

# 多纵模受激布里渊散射阈值<sup>\*</sup>

林殿阳<sup>†</sup> 高洪岩 王双义 蒋萧村 吕志伟

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室 哈尔滨 150001)

(2004 年 12 月 14 日收到 2005 年 1 月 18 日收到修改稿)

针对自由运转激光, 通过多纵模受激布里渊散射理论中引进不同纵模的随机初始相位, 推导出抽运光模间隔不受任何限制的宽带多纵模 SBS 耦合波方程, 讨论了宽带 SBS 阈值与抽运光线宽、模数、模间隔、布里渊线宽及有效相互作用长度之间的关系. 理论与已有实验结果符合得很好.

关键词: 受激布里渊散射, 多纵模, 阈值

PACC: 4256C, 4256F

## 1. 引言

自从受激布里渊散射(SBS)发现以来, 由于它在改善激光光束质量和压缩脉宽方面的潜在的应用前景, 在理论和实验上受到广泛的关注和深入的研究. 现在窄带 SBS 相位共轭镜和脉宽压缩技术已成功应用于商业激光器上, 而宽带 SBS 在理论和实验上还有许多问题尚待解决. 其中在宽带 SBS 产生阈值的研究中就存在相互矛盾的结论. 早在 1970 年 D'yakov 就对连续宽带 SBS 进行了理论讨论, 指出当激光相干长度远大于 SBS 特征增益长度时, SBS 增益与带宽无关; 当激光相干长度小于 SBS 特征增益长度或接近相同量级时, SBS 增益与带宽有关, 带宽越大, SBS 阈值越高<sup>[1]</sup>. 1974 年 Zubarev 等人在实验上证明了这一结论, 获得了 SBS 阈值与抽运光带宽成正比的关系<sup>[2]</sup>. 1986 年 Valley 对宽带 SBS 的研究进行了详细综述<sup>[3]</sup>. 1996 年 Cook 等人用不同的方法推导出与 D'yakov 相同的理论结果, 并在无模宽带染料激光抽运的 SBS 实验中获得了与理论一致的结论<sup>[4]</sup>. 1986 年 Narum 等人在激光模间隔大于布里渊线宽的条件下利用多纵模理论对宽带 SBS 进行了讨论, 理论结果仍然是当激光相干长度远大于 SBS 特征增益长度时, SBS 增益与带宽无关, 但理论不能解释激光纵模间隔小于布里渊线宽的情况<sup>[5]</sup>. 后来的许多实验都支持了 Narum 等人的观点. 1991

年 Davis 等人在实验上获得了 SBS 反射率与激光带宽有关, 激光相干长度变小, SBS 反射率变小<sup>[6]</sup>. 1994 年 Bullock 等对多纵模激光抽运的 SBS 做了进一步的讨论, 指出抽运光纵模间隔在布里渊线宽之内, 产生 SBS 时相互增强; 抽运光纵模间隔大于布里渊线宽时 SBS 放大与相干长度和 SBS 增益长度的比值有关, 理论和实验符合得很好<sup>[7]</sup>. 1995 年 Eichler 等人在宽带 XeCl 激光 SBS 相位共轭镜的研究中, 指出 SBS 阈值与相干长度和瑞利长度的比值有关. 当焦距很短时, 如果相干长度大于相互作用长度, 宽带与窄带 SBS 阈值相等. 如果相干长度小于相互作用长度, 宽带 SBS 阈值与线宽有关<sup>[8]</sup>. 2004 年 Wang 等人在宽带 KrF 激光抽运的 SBS 研究中指出抽运光各纵模之间在一定范围内存在耦合, 宽带 SBS 与抽运光线宽有关<sup>[9]</sup>. 而 Duignan 等人<sup>[10]</sup>和 Whitney 等人<sup>[11]</sup>在利用多线 HF 激光产生的 SBS 实验中获得不同谱线的激光独立产生 SBS, 相互之间没有耦合的结论. 虽然不同的实验结果可以用不同的理论解释, 但它们之间是相互矛盾的. 因此, 需要对宽带 SBS 的理论模型做进一步研究.

宽带 SBS 的定义是抽运光线宽大于布里渊线宽或抽运光脉宽小于 SBS 介质的声子寿命, 而 SBS 的增长与介质增益系数、抽运光强度和有效相互作用长度有关, 所以宽带 SBS 的阈值也应当与多纵模抽运光的线宽、模数、模间隔以及介质的布里渊线宽、有效相互作用长度有关. 本文利用多纵模受激布里

<sup>\*</sup> 国家 863 惯性约束聚变(批准号 863-804)资助的课题.

<sup>†</sup> E-mail: dianyanglin@hit.edu.cn

渊散射理论, 针对自由运转激光, 通过引进不同纵模的随机初始相位, 导出了抽运光模间隔不受任何限制的宽带多纵模 SBS 耦合波方程, 讨论了宽带 SBS 阈值与抽运光线宽、模数、模间隔、布里渊线宽及有效相互作用长度之间的关系. 理论与已有实验结果符合得很好.

## 2. 理论模型

在忽略其他非线性效应的情况下, SBS 的耦合波方程为

$$\nabla^2 \rho - \frac{1}{v} \alpha \frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\gamma}{2} \nabla^2 (E^2), \quad (1)$$

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{n^2}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu \frac{\gamma}{\rho_0} \frac{\partial^2 (\rho \mathbf{E})}{\partial t^2}, \quad (2)$$

其中  $v$  是声波在介质内的传播速度,  $\gamma$  是电致伸缩系数,  $\alpha$  是声波在介质内的衰减系数,  $\rho$  是介质的密度,  $\rho_0$  是密度的平均值.

如果抽运光是具有相同横模结构的多纵模长脉冲线偏振光, 在自由运转情况下, 各纵模的相位是随机的. 当产生 SBS 时,  $N$  个纵模的抽运光对应产生  $N$  个纵模的 SBS 光, 则 SBS 光各纵模的相位只与相应抽运光纵模的相位有关, 各纵模间相位分布也是相对随机的, 与抽运光相位分布具有相同的特性. 因此, 介质内光波的总场强可以写作

$$E = \frac{1}{2} \left[ \sum_m E_m^p e^{(k_m^p z - \omega_m^p t + \varphi_m^p)} + \sum_n E_n^s e^{(-k_n^s z - \omega_n^s t + \varphi_n^s)} + \text{c. c.} \right], \quad (3)$$

其中  $p, s$  表示抽运光和散射光,  $\varphi$  为随机初相位,  $m, n$  表示纵模序号. (1)(2) 式中的驱动项与总场强的平方成比例, 即有

$$E^2 = \sum_m \sum_n E_m^p E_n^{s*} e^{(k_{mn}^p z - \omega_{mn}^p t + \varphi_{mn}^p)} + \text{c. c.}, \quad (4)$$

其中  $k_{mn} = k_m^p + k_n^s$ ,  $\omega_{mn} = \omega_m^p + \omega_n^s$ ,  $\varphi_{mn} = \varphi_m^p + \varphi_n^s$ , 它们代表声波的波数、频率和初相位. 对应的介质密度可表示为

$$\rho = \sum_m \sum_n \frac{1}{2} [\rho_{mn} e^{(k_{mn}^p z - \omega_{mn}^p t + \varphi_{mn}^p)} + \text{c. c.}]. \quad (5)$$

把 (4) 式和 (5) 式代入到 (1) 式, 可以得到密度变化的表达式

$$\rho_{mn} = g_{mn} E_m^p E_n^{s*}, \quad (6)$$

其中  $g_{mn} = \gamma \frac{k_{mn}^2}{(k_{mn}^2 v^2 - i\Gamma \omega - \omega_{mn}^2)}$ ,  $\Gamma = \alpha v$ .

把 (3) 式和 (4) 式代入 (2) 式, 利用慢变振幅近似

及  $k_m^{p,s} = \frac{n}{c} \omega_m^{p,s}$  可得到

$$\begin{aligned} & \sum_k k_k^p \left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) E_k^p \exp[i(k_k^p z - \omega_k^p t + \varphi_k^p)] \\ &= \frac{i\mu\gamma}{4\rho_0} \sum_m \sum_n \sum_j (\omega_{mn} + \omega_j^s) \rho_{mn} \\ & \times E_j^s \exp[i[(k_{mn} - k_j^s)z - (\omega_{mn} + \omega_j^s)t \\ & + (\varphi_{mn} + \varphi_j^s)]] , \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \sum_j k_j^s \left( \frac{\partial}{\partial z} - \frac{n}{c} \frac{\partial}{\partial t} \right) E_j^s \exp[i(-k_j^s z - \omega_j^s t + \varphi_j^s)] \\ &= -\frac{i\mu\gamma}{4\rho_0} \sum_m \sum_n \sum_k (-\omega_{mn} + \omega_k^p) \rho_{mn}^* \\ & \times E_k^p \exp[i[(-k_{mn} - k_k^p)z \\ & - (-\omega_{mn} + \omega_k^p)t + (-\varphi_{mn} + \varphi_k^p)]] . \end{aligned} \quad (8)$$

当产生 SBS 的有效相互作用长度小于抽运光的相干长度时, 在 SBS 有效相互作用长度内, 抽运光是完全相干光. Eichler 已在实验中证明在这种情况下, SBS 与抽运光带宽无关<sup>[8]</sup>. 因此, 耦合波方程简化为窄带 SBS 的耦合波方程

$$\frac{\partial}{\partial z} I^p = g I^p I^s, \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} I^s = g I^p I^s. \quad (10)$$

当产生 SBS 的有效相互作用长度大于抽运光相干长度时, 在自由运转情况下, 抽运光各纵模间是完全非相干的, 可按各纵模的非相干叠加处理. 因此, 对 (7) 式两边同乘以  $E_l^{p*} e^{-(k_l^p z - \omega_l^p t + \varphi_l^p)}$  并对其进行时间平均<sup>[12]</sup>, 于是

$$E_l^{p*} \frac{\partial}{\partial z} E_l^p k_l^p = \frac{i\mu\gamma}{4\rho_0} \sum_j \omega_l^2 g_{lj} E_j^p E_j^{s*} E_j^s E_l^{p*}. \quad (11)$$

对上式求复共轭, 然后再与上式求和可得抽运光场强的表达式为

$$\frac{\partial}{\partial z} I_l^p = \sum_j C_{lj} I_l^p I_j^s, \quad (12)$$

其中

$$C_{lj} = \frac{2\mu\gamma^2 \Gamma \omega_l^p}{\rho_0 n_l^p n_j^s \varepsilon_0} \frac{k_j^2 \omega_{lj}}{(k_j^2 v^2 - \omega_j^2)^2 + \Gamma^2 \omega_j^2}. \quad (13)$$

一般定义  $g_l = C_{ll} = \frac{2\mu\gamma^2 \omega_l^p}{\rho_0 n_l^p n_j^s \varepsilon_0 \Gamma} \cdot \frac{\rho_l}{v}$  为第  $l$  个抽运光纵模产生其对应共振散射光 (第  $l$  个纵模散射光) 的

增益系数  $\rho_l$  是第  $l$  个纵模对应的声波波数.

令

$$B_{ij} = C_{ij}/C_{il} = \frac{\Gamma^2 v}{\rho_l} \cdot \frac{k_{ij}^2 \omega_{ij}}{(k_{ij}^2 v^2 - \omega_{ij}^2)^2 + \Gamma^2 \omega_{ij}^2}$$

为抽运光第  $l$  个纵模对散射光第  $j$  个纵模的耦合系数. 随  $\omega_{ij}$  变化,  $B_{ij}$  呈洛伦兹型变化. 这表明单个纵模抽运光对在一定频率失谐量范围内的散射光具有放大作用; 反之, 单个纵模散射光对在一定频率失谐量范围内的抽运光具有抽空效应. 根据  $B_{ij}$  的表达式可知,  $B_{ij}$  随抽运光频率的变化线型是洛伦兹型, 频率失谐宽度正是布里渊线宽. 因此 (12) 式可以写成形式

$$\frac{\partial I_l^p}{\partial z} = \sum_j g_l B_{ij} I_l^p I_j^s \quad (14)$$

同理可以得到散射光光强的表达式

$$\frac{\partial I_l^s}{\partial z} = \sum_k g_l B_{kl} I_l^s I_k^p \quad (15)$$

根据方程 (9) (10) 和方程 (14) (15) 可知, 当 SBS 有效相互作用长度小于抽运光相干长度时, SBS 按窄带规律变化; 当 SBS 有效相互作用长度大于抽运光相干长度时, SBS 按宽带规律变化. 下面利用方程 (9) (10) 和方程 (14) (15), 进一步讨论宽带多纵模 SBS 阈值的变化规律.

### 3. SBS 阈值

为了讨论宽带多纵模 SBS 阈值的变化规律, 做进一步简化, 假设在抽运光线宽内所有纵模具有相同的强度; 并且假设包含在布里渊线宽内各纵模之间的耦合因子  $B_{ij} \approx 1$  及在抽运光线宽内  $g_l \approx g$  近似成立. 根据文献 [13], SBS 达到阈值的条件定义为反射率达到  $\sim 2\%$ . 此时, 小信号近似成立, 即  $I^p(z) = I^p(0)$ . 当产生 SBS 的有效相互作用长度小于抽运光的相干长度时, 对 (10) 式求解; 当产生 SBS 的有效相互作用长度大于抽运光相干长度时, 对 (8) 式求解, 再对所有散射光分量求和, 可获得散射光光强为

$$I_s = \begin{cases} I_0 \exp[g I^p L] & (L < L_c^M), \\ I_0 \exp[g I^p L_c^M] \exp\left[g \frac{m}{N} I^p (L - L_c^M)\right] & (L \geq L_c^M), \end{cases} \quad (16)$$

式中  $L_c^M$  表示宽带抽运光的相干长度,  $N$  表示抽运光的纵模数,  $m$  表示包含在布里渊线宽内的纵模数,  $L$  表示 SBS 的有效相互作用长度,  $I_0$  表示散射光的总初始光强.

按与窄带 SBS 同样的方式  $I_{th}^s \approx C/gL$  ( $I_{th}^s$  表示窄带 SBS 阈值,  $C$  为常数, 其大小为  $25-30$ )<sup>[8]</sup>. 定义宽带 SBS 达到阈值的条件, 则宽带 SBS 阈值可以表示为

$$I_{th}^M \approx \begin{cases} C/(gL) & (L < L_c^M), \\ C[L/gL_c^M + g \frac{m}{N}(L - L_c^M)] & (L \geq L_c^M). \end{cases} \quad (17)$$

因此可以得到以下结论:

1) 如果宽带光与窄带光的有效相互作用长度相同, 当有效相互作用长度小于激光相干长度时, SBS 的阈值与带宽无关.

2) 如果宽带光与窄带光的有效相互作用长度相同, 当有效相互作用长度大于激光相干长度时, 则宽带 SBS 与窄带 SBS 的阈值不同, 宽带 SBS 的阈值与抽运光的相干长度、抽运光的纵模数、模间隔、布里渊线宽内包含的纵模数及有效相互作用长度有关.

### 4. 讨论与分析

1) 根据上面的理论结果, 当抽运光相干长度大于 SBS 有效相互作用长度时, 无论模间隔多大, 只要不同带宽激光产生 SBS 的有效相互作用相同, SBS 阈值与抽运光带宽无关. 在理论上这与 Bullock 等人<sup>[7]</sup>的多纵模 SBS 理论结果是一致的. 他们指出当抽运光线宽大于布里渊线宽且 SBS 有效相互作用长度小于抽运光相干长度时, 各纵模产生 SBS 时相互增强. 在实验上, 这与 Eicher 等人<sup>[8]</sup>的宽带 SBS 实验结果一致. 他们利用短焦距聚焦产生 SBS, 当抽运光相干长度大于 SBS 有效相互作用长度时, 宽带与窄带阈值相等. 当抽运光相干长度小于 SBS 相互作用长度, 宽带阈值与线宽有关. 如果实验满足 SBS 相互作用长度小于抽运光相干长度的条件, 则同时满足在连续谱 SBS 理论<sup>[14]</sup>和多线 SBS 理论<sup>[5,7]</sup>中提出的抽运光相干长度远大于 SBS 特征增益长度的条件. 因为 SBS 的特征增益长度为  $1/gI_p$ , 而 SBS 有效相互作用长度约为  $25/gI_p - 30/gI_p$ , 当抽运光相干长度大于 SBS 有效相互作用长度时, 显然满足抽运光相干长度远大于 SBS 特征增益长度. 在文献 [5] 的 SBS 实验中, 激光最大线宽为 10GHz, 纵模数为 3 个和 4 个时, 相干长度  $\sim 3$ cm, 而共焦参量为 0.5mm. 在短焦距聚焦状态下, 有效相互作用长度

按 5 倍的瑞利长度计算<sup>[14]</sup>,文献[5]实验中的 SBS 有效相互作用长度为 5.5mm,这完全满足抽运光相干长度大于有效相互作用长度的要求.因此,SBS 阈值与抽运带宽无关.这与理论结果是完全一致的.

2)如果抽运光模间隔小于布里渊线宽,且抽运光线宽大于布里渊线宽时,则当有效相互作用长度大于激光相干长度时,(17)式可以写作

$$I_{th} \approx 30 \left[ gL_c^M + g \frac{\Delta\omega_B}{\Delta\omega_p} (L - L_c^M) \right]. \quad (18)$$

由于对抽运光模间隔没有任何限制,上式同样满足连续谱抽运 SBS 的情况.如果  $gL_c^M \ll g \frac{\Delta\omega_B}{\Delta\omega_p} (L - L_c^M)$  则  $L \gg L_c^M$ ,则  $I_{th} \approx 30 \left[ g \frac{\Delta\omega_B}{\Delta\omega_p} L \right]$ ,当布里渊线宽和 SBS 有效相互作用长度不变时,SBS 阈值正比于抽运光线宽.这比较适合带宽较宽的激光产生 SBS 的情况.如果  $gL_c^M \gg g \frac{\Delta\omega_B}{\Delta\omega_p} (L - L_c^M)$  且  $L \gg L_c^M$  则  $I_{th} \approx 30 \left[ gL_c^M \right]$ ,随带宽变大,相干长度变短,则 SBS 阈值增大.这比较适合 SBS 有效相互作用长度与抽运光相干长度比较接近的情况.文献[2]和[4]报道了在实验上获得 SBS 阈值与线宽成正比的关系.图 1 为文献[2]给出的理论与实验结果.图中实线为理论上得到的阈值强度和带宽的关系,○和△分别表示实验中介质为  $N_2$  和  $SF_6$  时,不同抽运带宽下的归一化的阈值强度.图 2 为文献[4]采用连续可调线宽的染料激光器作抽运源,介质为  $C_2F_6$  且作用长度短的条件下得到的实验结果,从图中可以看出抽运带宽在一定范围内阈值与带宽近似成直线.

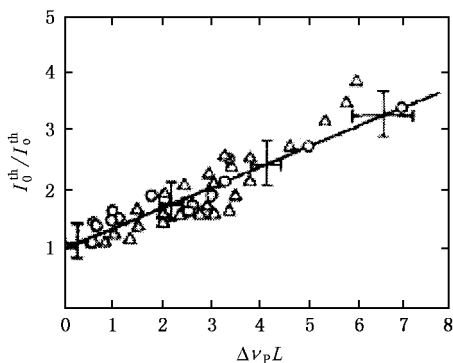


图 1 文献[2]中给出的 SBS 阈值与抽运光带宽的关系

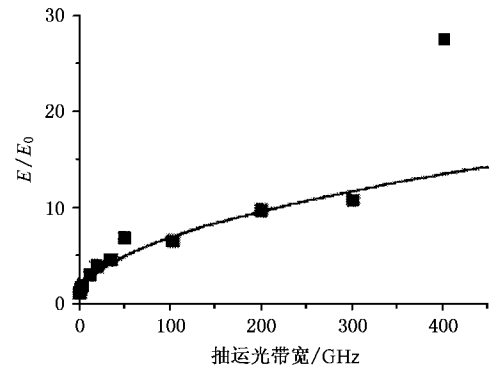


图 2 文献[4]中给出的 SBS 阈值与抽运光带宽的关系

1,当有效相互作用长度大于激光相干长度时,(17)式可以写作

$$I_{th} \approx 30 \left[ gL_c^M + g \frac{1}{N} (L - L_c^M) \right]. \quad (19)$$

如果  $gL_c^M \ll g \frac{1}{N} (L - L_c^M)$  且  $L \gg L_c^M$ ,则  $I_{th} \approx 30N/gL$ ,各纵模独立产生 SBS,宽带 SBS 阈值是窄带阈值的  $N$  倍.文献[10]用多线的 HF 激光产生 SBS,各线间隔约为  $5 \times 10^{11}$  Hz,介质的布里渊线宽为  $3.7 \times 10^6$  Hz,满足上述条件.实验结果得到各线的阈值和反射率都与单线情况相似,且在不同输入能量下测得的 SBS 总的反射率表明各线间没有非线性相互作用.文献[11]实验上也没发现多线产生 SBS 时有相互作用,即认为 SBS 是各线独立产生的.如果  $gL_c^M \gg g \frac{1}{N} (L - L_c^M)$  则  $I_{th} \approx 30/gL_c^M$ ,宽带 SBS 阈值与相干长度有关.

4)如果抽运光线宽保持不变,但模间隔改变,则激光的总纵模数发生变化.如果模间隔保持大于布里渊线宽,则随模间隔变小,抽运光总模数  $N$  增加,布里渊线宽内包含的模数不变,即  $m = 1$ ,当抽运光相干长度小于 SBS 有效相互作用长度时, $1/N$  减小,SBS 阈值增加.当抽运光相干长度大于有效相互作用长度时,SBS 阈值不变,与模数无关.如果模间隔小于布里渊线宽,模间隔变小, $N$  增大, $m$  也增大,但  $m/N$  不变,因此 SBS 阈值不变,与模数无关.

5)如果抽运光线宽保持不变,且模间隔不变,当布里渊线宽发生变化时如果抽运光模间隔保持大于布里渊线宽,则包含在布里渊线宽内的模数不变,SBS 阈值不变.如果模间隔小于布里渊线宽,则随布里渊线宽变宽,包含在布里渊线宽内的模数变大,当抽运光相干长度小于有效相互作用长度时,宽带 SBS 阈值减小.文献[9,15]中,采用气体  $SF_6$  作为

3)如果抽运光模间隔大于布里渊线宽,则  $m =$

SBS 介质,得到随着气压升高反射率增大的结论.这是因为随着气压的改变,布里渊线宽也随着发生了变化,从而导致了反射率和阈值的变化.

6)如果抽运光模数不变,但模间隔改变,则抽运光线宽发生变化.当模间隔保持大于布里渊线宽时,SBS 阈值为  $I_{th} \approx 30N/gL_c^M + g \frac{1}{N}(L - L_c^M)$ .如

果  $gL_c^M \ll g \frac{1}{N}(L - L_c^M)$ ,且  $L \gg L_c^M$ ,则  $I_{th} \approx 30N/gL$ .各纵模独立产生 SBS,多线 SBS 的阈值与模数成正比,与抽运光带宽无关.如果不满足条件

$gL_c^M \ll g \frac{1}{N}(L - L_c^M)$  则 SBS 阈值与带宽有关.

7)(17)式可以改写为

$$\frac{I_{th}^M}{I_{th}^S} \approx \begin{cases} 1 & (L < L_c^M), \\ \left[ \frac{L_c^M}{L} + \frac{m}{N} \left( 1 - \frac{L_c^M}{L} \right) \right]^{-1} & (L \geq L_c^M). \end{cases} \quad (20)$$

由此可以看出宽带 SBS 阈值和抽运光相干长度与 SBS 有效相互作用长度的比值及包含在布里渊线宽内的纵模数与抽运光总模数的比值有关.这与文

献 [8] 在实验上获得的 SBS 阈值与相干长度和瑞利长度的比值有关的结果是一致的.这是因为在聚焦抽运条件下,SBS 有效相互作用长度与瑞利长度有关.

## 5. 结 论

本文利用多纵模理论,针对自由运转激光,通过引进不同纵模的随机初始相位,推导出了模间隔不受任何限制的宽带多纵模 SBS 耦合波方程,讨论了宽带 SBS 阈值与抽运光线宽、模数、模间隔、布里渊线宽及有效相互作用长度之间的关系.理论结果表明,当抽运光相干长度大于 SBS 有效相互作用长度时,SBS 阈值与抽运光带宽无关;当抽运光相干长度小于 SBS 有效相互作用长度时,SBS 阈值与抽运光的相干长度、抽运光的总模数、模间隔、布里渊线宽内包含的纵模数及有效相互作用长度有关.给出了不同条件下 SBS 阈值与抽运光带宽的关系,及多纵模抽运光独立产生 SBS 的条件.理论与已有实验结果符合得很好.

- [1] D'yakov Yu E 1970 *JETP Lett.* **11** 243  
 [2] Zubarev I G and Mikhailov S I 1974 *Kvant. Elektron.* **1** 1239  
 [3] Valley G C 1986 *IEEE J. Quantum Electron.* **22** 704  
 [4] Cook G and Ridley K D 1996 *Optics Communications* **130** 192  
 [5] Narum P, Skeldom M D and Boyd W 1986 *IEEE J. Quantum Electron.* **22** 2161  
 [6] Davis G M and Gower M C 1991 *IEEE J. Quantum Electron.* **27** 496  
 [7] Bullock D L, Nguyen-Vo N M and Pfeifer S J 1994 *IEEE J. Quantum Electronics* **30** 805  
 [8] Eichler H J, König R, Patzold H J et al 1995 *Appl. Phys.* **B 61** 73  
 [9] Wang X H, Lü Z W, Lin D Y et al 2004 *Chinese Physics* **13** 1734  
 [10] Duignan M T, Feldman B J, Gibson N D et al 1988 *SPIE Nonlinear*

*Optical Beam Manipulation, Beam Combining, and Atmospheric Propagation* **874** 25

- [11] Whitney W T, Duignan M T and Feldman B J 1990 *J. Opt. Soc. Am.* **B 7** 2160  
 [12] Gavrielides A and Peterson P 1986 *J. Opt. Soc. Am.* **B 3** 1394  
 [13] Eicher H J, Menzel R and Schumann D 1992 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **25** 1161  
 [14] Munch J, Wuerker R F and LeFebvre M J 1989 *Applied Optics* **28** 3099  
 [15] Lü Z W, Wang X H, Lin D Y et al 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 1184 (in Chinese) [吕志伟、王晓慧、林殿阳等 2003 物理学报 **52** 1184]

# Threshold of stimulated Brillouin scattering pumped by a multi-longitudinal mode laser<sup>\*</sup>

Lin Dian-Yang Gao Hong-Yan Wang Shuang-Yi Jiang Xiao-Cun Lü Zhi-Wei

( *National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China* )

( Received 14 December 2004 ; revised manuscript received 18 January 2005 )

## Abstract

On the basis of the multi-longitude theory of stimulated Brillouin scattering (SBS), a group of coupling wave equations without limitation to the mode separation of a laser was deduced while the random initial phases of the multi-longitudinal modes were introduced for SBS pumped by a free-operating laser. The dependences of broadband SBS threshold on the bandwidth of the laser, the number of the laser modes, the mode separation of the laser, the linewidth of Brillouin, and the ratio of the SBS interaction length to the laser coherence length were discussed in detail. And the theoretical results were consistent with the experimental results reported.

**Keywords** : stimulated Brillouin scattering, multi-longitudinal mode, threshold

**PACC** : 4256C, 4256F

---

<sup>\*</sup> Project supported by the National High Technology Development Program of China ( Grant No.863-804 ).