

受激布里渊散射位相共轭激光器自调 Q 机理研究

王国松

(中国人民解放军 92785 部队,河北 秦皇岛 066200)

摘要: 基于受激布里渊散射的位相共轭激光器能够产生自调 Q 脉冲并有效改善光束质量,分析了位相共轭激光器的自调 Q 机理,认为 SBS 属于快开关,可以采用阶跃函数描述而无需考虑过渡腔中复杂 Q 值变化过程,分析了起始腔后反射率、耦合输出率以及 SBS 饱和反射率对 Q 调制过程以及输出脉冲时域和能量特性的影响,认为在设计 SBS 激光器时应在保持阈值前提下选取具有较低后反射率的腔镜和具有较高 SBS 饱和反射率的介质,在综合考虑耦合输出效率前提下优化选取合适的耦合输出率。

关键词: 受激布里渊散射; 位相共轭; 激光器

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)06-1437-06

Research on self-Q-switching mechanism of phase conjugate laser oscillator based on SBS

Wang Guosong

(The 92785 Unit, Chinese People's Liberation Army, Qinhuangdao 066200, China)

Abstract: The phase conjugate laser oscillator based on stimulated Brillouin scattering (SBS) can efficiently improve the beam quality and realize a Q switch function. The mechanism of Q-switch based on SBS was analyzed, the result shows that the SBS effect belongs to fast Q-switch, which can be described by step function instead of consideration of the complicated Q-value changing process. The influencing factors on Q-switched characteristics were analyzed, including the back reflectivity, output coupler and SBS saturated reflectivity. The result shows that in designing of a SBS Q-switched laser, by ensuring the threshold to be reached, lower back reflectivity and higher SBS reflectivity are preferred and the output coupler reflectivity should be optimized also considering on the efficiency.

Key words: stimulated Brillouin scattering; phase conjugation; laser

收稿日期:2012-10-14; 修订日期:2012-11-10

作者简介:王国松(1984-),男,助理工程师,硕士,主要从事自适应光学技术方面的研究。Email:super-wqsong@163.com

0 引言

受激布里渊散射(SBS)位相共轭激光器不仅能改善光束质量,还能够实现自调 Q 过程,产生峰值功率很高的脉冲,具有广阔的应用前景。文中对 SBS 激光器 Q 开关的特性进行了研究,认为可以采用阶跃 Q 开关函数进行描述并进行了求解;对腔镜和 SBS 介质对 Q 脉冲特性的影响进行了分析,发现 SBS 激光器具有不同于一般调 Q 激光器的特性,对于 SBS 激光器的设计具有一定的指导意义。

1 SBS 自调 Q 机理

典型的位相共轭腔型如图 1 所示。图中, L 为起始腔长, L_{SBS} 为位相共轭腔长, M1 为后反射镜, M2 为耦合输出镜, f_1, f_2 组成望远系统将光束聚焦于 SBS 介质中, P 为偏振片。

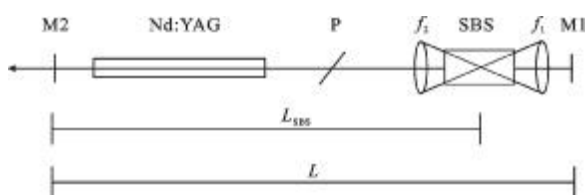


图 1 位相共轭激光器结构示意图

Fig.1 Schematic of phase conjugate laser

下面以该腔型为例对 SBS 自调 Q 过程进行分析。激光开始振荡初期光强较小, SBS 介质不会产生位相共轭效应,随着光强逐渐增加,首先将以较低的阈值通过布里渊增强的四波混频过程(BEFWM)产生位相共轭波^[1-2],如图 2 所示。

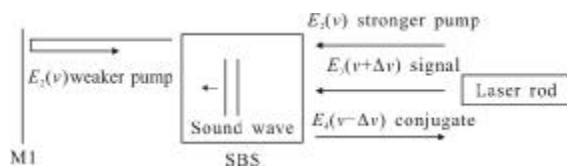


图 2 起始腔中产生的 BEFWM 过程

Fig.2 Producing process of BEFWM in primary resonator

图中, ν 和 $\nu + \Delta\nu$ 为纵模频率, $\Delta\nu = k\Delta\nu_{start}$, $\Delta\nu_{start} = \frac{c}{2L}$ 为起始腔中纵模间隔, k 为正整数。SBS 介质中的超声波场的驱动力正比于 $\nabla^2(E^2)$, E 为 SBS 介质中总的电场强度,其中 E_2, E_3 与 E_1, E_4 将对能量在电场

与超声场的转换产生作用。由 E_2 和 E_3 差频驱动场的速度为: $v_{beat} = \frac{\Delta\nu}{2\nu_L} \frac{c}{n}$, ν_L 为光场频率, n 为折射率;SBS

介质中的本征声波场速度为 $v_{sound} = \frac{v_B}{2\nu_L} \frac{c}{n}$, v_B 为布里渊频移,当 $\Delta\nu = v_B = k\nu_{start}$ 时,起始腔中不同纵模的差频驱动场的频率和速度将与 SBS 本征声场的频率和速度相同,从而有效地驱动 SBS 介质产生频率为 ν_B 的声场, E_1 将与此声场作用产生位相共轭散射波 E_4 。

由于 BEFWM 过程的阈值明显低于 SBS 过程的阈值,当起始腔长满足 $L_{start} = k \frac{c}{2\nu_B}$ 时, SBS 激光器将以较低的阈值产生位相共轭效应。 E_1 与 E_4 产生的差频场将会进一步增强声场,进而使 E_4 不断增强,这等效于增加 SBS 介质的反射率, E_2 将会产生衰减,从而产生 BEFWM 向 SBS 过程的转换,当达到 SBS 饱和反射率时,振荡腔将由起始腔 L 转换为位相共轭腔 L_{SBS} 。

位相共轭腔的衍射损耗将明显低于起始腔,且光学元件数量减少,散射、吸收等损耗也随之减小,因此,由起始腔转变为位相共轭腔后 Q 值将会突增,产生调 Q 脉冲,这就是 SBS 的自调 Q 过程。

2 SBS 自调 Q 理论模型

对四能级系统 Nd:YAG, 调 Q 过程的速率方程为^[3-4]:

$$\begin{cases} \frac{\partial n^*}{\partial t} = -\gamma n^* \phi^* \sigma c N \\ \frac{\partial \phi^*}{\partial t} = \phi^* \left(\sigma c N n^* \frac{l}{l'} - \frac{\epsilon}{t_R} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $n^* = n/N$ 为归一化的反转粒子数密度; $\phi^* = \phi/N$ 为归一化光子密度; N 为 YAG 中 Nd^{3+} 的浓度; γ 为激光上下能级简并度; σ 为发射截面; c 为光速; l 为激光介质长度; l' 为激光腔长; $t_R = \frac{2l'}{c}$ 为光子在腔内往返一周的时间; ϵ 为腔损耗,谐振腔的 Q 值表示为: $Q = \frac{2\pi\nu_0 t_R}{\epsilon}$ 。

中国科技大学对于不同 Q 开关函数进行了深入研究^[5]。根据其所得结果,对于稳变 Q 开关(Q 开关开启后腔的高 Q 值状态能稳定一段时间的一类 Q 开关),当 $t_s \leq t_0$ 即满足“快开关”条件时,调 Q 脉冲的性能与 Q 开关函数的形式和 Q 开关时间 t_s 均无关,而与理想的阶跃开关调 Q 性能相同。这里 t_s 为 Q 开关过程中腔的损耗从临界振荡值减小到最小值

所需的时间, t_b 为 Q 开关开启的持续时间, 即调 Q 脉冲从振荡开始到巨脉冲激光形成需要的延迟时间。

对于 SBS 的自调 Q 过程其机理及腔损耗变化比较复杂, 但非线性过程一旦启动, SBS 反射率将以指数规律迅速增大, 一般在十几到几十纳秒就能达到其饱和反射率, 而脉冲的建立时间一般在百纳秒量级, 因此可以认为该过程满足“快开关”条件, 从而在分析调 Q 脉冲性能时可以当作阶跃 Q 开关来处理, 只考虑起始腔和 SBS 介质达到饱和反射率时的位相共轭腔的损耗, 不考虑过渡腔损耗的复杂变化。损耗 ε 可以表示为:

$$\varepsilon = \begin{cases} -\ln R_2 + \delta_p - \ln R_1 & t < 0 \\ -\ln R_2 + \delta_{pc} - \ln R_{SBS} & t > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: t 为 Q 值产生突变的时刻; R_1 为起始腔后反射镜 M1 的反射率; R_2 为耦合输出镜反射率; R_{SBS} 为 SBS 介质的饱和反射率; δ_p 和 δ_{pc} 为起始腔和位相共轭腔的双程损耗(不包括反射镜的耦合输出损耗), 这里的双程损耗是以指数定义的: $I/I_0 = R_1 R_2 e^{2\delta_p}$ 。

对于调 Q 过程一个很重要的参量时——Q 开关开启时, 初始反转粒子数与阈值反转粒子数之比 n_i/n_t , 一般情况下对于阶跃 Q 开关它决定了脉冲的能量、脉宽、峰值功率等重要参量^[6], 下面对 n_i/n_t 进行分析。

通过简单的计算可以得到起始腔和位相共轭腔的阈值反转粒子数为:

$$\Delta n_{t,start} = \frac{-\ln(\sqrt{R_1 R_2} \cdot (1 - V_p))}{\sigma l} \quad (3)$$

$$\Delta n_{t,SBS} = \frac{-\ln(\sqrt{R_{SBS} R_2} \cdot (1 - V_{pc}))}{\sigma l} \quad (4)$$

式中: $V_p = 1 - e^{-\frac{\delta_p}{2}}$, 为起始腔中单程光强衰减百分比(不包括反射镜的耦合输出损耗); V_{pc} 定义类似。

由于起始腔中激光脉冲的持续时间小于泵浦光持续时间, 且由于 BEFWM 过程使得位相共轭效应阈值大大降低, 可以忽略达到阈值时起始腔脉冲前沿所消耗的反转粒子数, 近似用 $\Delta n_{t,start}$ 表示 Q 开关开启后的初始反转粒子数密度, 由此可以得到:

$$\frac{n_i}{n_t} = \frac{-\ln(\sqrt{R_1 R_2} \cdot (1 - V_p))}{-\ln(\sqrt{R_{SBS} R_2} \cdot (1 - V_{pc}))} \quad (5)$$

对于 Q 脉冲的脉宽、能量和峰值功率可以通过以下 4 个方程求解^[7-8]:

$$\frac{n_i}{n_t} = \frac{\ln(n_i/n_t)}{n_i/n_t - 1} \quad (6)$$

$$\Delta t_{FWHM} = \tau_{pc} \frac{-\ln(n_i/n_t)}{n_i/n_t - [1 + \ln(n_i/n_t)]} \quad (7)$$

$$E = \frac{h\nu\pi w^2}{2\sigma\gamma} \ln\left(\frac{1}{\sqrt{R_{SBS} R_2}}\right) \ln\left(\frac{n_i}{n_t}\right) \quad (8)$$

$$P = \frac{E}{t_{FWHM}} \quad (9)$$

式中: $\tau_{pc} = \frac{2l}{c\varepsilon(t>0)} = \frac{2l}{c \cdot (-\ln R_2 + \delta_{pc} - \ln R_{SBS})}$, 为位相共轭腔的光子寿命; w 为光斑半径, 计算时取为 1 cm。

3 模型参数设置和求解

3.1 参数设置

计算前对参数进行如下选取:

(1) 初始 n_0^* 和 ϕ_0^*

根据方程(1)可得阈值反转粒子数为 $\frac{\varepsilon(t>0)}{2\sigma l N}$, 结合方程(5)可得:

$$n_0^* = \frac{n_i}{n_t} \cdot \frac{\varepsilon(t>0)}{2\sigma l N} = \frac{n_i}{n_t} \cdot \frac{-\ln R_2 + \delta_{pc} - \ln R_{SBS}}{2\sigma l N} \quad (10)$$

ϕ_0^* 仅对脉冲建立的延迟时间有影响, 选取 $\phi_0^* = 10^{-10}$ 。

(2) 其他参数

γ 为粒子数减少因子, 对 Nd:YAG 的能及结构 $\gamma = 1.5$, 发射截面 $\sigma = 5 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$, Nd 原子数 $N = 1.38 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, 对腔参数选取了典型值: 激光棒长度 $l = 15 \text{ cm}$, 位相共轭腔长 $l = 150 \text{ cm}$, 后反射镜反射率 $R_1 = 0.3$, 耦合输出镜反射率 $R_2 = 0.6$, SBS 饱和反射率 $R_{SBS} = 0.8$ 。

3.2 模型求解

3.2.1 腔参数对 n_i/n_t 的影响

根据方程(5)计算了腔镜和 SBS 反射率以及腔损耗(不包括反射镜的耦合输出损耗)对 n_i/n_t 的影响, 计算过程中除了自变量以外的其余参数均与设定参数相同, 结果如图 3、图 4 所示。

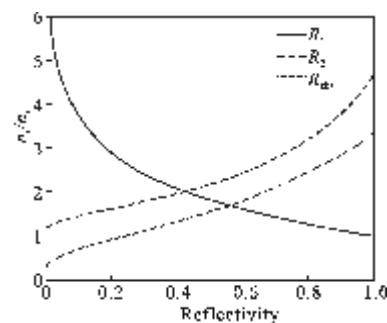


图 3 腔镜以及 SBS 反射率对 n_i/n_t 的影响

Fig.3 Effect of cavity mirror and SBS reflectivity on n_i/n_t

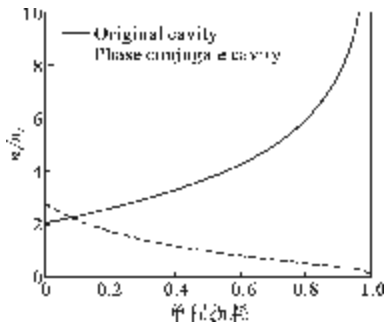


图 4 腔损耗对 n_i/n_t 的影响

Fig.4 Effect of cavity loss on n_i/n_t

3.2.2 腔参数对调 Q 脉冲特性的影响

对于一般的调 Q 激光器,随着 n_i/n_t 的增加,其脉冲的脉宽减小,能量提高,峰值功率增加^[6],但对于 SBS 激光器情况却不同,这是由于方程(7)~(9)不是 n_i/n_t 的单变量函数,其中还包括了 R_2 和 R_{SBS} 的影响,下面分两种情况进行讨论。

(1) 通过改变 R_1 和腔的损耗来改变 n_i/n_t

此时方程(7)~(9)为 n_i/n_t 的单变量函数,其他量为常量,通过计算得到的结果如图 5、图 6 所示。

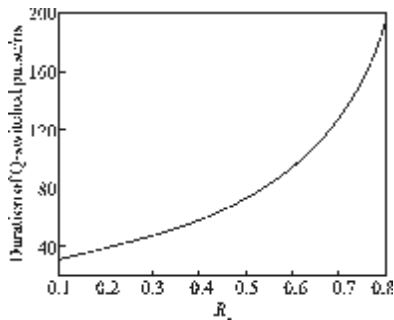


图 5 R_1 对 Q 脉冲脉宽的影响

Fig.5 Effect of R_1 on pulse width of Q-switched

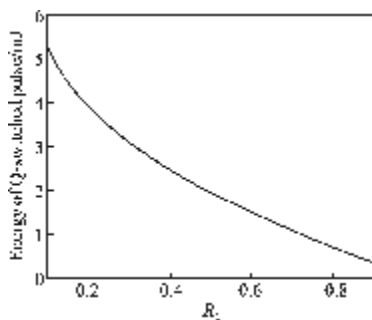


图 6 R_1 对 Q 脉冲能量的影响

Fig.6 Effect of R_1 on pulse energy of Q-switched

结合图 3 可以看出,随着 R_1 增加, n_i/n_t 减小,

调 Q 脉冲的脉宽增加,能量下降,峰值功率也随之下降,此时 n_i/n_t 对激光器性能的影响与普通的调 Q 激光器相同,因此在设计时应采用较小的 R_1 值,但要保证起始腔能够达到产生位相共轭效应的阈值。

(2) 通过改变 R_2 和 R_{SBS} 来改变 n_i/n_t

此时方程(7)~(9)总含有 R_2 和 R_{SBS} ,因此激光器的性能不单由 n_i/n_t 决定,通过计算得到的结果如图 7、8 所示。

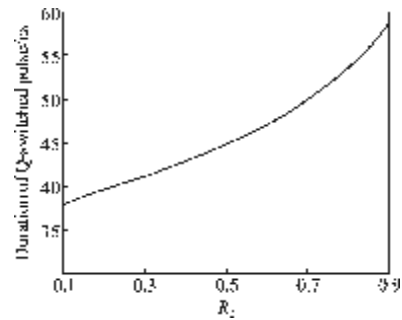


图 7 R_2 对 Q 脉冲脉宽的影响

Fig.7 Effect of R_2 on pulse width of Q-switched

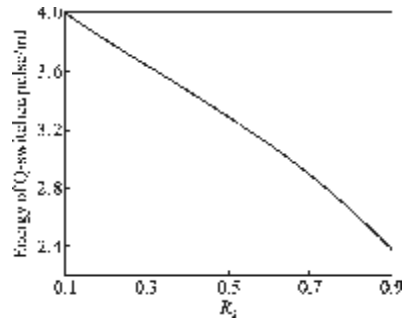


图 8 R_2 对 Q 脉冲能量的影响

Fig.8 Effect of R_2 on pulse energy of Q-switched

结合图 3 可以看出,随着 R_2 的增加, n_i/n_t 增加,但 Q 脉冲的脉宽增加,能量下降,峰值功率也随之下降,出现不同于一般调 Q 激光器的反常现象,这是由于在方程(7)、(8)中 R_2 均出现在了分母项中,在设计 SBS 激光器时应综合考虑在耦合输出效率的基础上选取较低的 R_2 值。

图 9 和图 10 是 R_{SBS} 对脉冲特性的计算结果。可以看出,随着 R_{SBS} 的增加, n_i/n_t 增加, Q 脉冲的脉宽减小,能量增加,峰值功率增加,没有出现反常现象,应该选择针对所用激光波长饱和反射率较高的 SBS 介质。

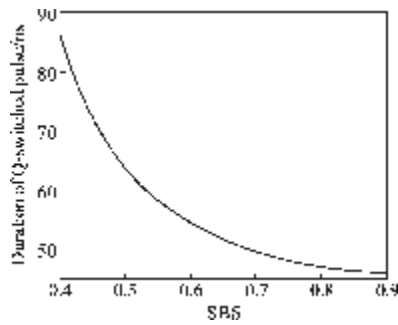


图 9 R_{SBS} 对 Q 脉冲脉宽的影响

Fig.9 Effect of R_{SBS} on pulse width of Q-switched

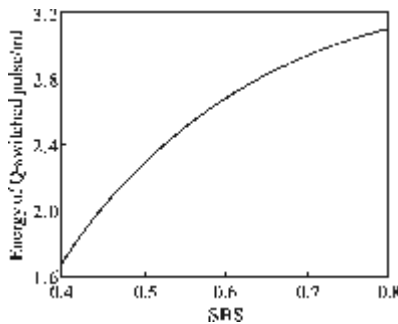


图 10 R_{SBS} 对 Q 脉冲能量的影响

Fig.10 Effect of R_{SBS} on pulse energy of Q-switched

3.2.3 对光子密度和反转粒子数密度的求解

采用四阶、五阶 Runge-Kutta 对方程(1)和相应参数进行了求解,得到如图 11 所示的光子密度和反转粒子数密度演化过程。

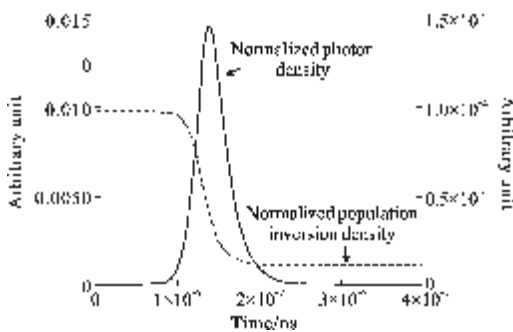


图 11 光子密度和反转粒子数密度随时间演化过程

Fig.11 Evolution process of photon density and population inversion density

对于该模型所选用的参数,通过计算得到 $n_i/n_{th}=2.4384$,Q 脉冲的脉宽为 48 ns,能量为 3 mJ,峰值功率为 6.25×10^4 W,通过图 11 也可以看到脉冲建立时间在 100 ns 左右,满足“快开关”条件。

另外,计算了不同腔镜反射率对调 Q 脉冲特性的影响,如图 12、图 13 所示。

可以看出,随着 R_1 和 R_2 的增加,Q 脉冲的建立时间延迟,脉宽增加,峰值功率下降,这与前面的分析一致。

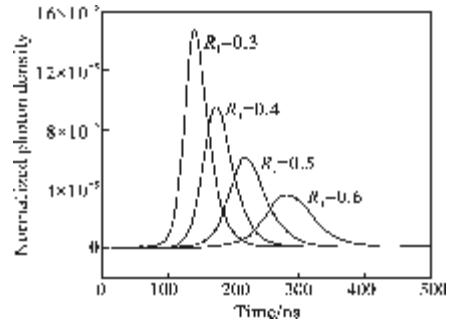


图 12 R_1 对调 Q 脉冲性能的影响

Fig.12 Effect of R_1 on pulse behaviors of Q-switched

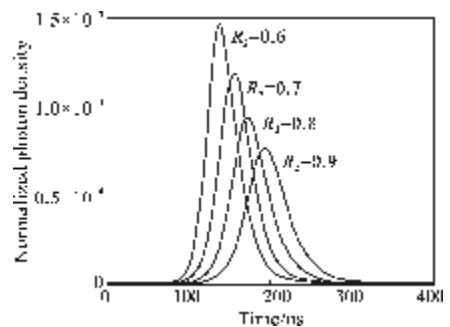


图 13 R_2 对调 Q 脉冲性能的影响

Fig.13 Effect of R_2 on pulse behaviors of Q-switched

4 结论

文中对 SBS 激光器自调 Q 过程进行了研究,认为 SBS 开关属于快开关,可以用阶跃函数来描述,而不用考虑过渡腔中复杂的 Q 值变化过程;分析了腔镜反射率和 SBS 饱和反射率对调 Q 过程中的重要参量 n_i/n_{th} 以及调 Q 脉冲特性的影响,发现通过增加后向反射镜 R_1 和 SBS 饱和反射率 R_{SBS} 来增大 n_i/n_{th} 时输出脉冲脉宽变窄,能量增加;而通过增加耦合输出镜反射率 R_2 来增大 n_i/n_{th} 时则出现反常现象,脉宽增加,能量下降,峰值功率随之下降,因此,在设计 SBS 激光器时应在保证阈值的前提下选取较低的 R_1 ,选择 R_{SBS} 较高的介质,在综合考虑耦合输出效率的前提下选取合适的 R_2 。

参考文献:

[1] Damzen M J, Vlad V I, Babin V, et al. Stimulated Brillouin Scattering Fundamentals and Applications [M]. Bristol: IOP

- Publishing, 2003: 92-93.
- [2] Ostermeyer M, Mittler K, Menzel R. Q switch and longitudinal modes of a laser oscillator with a stimulated-Brillouin-scattering mirror[J]. *Phys Rev A*, 1999, 59: 3975-3985.
- [3] Koechner W. *Solid-state Laser Engineering* [M]. 3rd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1992, 8: 1.
- [4] Chen Jun, Long Ying, Zhou Yueming. Investigation on the Q-switch mechanism in the phase conjugate resonator with the SBS-cell [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1993, 20(6):421-425. (in Chinese)
陈军, 龙鹰, 周月明. 带 SBS 池的位相共轭激光器调 Q 机理的研究[J]. *中国激光*, 1993, 20(6): 421-425.
- [5] Wu Hongxing, Li Yongping, Zhang Limin. The theory of fast-Q-switch and slow-Q-switch[J]. *Applied Laser*, 1984, 4(6): 245-248. (in Chinese)
吴鸿兴, 李永平, 张立敏. 快开关调 Q 理论与慢开关调 Q 理论[J]. *应用激光*, 1984, 4(6): 245-248.
- [6] Lan Xinju, et al. *Laser Technology* [M]. Beijing: Science Press, 2006: 88-96. (in Chinese)
蓝信钜, 等. *激光技术*[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 88-96.
- [7] Ge Chuanwen, Zhang Weijun, Gao Xiaoming. Self-Q-switching mechanism of SBS phase-conjugation laser resonator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(9): 788-709. (in Chinese)
葛传文, 张为俊, 高晓明. 受激布里渊散射位相共轭激光器自调 Q 机理探讨[J]. *中国激光*, 2003, 30(9): 788-709.
- [8] Brignon Arnaud, Huignard Jean-Pierre. *Phase Conjugate Laser Optics*[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.