

学科的大量新信息,而且为开拓各波段内新的激光和相干辐射源提供了重要线索。

- [1] Z. G. Wang, H. R. Xia, *Molecular and Laser Spectroscopy*, Springer, Berlin, Heidelberg, (1991), Chap. 6.
- [2] E. K. Kraulinaya, E. K. Kopeikina, M. L. Janson, *Chem. Phys. Lett.*, **39**(1976), 565.
- [3] V. B. Grushevskii, *Opt. Spectrosc.*, **42**(1977), 572.
- [4] Z. G. Wang et al., *Opt. Commun.*, **51** (1984), 155.
- [5] D. Krökel et al., *Appl. Phys.*, **B37**(1985),137.
- [6] Z. G. Wang, L. J. Qin, K. C. Zhang, *Appl. Phys.*, **B41**(1986), 125.
- [7] L. J. Qin et al., *Chinese Physics*, **6**(1986),986.
- [8] 唐小玲等,物理学报, **37**(1988),1227.
- [9] 王祖贻等,中国科学 (A), **30**(1987), 1045.
- [10] S. L. Deng et al., *SPIE*, **1726**(1992),264.
- [11] Z.G. Wang et al., *Opt. Commun.*, **58**(1986),313.
- [12] H. Y. Jin et al., *SPIE*, **1726**(1992), 274.

亚皮秒光整流效应

马新发 张希成

(美国 Rensselaer 综合技术学院物理系)

介绍了亚皮秒光整流效应的原理及其应用。亚皮秒光整流效应是一种特殊的非线性光学效应,是指利用亚皮秒脉冲激光和非线性介质的相互作用而产生低频电极化场(THz)的过程。这种低频电极化场可以产生超快电磁波辐射。它可以作为一种非接触探测手段来研究非线性材料的电光效应,测量非线性材料的二阶非线性极化张量元之间的比值。

关键词 非线性光学,光整流, THz 辐射

Abstract

Subpicosecond optical rectification is presented as a novel nonlinear optical effect and a powerful THz radiation technique. It can be used as a noncontact method to study electro-optic materials and to characterize electro-optic devices. It can also be employed efficiently to determine the ratios between nonlinear optical coefficients in low symmetry nonlinear optical crystals.

Key words nonlinear optics, optical rectification, THz radiation

利用激光脉冲产生亚毫米电磁波脉冲是近年来十分活跃的研究领域。许多种不同的光子和光电子技术被用来激发自由空间的 核赫兹(10^{12} Hz)宽频带电磁波辐射。常见的光致电磁辐射有两种:光生电流效应和脉冲激光光整流效应^[1]。光生电流效应是指介质中的光生载流子(电子-空穴对)在内部或外加电场下作变速运动而辐射电磁波的过程。光生载流子的激发时间和入射激光脉冲的宽度相同,而其寿命则决定于介质的衰减机制。脉冲激光光整流效应则是一种非线性光学效应,是指利用脉冲激

光和非线性介质的相互作用而产生低频电极化场的过程。这种随时间变化的电极化场辐射电磁波,其辐射电磁波的振幅强度和频率分布决定于脉冲激光的特征和介质的非线性性质。本文将介绍脉冲激光光整流效应的原理及其在电光材料和非线性材料测试方面的应用。

一、光整流效应和亚皮秒光整流效应

我们知道,两个光束在线性介质中可以独立传播,而不改变各自的振荡频率。但是在非

线性介质中,两个单色光束将发生混合,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^[2]。由于这种效应缺乏实际的应用背景,所以除了早期用于验证它和线性电光效应之间的关系之外^[3],并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的途径。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,其频谱决定于该脉冲的中心频率和脉冲宽度。在线性介质中,因为每一单色分量都可以独立传播,出射光的频谱和波形与入射光相比没有根本的变化。其差别仅来源于介质的色散特性。但是,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振荡的电极化场。这种低频电极化场可以辐射直到核赫兹的低频电磁波。

图1给出了脉冲激光光整流效应的原理。频率为 ω_0 ,宽度为 τ 的脉冲激光照射到一个

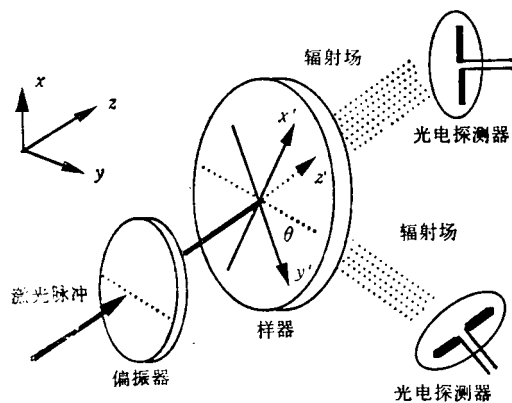


图1 亚皮秒光整流效应的原理

非线性介质样品,脉冲激光的各个单色分量之间会在样品中通过差频振荡现象,产生一个随时间变化的电极化场,这个随时间变化的电极化场将会辐射低频电磁波,其频率上限和入射激光的脉冲宽度有关。由于入射激光的脉冲宽度在亚皮秒量级,辐射电磁波的频率上限约为核赫兹,所以这种光整流效应被称为亚皮秒光整流效应^[4],或者核赫兹光整流效应^[5]。

若入射激光脉冲的光学电场强度的傅里叶变换为 $E(\omega)$,则介质中频率为 Ω 的电极化场可表示为

$$P_i(\Omega) = \epsilon_0 \int_{\omega_0 - \Delta\omega/2}^{\omega_0 + \Delta\omega/2} \chi_{ijk}^{(2)}(-\Omega; \omega + \Omega, -\omega) \times E_j(\omega + \Omega) E_k^*(\omega) d\omega, \quad (1)$$

其中 $\chi_{ijk}^{(2)}(-\Omega; \omega + \Omega, -\omega)$ 是非线性介质的二阶非线性极化张量元, ω_0 是入射激光的中心频率, $\Delta\omega$ 是入射激光的频带宽度, τ 是入射激光的脉冲宽度。根据测不准原理, $\tau \sim 1/\Delta\omega$ 。一般说来, $\chi_{ijk}^{(2)}$ 是相应的波频(包括 ω_0 和 Ω)的函数。当入射激光的中心频率远离晶体样品的共振频率时, $\chi_{ijk}^{(2)}$ 随频率的变化很小,可以近似看作一个等效的二阶非线性极化张量元 χ_{ijk} 。它的数值和单色光光整流效应系数略非常接近,可以看作是某种平均结果。

根据电偶极辐射的远场近似^[6],频率为 Ω 的电磁辐射场正比于其相应频率的电极化场。通过数学推导,辐射场在特定方向上的电场强度可表示为

$$E^{rd}(\Omega) \sim \Omega^2 P(\Omega) \sim \Omega^2 d_{ijk}^{\Omega} \int_{\omega_0 - \Delta\omega/2}^{\omega_0 + \Delta\omega/2} \times E_j(\omega + \Omega) E_k^*(\omega) d\omega. \quad (2)$$

亚皮秒光整流效应的实验光路和测试技术已在文献[1]中详述。在这些实验中,氩离子泵浦的掺钛蓝宝石激光器被用作锁模超短激光脉冲源。单个脉冲的能量大于 10^{-8} J,脉冲宽度小于200mps,波长可在700nm—1 μ m之间调节,而探测器则是一个光导半波天线(又称Hertzian dipole)^[7]。这种光电探测器对电磁辐射场的偏振方向敏感,可以测量辐射电场在特定方向上的分量。探测器的这种特性使得我

们能够容易地确定非线性极化张量元之间的关系。

二、亚皮秒光整流效应的应用

1. 非接触手段研究线性电光效应

在外加电场作用下,非线性光学介质的光学折射率将发生变化。这种现象称作电光效应。若光学折射率的变化正比于外加电场,则称为线性电光效应(或者 Pockel 效应)。电光效应具有很大的实用价值。电光调制已广泛应用于长途光学通信,而且将在光子-电子混合集成电路中发挥重大作用。线性电光效应实际上是光整流效应的逆效应,也是三个波束非线性混合的过程。在非吸收介质中,电光效应系数 r_{ijk} 和相应的二阶非线性极化张量元 $\chi_{ijk}^{(2)}$ [或者光整流效应系数 $d_{\mu\nu}(-\Omega; \omega + \Omega, -\omega)$] 之间具有下述关系:

$$\chi_{ijk}^{(2)}(-\Omega; \Omega + \omega, -\omega) = \frac{\epsilon_{ij}(\Omega)\epsilon_{jk}(\Omega)}{4\pi}$$

$$\times r_{ikj}(\omega + \Omega; -\omega, -\Omega), \quad (3)$$

这里 ϵ_{ij} 和 ϵ_{jk} 是非线性介质的介电常数。因此,通过检测光整流效应,我们可以研究材料的电光效应。这是一种非接触测量,不需要在待测样品上制备电极,特别适用于非线性材料的实时无损检测。需要指出的是,电光调制的频率正在不断的提高,已接近京赫兹。在这种情况下,电光调制的系数将和静态光整流效应系数有所不同,从而更接近在亚皮秒光整流效应实验中得到的结果。

2. 确定不同非线性极化张量元之间的关系

我们知道,二阶非线性极化率是一个三阶张量,可以包括 18 个独立张量元。在实际晶体中,独立非零张量元的个数决定于晶体的对称性。有些高度对称的晶体,例如砷化镓等,仅有一个或者很少几个独立的非零张量元。而低对称的非线性光学晶体,特别是近年迅速发展的有机和高分子晶体,则可以包括多达 10 个以上的独立非零张量元。因此,利用电光调制法或者谐波振荡来完全测定这些光学晶体就变得很

繁琐,需要多种不同取向的样品来测定相应的非线性极化张量元。

在亚皮秒光整流效应实验中,我们发现特定方向的辐射电场强度可以表示为数个非线性极化张量元的线性组合。它们的系数是旋转角度的函数。因此,通过测定光整流信号随角度的变化就可以确定不同非线性张量元之间的比值。

亚皮秒光整流效应已被用于研究许多电光晶体,特别是近年迅速发展的有机晶体。图 2 是利用一种新型有机晶体实验得到的辐射波形。这种晶体的简名叫 DAST,是目前世界上具有最强非线性光学效应的材料之一^[9]。它所产生的电磁辐射比钽酸锂的电磁辐射强 100 倍^[9]。这个波形和通常从其他晶体观测到的辐射波形很不相同^[9],它给出许多弛豫振荡环,可能来源于辐射电磁波和分子振动之间的相互作用。图 3 给出了辐射电场强度随样品旋转角度的变化。

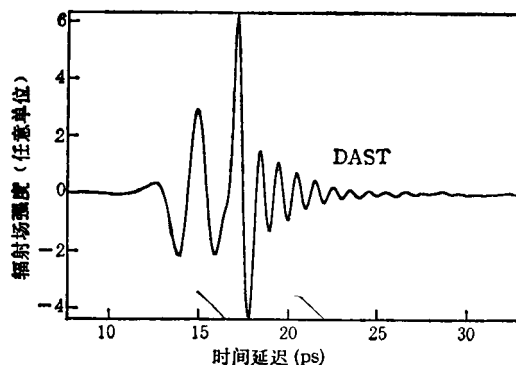


图 2 从 DAST 晶体辐射的电磁脉冲的波形

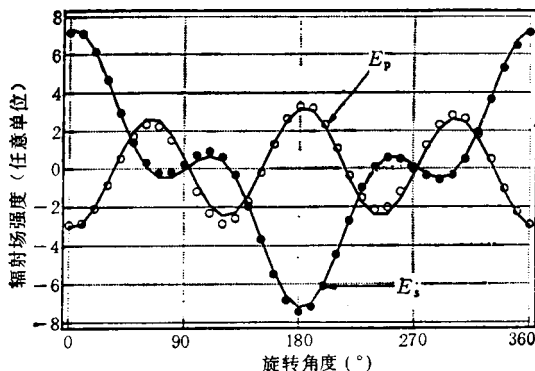


图 3 光致电磁辐射强度随晶体样品旋转角度的变化

DAST 晶体属于单斜晶系,它的二阶非线性极化张量含有 10 个独立的非零张量元。当入射激光脉冲垂直照射到 z -切割(即(001))的晶体样品表面时,只有三个非零张量元对电磁辐射有贡献。在沿光束传播方向,电磁波呈横电磁波特性。它的两个电场分量垂直于入射光偏振方向的分量 E_s 和平行于入射光偏振方向的分量 E_p , 可以分别表示为

$$E_p(\theta) = A\{(3d_{11} + d_{12} + 2d_{26})\cos\theta + (d_{11} - d_{12} - 2d_{26})\cos(3\theta)\}, \quad (4)$$

$$E_s(\theta) = A'\{(3d_{12} + d_{11} - 2d_{26})\cos\theta - (d_{11} - d_{12} - 2d_{26})\cos(3\theta)\}, \quad (5)$$

这里 d_{11} , d_{12} 和 d_{26} 是 DAST 晶体的三个非线性极化张量元, θ 是晶体样品的旋转角度, A 和 A' 是两个决定于测量系统的常数。通过拟合图 2 所示的实验结果就可以得到这些张量元之间的比值。即 $d_{12} = -0.4d_{11}$, d_{26} 是一个很小的量, 大约只有 d_{12} 的 295 分之一。利用这种方法只要知道一个张量元, 就可以确定另外两个。

亚皮秒光整流效应是一个非常有效的实验手段, 可以用来研究许多非线性材料, 特别是一些低对称的有机和高分子化合物。利用这种方法, 仅需要很少几个样品就可以测定材料的所有非线性极化张量元间的比值。当然, 要精确测定某一张量元的值, 还需要利用标准样品比

较法和相应的数学运算。

3. 制造新型的快速电磁探针及其他应用

由前所述, 亚皮秒光整流效应可以产生超短亚毫米电磁波脉冲。这种电磁波的频率可以达到埃赫兹, 脉冲宽度可低于 200mps。这种超快电磁波可以用来研究材料的变化特性。若将光电晶体安装在一个光导纤维的终端, 辐射电磁波还可以作为微型的电磁探针。

此外, 利用亚皮秒光整流效应, 可以在所研究的非线性介质内部产生快速变化的强电场, 由此来研究非线性材料在强电场下的性质。这种方法无需偏置电极而具有很多优点。

总之, 亚皮秒光整流效应作为一种特殊的非线性光学现象, 具有相当的研究价值和应用领域, 它将在光电子技术和材料的研究开发中发挥重要的作用。

- [1] 张希成、金亚红, 物理, 22(1993), 136.
- [2] Y. R. Shen, The principle of nonlinear optics, Wiley, (1984).
- [3] M. Bass et al., Phys. Rev. Lett., 9(1962), 446.
- [4] X. F. Ma and X. -C. Zhang, J. Opt. Soc. Am. B, 10(1993), 1175.
- [5] X.-C. Zhang et al., Appl. Phys. Lett., 61(1992), 3080.
- [6] J. D. Jackson 著, 朱培豫译, 经典电动力学, 人民教育出版社, (1978).
- [7] Ch. Fattinger et al., Appl. Phys. Lett., 54(1989), 490.

ZnSe 蓝色半导体发光和激光器件的研究进展

范希武 吕有明

(中国科学院长春物理研究所, 长春 130021)

阐述了研制蓝色半导体发光和激光器件在光电子技术发展中的重要性。通过对 ZnSe 半导体发光和激光器件发展过程的评论, 说明了获得 P 型 ZnSe 所遇到的困难和解决的途径。介绍了近期在获得高导电 P 型 ZnSe 层方面的突破性进展, 从而实现了 ZnSe p-n 结蓝色半导体发光和激光器件。

关键词 ZnSe, 蓝色发光二极管, 蓝色半导体激光器

Abstract

The role of blue light emitting diodes (LEDs) and laser diodes (LDs) is beco-