

有外场的条件下推导出来的。如果在测量环境中**有强光照、放射性辐射或强磁场**， $p-n$ 结中的物理过程就会发生变化，光照有可能使半导体材料产生新的空穴、电子对；放射性辐射也会使材料产生新的载流子，甚至使半导体材料活化。在这种情况下，测温元件应该加以适当屏蔽。

在低温下，强磁场对 $p-n$ 结温度传感器的工作有极大的影响。这是由于低温时载流子扩散运动减弱，强磁场对定向运动载流子的洛伦兹力使其运动路径弯曲，使半导体材料的体电阻率显著变化，同时使 $p-n$ 结过渡区载流子的扩散、迁移情况发生变化，尤其当强磁场方向与 $p-n$ 结垂直时，这种影响十分强烈^[8]。在强磁场中测量低温时， $p-n$ 结取向对测量结果影响极

大，为了减小测量误差，应该采取磁屏蔽，或保持 $p-n$ 结取向与磁场方向严格平行。

参 考 文 献

- [1] L. E. Barton, *Electronics*, May (1962), 4.
- [2] A. V. Ziel, *Solid State Physical Electronics*, (1976), 115.
- [3] 黄昆、谢希德, 半导体物理学, 科学出版社, (1958).
- [4] J. A. Becker, C. B. Green and G. L. Dearson, *Trans. AIEE*, 65(1946), 713.
- [5] E. M. Conwell, *Proc. IRE*, 46(1958), 128.
- [6] David L. Swartz, John M. Swartz, *Advances in Instrumentation*, ISA-76, Vol. 31, Part 2, p. 611.
- [7] J. A. Burton, *Physica*, 20(1954), 845.
- [8] H. H. Sample, L. G. Rubin, *Advances in instrumentation*, ISA-76, Vol. 31, Part 2, p. 608.

高重复率千瓦级 Nd^{3+} :YAG 激光器的若干应用

朱劲松 谈云鹏 杨震 王业宁

(南京大学物理系)

为了获得高重复率及峰功率较高的激光输出，国外于 1969 年首次报道了声光调 Q 技术^[1]。我们于 1974 年试制成功连续泵浦声光调 Q - Nd^{3+} :YAG 激光器^[2]，并且于 1975 年起将该机用于电子工业微加工。做了石英晶体的调频、分割，电阻刻槽，硅、锗、钽酸锂的划片等实验。近年来又将它用于非线性晶体的性能研究，取得了一定的结果。

重复率为数千赫（最高可达几十千赫），峰功率为千瓦级（最高可达几十千瓦）的准连续激光输出，是利用声光 Q 开关、插入连续 Nd^{3+} :YAG 激光器的谐振腔内获得的。声光开关具有调制电压较低、消光比好、插入损耗小、激光损伤阈值高、脉冲-脉冲振幅稳定性好、动静比大等优点（但也具有开关时间慢、脉宽较宽等缺点）。因此适用于中等峰功率的需要。它与最大功率仅为一、二百瓦的连续 Nd^{3+} :YAG 激光器相比，应用范围大大地扩大了。

我们利用具有下述参数的激光器：重复率

为 1—10 个千赫可调，脉宽为 300 毫微秒左右，平均功率为十瓦，峰功率为一万瓦左右。进行了如下的工作：

1. 电子工业微加工

声光调 Q - Nd^{3+} :YAG 激光器所输出的激光经透镜聚焦后，有较小的光斑（十微米左右），并且具有适中的峰功率、脉冲间隔较短、重复率高等特点。适用于电子元件的精密调整，它可以在热敏感的材料上除去薄膜的一部分。由于脉冲宽度很窄，在热量传到基底上以前，脉冲的作用已完结，因而用它来加工有衬底的薄膜元件，具有不损伤基底材料的优点。这个对于石英晶体的“调频”、薄膜电阻“刻槽”等是十分有利的。在精密加工的过程中，可用监视系统，并且通过门电路来控制声光开关，使激光可以在一个脉冲之内得以熄灭。因而可使元件调整精度较一般传统的调整加工技术高出若干个数量级。

(1) 石英晶体频率调整(简称“调频”)

石英晶体(石英谐振器)是电子工业的极其重要的元件。它在制造过程中,除包括切割、磨、镀电极银层外,还需要调整频率。用传统的“蒸镀”、“腐蚀”等方法来调准频率,速度慢,精度也不高(10^{-4} 左右)。激光调频是将激光用透镜聚焦在石英晶体表面电极银层上,使其温度迅速上升,此时电极银层受激光作用迅速被蒸发,因而电极银层减少,使得石英晶体的频率得以变化。由于石英晶体的特殊性,因而对于“调频”用的激光提出苛刻的要求,激光束既要在电极银层上烧出一系列整齐的空洞列阵,而又对石英基底没有作用(即不损伤基底)。只有这样才不影响石英晶体的 Q 值。这不是通常的激光所能胜任的。

我们用图1所示的装置进行了“调频”工作,石英晶体放在往复工作台上,一边受激光作用,一边由数字频率计监测其频率变化。只要适当选取工件移动速度和超声脉冲重复率,即可在石英晶体表面电极银层上“烧”出间隔适中的斑点,控制激光输出可改变斑点直径及深度,

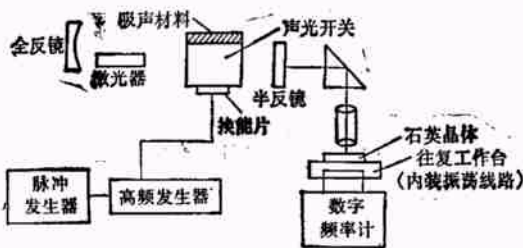


图1 调频装置示意图

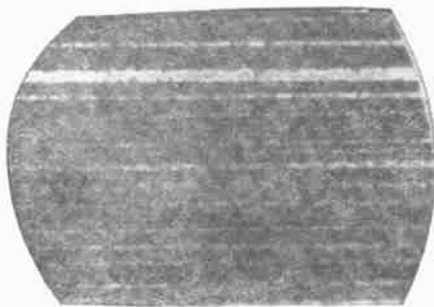


图2 石英晶片用激光调频后,激光在电极银层上所留下的痕迹(空洞列阵)

使得石英晶体频率改变量可以控制。我们选取了频率为4兆赫及6兆赫两种石英晶体,进行“调频”实验。当激光束每次扫过频率为4兆赫的石英晶体时,在银电极层上,大约“烧”出100余个洞。洞的直径平均2丝左右,洞的间隙为6—7丝(图2为经激光束多次作用后,在石英晶体银层上所留下的痕迹)。激光每作用一次,晶体频率上升6—7赫,平均 10^{-2} 赫/洞(即激光每个脉冲的作用,可以改变石英晶体 10^{-2} 赫)。当多次作用后,石英晶体频率变化达100余赫时,石英晶体的 Q 值不变。而在频率变化3000赫时,其 Q 值下降30%。在调整频率为6兆赫的晶体时,原晶体的并联频率为6000059赫,经过激光十余次作用后变为6000114赫,变化了55赫。调整精度达 1×10^{-6} — 2×10^{-7} 。如果采用自动控制,精度还可以提高。由于激光“调频”是“烧”掉银层,故其频率仅是向频率升高方向改变。如果激光作用在银层的中心,频率变化量大。此外,因激光可透过玻璃外壳,因而使得由于封装过程产生了频差而报废的晶体,可用激光来使其纠正,从而可以大大提高成品率。

(2) 电阻刻槽实验

我们用金属膜电阻进行了刻槽实验,结果较为满意,刻槽清洁、干净,并且不损伤陶瓷基底。这是由于 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 激光波长为1.06微米。这种波长为金属膜吸收,而对非金属的陶瓷基底是透过的。并且用 Q 开关输出,峰功率高,脉宽窄,既易刻干净,又使基底发热量少,监控测量时误差小,调整精度高。

(3) 硅、锗片划割

在晶体管制作工艺中的管芯切割工序,传统的方法是用金刚刀划割。目前用准连续的千瓦级激光切割,是在硅(锗)片的管芯周围划出成孔状的连线(类似于邮票四周的孔)后,再完成管芯分割。我们划割了锗、硅片(20—40丝厚),划槽深十余丝,宽6—7丝,图3为划割后硅片断面照片。用激光划割既可以提高成品率,又可以提高管芯质量,目前已推广用于生产。

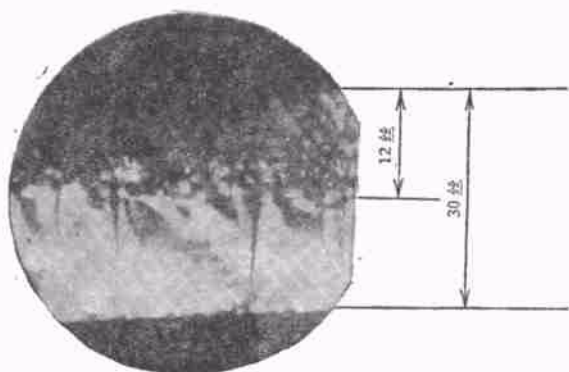


图3 30 丝左右厚的硅片,激光划割后的断面
(上部黑色为激光“烧”过的区域)

2. 晶体的非线性光学性能研究中的应用

由于声光调Q-Nd³⁺:YAG 激光器具有较高的峰功率及准连续的输出,用它可以提高非线性效应的转换效率,也可以用它来获得较强的倍频光,以研究非线性光学晶体结构不完整性。

(1) 提高非线性效应的转换效率

根据非线性光学理论,二次谐波光强与基波光强满足如下关系:

$$I^{2\omega} \propto d_{ijk}^2 l^2 (I^\omega)^2 \frac{\left(\sin \frac{\Delta k l}{2}\right)^2}{\left(\frac{\Delta k l}{2}\right)^2},$$

$$\eta = \frac{I^{2\omega}}{I^\omega} \propto I^\omega,$$

式中 $I^{2\omega}$, I^ω 分别为谐波及基波光强, d_{ijk} 为非线性系数, l 为晶体长度, η 为基波到谐波的转换效率。从式中可以看出倍频光强与基波光强的平方成正比,转换效率正比于基波功率。

由于声光调 Q-Nd³⁺:YAG 激光器峰功率较普通连续 Nd³⁺:YAG 激光器功率高两个数量级,因而用高功率的声光调 Q 激光器作为基波光源时,倍频光强将大大增加,转换效率也因基波功率增加而增加。

我们用一块 $\phi 10 \times 18$ 毫米的 LiIO₃ (质量较差)置于激光腔内,进行腔内倍频实验。当连续 Nd³⁺:YAG 输出 5 瓦时,得倍频输出 6—7 毫瓦(此时转换效率为 0.13%)。而当在谐振腔内再加入声光 Q 开关,并且在调 Q 以后(由于开关插入损耗,基波功率变为 2 瓦),得倍频平均

物理

功率为 110 毫瓦(转换效率为 5.5%)。可见,转换效率提高了 42 倍。

(2) 研究非线性光学晶体的质量

我们用千瓦级高重复率的 Nd³⁺:YAG 激光作为基波光,测量了 BNN, LN 等晶体的倍频温度及倍频角度扫描曲线(图 4 为 LN 温度扫描曲线)。从这些曲线的峰的个数、高度、位置、半功率宽度等数据可以判断出该晶体的质量。由于基波功率强,并且有一定重复率,故可以不使用通常所需要的高灵敏度、高信噪比的接收放大装置,如锁相放大器或门积分放大器等。

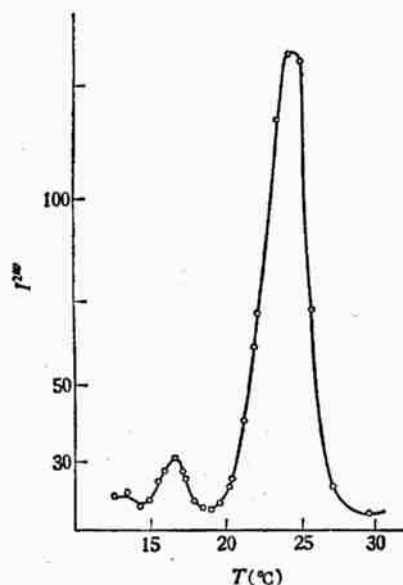


图4 LiNbO₃ 晶体的倍频温度扫描曲线

(3) 用于研究铁电晶体中缺陷对倍频的影响

基波光入射在具有非线性效应的铁电晶体时,可以看到倍频光输出,但当晶体中存在诸如生长层、铁电畴、孪晶等缺陷时将会在倍频光中有所反应。

(a) 我们观察到,在基波光束范围内,当晶体存在应力或组分不均匀时,因为各处匹配温度不同,则在某一温度观察倍频光斑时,可以发现光斑内各处光强不一,并且随着温度的变化,光斑内各处相对光强也会发生变化。图 5 为倍频光斑放大的照片,图中的横向条纹是生长层。

(b) 由于晶体内存在的各种缺陷,会产生

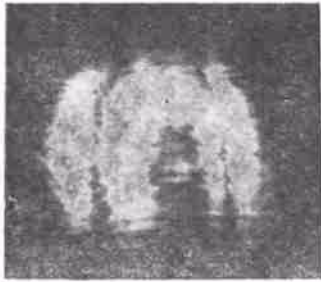


图5 倍频光斑放大照片,可以看出,由于在光斑范围内折射率的不均匀而引起的光强变化,图片中纵向黑条纹位置随温度变化而移动

离轴散射基波光。它与轴向基波光匹配可以产生倍频光环^[3]。可以用它来检验匹配。我们在LN, BNN 中均观察到这类倍频光环。并且发现倍频光环数与扫描曲线上的峰有对应关系。

(c) 在某些情况下,铁电畴,将会增强倍频光强。我们在几块LN晶体的多畴层带区,均发现倍频光较单畴区有增强效应。

上述种种研究,都只有在较强的基波光强条件下,才能有效地进行。普通的Nd³⁺:YAG器件,因为二次谐波太弱,在实验上很难观察到这些现象。

图2,3为邹峰一同志协助完成,在此致谢。

参 考 文 献

- [1] R. B. Chesler et al., *IEEE J-QE*, **QE-5**(1969), 345.
- [2] 南京大学物理系晶体物理教研室, *激光*, 2-4 (1975), 27.
- [3] H. E. Bates, *J. Opt. Soc. Amer.*, **61-7** (1971), 904; **63-2** (1973), 146.

背散射技术用于表面微分析

承焕生 汤家镛 徐志伟 杨福家 赵国庆 周筑颖

(复 旦 大 学)

引 言

用离子加速器的离子束进行物质分析是近十年发展起来的有效的实验方法。它包括背散射、质子荧光分析和核反应三种方法。这些方法各有特点,互相补充^[1]。背散射用来分析样品表面下组成的变化或者杂质的深度分布特别合适。其主要优点是简便、直观、定量、可靠,对样品无损伤。与其它方法相比,既不需要对样品进行麻烦的剥层处理(例如离子溅射、化学腐蚀或研磨等),也不需要依赖“标样”。使用1—2兆电子伏的⁴He离子束分析样品深度可达几千埃(采用质子束可增加分析深度达几个微米),通常深度分辨率可达200埃左右(采用掠角散射,深度分辨率可达20—30埃)^[2]。

背散射可以成功地用于电子材料、原子能技术和材料科学研究。电子材料方面,如离子注入、掺杂深度分布、晶体中杂质原子定位和晶

格损伤、热氧化和阳极氧化、接触形式、薄膜沉淀等。原子能技术方面,如反应堆内壁材料的腐蚀和覆盖材料研究,氮和氧的结合研究等。材料科学方面,如杂质溶解度、扩散过程、薄膜反应、氧化和磨蚀、超导及磁性薄膜形成等。

一、基本原理

用具有一定能量的离子束轰击靶物质,入射离子和靶物质的原子核发生库仑相互作用,引起了散射现象,其中有一部分入射离子发生大角度散射。用金硅面垒半导体探测器或静电分析器可以测得背散射离子的能谱。

这里发生的是一个弹性散射过程,利用能量守恒和动量守恒定律即可导出散射的离子能量E为

$$E = KE_0, K = \frac{(m \cos \theta + \sqrt{M^2 - m^2 \sin^2 \theta})^2}{(M + m)^2}, \quad (1)$$