

文章编号: 0253-2239(2001)02-139-03

非线性晶体三波相互作用允许参量的修正计算*

王 杰 姚建铨 李喜福 于意仲 施翔春

(天津大学精密仪器与光电子工程学院, 教育部光电信息技术科学开放试验室, 天津 300072)

摘要: 采用传统级数展开方法计算晶体非线性三波相互作用的允许参量。利用定义通过计算机数值模拟进行了精确计算, 修正了传统计算结果, 发现晶体在产生二次谐波时, 在某些角度存在很宽的允许波长峰, 超过传统文献值约几十倍。研究表明, 在产生二次谐波时, 10 mm 长的晶体在某些波段获得 100 nm 以上的允许倍频带宽是可能的, 并提出了移动这些宽带的方法。

关键词: 三波相互作用; 允许参量; 超宽允许波长带

中图分类号: O437 文献标识码: A

1 引 言

非线性晶体的三波相互作用的频率变换如倍频、和频、差频、光参量振荡和光参量放大等技术已广泛用于产生特殊波段和宽调谐范围的相干辐射源。研究晶体的三波相互作用允许参量对提高非线性频率变换的效率和设计特殊的器件都有重要意义。由于宽谱线激光在惯性约束核聚变中的采用, 研究宽谱线激光的高效频率转化引起了广泛关注^[1, 2]。双轴晶体的非线性三波相互作用最佳相位匹配曾进行过详细研究^[3-5]。进一步研究发现传统的级数展开方法在计算允许参量中有一定缺陷。级数展开法都通过对相位匹配方程求导数后展开, 假设允许参量为足够小, 然后取一、二级近似。但如果允许参量不是小量时这种近似与实际偏离较大。在研究匹配曲线时发现, 允许参量在某些角度或波段有很大的峰值, 传统低阶级数展开无法精确计算出峰值。本文利用允许参量的定义通过数值计算重新求解了晶体三波相互作用的允许参量, 得到一些惊人的新结果, 发现二次谐波产生时存在波长的允许峰, 其峰值附近实际允许量比传统计算方法大近两个数量级, 这一结论预示设计在某些波段上允许波长达 100 nm 以上的超宽带倍频器件是可行的。

2 基本理论

在晶体的三波相互作用中, 光波的两个波矢 k 沿

一定方向传播(这些方向用一组 θ, φ 表示), 如果满足相位匹配条件 $\Delta k = 0$, 就能产生明显的频率变换效应, 如果波矢方向偏离相位匹配方向, 这种效应将逐渐减弱, 在相位匹配方向附近存在一个仍然有频率变换效应的范围, 这个范围导致了允许参量的概念。激光的发散角、线宽都会引起相位失配, 当这些失配在允许的范围之内, 就引出了允许角和允许波长。许多情况下这些允许量是非常小的, 相位匹配条件非常苛刻, 不利于高效频率变换。

设晶体三波相互作用中的三个光波频率分别为 ω_1, ω_2 和 ω_3 ($\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$), 其波矢分别为 k_1, k_2 和 k_3 , 根据动量守恒定理, 完全相位匹配时, 有

$$k_3 = k_2 + k_1, \quad (1)$$

当非完全相位匹配时, 在三波共线的相位失配可写为标量形式:

$$\Delta k(\theta, \varphi, T, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = k_3(\theta, \varphi, T, \lambda_3) - k_2(\theta, \varphi, T, \lambda_2) - k_1(\theta, \varphi, T, \lambda_1), \quad (2)$$

这里 θ, φ 为光波在晶体中的方位角, T 为晶体温度。在小信号近似下认为, 三波相互作用中抽运光电场强度在作用方向上没有变化。这样三波相互作用的效率可表示为

$$\eta = \eta_0 \frac{\sin(\Delta k l)}{(\Delta k/2)l}, \quad (3)$$

η_0 为理想匹配时的效率, l 为晶体长度, 匹配宽度为

$$-\pi/l \leq \Delta k \leq \pi/l. \quad (4)$$

此时三波相互作用的效率下降到最大值的约 40% 左右, 由相位匹配宽度可以求得三波相互作用的允许角 $\Delta\theta$ 与 $\Delta\varphi$ 、允许波长 $\Delta\lambda$ 以及晶体的允许温度 ΔT 。

传统的计算方法是利用级数展开的方法求解

* 国家自然科学基金高技术探索主题(69988003)、博士后基金、激光技术国家重点实验室资助项目。

收稿日期: 1999-08-30; 收到修改稿日期: 1999-11-05

的,从(2)式中可以看出相位失配 Δk 是角度 θ 、 φ 、 T 以及波长 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的函数,分别对函数求高阶导数,然后利用泰勒级数展开近似求出允许量。

$$\Delta k_{\theta} = \Delta k \Big|_{(\theta = \theta_m, \varphi = \varphi_m)} + \frac{\partial \Delta k}{\partial \theta} \Big|_{(\theta = \theta_m, \varphi = \varphi_m)} \Delta \theta + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Delta k}{\partial \theta^2} \Big|_{(\theta = \theta_m, \varphi = \varphi_m)} (\Delta \theta)^2 + \dots, \quad (5)$$

$$\Delta k_{\lambda_1} = \Delta k \Big|_{(\lambda_1 = \lambda_{10})} + \frac{\partial \Delta k}{\partial \lambda_1} \Big|_{(\lambda_1 = \lambda_{10})} \Delta \lambda_1 + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 \Delta k}{\partial \lambda_1^2} \Big|_{(\lambda_1 = \lambda_{10})} (\Delta \lambda_1)^2 + \dots, \quad (6)$$

这里 θ_m 、 φ_m 表示最佳匹配角, λ_{10} 为中心波长,传统计算方法一般取一、二阶近似.这种近似计算的前提是允许量是小量,如果允许量实际很大,这种计算就会带来很大误差.在研究非线性晶体的二次谐波产生的相位匹配曲线时,发现传统方法计算的允许参量曲线与相位匹配曲线之间存在矛盾.研究表明,相位匹配曲线的计算是精确的,允许参量的计算在允许量小的时候计算也是精确的;但在允许参量不是小量时存在较大偏差,特别是允许波长偏离很大时。

我们利用定义对三波相互作用允许参量重新进行了数值计算,对共线匹配,可以利用公式

$$\Delta k(\theta, \varphi, T, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \leq |\pi/l|. \quad (7)$$

在求得相位匹配点的参数后,固定其他参数,改变其中某一参数,求出其能满足公式成立的变化范围,这个变化范围就是实际允许参量.这种计算很容易利用计算机实现.在计算中,我们修正了许多近似计算带来的误差,而且得出允许参量实际不对称的结论,指出允许参量可以进一步分为允许增大量和允许减小量。

3 数值计算

以单轴晶体 BBO I、II 类共线相位匹配产生二次谐波为例,经过数值计算可得到相位匹配曲线如图 1 所示,允许角如图 2 所示,允许波长如图 3、图 4

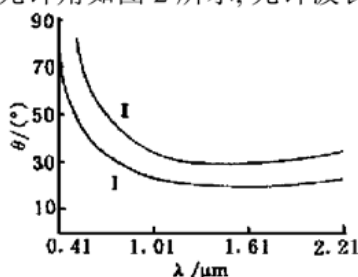


Fig. 1 Phase matching curve of BBO for SHG

所示.从相位匹配曲线上看出,在 I 类相位匹配波长 1.54 μm 附近,II 类相位匹配波长 1.51 μm 附近,相位匹配角度随波长变化很小,对 10 mm 长的晶体,在此附近波长变化 100 nm,相位匹配角的变化还在允许角范围内。

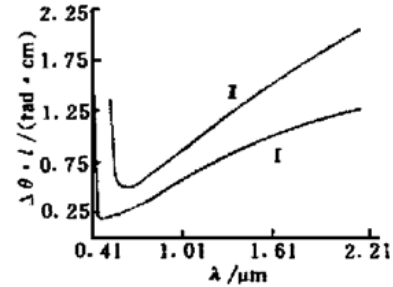


Fig. 2 Acceptance angles of BBO for SHG versus wavelength

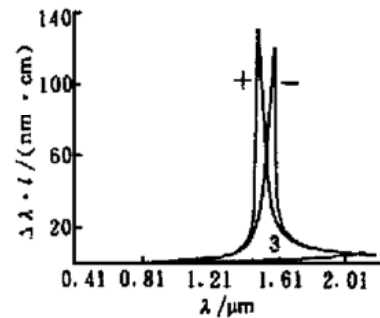


Fig. 3 Acceptance wavelength of BBO for SHG versus wavelength (type I). (+ : acceptance increasing of wavelength; - : acceptance decreasing of wavelength; curve 3: acceptance wavelength calculated by first order Taylor expansion.)

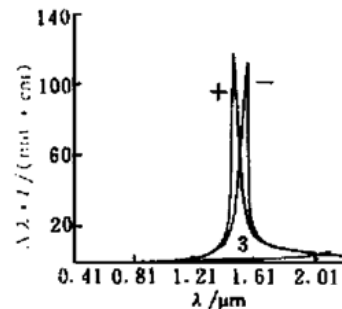


Fig. 4 Acceptance wavelength of BBO for SHG versus wavelength (type II). (+ : acceptance increasing of wavelength; - : acceptance decreasing of wavelength; curve 3: acceptance wavelength calculated by first order Taylor expansion.)

4 理论分析

从图中可以看出,允许参量与相位匹配曲线形状有密切关系,除了传统计算中允许参量随波长增大呈增大趋势外,还存在一些精细结构.当角度匹配曲线斜率较大时,允许角就较大,一般晶体在靠近主平面时匹配曲线斜率很大,所以在折射率轴的方向相位匹配对角度允许参量很大,也就是非临界

相位匹配。在某波长, 相位匹配曲线的斜率为零, 这个点附近, 意味着存在宽的允许波长峰。传统的级数展开法没有计算出峰的存在, 导致传统的相位匹配曲线与允许角和允许波长三者存在矛盾, 即在相位匹配曲线的斜率为零点附近, 波长变换很大的范围, 相位匹配角变化在允许角范围之内, 意味这点存在大的允许波长。传统计算方法产生的矛盾在于其前提是假定允许量是小量, 所以在允许量很大时必然与实际偏离较大。计算表明许多非线性晶体都存在允许波长峰。同时利用定义计算发现, 允许量在较小时, 允许增大量和允许减小量几乎相等; 但随着允许量增大, 就呈现不严格对称, 可以进一步分为允许增大量和允许减小量(如图中标有+、-的曲线)。

5 超宽带二次谐波的产生

由于晶体存在大的允许波长峰, 计算表明在峰附近, 大多数 10 mm 长晶体的倍频允许波长都可以超过 100 nm, 这就意味允许带宽超过 100 nm 的超宽带倍频是可行的。由于这些峰的位置分别是: BBO 晶体的 I 类相位匹配: 1.54 μm ; BBO 晶体的 II 类相位匹配: 1.51 μm ; KTP 晶体 II 类相位匹配: 1.78 μm ; LBO 晶体 II 类相位匹配: 1.48 μm ; ATP 晶体 I 类相位匹配: 1.05 μm ; DKDP 晶体 1.06 μm 。这些波段都可以进行超宽带的二次谐波产生。

我们采用脉冲 532 nm 激光抽运温度调谐 MgO : LiNO₃ 光学参量振荡器产生 0.8 μm ~ 1.6 μm 可调谐激光, 利用 BBO 晶体 I 类相位匹配进行二次谐波产生, BBO 晶体切割为 30°, 长度为 7 mm。在实验中, 当调谐激光波长在 1.5~ 1.6 μm 范围变化时, 固定倍频晶体, 发现仍然有明显的二次谐波产生。

结论 本文利用精确数值计算修正了二次谐波产生中允许参量的传统计算结果, 计算出允许波长峰的存在, 这种精确计算方法也可以用于光学参量过程, 如对增益带宽的精确计算。

参 考 文 献

- [1] 姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术. 北京: 科学出版社, 1995. 1~ 67
- [2] Yao Q, Fahlen S. Calculations of optimum phase match parameters for the biaxial crystal KTiOPO₄. *J. Appl. Phys.*, 1984, **55**(1): 65~ 68
- [3] Yao Jianquan, Sheng Weidong, Shi Weiqiang. Accurate calculation of the optimum phase-matching parameters in three-wave interactions with biaxial nonlinear-optical crystals. *J. Opt. Soc. Am. (B)*, 1992, **9**(6): 891~ 902
- [4] Skeldon M D, Craxton R S, Kessler T J *et al.*. Efficient harmonic generation with a broad-band laser. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1992, **QE 28**(5): 1389~ 1399
- [5] Richman B A, Bisson S E, Trebino *r et al.*. Achromatic phase matching for tunable second-harmonic generation by use of a grism. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16): 1223~ 1225

Amendatory Calculation of the Acceptance Parameters in Three-Wave Interactions

Wang Jie Yao Jianquan Li Xifu Yu Yizhong Shi Xiangchun

(College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Optoelectronic Information Science and Technology Laboratory, Tianjin University, Tianjin 300072)

(Received 30 August 1999; revised 5 November 1999)

Abstract: The traditional method of calculation for the acceptance parameters by Taylor expansion in three wave interactions is only suitable for the condition of small acceptance parameters. The accurate calculation method of the acceptance parameters by means of definition is given. Through numerical calculation some values of acceptance parameters are corrected, and some super wide acceptance wavelength bands of SHG in nonlinear crystals are found, which are almost tens times larger than that calculated by traditional method. It suggests the possibility of obtaining super acceptance spectral bands in 1 cm long crystal for SHG.

Key words: three wave interactions; acceptance parameters; super wide acceptance spectral band