

端面耦合钛扩散铌酸锂平面光波导中 非简并四波混频的研究

胡汉武 曹庄琪 杨傅子 胡 纯 陈英礼 方俊鑫
(上海交通大学应用物理系)

提要: 在钛扩散 LiNbO_3 平面光波导中, 用端面耦合方法实现了相向传播光脉冲的非简并四波混频效应。实验发现, 倍频光以一定的发散角沿垂直于波导表面的方向传播, 而发散的机理可用夫琅和费衍射理论解释。

关键词: 光波导, 端面耦合, 非简并四波混频

Research on nondegenerate four-wave mixing in Ti-diffused LiNbO_3 planar waveguide by end-face coupling

Hu Hanwu, Cao Zhuangqi, Yang Fuzi, Hu Chun, Chen Yingli, Fang Junxin
(Department of Applied Physics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai)

Abstract: The experiment of nondegenerate four-wave mixing was carried out in Ti-diffused LiNbO_3 single mode waveguide by end-face coupling. The frequency doubled light propagated certain divergent angle in the direction perpendicular to the surface was observed. The mechanism of divergence was explained by the theory of diffraction.

Key words: Optical waveguide, end-face coupling, nondegenerate four-wave mixing.

一、引 言

平面波导中两束相向传播光脉冲的非线性相互作用, 将产生垂直于波导表面的倍频辐射^[1]。利用这种非简并四波混频效应, 可进行光信息处理和超短脉冲时间宽度的测量^[2]。这些工作开拓了集成光学新的应用领域, 同时也促进了非线性集成光学的发展。但以上工作都是在棱镜耦合方式下进行的, 这种方法虽然具有耦合效率较高的优点, 但也存在不少固有的困难。首先, 棱镜波导这种分立元件之间的耦合难以做成平面化和集成化的器件; 其次, 不同的波长具有不同的耦合角, 势必给光路的调整带来许多不便, 对实现多波段通用是十分不利的; 第三, 采用这种方式需要价格昂贵的金红石棱镜, 而且在耦合过程中容易损坏。为避免上述困难, 我们把棱镜耦合方式改为端面耦合方式, 在钛扩散 LiNbO_3 平面光波导中进行了非简并四波混频的实验。经过解决一系列技术困难, 我们在垂直于波导表面的方向上观察到了倍频辐射。实验结果表明: 倍频辐射的强度正比于两束入射基频光强度的乘积。同时, 我们还观察到

了以前没有报道过的现象，即倍频辐射具有一定的发散角，通过拍摄照片，可估计出发散角的大小。如果激光器的输出是高斯光束，则可证明波导中的非线性极化是一狭长的区域，因而可用夫琅和费狭缝衍射的理论来解释倍频辐射的发散机理。

二、实验装置和信号测量

实验光路如图 1 所示。其中 1 是 Q 开关 YAG 脉冲激光器，输出脉冲宽度约为 15 ns，单脉冲能量是 0.5 J。2、3 是一对泰勒偏振棱镜，其作用是激发波导中的 TE 波，并使进入波导的导波光强连续可调。4、5 是分束镜，8、9 的作用是聚焦显微物镜，用以提高端面耦合效率。10 是 x 切割 y 方向传播的钛扩散 LiNbO₃ 光波导，为进行有效的耦合，波导两个端面必须经过仔细的抛光处理。11 是探测器，用来监视激光功率的涨落。

图 2 是倍频信号测量系统。在垂直于波导表面、倍频信号传输方向上加两个小孔 A₁ 和

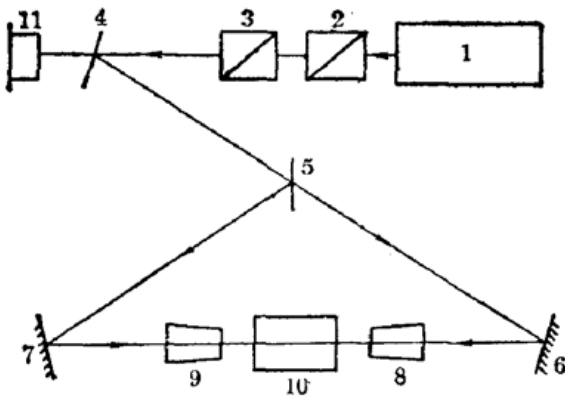


图 1 实验装置

1—Q 开关 YAG 激光器；2, 3—偏振器；4, 5—分束器；6, 7—反射镜；8, 9—望远镜物镜 (×10)；10—波导；11—探测器

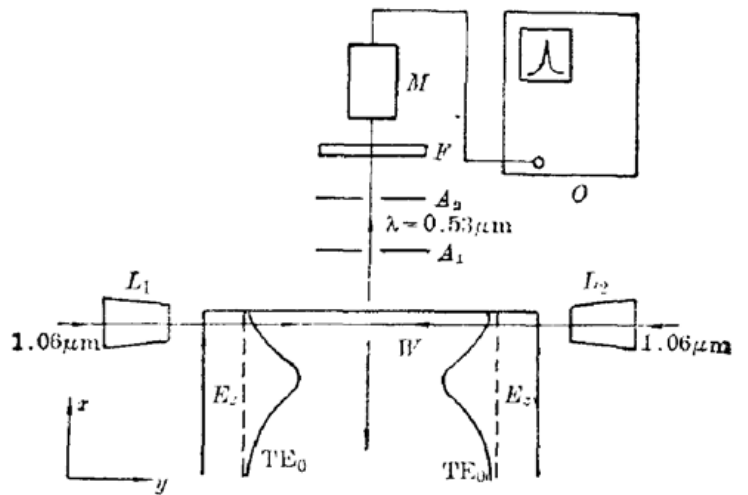


图 2 倍频信号测量系统

L₁、L₂—望远镜物镜；A₁、A₂—小孔；M—光电倍增管；O—示波器；F—0.53 μm 滤光片；W—LiNbO₃ 波导管

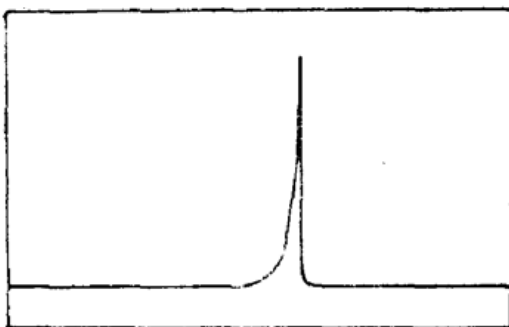


图 3

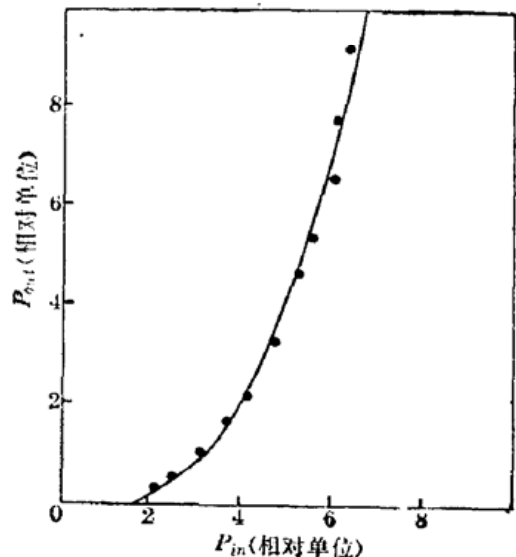


图 4

A_2 , 以挡住其它方向的杂散光; 在小孔后面放置 $0.53 \mu\text{m}$ 全透、 $1.06 \mu\text{m}$ 全反的介质膜片 F , 用以滤去红外杂散光; 通过滤光片的倍频信号由光电倍增管接收, 然后用示波器 O 显示。图 3 是示波器上看到的倍频信号(由于示波器的响应速度跟不上 15 ns 量级的脉冲, 故这里是接收器加了积分电路后显示的波形。)

图 4 表示倍频信号强度与入射光强度的关系曲线。根据文献[1], 已知有

$$I(2\omega) \propto I_+(\omega)I_-(\omega) \quad (1)$$

其中 $I(2\omega)$ 表示倍频信号光强, $I_+(\omega)$ 和 $I_-(\omega)$ 分别代表正反向传播的入射光强。当正反向传播的二束入射光强度相等时, 倍频信号光强与入射光强的平方成正比。从图 4 的曲线可以看出, 我们的实验结果与(1)式的平方关系相符。

三、倍频信号的发散及其理论解释

在实验中我们发现, 当相向传播的两束入射光足够强时, 用眼睛就能观察到倍频绿光。倍频光以一定的发散角从波导表面垂直地向观察方向辐射。为了确定所见倍频光是否是相向传播入射光相互作用的结果, 可将两束入射光中的任何一束遮住, 这时再观察波导表面将看不到倍频绿光。用照相镜头聚焦于波导表面所拍摄的倍频绿光照片如图 5(a) 所示。实验中, 我们还观察到了以前没有报道过的现象, 即当眼睛聚焦于无穷远时, 看到从波导表面辐射出来的倍频信号是一条竖的绿线。图 5(b) 是用照相镜头聚焦于无穷远时, 所拍摄的倍频绿光照片。

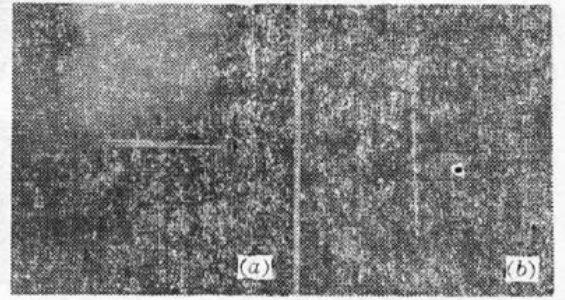


图 5

该现象可以用夫琅和费狭缝衍射的模型来解释。对于 x 切割 y 传输的钛扩散 LiNbO_3 光波导, 使入射光的偏振方向沿 z 方向, 则在该波导中传输的 TE 模的电场可写成如下形式:

$$\mathbf{E} = \mathbf{K}E_z \exp[i(\omega t - \beta y)] \quad (2)$$

其中, \mathbf{K} 是 z 方向的单位矢; E_z 是电场在 z 方向的分量; ω 是入射光的圆频率; β 是 TE 导模的传播常数。该式表示 TE 导模是沿正 y 方向传输的一个行波。考虑到激光器输出为高斯光束, 而我们将光束耦合进波导的方式是通过显微物镜进行的端面耦合, 这样就会产生一个聚焦的高斯光束。为得到会聚高斯光束在波导里相向传输所产生的非线性极化场, 必须知道高斯光束在波导中的形式。对于我们所使用的平面波导, 由于它只在一个方向(x 方向)上对光起约束作用, 而在另一方向(z 方向)上对光束的影响不大。所以, 我们认为高斯光束耦合进波导后在 z 方向仍然是高斯型分布, 而在 x 方向上则为受波导折射率分布制约的导模场分布 $f(x)$ 。对于无损耗的情况, 电场在 z 方向的分量可以写为:

$$E_z = Df(x) \frac{w_0}{w(y)} e^{-z^2/w^2(y)} \quad (3)$$

其中, D 是归一化常数, w_0 是高斯光束的光腰半宽度, 而

$$w(y) = w_0 \sqrt{1 + \frac{4(y-d)^2}{k^2 w_0^4}} \quad (4)$$

其中, $k = \frac{\omega}{c}n$ 是介质中的波数, n 为介质折射率, d 是光腰到坐标原点的距离。 $w(y)$ 表示在光

束的横截面上,场强下降到最大场强的 $1/e$ 处到中心点的距离,见图 6。

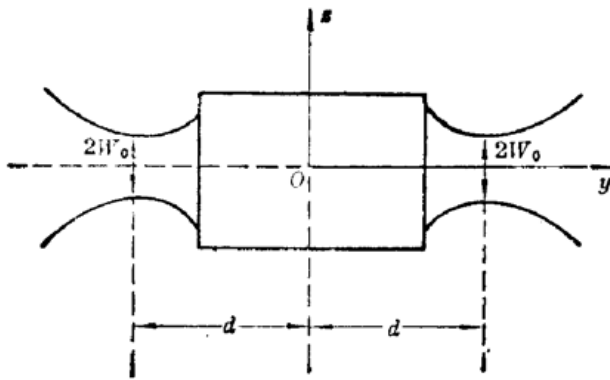


图 6

对于负 y 方向传输的导波,只需将电场传播因子写成 $\exp [i(\omega t + \beta y)]$ 即可。两束相对传输的导波相互交迭后,产生的非线性极化场由下式表示:

$$P_z^{NL}(2\omega) = \epsilon_0 d_{33} E_z^2 \exp(2i\omega t) \quad (5)$$

式中 ϵ_0 是真空极化系数,而 d_{33} 是有效倍频极化系数。与文献[1]中的(4)式比较,本文的(5)式显然多了一个因子:

$$f(y, z) = \left[\frac{w_0}{w(y)} \right]^2 e^{-2z^2/w^2(y)} \quad (6)$$

这是由于我们考虑激光束为高斯光束,而并非均匀平面波所致。

为了应用解析形式研究表面倍频光的性质,我们作如下近似:考虑到场在 z 向分布为高斯函数,在离开对称轴稍远的地方就迅速衰减,这样我们就可认为高斯光束只有在其对称轴附近的场对非线性极化强度才有贡献。同时,我们忽略波导中光束宽度的变化,即假设(6)式中指数部分的参量 $w(y)$ 为常数。但仍保留幅度部分对 y 的依赖关系,于是(6)式可近似地表示为

$$f(y, z) \approx \left[\frac{w_0}{w(y)} \right]^2 e^{-2z^2/\sigma^2} \quad (7)$$

其中, σ 为常数。另外,我们考虑两入射光束的光腰均在 $y=0$ 这一点的情况,于是有

$$f(y, z) = \left(1 + \frac{4y^2}{k^2 w_0^4} \right)^{-1} e^{-2z^2/\sigma^2} \quad (8)$$

由此可见,非线性极化区域是沿 y 轴有一光强分布面沿 z 轴迅速衰减的一狭长地带。把(8)式看作狭缝中的复扰动分布,并假设折射率为 n 的介质充满全空间,则远场夫琅和费衍射公式^[3]

$$E(x, y, z) = \frac{e^{ikx}}{i\lambda x} e^{\frac{ik}{2x}(y^2+z^2)} \iint_{\Sigma} f(y_1, z_1) e^{-\frac{ik}{x}(yy_1+zz_1)} dy_1 dz_1 \quad (9)$$

将可应用于这一情况,积分区域 Σ 为狭缝表面,但由于(8)式中的扰动只在一小区域中有较大的值,偏离这个区域就很快衰减,因此,(9)式中的积分仍然取全平面。将(8)式代入(9)式,我们可得到倍频信号的远场分布为

$$E(x, y, z) = \frac{\sqrt{2\pi} \sigma k^2 w_0^2}{8} \cdot \frac{e^{ikx}}{ix} \cdot e^{\frac{ik}{2x}(y^2+z^2)} \cdot e^{-\frac{k^2 w_0^2 |y|}{2x}} \cdot e^{-\frac{k^2 \sigma^2 z^2}{8x^2}} \quad (10)$$

由(10)式可见,在远场倍频信号随 $|y|$ 增大而指数衰减;随 $|z|$ 增大以高斯函数形式衰减。并可看出,倍频光束在 y 和 z 方向上均有发散,其中在 z 方向的光束发散角由下式确定:

$$\frac{k^2 \sigma^2 z^2}{4x^2} = 1 \quad (11)$$

于是

$$\theta \approx \frac{z}{x} = \sqrt{\frac{4}{k^2 \sigma^2}} = \frac{2}{k\sigma} \quad (12)$$

值得指出的是,以上分析只是实验现象的定性解释,目的是说明倍频信号的发散。至于定量的分析,除了在实验上必须提高测量精度以外,理论上还需进一步的工作。

参 考 文 献

- 1 R. Normandin *et al.*, *Opt. Lett.* **4**(2), 58-60(1979)
- 2 R. Normandin *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **38**(4), 253-255(1980)
- 3 梁铨廷,《物理光学》(机械工业出版社,北京 1980), 117

铌玻璃激光器应用技术研讨会在苏州召开

众所周知,铌玻璃是激光器常用的一种工作物质,但以往使用的硅酸盐玻璃热光性能差,阈值较高而效率较低,因而使用范围受到一定限制。目前国外已普遍使用磷酸盐铌玻璃,因为此种玻璃的受激发射截面大,非线性折射率小,阈值低,效率高,因此在激光等离子体研究、激光核聚变及激光加工等应用中具有广泛的前景。

但磷酸盐玻璃的表面耐潮性稍差,机械强度稍低,热膨胀系数大,如果沿用硅酸盐玻璃的工作条件,不适当地长时间高功率光泵,就容易引起热炸裂,工作场地也应保持干燥,以免端面起毛。聚光腔的设计和灯、棒的匹配也是使器件最佳化的重要条件。

为了加强铌玻璃研制与使用单位之间的联系,中国科学院上海光机所于 1989 年 11 月 8 日至 10 日在苏州召开了铌玻璃激光器应用技术研讨会,有 30 多名代表参加了会议。会上,该所有关实验室介绍了磷酸盐玻璃的主要性能、激光特性等,使用单位介绍了磷酸盐激光器在各种金属、非金属和磁性材料上打孔,特别是打深孔的使用情况。代表们对如何进一步提高磷酸盐玻璃的质量,改善激光器件的工作条件和拓宽它的应用范围进行了认真的探讨。

(周稳观)

第五届江苏、山东、河南、黑龙江激光医学 联合年会在苏州召开

第五届江苏、山东、河南、黑龙江四省激光医学联合年会 1989 年 11 月 9 日至 12 日在苏州召开,近 150 名来自四省及上海等外省市的代表参加了会议。会议共收到 130 多篇论文,其中有 66 篇在大小会议上进行了交流。

与历届会议相比,这次会议论文涉及的病例多,病种广;YAG 激光光纤治疗腔内疾病的论文比例增加;光动力学治疗趋向于激光气化、化疗、放疗相结合的综合治疗;首次报告了 Kr^{+} 激光在眼底病治疗上的应用;开始了激光与电脑相结合治疗乳腺小叶增生及用电脑处理病例等激光医疗电脑化的探索。

会议代表认为,今后要进一步加强激光医疗基础理论的研究,临床上不仅要达到量的增加,更要注重质的提高。下届年会将于 1990 年在山东省召开。

(吉 禾)