

直接耦合半导体光放大器的噪声特性

段子刚 姚 芳 胡晓君 刘德明 黄德修

(华中理工大学光电子工程系 武汉 430074)

张哲民

(武汉电信器件公司 武汉 430074)

提要 研究了直接耦合混合应变量子阱半导体光放大器(SOA)的噪声特性. 实验中测定 SOA 在 130 mA 偏置电流下的噪声指数为 7.7 dB, 表明应变量子阱结构改善了 SOA 的噪声性能. 理论分析指出, 通过消除 SOA 的剩余反射, 其噪声性能可以得到进一步改善.

关键词 应变量子阱, 半导体光放大器, 噪声指数

1 引 言

半导体光放大器(SOA)获得实际应用的障碍之一是其较差的噪声特性. 体材料结构的 SOA, 其噪声指数达到 13 dB 左右^[1]. 相对而言, 掺铒光纤放大器的噪声指数仅为约 6 dB^[2]. SOA 的噪声机制为信号与自发辐射拍噪声和自发辐射与自发辐射拍噪声^[3,4]. 后者可以采用滤波器滤去, 前者成为 SOA 的主要噪声来源. 近年来, 采用应变量子阱结构的 SOA 获得了很大的成功. 不仅使 SOA 实现了很高的增益, 还大大降低了偏振灵敏度^[5], 并且有效地改善了噪声特性, 使其接近掺铒光纤放大器的噪声水平.

2 实 验

2.1 样品制备

混合应变量子阱 SOA 的条形有源区为在 InP 衬底上采用 MOCVD 生长 InGaAsP 多量子阱, 由三个压应变量子阱和四个张应变量子阱构成. 芯片为 BH 结构. 将外延片用湿法刻蚀再液相外延掩埋, 加电极后解理成腔长 650 μm 的条形, 然后采用特定的镀膜工艺在腔面上镀 AR 膜增透, 最后解理成 SOA 芯片. 安装热沉后两端用拉锥的单模光纤直接耦合. 加半导体制冷器封装. 镀膜前激励波长为 1.34 μm , 镀膜后在 120 mA 偏置下自发辐射谱的中心波长为 1.28 μm . SOA 的偏振灵敏度约为 1 dB.

2.2 测量

由于 SOA 的噪声源于自发发射, 噪声特性测量即为测量输入信号功率和输出的信号功率与信号光谱宽范围内的自发发射噪声功率. 由输入输出信噪比即可获得描述 SOA 噪声性能的噪声指数 N_F ^[5]

$$N_F = \frac{1}{G} \left[1 + \frac{P_a}{h\nu B} \right]$$

式中, G 为信号增益, P_a 为 SOA 自发发射噪声功率, $h\nu B$ 为输入噪声功率.

噪声测量原理如图 1 所示.

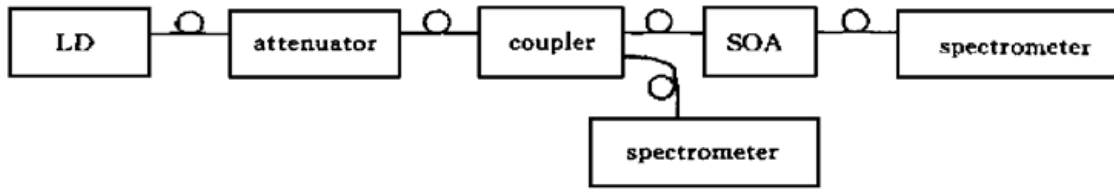


图 1 SOA 噪声测量系统

Fig. 1 System of SOA noise detection

波长为 $1.29 \mu\text{m}$ 的 LD 所发出的信号光经过衰减器后送入 1:2 耦合器, 耦合器的两个输出端之一将信号送入混合应变量子阱 SOA, 另一端送入光谱仪, 由此测出输入信号的大小. 输入信号经 SOA 放大后, 连同 SOA 所产生的噪声送入光谱仪, 由光谱仪读出信号和噪声的大小. 由于输入和输出测量用同一台光谱仪进行, 且偏振灵敏度不大, 测量重复性较好. 每个数据连续重复测量 4 次, 取平均值.

3 结果与讨论

测试结果如图 2 所示. 输入光功率为 $10 \mu\text{W}$. 注入电流小于 60 mA 时, 噪声指数大于 10 dB . 当电流从 30 mA 增大到 60 mA 时, 噪声指数下降很快, 而当电流大于 100 mA 时, 噪声指数下降缓慢, 趋于稳定, 大约为 7.7 dB . 噪声指数随注入电流的增大而下降, 是由于载流子浓度增大所致. 当载流子浓度较低时, 受激发射很弱, 自发发射的噪声功率相对较强, 因而噪声指数很高. 随着载流子浓度增大, 受激发射加强, 自发发射的噪声功率相对减弱, 噪声指数下降. 当受激发射趋于稳定时, 噪声指数也趋于稳定.

由于应变量子阱结构改善了态密度和跃迁偶极矩阵元, SOA 的噪声指数相应获得了较大的改善^[3]. 可以通过对匹配量子阱和压应变与张应变量子阱的计算来作出定性的分析. SOA 的噪声指数 N_F 近似为^[6]

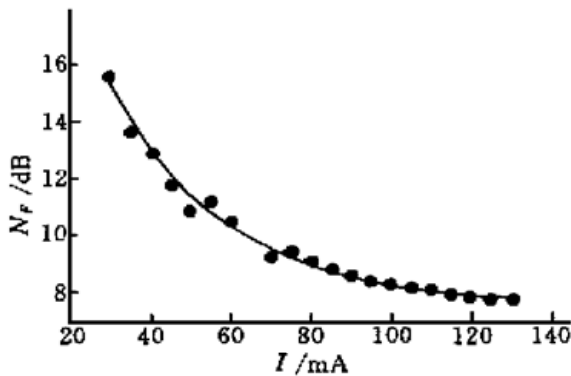


图 2 噪声指数测试结果

Fig. 2 Experimental result of noise figure

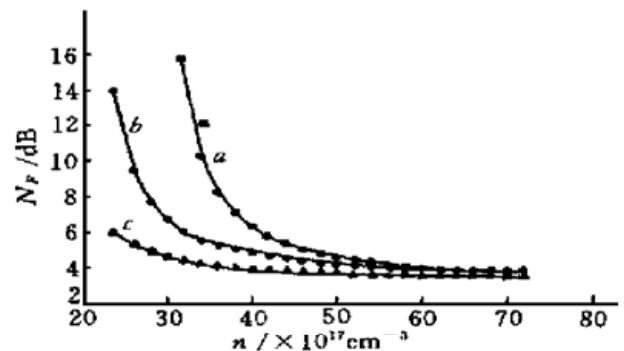


图 3 噪声指数的计算结果

Fig. 3 Calculation of noise figure of SOAs with different quantum wells

$$N_F \approx 2\mathcal{Y}_{sp} + \frac{\mathcal{Y}_{sp}^2 \Delta f}{\langle \mathcal{S}_{in} \rangle}$$

式中 $\langle \mathcal{S}_{in} \rangle$ 为输入光子密度, Δf 为有效噪声带宽, \mathcal{Y}_{sp} 为粒子数反转参数, 由下式给出

$$\mathcal{Y}_{sp} = \frac{\Gamma T_{spon}}{\Gamma T_{stim} - \alpha v_g}$$

Γ 为光场限制因子, α 为损耗系数, v_g 为光群速度, T_{spon} 和 T_{stim} 分别为自发发射速率与受激发射速率, 并由下式给出

$$T_{spon} = \frac{\omega}{n_r^2 \epsilon_0} \int \langle R_{cv}^2 \rangle \frac{f_c(1-f_v)g_{cv}(\hbar/\tau_{in})}{(E_{cv} - \hbar\omega)^2 + (\hbar/\tau_{in})^2} dE_{cv}$$

$$T_{stim} = \frac{\omega}{n_r^2 \epsilon_0} \int \langle R_{cv}^2 \rangle \frac{(f_c - f_v)g_{cv}(\hbar/\tau_{in})}{(E_{cv} - \hbar\omega)^2 + (\hbar/\tau_{in})^2} dE_{cv}$$

式中, τ_{in} 为载流子寿命, f_c 和 f_v 分别为导带和价带的费米分布函数, ω 为入射光子的角频率, g_{cv} 为折合态密度, $\langle R_{cv}^2 \rangle$ 为偶极矩阵元^[7]

$$R_{cv} = \langle \Psi_c | -e\mathbf{r} \cdot \mathbf{e} | \Psi_v \rangle$$

\mathbf{e} 是光场 \mathbf{E} 的偏振单位矢量. 计算采用的匹配、压应变和张应变量子阱的阱宽分别为 5.6 nm, 5.6 nm 和 10.4 nm, 损耗系数分别为 20 cm^{-1} , 15 cm^{-1} 和 25 cm^{-1} , 波长均为 $1.28 \mu\text{m}$, 应变量为 1% 和 -1%, $\Delta\lambda$ 为 0.5 nm, τ_{in} 为 $1 \times 10^{-13} \text{ s}$, 输入光功率为 6 mW.

图 3 为噪声指数的计算结果. 其中, 曲线 a 对应张应变量子阱, TM 模受激发射; 曲线 b 对应匹配量子阱, 曲线 c 对应压应变量子阱, TE 模受激发射. 计算表明, 对于张应变量子阱, 当载流子浓度小于 $3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 时, $\mathcal{Y}_{sp} < 0$. 这说明 TM 需要较高的载流子浓度才能激射. 相对而言, TE 模比较容易激射, 因而在较低的载流子浓度下, 压应变量子阱具有最低的噪声指数. 从图 3 还可看出, 当载流子浓度很高时, 噪声指数趋于稳定, 不再随载流子浓度变化, 其值小于 4 dB, 趋近于 3 dB 极限. 从变化趋势上看, 实验结果与理论计算相符. 但数值上相差较大, 这主要是因为外腔反射的原因. 上面的计算建立在腔面完全增透, 且无外腔反射的基础上. 假设光纤对光纤所造成的外腔反射为 R , 并假设内腔完全增透(内腔剩余反射约为 10^{-4} , 远小于 R), 自发发射噪声因为外腔反射而放大, \mathcal{Y}_{sp} 相应地为 $\mathcal{Y}_{sp}\chi$ 所替代^[8], χ 由下式给出

$$\chi = \frac{(1 + R_1 G_s)(1 - R_2)(G_s - 1)}{(1 - \sqrt{R_1 R_2 G_s})^2 + 4 \sqrt{R_1 R_2 G_s} \sin^2(kL)} \frac{1}{(G - 1)}$$

式中, G_s 为单程增益, G 为 SOA 的增益. 当 G 很大时, 上式成为

$$\chi = \frac{(1 + R_1 G_s)(G_s - 1)}{(1 - R_1) G_s}$$

假设 $R_1 = R_2 = R = 0.04$ (这是在光纤端面为半球面, 自发发射光为高斯光束, 近距离耦合下的情况), $G_s = 16 \text{ dB}$, 将 N_F 的算式中 \mathcal{Y}_{sp} 用 $\mathcal{Y}_{sp}\chi$ 代替, 则 N_F 将增加约 4 dB, 这和实验基本相符. 如果将 R 降低到 0.01, 相应地 N_F 只增加约 1.4 dB. 可见 SOA 的噪声特性对剩余反射非常敏感.

4 结 语

SOA 的噪声主要由自发发射引起, 其噪声指数主要由粒子数反转参数、增益和剩余反射决定. 应变量子阱结构有利于降低 SOA 的噪声指数. 剩余反射使自发发射在腔内放大, 从而恶化噪声特性, 只有在内腔完全增透(如采用斜腔结构和增透膜)和消除外腔反射(如采用隔离

器)的条件下,才能提高 SOA 的噪声性能. 实验结果与 EDFA 相差不远,计算表明,这一结果还可有较大的改善.

参 考 文 献

- 1 G. R. Walker, R. C. Steele, N. G. Walker. Measurement of semiconductor laser amplifier noise figure in coherent optical transmission system. *Electron. Lett.*, 1989, **25**(25): 1681~ 1682
- 2 P. Kiiveri, S. Tammela. Spectral gain and noise measurement system for fiber amplifiers. *Opt. Eng.*, 1995, **34**(9): 2592~ 2595
- 3 S. D. Personick. Receiver design for digital fiber optic communication system. *Bell System Technology J.*, 1973, **52**(6): 843~ 847
- 4 K. Komori, S. Arai, Y. Suematsu. Noise study of low-dimensional quantum well semiconductor laser amplifiers. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(9): 1894~ 1990
- 5 L. F. Tiemeijer. High performance MQW laser amplifiers for operating in 1310 nm window at bitrates of 10 Gbit/s and beyond. *Proc. Twenty-first Eurc. on Opt. Comm. (ECOC95-Brussel)*, 1995, 295~ 266
- 6 Yidong Huang, Kazuhiro Komori, Shigehisa Arai. Reduction of noise figure in semiconductor laser amplifiers with Ga_{1-x}In_xAs/GaInAsP/InP strained quantum well structures. *IEEE. J. Quantum Electron.*, 1993, **29**(12): 2950~ 2956
- 7 D. D. Coon, R. P. G. Karunasiri. New mode of IR detection using quantum wells. *Appl. Phys. Lett.*, 1984, **45**(6): 649~ 651
- 8 S. Shimada, H. Ishio. Optical amplifiers and their applications. Chichester, UK, John Wiley & Sons Ltd., 1994, 56~ 62

Noise Character of SOA Directly Coupled with Fiber

Duan Zigang Yao Fang Liu Deming Huang Dexiu

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Zhang Zhemin

(Wuhan Telecommunication Device Co Ltd, Wuhan 430074)

Abstract The noise character of strained MQW semiconductor optical amplifier has been studied in the paper. 7.7 dB noise figure of SOA directly coupled with fiber in both ends at 130 mA bias current shows that the noise character of SOA is improved by strained quantum well structure. Theoretical study explains experimental result and shows that the noise figure of SOA can be further improved by reducing residual reflectivity.

Key words MQW, SOA, noise figure