

KDP 二维声电光相互作用最佳工作模式的确定 *

俞宽新 赵启大 何士雅 田建军

(北京工业大学应用物理系 北京 100022)

1997年9月18日收到

摘要 在计算 KDP 晶体的反常声电光相互作用几何关系的基础上, 确定了晶体中二维反常声电光相互作用的最佳工作模式。

关键词 KDP, 二维, 声电光相互作用, 最佳工作模式

Determination of optimum operating mode for two-dimensional acousto-electro-optic interaction in KDP

Yu Kuanxin Zhao Qida He Shiya Tian Jianjun

(Department of Applied Physics, Beijing Polytechnic University, Beijing 100022)

Abstract Based on calculations to the geometric relations of anisotropic acousto-electro-optic (AEO) interactions in KDP crystal, an optimum operating mode for two-dimensional AEO interaction is determined.

Key words KDP, Two-dimension, Acousto-electro-optic interaction, Optimum operating mode

1 引言

声电光器件同时使用声光效应和电光效应, 电光效应用来调制激光强度, 声光效应用来偏转激光传播方向, 这样就可以将分立的偏转器和调制器合成一个器件^[1-4]。一维声电光器件只有一个声光相互作用通道, 它可以同时实现激光的强度调制与一维偏转。二维声电光器件则有两个互相垂直的声光相互作用通道, 它可以同时实现激光的强度调制与二维偏转。为了实现有效的声电光效应, 其中的声光效应必须

是反常声光效应。一维声电光器件中, 在与光传播垂直的两个方向上, 一个用于横向电光效应, 另一个用于反常声光效应。铌酸锂(LN)晶体既可实现横向电光效应, 又可实现反常声光效应, 成为制作一维声电光器件的最佳晶体。在二维声电光器件中, 两个与光传播垂直的方向都被用于反常声光效应, 故电光效应只能是纵向的。LN不能实现纵向电光效应, 也就不能用于制作二维声电光器件了。其他传统声光晶体如熔石英、重火石玻璃、钼酸铅、氧化碲

* 国家自然科学基金资助项目

等虽具有较高的声光系数, 但无电光效应, 也无法用来制作声电光器件。在既可实现纵向电光效应, 又具有声光效应的晶体中, KDP 晶体是最佳选择。由于过去它仅用于制作电光器件, 对它的反常声光互作用几何关系以及如何选择最佳声电光工作模式都从未研究过。本文在计算 KDP 晶体的反常声电光互作用几何关系的基础上, 研究它的二维反常声电光互作用的最佳工作模式, 为二维声电光器件的设计、制作打下基础。

2 最佳工作模式的选择

二维声电光器件中引起纵向电光效应所需要的电场与光传播方向一致, 引起反常声光效应需要的超声波在与光传播垂直的两个方向上。二维声电光互作用最佳工作模式的选择原则有 3 个: (1) 纵向电光效应所使用的电光系数尽量大, 这样可以降低半波电压。按照此原则, 来决定晶体的电光互作用方向, 也就是通光方向和外加电场的方向。(2) 两个反常声光互作用的各种几何参数, 如声波矢的方向、光波矢的入射角、偏转角等, 以及性能参数如衍射效率、布拉格带宽等, 必须一致, 以保持二维偏转的平衡, 并尽量提高衍射效率。根据本原则, 来决定两个声光互作用的平面。(3) 布拉格带宽尽量大, 以提高二维偏转的范围。由这个原则, 来决定超声波矢的传播方向。下边我们就按这三个原则来讨论 KDP 二维声电光互作用的最佳工作模式。

2.1 电光互作用方向的确定

KDP 为四方晶系的 $\bar{4}2m$ 晶类, 其电光系数矩阵的形式为 [5]

$$\gamma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \gamma_{41} & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_{41} & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_{63} \end{bmatrix} \quad (1)$$

不难看出, 单独沿 X、Y、Z 三个方向加应用声学

直流电场, 都可以实现纵向电光效应, 其中沿 X、Y 方向的纵向电光效应使用相同电光系数 γ_{41} , 沿 Z 方向使用 γ_{63} 。按文献 [6] 的数据, $\gamma_{41} = 8.77 \times 10^{-12} \text{m/V}$, $\gamma_{63} = 10.3 \times 10^{-12} \text{m/V}$, 显然沿 Z 轴方向的纵向电光效应最强, 将此方向作为电光互作用方向是最佳选择。

2.2 声光互作用平面的确定

电光互作用方向选 Z 方向, 决定了通光方向也必须是 Z 方向, 因此两个互相垂直的声光互作用平面都必须包含 Z 轴。由晶体声学知, 对于四方晶系的晶体来说, 在 XOZ 面即 [010] 面与 YOZ 面即 [100] 面内, 超声波倒速度曲线是一样的。同理, 在由 Z 轴和 [110] 方向决定的平面即 $\bar{1}10$ 面与由 Z 轴和 $\bar{1}\bar{1}0$ 方向决定的平面即 [110] 面内, 超声波倒速度曲线也是一样的 [7]。由晶体光学知, 四方晶系中晶体的折射率椭球是以 Z 为旋转轴的旋转椭球, 故上述这四个平面内的折射率曲线完全一样。按上面的分析可以得出结论, 这两个声光互作用的平面有两种不同的选择方法, 其一是 [010] 和 [100] 面, 另一是 [110] 和 $\bar{1}\bar{1}0$ 面。这二种选择方式中哪一个更好些, 就需要考虑能反映声光互作用模式好坏的参数——声光优值了。按声光理论, 声光优值的定义是 [8]

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

式中 n_i, n_d 分别为入射光和衍射光的折射率, ρ 为晶体密度, v 为声速, p_{eff} 为有效声光系数, 其大小为

$$p_{eff} = p_{ijkl} a_i a_j a_k a_l \quad (3)$$

a_i, a_j, a_k, a_l 分别为入射光偏振、衍射光偏振、超声传播、超声偏振四个方向的方向余弦。无论上述二种选择方法中选择哪一种, 光传播方向都是在 Z 轴附近, 因此入射光和衍射光的折射率相差不大, 近似等于 o 光折射率 n_o 。这样, 声光互作用平面的两种选择方法的取舍, 便在于声速和有效声光系数两个因素上了。选择原则为声速尽量小、有效声光系数尽

量大。

首先,我们来考虑声速的影响。为此,通过求解晶体声学的 Christoffel 方程,可得到 XOY 平面内的三个超声波模式的倒速度曲线如图 1 所示。

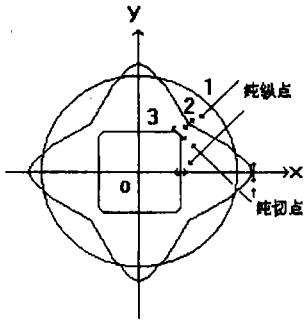


图 1 KDP 晶体 XOY 面倒速度曲线

图中圆形曲线“1”为纯切变波,无论超声波矢传播方向如何,其偏振方向总是垂直于 XOY 平面,与传播方向垂直,声速为 $v_1 = \sqrt{c_{44}/\rho}$ 。四角形曲线“2”和四方形曲线“3”都是准波,这二个模式的偏振方向都平行于 XOY 面,而与传播方向一般说来既不平行也不垂直。只有当波矢沿 [100]、[010]、[110]、 $[\bar{1}10]$ 这四个方向时,偏振方向与传播方向才严格平行或垂直,这些点称为纯纵点或纯切点。其中曲线“2”沿 [100] 和 [010] 方向为纯切点,声速为 $v_2 = \sqrt{c_{66}/\rho}$,沿 [110] 和 $[\bar{1}10]$ 方向为纯纵点,声速为 $v'_2 = \sqrt{(c_{11} - c_{12})/2\rho}$ 。相反,曲线“3”沿 [110] 和 $[\bar{1}10]$ 方向为纯切点,声速为 $v_3 = \sqrt{(c_{11} + c_{12} + 2c_{66})/\rho}$,沿 [100] 和 [010] 方向为纯纵,声速为 $v'_3 = \sqrt{c_{11}/\rho}$ (见图 1)。由于反常声光效应一般是由切变波引起的,因此在这里我们只需要考虑纯切变波的声速大小即可。由文献 [7] 数据, $c_{11} = 7.85 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, $c_{12} = 3.2 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, $c_{44} = 1.23 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, $c_{66} = 0.61 \times 10^{10} \text{N/m}^2$, $\rho = 2.328 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, 可以算出,曲线“2”沿 [100] 和 [010] 方向的声速最小。因此考虑声速的影响,声光相互作用平面的最佳选择为 [100] 和 [010] 面,并且选择传播方向分别沿 Y 和 X、偏振方向分别沿 X 和 Y 的

纯切变波。

其次,考虑有效声光系数的影响。先计算面 [100] 和 [010] 面的反常声光相互作用的有效声光系数。由于这二个面内的声光相互作用几何关系完全一样,故有效声光系数的计算方法及结果也是一样的,我们以 [100] 面为例进行计算。为了提高反常声光相互作用的布拉格带宽,入射光取 o 光(见后面),衍射光为 e 光,故二光的偏振方向的方向余弦分别为 (1,0,0) 和 (0,1,0),超声波传播方向与偏振方向的方向余弦分别为 (0,1,0) 与 (1,0,0)。由 (3) 式可推算出有效声光系数为 p_{1221} ,采用简化下标后,即为 p_{66} 。再计算 [110] 和 $[\bar{1}10]$ 面的有效声光系数,为此,对声光系数矩阵 p 进行坐标变换,以 Z 为轴,逆时针旋转 $\pi/4$ 后,得到新的声光系数矩阵 p' ,按照计算 [100] 和 [010] 面的有效声光系数的方法,可得出 [110] 和 $[\bar{1}10]$ 面的有效声光系数为 p'_{66} 。再由坐标变换的运算规则,有 $p'_{66} = \frac{1}{2}(p_{11} - p_{12})$ 。根据文献 [6] 的数据 $p_{11} = 0.287$, $p_{12} = 0.282$, $p_{66} = 0.064$,可知 $p'_{66} < p_{66}$ 。这说明,选择 [100]、[010] 面作为声光相互作用平面要优于 [110]、 $[\bar{1}10]$ 面。综上所述,无论是从声速的角度,还是从有效声光系数的角度来考虑,都是选择 [100] 面和 [010] 面作为声光相互作用平面最佳。

2.3 超声波矢传播方向的确定

以上讨论中我们一直假设光波矢沿 Z 轴,声波矢沿 X 或 Y 轴。实际器件在工作时,衍射光会偏转一小角度,入射光与衍射光波矢并不严格沿 Z 方向,而是在 Z 轴附近,声波矢与 X 或 Y 轴之间也有一离轴角。为了提高衍射效率,反常声光相互作用的入射光波矢、衍射光波矢、声波矢之间要满足动量匹配条件,此条件是指这三个波矢应满足关系式

$$\vec{k}_d = \vec{k}_i \pm \vec{K} \quad (4)$$

\vec{k}_i 、 \vec{k}_d 分别为入射光、衍射光波矢, \vec{K} 为声波矢,“+”号对应于 +1 级衍射,“-”号对应于 -1 级衍射。另外,为了提高布拉格带宽,入射光波矢、衍射光波矢、声波矢还需要满足

所谓频率相切条件，它是指在器件的中心频率处，声波矢与折射率曲面的内曲面要相切。图2画出了KDP晶体XOZ面内的声光相互作用几何关系(YOZ面内的声光相互作用几何关系完全相同)，并反映出了上述这二个条件。KDP为负单轴晶体，它的折射率曲面的外曲面为o光，内曲面为e光，沿Z轴无旋光性，两曲面在Z方向上相切。频率相切条件还要求入射光折射率曲面为外曲面，衍射光为内曲面。对KDP来说，入射光就是o光。衍射光为e光。

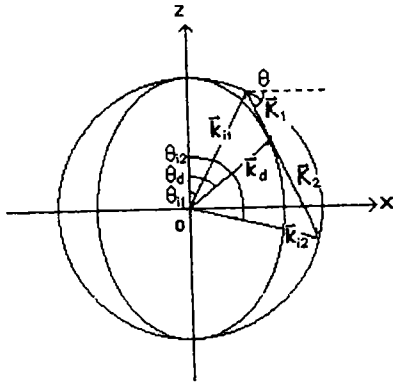


图2 KDP晶体XOZ面内的声光相互作用几何关系

图2中的 ϑ 角为声波矢与X正方向的夹角，称离轴角。给定 ϑ 后，可以得到二个声波

矢 \vec{k}_1 和 \vec{k}_2 ，对应於二个声频率 f_1 和 f_2 ；二个入射光波矢 \vec{k}_{i1} 和 \vec{k}_{i2} ，对应於二个入射角 ϑ_{i1} 和 ϑ_{i2} ；一个衍射光波矢 \vec{k}_d ，对应於一个衍射角 ϑ_d 。入射角和衍射角分别为入射光和衍射光波矢与Z轴正方向之间的夹角。上述字母中的下标“1”代表+1级衍射，“2”代表-1级衍射。从图中可以看出，当 $\vartheta=0$ 时， \vec{k}_1 、 \vec{k}_2 和相应的 f_1 、 f_2 以及 ϑ_{i1} 、 ϑ_{i2} 、 ϑ_d 都为零。当 ϑ 逐渐增大时，这些声波矢、声频率、及入射角、衍射角等参数也都随之而增大，使得衍射光折射率、声速、有效声光系数也随之而变，导致声光优值发生变化。我们计算了离轴角 ϑ 从 $0^\circ-10^\circ$ 范围内变化时，这些参数变化的情况，如表1所示。所用激光为He-Ne激光($0.6328\mu\text{m}$)，KDP折射率为 $n_o=1.50737$ 、 $n_e=1.46685^{[6]}$ 。表中 ϑ_d 、 M_2 与衍射级次无关， $\Delta\vartheta_1$ 和 $\Delta\vartheta_2$ 分别为+1级和-1级衍射的偏转角，即衍射角和入射角之差。从表中可以看出，离轴角越大，入射角、衍射角、声频率和偏转角也越大，而声光优值则越小。+1级衍射与-1级衍射相比较，在相同离轴角的条件下，-1级衍射的入射角、声频率、偏转角都大於+1级衍射。

表1 KDP晶体XOZ面声光相互作用几何参数

离轴角 $\vartheta(^{\circ})$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
入射角 $\vartheta_{i1}(^{\circ})$	0.77	1.54	2.31	3.08	3.85	4.62	5.39	6.16	6.94	7.71
超声频率 $f_1(\text{MHz})$	11.93	23.82	35.76	47.74	59.74	71.80	83.93	96.12	108.39	120.75
偏转角 $\vartheta_1(^{\circ})$	0.18	0.35	0.53	0.71	0.89	1.06	1.24	1.42	1.59	1.77
入射角 $\vartheta_{i2}(^{\circ})$	1.23	2.46	3.69	4.92	6.15	7.38	8.61	9.84	11.06	12.29
超声频率 $f_2(\text{MHz})$	19.06	38.07	57.13	76.22	95.32	114.48	133.69	152.96	172.28	191.67
偏转角 $\vartheta_2(^{\circ})$	0.28	0.57	0.85	1.13	1.41	1.70	1.98	2.26	2.53	2.81
衍射角 $\vartheta_d(^{\circ})$	0.95	1.89	2.84	3.79	4.74	5.68	6.63	7.58	8.53	9.48
声光优值 M_2 ($\times 10^{-15} \text{s}^3/\text{kg}$)	4.859	4.837	4.807	4.769	4.723	4.669	4.607	4.539	4.464	4.384

3 结论

KDP晶体的声电光相互作用工作模式的最佳选择为：电光相互作用沿光轴Z方向，两个声光相互作用平面分别取[100](即YOZ)面、[010](即

应用声学

XOZ)面，超声波矢的离轴角和衍射级次的选择则由设计要求及工艺条件来决定。设计器件时，一般总是首先给定器件的中心频率。由给定的中心频率，可以有两个不同离轴角的选择，

分别对应于 +1 级和 -1 级衍射工作状态。使用 +1 级衍射工作状态，离轴角大些，优点是偏转角也大些，但声光优值则小些。反之，使用 -1 级衍射工作状态，离轴角小些，优点是声光优值大些，而偏转角则小些。到底采用哪一种工作状态，由器件用途对衍射效率和偏转角的要求来综合考虑。

参 考 文 献

1 Psaltis D, Lee H, Sirat G. *Appl.Phys.Lett.*, 1985,46(3): 215-217.
2 Lee H. *Appl.Phys.Lett.*, 1986, 49(1): 24-25.

3 俞宽新, 赵启大, 何士雅等. *光学学报*, 1997, 17(2): 253-256.
4 俞宽新, 何士雅, 赵启大等. *应用声学*, 1996, 15(6): 7-10.
5 董孝义. *光波电子学*. 天津: 南开大学出版社, 1987, 312-323.
6 陈纲, 廖里几. *晶体物理学基础*. 北京: 科学出版社, 1992, 367, 435, 447.
7 B A 奥尔特著, 孙承平译. *固体中的声场和波*. 北京: 科学出版社, 1982, 362, 387.
8 徐介平. *声光器件的原理、设计和应用*. 北京: 科学出版社, 1982, 65.

第十六届国际声学大会

1998 年 6 月 20-26 日, 第十六届国际声学大会 (ICA) 与美国声学学会第 135 届年会在美国西雅图联合举行。有来自 49 个国家、近二千名代表出席, 论文报告 1500 余篇, 是历史上最大一次声学界聚会。据不完全统计, 我国出席人数不下五十有余, 包括来自港、台和旅外学者。论文分布在十三个分支学科: 物理声学、建筑声学、噪声、结构声学和振动、工程声学、音乐声学、动物生理学、海洋声学; 水声学、声学中的信号处理、振动生理响应及医学超声、心理和生理声学。

ICA 是在国际声学委员会 (国际理论和应用物理联合会 IUPAP 的下属组织, 我国中科院张仁和院士为本届委员, 马大猷院士为上届委员) 主持下举行的, 每三年一次, 下届大会将于 2001 年 9 月 2-7 日在罗马举行。

本届年会的论文集首次发行 CD 光盘, 集 3000 余页四厚册于一薄片, 与会代表人手一片, 携带和储藏方便。会议期间则辟专用计算机房供大家查阅之用。由于论文众多, 分别在十八个分组会同时进行, 会场分设在相近的两座旅馆之中。大会安排了十六个特邀报告, 分别由国际著名学者作专题讲演, 从这些论文中可一窥各分支学科中的若干前沿或热点问题。会议期间还召开了各专业委员会会议, 讨论和交流有关专业

活动、标准、教育等问题。考虑到时间紧凑, 有几次活动只能安排在中午和晚间。大会还举行多用途剧场声学设计 (音质和噪声控制) 学生作业展览和评选, 最后评出一等奖一名, 二等奖两名, 并颁发奖金。会议期间美国声学学会还举行了对声学事业有杰出贡献的四名会员授奖, 该学会现拥有七千余会员, 举各国之首。

大会特邀报告的专题为: 1. 语言信息处理的未来发展方向 (日); 2. 海洋边界层的声学研究 (美); 3. 声音通过吊平项的传递 (德); 4. 声学处理中的自适应波形分析 (美); 5. 无伤超声外科 (英); 6. 户外地面的声学性能 (英); 7. 电-机换能器发展趋向 (美); 8. 末梢听觉系统中复合波的描述 (美); 9. 听者如何找到恰当的用词 (荷); 10. 海洋声学中的随机效应—理论和实验进展 (英); 11. 海洋哺乳动物的耳朵: 水下听力的解剖学展望 (美); 12. 物理声学和结构声学的模糊而简易分析模型 (美); 13. 耳蜗听力受损的生理声学分析和助听器设计 (英); 14. 复杂结构声学系统的低频和中频模型模拟趋向 (法); 15. 两相流体和声纳发光的声学问题 (俄); 16. 乐器声的非线性和复杂 (澳)

(同济大学 王季卿)