

2 μm InGaSb/AlGaAsSb 量子阱激光器理想因子的研究

李翔¹, 汪宏¹, 乔忠良^{1,5}, 张宇³, 徐应强³, 牛智川³, 佟存柱⁴, 刘重阳²

(1. 新加坡南洋理工大学 电子与电气工程学院, 新加坡 639798;

2. 新加坡南洋理工大学 淡马锡实验室, 新加坡 637553;

3. 中国科学院半导体研究所 半导体超晶格国家重点实验室, 北京 100083;

4. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 发光学及应用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

5. 长春理工大学 高功率半导体激光国家重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 展示了一种低阈值($\sim 131 \text{ A/cm}^2$) $2 \mu\text{m}$ InGaSb/AlGaAsSb 单量子阱(Single Quantum Well, SQW) 激光器, 并对该激光器的理想因子 n 进行了研究。激光器的总体理想因子 n 由中央 pn 结的理想因子 n 和 n 型 GaSb 衬底与 n 型金属之间形成的整流结的理想因子 n 两部分组成。当温度从 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 升高到 $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 激光器的总体理想因子 n 从 4.0 降低至 3.3。该结果与所使用的理论模型以及独立的 GaSb 材料整流结(pn 结、GaSb/金属结等)理想因子 n 的数值是相吻合的。

关键词: 半导体激光器; 理想因子 n ; 单量子阱

中图分类号: TN248 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0503001

Investigation on ideality factor of $2 \mu\text{m}$ InGaSb/AlGaAsSb quantum well laser

Li Xiang¹, Wang Hong¹, Qiao Zhongliang^{1,5}, Zhang Yu³, Xu Yingqiang³, Niu Zhichuan³,
Tong Cunzhu⁴, Liu Chongyang²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798;

2. Temasek Laboratories, Nanyang Technological University, Singapore 637553;

3. State Key Laboratories of Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 4. State Key Lab of Luminescence and Applications, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 5. The National Key Laboratory on High Power Semiconductor Lasers, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: $2 \mu\text{m}$ InGaSb/AlGaAsSb single quantum well(SQW) laser with low threshold current density of $\sim 131 \text{ A/cm}^2$ and its ideality factor n was presented. The ideality factors n of the central p-n junction and the n-GaSb/metal junction sum up to be the total ideality factor n of the laser. The total ideality factor n decreases from 4.0 to 3.3 when the temperature was increased from $20 \text{ }^\circ\text{C}$ to $80 \text{ }^\circ\text{C}$. The results are in good agreement with the applied theoretical model as well as the ideality factor n of the individual GaSb-based junctions(p-n junction, GaSb/metal junction etc.).

Key words: semiconductor laser; ideality factor n ; single quantum well

收稿日期: 2018-03-05; 修订日期: 2018-04-03

基金项目: 新加坡国家研究基金会(NRF-CRP12-2013-04); 国家自然科学基金(61790581, 61790582, 61435012, 61308051)

作者简介: 李翔(1989-), 男, 博士生, 主要从事红外半导体激光器方面的研究。Email: E140151@e.ntu.edu.sg

导师简介: 汪宏(1966-), 男, 副教授, 主要从事半导体器件和集成电路方面的研究。Email: EWANGHONG@ntu.edu.sg

0 引言

工作在 2 μm 波长范围的激光光源在诸如分子光谱学、气体传感、先进光通讯以及激光雷达等众多领域有着广泛的应用^[1-3]。在这个波长范围内, GaSb 基材料在材料生长上的挑战性要低于需要高应力的 InP 基材料。近年来, 研究人员在 GaSb 基材料以及器件结构上都取得了大量的进展^[4-8], 但是为了能够进一步提高 GaSb 基激光器的性能, 一些关于 GaSb 基器件的基础特性研究仍然是很有必要的。

作为一个被普遍使用的参数, 理想因子 n 反映了器件中的载流子输运及复合过程, 而这些过程会直接影响到诸如阈值电流密度(J_m), 功率效率等激光器的性能。对于单个独立的 pn 结, 它的理想因子 n 取决于以下哪种复合在其载流子复合过程中占据主导: 中性区中的复合 ($n=1.0$), 空间电荷区中的 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合 ($n=2.0$), 空间电荷区中的辐射复合 ($n=1.0$), 空间电荷区中的俄歇复合 ($n=2/3$)。实验中已经证明单个独立的正向偏置 GaSb 材料 pn 结的理想因子 n 接近于 2.0^[9], 这说明空间电荷区中的 SRH 复合占据主导地位, 同时单个独立的正向偏置 n 型 GaSb 肖特基结的理想因子 n 大约是 2.0~2.5^[9], 从而其反向偏置的理想因子 n' 可以用公式 $n'=(1-n^{-1})^{-1}$ 得到^[10], 为 1.7~2.0。然而, 一个包含所有或者部分上述整流结的完整 GaSb 基器件的理想因子 n 仍然是未知的。

文中, 笔者系统的研究了一种 2 μm InGaSb/AlGaAsSb 单量子阱 (Single Quantum Well, SQW) 激光器的理想因子 n 。首先, 给出了此激光器的等效电路, 基于两个节点 (激光二极管开启电压和激射阈值) 对激光器的伏安特性与微分电阻进行了分析, 随后, 通过电流对数与外加电压关系曲线得到了激光器的总体理想因子 n 并对其来源进行了讨论, 最后测量得到了不同温度下此激光器的总体理想因子 n 并分析了其变化。

1 激光器概况

此次实验用到的激光器结构是使用分子束外延技术在 GaSb 衬底上生长得到的, 其包含了一个 In_{0.2}Ga_{0.8}Sb 量子阱以及两侧与 GaSb 材料晶格匹配的

Al_{0.2}GaAsSb 垒结构, 激光器的完整结构可以详见参考文献[6]。笔者用典型的“开接触窗口”制作工艺^[11]在同一片外延片上得到了不同脊宽的 Fabry-Perot (FP) 激光器。解理后的单个激光器被 p 面朝上焊在了热沉上, 同时使用一个电子式温控器来对激光器的工作温度进行控制。

图 1 给出了其中一个激光器出射光功率 (双面) 随注入电流变化的曲线 ($L-I$)。该激光器可以在连续模式 (CW) 下工作到 40 °C。在 10 °C 时低至 ~131 A/cm² 的阈值电流密度说明了良好的材料外延质量。图 1 的插图还给出了 20 °C 时的激光器激射光谱, 从图中可以看出, 激射的中心波长大约是在 2 019 nm。

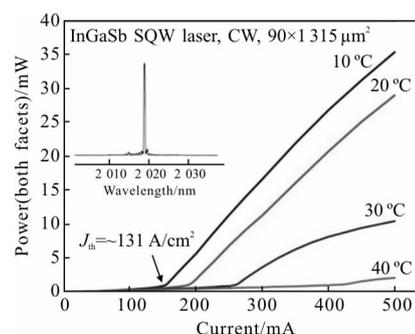


图 1 不同温度下 InGaSb 单量子阱激光器出射光功率 (双面) 与注入电流的关系曲线

Fig.1 Temperature-dependent $L-I$ curves and power (both facets) InGaSb SQW laser

2 理论模型

根据 Shah 等人之前的报道^[12], 一个基于 pn 结的完整二极管器件可以看成是一系列整流结 (包括 pn 结、异质结、肖特基结等) 串联在一起组成的。每个整流结的伏安特性 ($I-V$) 可写成以下形式 (当 $V_i > 3 kT/e$ 时成立, i 是结的编号):

$$I = I_s \exp\left(\frac{eV_i}{n_i kT}\right) \quad (1)$$

式中: I_s 表示反向饱和电流; e 表示电子电量; n 表示理想因子; k 表示玻耳兹曼常数; T 表示温度。整个器件的外加电压 V 等于施加在单个整流结上的电压之和, 同时单个整流结的理想因子之 n 和也就是整个器件的总体理想因子 n , 可表示为:

$$V = \sum V_i = \sum \left[n_i \left(\frac{kT}{e} \right) \ln I - n_i \left(\frac{kT}{e} \right) \ln I_{s_i} \right] \quad (2)$$

$$n = \sum n_i$$

该理论是对理想因子 n 明显大于 2.0 的二极管器件所作出的一个合理解释。

基于以上理论, 激光器结构及其等效电路如图 2 所示, 这里的等效电路只是为了分析激光器理想因子 n 而得到的一个简化模型。整个器件包含一个正向偏置的中央 $\text{Al}_{0.5}\text{GaAsSb}$ 同质 pn 结, 一个反向偏置的 n 型 GaSb/金属结, 和一个串联电阻 R_s 。这两个整流结贡献了整个器件绝大部分的理想因子 n 。这里需要指出的是, 最上层的 p 型 GaSb 接触层的掺杂浓度非常高, 达到了 $10^{19}/\text{cm}^3$ 量级, 所以 p 型 GaSb 材料与金属的接触可以被认为是一个欧姆接触。但是对于 n 型 GaSb 衬底与金属的接触, 由于 GaSb 衬底的掺杂浓度只有 $10^{17}/\text{cm}^3$ 量级, 同时为了避免高温可能引起的器件性能的恶化, 并没有对器件进行退火处理, 所以此侧的接触会更像是一个整流接触。在激光器结构中, 还有两个单极异质结(p 型 GaSb 接触层/p 型 $\text{Al}_{0.5}\text{GaAsSb}$ 包层, n 型 $\text{Al}_{0.5}\text{GaAsSb}$ 包层/n 型 GaSb 缓冲层), 但是由于其组成材料的掺杂浓度都比较高, 它们会表现的更像是欧姆接触^[12], 并不会对总体理想因子 n 有太多贡献。中央 pn 结中的量子阱结构会对已经越过 pn 结势垒的载流子进行再次“管理”, 实际上它会促进载流子的输运, 因为它的存在增大了载流子的浓度。串联电阻 R_s 则主要来源于中性区。

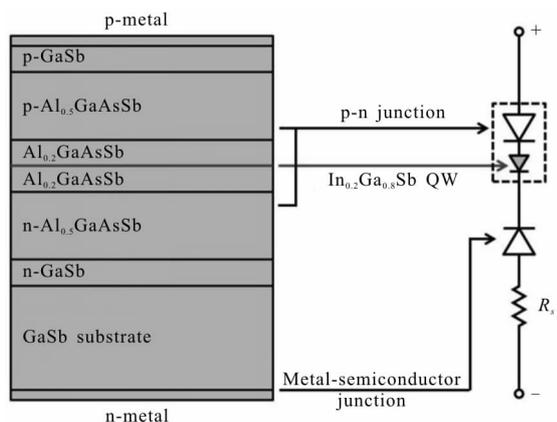


图 2 InGaSb 单量子阱激光器结构以及它的等效电路示意图
Fig.2 Schematic diagram of the InGaSb SQW laser structure and its equivalent circuit

3 实验结果与分析

图 3 给出了 20 °C 时器件中电流(图 3(a))和微分

电阻(图 3(b))与器件外加电压的关系曲线。该激光二极管的开启电压大概在 0.56 V(对应于大概 $10 \text{ A}/\text{cm}^2$ 的电流密度)。激射阈值电流大概在 190 mA(对应的外加电压大概在 1.21 V)。由此, 图 3 可分 3 部分进行讨论:

(1) 当外加电压小于激光二极管的开启电压时, 几乎所有的电压都会加在中央 pn 结和反偏的 GaSb/金属结上来降低它们的结势垒, 流入量子阱区域的载流子很少, 电流相对也小, 见图 3 中黑线所示, 此时这些结的等效电阻会非常大, 串联电阻 R_s 可以忽略不计。因此, 加到中央 pn 结上的电压直接正相关于量子阱中电子和空穴准费米能级之间的能量差, 载流子慢慢在量子阱中积累, 浓度越来越大, 电流也随之慢慢变大。

(2) 当外加电压大于激光二极管的开启电压同时又没有达到激光器的激射阈值时, 对应于图 3 中灰线所示, 两个结的等效电阻明显变小。这时候, 载流子继续不断的流入量子阱内, 在里面继续积累, 复合, 量子阱中的载流子浓度相较于第(1)部分明显增大。这部分增加的电压一部分加到了中央 pn 结(或者说量子阱, 电子和空穴准费米能级进一步分开)和反偏的 GaSb/金属结上, 其余的电压则开始加到串联电阻 R_s 上。

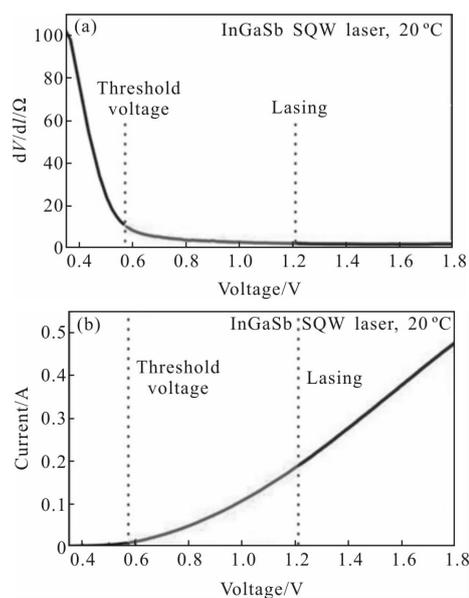


图 3 20 °C 时 InGaSb SQW 激光器中电流(a)、微分电阻(b)与器件外加电压的关系曲线

Fig.3 (a) $I-V$ characteristics of the InGaSb SQW laser at 20 °C, (b) differential resistance of the laser at 20 °C

(3) 当激光器开始激射时,两个准费米能级被钉扎在了阈值水平上,所以施加在中央 pn 结上的电压不再会变化,这也是激光二极管最特别的性质之一。这部分增加的电压几乎全部都会加到串联电阻 R_s 上,从而使器件的电流电压特性变为了线性的。这时候由于中央 pn 结等效电阻的突然消失,应该会看到总体微分电阻有一个突然的下降的^[13],但是实际上这个下降并没有出现,主要是因为激射阈值远离激光二极管的开启电压,两个整流结的等效电阻本身就变得很小了。该部分的微分电阻也就是串联电阻 R_s , 大约为 $2\ \Omega$ 。

为了得到激光器的总体理想因子 n , 图 4 给出了 $20\ ^\circ\text{C}$ 时开启电压附近电流对数(图 4(a)) 和理想因子 n (图 4(b)) 与对应外加电压的关系曲线。根据公式(1),

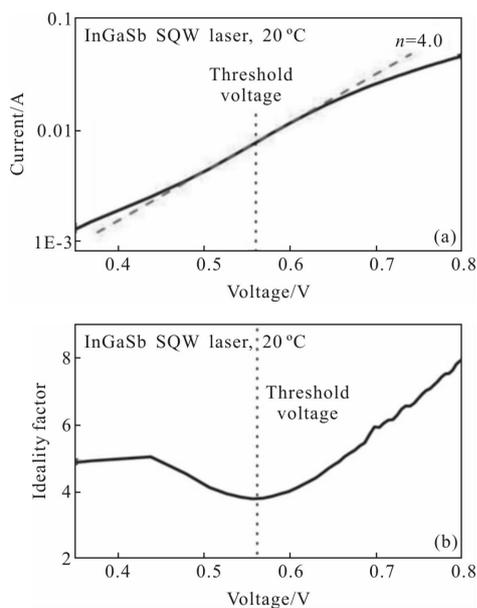


图 4 $20\ ^\circ\text{C}$ 时 InGaSb SQW 激光器开启电压附近电流对数(a) 和理想因子(b)与器件外加电压的关系
 Fig.4 (a) Semilogarithmic plot of the $I-V$ characteristics of the InGaSb SQW laser at $20\ ^\circ\text{C}$, (b) total ideality factor of the laser at $20\ ^\circ\text{C}$

由电流对数与电压特性曲线的导数(斜率)就能够直接得到理想因子 n 的数值。当外加电压很小时,理想因子 n 很大,主要是受并联电阻对其伏安特性的影响。当外加电压增大到激光二极管的开启电压附近时,电流对数与电压关系曲线出现了一个线性区域,此时器件的伏安特性是由两个整流结(中央 pn 结和反偏的 GaSb/金属结)来主导的。这时的理想因子 n

出现了一个局部最小值,大约为 4.0,而这个数值反映了两个整流结自身的伏安特性。当外加电压进一步增大时,串联电阻开始介入,慢慢主导整个器件的伏安特性,使得总体理想因子 n 不断上升。

由此可见,总体理想因子 n 4.0 的来源,首先是中央 pn 结,由于它内部量子阱结构的存在,pn 结的理想因子 n 相较于独立的 GaSb 材料 pn 结的 2.0 会有所减小,原因是量子阱结构的存在增大了载流子的浓度,从而促进了所有类型的复合过程(包括 SRH 复合,辐射复合,俄歇复合等),同时由于载流子浓度的增大,辐射复合的比例也会增大,这是由于辐射复合的速率与载流子浓度的二次方成正比(对应理想因子 n 是 1.0 ^[14]),而 SRH 复合与载流子浓度的一次方成正比(对应理想因子 n 是 2.0)。而对于反偏的 n 型 GaSb/金属结,其情形与参考文献[9]中提到的几乎是一样的,所以其理想因子 n 应该在 1.7~2.0 左右。两个结的理想因子 n 相加,贡献了激光器总体理想因子的绝大部分。

为了研究工作温度对于激光器总体理想因子 n 的影响,笔者分别测试了激光器在 $20, 40, 60, 80\ ^\circ\text{C}$ 时的伏安特性,如图 5(a)所示。可以看出,激光二极管的开启电压随温度不断下降。图 5(b)所示为 4 个温

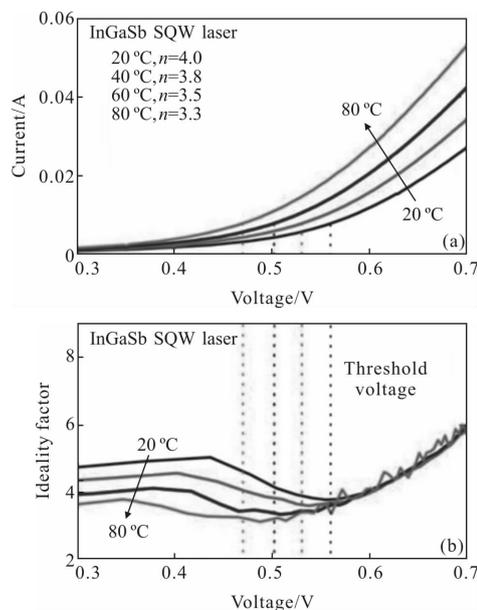


图 5 InGaSb SQW 激光器在 $20, 40, 60, 80\ ^\circ\text{C}$ 时, 电流(a) 和理想因子(b)与器件外加电压的关系
 Fig.5 (a) $I-V$ characteristics of the InGaSb SQW laser at four different temperatures ($20, 40, 60,$ and $80\ ^\circ\text{C}$), (b) total ideality factor of the laser at above four temperatures

度下总体理想因子 n 的变化情况,总的来说,理想因子 n 的变化趋势在 4 个温度下是相同的:都是在开启电压附近到达了最小值,也都是在电压很低和很高时分别由于并联电阻和串联电阻的影响变得很大。总体理想因子 n 同样随着温度的升高不断变小,这主要归因于在高温下 n 型 GaSb/金属结会变得更加像欧姆接触。

4 结 论

综上所述,文中展示了一种低阈值($\sim 131 \text{ A/cm}^2$) $2 \mu\text{m}$ InGaSb/AlGaAsSb 单量子阱激光器。基于 Shah 等人的理论得到了此激光器的等效电路,根据此等效电路,器件总体理想因子 n 主要来源于中央 pn 结与 n 型 GaSb/金属结。中央 pn 结中量子阱结构的存在促进了其中载流子的复合过程,使得此 pn 结的理想因子 n 相较于独立的 GaSb 材料 pn 结的 2.0 会有所减小。总体理想因子 n 在温度升高时从 4.0 降低至 3.3,这主要归因于高温下 n 型 GaSb/金属结变得更像欧姆接触而导致的其理想因子 n 的下降。这些结果与笔者所应用的 Shah 等人提出的理论模型与之前报道中独立的 GaSb 材料 pn 结、GaSb/金属结的理想因子 n 数值都是相吻合的。

参 考 文 献:

- [1] Scholle K, Lamrini S, Koopmann P, et al. Frontiers in guided wave optics and optoelectronics [J]. *Optical Engineering*, 2010, 2(10): 3033.
- [2] Geng J, Jiang S. Fiber lasers: The $2 \mu\text{m}$ market heats up[J]. *Optics and Photonics News*, 2014, 25(7): 34–41.
- [3] Schliesser A, Picqué N, Hänsch T W. Mid-infrared frequency combs[J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(7): 440–449.
- [4] Shterengas L, Belenky G, Kisin M V, et al. High power $2.4 \mu\text{m}$ heavily strained type-I quantum well GaSb-based diode lasers with more than 1 W of continuous wave output power and a maximum power-conversion efficiency of 17.5%[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(1): 011119.
- [5] Rong J, Xing E, Zhang Y, et al. Low lateral divergence $2 \mu\text{m}$ InGaSb/AlGaAsSb broad-area quantum well lasers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(7): 7246–7252.
- [6] Li X, Wang H, Qiao Z, et al. Design and analysis of $2 \mu\text{m}$ InGaSb/GaSb quantum well lasers integrated onto silicon-on-insulator (SOI) waveguide circuits through an Al_2O_3 bonding layer [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 22(6): 1500507.
- [7] Ikkyo A B, Marko I P, Hild K, et al. Temperature stable mid-infrared GaInAsSb/GaSb vertical cavity surface emitting lasers (VCSELs)[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19595.
- [8] Li X, Wang H, Qiao Z, et al. Temperature-and current-dependent spontaneous emission study on $2 \mu\text{m}$ InGaSb/AlGaAsSb quantum well lasers [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, 56(5): 050310.
- [9] Polyakov A Y, Stam M, Milnes A G, et al. Electrical properties of GaSb Schottky diodes and pn junctions [J]. *Materials Science and Engineering: B*, 1992, 12(4): 337–343.
- [10] Rhoderick E H, Williams R H. Metal-Semiconductor Contacts [M]. 2nd ed. Oxford: Oxford University Press, 1988.
- [11] Liu C, Wang H, Meng Q, et al. Modal gain and photoluminescence investigation of two-state lasing in GaAs-Based $1.3 \mu\text{m}$ InAs/InGaAs quantum dot lasers [J]. *Applied Physics Express*, 2013, 6(10): 102702.
- [12] Shah J M, Li Y L, Gessmann T, et al. Experimental analysis and theoretical model for anomalously high ideality factors ($n \gg 2.0$) in AlGaIn/GaN pn junction diodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94(4): 2627–2630.
- [13] Eliseev P G, Maege J, Erbert G, et al. Threshold drop of the differential resistance of stripe quantum-well InGaAs/GaAlAs lasers[J]. *Quantum Electronics*, 1995, 25(2): 99.
- [14] Lee G W, Shim J I, Shin D S. On the ideality factor of the radiative recombination current in semiconductor light-emitting diodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, 109(3): 031104.