

种子注入对可调谐光学参量振荡激光器阈值和转换效率影响的理论与实验研究*

张裕飞 邓道群 张秀兰 冯宝华 张东香 许祖彦

(中国科学院物理研究所, 北京 100080)

王先运 张兆臣

(泰山医学院放射系, 泰安 271000)

提要 通过对种子注入调谐光参量振荡激光器的理论计算,从理论上证明了种子注入法不仅能压窄参量激光的线宽,还能降低参量振荡激光器振荡的阈值,增大其输出参量激光的能量,提高输出激光能量的转换效率,并在实验上给予证明。

关键词 种子注入,光参量振荡器,振荡阈值,能量转换效率, BBO

1 引言

近年来,由于高效非线性光学晶体,如 β -BaB₂O₄(BBO)晶体的发明,使利用BBO作增益介质,用ns脉冲激光作泵源的光学参量振荡器能产生可以从紫外到红外波段连续调谐的高效率参量激光。可自由运转的BBO光学参量振荡器(OPO)输出激光的线宽较宽,其光谱亮度还不够强,不能满足某些高分辨率光谱技术及激光化学等领域的需要,因而参量激光的窄线宽、高能量输出技术研究一直是一大热点。

利用窄线宽(或单模)种子源以信号波或闲置波形式注入OPO谐振腔已被证明是一种准确有效的压窄OPO激光线宽的方法^[1~3]。并且实验发现,种子注入方法不仅能压窄激光线宽,还大大降低了参量激光振荡的阈值,提高了输出激光的能量及能量转换效率^[4~6]。

为指导种子注入OPO系统的设计,关于种子注入OPO的原理已有研究与报道。1979年E. S. Cassedy和M. Jain给出了种子注入光参量振荡激光器的时间特性理论方程组,并对种子注入的成功性进行了研究^[7];1994年M. J. Johnson等利用上述方程组进行数值计算解释了其实验结果^[8]。

上述关于种子注入OPO的理论全都注意于种子注入对压窄参量激光线宽、实现精确调谐方面的研究,还没有关于阈值及效率方面的理论研究。因而本文拟从E. S. Cassedy和M. Jain建立的方程组出发,对种子注入OPO的振荡阈值及能量转换效率进行理论模拟计算及实验研究。

* 中国科学院重点科研资助项目;全部实验在中国科学院物理所光学物理开放实验室完成。

收稿日期: 1995年11月13日;收到修改稿日期: 1995年12月28日

2 理论计算及结果分析

2.1 理论方程组及解法

设 OPO 谐振腔内有 N 个振荡模式,则由文献[7]知,描述此多模振荡的动力学特征的归一化方程组为:

$$\begin{aligned} \frac{dA_p}{dT} &= -A_p - \sum_{n=1}^N \eta_n \sqrt{\alpha_s \alpha_i} A_{ns} A_{ni} + i\beta \\ \frac{dA_{ns}}{dT} &= -\alpha_s A_{ns} + \eta_n \sqrt{\alpha_s \alpha_i} A_{ni}^* A_p \\ \frac{dA_{ni}}{dT} &= -\alpha_i A_{ni} + \eta_n \sqrt{\alpha_s \alpha_i} A_{ns}^* A_p \end{aligned}$$

其中 A_p, A_{ns}, A_{ni} 分别代表泵浦光、第 n 个信号波和第 n 个闲置波的归一化振幅幅值(电场分量为复数); η_n 代表第 n 个模式的归一化耦合系数; α_s, α_i 分别为信号波和闲置波的归一化衰减系数。因在整个增益带宽内各不同信号波(或闲置波)相差很小,所以可以认为对所有 n 个模式,其衰减系数相同; T 为归一化后的时间; β 代表归一化的泵浦振幅强度。

由上可知,若参量振荡有 N 个纵模,则方程组包含 $2N + 1$ 个方程,考虑到振幅为复数,每一个方程可分解为两个实数方程,因而上述方程组可分解为 $4N + 2$ 个一阶微分方程。上述方程组可用定步长龙格-库塔方法(Runge-Kutta)进行数值计算,求得所有振荡模式在不同时刻的幅值。根据不同泵浦条件,种子能量在不同时刻各模式的幅值,我们就可求得 OPO 振荡阈值及输出能量随种子能量的理论变化曲线。计算中,考虑到实际上泵浦波大多为高斯型,因而令 $\beta = \beta(T) = \beta_0 \exp[-\alpha(T - T_0)^2]$ 。

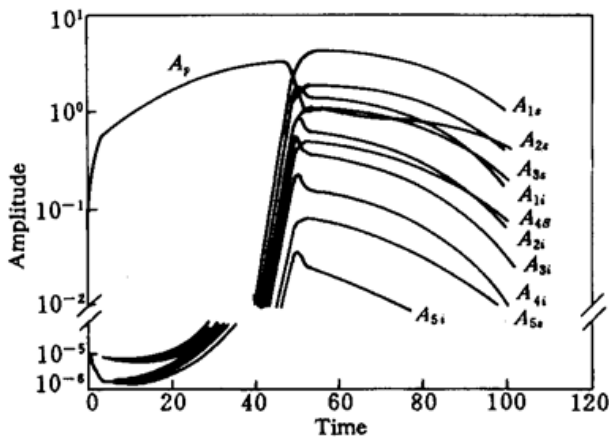


Fig. 1 OPO mode time dynamics (no injection)

Parameters: $\eta_1 = 1.0, \eta_2 = 0.97, \eta_3 = 0.95,$
 $\eta_4 = 0.92, \eta_5 = 0.85, \alpha_s = 0.1, \alpha_i = 1.0,$
 $\beta = 3.5 \exp[-8 \times 10^{-4}(T - 50)^2],$ and $N = 5$

为便于理解,首先考虑不注入种子时,有 5 个振荡模式的参量光的情况,这 5 个模的耦合系数分别为 $\eta_1 = 1.0, \eta_2 = 0.97, \eta_3 = 0.95, \eta_4 = 0.92, \eta_5 = 0.85$ 。OPO 谐振腔对信号波和闲置波的衰减系数为 $\alpha_s = 0.1, \alpha_i = 1.0$, 设各模的初值(噪声强度)为 1.414×10^{-5} ; 令 $\beta = 3.5 \exp[-8 \times 10^{-4}(T - 50)^2]$, 即泵浦光振幅在 $T = 50$ 处达最大值 3.5。把上述数据代入上述方程组编制的计算程序,可获得如图 1 所示曲线。由图 1 知,当 $T \geq 40$ 后,各振荡模由很小的初值增大到较大幅度,开始消耗泵光,实现参量振荡,其中 A_p 代表泵光振幅, $A_{1s}, A_{2s}, \dots, A_{5s}$ 为 5 个模式信号波的时间曲线; $A_{1i}, A_{2i}, \dots, A_{5i}$ 为 5 个闲置波曲线。因 $\eta_1 = 1.0$ 耦合系数最大,所以振幅 A_{1s} 和 A_{1i} 也最大,且

闲置波振幅小于信号波振幅。

2.2 种子注入对阈值的影响

图 2 中实线为无种子注入时 $N = 3, \alpha_s = 0.05, \alpha_i = 0.8, \eta_1 = 0.99, \eta_2 = 1.0, \eta_3 = 0.95$, 初始噪声值为 1.414×10^{-20} 时的 OPO 刚超过阈值振荡时信号波随时间变化的理论曲线。此时泵浦光 $\beta = \beta_0 \exp[-14 \times 10^{-4}(T - 50)^2]$, 其中 $\beta_0 = 9$ 。当以信号波(A_{2s})形式注入种子后,其中

种子初值为 $|A_{2s}|_{T=0} = 1.414 \times 10^{-4}$, 理论计算发现, 当 $\beta_0 = 4$ 时, 此 OPO 就实现了振荡(也是刚过阈值), 如图 2 中虚线所示。图 2 表明, 只有 A_{2s} 得以放大而消耗泵浦光能量, 实现了单模(窄线宽)振荡, 且此时的泵浦幅值 β 只有不注入种子的 $\beta_2/\beta_1 = 4/9$, 即注入种子后, 降低了 OPO 振荡的阈值。由于泵浦能量正比于泵浦幅值(相当于泵浦波的电场分量)的平方, 所以注入种子后, 使阈值降低到原来的五分之一。

对于图 2 情况, 当取 $\beta_0 = 2$ 或其它小于其振荡阈值的数时, 计算发现, 不仅 A_{1s}, A_{3s} 在整个泵浦时间段 ($T = 0 \sim 100$) 得不到放大振荡, 连种子模式 A_{2s} 也不足以放大到振荡; 但通过增大种子的能量, 即 A_{2s} 的幅值, 仍可实现参量振荡。

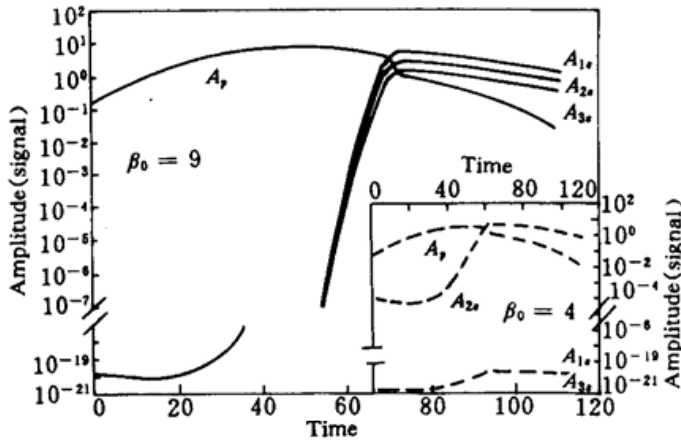


Fig. 2 OPO mode time dynamics (operation just above threshold, with and without injection-seeded). Parameters: $\eta_1 = 0.99, \eta_2 = 1.0, \eta_3 = 0.98, \alpha_s = 0.05, \alpha_i = 0.8, \beta = \beta_0 \exp[-14 \times 10^{-4}(T - 50)^2], N = 3$. real curve; no injection case, and $\beta_0 = 9$; dotted curve; injection case, $|A_{2s}|_{T=0} = 2 \times 10^{-2}$, and $\beta_0 = 4$

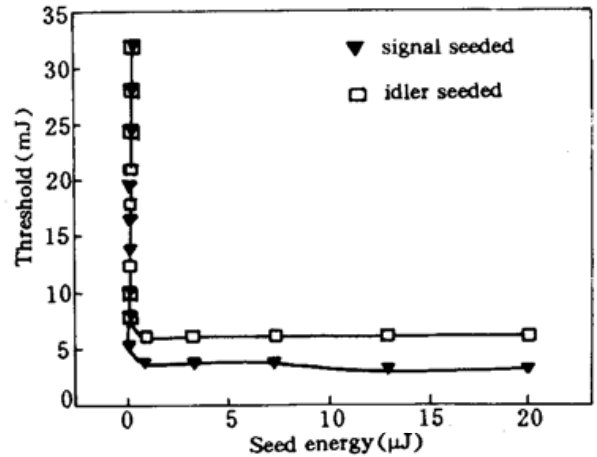


Fig. 3 OPO's threshold versus injection-seeder energy. Parameters are the same as in Fig. 2. The line with triangular symbols; injection-seeding at the signal wavelength; the line with hollow symbols; injection-seeding at the idler wavelength

图 3 中带实三角符号的曲线为利用上述原理计算的 OPO 振荡阈值随注入种子(以信号波形式注入, A_{2s}) 能量变化的理论曲线, 其中各参数与图 2 相同。图中单位为相对值, 其中种子能量为 μJ 量级, 阈值为 mJ 量级。由图知, 注入种子后可大大降低 OPO 振荡的阈值, 可降低约 10 倍左右。当种子能量较小时, 参量阈值随种子的变化较敏感, 种子能量大于 1 后, 阈值的变化就不再明显了。

图 3 中带空心方块符号的曲线为采用闲置波形式 (A_{2i}) 注入 OPO 时的阈值随种子能量变化的理论曲线。图 3 表明, 种子以闲置波注入 OPO, 也能降低 OPO 的振荡阈值, 但降低的倍数比以信

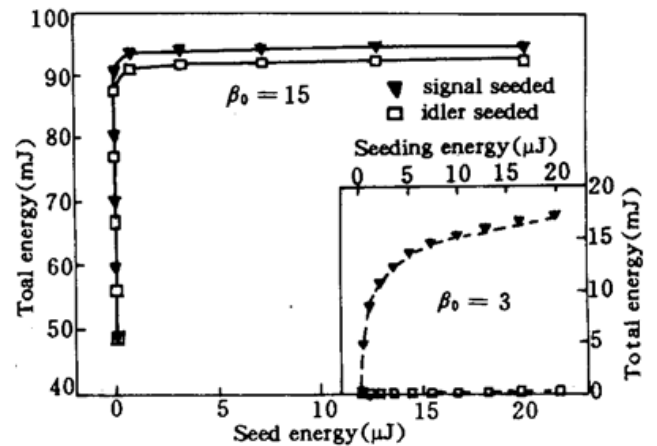


Fig. 4 OPO's energy (signal + idler) versus injection-seeder energy. Parameters same as Fig. 2. The line with triangular symbols; injection-seeding at the signal wavelength; the line with hollow symbols; injection-seeding at the idler wavelength; solid curve; $\beta_0 = 15$; dotted curve; $\beta_0 = 3$

号波形式注入时较小些。主要原因是信号波能在 OPO 腔内谐振。当参量模在 OPO 腔内往复振荡放大的过程中,种子(信号波)都能参予波的相互非线性作用,从而使参量波增长速度较快,消耗泵浦光能量的时间变早;而以闲置波形式注入时,由于 OPO 腔对闲置波不反射(谐振),在参量光返回过程中,种子(闲置波)对相互作用没有贡献,即种子波只能单程参予波的相互非线性作用,所以以信号波形式注入对参量振荡贡献较大,因而其阈值降低的倍数比以闲置波形式注入时较大些。上述种子能量是进入 OPO 谐振内的能量,实际上,对于具有某一能量的种子源,由于种子以信号波形式注入 OPO 谐振腔时,对种子反射较大,进入腔内能量较小;而以闲置波形式注入时,几乎全部种子能量都能进入 OPO 腔内。所以用闲置波形式注入 OPO,同样可以达到压窄 OPO 线宽,大大降低其阈值的目的。

2.3 种子注入对输出激光能量的影响

设 OPO 第 n 个模式信号波的电场分量为 E_{ns} , 磁场分量为 $H_{ns} = \sqrt{\varepsilon/\mu} E_{ns0} \hat{H}_{ns}$, 则能流密度矢量周期平均值

$$S_{ns} = \frac{1}{2} \text{Re}(E_{ns}^* \times H_{ns}) = \frac{1}{2} \text{Re}(E_{ns}^* \times \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_{ns0} \hat{H}_{ns}) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} |E_{ns}|^2$$

设 S_{ns} 在整个截面 S 内都相等, 则在整个泵浦时间内 $(0 - \tau)$, 第 n 个模式信号波的腔内能量为:

$$E_{ns} = \oiint_0^\tau S_{ns} \cdot dS dt = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot S \int_0^\tau |E_{ns}|^2 dt$$

对于所有模式, 都可以得到类似结果。所以 OPO 腔内总能量为:

$$E = \sum_{n=1}^N (E_{ns} + E_{ni}) = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} \cdot S \sum_{n=1}^N \int_0^\tau (|E_{ns}|^2 + |E_{ni}|^2) dt$$

考虑到方程组中 A_{ns}, A_{ni} 为归一化的谐振波幅值(电场分量幅值), 则由上式可得出:

$$E \propto \sum_{n=1}^N \int_0^\tau (|A_{ns}|^2 + |A_{ni}|^2) dt$$

根据此式我们就可求得 OPO 腔内激光能量跟种子能量等参数的变化关系。因当谐振腔不变时, 其腔内能量越大, 则输出激光能量越大, 从而可得出 OPO 输出激光能量与注入种子强度的关系(相对值)。

图 4 带实三角符号的曲线为 $\beta_0 = 15$, 其它参数同图 2, OPO 腔内激光能量随注入种子能量(以信号波形式注入)的关系理论曲线; 其中种子能量为 μJ 量级, 产生激光能量为 mJ 量级。从图可知, OPO 注入种子后腔内激光能量比不注入提高 2 倍左右, 从而输出激光能量转换效率提高 ~ 2 倍。当种子能量较大时, 其腔内参量激光能量随种子能量的变化不再那么明显; 主要原因是注入种子后使该信号波初始值较大, 能很快被放大, 从而比不注入种子大大提前消耗泵浦光能量的时间, 使泵浦光能量更多地转化为参量激光(如图 2, A_{2s} 在 $T > 60$ 后开始消耗泵浦光能量, 若增大 A_{2s} 的初值, 则在 $T < 60$ 就开始消耗泵浦光能量)。若种子激光能量较大, 并再增大时, 其开始消耗泵浦光的时间几乎不再提前, 因而对提高输出激光能量的贡献不再那么显著。图 5 中带空心方块符号的曲线为种子以闲置波形式注入 OPO 中的腔内的情形。从图可知, 由于闲置波不谐振, 所以对参量激光能量的贡献稍小了些。

理论计算还发现, 在不同泵浦条件下(β_0 取不同值)注入种子后, OPO 产生参量激光能量

提高的倍数也有所不同,若 OPO 在刚过阈值处工作,注入种子后,其参量激光能量提高的倍数就较大。图 4 中虚线是 OPO 在小于自由运转阈值的泵浦条件下,腔内激光能量随注入种子能量的关系的理论曲线($\beta_0 = 3$)。当不注入种子时,此 OPO 不振荡,腔内能量为零;随注入种子能量的增大,OPO 开始振荡,腔内能量也随之增大。图中带实三角符号的曲线为以信号波形式注入 OPO 的情况,带空心方块符号的曲线为种子以闲置波形式注入的情形。与图 4 实线相比,此时以闲置波形式注入对 OPO 的贡献很小,但通过继续增大其种子能量,OPO 就可以超过其阈值,实现振荡。

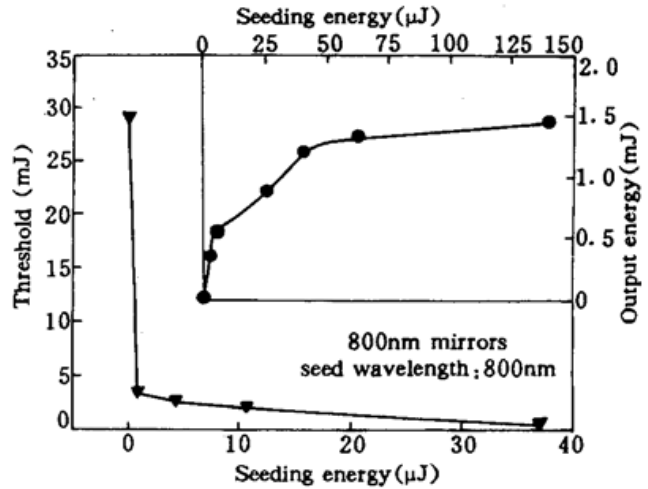


Fig. 5 OPO's experimental threshold and OPO's output energy versus injection-seeder energy

3 实验研究

我们在实验上,对种子注入对 OPO 阈值和输出激光能量的影响也进行了研究,其中 BBO 晶体长 15 mm,截面为 $8 \times 6 \text{ mm}^2$,采用 I 类相位匹配切割, $\theta = 28.5^\circ$, $\phi = 0^\circ$,谐振腔长为 30 mm。用钛宝石激光作种子,以闲置波形式注入 OPO 腔内的实验结果在文献[9]中已有报道,其结果与上述理论结果相同。图 5 是我们采用中心波长为 800 nm 膜片作为 BBO-OPO 谐振腔,用钛宝石激光作种子,以信号波形式(800 nm)注入时的 OPO(其它条件同文献[9]阈值(带三角符号的曲线)和输出激光能量(信号波+闲置波,带圆点符号的曲线)随种子强度变化的实验曲线。从图看出,注入种子后,BBO-OPO 的振荡阈值由自由运转时的 29 mJ 可降低到 3.12 mJ,此时种子能量为 12 μJ ,种子能量为 37 μJ 时,阈值降为 0.48 mJ,降低幅度大于 10 倍;输出激光能量由注入种子能量为 0.08 μJ 时的 0.02 mJ 增大到注入种子能量为 140 μJ 时的 1.45 mJ,因为此时 BBO-OPO 在低于阈值处工作,不注入种子没有能量输出,所以输出能量随种子变化的增幅较大,与图 4 虚线的理论条件相同。实验结果与理论结果有相同的变化趋势。

总之,通过对种子注入 OPO 的理论计算与实验研究,发现种子注入不仅能压窄 OPO 的线宽,还能大大降低其振荡阈值,提高其输出激光能量及能量转换效率。在本实验条件下,注入种子后阈值降低了约 10 倍,能量转换效率大大提高。其随种子强度的变化趋势与理论相符,从而从理论和实验上证明了,种子注入方法是提高 BBO-OPO 输出激光能量及转换效率的一种有效的方法。

参 考 文 献

- 1 J. E. Bjorkholm, H. G. Danielmeyer. Frequency control of a pulsed optical parametric oscillator by radiation injection. *Appl. Phys. Lett.*, 1969, 15 : 171
- 2 A. Fix, T. Schroder, R. Wallenstein *et al.*. Tunable β -barium borate optical parametric oscillator; operating characteristics with and without injection seeding. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, 10(9) : 1744~1750
- 3 A. Fix, R. Urschel, G. Goeritz *et al.*. Single-mode BBO/KNB optical parametric oscillator-amplifier system, broadly tunable from the visible (0.4 μm) to the infrared(4 μm). CLEO'94, 199. CWE3
- 4 A. G. Marunkov, V. I. Pryalkin, A. I. Kholdnykh. Improvement in the conversion efficiency of pulsed optical parametric oscillators using external signal injection. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1981, 11 : 869

- 5 U. A. Abdullin, G. P. Dahotyan, Y. E. D'yakov *et al.*. Investigation of the spectral and energy characteristics of a pulsed optical parametric oscillator operating in the regime of external signal injection. *Sov. J. Quant. Electr.*, 1984, 14 : 538
- 6 F. J. Effenberger, G. J. Dixon. Optical parametric oscillator threshold reduction via intracavity laser seeding. CLEO'94, 94, CTK20
- 7 Edward S. Cassedy, Senior Member, Manoj Jain *et al.*. A theoretical study of injection tuning of optical parametric oscillator. *IEEE J. Quant. Electr.*, 1979, QE-15 : 1290
- 8 M. J. Johnson, J. G. Haub, B. J. Orr. Numerical simulations and realization of a tunable, injection-seeded optical parametric oscillator. CLEO'94, 199, CWE2
- 9 Zhang Yufei, Deng Daoqun, Zhang Xiulan *et al.*. A narrow bandwidth BBO optical parametric oscillator injection-seeded by a tunable pulsed Ti : sapphire laser. *Chinese J. Lasers*, 1996, B5(3) : 193

Numerical Simulations and Experimental Research of OPO Threshold Reduction and Conversion Efficiency Improvement Via Injection-seeding

Zhang Yufei Deng Daoqun Zhang Xiulan

Feng Baohua Zhang Dongxiang Xu Zuyan

(*Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080*)

Wang Xianyun Zhang Zhaochen

(*Department of Radiology, Taishan Medical College, Taian 271000*)

Abstract A detailed theoretical and experimental investigation of an injection-seeded BBO optical parametric oscillator (OPO) is undertaken. We find that the injection—seeding not only reduces the linewidth of the laser output, but also lowers the OPO's threshold and improves the conversion efficiency. The theoretical results agree with the experiments very well.

Key words injection-seeding, optical parametric oscillator, the threshold for OPO's operation, conversion efficiency, BBO