 351-354.)
- [2] HUBER R, TAUSER F, BRODSCHMELM A, et al. How many-particle interactions develop after ultrafast excitation of an electron-hole plasma[J]. Nature, 2001, 414(6861): 286-289.
- [3] CUNNINGHAM J, BYRNE M B, WOOD C D, et al. On-chip terahertz systems for spectroscopy and imaging[J]. Electronics Letters, 2010, 46(26): 34-37.
- [4] 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.)
- [5] GACEMI D, MANGENEY J, LAURTENT T. THz surface plasmon modes on planar Goubau lines[J]. Opt Express, 2012, 20(8): 8466-8471.
- [6] 倪国旗. 介质埋藏微带天线[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012. (NI Guoqi. Dielectric Embedded Microstrip Antenna[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.)
- [7] 张磊. 共面波导与微带线无通孔转接头结构的研究与设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2013. (ZHANG Lei. Research and design on coplanar waveguide and microstrip line transition structure without via hole[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2013.)
- [8] 唐玉芳. 微带线损耗的理论研究及工程应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2009. (TANG Yufang. Theoretical study and engineering application of microstrip line loss[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Science and Technology, 2009.)
- [9] WOOD C D, CUNNINGHAM J E, UPADHYA P C, et al. On-chip photoconductive excitation and detection of pulsed terahertz radiation at cryogenic temperatures[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(14): 2103-2105.

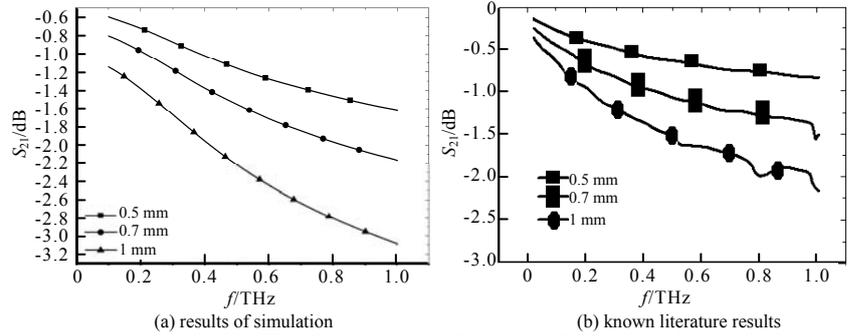


Fig.4 S_{21} parameters of MSL with different lengths

图4 微带线不同传输长度的 S_{21} 图

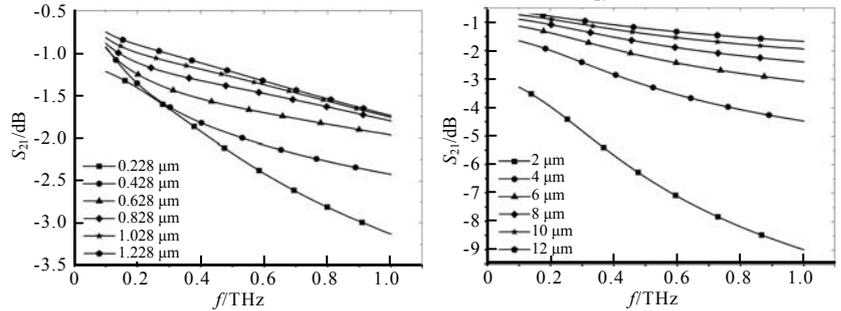


Fig.5 S_{21} parameters of MSL with different thickness of metal layer

图5 微带线不同金属层厚度的 S_{21}

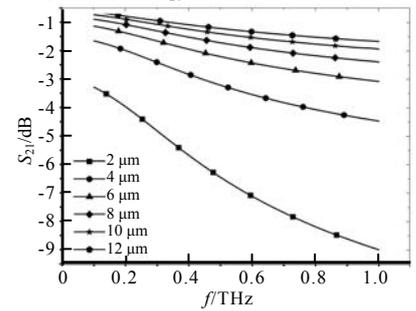
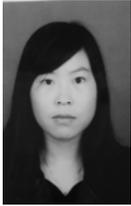


Fig.6 S_{21} parameters of MSL with different thickness of dielectric layer

图6 太赫兹波损耗与微带线介质层厚度的关系

作者简介:



张 聪(1993-), 女, 北京市人, 在读硕士研究生, 主要从事太赫兹片上系统的研究, 曾获得一等奖学金.email:1014681243@qq.com.

张盛博(1987-), 男, 北京市人, 硕士, 实验师, 主要从事虚拟仪器技术和太赫兹光谱成像的研究.

苏 波(1975-), 男, 山西省临猗县人, 博士, 副教授, 主要从事太赫兹探测与成像的研究.email:su-b@163.com.

范 宁(1988-), 男, 山西省朔州市人, 在读硕士研究生, 主要从事太赫兹生物传感与微流控器件的研究.

张存林(1961-), 男, 北京市人, 博士, 教授, 主要从事太赫兹及红外波谱与成像的研究.

(上接第 177 页)

- [6] JARVIS K S,PARR-THUMM T L,ABERCROMBY K J,et al. CCD debris telescope observations of the geosynchronous orbital debris environment observing year:2001[R]. NASA, 2008:TM-2008-214773.
- [7] ABERCROMBY K J,BARKER E S,JARVIS K S,et al. The geosynchronous earth orbit environment as determined by the ccd debris telescope observations between 1998 and 2002:final report 2008[R]. NASA, 2008:TP-2008-214774.
- [8] ABERCROMBY K J,SEITZER P,BARKER E S,et al. Michigan orbital debris survey telescope observations of the geosynchronous orbital debris environment[R]. NASA, 2011, TP-2011-217350.
- [9] SCHILDKNECHT T,PLONER M,HUGENTOBLE U. The search for debris in GEO[J]. Advances in Space Research, 2001, 28(9):1291-1299.
- [10] PORTERFIELD D,HESLER J,CROWE T. Integrated terahertz transmit/receive modules[C]// 33rd European Microwave Conference. [S.l.]:IEEE, 2003:1319-1322.
- [11] High power multiplier[EB/OL]. [2016-08]. www.virginiadiodes.com.
- [12] 张光义,郑玉洁. 相控阵雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2006. (ZHANG Guangyi,ZHENG Yujie. Phased Array Radar Technology[M]. Beijing:Electronics Industry Press, 2006.)
- [13] MAHAFAZA B R,ELSHERBENI A Z. MATLAB Simulations for Radar Systems Design[M]. Beijing:Electronics Industry Press, 2012.

作者简介:



国爱燕(1984-), 女, 河北省衡水市人, 工程师, 主要研究方向为太赫兹雷达与通信系统.email:guoaiyan@126.com.

徐明明(1987-), 男, 江西省九江市人, 工程师, 主要研究方向为太赫兹射频器件.

高文军(1973-), 男, 内蒙古自治区呼和浩特市人, 高级工程师, 主要研究方向为雷达系统设计.

周傲松(1971-), 男, 湖北省黄石市人, 研究员, 主要研究方向为卫星系统.