

光整流太赫兹源及其研究进展

邵立, 路纲, 程东明
(郑州大学物理工程学院, 河南 郑州 450052)

摘要:太赫兹科学技术是近20年来发展起来的一门新学科,其关键技术是太赫兹波的产生和探测。本文介绍了光整流太赫兹源的辐射原理、国内外研究情况、存在的问题等。今后其发展方向主要应为通过掺杂等手段改进光电导材料的光电特性,提高材料的相位匹配能力和减小饱和现象来提高辐射的功率和效率。

关键词:太赫兹波;光整流;非线性

中图分类号:0441.4 **文献标识码:**A

Generation and Recent Advances in Optical Rectification THz Sources

SHAO Li, LU Gang, CHENG Dong-ming

(Physical Engineering College of Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In recent 20 years, THz science and technology have been developed fastly. The key of THz is its generation and detection. In this paper, the generation mechanism of optical rectification THz sources and recent research progress in this field are introduced. The future of this kind of THz generation method is also forecast.

Key words: THz wave; optical rectification; nonlinear

1 引言

太赫兹(THz, $1\text{THz} = 10^{12}\text{Hz}$)波一般指频率在(0.1~10)THz(对应波长为 $30\mu\text{m} \sim 3\text{mm}$)范围内的电磁波,它介于毫米波与红外光之间,处于从电子学向光子学的过渡区^[1],如图1所示。

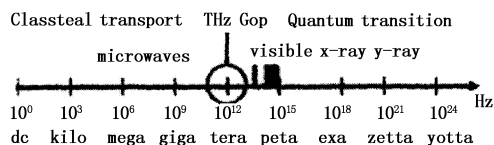


图1 太赫兹波段在电磁波谱中的位置

太赫兹波以其独特的瞬态性、宽带性、相干性和低能性等特点及其在物体成像、医疗诊断、环境监测、射电天文、宽带移动通讯、卫星通讯和军用雷达等领域的潜在应用而正越来越受到人们的关注^[1]。

但在20世纪80年代中期以前,由于缺乏有效的太赫兹辐射产生和检测方法,人们对该波段的特性知之甚少,以至于该波段被称为电磁波谱中的太赫兹空隙。近年来,由于自由电子激光器和超快技术的发展,为太赫兹脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源,使太赫兹辐射的产生和应用得到蓬勃发展。常用的太赫兹发射源可分为四大类:①半导体太赫兹源(包括太赫兹量子级联激光器等);②基于光子学的太赫兹发生器(包括光电导天线和光整流等);③利用自由电子的太赫兹辐射源(包括太赫兹真空器件、电子回旋脉塞和自由电子激光);④基于高能

作者简介:邵立(1979-),男,硕士研究生,主要从事太赫兹源方面的研究。E-mail:shaoli094@sina.com

收稿日期:2008-03-24

加速器的太赫兹辐射源^[1]。本文将对光整流太赫兹源的辐射原理、国内外研究情况、存在的问题及解决思路等方面予以评述。

2 辐射原理

在众多的太赫兹辐射产生技术中,光整流是目前最广泛使用的方法之一。两个光束在非线性介质传播时会发生混合,从而产生和频振荡和差频振荡现象。在出射光中,除了和入射光相同的频率的光波外还有新的频率(例如和频)的光波。而且当一束高强度的单色激光在非线性介质中传播时,它会在介质内部通过差频振荡效应激发一个恒定(不随时间变化)的电极化场。恒定的电极化场不辐射电磁波,但在介质内部建立一个直流电场。这种现象称为光整流效应,它是最早发现的非线性光学效应之一。当时由于这种效应缺乏实际的应用背景而没有受到研究者的重视,超短激光脉冲的发展为光整流效应的研究和应用开辟了新途径。根据傅里叶变换理论,一个脉冲光束可以分解成一系列单色光束的叠加,其频率决定于该脉冲的中心频率和脉冲宽度。在非线性介质中,这些单色分量不再独立传播,它们之间将发生混合。和频振荡效应产生频率接近于二次谐波的光波,而差频振荡效应则产生一个低频电极化场,这种低频电极化场可以辐射直到太赫兹的低频电磁波^[3]。

从以上分析可知,光整流效应是一种非线性效应,是电光效应的逆过程。它利用了非线性介质(电光晶体)的二次非线性电极化效应,不需要外加直流偏置电场,所以辐射器的形式较为单一,可以用整块电光晶体作为辐射器。当激光脉冲(脉冲宽度在亚皮秒量级)和非线性介质(如 ZnTe)相互作用而产生低频电极化场,此电极化场辐射出太赫兹电磁波^[4],如图 2 所示。

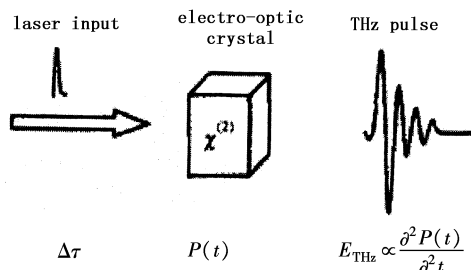


图2 光整流效应

当光场与具有二阶非线性性质的介质相互作用时,由具有同样频率的两个光子差频得到一个与光强度成正比的直流电场,该过程可由下式描述^[5-6]:

$$P(0) = \chi^{(2)}(\omega, -\omega, 0)E(\omega)E^*(-\omega) \quad (1)$$

其中, P 表示电极化强度; $\chi^{(2)}$ 表示二阶非线性极化率; ω 为基频; $E(\omega) = E_0 \exp(ik \cdot r - i\omega t)$ 。

当光脉冲入射到晶体后,在晶体内激发一个随时间变化的极化场,从而产生极化电流,其强度与极化场对时间的变化率成正比,即:

$$J(t) \propto \frac{\partial P}{\partial t} \quad (2)$$

该极化电流使晶体产生太赫兹电磁辐射,在远场近似下,太赫兹电场强度为:

$$E_{\text{THz}} \propto \frac{\partial J(t)}{\partial t} \propto \frac{\partial^2 P(t)}{\partial t^2} = \chi^{(2)} \frac{\partial^2 I(t)}{\partial t^2} \quad (3)$$

3 太赫兹波产生的影响因素

光整流发射的太赫兹脉冲宽度与入射脉冲宽度相当,可以获得连续的太赫兹波,产生的太赫兹辐射具有较高的时间分辨率、较宽的波谱范围,波形可以合成,而且试验调整简单,但是很难获得相位匹配,太赫兹光束的能量直接来源于激光脉冲的能量,所以输出功率有限,而且需要飞秒激光器,其价格昂贵。太赫兹辐射的最大功率既受超快激光脉冲的影响,又受介质的损伤阈值的制约。太赫兹辐射的产生效率受材料的非线性系数、介质材料对太赫兹辐射的吸收及激光脉冲与太赫兹脉冲之间的相位匹配等因素影响。

光整流方法中用作太赫兹辐射脉冲源材料是传统的电光晶体,常见的有 LiTaO_3 , LiNbO_3 , 半导体材料 ZnSe , ZnTe , InP , CdTe , GaAs , 有机晶体 DAST 等。选择应用于太赫兹波段的非线性晶体应满足下列几个条件:在所用波段范围内具有较高的透过率、具有高的损伤阈值、具有大的非线性系数及优秀的相位匹配能力。其中材料的非线性系数与晶体的切向和方位有关。

相位匹配要求参与非线性过程的各个光波的频率和波矢都要守恒。在相位匹配的条件满足时,参与非线性过程的各个频率的光波在非线性介质中才可能有比较长的作用距离,从而该非线性过程才有较高的效率。光整流过程中的相位匹配条件表述如下:

$$\omega_{01} - \omega_{02} = \Omega_{\text{THz}} \quad k_{01} - k_{02} = k_{\text{THz}} \quad (4)$$

其中, ω_{01} 和 ω_{02} 为参与光波差频的两光波频率; k_{01} 和 k_{02} 分别是相应的波矢。将以上两式相除,并且注意到 $\Omega_{\text{THz}} \ll \omega_0$ 和 $k_{\text{THz}} \ll k_0$, 得到:

$$\frac{\partial \omega_0}{\partial k_0} = \frac{\Omega_{\text{THz}}}{k_{\text{THz}}} \quad \text{即} \quad v_{g,0} = v_{\text{ph,THz}} \quad (5)$$

简单地说,当光脉冲的群速度等于太赫兹波的相速度时,光整流过程满足相位匹配条件^[5]。

但光整流方法产生太赫兹辐射的主要问题就是:在晶体内部光脉冲传播速度总是比太赫兹脉冲传播速度快,因此在很多非线性晶体内部很难获得速度匹配,前面所述的电光晶体只有对某些特色的泵浦光频率和某些特定的太赫兹频率可以获得速度匹配,即在太赫兹这样宽的频段内做到相位匹配十分困难。

相比于其他的电光晶体材料,ZnTe 晶体的二阶非线性系数大,更重要的是用钛宝石激光器产生的 800nm 附近的激光脉冲产生和探测太赫兹脉冲时,它的相位匹配最好,即在 ZnTe 晶体内部,激光脉冲的群速度与太赫兹脉冲的相速度一致。综合以上几种因素,ZnTe 晶体具有比其他电光晶体的综合优势,故目前在光整流效应产生太赫兹波方法中应用最为广泛。另外,有机晶体 DAST 是一种很有潜力的有机介质,它是非线性效应最强的物质之一。

通常认为,晶体中的载流子越少,电阻率就越高,晶体对太赫兹辐射的吸收和散射就越少,作为太赫兹辐射产生器件,产生太赫兹辐射的效率也就越高。因此通过掺杂来降低晶体中的载流子浓度是晶体生长中常用的方法。

太赫兹波的带宽随晶体长度的增加而减小,且辐射角在 $79^\circ \sim 90^\circ$ 内时,太赫兹波中心频率和相应带宽随辐射角的减小而增加,电场随辐射角呈准谐波变化^[7]。也可以对半导体发射极外加电场和磁场来增强太赫兹电磁辐射的强度,其原因是半导体中载流子的加速运动受外加电磁场的影响^[8]。

目前的飞秒光源有三种:半导体泵浦的 Li:SAF 飞秒激光器(脉宽小于 100fs,平均功率大于 100mW)、Ar⁺ 激光器泵浦的 Ti:S 激光器和锁模光纤激光器。相比较而言,锁模光纤激光器是体积最小、结构最紧凑的激光器。美国已用它制成了便携式太赫兹频谱仪^[9]。

4 光整流太赫兹源研究进展

光整流模型是由 S. L. Chuang 等在 1992 年提出的^[10]。光整流方法中,太赫兹波的能量主要取决于抽运激光转换成太赫兹波的效率,即能量仅仅来源于入射的激光脉冲的能量,故其能量较低,一般为纳瓦量级,而作为激发太赫兹辐射的飞秒光源的平均

功率却是瓦量级。太赫兹辐射的带宽上限由泵浦激光脉冲的宽度决定,产生的太赫兹电磁波的频率较高,通常可以达到 50THz,而有些晶体甚至可以覆盖直到 100THz 的范围。

1995 年, A. Bonvalet 等^[11]报道的用 15fs 的超短激光脉冲(重复频率为 100MHz)照射诸如 GaAs 等非线性半导体材料产生的太赫兹辐射,其光谱可以到中红外波段,达到 50THz,但其平均功率只有 30nW。文中指出,有许多可能的方式能显著提高太赫兹辐射的功率,使用加或不加偏压的有量子阱结构的非线性材料是最有效的方式之一。对激光器、太赫兹波收集元件和聚焦元件的优化也能进一步提高其辐射。另外,要降低光脉冲的脉宽到 10fs 以下,应保持单周期辐射谱组分波长在 $4\mu\text{m}$ 以下。

1999 年, A. Leitenstorfer 等人^[12]详细计算了超薄 ZnTe 和 GaP 电光晶体的振幅和相位响应,实验数据中的重要结构可用理论的响应函数解释。作者指出半导体中的光生载流子的超快输运过程可作为可涵盖全部远红外至中红外范围的电磁辐射的有效发射源。实验得到的基于半导体中超快载流子输运激发的连续电磁辐射覆盖了从 100GHz 到 70THz 的光谱范围,相应于波长从 $3\text{mm} \sim 4\mu\text{m}$,如图 3 所示。其中带圆点的细线为 GaAs P-I-N 二极管在 130kV/cm 的偏置电场下辐射的太赫兹波的频谱,粗实线为 $13\mu\text{m}$ 厚的 GaP 探测器的复合响应函数 $R(\omega) = G(\omega) \times r_{41}(\omega)$ 的图线(其中 $G(\omega)$ 为探测器的响应函数, $r_{41}(\omega)$ 为材料的电光系数),靠上部的插图在 30kV/cm 电场下二极管的归一化的电光脉冲的时域谱,较靠下的插图调整探测器响应后得到的原始时域谱。

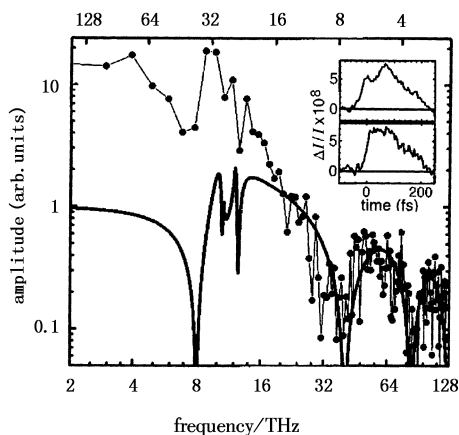


图3 太赫兹辐射的频谱

2000年, R. Huber等^[13]用脉宽为10fs的激光脉冲的相位匹配光整流效应在薄GaAs晶体中产生了短至50fs的红外脉冲。电磁辐射的中心频率从41THz($\lambda = 7\mu\text{m}$)到远红外波段连续可调。实验中以垂直于入射光的水平轴旋转晶体来实现相位匹配条件的调整。此实验系统也为人们感兴趣的浓缩物质的飞秒实验领域开辟了广阔的前景。

2007年, K. -L. Yeh等^[14]用掺Ti蓝宝石飞秒激光器,在太赫兹脉冲的相速度与LiNbO₃晶体中的泵浦激光脉冲的群速度相匹配时,利用光整流效应产生了中心频率0.5THz、能量10 μJ 、平均功率达100 μW 、峰值功率5MW、脉冲强度高达10MW/cm²的接近单周期的电磁脉冲。如图4所示,其中实线为修正后的图线,虚线为简化后的太赫兹谱线。实验中的光子转换效率为45%,计算得出在离轴抛物面镜焦点处的电场强度的峰值为250kV/cm。实验也表明,得到的高质量的太赫兹信号在成像和远距离传感器中的应用是可能的。

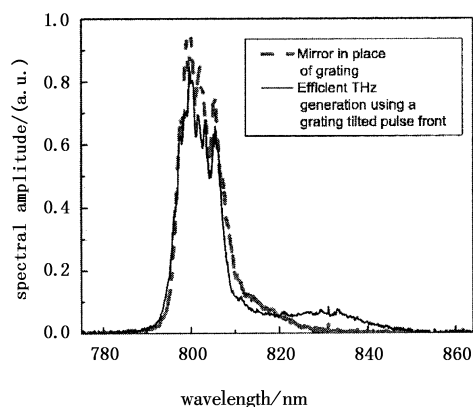


图4 LiNbO₃辐射的太赫兹脉冲光谱

5 结束语

太赫兹波以其独特的性能和广泛的潜在应用而越来越受到世界各国的关注。而缺少高功率、低造价、轻质量、小体积的室温太赫兹光源是限制其应用的最主要因素。在各种太赫兹发射源中,虽然光整流法辐射的太赫兹波功率较小,但其频率较高、频谱较宽,故目前仍是最常用的太赫兹辐射产生方法之一。太赫兹波辐射源技术的发展是推动太赫兹应用技术和相关交叉学科迅速发展的关键所在。越来越多的研究人员投身研究更为有效地太赫兹源,随着研究的不断深入、其应用与交叉研究的学科领域的不断扩大,可以预计太赫兹

波的研究将迎来一个蓬勃发展的阶段。太赫兹波将和电磁波谱的其他波段一样,给人类的社会生活带来深远的影响。

参考文献:

- [1] 刘盛纲. 太赫兹科学技术的新发展[J]. 中国基础科学·科学前沿, 2006, (1): 7-12.
- [2] 姚建铨, 路洋, 张百钢, 等. 太赫兹辐射的研究和应用新进展[J]. 光电子·激光, 2005, 16(4): 503-509.
- [3] 马新发, 张希成. 亚皮秒光整流效应[J]. 物理, 1994, 23(7): 390-393.
- [4] 孙博, 姚建铨. 基于光学方法的太赫兹辐射源[J]. 中国激光, 2006, 33(10): 1349-1359.
- [5] 许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 37-41.
- [6] 张希成, 金亚红. 光致电磁辐射原理及应用[J]. 物理, 1993, 22(3): 136-140.
- [7] 张开春, 吴振华, 刘盛纲. 周期极化非线性晶体中太赫兹波辐射研究[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(5): 799-802.
- [8] 孙金海, 赵国忠, 张亮亮, 等. 外加电场和磁场对太赫兹辐射产生的影响[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 192-195.
- [9] 王秀敏, 徐新龙, 李福利. 太赫兹技术进展[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 17-25.
- [10] S L Chuang, S Schmitt-Rink, B I Greene. Optical rectification at semiconductor surfaces[J]. Phys. Rev. Lett., 1992, 68(1): 102-105.
- [11] A Bonvalet, M Joffe, J L Martin, et al. Generation of ultrabroadband femtosecond pulses in the mid-infrared by optical rectification of 15 fs light pulses at 100 MHz repetition rate[J]. Appl. Phys. Lett., 1995, 67(20): 2907-2909.
- [12] A Leitenstorfer, S Hunsche, J Shah, et al. Detectors and sources for ultrabroadband electro-optic sampling: Experiment and theory[J]. Appl. Phys. Lett., 1999, 74(11): 1516-1518.
- [13] R Huber, A Brodschelm, F Tauser, et al. Generation and field-resolved detection of femtosecond electromagnetic pulses tunable up to 41 THz[J]. Appl. Phys. Lett., 2000, 76(22): 3191-3193.
- [14] K -L Yeh, M C Hoffmann, J Hebling, et al. Generation of 10J ultrashort terahertz pulses by optical rectification[J]. Appl. Phys. Lett., 2007, 90(17): 171121.