

# 周期性极化铌酸锂波导全光开关特性分析\*

薛挺于建 杨天新 倪文俊 李世忱

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

(2001 年 10 月 17 日收到, 2001 年 12 月 16 日收到修改稿)

从理论方面研究了基于和频与差频级联二阶非线性效应的周期性极化铌酸锂波导全光开关的特性, 给出了耦合模方程在满足相位匹配条件下小信号近似的解析表达式, 用数值方法求解耦合模方程, 讨论了相位失配情况下输出的信号光功率与控制光功率的关系, 分析了全光开关器件的极化反转光栅周期、晶体温度、控制光波长等参量的容差特性与相互作用长度和晶体温度的关系.

关键词: 级联二阶非线性, 光开关, 准相位匹配, 周期性极化铌酸锂

PACC: 4265, 4265K, 4280L, 4280S

## 1. 引 言

高速全光开关是光通信系统中关键器件, 它可用于备份光源的光路切换, 以及用于逻辑、数字系统中的光路选择和光交换. 由于基于准相位匹配和频与差频级联二阶非线性效应的全光开关不仅具有全光透明特性, 而且具有速度快, 噪声低, 无啁啾, 所需控制光功率小, 并保持着互作用光波的强度和相位信息等优点, 因此倍受瞩目<sup>[1-5]</sup>. 近年来, 由于铌酸锂晶体具有大的非线性系数, 光波导制作工艺成熟, 特别是外加电场周期性极化铌酸锂(PPLN)的迅速发展, 用其实现的全光开关受到极大关注<sup>[1-3]</sup>.

Kanbara 等人<sup>[1]</sup>于 1999 年报道了在周期性极化铌酸锂钛扩散光波导中利用级联二阶非线性效应实现了光控全光开关, 控制光波长为  $1.319\mu\text{m}$ , 信号光波长为  $1.536\mu\text{m}$ , 极化反转光栅周期为  $15.5\mu\text{m}$ , 相互作用长度为  $10\text{mm}$ , 当控制光功率为  $20\text{W}$  时获得 12% 的开关比. Fejer 等人<sup>[2]</sup>于 2000 年报道了在周期性极化铌酸锂退火质子交换(annealed proton exchanged, APE)光波导中利用级联二阶非线性效应实现了低控制功率全光开关, 控制光波长为  $1.537\mu\text{m}$ , 信号光波长为  $1.552\mu\text{m}$ , 极化反转光栅周期为  $14.7\mu\text{m}$ , 相互作用长度为  $55.5\text{mm}$ , 当控制光功率为  $185\text{mW}$  时, 获得 96% 的开关比. 由此, 这种光开关在将来的全光网络中具有值得重视的应用前景.

本文分析了基于级联二阶非线性效应全光开关的耦合模方程, 给出了方程在满足相位匹配条件时小信号近似的解析解. 在用标量有限单元法分析铌酸锂退火质子交换光波导的模折射率与模场分布的基础上, 给出了满足相位匹配条件时的输出信号光功率、和频光功率在小信号近似下与控制光功率的关系曲线, 以及二者与相互作用长度的关系曲线. 用数值方法分析了相位失配情况下的全光开关特性, 给出了由于控制光波长、晶体温度或光栅周期等参量变化引起的相位失配对输出的信号光功率的影响, 并给出了信号光功率与控制光功率的关系曲线. 分析了这种全光开关对于控制光波长、晶体温度以及极化反转光栅周期等参量的容差特性, 给出了关系曲线.

## 2. 理论分析

周期性极化铌酸锂光波导中基于和频与差频级联二阶非线性效应的全光开关示意图如图 1 所示. 在  $z$ -切铌酸锂晶体上用外加电场极化方法制作畴反转光栅, 然后制作退火质子交换光波导, 信号光  $\omega_{\text{signal}}$  与控制光  $\omega_{\text{gate}}$  同时从光波导一端耦入, 其机理在于: 当信号光  $\omega_{\text{signal}}$  与控制光  $\omega_{\text{gate}}$  满足和频相位匹配条件时, 二者首先发生和频互作用(sum-frequency-generation, SFG)而产生和频光  $\omega_{\text{SFG}}$ , 然后和频光  $\omega_{\text{SFG}}$  又与信号光发生差频(differential-frequency-

\* 天津市自然科学基金(批准号 99380071)资助的课题.

generation,DFG)相互作用而产生控制光  $\omega_{gate}$  接着控制光  $\omega_{gate}$  再与信号光  $\omega_{signal}$  发生和频作用产生和频光  $\omega_{SFG}$  如此循环往复,若相互作用长度一定,则可以通过调节控制光的功率来控制信号光的有无,达到控制信号光开关的目的.

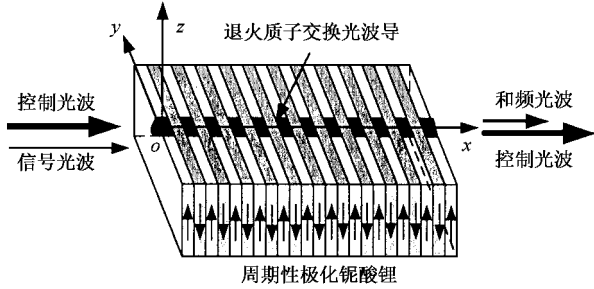


图 1 级联二阶非线性效应的全光开关示意图

慢变振幅近似条件下,基于和频与差频级联二阶非线性效应的耦合模方程可写为

$$\frac{dE_{gate}}{dz} = i\kappa_{gate} E_{signal}^* E_{SFG} \exp(-i\Delta kz) - \alpha_{gate} E_{gate} \quad (1)$$

$$\frac{dE_{signal}}{dz} = i\kappa_{signal} E_{gate}^* E_{SFG} \exp(-i\Delta kz) - \alpha_{signal} E_{signal} \quad (2)$$

$$\frac{dE_{SFG}}{dz} = i\kappa_{SFG} E_{signal} E_{gate} \exp(i\Delta kz) - \alpha_{SFG} E_{SFG} \quad (3)$$

其中耦合系数  $\kappa_i = \frac{\omega_i^2 d_{eff}}{k_i c^2} = \frac{\omega_i d_{eff}}{n_i c} = \frac{2\pi d_{eff}}{n_i \lambda_i}$ ,  $E_i$  为光场振幅,  $\alpha_i$  为传播损耗,  $d_{eff}$  为有效非线性系数,下标  $i = gate, signal, SFG$  分别为控制光、信号光与和频光.

由  $\omega_{SFG} = \omega_{signal} + \omega_{gate}$  可得和频光波长为  $\lambda_{SFG} = \frac{\lambda_{signal} \lambda_{gate}}{\lambda_{signal} + \lambda_{gate}}$  相位失配因子  $\Delta k = k_{SFG} - k_{gate} - k_{signal} - \frac{2\pi}{\Lambda_{SFG}}$  其中  $\Lambda_{SFG}$  为极化反转光栅周期,  $k_i = \frac{2\pi n_i}{\lambda_i}$  为

模传播常数,  $n_i$  为模折射率,  $\lambda_i$  为真空中的光波长.

铌酸锂进行质子交换之后,  $Li^+$  被  $H^+$  代替,因此质子交换部分的铌酸锂二阶非线性极化系数为零;另外,退火之后,铌酸锂光波导中的有效非线性极化系数将减小为  $d_{eff} = \frac{2}{\pi} d_{33}$ ,其中  $d_{33} = 27 \text{ pm/V}$  为铌酸锂晶体的二阶非线性系数.由于质子交换部分深度较浅,而且其中传播的导模光功率占整个光波导中光波总功率的比例较小,因此,光波导中的有效非线性系数可以近似用  $d_{eff}$  代替.此外,由于和频光波长约为控制光波长的  $1/2$ ,因此若光波导对控制光、信号光为单模波导,则对和频光为多模波导,但是因高阶模不满足相位匹配条件,因此可以忽略和频光高阶模的影响,仅仅考虑各光波零阶导模之间的相互作用.

小信号近似下,忽略控制光  $E_{gate}$ ,信号光  $E_{signal}$  与和频光  $E_{SFG}$  的传播损耗,即  $\alpha_i = 0$ ,设  $|E_{gate}(0)| \gg |E_{signal}(0)|$ ,  $|E_{gate}(z)| \gg |E_{SFG}(z)|$  并且忽略控制光的转换损失,即  $\frac{dE_{gate}}{dz} = 0$  或  $E_{gate}(z) = E_{gate}(0)$ ,因此耦合模方程仅剩(2)和(3)两式.求解此联立方程组,可得

$$E_{signal}(L) = E_{signal}(0) \cos(gL) \exp\left(-\frac{i}{2} \Delta k L\right) \quad (4)$$

$$E_{SFG}(L) = i \frac{\kappa_{SFG}}{g} E_{gate}(0) E_{signal}(0) \times \sin(gL) \exp\left(\frac{i}{2} \Delta k L\right) \quad (5)$$

其中  $g = \sqrt{\Gamma^2 + \left(\frac{\Delta k}{2}\right)^2}$ ,  $\Gamma^2 = \kappa_{signal} \kappa_{SFG} |E_{gate}|^2$ ,  $L$  为相互作用长度.

控制光功率  $P_{gate} = \frac{1}{2} n_{gate} c \epsilon_0 |E_{gate}|^2 A_{eff}$ ,  $A_{eff}$  为控制光、信号光与和频光的有效相互作用面积:

$$A_{eff} = \frac{\left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi_{gate}(z, y)|^2 dz dy \right] \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi_{signal}(z, y)|^2 dz dy \right] \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi_{SFG}(z, y)|^2 dz dy \right]}{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{SFG}^*(z, y) \psi_{signal}(z, y) \psi_{gate}(z, y) dz dy \right|^2} \quad (6)$$

其中  $\psi_j$  为归一化光场振幅,  $j = gate, signal, SFG$ ,

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi_j \psi_j^* dz dy = 1.$$

在光波导中,  $A_{eff}$  为几十平方微米量级,因此控制光、信号光与和频光的功率密度很大,当相互作用长度  $L$  较长时,达到信号光完全关断状态所需的控

制光功率理论上可以降低到数百甚至数十毫瓦量级,Fejer 等人<sup>[2]</sup>所达到的最小控制光功率为 185mW.

由(4)和(5)式,可得:

$$P_{\text{signal}}(L) = P_{\text{signal}}(0) \cos^2(gL), \quad (7)$$

$$P_{\text{SFG}}(L) = \left( \frac{\kappa_{\text{SFG}}}{g} \right)^2 \frac{2n_{\text{SFG}}}{n_{\text{gate}} n_{\text{signal}} c \epsilon_0 A_{\text{eff}}} \times P_{\text{gate}}(0) P_{\text{signal}}(0) \sin^2(gL). \quad (8)$$

当满足相位匹配条件时,有  $\Delta k = 0$ , 此时  $g = \Gamma$ , 因此(4)和(5)式可写为

$$E_{\text{signal}}(L) = E_{\text{signal}}(0) \cos(\Gamma L), \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E_{\text{SFG}} &= i \sqrt{\frac{\kappa_{\text{SFG}}}{\kappa_{\text{signal}}}} E_{\text{signal}}(0) \sin(\Gamma L) \\ &= i \sqrt{\frac{\lambda_{\text{signal}}}{\lambda_{\text{SFG}}}} E_{\text{signal}}(0) \sin(\Gamma L), \quad (10) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \Gamma &= \sqrt{\kappa_{\text{signal}} \kappa_{\text{SFG}}} |E_{\text{gate}}| \\ &= \frac{2\sqrt{2}\pi d_{\text{eff}} L}{n_{\text{gate}} n_{\text{signal}} n_{\text{SFG}} \lambda_{\text{signal}} \lambda_{\text{SFG}} c \epsilon_0 A_{\text{eff}}} \sqrt{P_{\text{gate}}}, \end{aligned}$$

因此

$$P_{\text{signal}}(L) = P_{\text{signal}}(0) \cos^2(\Gamma L), \quad (11)$$

$$P_{\text{SFG}}(L) = \left( \frac{\lambda_{\text{signal}}}{\lambda_{\text{SFG}}} \right) P_{\text{signal}}(0) \sin^2(\Gamma L). \quad (12)$$

满足相位匹配条件下,当控制光功率  $P_{\text{gate}} = 0$  时有  $\Gamma L = 0$ ,  $P_{\text{signal}}(L) = P_{\text{signal}}(0)$ , 信号光为开通状态;当调节控制光功率  $P_{\text{gate}}$ , 使得相位匹配  $\Gamma L = \pi/2$  时,有  $P_{\text{signal}}(L) = 0$ , 信号光为关断状态,此时和频光  $\omega_{\text{SFG}}$  也达到最大值. 因此可通过调节控制光功率达到对信号光控制的目的.(7)和(8)式仅仅在满足相位匹配条件,即  $\Delta k = 0$  时成立,可化简为(11)和(12)式;当相位失配时,控制光与信号光不满足和频的相位匹配条件,小信号近似解法将会产生巨大误差,因此(7)和(8)式不再成立,此时必须用数值方法求解耦合模方程(1)–(3).

### 3. 相位匹配情况下的光开关特性

实验中既要考虑到光纤与铌酸锂退火质子交换光波导的耦合效率,又要考虑到控制光、信号光与和频光的重叠积分大小,即有效相互作用面积  $A_{\text{eff}}$  的大小,以提高全光开关的性能. 本文采用文献[6]中给出的标量有限单元法来分析铌酸锂退火质子交换光波导的模折射率与模场分布,并选择文献[7]中的

退火质子交换光波导制作参数,如表 1 所示,其余参数参见文献[6].

选择信号光波长  $\lambda_{\text{signal}} = 1.520\mu\text{m}$ , 控制光波长  $\lambda_{\text{gate}} = 1.550\mu\text{m}$ , 晶体温度为  $T = 27^\circ\text{C}$  时,采用标量有限元方法分析三种光波的模场分布与模折射率<sup>[6]</sup>, 计算得极化反转光栅周期  $\Lambda_{\text{SFG}} = 16.108\mu\text{m}$ , 有效相互作用面积  $A_{\text{eff}} = 45.0\mu\text{m}^2$ .

表 1 退火质子交换光波导制作参数

参数	数值
切向	z-切
质子交换源	苯甲酸
掩模版开口宽度 $w/\mu\text{m}$	10
交换温度 $T_e/^\circ\text{C}$	250
交换时间 $t_e/\text{h}$	0.5
退火温度 $T_a/^\circ\text{C}$	350
退火时间 $t_a/\text{h}$	2

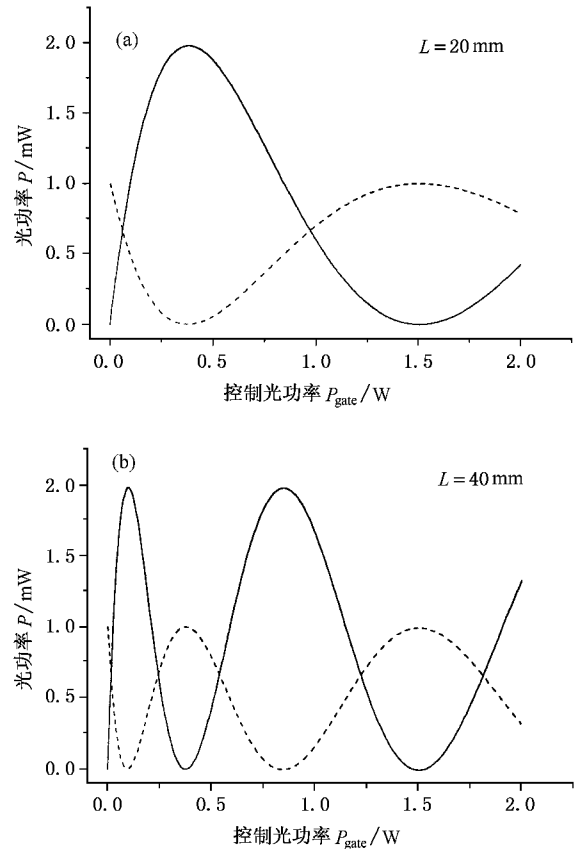


图 2 满足相位匹配条件时,对应不同相互作用长度  $L$ ,小信号近似法计算得信号光、和频光与控制光功率  $P_{\text{gate}}$  的关系 —— 为和频光, - - - 为信号光

在相位匹配情况下,信号光功率  $P_{\text{signal}} = 1\text{mW}$

(以下均同),相互作用长度  $L$  分别为 20 与 40mm 时,用小信号近似法计算得信号光、和频光与控制光功率的关系曲线,如图 2 所示.由图 2 可以看出:相互作用长度  $L$  越长,达到信号光关断所需的控制光功率  $P_{gate}$  越小;在控制光功率  $P_{gate}$  分别为 100,200 和 400mW 时,计算得信号光、和频光与相互作用长度  $L$  的关系曲线,如图 3 所示.由图 3 可知:控制光功率  $P_{gate}$  越大,达到信号光完全关断状态所需的相互作用长度  $L$  越短.

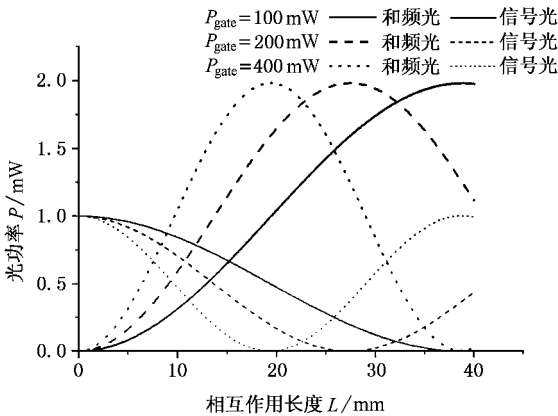


图 3 满足相位匹配条件时,对应不同控制光功率  $P_{gate}$ ,小信号近似法计算得输出信号光、和频光功率与相互作用长度  $L$  的关系

### 4. 相位失配情况下的光开关特性

相位失配时,控制光与信号光的和频条件得不到满足,导致信号光的输出功率增加,消光比降低.下面将在基于数值方法求解耦合模方程(1)–(3)的基础上,忽略各光波的传播损耗,讨论由于极化反转光栅周期  $\Lambda_{SFG}$  误差、晶体温度  $T$  漂移或控制光波长  $\lambda_{gate}$  偏移引起的相位失配情况下的全光开关特性.

#### 4.1. 由极化反转光栅周期 $\Lambda_{SFG}$ 引起的相位失配

晶体温度  $T = 27^\circ\text{C}$ ,控制光波长  $\lambda_{gate} = 1.550\mu\text{m}$ ,信号光波长  $\lambda_{signal} = 1.520\mu\text{m}$ ,相互作用长度  $L = 20\text{mm}$ ,当极化反转光栅周期  $\Lambda_{SFG}$  偏离中心值  $\Lambda_0 = 16.108\mu\text{m}$  分别为  $\Delta\Lambda_{SFG} = 3\text{nm}$  和  $\Delta\Lambda_{SFG} = 5\text{nm}$  时,对应输出信号光功率  $P_{signal}$  与控制光功率  $P_{gate}$  的关系如图 4(a)所示;相互作用长度  $L = 40\text{mm}$ ,当极化反转光栅周期  $\Lambda_{SFG}$  偏离中心值分别为  $\Delta\Lambda_{SFG} = 2\text{nm}$  和  $\Delta\Lambda_{SFG} = 4\text{nm}$  时,对应输出信号光功率  $P_{signal}$

与控制光功率  $P_{gate}$  的关系如图 4(b)所示.

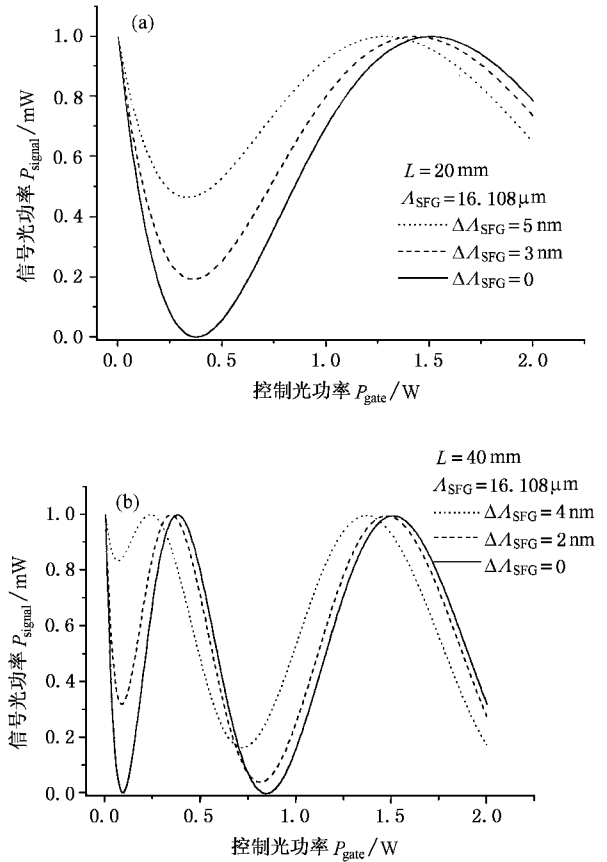


图 4 极化反转光栅周期  $\Lambda_{SFG}$  偏移中心值时,输出信号光功率  $P_{signal}$  与控制光功率  $P_{gate}$  的关系

#### 4.2. 由晶体温度 $T$ 漂移引起的相位失配

控制光波长  $\lambda_{gate} = 1.550\mu\text{m}$ ,信号光波长  $\lambda_{signal} = 1.520\mu\text{m}$ ,极化反转光栅周期  $\Lambda_{SFG} = 16.108\mu\text{m}$ ,考虑到热膨胀引起光栅周期  $\Lambda_{SFG}$  的变化,相互作用长度  $L = 20\text{mm}$ ,当晶体温度  $T$  偏离中心值  $T_0 = 27^\circ\text{C}$  分别为  $\Delta T = 2^\circ\text{C}$  和  $\Delta T = 3^\circ\text{C}$  时,对应输出信号光功率  $P_{signal}$  与控制光功率  $P_{gate}$  的关系如图 5(a)所示;相互作用长度  $L = 40\text{mm}$ ,当晶体温度  $T$  偏离中心值  $T_0$  分别为  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  和  $\Delta T = 2^\circ\text{C}$  时,对应输出信号光功率  $P_{signal}$  与控制光功率  $P_{gate}$  的关系如图 5(b)所示.

#### 4.3. 由控制光波长 $\lambda_{gate}$ 偏移引起的相位失配

晶体温度  $T = 27^\circ\text{C}$ ,极化反转光栅周期  $\Lambda_{SFG} = 16.108\mu\text{m}$ ,信号光波长  $\lambda_{signal} = 1.520\mu\text{m}$ ,相互作用长度  $L = 20\text{mm}$ ,当控制光波长  $\lambda_{gate}$  偏离中心波长  $\lambda_0 = 1.550\mu\text{m}$  分别为  $\Delta\lambda_{gate} = 0.3\text{nm}$  和  $\Delta\lambda_{gate} = 0.5\text{nm}$  时,

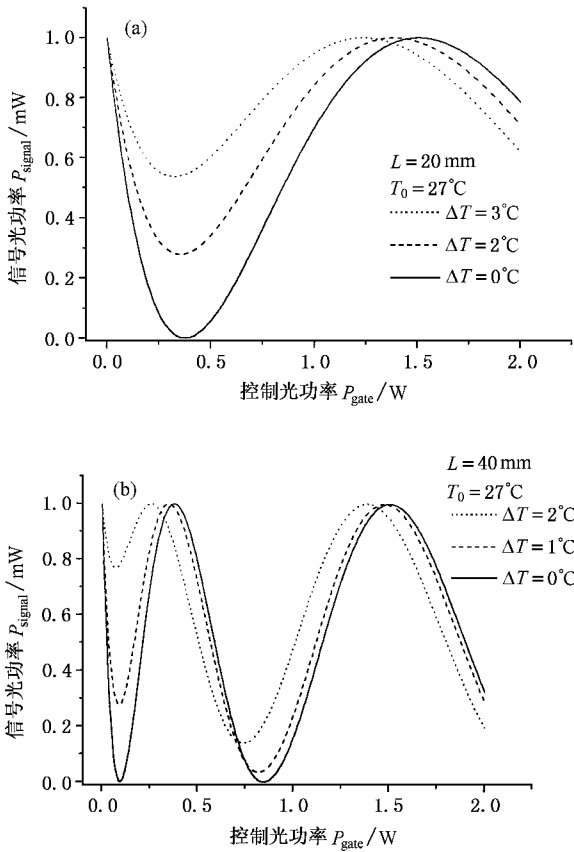


图5 晶体温度  $T$  偏移中心值时, 输出信号光功率  $P_{\text{signal}}$  与控制光功率  $P_{\text{gate}}$  的关系

对应输出信号光功率  $P_{\text{signal}}$  与控制光功率  $P_{\text{gate}}$  的关系如图 6(a) 所示: 相互作用长度  $L = 40\text{mm}$ , 当控制光波长  $\lambda_{\text{gate}}$  偏离中心波长  $\lambda_0 = 1.550\mu\text{m}$  分别为  $\Delta\lambda_{\text{gate}} = 0.2\text{nm}$  和  $\Delta\lambda_{\text{gate}} = 0.4\text{nm}$  时, 对应输出信号光功率  $P_{\text{signal}}$  与控制光功率  $P_{\text{gate}}$  的关系如图 6(b) 所示。

另外, 对比图 2 与图 4—图 6 可知, 相位匹配情况下的小信号近似结果与数值计算结果完全相同, 说明在相位匹配时小信号近似结果具有非常高的准确性和适用性。

分析上述信号光功率  $P_{\text{signal}}$  与控制光功率  $P_{\text{gate}}$  的关系曲线可知, 对由于控制光波长  $\lambda_{\text{gate}}$  偏移、极化反转光栅周期  $\Lambda_{\text{SFG}}$  误差和晶体温度  $T$  漂移等因素引起的相位失配情况, 随着相位失配因子  $\Delta k$  增大, 输出的信号光功率  $P_{\text{signal}}$  增加, 导致消光比降低; 而相应使信号光  $P_{\text{signal}}$  达到最小谷值功率所需的控制光功率  $P_{\text{gate}}$  也在变化。虽然增加控制光功率  $P_{\text{gate}}$  总能够使输出的信号光功率  $P_{\text{signal}}$  达到下一个谷值, 而

且该谷值比前一个谷值要小, 即消光比会提高, 但是所需的控制光功率  $P_{\text{gate}}$  将远大于前一个谷值所对应的控制光功率  $P_{\text{gate}}$ , 而实际上最令人感兴趣的是控制光功率  $P_{\text{gate}}$  增加时, 输出的信号光功率  $P_{\text{signal}}$  达到第一个最小谷值时所对应控制光功率  $P_{\text{gate}}$  大小。因此本文下面将分析对应于相互作用长度  $L$  分别为 20 与 40mm, 当控制光波长  $\lambda_{\text{gate}}$ 、极化反转光栅周期  $\Lambda_{\text{SFG}}$  或晶体温度  $T$  偏移中心值时, 逐渐增加控制光功率  $P_{\text{gate}}$ , 使得输出的信号光功率  $P_{\text{signal}}$  达到第一个最小谷值位置时的信号光功率  $P_{\text{signal}}$  及相应的控制光功率  $P_{\text{gate}}$  与控制光波长  $\lambda_{\text{gate}}$ 、极化反转光栅周期  $\Lambda_{\text{SFG}}$  以及晶体温度  $T$  等三个变量的关系。

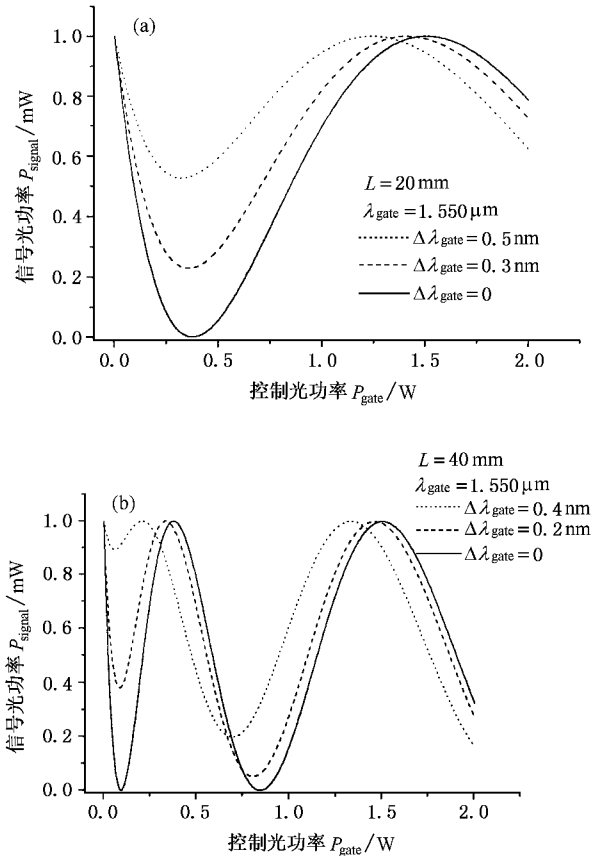


图6 控制光波长  $\lambda_{\text{gate}}$  偏移中心值时, 输出信号光功率  $P_{\text{signal}}$  与控制光功率  $P_{\text{gate}}$  的关系

输出信号光功率  $P_{\text{signal}}$  达到第一个最小谷值时及相应的控制光功率  $P_{\text{gate}}$  与光栅周期  $\Lambda_{\text{SFG}}$  的关系如图 7(a) 和 (b) 所示。

输出信号光功率  $P_{\text{signal}}$  达到第一个最小谷值时及相应的控制光功率  $P_{\text{gate}}$  与晶体温度  $T$  的关系如图 8(a) 和 (b) 所示。

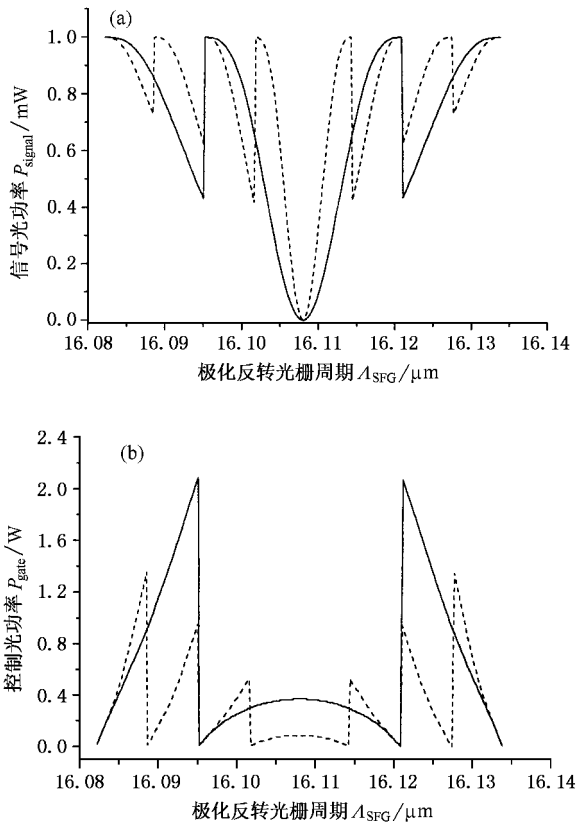


图7 最小谷值位置的输出信号光功率  $P_{\text{signal}}$  与极化反转光栅周期  $\Delta_{\text{SFG}}$  的关系 (a) 控制光功率  $P_{\text{gate}}$  与极化反转光栅周期  $\Delta_{\text{SFG}}$  的关系 (b) ——为  $L=20\text{mm}$  - -为  $L=40\text{mm}$

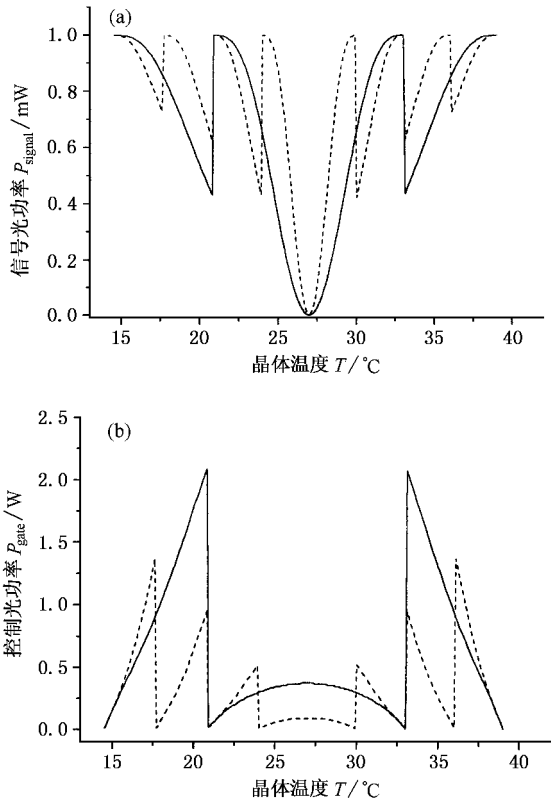


图8 最小谷值位置的输出信号光功率  $P_{\text{signal}}$  与晶体温度  $T$  的关系 (a) 控制光功率  $P_{\text{gate}}$  与晶体温度  $T$  的关系 (b) 图注同图7

输出信号光功率  $P_{\text{signal}}$  达到第一个最小谷值时及相应的控制光功率  $P_{\text{gate}}$  与控制光波长  $\lambda_{\text{gate}}$  的关系如图 9 (a) 和 (b) 所示。

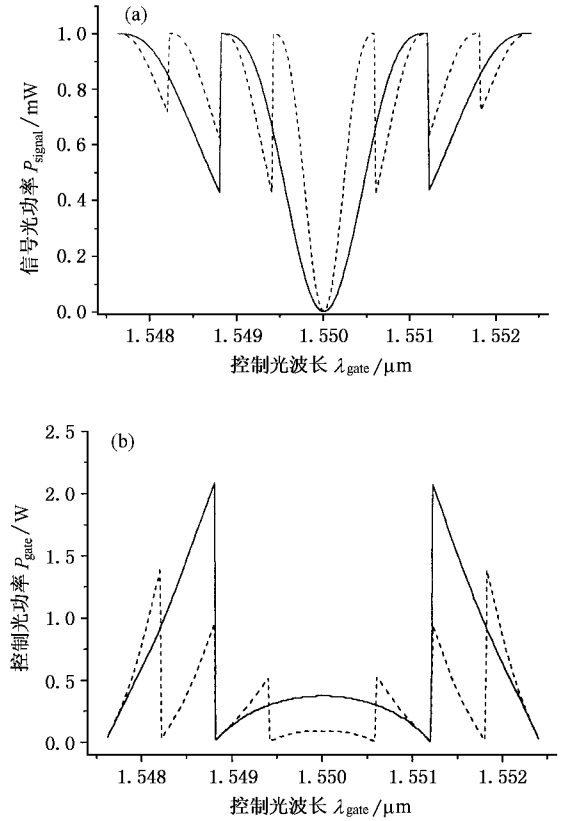


图9 最小谷值位置的输出信号光功率  $P_{\text{signal}}$  与控制光波长  $\lambda_{\text{gate}}$  的关系 (a) 控制光功率  $P_{\text{gate}}$  与控制光波长  $\lambda_{\text{gate}}$  的关系 (b) 图注同图7

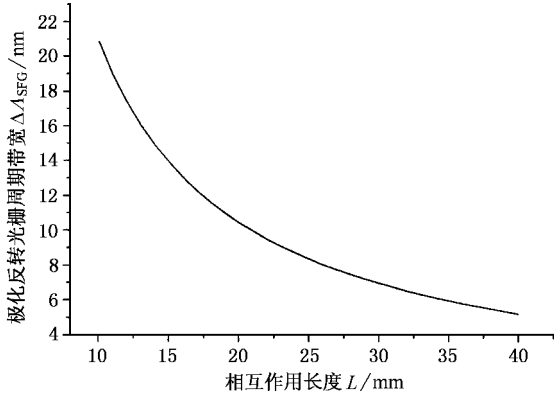
## 5. 光开关容差特性

由于控制光波长偏移、极化反转光栅周期误差或晶体温度漂移引起的相位失配,导致信号光的输出功率增大,光开关的性能降低.为了描述光开关的特性,忽略各光波的传播损耗,定义输出的信号光功率增加到其输入功率  $P_{\text{signal}}(0)$  的  $1/2$  时所对应的控制光波长  $\lambda_{\text{gate}}$ 、极化反转光栅周期  $\Delta_{\text{SFG}}$  或晶体温度  $T$  为相应各参量的半极大带宽,或容差.

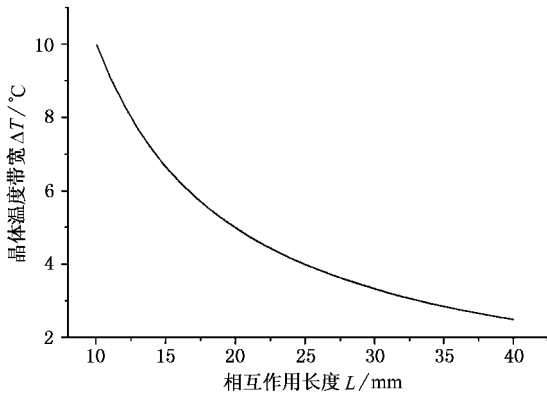
### 5.1. 容差与相互作用长度 $L$ 的关系

信号光波长  $\lambda_{\text{signal}} = 1.520\mu\text{m}$  恒定,控制光中心波长  $\lambda_{\text{gate}} = 1.550\mu\text{m}$ ,极化反转光栅周期中心值  $\Delta_{\text{SFG}} = 16.108\mu\text{m}$ ,晶体中心温度  $T_0 = 27^\circ\text{C}$  时,计算

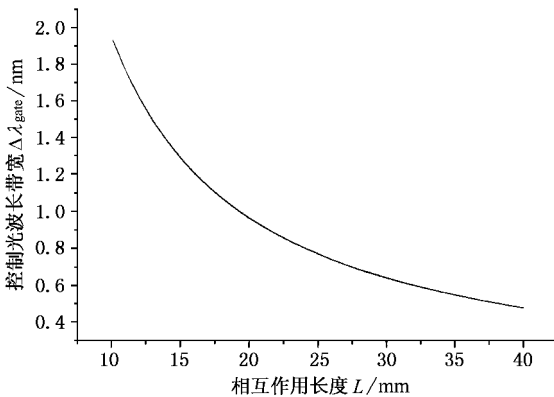
得各参量的容差与相互作用长度  $L$  的关系如图 10 所示.由图 10 可以看出,三个参量容差的变化趋势均随相互作用长度  $L$  的增加而减小.



(a)极化反转光栅周期  $\Lambda_{SFG}$  的容差与相互作用长度  $L$  的关系



(b)晶体温度  $T$  的容差与相互作用长度  $L$  的关系



(c)控制光波长  $\lambda_{gate}$  的容差与相互作用长度  $L$  的关系

图 10 晶体温度  $T_0 = 27^\circ C$ , 光栅周期  $\Lambda_{SFG} = 16.108\mu m$ ,  $\lambda_{gate} = 1.550\mu m$ , 全光开关各参量容差与相互作用长度  $L$  的关系

## 5.2. 容差与晶体温度 $T$ 的关系

由于铌酸锂晶体在室温附近具有较强的光折变效应,因此 Fejer 等人<sup>[2]</sup>在实验中将铌酸锂晶体控制在较高的温度,以降低光折变效应.考虑到铌酸锂晶体的热膨胀因素,在不同的晶体温度  $T$  下满足相位匹配条件的相应极化反转光栅周期  $\Lambda_{SFG}$  如图 11 所示,因此相应光开关的各参量容差也不同.信号光波长  $\lambda_{signal} = 1.520\mu m$ ,控制光波长  $\lambda_{gate} = 1.550\mu m$ ,若极化反转光栅周期  $\Lambda_{SFG}$  在晶体中心温度为  $T_0$  时满足相位匹配条件,当相互作用长度  $L$  分别为 20 和 40mm 时,计算得极化反转光栅周期  $\Lambda_{SFG}$ 、晶体温度  $T$  和控制光波长  $\lambda_{gate}$  在晶体温度为  $T_0$  时的容差与晶体温度  $T$  的关系,如图 12 所示.由图 12 可见,三者容差的变化趋势均随温度  $T$  的增加而减小,但是绝对变化量都较小,因此晶体温度  $T$  对容差影响较小.

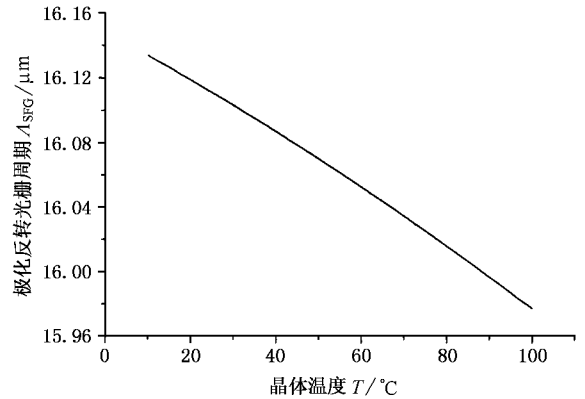


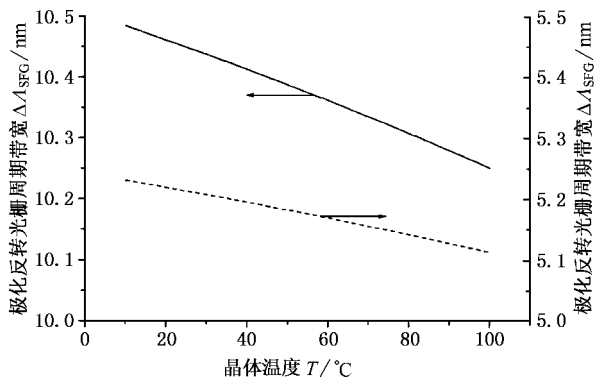
图 11 考虑到热膨胀因素,不同晶体温度  $T$  下达到相位匹配所要求的极化反转光栅周期  $\Lambda_{SFG}$

## 6. 结 论

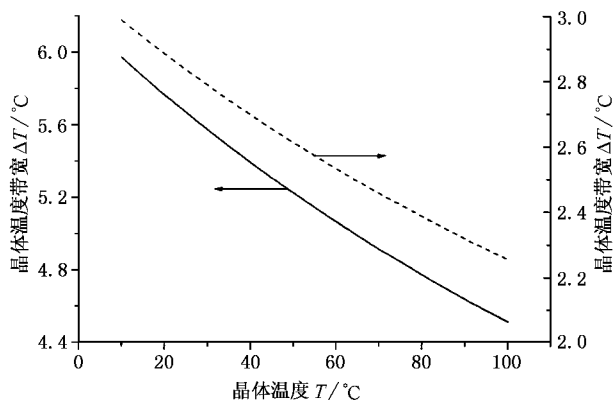
本文从理论上分析了全光开关的耦合模方程,给出了小信号近似下的耦合模方程的解析解.在用标量有限单元法分析铌酸锂退火质子交换光波导的模折射率与模场分布的基础上,分析了相位匹配情况下的小信号近似解,给出了输出的信号光功率、和频光功率随控制光功率变化的关系曲线,以及随相互作用长度变化的关系曲线,并用数值方法求解耦合模方程,分析了相位失配情况下的全光开关特性,给出了由于控制光波长、晶体温度或光栅周期等引起的相位失配对输出的信号光功率的影响,并给出

了信号光功率与控制光功率的关系曲线. 分析了这种全光开关对于控制光波长、晶体温度以及极化反

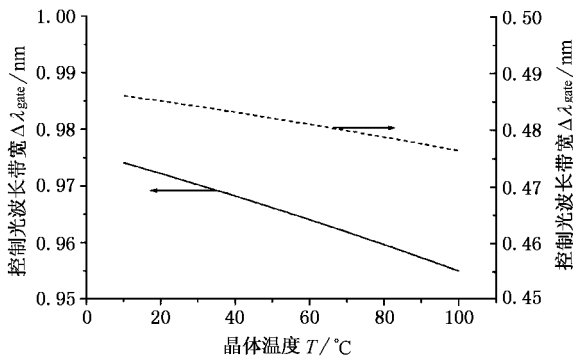
转光栅周期等参量的容差特性与相互作用长度和晶体温度的关系 给出了关系曲线.



(a) 极化反转光栅周期  $\Delta\lambda_{\text{SFG}}$  的容差与晶体温度  $T$  的关系



(b) 晶体温度  $T$  的容差与晶体温度  $T$  的关系



(c) 控制光波长  $\lambda_{\text{gate}}$  的容差与晶体温度  $T$  的关系

图 12 全光开关各参量容差与晶体温度  $T$  的关系 极化反转光栅周期  $\Delta\lambda_{\text{SFG}} = 16.108\mu\text{m}$  图注同图 7

[ 1 ] Kanbara H *et al* 1999 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **11** 328  
 [ 2 ] Parameswaran K R *et al* 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 654  
 [ 3 ] Asobe M *et al* 1997 *Opt. Lett.* **2** 274  
 [ 4 ] Hutchings D C *et al* 1993 *Opt. Lett.* **18** 793  
 [ 5 ] Stegeman G I *et al* 1993 *Opt. Lett.* **18** 13

[ 6 ] Xue T *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 565 ( in Chinese ) [ 薛 挺等 2002 物理学报 **51** 565 ]  
 [ 7 ] Xue T *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 91 ( in Chinese ) [ 薛 挺等 2002 物理学报 **51** 91 ]



# Analysis of all-optical switching in periodically poled $\text{LiNbO}_3$ waveguide<sup>\*</sup>

Xue Ting Yu Jian Yang Tian-Xin Ni Wen-Jun Li Shi-Chen

( *College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering , Key Laboratory of Optoelectronics Information Technical Science ,*

*Ministry of Education of China , Tianjin University , Tianjin 300072 , China )*

( Received 17 October 2001 ; revised manuscript received 16 December 2001 )

## Abstract

The characterization of all-optical switching based on cascaded second-order nonlinearity of sum-frequency generation ( SFG ) and differential frequency generation ( DFG ) in periodically poled lithium niobate ( PPLN ) waveguide was analyzed theoretically . The small signal solution of the couple mode equation was given at phase matched firstly . Then based on solving the couple mode equation numerically , the dependence of the signal power on the gate power was given under different phase mismatch conditions . Finally , the dependence of the tolerance of the grating period , the crystal temperature and the gate power on the interaction length and the crystal temperature were analyzed .

**Keywords :** cascaded second-order nonlinearity , optical switching , quasi-phase-matched ( QPM ) , periodically poled lithium niobate ( PPLN )

**PACC :** 4265 , 4265K , 4280L , 4280S

---

<sup>\*</sup> Project supported by the Natural Science Foundation of Tianjin , China ( Grant No. 99380071 ) .