

太赫兹波的产生、传播和探测

李玉林 陈华 汪力 彭慰先

太赫兹 (THz) 辐射通常指的是频率在 0.1 THz ~ 10 THz 之间的电磁波,其波段在微波和红外之间,见图 1。THz 电磁辐射具有非常独特的性质,它可以透过各种生物体、电介质材料以及气相物质,这些介质在 THz 波段具有丰富的吸收和色散性质,通过测量并分析样品的 THz 信号便可以获得关于材料中的物质成分和物理、化学以及生物学信息。太赫兹频段在高数据率通信、保密通信、精确制导和隐藏武器探测等方面有重要的应用。因此,近年来这个新兴的研究领域——THz 电磁辐射的产生及应用,正在受到各国科学家的极大关注。

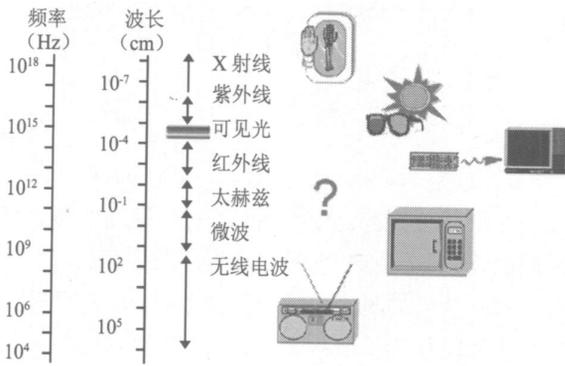


图 1 电磁谱

通常波长在 THz 范围内的电磁场产生和探测都很困难,一般的光学和微波技术都不能直接应用于 THz 范围,因此 THz 辐射的产生、传播及探测到目前为止仍然是一个值得探索的课题。超快光学技术的发展,具有很短载流子寿命的半导体材料的制作成功,以及微波和纳米技术等的应用,使人们对 THz 场的研究有了新的进展。

一、THz 波的产生

宽带 THz 脉冲的产生主要有光导激发和光整流方法,此外还有非线性传输线方法等。

光导激发是利用超短激光脉冲泵浦电场偏置的半导体,使其激发载流子,产生电子-空穴对,它们在外加电场作用下加速运动,相当于一个瞬时电流源。可以通过一个天线在短时间内向自由空间传播 THz 电磁波。探测和产生所用的设备相同,只是光导体不加偏置电压(图 2)。

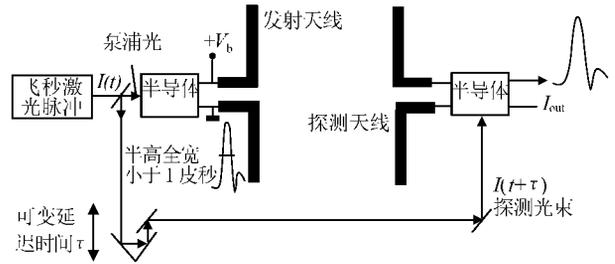


图 2 利用光导激发产生 THz 场及相应探测

THz 电磁辐射发射系统的性能主要决定于三个因素:光导体、天线几何结构和泵浦激光脉冲宽度。光导体是产生 THz 场的关键部件,性能良好的光导体应具有尽可能短的载流子寿命、高的载流子迁移率和介质耐击穿强度。目前应用最多的是 Si 和低温生长的 GaAs。天线一般采用基本偶极子天线,因其结构相对简单。此外为了增大 THz 信号功率,可采用天线阵列。

光整流效应是一种非线性效应,是电光效应的逆过程,利用激光脉冲(脉宽在亚皮秒量级)和非线性介质相互作用而产生低频电极化场。辐射出 THz 电磁波。包含在光整流过程中的物理过程是瞬时极化过程。要求一束超短激光脉冲聚焦在电光材料上。THz 辐射强度与非线性介质的极化电场强度 $P(t)$ 的低频部分的二次时间偏微商成正比。通过这种方法得到的 THz 电磁波频率较低。光整流的关键问题是相位匹配,它可以放大激光和 THz 脉冲在非线性材料中的相互作用以及增强 THz 产生效果。常用的非线性介质有 LiNbO_3 、 LiTaO_3 、半导体 GaAs、InTe、InP 和有机晶体 DAST(图 3)。

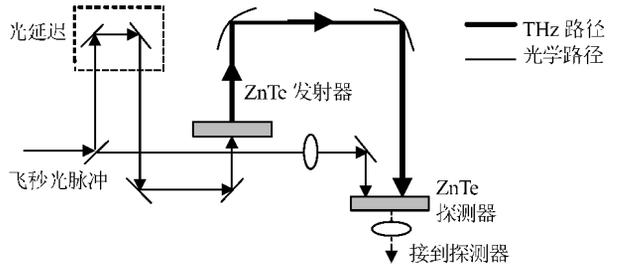


图 3 利用光整流产生 THz 场

非线性传输线是分布式的装置,由一个高阻抗的传输线,周期地加载非线性元件。非线性元件通

常为肖特基变容二极管。整个装置集成如图 4。

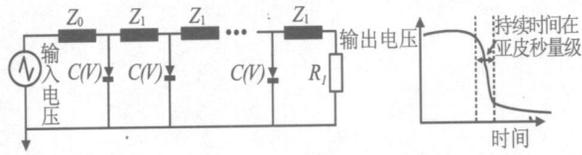


图 4 产生 THz 场的非线性设备

由于非线性特性和固有散射之间的平衡,在装置内产生震荡波或者孤子波,可以产生一定频率的 THz 电磁场辐射。

窄带 THz 电磁波产生可以利用光学参量转换光混频方法。光学非线性晶体,例如 LiNbO_3 ,在近红外区(波长为 1.064 微米),被较强的纳秒脉冲激光泵浦时,产生受激极化散射现象。泵浦光频率为 ω_p ,当它激发非线性晶体时,产生一个频率为 ω_i 的闲置光。根据 $\omega_p = \omega_i + \omega_{\text{THz}}$,产生 THz 电磁波。可以通过 Si 棱镜传播出去。整个过程要求动量守恒 $K_p = K_i + K_{\text{THz}}$ (图 5)。通过改变泵浦光的入射角可以得到不同频率的 THz 电磁波。

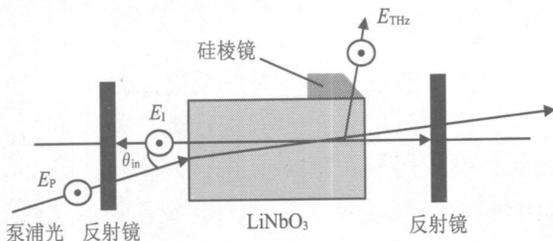


图 5 利用光学参量产生 THz 场

两束激光(其中至少一个为连续可调)在光导体内进行光混频,可以产生一个频率为它们差值的光电流。若频率在 THz 范围内,光电流可以沿传输线或通过天线自由辐射,从而形成 THz 电磁波。

二、THz 波的传导

目前 THz 波的传导有两种方法——波导技术和准光学技术。波导方法需要金属波导腔或介质光纤。在波长低于毫米级频率范围内,金属波导方法有很大的能量损失,大约与频率的平方成正比,而利用光纤则有色散和较高的吸收。最近王康林和丹尼尔·密特曼(Daniel M. Mittleman)研制了一种新型波导,即一段具有特殊结构的空心金属线,对于 THz 来说相当于一个腔内镜。借助它可以无色散地、低衰减地传输太赫兹脉冲。而准光学技术实质是使 THz 波在发射和接收平面间自由传播,是多年来解决 THz 场传播的常用方法。

三、THz 的探测

如果 THz 信号很弱,探测则是相当艰难的任务,并且由于光子能量很低,外界热的噪声超过 THz 信号,因此需要控制探测器的温度使其在较低的情况下工作。超短电脉冲的光谱在 THz 范围内,主要有两种探测方法。光导天线法和电光取样法。光导天线利用光导偶极子天线和远红外相干技术来探测自由空间传播的 THz 电磁波。所探测的波形信号和所用天线的共振响应函数有关。电光取样利用被探测光场和 THz 场同时激发的电光晶体的线性电光效应。两场传播方向相同,但偏振方向不同。通过对探测光的偏振方向改变的分析,可以得到 THz 电磁辐射场的波形(图 6)。

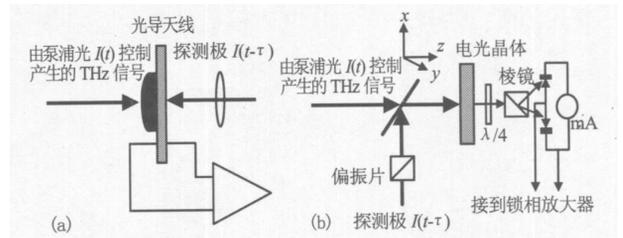


图 6 超短 THz 脉冲信号探测(a)光导天线(b)电光取样

在低频范围内,光导天线法有很好的信噪比和灵敏度,随频率增加,电光取样逐渐发挥作用。电光取样可探测较宽的范围,一般为 100 GHz ~ 37 THz,而光导天线仅为 3 T ~ 4 THz,这是由于天线参数的限制。

连续 THz 场外差法探测:在微波、毫米波和 THz 频率范围内,最灵敏的探测器制作原理都以外差法原理为基础,它是由两个信号混合而成,被探测的 THz 连续场信号和局部振荡信号。局部振荡信号有一个固定的输出能量,且该能量大于接收信号。外差法的处理通过一个非线性设备进行,称为混合器。输出信号的频率和 THz 信号与局部振荡信号差值成比例。通过对输出信号的分析,可以得知 THz 信号的相关信息。

一般说来 THz 技术从产生到探测都离不开超快激光技术,所以设备庞大,价格昂贵。要想 THz 技术应用到气体检测、环境监测、医疗设备等方面,就必须使其小型化、低廉化,逐渐发展的纳米技术等有可能使其从学术阶段过渡到工业应用方面。

(李玉林、陈华、彭慰先,长春市吉林大学物理学院 130023; 陈华、汪力,北京中国科学院物理研究所 100080)