

# 液芯光纤中基于多线抽运调制的带宽可控平顶布里渊增益谱\*

高玮<sup>1)2)†</sup> 刘胜男<sup>1)</sup> 毕雅凤<sup>1)</sup> 胡晓博<sup>1)</sup> 浦绍质<sup>1)</sup> 赵洪<sup>2)</sup>

1) (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)

2) (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)

(2013年4月16日收到; 2013年5月23日收到修改稿)

提出在  $\text{CS}_2/\text{CCl}_4$  混合介质液芯光纤中利用多线抽运调制技术实现带宽可控平顶布里渊增益谱的方法, 理论研究了抽运光谱线间距、谱线强度和芯液介质混合比对布里渊增益谱的影响, 得到了带宽可控平顶增益谱的条件. 结果表明, 采用一个强度或相位调制器, 基于单频和多频调制技术产生 2—9 条抽运光谱线, 通过控制谱线间距和各谱线强度比, 并改变  $\text{CS}_2$  体积分数, 获得了增益带宽在 50 MHz—2 GHz 范围内可控的平顶增益谱. 该方法操作简便、带宽调控范围大, 可用于高增益低畸变布里渊放大, 满足微弱光信号探测和慢光系统的应用需求.

**关键词:** 受激布里渊散射, 布里渊增益谱, 多线抽运调制, 液芯光纤

**PACS:** 42.65.-k, 42.65.Es

**DOI:** 10.7498/aps.62.194206

## 1 引言

近年来, 基于受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 的滤波放大技术受到广泛关注, 它在强背景场微弱光信号高灵敏探测、密波分复用通信网络、光纤传感、微波光子信号处理和慢光等系统中有巨大应用潜力<sup>[1-6]</sup>. 然而, 研究中也发现了一些问题: 首先, 常用非线性介质的本征布里渊增益谱 (Brillouin gain spectrum, BGS) 为洛伦兹线型, 这势必会造成信号的非均匀放大, 从而产生畸变; 其次, 布里渊放大器能够实现窄带光学滤波, 但过窄的带宽也会对其应用有所限制. 理想的滤波放大器应该能够根据信号光谱的形状及带宽适当调节其增益谱宽, 并使增益光谱顶部平坦化, 实现低畸变滤波放大.

目前, 国际上基于抽运调制改变 BGS 带宽和形状的方法主要有两种: 1) 激光器内调制法<sup>[7,8]</sup>, 即采用噪声源对抽运激光直接进行电流调制, 形成平顶光谱. 实际 BGS 为抽运光谱和与介质材料有

关的本征 BGS 的卷积, 所以, 仅仅当抽运光带宽远远大于本征 BGS 带宽时, 实际 BGS 的带宽和形状将与抽运光谱相似. 这样, 利用内调制法难以获得接近本征增益带宽的平顶 BGS. 2) 激光器外调制法<sup>[9-12]</sup>, 即利用强度或相位调制器, 或者两者结合将抽运光调制成多条光谱线, 每条光谱线产生增益谱的叠加形成总增益谱, 该方法具有结构简单、增益带宽调整灵活和低抽运功率等优势. 近来, Dong 和 Ba 等人分别提出利用多频相位调制和多频强度调制形成多条等幅抽运线产生平顶 BGS 的方法<sup>[9-11]</sup>, 这些方法适合光谱线条数大于 20 的情况, 但此时需要高次谐波多频调制, 导致理论和实验上的操作变得相当复杂<sup>[13]</sup>. 如果光谱线少于 20, 利用该方法虽然能够得到带宽较宽的 BGS, 但其顶部为凸起的钟形.

以上方法大都采用色散位移光纤或标准单模光纤, 由于其非线性系数较小, 必须使用较高的抽运功率或者较长的光纤进行补偿, 长度通常为数十 km. 而且, 由于石英光纤的本征 BGS 带宽和频率变

\* 黑龙江省教育厅科学技术研究计划 (批准号: 12511114)、国家自然科学基金 (批准号: 61078004, 61378003) 和中国博士后科学基金 (批准号: 2012T50372, 20100481017) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: wei.g@163.com

化范围很小, 目前报道的都是通过改变抽运光谱来调整增益谱, 所以利用单频强度或相位调制抽运光时, 得到的增益谱带宽最大不超过 150 MHz<sup>[9]</sup>.

在空心光纤中充以高非线性高折射率芯液介质形成的液芯光纤日益受到各国学者的关注, 已成为光纤传感、光开关和非线性光学等领域的研究热点<sup>[14-19]</sup>. 2013 年 Kieu 和 Herrera 等<sup>[16,17]</sup> 采用芯径 2 μm、长 1 m 的 CS<sub>2</sub> 液芯光纤获得带宽小于 1 kHz 的布里渊激光, 并进行了受激拉曼散射慢光的研究. 我们实验发现 CS<sub>2</sub> 液芯光纤具有良好的 SBS 特性<sup>[18]</sup>, 对 4 pJ 的微弱光信号实现了 10<sup>6</sup> 的高增益放大<sup>[19]</sup>. 本文针对石英光纤抽运调制法获得平顶 BGS 中存在的问题, 提出在 CS<sub>2</sub>/CCl<sub>4</sub> 混合介质液芯光纤中利用多线抽运调制技术获得平顶 BGS 的方法, 该方法具有以下优点:

1) CS<sub>2</sub> 液芯光纤的非线性系数比普通石英光纤的高近两个数量级<sup>[20]</sup>, 在相同增益带宽条件下, 更有利于提高 SBS 慢光的延时量和滤波放大器的增益, 并大大缩短了光纤长度.

2) 通过调节 CS<sub>2</sub> 的体积分数可以灵活控制 CS<sub>2</sub>/CCl<sub>4</sub> 液芯光纤的布里渊频移和线宽 (即本征 BGS 带宽), 结合多线抽运调制技术可大幅度提高实际 BGS 带宽的控制范围. 如, 利用单频强度或相位调制可获得带宽为 50 MHz—1 GHz 的平顶增益谱, 有效避免高次谐波多频调制的复杂性问题.

3) 液芯光纤的弯曲损耗很小<sup>[21]</sup>, 便于装置的集成化和小型化, 并可根据实际应用灵活选择芯液介质, 工作波长范围较宽.

本文利用多线抽运调制 BGS 理论模型, 并结合 CS<sub>2</sub>/CCl<sub>4</sub> 液芯光纤本征 BGS 带宽随混合比变化的特点, 理论研究了两条、三条和九条抽运光谱线形成平顶 BGS 的条件, 以及 BGS 带宽的控制范围, 为低畸变滤波放大和 SBS 慢光等应用研究奠定基础.

## 2 液芯光纤中多线抽运调制 BGS 理论模型

采用一个强度调制器或相位调制器对抽运光进行调制均可获得多条光谱线, 这里以单频强度调制和多频相位调制为例讨论多线抽运 BGS 理论模型.

设输入光波的电场强度为

$$E(t) = \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

式中  $f_0$  和  $\varphi_0$  分别是输入光波的频率和相位. 经单频强度调制后, 输出光电场表示为

$$E(t) = \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \cos[C \cos(2\pi f_m t) + \varphi_{DC}], \quad (2)$$

式中  $f_m$  为调制信号频率;  $C = \pi(V_m/2V_\pi)$  为调制指数,  $V_m$  和  $V_\pi$  分别为调制信号电压和调制器的半波电压;  $\varphi_{DC} = \pi(V_{DC}/2V_\pi)$  为由直流偏置电压  $V_{DC}$  导致的相位.

将 (2) 式按照 Bessel 函数展开得到

$$E(t) = \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \left\{ \left[ J_0(C) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \times J_{2n}(C) \cos(4n\pi f_m t) \right] \cos \varphi_{DC} - \left\{ 2 \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n J_{2n+1}(C) \times \cos[(2n+1)2\pi f_m t] \right\} \sin \varphi_{DC} \right\}. \quad (3)$$

从 (3) 式可以看出, 输出光的频谱中除了入射光的频率  $f_0$  外, 还有  $f_0 \pm n f_m$  等边频成分, 其中 0 阶、1 阶和 2 阶光波的强度分别为

$$I_0 = J_0^2(C) \cos^2 \varphi_{DC}, \quad (4a)$$

$$I_1 = J_1^2(C) \sin^2 \varphi_{DC}, \quad (4b)$$

$$I_2 = J_2^2(C) \cos^2 \varphi_{DC}, \quad (4c)$$

相应的频率分别为  $f_0$ ,  $f_0 \pm f_m$  和  $f_0 \pm 2f_m$ . 所以, 各阶光波强度取决于  $C$  值和  $\varphi_{DC}$ , 通过控制调制信号电压和直流偏置电压可得到不同的光波强度.

设输入光波的电场强度仍为 (1) 式, 经多频相位调制后, 输出光电场表示为

$$E(t) = \cos \left[ 2\pi f_0 t + \sum_{k=1}^{+\infty} C_k \times \sin(2\pi k f_m t + \varphi_k) \right]. \quad (5)$$

对 (5) 式进行傅里叶展开可得<sup>[11]</sup>

$$E(t) = \sum_{i_1=-\infty}^{+\infty} \cdot \sum_{i_2=-\infty}^{+\infty} \cdots \sum_{i_k=-\infty}^{+\infty} \cdots \left[ \prod_{k=1}^{+\infty} J_{i_k}(C_k, \varphi_k) \cdot \cos \left( 2\pi \left( f_0 + \sum_{k=1}^{+\infty} i_k k f_m \right) t \right) \right], \quad (6)$$

其中,  $C_k$  和  $\varphi_k$  分别为  $k$  次谐波的调制指数和相位,  $k=1$  对应于单频相位调制的情况, 并假设  $\varphi_1 = 0$ .

多频相位调制时, 0 阶和  $n$  阶光波的强度分别为

$$I_0 = \left| \sum_{\sum_{k=1}^{+\infty} k \cdot i_k = 0} \prod_{k=1}^{+\infty} J_{i_k}(C_k, \phi_k) \right|^2, \quad (7a)$$

$$I_n = \left| \sum_{\sum_{k=1}^{+\infty} k \cdot i_k = n} \prod_{k=1}^{+\infty} J_{i_k}(C_k, \phi_k) \right|^2. \quad (7b)$$

通过对抽运光进行强度或相位调制, 可获得多谱线抽运光, 该光束进入液芯光纤后, 实际的 BGS 为每条光谱线产生的本征 BGS 的叠加, 这里假设

$$\gamma = \frac{16\pi^3 10^{(x_1 \lg \eta_1 + x_2 \lg \eta_2)}}{\lambda^2} \times \left\{ \frac{1 + 2(\phi_1 \rho_1 + \phi_2 \rho_2) \left[ \frac{\phi_1(n_1^2 - 1)}{\rho_1(n_1^2 + 2)} + \frac{\phi_2(n_2^2 - 1)}{\rho_2(n_2^2 + 2)} \right]}{1 - (\phi_1 \rho_1 + \phi_2 \rho_2) \left[ \frac{\phi_1(n_1^2 - 1)}{\rho_1(n_1^2 + 2)} + \frac{\phi_2(n_2^2 - 1)}{\rho_2(n_2^2 + 2)} \right]} \right\}, \quad (9)$$

式中  $n_1$  和  $n_2$  为二单体的折射率;  $\rho_1$  和  $\rho_2$  为二单体的密度;  $\phi_1$  和  $\phi_2$  为二单体的体积比,  $\phi_1 = V_1/(V_1 + V_2)$ ,  $\phi_2 = V_2/(V_1 + V_2)$ , 其中  $V_1$  和  $V_2$  为二单体的体积;  $x_1, x_2$  分别为二单体的摩尔分数;  $\eta_1, \eta_2$  分别为二单体的运动黏度.

### 3 计算结果与分析

对抽运光进行单频强度调制时, 改变调制指数  $C$  和相位  $\phi_{DC}$ , 一般可得到两条或三条光谱线. 当  $C$  为 1.162,  $\phi_{DC}$  为 1.570 时, 0 阶光波强度为零, 即中心载波被抑制, 只有 1 阶上下边频光, 形成两条光谱线, 如图 1(a) 所示. 固定本征 BGS 带宽  $\gamma$ , 改变两条光谱线之间的间距  $2\delta$ , 分别模拟了  $\delta/\gamma = 0.5, 0.6, 1, 1.5$  条件下的 BGS, 如图 1(b) 所示. 从图中可以看出, 当  $\delta/\gamma = 0.6$  时, 可获得平顶的 BGS.

利用单频强度调制和单频相位调制均可获得三条抽运光谱线, 此时, 光谱的主要成分为 0 阶和 1 阶上下边频光. 以强度调制为例, 获得的抽运光谱如图 2(a) 所示, 相位调制后的光谱与此类似, 只是 2 阶上下边频光的强度略高些, 但不影响增益谱的形状. 当谱线间距等于每条抽运光谱线产生的增益谱带宽, 即  $\delta/\gamma = 1$  时, 改变 1 阶边频光和 0 阶光的强度比 ( $t = I_1/I_0$ ), 研究了 BGS 的变化. 图 2(b) 为  $t = 1, 1.5, 1.8, 2, 3$  时的 BGS, 由图可以看出, 当  $t = 1.8$ , 即  $C$  为 1.162,  $\phi_{DC}$  为 1.068 (单频相位调制:

本征 BGS 为洛伦兹线型, 总增益  $g(\nu)$  可表示为

$$g(\nu) = g_0 \frac{\gamma^2}{\nu^2 + \gamma^2} + \sum_{n=1}^q g_n \times \left[ \frac{\gamma^2}{(\nu - n\delta)^2 + \gamma^2} + \frac{\gamma^2}{(\nu + n\delta)^2 + \gamma^2} \right], \quad (8)$$

式中,  $g_0$  和  $g_n$  分别对应于 0 阶和  $n$  阶抽运光谱线产生的增益谱线中心值, 由 (4) 和 (7) 式计算得到的  $I_0$  和  $I_n$  所调制;  $\gamma$  为每条谱线的增益带宽, 这里为本征 BGS 带宽;  $\delta$  为相邻谱线之间的间距;  $\nu$  是与增益谱线中心的失谐;  $q$  为边频的最高级次.

对于混合介质液芯光纤, 各个谱线的增益带宽随着混合比而改变, 可表示为 [22]

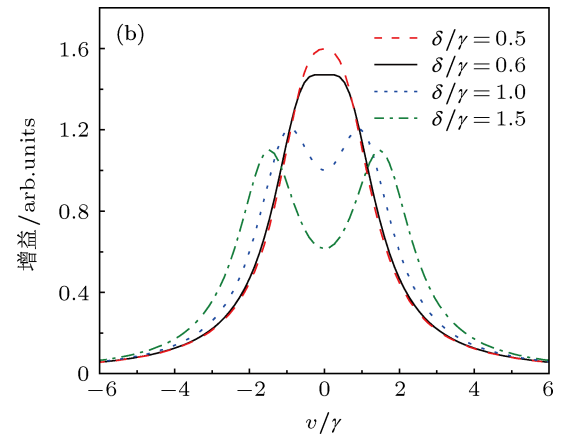
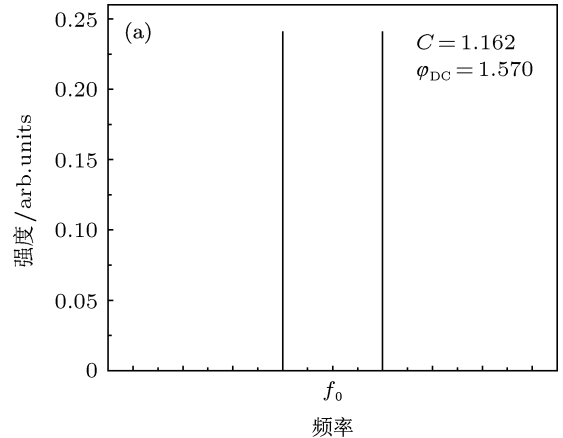


图 1 两条光谱线的抽运光谱和不同  $\delta/\gamma$  时的 BGS (a) 抽运光谱; (b) BGS

$C_1 = 1.647$ ) 时, 可以得到平顶的增益谱, 且顶部波动接近 0 dB; 当  $t = 1$  时, BGS 为顶部凸起的钟形;

当  $t > 2$  时, BGS 顶部中心开始出现凹陷.

当  $t$  为固定值, 如  $t = 1.8$  时, 改变谱线间距, 计算了  $\delta/\gamma = 0.5, 0.67, 1, 1.5, 2$  时的 BGS, 如图 3 所示. 可以看出, 当  $\delta/\gamma > 1$  时, BGS 的增益带宽增加, 但顶部出现凹陷和波动, 改变  $t$  值也无法得到平顶的 BGS; 当  $\delta/\gamma < 1$  时, 增益带宽变窄、顶部凸起, 通过增加  $t$  值可以获得平顶的 BGS, 如图 4 所示. 然而, 当  $\delta/\gamma = 0.6$  时, 要求  $t$  值很大, 这时 1 阶边频强度远大于 0 阶强度, 三条抽运线基本变为两条, 与图 1(b) 获得平顶 BGS 的情况一致; 当  $\delta/\gamma < 0.6$  时, 则很难找到合适的  $t$  值, 使增益谱顶部平整. 因此, 对于三条抽运线的情况, 谱线间距  $\delta$  应满足  $0.6 < \delta/\gamma \leq 1$  条件, 并调整 1 阶边频和 0 阶光波强度比, 能够获得平顶的增益谱.

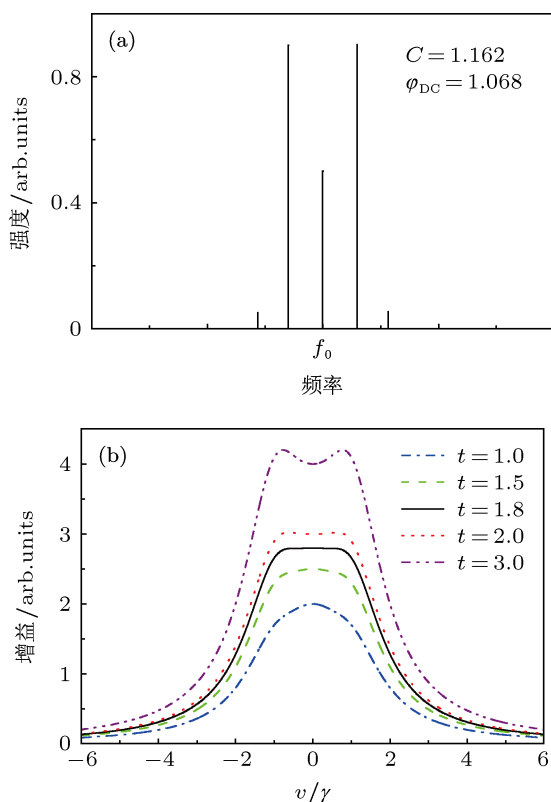


图 2 三条光谱线的抽运光谱和不同  $t$  时的 BGS (a) 抽运光谱; (b) BGS

通常的电光强度或相位调制器能够承受的调制信号电压有限, 调制指数一般小于 2, 所以, 利用单频强度或相位调制难以获得更多的光谱线. 采用多频调制技术能够解决这一问题, 在调制指数较小的情况下获得大于三条的光谱线. 以多频相位调制为例, 根据 (7) 式计算不同调制参数 ( $C_k, \varphi_k$ ) 下  $k$  次谐波的各阶光波强度, 并利用 (8) 式进行光谱叠加, 可得到实现平顶 BGS 的最佳调制参数. 考虑三次

谐波的情况, 当  $C_1 = 1.390, C_3 = 1.460, \varphi_3 = 1.589$  时能够得到九条抽运光谱线, 如图 5(a) 所示, 谱线间距满足  $\delta/\gamma = 1$  时, 相应的平顶 BGS 如图 5(b). 计算时也发现, 当  $\delta/\gamma > 1$  时, 增益谱顶部出现波动. 因此, 对于多频调制抽运线条数小于 20 的情况, 应采用非等幅光谱线, 通过选择合适的各阶光波强度比、谱线间距和抽运线数目可以得到不同带宽的平顶增益谱.

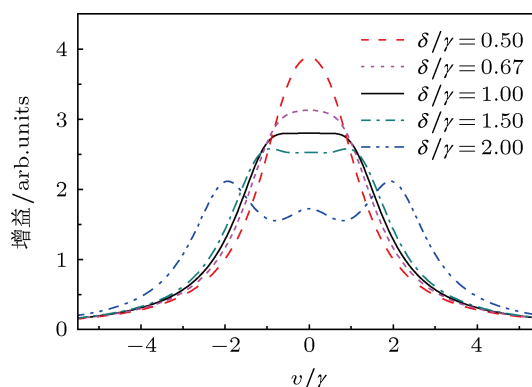


图 3 三条抽运光谱线对应的 BGS 随  $\delta/\gamma$  的变化

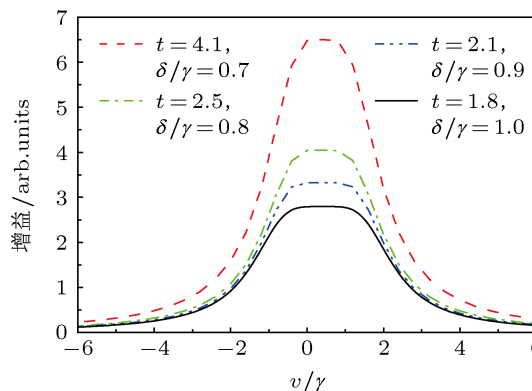


图 4  $\delta/\gamma \leq 1$  时的平顶 BGS

在液芯光纤中注入不同本征布里渊线宽的液体 SBS 介质, 从而改变抽运调制后每条光谱线产生的 BGS 带宽, 结合谱线间距和数目的改变, 可以大幅度扩展叠加后总的 BGS 带宽的控制范围. 以  $\text{CS}_2/\text{CCl}_4$  混合介质为例, 计算了波长为 1550 nm 时  $\text{CS}_2/\text{CCl}_4$  混合介质布里渊线宽和频移随  $\text{CS}_2$  体积分数的变化关系, 如图 6 所示. 可以看出,  $\text{CS}_2$  体积分数由 0 变化到 1, 混合介质的布里渊线宽由接近 250 MHz 变化到 24 MHz, 布里渊频移由 1.89 GHz 变化到 2.56 GHz, 其中纯  $\text{CS}_2$  的布里渊频移与实验测量值 2.51 GHz<sup>[16]</sup> 符合较好. 因此, 通过改变介质的混合体积比, 能够调谐 BGS, 并使其本征增益带宽可调. 图 7(a) 为三条抽运光谱线, 且 1 阶边频是

0 阶光波强度的 1.8 倍条件下不同  $\text{CS}_2$  体积分数  $\beta$  对应的平顶 BGS, 图 7(b) 为两条、三条和九条抽运线时, 平顶 BGS 带宽随  $\text{CS}_2$  体积分数的变化曲线. 可见, 采用两条和三条单频调制的抽运光获得的平顶 BGS 带宽范围为 50 MHz—1 GHz, 采用九条多频调制的抽运光可获得 2 GHz 以上的带宽. 而在单模石英光纤中, 利用三条和十一条等幅光谱线抽运光分别获得了带宽为 150 MHz 和 570 MHz 非平顶的 BGS<sup>[9,11]</sup>. 所以, 在  $\text{CS}_2/\text{CCl}_4$  液芯光纤中相同抽运线条数下 BGS 带宽的控制范围远远超过石英光纤的结果.

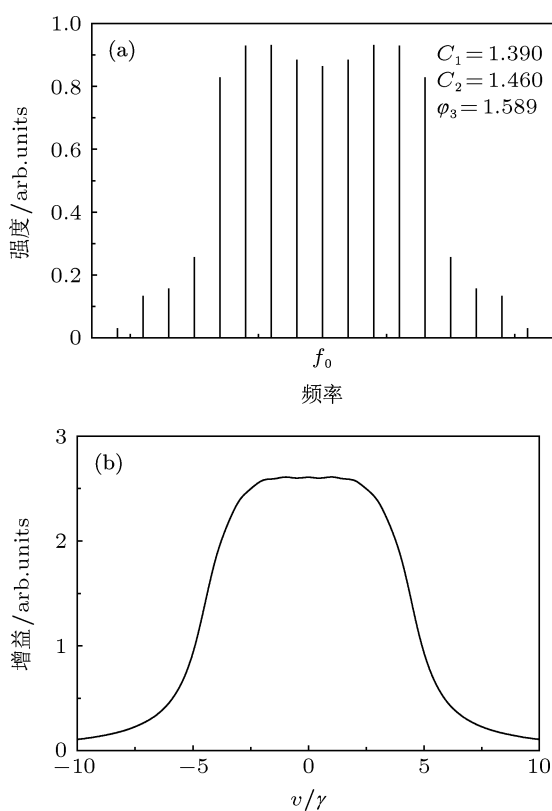


图 5 九条光谱线的抽运光谱和对应的 BGS (a) 抽运光谱; (b) BGS

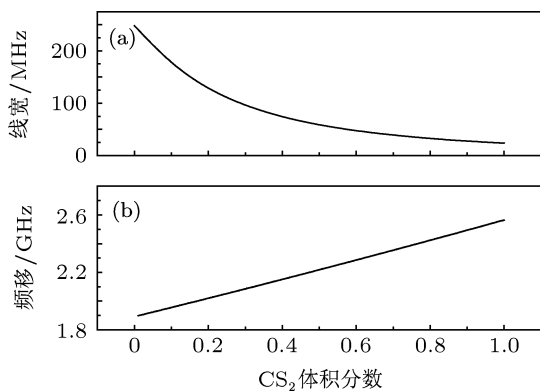


图 6  $\text{CS}_2/\text{CCl}_4$  混合介质布里渊线宽和频移随  $\text{CS}_2$  体积分数的变化关系 (a) 线宽; (b) 频移

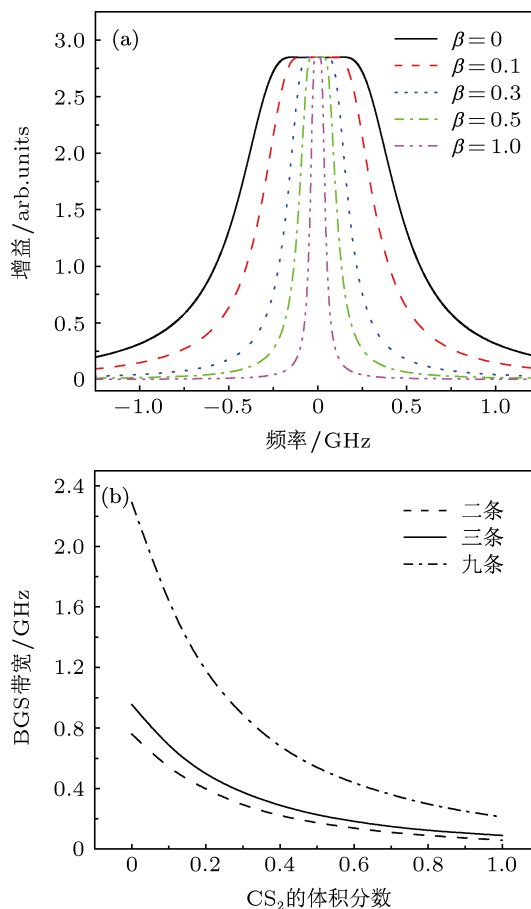


图 7 平顶 BGS 及其增益带宽随  $\text{CS}_2$  体积分数的变化 (a) 三条抽运线时的平顶 BGS; (b) 二条、三条和九条抽运线时的 BGS 带宽

### 4 结论

提出了在  $\text{CS}_2/\text{CCl}_4$  液芯光纤中多线抽运调制和改变本征增益带宽相结合控制 BGS 的方案, 理论模拟了 BGS 随抽运光谱线间距、各谱线强度和  $\text{CS}_2/\text{CCl}_4$  液芯光纤混合比的变化关系, 得到了产生带宽可控平顶 BGS 的条件: 两条抽运线时, 谱线间距满足  $\delta/\gamma = 0.6$  条件, 且谱线强度相同; 三条抽运线时, 谱线间距满足  $0.6 < \delta/\gamma \leq 1$  条件, 改变 1 阶边频和 0 阶光波强度比, 能够得到顶部波动接近 0 dB 的平顶 BGS. 在  $\text{CS}_2/\text{CCl}_4$  液芯光纤中, 通过控制  $\text{CS}_2$  的体积分数, 单频调制下 BGS 带宽的变化范围为 50 MHz—1 GHz. 对于抽运线条数少于 20 的多频调制情况, 应采用非等幅光谱线, 控制各阶光波强度和谱线间距, 可获得平顶 BGS. 九条抽运线时, 在  $\text{CS}_2/\text{CCl}_4$  液芯光纤中总的 BGS 带宽可拓展到 2 GHz. 因此, 利用  $\text{CS}_2/\text{CCl}_4$  液芯光纤, 结合抽运调制技术能够实现高增益且带宽可控范围宽的布里渊放大, 在 SBS 慢光和窄带光学滤波等方面有巨大应用潜力.

- [1] Dong Y K, Zhang H Y, Chen L, Bao X Y 2012 *Appl. Opt.* **51** 1229
- [2] Zhang L, Zhang D, Shi J L, Shi J W, Gong W P, Liu D H 2012 *Appl. Phys. B* **109** 137
- [3] Hasi W L J, Wang X Y, Guo X Y, Zhong Z M, Fan R Q, Lin D Y, He W M, Lu Z W 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 144207 (in Chinese) [哈斯乌力吉, 王雪阳, 郭翔宇, 仲召明, 范瑞清, 林殿阳, 何伟明, 吕志伟 2012 物理学报 **61** 144207]
- [4] Liu D H, Shi J W, Chen X D, Ouyang M, Gong W P 2010 *Front. Phys. China* **5** 82
- [5] Wise A, Tur M, Zadok A 2011 *Opt. Express* **19** 21945
- [6] Lu Z W, Ba D X, Zhu C Y, Dong Y K 2012 *Appl. Phys. B* **109** 55
- [7] Zhu Z, Dawes A M C, Gauthier D J, Zhang L, Willner A E 2007 *J. Lightwave Technol.* **25** 201
- [8] Herr'aez M G, Song K Y, Th'evenaz L 2006 *Opt. Express* **14** 1395
- [9] Lu Z W, Dong Y K, Li Q 2007 *Opt. Express* **15** 1871
- [10] Ba D X, Lu Z W, Zhu C Y 2011 *Academic International Symposium on Optoelectronics and Microelectronics Technology (AISOMT)*, Harbin, Oct.12-16 2011 p108
- [11] Dong Y K, Lu Z W, Li Q, Liu Y F 2008 *J. Opt. Soc. Am. B* **25** C109
- [12] Sakamoto T, Yamamoto T, Shiraki K, Kurashima T 2008 *Opt. Express* **16** 8026
- [13] Dong Y K 2008 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Harbin Institute of Technology) (in Chinese) [董永康 2008 博士学位论文 (哈尔滨: 哈尔滨工业大学)]
- [14] Kieu K, Schneebeli L, Merzlyak E, Hales J M, Desimone A, Perry J W, Norwood R A, Peyghambarian N 2012 *Opt. Lett.* **37** 942
- [15] Kieu K, Schneebeli L, Norwood R A, Peyghambarian N 2012 *Opt. Express* **20** 8148
- [16] Kieu K, Churin D, Schneebeli L, Norwood R A, Peyghambarian N 2013 *Opt. Lett.* **38** 543
- [17] Herrera O D, Schneebeli L, Kieu K, Norwood R A, Peyghambarian N 2013 *Opt. Express* **21** 8821
- [18] Gao W, Sun D, Bi Y F, Li J Y 2012 *Appl. Phys. B* **107** 355
- [19] Gao W, Hu X B, Sun D, Li J Y 2012 *Opt. Express* **20** 20715
- [20] Xu Y H 2010 *Ph. D. Dissertation* (Shanghai: Shanghai Jiao Tong University) (in Chinese) [许永豪 2010 博士学位论文 (上海: 上海交通大学)]
- [21] Dai F F, Xu Y H, Chen X F 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 14
- [22] Hasi W L J, Lu Z W, Liu S J, He W M, Zhao X Y, Zhang W 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2976 (in Chinese) [哈斯乌力吉, 吕志伟, 刘述杰, 何伟明, 赵晓彦, 张伟 2008 物理学报 **57** 2976]

# Flat-top Brillouin gain spectrum with a controllable bandwidth produced from multiple-lines pump modulation in liquid-core optical fibers\*

Gao Wei<sup>1)2)†</sup> Liu Sheng-Nan<sup>1)</sup> Bi Ya-Feng<sup>1)</sup> Hu Xiao-Bo<sup>1)</sup>  
Pu Shao-Zhi<sup>1)</sup> Zhao Hong<sup>2)</sup>

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

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

( Received 16 April 2013; revised manuscript received 23 May 2013 )

## Abstract

We present a method of achieving a flat-top Brillouin gain spectrum (BGS) with a controllable bandwidth based on multiple-lines pump modulation in a CS<sub>2</sub>/CCl<sub>4</sub> mixture liquid-core optical fiber. The influences of the pump spectrum separation, the intensity of each spectrum line, and the mixing ratio of core liquid media on the BGS are theoretically investigated, and the conditions of producing the flat-top BGS with an adjustable bandwidth are obtained. Results show that 2—9 spectral lines are generated based on single-frequency and multifrequency modulation using an intensity or phase modulator. The flat-top BGS with bandwidths of 50 MHz—2 GHz are obtained by controlling spectrum separation, the intensity ratio of each spectral line and CS<sub>2</sub> volume fraction. This method has advantages of convenient operation and wide bandwidth range. It can be applied in Brillouin amplification with high gain and low distortion, and hence satisfies the requirements of weak signal detection and slow light systems.

**Keywords:** stimulated Brillouin scattering, Brillouin gain spectrum, multiple-lines pump modulation, liquid-core optical fiber

**PACS:** 42.65.-k, 42.65.Es

**DOI:** 10.7498/aps.62.194206

\* Project supported by the Program of Science and Technology of Education Bureau of Heilongjiang Province, China (Grant No. 12511114), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61078004, 61378003), and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant Nos. 2012T50372, 20100481017).

† Corresponding author. E-mail: wei\_g@163.com