

微弱光信号瞬态布里渊放大器的最佳工作点*

高玮^{1)2)†} 吕志伟³⁾ 何伟明³⁾

1) (哈尔滨理工大学, 工程电介质及其应用教育部重点实验室, 哈尔滨 150080)

2) (哈尔滨理工大学应用科学学院光信息科学与技术系, 哈尔滨 150080)

3) (哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150080)

(2012年2月12日收到; 2012年3月13日收到修改稿)

为提高瞬态布里渊放大器的工作性能, 利用包含噪声的瞬态布里渊放大理论模型数值模拟了放大器的信噪比、灵敏度、能量转换效率及信号放大率随指数增益系数 G 的变化规律, 获得了放大器的最佳工作点 G_{opt} . 采用倍频 Nd:YAG 脉冲激光器, 以 CS_2 和 FC-72 为非线性介质进行了实验验证. 结果表明, 抽运光脉冲相对于信号光脉冲延迟脉冲宽度的一半进入放大器时, G_{opt} 可设在介质受激布里渊散射阈值增益 G_{th} 之上. 对于共线型布里渊放大结构, G_{opt} 为 G_{th} 的 1.1—1.3 倍; 对于非共线型结构, G_{opt} 可超过 G_{th} 1.3 倍, 实现近饱和放大.

关键词: 瞬态布里渊放大器, 最佳工作点, 受激布里渊散射阈值增益, 延迟时间

PACS: 42.65.-k, 42.65.Es

1 引言

布里渊放大器能够高增益地选择性放大强背景下的微弱光信号^[1-3], 有望被研制成超窄带光学滤波器应用于激光通信或激光雷达探测系统中^[4,5]. 布里渊放大器的主要性能参数包括信噪比 (SNR)、灵敏度、信号放大率 (SAF), 以及能量转换效率等方面. 影响这些性能的主要因素有放大器的工作点、信号光强度、抽运光脉冲相对于信号光脉冲进入放大器的延迟时间等, 其中放大器的工作点通常用无量纲的指数增益 G ($G = gI_{\text{P}}L_{\text{eff}}$, g 为布里渊增益系数, I_{P} 为抽运光强度, L_{eff} 为作用长度) 来描述^[6], 这样便于对不同条件下放大器的状态进行比较. Sternklar 等^[6] 利用稳态布里渊放大耦合波方程计算了放大器的最佳工作点 $G_{\text{opt}} \approx 20$, 而稳态近似下受激布里渊散射 (SBS) 阈值指数增益 G_{th} ($G_{\text{th}} = gI_{\text{th}}L_{\text{eff}}$, I_{th} 为阈值光强) 在 20—25 范围内^[7]. 因此, 抽运光强度通常要求略低于放大

器介质的 SBS 阈值, 以避免自身 SBS 的产生, 影响信号光的放大^[6]. 一般对于抽运光脉冲宽度 τ_{P} 和介质声子寿命 τ 的比值 $\tau_{\text{P}}/\tau > 100$ 的情况可以采用稳态近似来处理; 当 $\tau_{\text{P}}/\tau < 100$ 时, 应该利用瞬态或超瞬态理论模型进行数值计算^[2,8], 对于光源为纳米量级的脉冲激光, 大部分介质 (声子寿命通常在 0.1—10 ns 之间^[9,10]) 发生的 SBS 或布里渊放大属于这种情况. 以往的实验中常常用稳态近似的放大器最佳工作点指导瞬态布里渊放大方案的设计, 致使放大器的能量转换效率和放大率不高^[1,11]. 实验中发现对于大信号瞬态布里渊放大, 抽运光强度可以超过介质 SBS 阈值, 其自身 SBS 受到抑制, 从而实现了高 SNR 及高转换效率; 而且, 抽运光脉冲相对于信号光脉冲延迟脉冲宽度的一半进入放大器有利于抑制自身 SBS^[12], 所以瞬态布里渊放大器最佳工作点的问题需要深入的理论分析和实验证明.

本文通过理论模拟和实验研究瞬态布里渊放大器的主要性能参数随指数增益系数的变化规律,

* 国家自然科学基金 (批准号: 61078004)、中国博士后基金 (批准号: 20100481017) 和黑龙江省教育厅科学技术研究计划 (批准号: 12511114) 资助的课题.

† E-mail: wei.g@163.com

确定放大器的最佳工作点, 为提高放大器的 SNR、灵敏度、转换效率及放大率奠定基础.

2 理论

2.1 理论模型

在包含噪声的瞬态布里渊放大理论模型中, 考虑输入的 Stokes 信号光和介质内分布式噪声与抽运光的相互作用, 分别形成光致光栅和噪声光栅, 从而输出放大的信号光和放大的布里渊散射 (ABS) 噪声, 其中 ABS 噪声又称为自身 SBS 或未聚焦 SBS^[13], 是布里渊放大器的主要背景噪声. 描述包含噪声的瞬态布里渊放大耦合波方程为^[12]

$$\frac{\partial E_L}{\partial z} - \frac{n}{c} \frac{\partial E_L}{\partial t} = -ig_0 \rho_{LS} E_S - ig_0 \rho_{LN} E_N + \frac{\alpha}{2} E_L, \quad (1a)$$

$$\frac{\partial E_S}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_S}{\partial t} = ig_0 \rho_{LS}^* E_L - \frac{\alpha}{2} E_S, \quad (1b)$$

$$\frac{\partial E_N}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial E_N}{\partial t} = ig_0 \rho_{LN}^* E_L - \frac{\alpha}{2} E_N, \quad (1c)$$

$$\frac{\partial \rho_{LS}}{\partial t} + \frac{1}{2} \Gamma \rho_{LS} = ig_a E_L E_S^*, \quad (1d)$$

$$\frac{\partial \rho_{LN}}{\partial t} + \frac{1}{2} \Gamma \rho_{LN} = ig_a E_L E_N^* + f, \quad (1e)$$

式中 E_L , E_S 和 E_N 分别为抽运光、信号光和噪声光的复振幅, ρ_{LS} 和 ρ_{LN} 分别是光致光栅和噪声光栅的振幅, Γ 是放大器介质的自发布里渊散射的线宽, 和声子寿命的关系为 $\Gamma = 1/\tau$, α 为介质对光波的吸收系数, c 为真空光速, n 为介质的折射率, g_0 和 g_a 分别为光波和声波耦合系数, f 为朗之万噪声项.

在空间和时间上采用有限差分方法对耦合波方程 (1) 进行离散化和数值求解. 方程的边界条件及初始条件为 $E_L(z = L, t) = E_L(t)$, $E_S(z = 0, t) = E_{Sin}(t)$, $E_S(z = L, t) = E_{Sout}(t)$, $E_N(z, 0) = f(z, 0)$, $E_N(z = L, t) = E_{Nout}(t)$. 光束的强度为 $I_{L,S,N}(t) = (nc/8\pi) |E_{L,S,N}(t)|^2$.

2.2 理论模拟的结果与分析

在放大器的性能参数中, SNR 定义为 I_{Sout}/I_N , I_{Sout} 和 I_N 分别为放大的信号光和 ABS 噪声的强度; SAF 用 E_{Sout}/E_{Sin} 表示, E_{Sout} 和 E_{Sin} 分别为放大的信号光和输入信号光的能量. 灵敏度的高低用最小可放大信号光强度 (I_{Smin}) 或能

量 (E_{Smin}) 来衡量, I_{Smin} 越小表示放大器灵敏度越高, 当 $SNR = 1$ 时对应的输入信号光强度或能量为 I_{Smin} 或 E_{Smin} . 能量转换效率 η 定义为 $\eta = (E_{Sout} - E_{Sin})/E_P$, 式中 E_P 为抽运光能量. 图 1 给出了放大器介质分别为 CS_2 和 $FC-72$, 归一化 SNR (NSNR) 随 G 的变化关系. 计算参数如下: 激光波长为 532 nm, 在此波长下 CS_2 和 $FC-72$ 的介质参数源于文献 [14]; 作用长度 L_{eff} 分别为 20 和 60 cm; 介质的吸收系数取零; 信号光强度 I_{Sin} 为 10^{-9} MW/cm², 抽运光和信号光的脉冲宽度为 8 ns, 且信号光脉冲超前于抽运光脉冲 4 ns 进入放大器. 计算时, g 和 L_{eff} 一定, 改变抽运光强度 I_P , G 值随之改变. 从图 1 中可以看出, 对于两种介质, SNR 随 G 的变化规律基本相同, 开始阶段 SNR 随 G 的增加而增加, 达到最大值后逐渐下降. 将最高 SNR 对应的 G 值称为最佳工作点 G_{opt} , 它的大小与介质参数和 L_{eff} 有关. 对于 CS_2 , 当 L_{eff} 为 20 和 60 cm 时, 相应的 G_{opt} 分别约为 61.4 和 83.5; 对于 $FC-72$, 仅模拟了 $L_{eff} = 60$ cm 的情况, G_{opt} 为 40.5. 根据文献 [14] 中理论预测的瞬态 SBS 阈值增益 (CS_2 : $G_{th20cm} = 44.5$, $G_{th60cm} = 66.3$; $FC-72$: $G_{th60cm} = 30.8$), 可以看出, 两种介质的 G_{opt} 均略高于 G_{th} , 约为 G_{th} 的 1.3 倍. 图 2 以 CS_2 ($L_{eff} = 20$ cm) 为例, 给出了 I_{Smin} 随 G 的变化, 当 G 约为 65 时, I_{Smin} 存在最小值. 所以, 当放大器运行于最佳工作点附近时, 不但能够获得最高 SNR, 同时最小可探测的信号光强度 I_{Smin} 也是最低, 灵敏度最高.

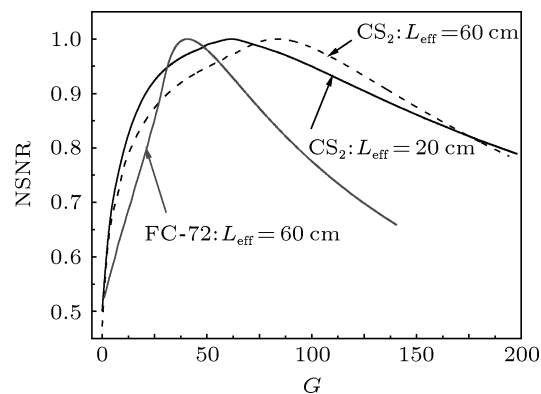


图 1 对于 CS_2 和 $FC-72$ 介质 NSNR 随 G 的变化

为解释上述现象, 图 3 以 CS_2 ($L_{eff} = 20$ cm) 为例, 给出了放大的信号光强度 I_{Sout} 和噪声强度 I_N 随 G 的变化. 在低增益阶段, I_{Sout} 和 I_N 均

随着 G 的增加而增加, 相比之下 I_N 增加得稍慢些, 导致 SNR 增加, 灵敏度提高. 当 $G > 50$ 时, 抽运光强度已略超过介质的 SBS 阈值, 但是由于超前引入了信号光, 且其强度比介质内起源噪声强度高, 因此信号光会被优先放大, 噪声放大后的强度比没有引入信号光时的弱, 如图 3 所示. 所以, SNR 在超过介质 SBS 阈值附近并没有立即下降, 反而有所提高, 在 $G = 61.4$ 处达到最佳值. 当 G 值超过 70 以后, I_{Sout} 和 I_N 都逐渐趋于饱和, 在饱和区, 抽运光强度已大大超过介质的 SBS 阈值, 抽运光在放大器前端, 未和信号光脉冲峰值部分相遇, 就有可能发生自身 SBS, 导致 SNR 下降. 和 SBS 阈值的研究结果类似^[14], 放大器的最佳工作点 G_{opt} 也和作用长度 L_{eff} 、介质特性等因素有关. 在抽运光波长和脉冲宽度相同的情况下, CS_2 的 G_{opt} 比 FC-72 的高, 而且都略超过介质的 SBS 阈值, 且都随着 L_{eff} 的增加而有所提高.

图 4 以 CS_2 ($L_{eff} = 20$ cm) 为例给出了能量转

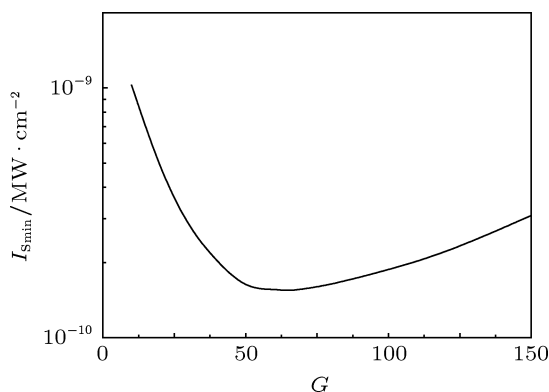


图 2 最小可放大信号光强度 I_{Smin} 随 G 的变化

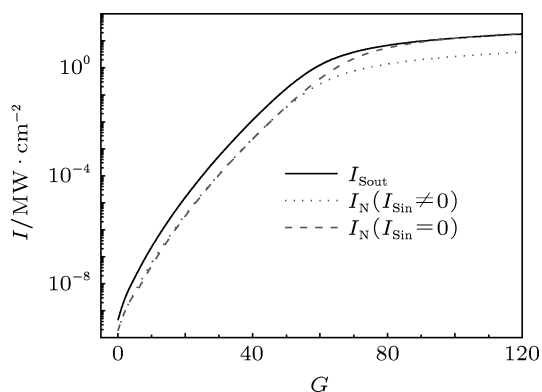


图 3 放大的信号光强度 I_{Sout} 和 ABS 噪声强度 I_N 随 G 的变化

换效率 η 和信号放大率 SAF 随 G 的变化. 图 4(a) 中的实线为不考虑噪声的一般布里渊放大理论模

型^[7] 模拟的结果, η 随着 G 值的增加逐渐趋于 1. 图 4(a) 中的虚线是利用本文考虑噪声的理论模型计算的结果, 当 G 值增长到一定程度则和实线产生分歧, 并随着 G 值进一步增加, 存在逐渐减小的趋势. 这是因为随着 G 的增加, 抽运光能量越来越大, 介质内产生的 ABS 噪声增强, 且与信号光之间存在竞争放大关系, 导致考虑噪声的比没考虑噪声的模型计算的 η 略低. 图 4(b) 中 SAF 随 G 的变化与此类似. 另外, 当抽运光能量较高时, 继续增加其能量, 由于放大饱和效应和来自 ABS 噪声的竞争, 导致放大的信号光能量几乎不再增加, 根据 η 和 SAF 的定义, 这时的 η 有逐渐减小的趋势, 而 SAF 趋向平稳. 从图 4(a) 和 (b) 中可以看出, 在前述的最佳工作点 G_{opt} 处, η 和 SAF 都未达到最大值, 如果采取措施, 避开 ABS 噪声的影响, 指数增益 G 可设定在 G_{opt} 以上, 即大于 1.3 倍 SBS 阈值, 并接近饱和放大处, 则 η 和 SAF 将有较大提高, 同时也会得到最佳的 SNR 和灵敏度.

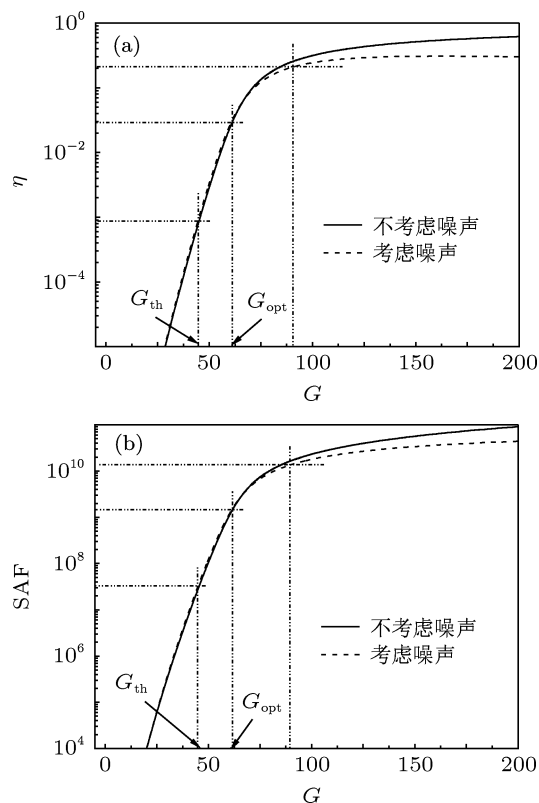


图 4 能量转换效率 η 和信号放大率 SAF 随 G 的变化 (a) η ; (b) SAF

3 实验

实验采用独立双池布里渊放大结构, 光路如

图 5 所示. 激光光源采用脉冲 Nd : YAG 激光器, 经倍频后输出波长为 532 nm, 脉冲宽度为 7.0—8.0 ns, 光束直径约为 8 mm. 来自激光器的 s 偏振光经由 1/2 波片入射到偏振片 P₁, 调整 1/2 波片的光轴方向改变光束通过后在两个正交偏振方向上的分量强度配比, 其中 s 偏振分量由偏振片 P₁ 和 P₂ 反射, 经 1/4 波片变成圆偏振光, 再经透镜 L ($f = 15$ cm) 聚焦到 SBS 产生器中, 后向反射的 Stokes 光经过 1/4 波片变为 p 偏振光, 透过偏振片 P₂ 后, 再由 1/4 波片变为圆偏振光, 经定标好的中性密度滤光片 (ND) 衰减后作为放大器的输入 Stokes 信号光. 实验时, 首先测量 ND 前的信号光能量 E_{S1} , ND 的透过率为 k_{ND} , 则实际输入信号光能量为 $E_{Sin} = k_{ND}E_{S1}$. 由偏振片 P₁ 透射的 p 偏振分量经全反镜 M₁, M₂ 反射后, 透过偏振片 P₃ 经 1/4 波片变成圆偏振光, 此光作为放大器的抽运光. 通过在抽运光光路中设置延时光路, 致使信号光脉冲超前 3.5 ns 进入放大器, 放大的信号光和 ABS 噪声由偏振片 P₃ 耦合输出. 由于 ABS 噪声是空间大角度分布的散斑, 而放大的信号光是方向性很好的激光光斑, 如文献 [12] 中的图 5(b) 所示, 它们几乎同时传播到光阑 A 处. 在 A 上开有直径为 6 mm 的圆孔 1, 仅让放大的信号光斑通过, 挡住大部分散斑噪声, 这时圆孔 1 处测量的能量为放大的信号光及截取部分的 ABS 噪声的总能量. 为能同时测量圆孔 1 处截取的 ABS 噪声能量, 在其附近用相同直径的圆孔 2 截取部分 ABS 噪声, 这部分噪声能量近似为放大的信号光方向上圆孔 1 处截取的背景 ABS 噪声能量. 实际放大的信号光能量 E_{Sout} 为圆孔 1 处测量的总能量减去圆孔 2 处的能量. 放大器和产生器介质均为 CS₂. 各光波的能量用 OPHIR 能量计 (ED) 探测, 低于 1 mJ 的能量用 Newport818J-09 型能量计探测.

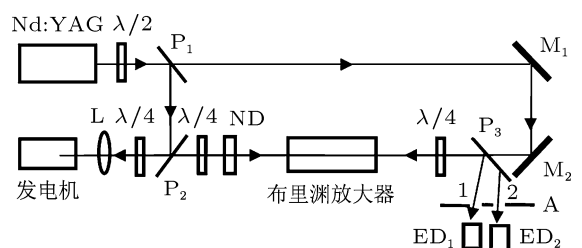


图 5 实验光路图 P₁₋₃, 偏振片; ND, 中性密度滤光片; M_{1,2}, 全反镜; A, 双孔光阑; ED_{1,2}, 能量计

在图 5 的实验光路中, M₁ 和 M₂ 反射镜之间加入一个 1/2 波片, 它和偏振片 P₃ 构成能量衰减器,

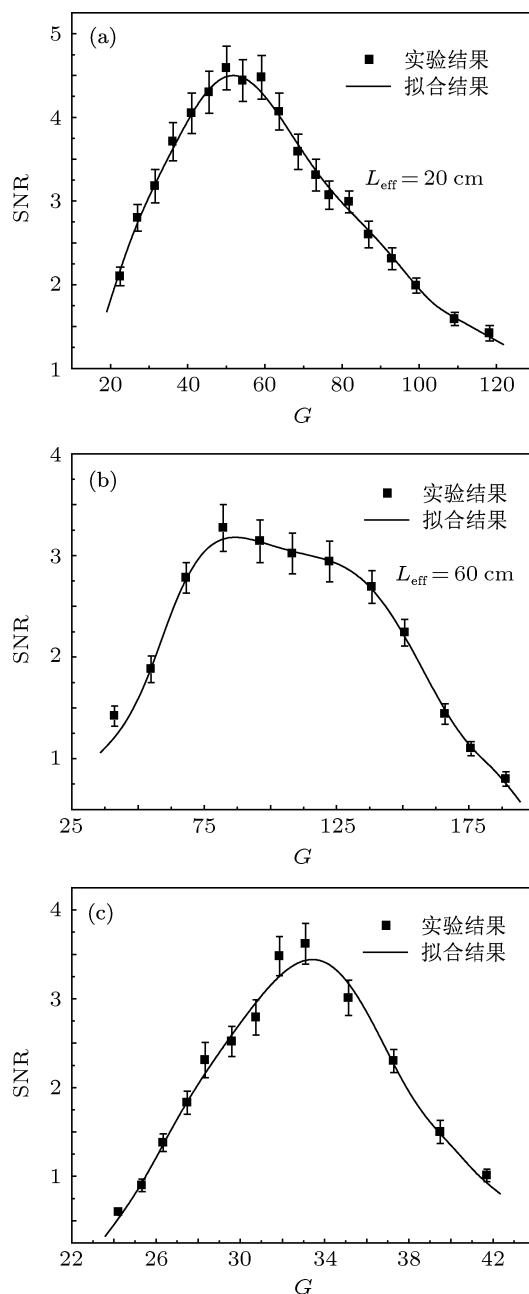


图 6 SNR 随 G 的变化 (a) CS₂, $L_{eff} = 20$ cm; (b) CS₂, $L_{eff} = 60$ cm; (c) FC-72, $L_{eff} = 60$ cm

用来改变抽运光的能量 E_P . 图 6 给出了 SNR 随 G 的变化关系, 输入信号光能量约为 6.02×10^{-12} J. 从图 6 拟合的结果可见, 对于 L_{eff} 为 20 和 60 cm 的放大器, G 值分别在 50.1 ($E_P \approx 70.2$ mJ) 和 82.4 ($E_P \approx 38.4$ mJ) 附近, 获得的 SNR 最高. 根据文献 [14] 的测量结果, 20 和 60 cm 长 CS₂ 介质的 SBS 阈值对应的 G_{th} 分别约为 41.6 和 64.9. 因此, 实验中的 G_{opt} 接近并略超过 G_{th} , 约为 G_{th} 的 1.25 倍. 对于 FC-72 介质, SNR 随 G 值的变化如图 6(c) 所

示,这时介质池长为 60 cm. 从图中可以看出,放大器的最佳工作点 G_{opt} 约为 33.5 ($E_P \approx 172$ mJ), 是其 SBS 阈值增益 ($G_{\text{th}} = 29.6$) 的 1.1 倍, 实验结果和理论预测基本符合. 因此, 在瞬态条件下, 当信号光脉冲超前抽运光脉冲入射时, 放大器均是在略超过介质 SBS 阈值处获得最高 SNR, 而且最佳工作点 G_{opt} 并不是一个常数, 它与介质及作用长

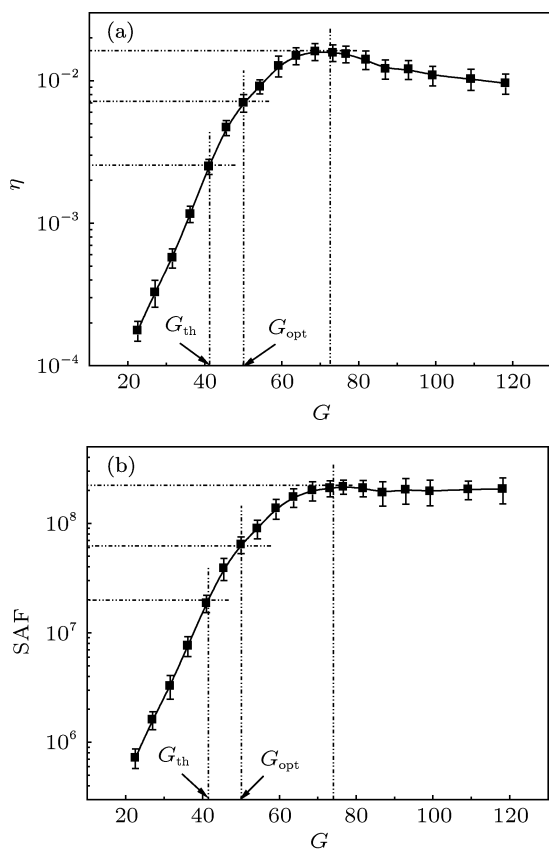


图7 能量转换效率 η 和信号放大率 SAF 随 G 的变化 (a) η ; (b) SAF

度有关.

图7为能量转换效率 η 和 SAF 随 G 的变化关系, 池长为 20 cm. 可以看出, 随着 G 值的增加, η 和 SAF 先逐渐增加, 待饱和后, 继续增加 G , η 有下降趋势, SAF 近似不变, 这些结果与理论预测基本相符. 然而, 由于介质的吸收、各光学元件的损耗等因素, 导致实验测量值比理论值低一些. 从图 6(a) 得知, 对于 $L_{\text{eff}} = 20$ cm 的 CS_2 , 获得最高 SNR 的 G_{opt} 值约为 50, 而从图 7 看出, 对应的 η 和 SAF 都未达到最大值, 当 G 在 60—80 范围内, η 和 SAF 接近饱和放大. 文献 [15] 中提出了采用双级非共线布里渊放大结构提高 SAF 并降低噪声的方案, 能够有效摆脱 ABS 噪声的限制, 改善 SNR. 将 G_{opt} 设置在 1.7 倍的 SBS 阈值附近, 同时获得较高的 SNR 和 SAF, 实验证明了理论分析的结果.

4 结论

理论和实验研究了瞬态条件下改变指数增益系数 G 对微弱光信号布里渊放大器的 SNR、灵敏度、转换效率及 SAF 等性能的影响, 确定了放大器的最佳工作点 G_{opt} . 结果表明, 瞬态条件下的 G_{opt} 不再是稳态时的 $G_{\text{opt}} \approx 20$, 而是与介质特性、作用长度有关; 对于普通的共线型布里渊放大器, G_{opt} 可设置在略超过介质 SBS 阈值附近, 为 SBS 阈值增益的 1.1—1.3 倍, 这时可获得最佳的 SNR 和灵敏度, 但由于 ABS 噪声的限制难以获得较高的转换效率和放大率. 采用非共线布里渊放大结构, 合理选择抽运光和信号光的交叉角, 能够避开 ABS 噪声的影响, G_{opt} 可设置在 1.3 倍 SBS 阈值增益以上, 接近饱和和放大处, 使放大器性能同时得到提高.

- [1] Gao W, Lü Z W, He W M, Zhu C Y, Dong Y K 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2693 (in Chinese) [高玮, 吕志伟, 何伟明, 朱成禹, 董永康 2007 物理学报 **56** 2693]
- [2] Bel'dyugin I M, Efimkov V F, Mikhailov S I, Zubarev I G 2005 *J. Russian Laser Res.* **26** 1
- [3] Gao W, Lü Z W, He W M, Dong Y K 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 254 (in Chinese) [高玮, 吕志伟, 何伟明, 董永康 2008 物理学报 **57** 254]
- [4] Wise A, Tur M, Zadok A 2011 *Opt. Express* **19** 21945
- [5] Liu D H, Shi J W, Chen X D, Ouyang M, Gong W P 2010 *Front. Phys. China* **5** 82
- [6] Sternklar S, Glick Y, Jackel S 1992 *J. Opt. Soc. Am. B* **9** 391
- [7] Boyd R W, Rzazewski K, Narum P 1990 *Phys. Rev. A* **42** 5514
- [8] Wang C 2006 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of

- Technology) (in Chinese) [王超 2006 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [9] Erokhin A I, Kovalev V I, Faizullov F S 1986 *Sov. J. Quan. Electron.* **16** 872
- [10] Yoshida H, Kmetik V, Fujita H, Nakatsuka M, Yamanaka T, Yoshida K 1997 *Appl. Opt.* **36** 3739
- [11] Lü Z W, Ding Y C, He W M 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1286 (in Chinese) [吕志伟, 丁迎春, 何伟明 2002 物理学报 **51** 1286]
- [12] Gao W, Lü Z W, He W M, Zhu C Y 2011 *Appl. Phys. B* **105** 317
- [13] Lü Z W, Wang S Y, Lin D Y 2008 *Laser Part. Beams* **26** 315
- [14] Gao W, Lü Z W, Wang S Y, He W M, Hasi W L J 2010 *Laser Part. Beams* **28** 179
- [15] Lü Z W, Gao W, He W M, Zhang Z, Hasi W L J 2009 *Opt. Express* **17** 10675

Optimal working point of a Brillouin amplifier for a weak input signal in the transient regime*

Gao Wei^{1)2)†} Lü Zhi-Wei³⁾ He Wei-Ming³⁾

1) (*Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China*)

2) (*Department of Optics Information Science and Technology, College of Applied Science, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China*)

3) (*Institute of Opto-Electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China*)

(Received 12 February 2012; revised manuscript received 13 March 2012)

Abstract

In order to improve the working performances of a transient Brillouin amplifier, the dependences of the signal-noise-ratio, sensitivity, energy extraction efficiency and signal amplification factor on exponential gain G are numerically studied based on the theoretical model of transient Brillouin amplification including distributed noise, and an optimal working point of a Brillouin amplifier is obtained. Experimental verifications are performed by choosing CS₂ and FC-72 as nonlinear media. A frequency-doubled Nd : YAG pulse laser is used. Results show that when the pump pulse lags behind the Stokes signal pulse by an amount of time equal to half the pulse width, G_{opt} can be set to be above the SBS threshold exponential gain G_{th} . For a collinear Brillouin amplifier, G_{opt} is 1.1—1.3 times G_{th} ; while for a non-collinear structure, G_{opt} can be set to be over 1.3 times G_{th} . Nearly saturated amplification is achieved.

Keywords: transient Brillouin amplifier, optimum working point, SBS threshold exponential gain, delay time

PACS: 42.65.-k, 42.65.Es

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61078004), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 20100481017), and the Program of Science and Technology of the Education Bureau of Heilongjiang Province, China (Grant No. 12511114).

† E-mail: wei_g@163.com