

基于 PPLN 倍频-电光耦合级联的光调谐技术

孔艳 张秀梅 苏宙平 高淑梅

(江南大学光信息科学与技术系, 江苏 无锡 214122)

摘要 研究了周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体内倍频和电光耦合的级联过程,发现引入另外一束光波,可以改变晶体内原有的三个光波的能量耦合过程。模拟结果显示,通过改变外加光波光强,可以实现对三个光波的强度和二次谐波偏振态的调制。研究结果对于同时实现倍频和信号调谐非常有益。

关键词 非线性光学;电光耦合;倍频;准相位匹配;光学超晶格

中图分类号 O734+.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.101901

Intensity and Polarization Modulation on Cascaded Frequency Doubling and Electro-Optic Coupling in Periodically Poled Lithium Niobate

Kong Yan Zhang Xiumei Su Zhouping Gao Shumei

(Department of Optical Information Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract The cascade process of frequency doubling and electro-optic (EO) coupling in a single periodically poled niobate (PPLN) crystal is studied. The original coupling process is disturbed by the introduction of another optical wave (control light). Numerical results indicate that magnitude of three waves and the polarization of the second harmonic (SH) can be both modulated by adjusting the intensity of control light. This result would be useful when simultaneous frequency doubling and signal tuning are desired.

Key words nonlinear optics; electro-optic coupling; frequency doubling; quasi-phase matching; optical superlattice

OCIS codes 190.4360; 190.2620; 230.2090

1 引言

自从室温下外加电场极化法制作周期极化晶体获得成功以来,周期性极化晶体就因其优良的非线性特性引起了人们的广泛关注^[1~5]。在周期性极化晶体中,不仅可以实现非线性极化率的空间调制,还可使其他三阶物性张量如电光系数也出现周期性的符号改变。有关周期性极化晶体电光效应的有趣现象和重要应用已被相继报道^[6~9]。

近年来随着非线性技术的发展,级联频率转换和信号调制逐渐吸引了人们的目光,受到越来越广泛的关注^[10~12]。这些复合功能使得器件更加紧凑和有效,在准确无误的光信号生成及信号处理同时进行方面,更是给我们提供了很大的便利。Chang 等^[10]给出了一种三明治结构的铌酸锂晶体[两边是周期性极化铌酸锂(PPLN)晶体,中间夹着一段未极化的铌酸锂晶体],通过电光效应可以控制混合波的相位,进而可以同时实现振幅调制和频率转换,不久这两个功能便被集成在了一块晶体上^[11]。不同于上述两种方法,Huang 等^[12]最近给出了一种新的方法,通过改变 PPLN 晶体外加电场的强度,可以实现对二次谐波(SH)的强度和偏振

收稿日期: 2012-04-27; **收到修改稿日期**: 2012-06-11; **网络出版日期**: 2012-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(60908041),中央高校基本科研业务费专项资金(JUSRP111A20)和江南大学预研基金(2009LYY09)资助课题。

作者简介: 孔艳(1979—),女,博士,讲师,主要从事非线性光学及光电子器件等方面的研究。

E-mail: ykong80@163.com

态的调节。

在 PPLN 晶体内的级联过程中,除了外加电压外,引入另外一束光波,其光强的改变也可以影响级联过程中原有的能量耦合过程。本文主要探讨外加光波对晶体内相互作用光波能量耦合过程的影响,通过对外加光波强度的调制,实现对三个光波的强度和二次谐波偏振的调制,获得光控光的效果。

2 耦合波方程

当光学超晶格 PPLN 的周期结构能够同时满足倍频 (SHG) 和电光耦合的准相位匹配条件时,在这块光学超晶格晶体内偏振耦合和倍频将级联发生。这里假设级联过程如下: $\omega_{1z} + \omega_{1z} \rightarrow \omega_{2z}, \omega_{2z} \rightarrow \omega_{2y}$ 。当抽运光射入 PPLN 晶体,由于非线性作用生成 z 偏振二次谐波,在电光效应作用下,偏振方向发生偏转生成 y 偏振二次谐波。控制光可以是 z 偏振或者 y 偏振的二次谐波。抽运入射光是 z 偏振光,光波沿 x 轴传播,均匀电场施加在 PPLN 的 y 方向,如图 1 所示。

与参考文献[12,13]工作类似,从麦克斯韦方程组出发,在平面波近似条件下,可以得到包含倍频和电光耦合的耦合波方程组:

$$\begin{cases} \frac{dE_{1z}}{dx} = -i \frac{\omega_1 d_{33}(x)}{n_{1z} c} E_{1z}^* E_{2z} \exp(-i\Delta k_1 x) \\ \frac{dE_{2z}}{dx} = -i \frac{\omega_2}{2n_{2z} c} [d_{33}(x) E_{1z}^2 \exp(i\Delta k_1 x) + \epsilon_{23}(x) E_{2y} \exp(-i\Delta k_2 x)] \\ \frac{dE_{2y}}{dx} = -i \frac{\omega_2}{2n_{2y} c} [\epsilon_{23}(x) E_{2z} \exp(i\Delta k_2 x) - \Delta\epsilon(x) E_{2y}] \end{cases}, \quad (1)$$

式中 $\epsilon_{23} = -n_{2y}^2 n_{2z}^2 \gamma_{51} f(x) E_y$, $\Delta\epsilon(x) = -\gamma_{22} n_{2y}^4 f(x) E_y$, $d_{33}(x) = d_{33} f(x)$, $\Delta k_1 = k_{2z} - 2k_{1z}$, $\Delta k_2 = k_{2y} - k_{2z}$, $E_{j\xi}$, $\omega_{j\xi}$, $k_{j\xi}$ 和 $n_{j\xi}$ ($j = 1, 2$ 分别代表抽运光和二次谐波, $\xi = y, z$ 表示偏振方向) 分别为电场强度,角频率,波数和折射率。 c 为真空中的光速, d_{33} 和 γ_{51}, γ_{22} 分别为倍频二阶非线性系数和电光系数, $f(x)$ 是 PPLN 的正负畴的结构函数。

由于非线性系数或电光系数的周期性调制,周期函数 $f(x)$ 可以写成傅里叶级数

$$f(x) = \sum_m g_m \exp(-i\mathbf{G}_m x), \quad (2)$$

式中 \mathbf{G}_m 是倒格矢, g_m 是倒格矢的振幅。当在倍频和电光耦合中的相位失配能够由倒格矢 \mathbf{G}_1 和 \mathbf{G}_2 补偿的情况下,耦合波方程组(1)可以简化为

$$\begin{cases} \frac{dA_{1z}}{dx} = -iK_1 A_{1z}^* A_{2z} \\ \frac{dA_{2z}}{dx} = -\frac{i}{2} K_1 A_{1z}^2 + iK_2 A_{2y} \\ \frac{dA_{2y}}{dx} = iK_2^* A_{2z} - iK_3 A_{2y} \end{cases}, \quad (3)$$

式中 $A_j = \sqrt{\frac{n_j}{\omega_j}} E_j$, $K_1 = \frac{d_{33} g_1}{c} \sqrt{\frac{\omega_1^2 \omega_2}{n_{1z}^2 n_{2z}}}$, $K_2 = \frac{\gamma_{51} g_2 \omega_2 E_y}{2c} \sqrt{n_{2y}^3 n_{2z}^3}$, $K_3 = \frac{\gamma_{22} g_2 \omega_2 E_y}{2c} n_{2y}^3$ 。这里 g_1, g_2 是与倒格矢有关的傅里叶系数, K_1, K_2, K_3 是耦合系数,其中 K_2 正比于外加直流电压强度 E_y 。

3 模拟结果

在级联过程中,倍频和电光耦合不再单独进行而是互相耦合在一起。耦合会导致三个相互作用光波之间一系列的能量传递。但是,分析和数值模拟显示耦合过程不仅与耦合系数的大小有关,还与耦合系数比

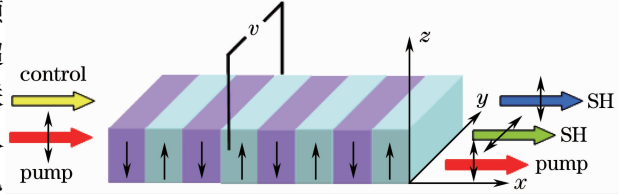


图 1 有外加控制光条件下 PPLN 内倍频和电光耦合光路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the SHG and electro-optic coupling process in the PPLN with control light

$t = K_2/K_1$ 有关。图 2 给出了在完全相位匹配条件下, 转换效率在不同耦合系数比条件下随非线性晶体长度的变化。在本文的所有模拟结果示意图中, 实线、短线、点线分别代表抽运光、 z 偏振 SH、 y 偏振 SH; 所有模拟过程中 K_1 、 K_3 的取值分别为 $K_1 = 500$, $K_3 = 0.26K_2$, $A_{1z}(0) = 1$, 此后不再赘述。在 z 偏振抽运光、 z 偏振 SH 和 y 偏振 SH 之间一系列的能量传递中, 很明显耦合系数比对转换效率影响很大, 不同的耦合系数比对应着不同的能量传递过程。从方程组(3)中可以看到, K_1 代表着倍频系数, K_2 代表着偏振耦合。耦合系数比 $t = K_2/K_1$ 可以由外加直流电压 E_y 调节。

我们知道, 在对耦合波方程组(3)求解时, 初始条件不同则得到的解也会不同。求解方程组(3)时, 在 $A_{1z}(0) = 1, A_{2z}(0) = 0, A_{2y}(0) = 0$ 条件下可以得到一组解, 但当改变 $A_{2z}(0)$ 、 $A_{2y}(0)$ 的初始值时, 又可以得到另一组解。即除了耦合系数比之外, 初始能量 $A_{2z}(0)$ 或者 $A_{2y}(0)$ 也能够影响甚至改变能量耦合过程, 而初始能量的改变则由外加控制光提供。下面将研究外加控制光的引入对各个光波转换效率的影响(以下模拟计算中 PPLN 晶体长度均为 20 mm)。

图 3 给出在有外加控制光情况下, 转换效率在不同耦合系数下随非线性晶体长度变化的模拟结果。与图 2 的模拟结果相比, 当外加控制光为 z 偏振 SH 且其振幅为 0.2 时, 在耦合系数比为 0.2 [图 3(a1)] 的情况下晶体内的能量耦合过程变化比较大。在 20 cm 的晶体内, 基波和 z 偏振 SH 的耦合过程增加到了 4 次, 且 y 偏振 SH 的最高转换效率从 100% 降到了 27%。耦合系数比 t 为 1 和 3 时, 晶体内的能量耦合过程也有改变, 但变换不大。当外加控制光为 y 偏振 SH 且其振幅为 0.2 时, 在耦合系数比为 1 的情况下晶体内的能量耦合过程变换比较大, z 偏振、 y 偏振 SH 的最大转换效率都有所下降, z 偏振 SH 的转换效率更是从 27% 下降到了 10%, 更多的能量存储在基波中。耦合系数比为其他两个值时, 晶体内的能量耦合过程也有改变, 但变化不大。

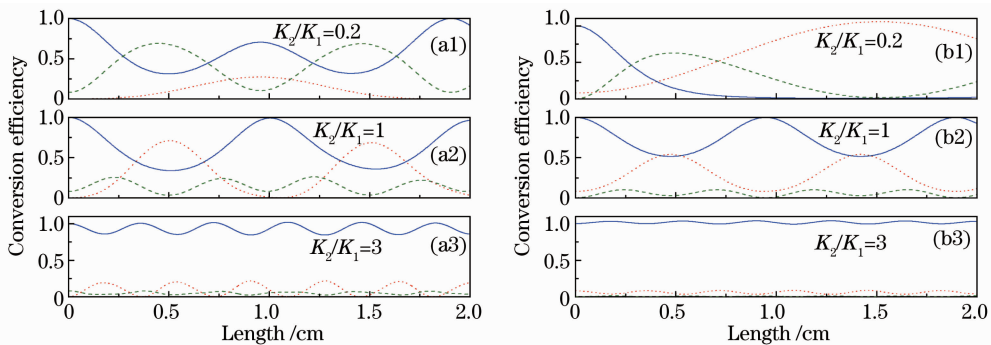


图 3 不同外加控制光下转换效率随晶体长度变化示意图。(a1)~(a3) $A_{2z}(0) = 0.2$; (b1)~(b3) $A_{2y}(0) = 0.2$

Fig. 3 Conversion efficiency versus crystal length with different control lights. (a1)~(a3) $A_{2z}(0) = 0.2$; (b1)~(b3) $A_{2y}(0) = 0.2$

由分析可知, 在晶体输入端加入一控制光波, 晶体内的原有能量耦合过程发生了改变。如果改变输入控制光振幅, 那么在晶体输出端光波的转换效率也会随之改变, 尤其是两种偏振态 SH 的输出强度。下面主要探讨控制光强的改变对晶体输出端光波转换效率的影响。

外加控制光为 z 偏振 SH 时, 给出不同耦合系数比情况下, 基波、 z 偏振 SH、 y 偏振 SH 在非线性晶体输出端(20 mm 处)转换效率随控制光振幅 $A_{2z}(0)$ 的变化情况, 如图 4 所示。当 $t = 0.2 < 1$ 时, 偏振耦合系数远小于倍频系数, 意味着在整个耦合过程中倍频效应强于偏振耦合而占主导地位。从图中也可以看到, 能量的传递主要发生在抽运光和 z 偏振 SH 之间。随着外加控制光强的增大, 抽运光转换效率最初有个比较小的

起伏,随后迅速增大,当控制光振幅达到 $A_{2z}(0)=0.16$ 时达到最大,之后随着控制光强的继续增大而下降。 z 偏振 SH 转换效率在初始光强不是很大的情况下迅速增大,当控制光振幅达到 $A_{2z}(0)=0.07$ 时, z 偏振 SH 的转换效率达到最大。随着控制光强的继续增大, z 偏振 SH 转换效率在控制光振幅为 0.16 处下降到最低点,随后又增大。而 y 偏振光转换效率最初随着控制光强的增大而迅速下降并接近于零,并在很长的范围内基本不变。当 $t=1$ 时,随着外加控制光强的增大, z 偏振 SH、 y 偏振 SH 的转换效率缓慢增大,且抽运光的转换效率缓慢减小,即外加控制光的能量主要给了 SH,并且促进倍频,使得抽运光的能量传递给了 SH。在此种条件下,倍频系数和偏振耦合系数相等,外加控制光对偏振耦合和倍频均有影响。当 $t=3$ 时,随着控制光强的增大,抽运光、 y 偏振 SH 的转换效率基本不变, z 偏振 SH 的转换效率缓慢上升。在这种情况下,外加控制光对三光波之间的耦合过程影响不大。

图 5 给出在外加控制光振幅 $A_{2y}(0)$ 对三光波在铌酸锂晶体输出端(20 cm 处)转换效率的影响。当 $t=0.2 < 1$ 时, y 偏振 SH 的强度并没有随着控制光强的增大而增大,反而在缓慢下降。抽运光、 z 偏振 SH 的光强随着控制光强的增大而增大,且 SH 的增大幅度要大于抽运光。在此种条件下,倍频系数要远远大于偏振耦合系数,外加控制光的能量主要传递给了 z 偏振 SH,再由抽运光和 z 偏振 SH 之间的能量耦合传递给了抽运光。当 $t=1$ 时,随着外加控制光的增大, y 偏振 SH 的光强也逐渐增大,抽运光光强缓慢下降, z 偏振 SH 的光强起伏不大。当 $t=3 > 1$ 时,随着控制光强的增大, y 偏振光的光强没有上升反而缓慢下降, z 偏振 SH 的光强基本不变,抽运光的光强有了显著的增强。在此种条件下,偏振耦合系数强于倍频系数,外加控制光的能量主要传递给了抽运光。

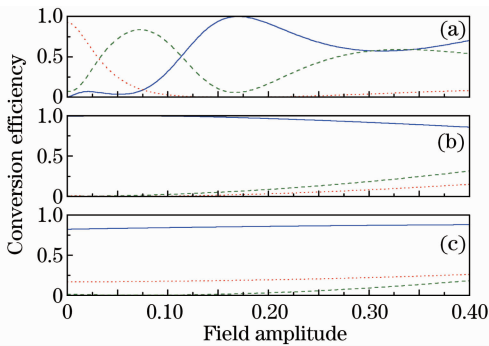


图 4 外加 z 偏振 SH 控制光对转换效率的影响。

(a) $t=0.2$; (b) $t=1$; (c) $t=3$

Fig. 4 Dependence of conversion efficiency on the initial field amplitude of z -polarized SH. (a) $t=0.2$; (b) $t=1$; (c) $t=3$

从模拟分析可知,耦合系数比和控制光的初始入射能量都能够影响光学超晶格内的光波耦合过程。换句话说,可以通过调谐控制光强来调制 PPLN 晶体内三个光波之间的能量耦合过程。基于这种性质,可以得到一种新的、方便的快速光控光方法。

为了说明外加控制光强对输出光强的调控作用,给出一个具体的例子。对于铌酸锂晶体来说,当抽运光波长为 1064 nm 时,在晶体温度 172.4 °C 条件下倍频与偏振耦合的相位失配量为 $\Delta k_1 = \Delta k_2 = 0.9573 \mu\text{m}^{-1}$ 。此时周期为 6.56 μm ,占空比为 50% 的 PPLN 晶体正好可以补偿这些相位失配量,满足准相位匹配条件。图 6 给出了三个光波的转换效率随控制光强变化的示意图。在模拟计算中,PPLN 晶体的长度为 20 mm,抽运光的初始输

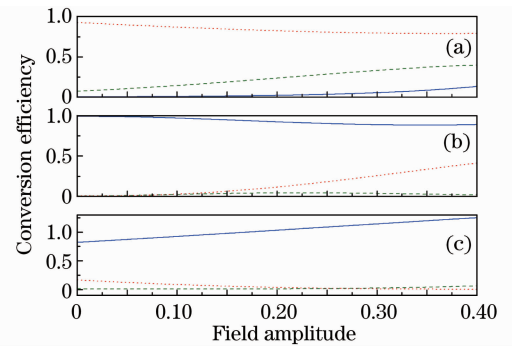


图 5 外加 y 偏振 SH 控制光对转换效率的影响。

(a) $t=0.2$; (b) $t=1$; (c) $t=3$

Fig. 5 Dependence of conversion efficiency on the initial field amplitude of y -polarized SH. (a) $t=0.2$; (b) $t=1$; (c) $t=3$

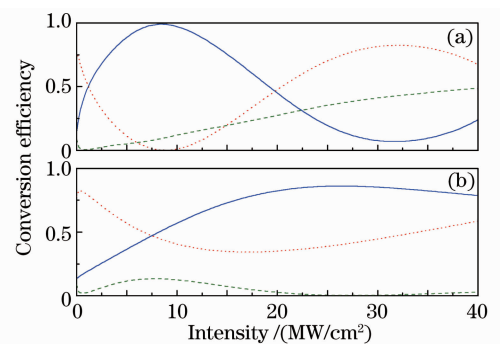


图 6 转换效率随控制光强变化示意图。(a)控制光为 z 偏振 SH;(b)控制光为 y 偏振 SH

Fig. 6 Conversion efficiency versus control light intensity. (a) Control light is z -polarized SH; (b) control light is y -polarized SH

入光强为 100 MW/cm^2 , LiNbO_3 晶体中不同偏振光波的折射率根据 Sellmeir 方程计算得到^[14]。在图 6(a) 中,控制光是 z 偏振 SH,从图中可以看到,随着控制光强的增强, z 偏振 SH 的转换效率逐渐增大, y 偏振 SH 的转换效率先减小后增大,抽运光的转换效率先增大后减小。抽运光和 y 偏振 SH 的转换效率交替振荡,当抽运光的转换效率达到最高点时, y 偏振 SH 的转换效率达到最低,抽运光的转换效率最低时, y 偏振 SH 的转换效率达到最高。控制光是 y 偏振的 SH 时,三波转换效率随外加控制光强变化如图 6(b) 所示。随着控制光强的增大, y 偏振 SH 的转换效率并没有增大,反而是先下降后略有增大。抽运光的转换效率有了显著的增大,在控制光强增加到 26.2 MW/cm^2 的情况下,抽运光的能量增大 73% 左右, z 偏振 SH 的能量变换不大。从图 6 的模拟结果可知,不需要改变电压,通过外加控制光也可以对基波光强和 SH 的不同偏振态输出值进行调控。PPLN 内的三波耦合过程以及外加控制光的结果为光控光器件的研究和发展以及全光通信网络构想的实现提供了一种新的方法。

4 结 论

在铌酸锂晶体的非线性频率变换和电光效应的理论基础上,研究了晶体内的倍频和电光耦合的级联过程,发现除了外加电压外,外加控制光也能够影响 PPLN 晶体内的倍频和电光耦合级联过程。模拟结果显示,外加控制光能够改变光波在晶体内的原有耦合过程,通过调制外加控制光强可以实现相互作用三光波光强和二次谐波偏振的调制。

参 考 文 献

- 1 L. E. Myers, R. C. Eckardt, M. M. Fejer *et al.*, Quasi phase matched optical parametric oscillators in bulk periodically poled LiNbO_3 [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1995, **12**(11): 2102~2116
- 2 Yan Caifan, Wang Yanan, Chen Shaofu *et al.*, Spectral properties of parametric oscillator based on periodically poled MgO-doped lithium niobate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1997~2000
颜彩繁, 王亚楠, 陈少甫 等. 周期性极化掺镁铌酸锂光参量振荡器的输出光谱特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1997~2000
- 3 Hu Minyuan, Liang Xiaoyan, Zhao Baozhen *et al.*, Theoretical investigation on broad band semi-noncollinear optical parametric amplification in periodically poled lithium niobate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 146~150
胡志远, 梁晓燕, 赵宝真 等. 周期性极化铌酸锂晶体中半非共线型宽带光学参变放大理论研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 146~150
- 4 Liu Tao, Yu Song, Shen Jing *et al.*, Bandwidth and gain of PPLN based optical parametric amplification with different noncollinear geometries[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(2): 302~306
刘 涛, 喻 松, 申 静 等. PPLN 晶体中不同非共线结构光参量放大过程的带宽与增益特性[J]. *中国激光*, 2009, **36**(2): 302~306
- 5 Chen Dong, Liu Wenqing, Zhang Yujun, Tuning characteristic of PPLN based difference-frequency-generation laser system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(3): 761~766
陈 东, 刘文清, 张玉钧. PPLN 晶体差频中红外激光系统调谐特性研究[J]. *光学学报*, 2009, **29**(3): 761~766
- 6 Lu Yanqing, Wang Zhiliang, Wang Quan *et al.*, Electro-optic effect of periodically poled optical superlattice LiNbO_3 and its applications[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2000, **77**(23): 3719~3721
- 7 Y. Q. Lu, M. Xiao, G. J. Salamo, Wide-bandwidth high frequency electro-optic modulator based on periodically poled LiNbO_3 [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, **78**(8): 1035~1037
- 8 Su Shida, Wan Lingyu, Zhou Yu *et al.*, Transversal electro-optic effect of light propagating in arbitrary direction in LiNbO_3 [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(10): 2972~2977
苏世达, 万玲玉, 周 煜 等. 任意传播方向下铌酸锂晶体的横向电光效应研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(10): 2972~2977
- 9 J. H. Shi, J. H. Wang, L. J. Chen *et al.*, Tunable Šolc-type filter in periodically poled LiNbO_3 by UV light illumination [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(13): 6279~6284
- 10 K. Chang, A. Chiang, T. Lin *et al.*, Simultaneous wavelength conversion and amplitude modulation in a monolithic periodically-poled lithium niobate[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **203**(1-2): 163~168
- 11 Y. H. Chen, F. C. Fan, Y. Y. Lin *et al.*, Simultaneous amplitude modulation and wavelength conversion in an asymmetric-duty-cycle periodically poled lithium niobate[J]. *Opt. Commun.*, 2003, **223**(4-6): 417~423

- 12 C. P. Huang, Q. Wang, Y. Zhu. Cascaded frequency doubling and electro-optic coupling in a single optical superlattice [J]. *Appl. Phys. B*, 2005, **80**(6): 741~744
- 13 Dong Huang, Weilong She. High-flux photon-pair source from electrically induced parametric down conversion after second-harmonic generation in single optical superlattice[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 8275~8283
- 14 Dieter H. Jundt. Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, n_e' in congruent lithium niobate[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(20): 1553~1555