

文章编号: 1001-3806(2007)02-0160-03

## 铌酸锂声电光调制器最优化工作模式研究

庞兆广<sup>1,2</sup>, 俞宽新<sup>2</sup>, 范虹<sup>3</sup>

(1. 河北师范大学 物理科学与信息工程学院, 石家庄 050016; 2. 北京工业大学 应用数理学院, 北京 100022; 3. 河北建筑工程学院 数理系, 张家口 075024)

**摘要:** 为进一步提高铌酸锂声电光调制器的性能, 在确定器件的电光工作模式后, 利用相切条件办法对相应的声光工作模式进行了系统的研究。通过以离轴角为自变量分别对  $xOz$  平面和  $yOz$  平面内不同超声波情况下的声光优值进行定量计算, 确定了铌酸锂声电光器件的最佳工作模式, 并给出了该工作模式下中心频率在 50MHz~300MHz 之间铌酸锂声电光器件的设计参数。计算结果表明, 利用最优化工作模式可以获得较大的声光优值, 从而有效提高器件的衍射效率。

**关键词:** 光学器件; 声光优值; 相切条件; 铌酸锂

**中图分类号:** TN65 **文献标识码:** A

### Study of the optimum operating mode in lithium niobate acousto-electro-optic modulator

PANG Zhao-guang<sup>1,2</sup>, YU Kuan-xin<sup>2</sup>, FAN Hong<sup>3</sup>

(1. College of Physics, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050016, China; 2. College of Applied Science, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 3. Department of Mathematics and Physics, Hebei Institute of Architecture Civil Engineering, Zhangjiakou 075024, China)

**Abstract:** In order to improve the performance of lithium niobate acousto-electro-optic (AEO) modulator, the acousto-optic operating modes were systematically studied according to tangent condition after the determination of electro-optic operating mode. Acousto-optic merit for sheared ultrasonic wave in  $xOz$  plane and  $yOz$  plane were calculated respectively and the optimum operating mode for lithium niobate AEO modulator was determined. Furthermore, the design parameters for central frequency in range of 50MHz~300MHz were also given. By this optimum operating mode, the AEO device can gain a higher acousto-optic merit and achieve a higher diffractive efficiency.

**Key words:** optical devices; acousto-optic merit; tangent condition; lithium niobate

## 引 言

声电光调制器是对激光进行调制的外调制器, 它是在声光技术的基础上发展而来, 声光调制技术在很多领域有着广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。声电光器件将声光器件与电光器件的特点集于一身, 声光驱动电功率和电光电压都可用来进行激光束的强度或方向的控制, 因此, 声电光器件无论作为调制器还是作为偏转器, 都具有相当大的灵活性, 其性能也比单独的声光器件或电光器件有所提高。

铌酸锂 (lithium niobate, LN) 晶体是一种常用的电

光和非线性光学材料, 它具有超声吸收率低, 同时可产生声光和电光效应等特点<sup>[3]</sup>。特别适合制作高频声光器件和声电光器件<sup>[4,5]</sup>。

## 1 电光工作模式和声光工作模式

声电光调制器的优化设计包括电光工作模式的优化设计以及声光工作模式的优化设计两个方面。由于是一维声电光器件, 声、电和光各占一维, 如图 1 所示。

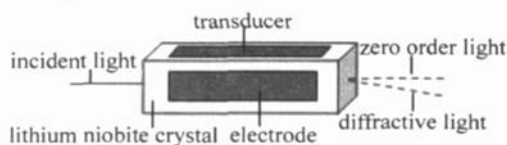


Fig 1 Configuration of LN AEO modulator

因此, 电光作用可以选择横向电光效应以利于降低半波电压。通过计算可知, 在两种情况下声电光调制器的电光工作模式可以实现横向电光效应, 并且电光效应引起的折射率的改变量中不含有自然双折射项<sup>[6]</sup>,

基金项目: 北京市教委基金资助项目 (05006111200101)

作者简介: 庞兆广 (1974-), 男, 博士, 研究方向为声光理论及声光器件。

E-mail: pangzhaoguang@emails.bjut.edu.cn

收稿日期: 2006-01-20; 收到修改稿日期: 2006-03-18

分别为:一种是沿着  $y$  轴加电场,超声波沿着  $x$  轴附近传播,光沿着  $z$  轴附近传播;另一种沿着  $x$  轴加电场,超声波沿  $y$  轴附近传播,光沿着  $z$  轴附近传播。

由于在晶体的一个特定方向上传播的超声波具有 3 个不同的本征值声速,而不同的本征值声速也将直接影响铌酸锂声光电调制器工作模式,本文中将对这些情况做具体的分析和讨论,以确定铌酸锂声光电器件的最优化工作模式。

铌酸锂晶体是负单轴晶体,无旋光性。本文中利用相切条件办法来研究铌酸锂反常声光相互作用几何关系<sup>[7]</sup>,为了使器件的带宽尽可能宽,因此选用入射  $o$  光,衍射  $e$  光的宽带匹配模式作为声光电调制器的声光工作模式,此时折射率曲面及波矢量几何关系见图 2。

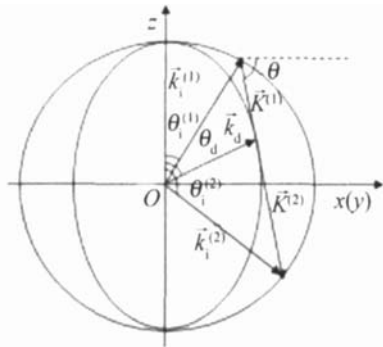


Fig 2 Geometrical relationships in  $xO-z(yO-z)$  plane

图 2 中的  $\theta_i^{(i)}$  和  $\theta_d$  为入射角和衍射角,分别表示入射光波矢  $\vec{k}_i^{(i)}$  和衍射光波矢  $\vec{k}_d$  与  $z$  轴之间的夹角,  $\theta$  表示离轴角,为超声波波矢  $\vec{K}^{(i)}$  和  $x(y)$  轴之间的夹角;规定顺时针为正,逆时针为负。对于  $\vec{k}_i^{(i)}, \vec{K}^{(i)}$ , 右上角角标  $i=1$  时,表示 +1 级衍射; $i=2$  时,表示 -1 级衍射。

根据相切条件<sup>[7,8]</sup>,可以得到:

$$\theta_i^{(1)} = \theta - \cos^{-1} \left[ \frac{n_d}{n_o} \cdot \cos(\theta - \theta_d) \right] \quad (1)$$

$$\theta_i^{(2)} = \theta + \cos^{-1} \left[ \frac{n_d}{n_o} \cdot \cos(\theta - \theta_d) \right] \quad (2)$$

$$\theta_d = \tan^{-1} \left[ \frac{n_e^2}{n_o^2} \cdot \tan\theta \right] \quad (3)$$

$$f_m^{(i)} = \frac{v}{\lambda} \sqrt{n_o^2 + n_d^2 - 2n_o n_d \cos[\theta_d - \theta_i^{(i)}]} \quad (4)$$

式中,  $f_m^{(i)}$  表示在一定的离轴角下超声波极值频率。

计算过程中还需求得不同离轴角时的超声波波速。通过求解  $xO-z$  平面及  $yO-z$  平面内的克里斯托夫方程,分别得到离轴角从  $0 \sim 2\pi$  范围内声速倒速度曲线,如图 3 和图 4 所示。

图 3 和图 4 中的曲线 1 为超声纵波倒速度曲线,曲线 2 为超声快切变波倒速度曲线,曲线 3 为超声慢

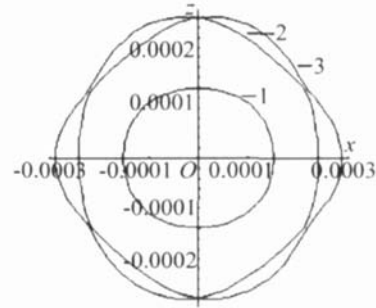


Fig 3 Reciprocal velocity curves in  $xO-z$  plane

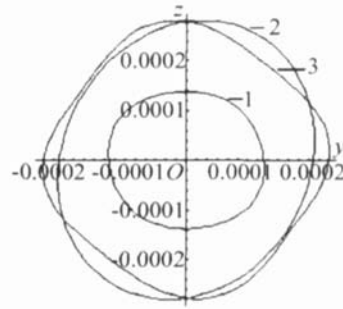


Fig 4 Reciprocal velocity curves in  $yO-z$  plane

切变波倒速度曲线。通常只有切变波才能引起反常声光相互作用<sup>[9]</sup>,因此,分别选取图 3 和图 4 中的超声切变波进行相关计算。

## 2 最优化工作模式的确定

声光优值是用来衡量不同晶体的不同声光相互作用模式之间声光衍射性能好坏的参数,通过比较相同离轴角时不同工作模式情况下声光优值的大小来确定最优化工作模式。声光优值计算公式为<sup>[10]</sup>:

$$M_2 = n_i^3 n_d^3 p_{eff}^2 / v^3 \rho \quad (5)$$

式中,  $n_i$  为入射光折射率,  $n_d$  为衍射光折射率,  $\rho$  为铌酸锂晶体密度,  $v$  为超声波波速。  $p_{eff}$  为有效声光系数。由于入射光为  $o$  光,  $n_i = n_o$ , 衍射光为  $e$  光,  $n_d$  可由  $e$  光折射率曲面方程求得:

$$p_{eff} = p_{ijk} a_i a_j a_k a_l \quad (6)$$

$p_{ijk}$  为铌酸锂晶体声光系数矩阵,  $a_i$  为入射光偏振方向的方向余弦;  $a_j$  为衍射光偏振方向的方向余弦;  $a_k$  为超声波传播方向的方向余弦;  $a_l$  为超声波偏振方向的方向余弦。

对于  $xO-z$  平面内的反常声光相互作用,切变波 2 和切变波 3 在  $(0, 2\pi)$  范围内都有:  $a_i = (0, 1, 0)$ ,  $a_j = (\cos\theta_d, 0, -\sin\theta_d)$ ,  $a_k = (\cos\theta, 0, -\sin\theta)$ ,  $a_l$  无法写出其在  $(0, 2\pi)$  范围内的解析表达式,只能通过数值法计算。

$yO-z$  平面的情况略有不同,通过类似讨论可得:  $a_i = (1, 0, 0)$ ,  $a_j = (0, \cos\theta_d, -\sin\theta_d)$ ,  $a_k = (0, \cos\theta, -\sin\theta)$ 。对于切变波 2,  $a_l$  在  $(0, 2\pi)$  范围内有  $a_l = (1, 0, 0)$ ;对于切变波 3,  $a_l$  不能写出其在  $(0, 2\pi)$  范围内解析表达式,只能通过数值法计算。

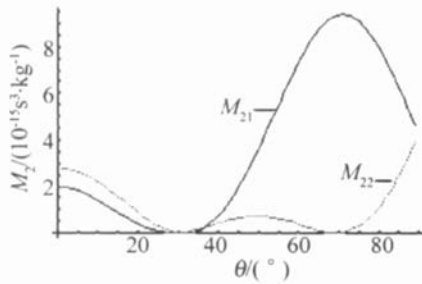


Fig 5 Acousto-optic merit curves of fast sheared ultrasonic wave and slow sheared ultrasonic wave in  $x$ - $O$ - $z$  plane

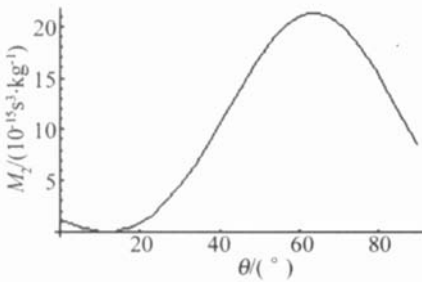


Fig 6 Acousto-optic merit curves of sheared ultrasonic wave in  $y$ - $O$ - $z$  plane

按照上面的计算方法,系统地得到了  $x$ - $O$ - $z$  平面内以及  $y$ - $O$ - $z$  平面内声光优值随离轴角变化曲线,通过计算可知,图 4 中的切变波 3 在  $(0, 2\pi)$  范围内有效声光系数均为 0,亦即该切变波不能引起反常声光效应,没有实际应用价值,因此,  $y$ - $O$ - $z$  平面仅对超声波切变波 2 予以讨论。所得结果如图 5 和图 6 所示。

图 5 中  $M_{21}$  表示慢切变波声光优值,  $M_{22}$  表示快切变波声光优值。考察图 5 和图 6 可知,在离轴角较小的情况下,  $x$ - $O$ - $z$  平面内快切变波具有最大的声光优值,因此,采用  $x$ - $O$ - $z$  平面内超声快切变有利于提高衍射效率。因此沿  $y$  轴加电场,超声快切变沿着  $x$  轴附近传播,光沿着  $z$  轴附近传播的工作模式为铌酸锂声电光器件的最优化工作模式。

实际设计声电光器件时是根据中心频率来确定相关的设计参数。结合 (1) 式 ~ (5) 式,通过 3 次样条插值和数据拟合,表 1 中给出了利用  $x$ - $O$ - $z$  平面内快切变波时铌酸锂声电光器件的设计参数。考虑到器件制

Table 1 Design parameters of lithium niobate AEO modulator

frequency /MHz	+1 order				-1 order			
	$\theta / (^\circ)$	$\theta_i / (^\circ)$	$\theta_d / (^\circ)$	$M_2 / (10^{-15} \text{ s}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$	$\theta / (^\circ)$	$\theta_i / (^\circ)$	$\theta_d / (^\circ)$	$M_2 / (10^{-15} \text{ s}^3 \cdot \text{kg}^{-1})$
50	0.95	0.69	0.88	2.766	0.54	0.69	0.50	2.770
100	1.91	1.38	1.76	2.749	1.08	1.38	0.99	2.764
150	2.86	2.06	2.64	2.720	1.62	2.07	1.49	2.754
200	3.82	2.76	3.52	2.680	2.15	2.74	1.98	2.742
250	4.77	3.44	4.40	2.631	2.69	3.44	2.48	2.726
300	5.73	4.14	5.29	2.570	3.23	4.13	2.98	2.706

作工艺的限制,表中仅列出了中心频率范围为 50MHz~300MHz 范围内的设计参数。其中,  $\theta$  表示超声波离轴角,  $M_2$  为声光优值,其单位为  $10^{-15} \text{ s}^3 / \text{kg}$ 。

### 3 结论

在确定铌酸锂声电光调制器的电光工作模式后,通过系统的计算不同声光互作用平面下声光优值随离轴角的变化曲线,确定了铌酸锂声电光调制器最优化声电光工作模式。最后给出了该工作模式下中心频率在 50MHz~300MHz 范围内的器件设计参数。这些讨论和计算结果为铌酸锂声电光调制器的设计提供了参考依据。

### 参考文献

- [1] HE Sh Zh, YAO X, JIANG Ch Zh. Study on demodulation system of laser Doppler [J]. Laser Technology, 2004, 28 (2): 190 ~ 192 (in Chinese).
- [2] YAO J H, YAN B X, CHEN Y H. Periodical poled second harmonic green light generation in near-stoichiometric MgO-doped LNbO<sub>3</sub> crystal [J]. Laser Technology, 2004, 28 (2): 141 ~ 143 (in Chinese).
- [3] WEIS R S. Lithium niobate: summary of physical properties and crystal structure [J]. Appl Phys, 1985, A37 (3): 191 ~ 201.
- [4] PSALTIS D. Acousto-electro-optic light modulation [J]. A P L, 1985, 46 (3): 215 ~ 2193.
- [5] LEE H. Acousto-electro-optic deflector [J]. A P L, 1986, 49 (1): 24 ~ 28.
- [6] YU K X, ZHAO Q D, HE Sh Y. Acousto-electro-optic effect and acousto-electro-optic device [J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17 (2): 253 ~ 256 (in Chinese).
- [7] YU K X, SHIX J, ZHAO B S. Study of acousto-optic diffraction geometry in TeO<sub>2</sub> crystal by tangent condition [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2002, 28 (2): 211 ~ 215 (in Chinese).
- [8] YU K X, LIU Ch Sh, ZHANG D H. Anisotropic acousto-optic interaction geometries in lithium niobate crystals [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 1996, 11 (2): 123 ~ 126 (in Chinese).
- [9] YU K X, ZHAO B S, HE Sh Y. Determination of optimum operating mode for three-dimensional anisotropic acousto-electro-optic interaction [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2003, 25 (1): 11 ~ 14 (in Chinese).
- [10] XU J P. Principle, design and application of acousto-optic device [M]. Beijing: Science Press, 1982. 65 ~ 66 (in Chinese).