

InP/InGaAsP 多量子阱自发辐射谱的解析函数

刘志勇 陈海燕

Analytic function for spontaneous emission spectrum of InP/InGaAsP multi-quantum wells

Liu Zhi-Yong Chen Hai-Yan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 134204 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.134204

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.134204>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I13>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

线宽增强因子对光反馈半导体激光器混沌信号生成随机数性能的影响

[Influence of the linewidth enhancement factor on the characteristics of the random number extracted from the optical feedback semiconductor laser](#)

物理学报.2017, 66(12): 124203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.124203>

808 nm 半导体激光芯片电光转换效率的温度特性机理研究

[Efficiency analysis of 808 nm laser diode array under different operating temperatures](#)

物理学报.2017, 66(10): 104202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.104202>

低阈值单横模 852 nm 半导体激光器

[A low threshold single transverse mode 852 nm semiconductor laser diode](#)

物理学报.2017, 66(8): 084205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.084205>

1550 nm-VCSELs 在偏振保持光反馈和正交光注入下的偏振转换特性

[Polarization switching characteristics of polarization maintaining optical feedback and orthogonal optical injection of 1550 nm-VCSEL](#)

物理学报.2016, 65(21): 214206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.214206>

外光注入半导体环形激光器同时产生两路宽带混沌信号

[Two broadband chaotic signals generated simultaneously by semiconductor ring laser with parallel chaotic injection](#)

物理学报.2016, 65(20): 204203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.204203>

InP/InGaAsP 多量子阱自发辐射谱的解析函数*

刘志勇 陈海燕†

(长江大学物理与光电工程学院, 荆州 434023)

(2017年1月4日收到; 2017年4月28日收到修改稿)

利用洛伦兹线型函数、高斯线型函数和 Sech 线型函数对 InP/InGaAsP 多量子阱自发辐射谱进行拟合, 采用莱文贝格-马夸特算法, 得到上述三种函数的解析表达式. 研究结果表明: 高斯线型光谱拟合函数的中心波长为 1548.651 nm, 谱线半极大全宽度为 61.42 nm, 功率补偿为 0.00212 mW, 拟合优度为 0.99191, 残差平方和为 2.26505×10^{-6} . 高斯线型拟合的拟合优度最大, 残差平方和最小, 且各数据点的残差值分布在 ± 0.0001 之间, 分布比较均匀. 高斯线型函数具有较高拟合度.

关键词: InP/InGaAsP 多量子阱, 自发辐射谱, 光谱拟合

PACS: 42.55.Px, 42.62.Fi, 78.66.Fd, 78.67.De

DOI: 10.7498/aps.66.134204

1 引言

自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 是一种重要的光与物质相互作用现象, 也是研究物质发光特性的窗口, 对 ASE 的研究具有重要的理论与工程研究价值^[1-4]. 工作于 1.55 μm 波段的 III-V 族 InP/InGaAsP 量子阱半导体是一种性能优良的发光材料, 其在激光器、放大器、分束器、调制器等光电器件中具有广泛应用^[5-11]. 此外, InP/InGaAsP 量子阱半导体材料的自发辐射作为宽带光源, 常用在光谱分析、光纤通信技术、光纤陀螺仪、光接入网、城域网以及各类光器件的测试中^[12-14].

近些年来, 关于 III-V 族半导体发光材料自发辐射特性的研究已有许多文献报道. 2006 年, 黄黎蓉等^[15]对基于半导体光放大器的非相干光源作优化设计, 得到了谱线既宽又平坦的非相干光源; 2012 年, Yeh 等^[16]采用半导体光放大器和掺铒光纤放大器级联方法, 获得了超宽带自发辐射谱光源; 2015 年, Lin 等^[17]制备了高镉含量的 InGaAs 多量子阱激光二极管, 模拟和讨论了 InGaAs 多量

子阱结构对其自发辐射特性的影响; 2016 年, Xia 和 Ghafouri-Shiraz^[18]采用量子阱传输线模型研究了应变对量子阱自发辐射光谱的影响等. 就我们所知, 到目前为止, 有关 III-V 族 InP/InGaAsP 多量子阱半导体材料自发辐射的研究报道主要集中在多量子阱半导体材料结构对自发辐射的影响上, 鲜见关于 InP/InGaAsP 多量子阱半导体材料自发辐射线型函数的研究报道.

本文采用莱文贝格-马夸特 (Levenberg-Marquardt, L-M) 算法, 利用洛伦兹线型、高斯线型和 Sech 线型函数对 InP/InGaAsP 多量子阱材料的 ASE 谱进行拟合, 得出 InP/InGaAsP 多量子阱材料 ASE 谱的解析表达式.

2 实验

图 1 为测量 InP/InGaAsP 多量子阱 (multi-quantum wells, MQWs) ASE 谱的实验装置示意图. InP/InGaAsP MQWs 是在 InP 衬底上生长的 InGaAsP 有源层量子阱结构 (THORLABS 公司, S9FC1004P, 温度 20.00—30.00 $^{\circ}\text{C}$ 可调, 分辨率为 0.01 $^{\circ}\text{C}$), 光谱分析仪 (安立公司, MS9710C)

* 国家自然科学基金 (批准号: 60777020) 和湖北省自然科学基金 (批准号: 2008CDB317) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hychen@yangtzeu.edu.cn

用于测量 InP/InGaAsP MQWs 的 ASE 谱。当 InP/InGaAsP MQWs 工作温度为 25 °C、注入电流为 140.0 mA 时，其 ASE 谱如图 2 所示。InP/InGaAsP MQWs ASE 谱的中心波长位于 1547.205 nm 处，其输出功率为 -8.32 dBm，谱线半极大全宽度 (full-width half maximum, FWHM) 为 61.79 nm。

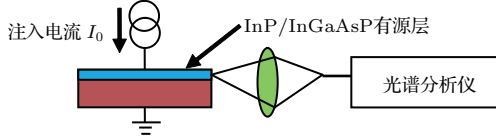


图 1 (网刊彩色) InP/InGaAsP 多量子阱自发辐射谱测量实验装置示意图

Fig. 1. (color online) Schematic diagram of ASE spectrum measurement of InP/InGaAsP MQWs.

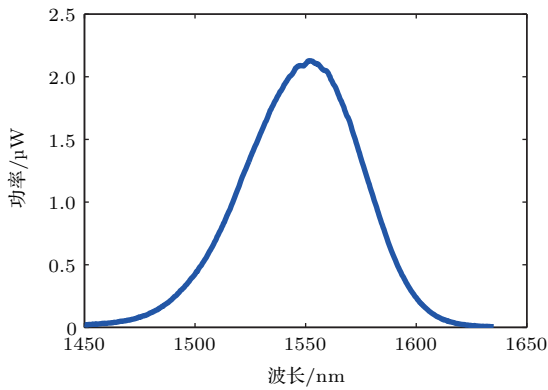


图 2 InP/InGaAsP MQWs ASE 谱 (注入电流: 140.0 mA)

Fig. 2. ASE spectrum of InP/InGaAsP MQWs ($I_0 = 140.0$ mA).

3 算法描述

根据光与物质相互作用的经典理论，均匀加宽与非均匀加宽激光工作物质谱线可分别用洛伦兹线型函数与高斯线型函数来描述^[19]。此外，增益开关型半导体激光工作物质谱线加宽具有双曲正割线型函数分布^[20]。

洛伦兹线型函数:

$$P(\nu, \nu_c) = \frac{\Delta\nu}{2\pi[(\nu - \nu_c)^2 + (\Delta\nu/2)^2]}, \quad (1)$$

式中, $\Delta\nu$ 为谱线宽度, ν_c 为谱线中心频率。

高斯线型函数:

$$P(\nu, \nu_c) = \exp\left(-\frac{(\nu - \nu_c)^2}{2\omega^2}\right), \quad (2)$$

式中, $\omega = \Delta\nu/(2\sqrt{\ln 4})$, $\Delta\nu$ 为谱线宽度, ν_c 为谱线中心频率。

Sech 线型函数^[21]:

$$P(\nu, \nu_c) = \frac{2 \ln(1 + \sqrt{2})}{\pi^2 \Delta\nu} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \operatorname{sech}\left[2 \ln(1 + \sqrt{2}) \frac{\nu - \nu_c}{\Delta\nu}\right], \quad (3)$$

式中, $\Delta\nu$ 为谱线宽度, ν_c 为谱线中心频率。

由图 2 可知, InP/InGaAsP MQWs 自发辐射谱具有单峰分布特征, 其洛伦兹线型、高斯线型及双曲正割线型拟合表达式可分别写成:

$$P(\nu) = P_0 + \frac{A\Delta\nu}{2\pi[(\nu - \nu_c)^2 + (\Delta\nu/2)^2]}, \quad (4)$$

$$P(\nu) = P_0 \exp\left(-\frac{(\nu - \nu_c)^2}{2\omega^2}\right), \quad (5)$$

$$P(\nu) = P_0 \times \frac{2 \ln(1 + \sqrt{2})}{\pi^2 \Delta\nu} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \operatorname{sech}\left[2 \ln(1 + \sqrt{2}) \frac{\nu - \nu_c}{\Delta\nu}\right], \quad (6)$$

式中, P_0 为补偿值, A 为功率辐射因子。

L-M 算法是介于高斯-牛顿算法和梯度下降算法之间的一种非线性优化算法^[22], 多用于解决通用曲线拟合问题。L-M 算法用拟合函数对待估参数向量在其范围内做线性近似, 找到局部最小参数向量, 利用 L-M 算法可得到拟合函数的待定参数 r 和残差平方和 RSS 。

$$RSS(r) = \sum_{j=0}^k [P(\nu_j) - P(\nu_j|r)]^2. \quad (7)$$

利用 (7) 式, 可对拟合结果进行评估, 得到“最佳”的逼近拟合函数及 (4) - (7) 式中的相关待定参数, 从而确定具体加宽谱线的解析表达式。

4 结果与讨论

洛伦兹线型、高斯线型和 Sech 线型三种线型拟合结果如图 3 所示。从图中可以看出, 洛伦兹线型拟合函数曲线的中心频率为 1.9371×10^{14} Hz (对应波长为 1548.707 nm), 谱线 FWHM 为 66.23 nm, 如图 3(a); 高斯线型拟合函数曲线的中心频率为 1.9372×10^{14} Hz (对应波长为 1548.651 nm), 谱线 FWHM 为 61.42 nm, 如图 3(b); Sech 线型拟合函数曲线的中心频率为 1.9370×10^{14} Hz (对应波长为 1548.787 nm), 谱线 FWHM 为 36.99 nm, 如图 3(c)。从拟合曲线来看, 高斯线型拟合曲线与实测曲线的拟合度较好。

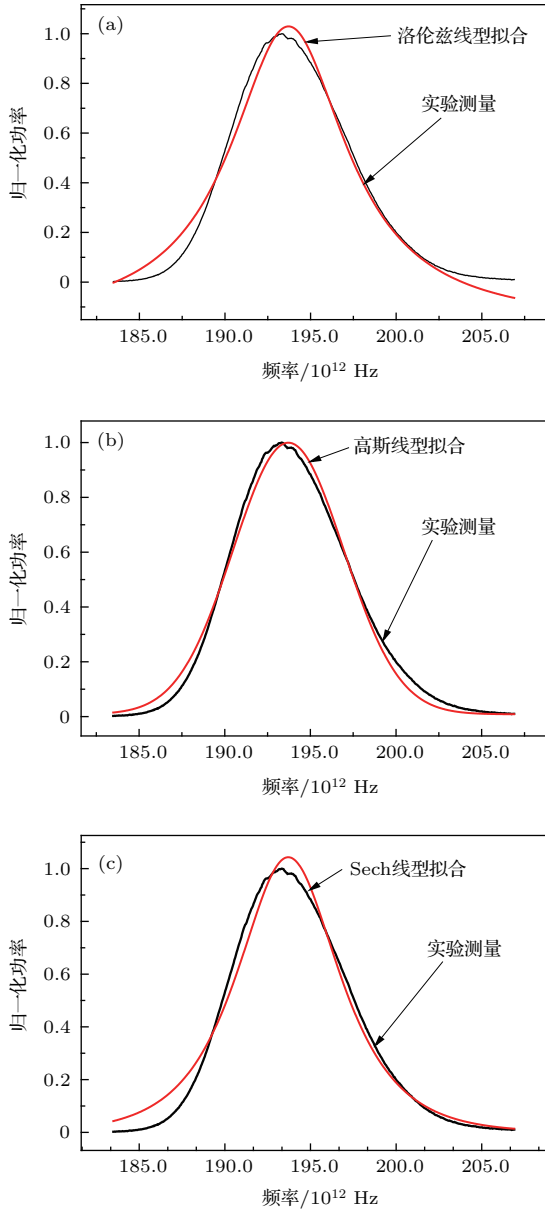


图3 (网刊彩色) InP/InGaAsP MQWs ASE 谱的三种拟合函数曲线 (a) 洛伦兹线型; (b) 高斯线型; (c) Sech 线型
 Fig. 3. (color online) Three kinds of line shape fitting of ASE spectrum of InP/InGaAsP MQWs: (a) Lorentz; (b) Gauss; (c) Sech.

三种拟合所得参数如表 1 所列. 洛伦兹线型拟合的功率补偿为 -0.00036484 mW, 功率因子为 3.3269×10^{10} mW·Hz, 拟合优度为 0.98294, 残差平方和为 4.76743×10^{-6} ; 高斯线型拟合的功率补

偿为 0.00212 mW, 拟合优度为 0.99191, 残差平方和为 2.26505×10^{-6} ; Sech 线型拟合的功率补偿为 0.00222 mW, 拟合优度为 0.98128, 残差平方和为 5.24331×10^{-6} . 可知高斯线型拟合的拟合优度最大, 残差平方和最小.

对洛伦兹线型拟合有

$$P(v) = -0.00036484 + \frac{1.3781 \times 10^{23}}{\pi[(v - 1.9371 \times 10^{14})^2 + 1.7159 \times 10^{25}]}, \quad (8)$$

令 $P(v) = P(v) + 0.00036484$, (8) 式可写成洛伦兹线型标准形式,

$$P(v) = \frac{1.3781 \times 10^{23}}{\pi[(v - 1.9371 \times 10^{14})^2 + 1.7159 \times 10^{25}]}. \quad (9)$$

对高斯线型拟合有

$$P(v) = 0.00212 \exp\left(-\frac{(v - 1.9372 \times 10^{14})^2}{2.1291 \times 10^{25}}\right). \quad (10)$$

对 Sech 线型拟合有

$$P(v) = 0.00222 \operatorname{sech}(3.80964 \times 10^{-13} \times (v - 1.937 \times 10^{14})). \quad (11)$$

三种拟合中各个数据点的残差值如图 4 所示. 从图中可以看出, 洛伦兹线型拟合中各个数据点的残差值分布在 ± 0.0002 之间, 且起伏比较大; 高斯线型拟合中各个数据点的残差值分布在 ± 0.0001 之间, 分布比较均匀; Sech 线型拟合中各个数据点的残差值分布在 ± 0.0002 之间, 起伏也比较大. 表明高斯线型拟合函数更符合实际情况, 与图 3 所得结果一致.

洛伦兹线型与 Sech 线型函数拟合误差较大的原因可用 InP/InGaAsP MQWs 半导体材料结构来解释. InP/InGaAsP MQWs 是在 InP 衬底上生长的 InGaAsP 有源层量子阱结构, 由于晶格缺陷的影响, 其自发辐射谱线加宽属于非均匀加宽, 相应线型函数为高斯函数.

表 1 三种线型拟合参数
 Table 1. Three kinds of line shape fitting parameters.

	功率补偿 P_0 /mW	中心波长/nm	拟合优度	残差平方和
洛伦兹线型	-0.00036484	1548.707	0.98294	4.76743×10^{-6}
高斯线型	0.00212	1548.651	0.99191	2.26505×10^{-6}
Sech 线型	0.00222	1548.787	0.98128	5.24331×10^{-6}

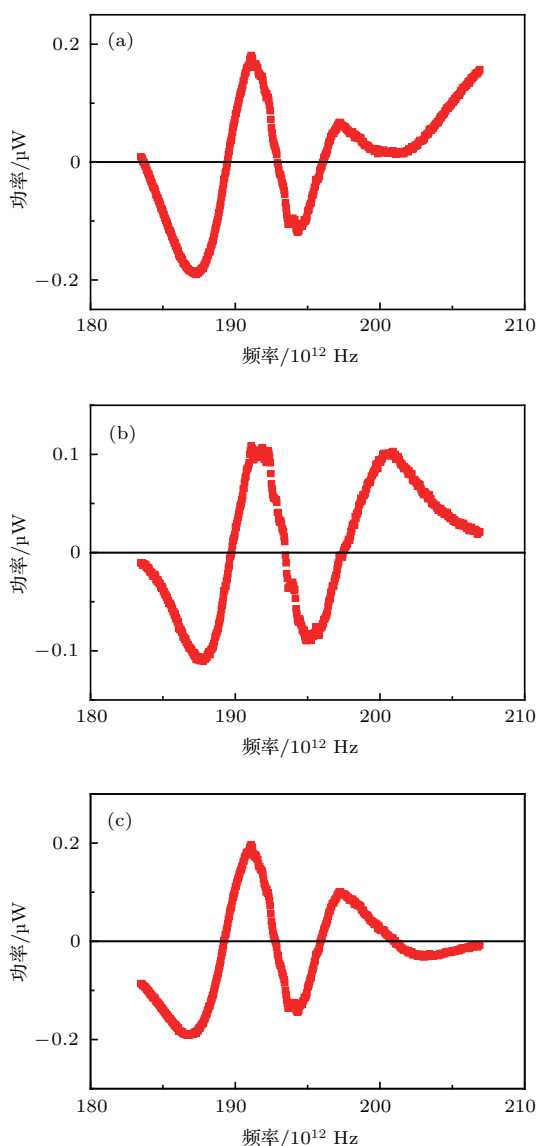


图4 三种拟合数据残差值分布 (a) 洛伦兹线型; (b) 高斯线型; (c) Sech 线型

Fig. 4. Residual squares distribution of three kinds of line shape fitting: (a) Lorentz; (b) Gauss; (c) Sech.

5 结 论

洛伦兹线型拟合函数曲线的中心波长为 1548.707 nm, 谱线 FWHM 为 66.23 nm. 高斯线型拟合函数曲线的中心波长为 1548.651 nm, 谱线 FWHM 为 61.42 nm. Sech 线型拟合函数曲线的中心波长为 1548.787 nm, 谱线 FWHM 为 36.99 nm. 洛伦兹线型拟合的功率补偿为 -0.00036484 mW, 拟合优度为 0.98294, 残差平方和为 4.76743×10^{-6} ; 高斯线型拟合的功率补偿为 0.00212 mW, 拟合优度为 0.99191, 残差平方和为 2.26505×10^{-6} ; Sech 线型拟合的功率补偿为 0.00222 mW, 拟合优度为 0.98128, 残差平方和为 5.24331×10^{-6} . 高斯线型

拟合的拟合优度最大, 残差平方和最小, 且各个数据点的残差值分布在 ± 0.0001 之间, 分布比较均匀, 表明 InP/InGaAsP 多量子阱自发辐射谱为高斯分布函数, InP/InGaAsP 多量子阱半导体材料属于非均匀加宽激光物质.

参考文献

- [1] Zhang B, Hou Y B, Lou Z D, Teng F, Liu X J, Hu B, Meng L C, Wu W B 2012 *Chin. Phys. B* **21** 084212
- [2] Hariri A, Sarikhani S 2015 *Chin. Phys. B* **24** 043201
- [3] Xing R, Xie S Y, Xu J P, Yang Y P 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 014202 (in Chinese) [邢容, 谢双媛, 许静平, 羊亚平 2017 物理学报 **66** 014202]
- [4] Jiang L, Wan R G, Yao Z H 2016 *Chin. Phys. B* **25** 104204
- [5] Duan Z G, Huang X D, Zhou N, Xu G H, Chai G Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 6193 (in Chinese) [段子刚, 黄晓东, 周宁, 徐光辉, 柴广跃 2010 物理学报 **59** 6193]
- [6] Wang W J, Wang H L, Gong Q, Song Z T, Wang H, Feng S L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 237104 (in Chinese) [王文娟, 王海龙, 龚谦, 宋志棠, 汪辉, 封松林 2013 物理学报 **62** 237104]
- [7] Yang W X, Dai P, Ji L, Tan M, Wu Y Y, Uchida S, Lu S L, Yang H 2016 *Appl. Surf. Sci.* **389** 673
- [8] Xi S P, Gu Y, Zhang Y G, Chen X Y, Ma Y J, Zhou L, Du B, Shao X M, Fang J X 2016 *Infrared Phys. Techn.* **75** 65
- [9] Amiri I S, Ariannejad M M, Ahmad H 2016 *Chin. J. Phys.* **54** 780
- [10] Ke Q, Tan S Y, Liu S T, Lu D, Zhang R K, Wang W, Ji C 2015 *J. Semicond.* **36** 094010
- [11] Nikufard M, Rostami Khomami A 2016 *Opt. Quant. Electron.* **48** 296
- [12] Kotb A, Maeda J 2012 *Optoelectron. Lett.* **8** 437
- [13] Schubert C, Ludwig R, Weber H G 2005 *J. Opt. Comm. Rep.* **2** 171
- [14] Won Y Y, Kwon H C, Hong M K, Han S K 2009 *Opt. Quant. Electron.* **41** 113
- [15] Huang L R, Huang D X, Zhang X L 2006 *J. Semicond.* **27** 1471 (in Chinese) [黄黎蓉, 黄德修, 张新亮 2006 半导体学报 **27** 1471]
- [16] Yeh C H, Chow C W, Chen J H, Lu S S 2012 *Laser Phys.* **22** 1700
- [17] Lin T, Sun H, Zhang H Q, Wang Y G, Lin N, Ma X Y 2015 *J. Alloy. Compd.* **631** 283
- [18] Xia M J, Ghafouri-Shiraz H 2016 *Opt. Commun.* **364** 60
- [19] Chen H Y 2016 *Laser Principles and Technology* (Beijing: National Defense Industry Press) pp75–78 (in Chinese) [陈海燕 2016 激光原理与技术 (北京: 国防工业出版社) 第 75—78 页]
- [20] Lazaridis P, Debarge G, Gallion P 1995 *Opt. Lett.* **20** 1160
- [21] Chen H Y 2013 *Optik* **124** 3015
- [22] Karas E W, Santos S A, Svaiter B F 2016 *Comput. Optim. Appl.* **65** 723

Analytic function for spontaneous emission spectrum of InP/InGaAsP multi-quantum wells*

Liu Zhi-Yong Chen Hai-Yan[†]

(School of Physics and Optoelectronic Engineering, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

(Received 4 January 2017; revised manuscript received 28 April 2017)

Abstract

The analytic function for the amplified spontaneous emission spectrum of InP/InGaAsP multi-quantum wells is studied by spectrum fitting. Three fitting functions, Lorentz, Gaussian and Sech line shape functions are chosen, and the analytical expressions for the above three functions are obtained with Levenberg-Marquardt algorithm, respectively. The center wavelength of Lorentz line shape function spectrum fitting is 1548.707 nm with 66.23 nm of full-width half maximum (FWHM), -0.00036484 mW power compensation, 0.98294 of R -square and 4.76743×10^{-6} of residual sum of squares; the center wavelength of Gaussian line shape function spectrum fitting is 1548.651 nm with 61.42 nm of FWHM, 0.00212 mW power compensation, 0.99191 of R -square and 2.26505×10^{-6} of residual sum of squares; the center wavelength of Sech line shape function spectrum fitting is 1548.787 nm with 36.99 nm of FWHM, 0.00222 mW power compensation, 0.98128 of R -square and 5.24331×10^{-6} of residual sum of squares. It can be seen that Gaussian line shape function spectrum fitting has the highest R -square and smallest residual sum of squares, and the residual squares of data are symmetrically distributed among ± 0.0001 . Gaussian line shape function spectrum fitting has higher fitting degree. It is demonstrated that InP/InGaAsP multi-quantum wells is a kind of active layer quantum well structure semiconductor material, whose amplified spontaneous emission spectrum line shape belongs to inhomogeneous broadening due to the effect of lattice defects, the corresponding line shape function is Gaussian line shape function, and the amplified spontaneous emission spectrum line shape function can be used for designing the optical passive devices.

Keywords: InP/InGaAsP multi-quantum wells, amplified spontaneous emission, spectrum fitting

PACS: 42.55.Px, 42.62.Fi, 78.66.Fd, 78.67.De

DOI: [10.7498/aps.66.134204](https://doi.org/10.7498/aps.66.134204)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60777020) and the Natural Science Foundation of Hubei Province, China (Grant No. 2008CDB317).

[†] Corresponding author. E-mail: hychen@yangtzeu.edu.cn