

光参量振荡器线宽研究

韦春龙

(上海科技大学无线电系, 上海 201800)

范琦康

(浙江大学光科系, 杭州 310027)

摘 要 对 0.532 μm 波长光泵浦的 BBO 光参量振荡器产生线宽的机制进行了详细分析和计算, 结果与实验基本一致, 实验结果表明泵浦光发散角是产生线宽的主要因素。文中的分析方法可推广至其它单轴晶体光参量振荡器线宽的分析。

关键词 光参量振荡器, BBO, 线宽。

1 引 言

光参量振荡器(OPO)是产生可调谐相干辐射的重要手段。近年来, 运用新型晶体 BBO, LBO, KTP 等制成了宽调谐高效率的光参量振荡器。然而, I 型相位匹配的 BBO、LBO 等光参量振荡器, 其输出线宽却较大, 可达几十纳米^[1], 影响了这类器件的实际应用。因此, 有必要对其产生线宽的机制作深入的研究。此外, II 型相位匹配的光参量振荡器输出线宽却较 I 型的窄得多^[2], 是获得窄线宽的有效而简单的手段。文中对 0.532 μm 泵浦的 I 型和 II 型 BBO 光参量振荡器产生线宽的机制作了详细分析和计算, 并与实验结果进行了比较, 基本一致。

2 理论分析与计算

光参量振荡器产生线宽的因素可以归纳为四个方面, 其中三个方面可通过将失配波矢 $\Delta k = k_s - k_o - k_i$, 对中心频率(ω_{s0} , ω_{i0}) 作泰勒展开, 略去二次以上项, 得到一个简单的线宽表达式为

$$\delta\omega = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4dg}}{2d} \quad (1)$$

用波长表示为:

$$\Delta\lambda = -\lambda^2\delta\omega/2\pi c \quad (2)$$

2.1 泵浦光功率超过参量光振荡阈值一定倍数而引起的线宽^[3]:

这时, 参量频率对为 $\omega_s = \omega_o + \omega_i$, $\delta\omega_s = -\delta\omega_o = \delta\omega_i$; (1)式中参数

$$b = \frac{\partial k_s}{\partial \omega} - \frac{\partial k_i}{\partial \omega}, \quad d = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 k_s}{\partial \omega^2} + \frac{\partial^2 k_i}{\partial \omega^2} \right), \quad g = -\Delta k,$$

Δk 由 $\sin^2(\Delta kl/2) = 1/N$ 式决定, 其中, $k_p, k_s, k_i, \omega_p, \omega_s, \omega_i$ 分别为泵浦, 信号, 空闲光波矢和光频率, l 为腔长, N 为泵浦光强超阈倍数。

1) 对于 I 型相位匹配

$$\text{在简并点处, } b = 0, \quad |\Delta k| = \frac{(\delta\omega)^2}{c} \left(2 \frac{\partial n}{\partial \omega} + \frac{\omega_p}{2} \frac{\partial^2 n}{\partial \omega^2} \right) \Big|_{\omega_p/2} \quad (3)$$

$$\text{远离简并点处, } |\Delta k| = \left| \frac{\delta\omega}{c} (n_s - n_i + \omega_s \frac{\partial n_s}{\partial \omega} - \omega_i \frac{\partial n_i}{\partial \omega}) \right| \quad (4)$$

其中, n_s, n_i 分别为信号, 空闲光折射率。

2) 对于 II 型相位匹配

$$\text{一般地, } |n_s - n_i| \gg \left| \omega_s \frac{\partial n_s}{\partial \omega} - \omega_i \frac{\partial n_i}{\partial \omega} \right|, \quad |\Delta k| = \left| \frac{\delta\omega}{c} (n_s - n_i) \right| \quad (5)$$

下面分别计算 $0.532 \mu\text{m}$ 泵浦的 I 型和 II 型 BBO 光参量振荡器在腔长为 5 cm , 调谐宽度 $0.96 \mu\text{m} \sim 1.2 \mu\text{m}$ (晶体切角 $\theta = 22.5^\circ$) 时, 超阈倍数与输出线宽的关系。在简并点处, 两种 (I, II) 相位匹配条件下, 输出线宽随泵浦光超阈倍数和调谐波长变化的关系, 分别如图 1 和图 2 所示。从图中可见, 在简并点处, 线宽急剧上升, II 型较 I 型小得多; 而线宽随调谐波长变化, II 型比 I 型平缓, 但在简并处最大。

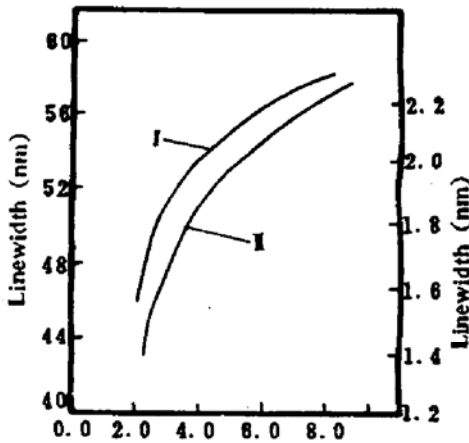


Fig. 1 Linewidth vs. times above threshold

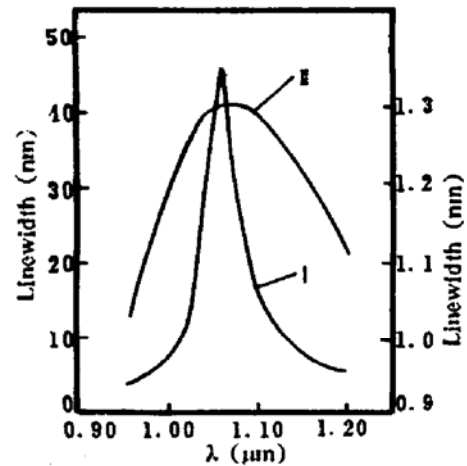


Fig. 2 Linewidth vs. wavelength

2.2 泵浦光本身线宽导致输出线宽;

由于泵浦光源为多纵模输出, 因而存在一定的线宽 $\delta\omega_p$, 这就引起了一定的参量输出线宽。这时, 参量频率对为 $\omega_s = \omega_p + \omega_i$, $\delta\omega_s = \delta\omega_p + \delta\omega_i$, $\delta\omega_s = \delta\omega$; (1) 式中,

$$b = (\partial k_s / \partial \omega) - (\partial k_i / \partial \omega) - (\partial k_i / \partial \omega^2) \delta\omega_p, \quad d = (1/2) [(\partial^2 k_s / \partial \omega^2) + (\partial^2 k_i / \partial \omega^2)], \quad (6)$$

$$g = (1/2) [(\partial^2 k_i / \partial \omega^2) - (\partial^2 k_s / \partial \omega^2)] \delta^2\omega_p + [(\partial k_i / \partial \omega) - (\partial k_s / \partial \omega)] \delta\omega_p, \quad (7)$$

利用 2.1 节中给出的 BBO 光参量振荡器参数计算 $\delta\omega_p$ 引起的线宽 $\delta\omega_s$ 。图 3 给出了 $0.532 \mu\text{m}$ 泵浦的 I 型、II 型相位匹配条件下 BBO 光参量振荡器在简并点处, 参量线宽随泵浦线宽变化曲线。由此可见, 泵浦频率微微变化, 则导致较大的输出线宽。图 4 给出了当泵浦线宽 $\delta\lambda_p = 0.1 \text{ nm}$ 时, 输出参量线宽随调谐波长变化的情形, 可见在简并点处, 曲线急剧上升, 表明输出参量线宽很大。图 3 表明在 II 型条件下, 在简并点处, 泵浦线宽与输出参量线宽近似成线性关系。这是因为在简并点处,

$$\lambda_s = \lambda_i = 1.064 \mu\text{m},$$

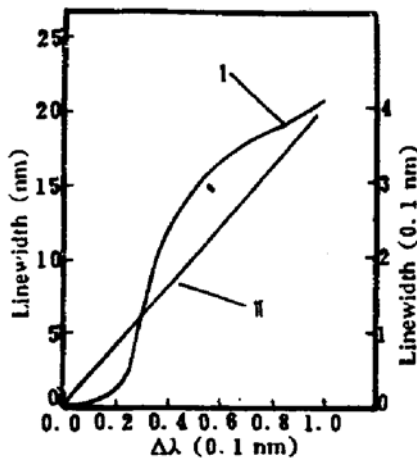


Fig. 3 Linewidth vs. pump linewidth

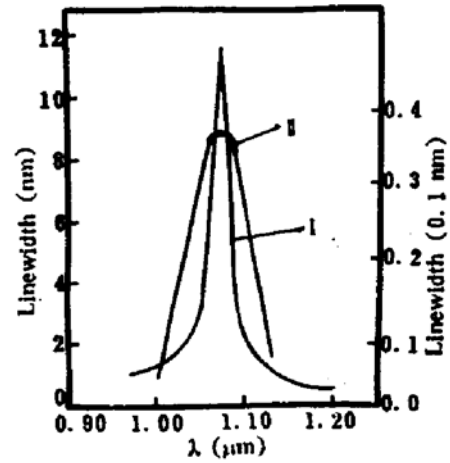


Fig. 4 Linewidth vs. wavelength

$$(\partial k_s / \partial \omega) = (\partial k_i / \partial \omega), \quad (\partial^2 k_s / \partial \omega^2) = (\partial^2 k_i / \partial \omega^2),$$

$$\text{而} \quad |(\partial^2 k_i / \partial \omega^2) - (\partial^2 k_r / \partial \omega^2)| \gg |(\partial k_i / \partial \omega) - (\partial k_r / \partial \omega)|,$$

故 $\delta \omega_s \propto \delta \omega_r$ 。从而, $\Delta \lambda_s \propto \delta \omega_r$ 近似成线性关系。图 4 为在 I' 型匹配条件下, 泵浦光典型线宽 $\delta \lambda = 0.1 \text{ nm}$ 时, 输出参量线宽随调谐波长在 $0.96 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 变化情形。从上面两图, 显见 I 型相位匹配的光参量振荡器具有显著的窄线宽特性。

2.3 泵浦光发散角引起的线宽

泵浦光总存在一定的发散角, 当其入射到晶体上时, 各个方向上相位匹配的参量频率对 (ω_s, ω_i) 在晶体中都有所不同, 这就导致了参量光的输出线宽。这时, 参量频率对

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i, \quad \delta \omega_s = -\delta \omega_i = \delta \omega \quad (8)$$

1) 对于 I 型相位匹配: 泵浦光 ω_p 取 e 光偏振态, 信号光及空闲光 ω_s, ω_i 皆取 o 光偏振态。

$$\text{这时(1)式中,} \quad b = \frac{\partial k_s}{\partial \omega} - \frac{\partial k_i}{\partial \omega}, \quad d = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 k_s}{\partial \omega^2} + \frac{\partial^2 k_i}{\partial \omega^2} \right), \quad (9)$$

$$g = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 k_r}{\partial \theta^2} \delta^2 \theta - \frac{\partial k_r}{\partial \theta} \delta \theta. \quad (10)$$

$k_r = n_r(\theta)\omega_p/c$, θ 为泵浦光与晶轴之夹角。

用 2.1 节中的参数计算 $0.532 \mu\text{m}$ 泵浦的 BBO 光参量振荡器线宽。图 5 中 I 表明在 I 型相位匹配条件下, 简并点处 $\lambda_s = \lambda_i = 1.064 \mu\text{m}$, 很小的泵浦光发散角将引起非常大的线宽。图 6 中 II 给出了当泵浦光发散角 $\delta \theta = 1 \text{ mrad}$ 时, 输出参量线宽随波长变化的情形, 可见, 简并点处线宽上升较快。

2) 对 II 型相位匹配的负单轴晶光参量振荡器, 泵浦光 ω_p 和信号光 ω_s 取 e 光偏振态, 空闲光 ω_i 取 o 光偏振态, 这时,

$$b = \frac{\partial k_s}{\partial \omega} - \frac{\partial k_i}{\partial \omega} + \frac{\partial^2 k_s}{\partial \omega \partial \theta} \delta \theta, \quad d = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 k_s}{\partial \omega^2} + \frac{\partial^2 k_i}{\partial \omega^2} \right), \quad (11)$$

$$g = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 k_s}{\partial \theta^2} - \frac{\partial^2 k_r}{\partial \theta^2} \right) \delta^2 \theta + \left(\frac{\partial k_s}{\partial \theta} - \frac{\partial k_r}{\partial \theta} \right) \delta \theta. \quad (12)$$

用 2.1 节中参数进行计算。图 5 中 II 表明在 II 型相位匹配条件下, 在简并点处, 输出线宽与

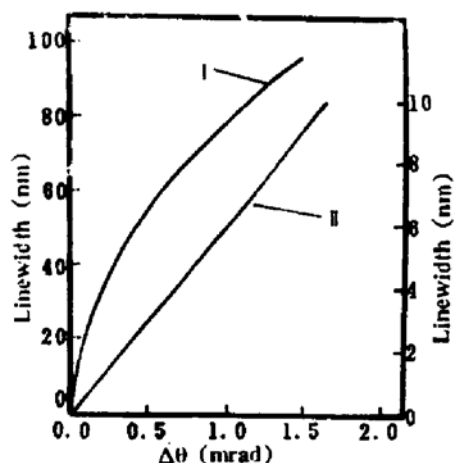


Fig. 5 Linewidth vs. divergent angle of pump beam

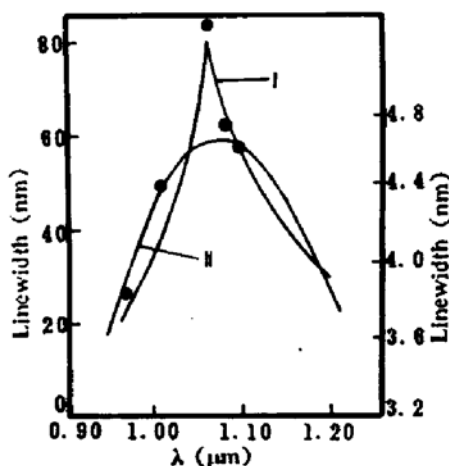


Fig. 6 Linewidth vs. divergent angle of pump beam

泵浦光发散角近似成线性关系。这是由于在简并点处，

$$\begin{aligned} \partial k_s / \partial \omega &= \partial k_i / \partial \omega, & \partial^2 k_s / \partial \omega^2 &= \partial^2 k_i / \partial \omega^2, \\ (1/2) |(\partial^2 k_s / \partial \theta^2) - (\partial^2 k_i / \partial \theta^2)| &\gg |(\partial k_s / \partial \theta) - (\partial k_i / \partial \theta)| \end{aligned}$$

故 $\Delta\lambda \propto \delta\theta$ 。图 6 中 I 给出了当泵浦光发散角 $\delta\theta = 1$ mrad 时，输出参量光线宽随波长 $0.96 \sim 1.2 \mu\text{m}$ 变化的情形。

2.4 有效腔长波动导致输出线宽

文献[4]给出了当腔长漂移 $1/4$ 波长时，输出线宽的计算表达式为

$$\Delta\lambda_{\text{双共振}} = -\frac{\lambda_s^2}{4l} \left(\frac{n_i}{n_s} \frac{1}{n_i - n_s} \right), \quad \Delta\lambda_{\text{单共振}} = \frac{\lambda^2}{4l n_s}, \quad (13)$$

对于 BBO 光参量振荡器，当 $\lambda_p = 0.532 \mu\text{m}$, $\lambda_s = 1.0 \mu\text{m}$, $\lambda_i = 1.136 \mu\text{m}$ ，则 $n_s = 1.653756$, $n_i = 1.656423$, $l = 5$ cm，算得， $\Delta\lambda_{\text{双共振}} = 1.87$ nm, $\Delta\lambda_{\text{单共振}} = 0.003$ nm。

当参量光接近简并点时， $\lambda_s = 1.06 \mu\text{m}$, $\lambda_i = 1.068 \mu\text{m}$ ，则 $n_s = 1.655055$, $n_i = 1.655212$ ， $\Delta\lambda_{\text{双共振}} = 36$ nm, $\Delta\lambda_{\text{单共振}} = 0.0034$ nm。

3 实验与讨论

BBO 光参量振荡器实验装置如图 7

所示。晶体参数为： $\theta = 22.8^\circ$, $\varphi = 0^\circ$ ，尺寸：宽 \times 高 \times 长 = $8.5 \times 9.7 \times 7.7$ mm³，晶体端面未镀膜。M₁, M₂ 在 $1.06 \mu\text{m}$ 附近高反 $R = 95\%$ ，对 $0.532 \mu\text{m}$ ，高透 $T = 92\%$ ；M₂ 45° 放置；M₃ 对 $0.532 \mu\text{m}$ 高透 $T = 92\%$ ，对 $1.06 \mu\text{m}$ 附近 $T = 15\%$ 。泵浦光斑直径 2.8 mm。光参量振荡器腔长 $L = 5$ cm。当泵浦光强 $I = 50.4$ mJ；相当于超阈倍数 $N = 2$ 时，测得输出参量线宽(FWHM)如图 6

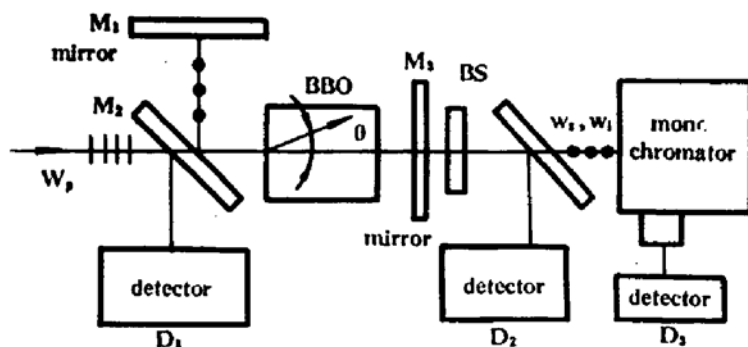


Fig. 7 BBO OPO configuration

C: BBO crystal; M₁, M₂, M₃: reflecting mirrors; F: filter; BS: beam splitter; D₁, D₂, D₃: detectors; Mono: monochromator

中 I。由此可见。它与 2.3 节中计算的由泵浦光发散角引起的线宽曲线十分接近。下面就此进行讨论。

实验测得的线宽为该参量波长半值输出光强的全宽度(FWHM)。而在前面的分析中,所计算的线宽则为 Δk 失配条件下的能够振荡输出参量偏离中心参量波长的线宽,研究结果表明,两者在量级上是一致的。由理论上求得输出参量的线宽(FWHM)是极为困难的。而通过在一定失配条件下估计出参量线宽则是简明有效的方法。在上面的 BBO 光参量振荡器中,由于泵浦光发散角引起的线宽在各因素中占了绝对主导地位,因此,实际测得的输出参量线宽与理论估算线宽基本一致。

结束语 本文已对 0.532 μm 泵浦的 BBO 光参量振荡器的线宽特性作了分析和计算,与实验基本一致。这一分析方法同样适合于其它单轴晶体光参量振荡器的线宽分析。

感谢浙江大学光科系陆祖康教授,吴碧珍高级工程师,邱文法工程师在论文实验中给予的热心指导和帮助。

参 考 文 献

- [1] W. R. Bosenberg, W. S. Pelouch, C. T. Tang, High-efficiency and narrow-linewidth operation of a two-crystal β -BaB₂O₄ optical parametric oscillator. *Appl. Phys. Lett.*, 1989, **55**(19): 1952~1954
- [2] W. R. Bosenberg, C. L. Tang, Type I phase matching in a β -barium borate optical parametric oscillator. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, **56**(19): 1819~1821
- [3] 沈元壤, 非线性光学, 北京, 科学出版社, 1987: 125~144
- [4] 范琦康, 吴存恺, 毛少卿, 非线性光学. 南京, 电子工业出版社, 1989: 92~95

Linewidth Analysis in a BBO Optical Parametric Oscillator

Wei Chunlong

(Department of Electronic Engineering, Shanghai University of Science & Technology, Shanghai 201800)

Fan Qikang

(Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 300027)

(Received 3 August 1994; revised 23 January 1995)

Abstract The numerical and experimental analysis of linewidth in a BBO optical parametric oscillator (OPO) pumped by a laser at 0.532 μm is made. The results indicate that the divergent angle of pump beam is the main factor of linewidth in BBO OPO. The analysis method of linewidth in this paper is also suitable for other uniaxial crystal OPOs.

Key words BBO, OPO, linewidth.