

制约纳秒级 OPO 输出线宽的因素及部分数值计算

黄 骝 张少军 王 丽 李延廷

(北京工业大学应用物理系,北京,100022)

摘要: 在“计算机-单片机定量高精度控制 BBO-OPO 宽频带窄线宽多波长输出”实验的基础上,专门讨论了制约纳秒级 OPO 输出线宽的因素,并作了部分数值计算。

关键词: 光参量振荡器 输出线宽 角度调谐 相位失配

The factors that restrict ns grade OPO exporting line width and sectional calculation

Huang Liu, Zhang Shaojun, Wang Li, Li Yanting

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

Abstract: The article discuss that restricts factors of ns grade OPO export line width specially on the project base which computer and micro controller control BBO-OPO wide frequency band narrow line width which is ration and high precision, meantime go on calculating.

Key words: OPO export line width angle harmony photo corner loss coordination

引 言

光参量振荡器(OPO)是波长可调谐的相干光光源,其特点是结构简单,从红外到紫外,包括可见光,调谐范围大,工作可靠,转换效率高,重复频率可以很高,并可以实现小型化与全固体化。

绝大多数 OPO 及 OPO 应用系统都对输出的单色性有一定要求,即对输出线宽有一定要求。项目“计算机-单片机高精度定量化控制 BBO-OPO 多波长输出”的实验包括了“实现窄线宽输出”的内容,我们以实验为基础,对制约纳秒级 OPO 输出线宽的主要因素进行了分析,并对部分数据进行了数值计算处理,为了在实验中获取高质量的参量光输出,在压缩线宽方面,从理论和实验上都作了一定的探讨。

下面从泵浦光、非线性晶体的高增益系数对输出线宽的影响及参量噪声自发辐射与信号光的线宽的关系几个方面加以讨论。

1 泵光对输出参量光线宽的影响

在 OPO 中,泵光的线宽以及发散角、泵光的偏轴泵浦对参量光的线宽都有重大的影响。

1.1 泵光的线宽对参量光的影响^[1]

当泵光有一定的频带宽度,即有一定的线宽,入射非线性晶体时,形成多波长泵浦,在参量光产生过程中,造成信号光的多模产生即频率发散,形成信号光的线宽并满足

式中, w_p 为泵光线宽, w_s 为信号光线宽, w_i 为闲频光线宽。在特定的高增益范围内, $2 G_s L = 30$, $G_s L$ 是三波互作用长度, G_s 是小信号增益。信号光作为高斯脉冲其对应的频谱

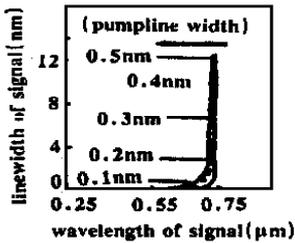


Fig. 1 Pumplinewidth effect to linewidth of signal

宽度近似为输出谱线宽度的 0.3 倍, 即泵光线宽产生的信号光线宽为

$$w_s = 0.3 \frac{n_{eff p} - n_{eff i}}{n_{eff s} - n_{eff i}} \frac{w_p}{\lambda_p} \quad (2)$$

式中, $n_{eff j} = n_j + (\partial n_j / \partial \lambda_j) \lambda_j$, $j = p, s, i$ $\partial n_j / \partial \lambda_j$ 是非线性晶体的光学色散。

对(2)式作数值计算, 设定泵光线宽为 0.1, 0.2, ..., 0.5nm 时, 对应信号光线宽的关系曲线如图 1。由图 1 看出, 泵光线宽越大, 在简并点(7094nm)处, 泵光线宽对信号线宽影响明显增大。当泵光线宽为 0.5nm 时, 信号光线宽可达 15nm 左右。

1.2 泵光偏轴泵浦对信号光线宽的影响

泵光入射晶体时, 光束方向没有严格地沿轴向传输, 而是与轴向夹角 θ , 如图 2, 参量光与泵光在晶体内进行非线性相位匹配, 设泵光光束直径为 w_p , 信号光与泵光的夹角 $\theta = \text{tg}(w_p / L) \approx w_p / L$ 内, 产生参量光。大于 θ 角方向的信号光, 偏出泵光作用区域, 仅在 w_p 范围内信号光得到增益放大并输出。实验中, 泵光光束直径 $w_p = 3\text{mm}$, BBO 晶体长 $L = 15\text{mm}$, 在 θ 约 0.2rad 情况下, 满足相位匹配的信号光得到增益。当 θ 很小时, 有

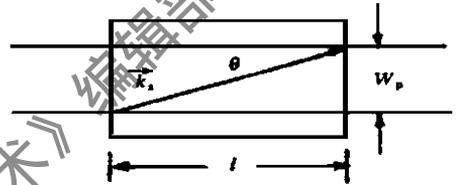


Fig. 2 Deviate from axle pump laser beam phase coordination

$$k = k_p - k_s \approx k_i + (k_p k_s k_i)^2 / 2 = k_p k_s^2 / 2 k_i \quad (4)$$

$$\theta = \text{d} \theta / \text{d} k \approx \left[\frac{1}{n_{eff s}^2 / \lambda_s^2 - n_{eff i}^2 / \lambda_i^2} \right]^2 \quad (5)$$

式中, k 为相位失配, k_p, k_s, k_i 分别为泵光、信号光、闲频光的波矢值, n_p, n_s, n_i 分别是晶体对泵光、信号光、闲频光的折射率; $\lambda_p, \lambda_s, \lambda_i$ 分别为泵光、信号光、闲频光的波长。

取 θ 为 0.3rad, 0.2rad, 0.1rad 时, 信号光线宽与波长的关系曲线由数值计算给出, 如图 3。偏轴方向泵光与满足相位匹配的信号光夹角越大, 所产生的信号光线宽越大, 简并点泵光与信号光波矢夹角小于 0.2rad 时, 信号光线宽约为 200nm。

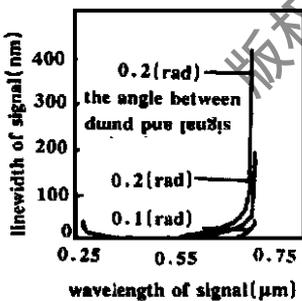


Fig. 3 Deviate from axle phase linewidth of signal

1.3 泵光发散角的影响

泵光的发散角对参量光谱线宽度的影响等效于不同泵光进行相位匹配时, 与晶体光轴夹不同角的情况。

设 θ 为泵光发散角, n_p 是 BBO 晶体对泵光的折射率, 泵浦光发散角引起的信号光线宽为

$$w_s = (d \theta / d k) \theta = (d \theta / d k) \theta / n_p \quad (6)$$

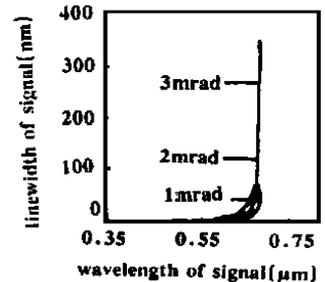


Fig. 4 Pump laser beam effect

对上式进行数值计算,得泵光发散角与信号光线宽的关系,如图4。从图中看到,简并点处,信号光线宽约为几百纳米,在远离简并点处几乎为0。

从以上讨论及数值计算的结果知道:泵光对信号光线宽影响的最大因素是发散角,要得到窄线宽输出的参量光,应采用发散角小的高质量泵浦源。

2 非线性晶体的高增益系数对参量光线宽的影响

在共线匹配下,信号光光强 $I_s(z)$ 按下述规律增强 $I_s(z) = I_{s0} \exp(2 G_s z)$ (7)

式中, I_{s0} 起源于参量噪声光强, G_s 为增益系数^[1,2] $G_s = (G_{s0}^2 - k^2/4)^{1/2}$ (8)

$$G_{s0} = (32 \pi^2 / c^3) n_s n_i n_p I_p(0) / n_s n_i n_p \quad (9)$$

对于高增益取 $2 G_s L = 30$, 且 $k = 2 [\ln(2 G_{s0} L)]^{1/2} = 6.5 L$ (10)

实验中,晶体长 15mm,并认为是最佳作用长度。相位匹配时,

$$k = k_{p0} - k_{s0} - k_{i0} = 0 \quad (11)$$

$$k_j = 2 n_j / \lambda_j \quad (j = p, s, i) \quad (12)$$

非线性晶体中对参量光的高增益引起的相位失配

$$k_s = k_{s0} + \Delta k_s \quad (13)$$

$$k_i = k_{i0} + \Delta k_i \quad (14)$$

$$k = -k_s - k_i \quad (15)$$

相位失配又引起频率变化 d

$$dk = (dk_s/d\lambda_s - dk_i/d\lambda_i) d\lambda \quad (16)$$

$$dk_s/d\lambda_s = 2 n_s / \lambda_s^2 + 2 n_s (dn_s/d\lambda_s) = 2 n_{eff_s} / \lambda_s^2 \quad (17)$$

$$dk_i/d\lambda_i = 2 n_i / \lambda_i^2 + 2 n_i (dn_i/d\lambda_i) = 2 n_{eff_i} / \lambda_i^2 \quad (18)$$

式中, $dn_{s,i}/d\lambda_{s,i} = (-2 n_{s,i} / \lambda_{s,i}^2) d\lambda_{s,i}$ 。由以上关系得线宽

$$= \left| \frac{d\lambda}{dk} \right| k \frac{1}{24 [n_{eff_s}^2 / \lambda_s^2 - n_{eff_i}^2 / \lambda_i^2] L} \quad (19)$$

对上式进行数值计算,得高增益系数引起的信号光线宽和闲频光线宽曲线如图5和图6,从中知道,参量光线宽在简并点处达最大,约1nm,远离简并点处,约为0,同时说明:简并点处,参量光输出能量最大。

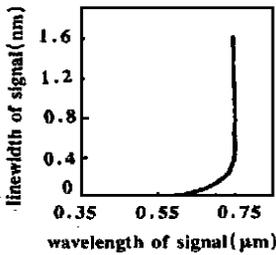


Fig. 5 High gain coefficient effect

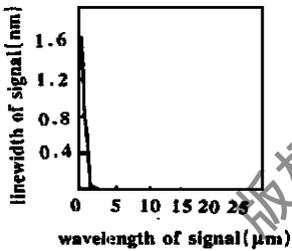


Fig. 6 High gain coefficient effect

3 参量噪声自发辐射的影响

在光参量振荡器的三波相互作用过程中,信号光是在与泵光满足相位匹配,且获得足够增益的参量噪声信号的基础上增益发展起来的。

下面讨论参量噪声自发辐射对参量光线宽的影响。设在自发参量噪声中只有一个闲频光子,泵光光子与闲频光光子通过极化波的耦合产生信号光,同时产生增益放大后输出。

当量子化的模体积内已有一个闲频光子,泵浦光光场与该闲频光子在极化波耦合的过程中实现差频,在所有方向上辐射出信号光波。量子体积记为 V ,相邻的单位波矢空间间隔内的噪声辐射模数为

$$P_p = [V / (2\pi)^3] dk_q dk_p dk_m \quad (20)$$

在晶体单位体积内,单位面积上,频率在 $\omega_i - \omega_i + \omega_i$ 之间的波矢 k_i 闲频光方向,在 $\omega - \omega + \omega$

之间闲频光强度 $d(p_i/A) = [h \nu_i^3 n_i^3 / (2c)^2] d \nu_i$ (21)

式中, ν_i 为闲频光角频率, c 是真空中光速, h 为普朗克恒量, n_i 是晶体对闲频光折射率, p_i 为闲频光的功率, A 为三波互作用的有效截面积。对于信号光波矢与泵浦光波矢夹角微元内和角频率变化范围 ν_s 内射功率^[2]

$$p_s = \frac{4}{8} \nu_i^2 \nu_s^2 \frac{h^2 n_s^2 L p_p}{c^5 n_i n_p} \text{sinc}^2 [1/2(b \nu_s - g^2) L] d \nu_s$$
 (22)

式中, $b = \partial k_s / \partial \nu_s - \partial k_i / \partial \nu_i$ (23)

$$g = k_s k_i / 2 k_i$$
 (24)

g 为角色散, b 为频率色散常数。

进一步推导得出:在非线性晶体允许的走离角内信号光功率为

$$p_s = \frac{4}{8} \nu_i^2 \nu_s^2 \frac{h^2 n_s^2 L p_p}{c^5 n_i n_p b} \text{ (25)}$$

令 $b \nu_s - g^2 = 2$

信号线宽为 $\nu_s = 0.3(g^2 + 2/L)^2 / (2bc)$ (27)

在 $\theta = 0.05, 0.02, 0.1, 0.2$ 时, (27) 式数值计算的曲线如图 7, 即参量噪声信号光线宽曲线, 并知道:走离角 θ 越大, 自发辐射参量噪声信号引起的信号线宽越大。

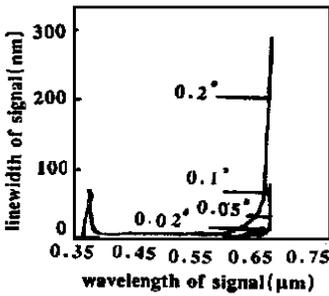


Fig. 7 Spontaneous radiation lead to linewidth of signal

4 结 语

在可调谐相干光辐射源技术中^[3,4],单色性好是一个基本要求,即线宽窄的要求。从理论与实验知道,光参量振荡器的输出线宽主要取决于非线性晶体、泵浦源和自身结构。

温度变化当然也能影响参量光输出线宽。在用温控调谐的光参量振荡器中,由于温度空间梯度存在及热惯性导致的传导温度起伏,都引起参量光综合线宽宽度加宽,关于这方面内容,我们就不进一步讨论了。

上面分析了纳秒级光参量振荡器输出线宽的几种主要制约因素,对于皮秒量级脉冲及超短脉冲,脉冲走离及群速度色散也影响参量光线宽。

为获得窄线宽的参量光输出,可采用窄线宽和发散角小的泵浦源;并尽量减小相位失配;在腔内插入压窄线宽的器件与装置,如棱镜、光栅、标准具等。

参 考 文 献

- 1 王 丽. 光参量效应作钛宝石激光脉冲选取放大并频率展宽的研究. 北京工业大学博士学位论文, 1998
- 2 李恭亮. 非线性光学. 北京:北京电子光学学会激光专业委员会出版, 1984
- 3 姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术. 第一版, 北京:科学出版社, 1995:198
- 4 刘颂豪, 赫光生. 强光光学及其应用. 第一版, 广州:广东科技出版社, 1995:136

作者简介:黄 骊,男,1937 年出生。博导,教授。主要从事超短脉冲固体激光器研究。