

文章编号: 1001-3806(2003)05-0411-04

共线声光模式转换效率的分析与计算*

周 愚 巫 柳 刘永智 张晓霞

(电子科技大学光电信息学院, 成都, 610054)

摘要: 利用声表面波共线声光效应的衍射光栅可使波导中导模向泄漏模转换, 此现象在光通信在线解复用系统具有潜在应用前景。利用耦合模理论求解这一过程, 模式转换效率可以化作声波频率、声光作用长度、波导厚度和声波功率密度的函数, 利用数值计算得出结果并给出其关系。由数值计算结果可知, x 切质子交换铌酸锂波导模式转换效率最大, 适当选择波导长度和声驱动功率密度, 其 TE_0 - TM 转换效率可达 90% 以上。

关键词: 共线声光效应; 模式转换效率; 耦合模理论; 质子交换铌酸锂波导

中图分类号: TN204

文献标识码: A

Analysis and numerical calculation of mode conversion efficiency in collinear acousto-optic interaction

Zhou Yu, Wu Liu, Liu Yongzhi, Zhang Xiaoxia

(School of Optic-electronic Information, University of Electronic Science and Technology, Chengdu, 610054)

Abstract: The guided-to-leaky mode conversion with the induced diffraction grating from the collinear surface acoustic wave (SAW) possess potential application in onboard optical demultiplexing of optic communication systems. This phenomenon is analyzed using the coupled mode theory. Mode conversion efficiency has been calculated as functions of acoustic frequency, interaction length, guiding layer thickness, and acoustic drive power density. It is shown that the x -cut configuration features the highest mode conversion efficiency, measured mode conversion efficiency as high as 90% is obtained at the relevant acoustic drive power density and interaction length.

Key words: collinear acousto-optic interaction; mode conversion efficiency; coupled mode theory; PE LiNbO₃ waveguide

引 言

近年来, 由于在光通信在线解复用系统中具有潜在的应用前景, 利用入射波、声表面波和泄漏模相互作用的共线声光器件日益引起人们的重视。相对于声光 Bragg 衍射器件, 共线声光器件由于光波与声波传播方向共线, 叉指换能器 (IDT) 可以沿波导传播方向制作, 结构紧凑, 可在同一基片上制作多路声光互作用波导, 实现多路宽带在线解复用。但这一器件要想实用化必须有很高的模式转换效率, 由于质子交换铌酸锂 (PE LiNbO₃) 波导非常光折射率产生明显的增加, 从而加强了光场约束和提高了声场-光场重叠, 这使得质子交换铌酸锂波导的模式转换效率远远高于钛扩散铌酸锂 (Ti LiNbO₃) 波导,

故本文中选择了质子交换铌酸锂波导进行分析计算。

1 原 理

共线声光互作用器件结构如图 1, 其中声表面

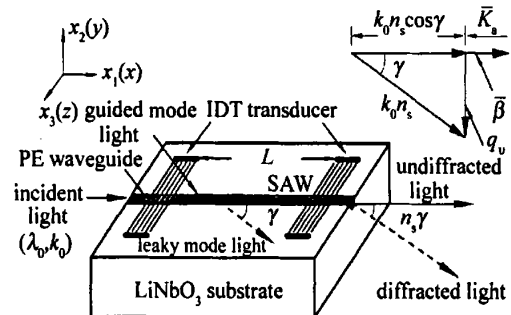


Fig. 1 Geometry for collinear guide-to-leaky wave AO interactions on PE LiNbO₃ waveguide structure, inset: phase-matching condition

波传播方向为负 x_1 方向, 而入射光的自由空间传播常数 k_0 方向则为正 x_1 方向。当以下的相位匹配条件满足时:

* 国家自然科学基金资助项目。

作者简介: 周 愚, 男, 1978 年 2 月出生。硕士, 助研。主要从事声光 OADM 器件的研究和制作。

收稿日期: 2002-12-25; 收到修改稿日期: 2003-02-27

$$-K_a = -(2/v_a)f_a = k_0 n_s \cos \theta \quad (1)$$

入射光波和反向传播声表面波相互作用使波导中的入射波产生衍射并转换成泄漏光波。在(1)式中, K_a , v_a 和 f_a 分别代表入射光传播常数、声表面波传播常数、声表面波波速和频率。

由(1)式给出的入射波与泄漏波之间的耦合必然会导致能量损失^[1]。同时因为泄漏波不是波导的本征模式,其传播区域随长度的增加呈指数增长,所以直接利用耦合模理论是不可能求出结果的。因此,可将入射波向泄漏波的转换看作导模向连续谱辐射模的转换,这样就可以利用耦合模理论进行求解了^[2]。

1.1 声光互作用模型

在本节中将入射波向泄漏波的转换看作导模向连续谱辐射模的转换。根据耦合模理论,声光互作用区域中模场分布可写成导模和辐射模的总和^[3]:

$$\begin{aligned} \overline{E} = E(x_1, x_2) = \sum_{m=0}^{M-1} A_m(x_1) E_m(x_2) \exp(-j m x_1) + \int a(x_1) \overline{E}(x_1) \exp(-j x_1) dq \quad (2) \end{aligned}$$

利用耦合模方程(2)式可推导出一组微分方程,由这组方程可以确定第 n 阶导模的振幅与 m 阶导模以及连续谱辐射模振幅之间的关系,微分方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{dA_n(x_1)}{dx_1} = -j \sum_{m=0}^{M-1} A_m(x_1) K_{mn}^q \exp[+j(n+qK_a-m)x_1] - j \int a(x_1) K_n^q \exp[+j(n+qK_a-)x_1] dq \quad (3.1) \end{aligned}$$

$$\frac{da(x_1)}{dx_1} = -j \sum_{m=0}^{M-1} A_m(x_1) K_m^q \exp[-j(m+qK_a-)x_1] \quad (3.2)$$

式中,

$$K_{mn}^q = \frac{1}{4} \overline{E}_m^*(x_2) \cdot [\int a(x_2) \overline{E}_n(x_2) dx_2 \quad (4.1)$$

$$K_n^q = \frac{1}{4} \overline{E}^*(x_2) \cdot [\int a(x_2) \overline{E}_n(x_2) dx_2 \quad (4.2)$$

分别代表的第 n 阶与 m 阶导模之间和第 n 阶与阶辐射模之间的耦合系数,此处的 $[\int a(x_2)]$ 为声波应力产生的介电系数张量变化量^[4]。

1.2 模式转换效率

(3.1)式中的微分方程描述了入射光波与共线声表面波之间的声光互作用,其数值解可以计算出

由于入射导模与连续谱辐射模之间耦合导致的能量损失。其中入射导模转换为连续谱辐射模的效率由下式给出:

$$= P_0 \left\{ 1 - \sum_{m=0}^{M-1} |A_m(L)|^2 \right\} \times 100 \% \quad (5)$$

式中, P_0 代表入射光功率, L 为声光互作用长度。由(1)式可知不满足相位匹配条件导模间不会有足够的能量交换,所以可以忽略导模与导模间的耦合。在这种情况下,(14)式的微分方程可化简为如下的简单形式:

$$\frac{dA_0(x_1)}{dx_1} = -A_0(x_1) \quad (6)$$

A_0 代表与入射导模相关的归一化振幅,其中:

$$= \int_{q=-1,1} K_0^q |^2 \cot \quad (7)$$

表示辐射衰减系数。代表满足相位匹配条件的阶辐射模。因为声表面波反向传播,所以 $q = -1$, 因此(7)式可化简为:

$$= |K_0^{-1}|^2 \cot \quad (8)$$

(6)式入射导模(入射处有 $A_0(x_1=0) = 1$)的解由下式给出:

$$A_0(x_1) = \exp(-x_1) \quad (9)$$

由(9)式,在声光互作用区域中入射导模的能量作为 x_1 的函数由下式给出:

$$P(x_1) = \exp(-2x_1) \quad (10)$$

这样就可以得到在总长为 L 的声光互作用区域中,模式转换效率为:

$$= \{1 - \exp(-2L)\} \times 100 \% \quad (11)$$

2 数值运算结果

利用自适应步长控制的龙格-库塔算法对(3.1)式的微分方程进行数值求解^[5],参照从(8)式到(11)式的推导,并利用(5)式可将(8)式定义的作为描述导模-泄漏模转换效率的参数,可得出模式转换效率与声波频率、声光作用长度、波导厚度和声功率密度的关系。

2.1 转换效率与声波频率的关系

图 2a ~ 图 2c 表明了声驱动功率密度为 1mW/mm 时不同切向不同深度下辐射衰减系数与相应的声波频率的关系。在给定声波频率、声驱动功率密度和声光互作用长度的情况下,模式转换效率就可利用 η 计算出。如图所示不同切向不同深度下模式转换效率最大值总是对应特定的声波频率,其对应的声波带宽也各不相同。在波导深度为

2.5 μm 时, x 切和 y 切波导模式转换效率最大时声波频率分别为 427MHz 和 480MHz。在波导深度为 2.0 μm 时, z 切波导则模式转换效率最大时声波频率为 432MHz。由图可知, x 切向的模式转换效率同时带宽却是最小的, 这一点在设计器件时应有所考虑。

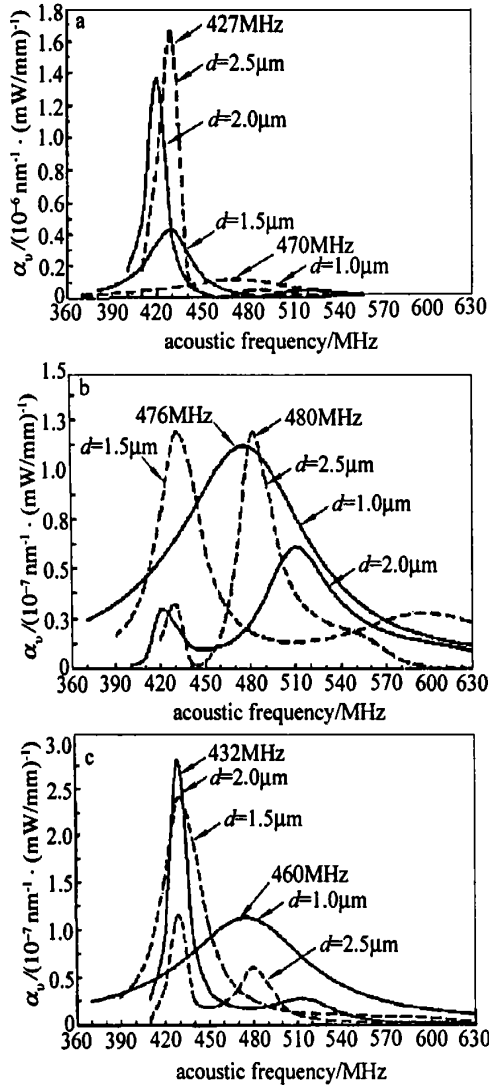


Fig. 2 a—calculated radiation decay coefficient versus acoustic frequency for $\text{TE}_0 \rightarrow \text{TM}$ conversion in the x -cut configuration
 b—calculated radiation decay coefficient versus acoustic frequency for $\text{TE}_0 \rightarrow \text{TM}$ conversion in the y -cut configuration
 c—calculated radiation decay coefficient versus acoustic frequency for $\text{TE}_0 \rightarrow \text{TM}$ conversion in the z -cut configuration

2.2 转换效率与声光作用长度及声波功率密度的关系

图 3a, 图 3b 分别显示了 x 切波导 $\text{TE}_0 \rightarrow \text{TM}$ 和 z 切波导 $\text{TM}_0 \rightarrow \text{TE}$ 转换效率相对于声驱动功率密度和声光相互作用长度的三维关系图。由图可知, 无论什么切向, 声光作用长度越长模式转换效率越大, 当然波导长度不可能任意延长下去, 需要由铌

酸锂波导长度决定。同时只要在声波非线性变得显著以前, 高的转换效率也总是对应大的声驱动功率。质子交换的过程会减少铌酸锂晶体的声光耦合系数^[6], 然而这一问题可以通过将声表面波叉指换能器制作在铌酸锂衬底出射边缘的未进行质子交换区域加以解决^[7]。

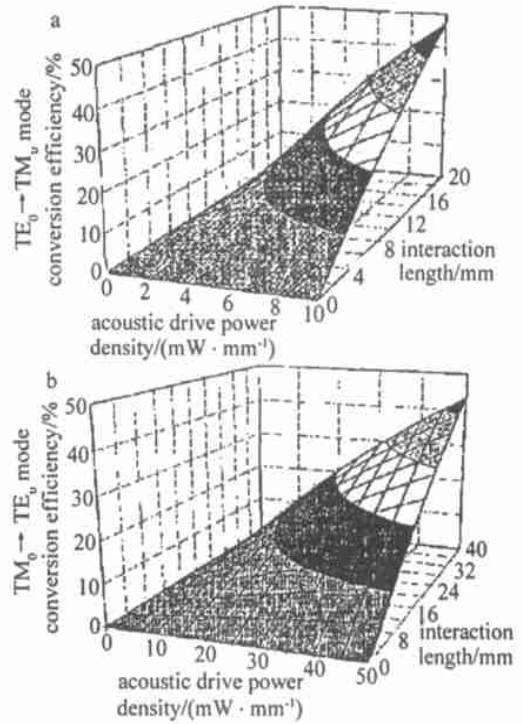


Fig. 3 a—mode conversion efficiency versus the acoustic drive power density and interaction length in the x -cut configuration (guiding layer thickness: 2.5 μm , acoustic frequency: 427MHz)
 b—mode conversion efficiency versus the acoustic drive power density and interaction length in the x -cut configuration (guiding layer thickness: 1.0 μm , acoustic frequency: 460MHz)

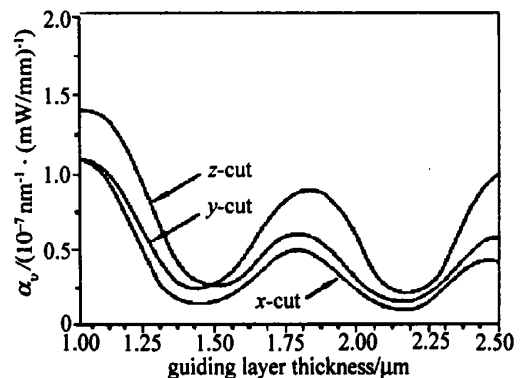


Fig. 4 Calculated radiation decay coefficient versus guiding layer thickness for mode conversion in different configuration waveguides. (the acoustic frequency of 470MHz, 476MHz and 460MHz for the x , y and z -cut configurations, respectively)

2.3 转换效率与波导深度的关系

图 4 显示的是声驱动功率 1mW/mm, 不同切向下辐射衰减系数与波导深度的关系。由图可知

不同切向下波导辐射衰减系数随波导深度增加而呈周期性变化。

3 结束语

简单阐述了对于共线声光效应的原理,将入射波向泄漏波的转换看作导模向连续谱辐射模的转换,并利用耦合模理论进行求解。最后模式转换效率可以作为声波频率、声光作用长度、波导厚度和声波功率密度的函数,并通过数值求解得出其相互关系。

由数值计算结果可知, x 切质子交换铌酸锂波导模式转换效率最大,若适当选择波导长度和声驱动功率密度其模式转换效率可达 90% 以上,因此,可利用共线声光互作用中入射光波频率与声波频率的对应关系,利用声波频率使相应频率光波产生模式转换从而完成可调谐滤波的功能。这种结构的可

调谐滤波器结构简单,易于制作,方便集成,价格便宜等优点,相信共线声光衍射光栅滤波器在未来光通信在线解复用系统中将具有非常广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Marcuse D, Theory of dielectric optical wave guides. New York: Academic Press, 1991: 134 ~ 147.
- [2] Pesrov D V. J Opt Commun, 1985, 6: 90 ~ 99.
- [3] Nishiara H, Haruna M, Suhara T. Optical integrated circuits. New York: McGraw-Hill Press, 1989: 62 ~ 95.
- [4] 徐介平. 声光器件的原理, 设计和应用. 北京: 科学出版社, 1982: 224 ~ 242.
- [5] Press W H, Teukolsky S A, Vetterling W T *et al.* The art of scientific computing. London: Cambridge University Press, 1992: 340 ~ 376.
- [6] Bielb E M, Russel P. IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr, 1992, 39: 330 ~ 334.
- [7] Tsai C S, Li Q, Chang C L. J Fiber-Integrated Opt, 1998, 17: 157 ~ 166.

(上接第 410 页)

间隔的多个光栅对,输出端光栅的反射率依次为 25%, 32%, 20%, 17%, 30%。得到最终 4 个波长上的激光输出,如图 5 所示。因为存在模式竞争的问题以及对长波长处的 Stokes 光形成泵浦, 1400nm 处功率很小。

题以及对长波长处的 Stokes 光形成泵浦, 1400nm 处功率很小。

4 小 结

以 DCF 光纤为增益介质,利用受激喇曼散射效应和光栅对形成光纤激光器,输出激光功率随泵浦功率、光纤长度和输出端的反射系数变化,通过优化选择可以得到一个最佳的值。利用多个光栅对改变各自的反射系数,得到多个波长的激光输出。

参 考 文 献

- [1] Rini M, Cristiani I, Degiorgio V *et al.* J Q E, 2000, 36(10): 1117 ~ 1122.
- [2] Namiki S, Emori Y. J Q E, 2001, 7 (1): 3 ~ 16.

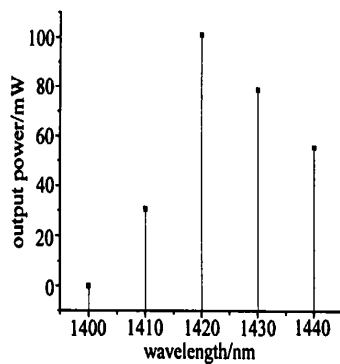


Fig. 5 Multi-wavelength laser power