

研究快报

硅衬底上 GaAlAs/GaAs 单量子阱激光器*

庄婉如 石志文 杨培生

(中国科学院半导体所,北京)

梅野正義 神保孝志 曾我哲夫

(日本名古屋工业大学電気情報工学科)

1989年5月4日收到

采用 MOCVD 方法在硅衬底上生长了带应力超晶格的 GaAlAs/GaAs 单量子阱外延片，并用质子轰击隔离法制成 10 微米条形单量子阱激光器。在室温下加脉冲电流（重复频率 20KHz，脉宽 1μs）观察到受激发射。最低阈电流 92mA、激射波长 849.2nm，外微分量子效率 11%。

主题词：半导体激光器, 光电集成, 非匹配异质外延, 硅上生长砷化镓

一、引言

八十年代以来，硅上异质外延生长砷化镓 (GaAs/Si) 已引起了许多研究者和应用者的兴趣。虽然目前尚存在不少问题，但已有试制成发光管、激光器、场效应管和太阳能电池的报道。

硅是器件工艺最成熟的半导体材料，大规模集成及超大规模集成主要是采用硅材料。砷化镓具有直接带隙结构、高迁移率、高漂移速度和较易获得优易的异质结构等优点，是光电子器件、微波器件和高速器件的重要衬底材料。如果硅上生长砷化镓的质量一旦过关，就有可能综合硅和砷化镓的优点，避开两者各自的缺点，把光电、微波及高速器件做在砷化镓上，而把超大规模集成电路做在硅衬底上，实现多类器件的单片集成。甚至还有可能发展新的功能组件。GaAs/Si 光电子单片集成芯片是把光电子器件（如激光器、发光管或光探测器等）和高速电子器件（如 FET、HEMT 等）做在砷化镓上，而把大规模集成电路做在硅衬底上^[1]。这类芯片在近期内可应用于光纤通信的局部网，下一步非常合适于做硅超大规模集成芯片之间的光互连（所采用的光开关，网络结构可大大简化）。单晶硅衬底还具有尺寸大、价格便宜的优点。

T. H. Windhorst 和 R. Fisher 分别报道了采用 MBE 及两步生长法在硅上制成了

* 1. 本文 MOCVD 工作在日本名古屋工业大学进行，激光器制作和测量在中科院半导体所进行。
2. 国家自然科学基金资助项目。

◆GaAlAs/GaAs 双异质结激光器^[2,3]; R. D. Dipuis 采用 MOCVD 方法在硅上生长了中间过渡层并做出了量子阱激光器^[4]; S. Sakai 等也采用 MOCVD 方法在硅上生长了应力超晶格 (SLS) 中间过渡层, 并做出了双异质结和量子阱激光器^[5]。上述报道的激光器都在室温下观察到了脉冲激射。D. G. Deppe 和 D. C. Hall 等人采用 MBE 及 MOCVD 两步的方法在硅上做出了室温连续激射的激光器, 1987 年寿命为 4 小时^[6], 1988 年已改进达 10 小时^[7]。本文采用 MOCVD 方法, 在硅上生长 GaP/GaAs_{0.5}P_{0.5} 及 GaAs_{0.5}P_{0.5}/GaAs 应力超晶格做为中间过渡层, 接着生长单量子阱激光器结构, 并应用质子轰击形成高阻隔离, 制成 10 微米宽的条形激光器, 获得了室温脉冲激射。

二、采用应力超晶格在硅上生长砷化镓

硅衬底上生长砷化镓遇到的主要问题是: ①, 由于砷化镓和硅的晶格常数相差 4%, 以致在 GaAs/Si 界面处存在 10^2 cm^{-2} 失配位错。②, GaAs 的热膨胀系数是硅的两倍多, GaAs 外延层处于 $10^9 \text{ Da} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的张应力, 影响器件性能, 片子也易翘曲变弯。③, 当一极性半导体生长在非极性半导体上时, 极易发生反相结构, 即在交界处会包含一些不合理的 Ga-Ga 键或 As-As 键。为了克服反相结构, 衬底表面要偏离 (100) $2-5^\circ$ 。

硅衬底上外延生长砷化镓的方法有: ①采用锗做过渡中间层^[8]。但近来发现锗会扩进外延层形成自掺杂。②最普遍的是“两步生长法”^[9]: 第一步用 MBE 在高温下淀积很薄(约 20nm) 的 GaAs 非晶膜, 然后在 450—500℃ 退火, 把 GaAs 加热至变为单晶。接着可在正常温度下用 MBE 或 MOCVD 生长 GaAs 层。③采用应力超晶格作为中间过渡层: 应力超晶格是两种晶格不匹配的异质薄层交替生长, 当每层厚度小于临界厚度时, 可以用晶格间的应变来补偿晶格失配, 因而可大大降低歪曲晶格的失配位错。

本文采用应力超晶格来减小由于晶格不匹配产生的应力。人们通常采用的是 GaAlAs/GaAs 应力超晶格或者 AlGaAsP/AlP 应力超晶格再过渡至 AlGaAsP/GaAs 应力超晶格。为了避免由于 Al 引起的化学不稳定。我们采用了第一层先长 GaP 薄层 (GaP 与硅晶格常数接近, 又与 GaAs 热膨胀系数相近), 紧接着选用了由 GaP 向 GaAs 的逐步过渡, 即由 GaP/GaAs_{0.5}P_{0.5} 应力超晶格过渡为 GaAs_{0.5}P_{0.5}/GaAs 应力超晶格。在其上就可生长 GaAs 层。由深能级及应力的测量可知这样的应力超晶格对材料完整性有较大的改进^[10,11]。

要在硅衬底上生长砷化镓, 首先要设法把硅表面上的氧化层彻底清除掉。为此, 我们把硅片在 900—1000℃ 的 H₂ + PH₃ 中焙烧 10 分钟, 以便使任何残存于硅表面上的氧化物能被还原成气态而被气体流带走。并在硅表面上镀上非常薄的磷, 以利于 GaP 的生长。

本文采用 MOCVD 法在 n 型硅 (100) 朝 (110) 偏 2° 的表面上生长如图 1 所示的多层结构。典型生长过程为: 先把硅片在 950℃ H₂ + PH₃ 中焙烧 10 分钟, 接着在 900℃ 生长 50nm GaP, 在 680℃ 生长五个周期的 GaP/GaAs_{0.5}P_{0.5} (每层 20nm) 及五个周期的 GaAs_{0.5}P_{0.5}/GaAs (每层 20nm)。上述各个超薄层结构组成了应力超晶格结构。再在 650℃ 生长 2μm n⁺ GaAs 缓冲层。接着进行了五个周期的从 650℃ 至 200℃ 的加热及

冷却的热循环处理,以形成热应力缓冲层,此层可以帮助吸收一部份缺陷^[7]。

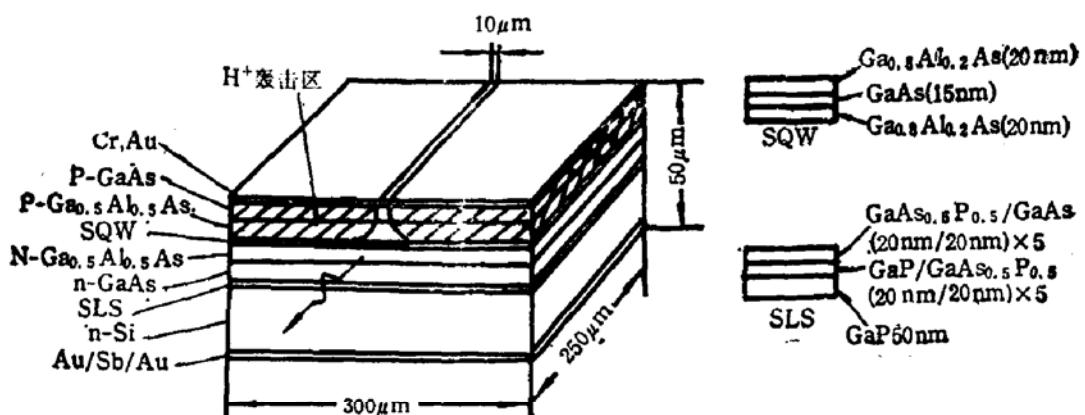


图1 硅衬底上单量子阱激光器结构示意图

三、单量子阱激光器的制作

在同一 MOCVD 反应室内,在热循环处理之后,紧接着生长 $1\mu\text{m}$ 厚掺 Se 的N型 $\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ 限制层(浓度 $1 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$),接着生长单量子阱结构,它由 15nm 未掺杂 GaAs 势阱及两旁的 20nm $\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ 势垒构成;在其上又生长了 $1\mu\text{m}$ 厚掺 Zn 的P型 $\text{Ga}_{0.5}\text{Al}_{0.5}\text{As}$ 限制层(浓度 $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$)及 $2\mu\text{m}$ 厚的P型 GaAs 顶层(浓度 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$)。

为了做好P面的欧姆接触,在 650°C 用闭管扩Zn把P面表面浓度提高至 $1 \times 10^{20}\text{cm}^{-3}$

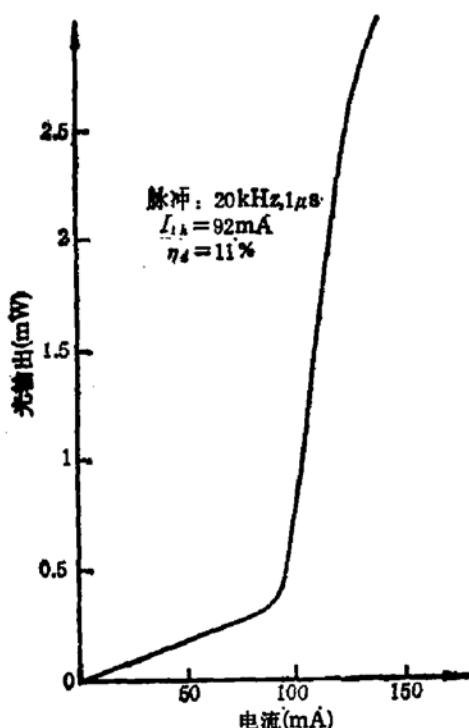


图2 单量子阱激光器 F64 光输出功率与电流的关系

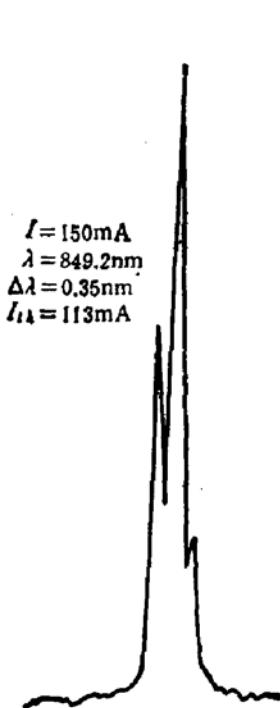


图3 单量子阱激光器 F35 脉冲激射光谱

cm^{-3} 。然后把硅衬底磨薄至总片厚约 $60\ \mu\text{m}$ 。 n 面蒸 $\text{Au}/\text{Sb}/\text{Au}$ 做电极, p 面蒸 Cr/Au 做电极。采用质子轰击造成的高阻隔离作成 $10\ \mu\text{m}$ 宽的条形激光器^[12]。用解理技术做成 $250\ \mu\text{m}$ 长的谐振腔。管芯 p 面朝下烧在铜热沉上。

四、单量子阱激光器特性

在室温(295K)下,激光器加以脉冲电流(重复频率 20KHz, 脉宽 $1\ \mu\text{s}$),观察到受激发射。图2为 F64 激光器光输出功率与所加电流的关系($L-I$ 特性)。其阈电流 I_{th} 为 92mA , 相应于阈电流密度为 $3.7 \times 10^3 \text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$, 外微分量子效率 η_d 为 11%。但 $L-I$ 曲线随测试时间衰退得很快: 阈电流随时间增加很快, 光输出明显降低, 外微分量子效率随时间也有所下降, 反向伏安特性亦明显变差。工作 15 分钟之后, 激射特性已很不明显了。

激光器 F35 在上述脉冲条件下的受激发射光谱表示于图3, 其峰值波长为 849.2nm , 光谱半宽为 0.35nm 。

五、讨 论

由本文的实验工作结果,我们可以得到如下的结论和启示:

(1) 采用应力超晶格对改善硅上生长的 GaAs 质量是有效的。采用本文使用的 $\text{GaAs}/[\text{GaAs}_{0.5}\text{P}_{0.5}(\text{SLS})]/[\text{GaAs}_{0.5}\text{P}_{0.5}/\text{GaP}(\text{SLS})]/\text{GaP/Si}$ 的结构可以得到质量较佳的 GaAs, 在其上生长的单量子阱激光器已经观察到室温下脉冲激射。

(2) 研制的单量子阱激光器在室温下只观察到脉冲激射,未能获得室温连续激射; 激光器阈电流还比较高,输出功率和量子效率还比较低; 特别是激光器的性能急剧退化; 这些都说明激光器的有源区尚存在许多缺陷和应力, 砷化镓的质量还很需要进一步改善。

(3) 根据 $\text{GaAs}/\text{Ga}_{0.8}\text{Al}_{0.2}\text{As}$ 方势阱的计算^[13], 本文单量子阱激光器的波长应为 860nm 左右,(用同一 MOCVD 条件生长在 GaAs 衬底上的相同结构的单量子阱激光器, 其激射波长基本接近计算的波长值)。而本文的激光器实测值为 849.2nm , 比计算值小 10nm 左右, 波长变短的问题尚需进一步搞清原因。

(4) 硅衬底上制作 GaAs/GaAlAs 激光器当前的主要矛盾是非匹配异质外延 GaAs 质量急需进一步提高: 随着工艺的进一步探索与改进, 硅和砷化镓界面的完整性将会进一步得到改善; 应力也可通过热循环处理试验进一步得到缓和^[7]。相信在不久的将来, 硅衬底上的 GaAs/GaAlAs 激光器的性能将会逐步提高, 达到实用化的要求。

参 考 文 献

- [1] S. Sakai and M. Umeno; *Jpn. J. Appl. Phys.*, 24, L666(1985).
- [2] T. H. Windhorn and G. M. Metze; *Appl. Phys. Lett.*, 47, 1031(1985).
- [3] R. Fisher et al., *Appl. Phys. Lett.*, 48, 1360(1986).
- [4] R. D. Dupuis et al., *Appl. Phys. Lett.*, 50, 407(1987).

- [5] S. Sakai, H. Shiraishi, M. Umeno; *IEEE J. Quantum Electronics*, **QE-23**, 211(1987).
 [6] D. G. Deppe *et al.*, *Appl. Phys. Lett.*, **51**, 1271(1987).
 [7] D. C. Hall; D. G. Deppe *et al.*, *J. Appl. Phys.*, **64**(6), 2854(1988).
 [8] R. P. Gale, *et al.*, *IEEE Electron. Device. Lett.*, **EDL-2**, 169(1981).
 [9] M. Akiyama, *et al.*, *J. Cryst. Growth*, **68**, 21(1984).
 [10] T. Soga *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **25**(10), 1510(1986).
 [11] T. Soga *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **25**, (11), 1680(1986).
 [12] 王启明、庄婉如, *半导体学报*, **1**(1), 46(1980).
 [13] R. Dingle *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **33**, 827(1974).

GaAlAs/GaAs SQW SCH LD Fabricated on Si by MOCVD*

Zhuang Wanru, Shi Zhiwen, Yang Peisheng

(Institute of Semiconductors, Academia Sinica P. O. Box 912, Beijing 100083 China)

M. Umeno, T. Soga and T. Jimbo

(Department of Electrical and Computer Engineering Nagoya Institute of Technology, Nagoya, Japan)

Abstract

GaAlAs/GaAs layers with SLS were grown on Si substrates by MOCVD. The isolated stripe of 10 μm stripe LDs were made by proton bombardment. LDs were stimulated under pulse 20 kHz, 1 μs at 295K. The lowest threshold current and peak wavelength are 92 mA and 849.2 nm, respectively. The external differential quantum efficiency is 11%.

KEY WORDS Semiconductor Laser, OEIC (Optoelectronic Integrated Circuit), GaAs grown on Si, Mismatched Hetero Epitaxial

* The MOCVD work was done in Umeno's lab., Nagoya Institute of Technology; The devices were fabricated in Institute of Semiconductors.