

窄条宽 MOCVD 选区生长 InP 系材料 的速率增强因子^{*}

张瑞英 董 杰 周 帆 冯志伟 边 静 王 坊

(中国科学院半导体研究所 国家光电子工艺中心, 北京 100083)

摘要: 报道了窄条宽选区生长有机金属化学气相沉积(NSAG-MOCVD)成功生长的 InP 系材料, 并提出在 NSAG-MOCVD 生长研究中, 引入填充因子的必要性, 给出速率增强因子随填充因子变化的经验公式, 计算得出速率增强因子随填充因子的变化关系。与实验结果作了比较, 发现 InP 的速率增强因子主要取决于掩膜宽度, InGaAsP 的速率增强因子不仅与掩膜宽度有关, 同时也依赖于生长厚度, 且这种依赖性随掩膜宽度的增加而增加。

关键词: 窄条宽选区生长; MOCVD; InP 系材料; 速率增强因子

EEACC: 0510D; 2520D; 4270

中图分类号: TN 304. 2⁺ 3

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)04-0399-04

1 引言

窄条宽选区生长有机金属化学气相沉积技术(NSAG-MOCVD)是在平面 MOCVD 和宽条宽选区生长 MOCVD 技术基础上发展起来的一项新型生长技术。采用该项技术, 可使 BH 结构的台面条形依晶向自动形成, 有利于改善 BH 有源器件性能; 同时可以实现对材料生长速率和波长的直接调制, 在一次外延中实现不同光电子器件的集成, 减少外延步骤和不同器件间对接的困难。因此, 该项技术具有巨大的开发潜力和应用前景。国际上, 已有采用该项技术生长的激光器、偏振不灵敏半导体光学放大器(SOA)与模斑转换器集成以及微列阵 DFB 激光器、SOA 和电吸收调制器集成器件的报道^[1~3]。

精确控制材料生长速率是成功制备各类光电子器件的关键, 采用 NSAG-MOCVD 技术, 在不同生长条件下速率增强因子随掩膜宽度的变化关系得到了较充分的研究^[4,5], 对于我们采用此种方法生长材料有一定的指导意义。但是, 在 NSAG-MOCVD 生

长中, 可生长区域的宽度与源分子的表面迁移长度、生长区域的侧面长度在同一数量级。因此, 生长过程中生长区域本身的变化对生长过程的影响不能忽略, 生长速率随掩膜宽度的变化已经不能客观准确地描述掩膜衬底对生长过程的影响。本文在国内首次报道了利用该项技术成功生长的 InP 系材料情况, 并引进填充因子概念, 首次给出窄条宽选区生长速率增强因子随填充因子的变化关系, 并与实验结果作了比较。得知, InP 的速率增强因子仅与掩膜宽度有关, 可以用掩膜宽度直接准确地描述 InP 的生长情况。InGaAsP 的速率增强因子不仅与掩膜宽度有关, 同时也依赖于生长厚度, 且这种依赖性随掩膜宽度的增加而增加, 只有用填充因子才能准确描述其生长情况。

2 实验过程

首先, 在(100)取向的 n 型 InP 衬底上, 用热氧化 CVD 淀积厚度为 100nm 的 SiO₂, 然后采用传统的光刻腐蚀技术在衬底面内沿[110]方向刻出如图

* 国家 973 计划资助项目(No. G20000683-I)

张瑞英 女, 博士研究生, 主要从事半导体光学放大器(SOA)的研制和窄条宽选择 MOVPE 技术的开发。

王 坊 男, 中国科学院院士, 主要从事窄条宽选区生长 MOVPE、SOA、光子集成、光电子集成等研究开发工作。

2001-07-02 收到, 2001-09-14 定稿

© 2002 中国电子学会

1 所示图形, 生长区域保证 $2\mu\text{m}$ 条宽窗口, SiO_2 掩膜区域宽度依次为 5, 10…… $40\mu\text{m}$, 生长周期为 $300\mu\text{m}$. 之后, 采用水平反应管 MOCVD 设备, 选择 TMIn、TMGa 作为 III 族源, AsH_3 、 PH_3 作为 V 族源, 生长室压力固定在 $1.3 \times 10^4\text{Pa}$, 生长温度控制在 610°C , V/III 比为 200~500. 整个生长过程中氢气载气控制在 3000sccm, 总流速控制在 50~100 cm/s . 其外延生长形貌与生长界面通过 AM-RAY 1910 场发射扫描电镜进行观察研究, 各个生长区域参数通过 SEM 照片来测量.

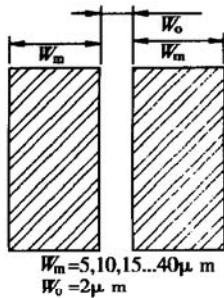


图 1 窄条宽选区生长 MOVPE 的 SiO_2 掩膜图形

Fig. 1 SiO_2 mask pattern for narrow stripe selective MOVPE

3 结果和讨论

3.1 台面自动形成的 InP 系半导体材料

图 2 给出 NSAG-MOCVD 生长的平整的 InP/InGaAsP/InP 材料, 从图中可以看出, 材料表面、界面都很平整, 侧面光滑, SiO_2 表面无晶核出现, 台面自然形成. 在选区生长中, 介质膜掩膜宽度直接决定了生长过程中的侧向浓度梯度, 由此造成不同掩膜宽度下选区生长材料的生长速率不同. 实验表明, 在 NSAG-MOCVD 生长中, 在特定的掩膜条宽范围内 ($5\sim 40\mu\text{m}$), 均可得到表面、界面平整的材料. 因此, 我们可以通过设计掩膜条宽来一次性获得不同厚度的材料而不必担心生长台面表面、界面平整性, 这是我们利用 NSAG-MOCVD 实现器件集成的基础. 同样也可得出, 在 NSAG-MOCVD 生长中, 侧向扩散作用对台面形貌不起作用, 台面形貌主要由表面迁移决定. 就表面迁移而言, III 族源在 SiO_2 表面上是各向同性扩散, 其扩散系数只决定于 III 族物质与 SiO_2 表面的相互作用; III 族原子在生长区域是各向异性扩散的, 其扩散系数大小与各个晶面上的悬挂

键密度相关. Sugiura^[6] 指出在 V 族原子饱和的各个晶面可提供的悬挂键密度分别为: (111) A 面, 1.73; (100) 面, 1; (111) B 面, 0.58. 可以肯定, III 族原子必然从悬挂键密度低的晶面向悬挂键密度高的晶面迁移, 导致各向异性生长, 从而使台面自动形成. 同时, 由于 III 族原子在(111) B 的表面迁移长度几乎与生长区域(100) 面的宽度相当, 因此, 可以生长出平整的台面.



图 2 NSAG-MOCVD 生长的平整的 InP/InGaAsP/InP 材料

Fig. 2 Flat InP/InGaAsP/InP materials grown by NSAG-MOCVD technology

3.2 NSAG-MOCVD 中的速率增强因子

在 NSAG-MOCVD 生长中, III 族原子的表面迁移长度和生长区域各晶面的宽度在同一数量级, 而且 InP 系材料是各向异性生长, 因此材料生长过程中各晶面的变化对材料生长速率的影响不能忽略. 为此, 我们引入填充因子 F 来描述生长过程中未生长区域和生长区域的关系. 对于平整的 InP 系材料, 有:

$$F(z) = \frac{w(z) + 2\alpha f(z)}{w(z) + 2f(z) + M}$$

公式中各参量所指如图 3 所示, α 表示(111) B 面生长层厚与(100) 面生长层厚的比值. 对于 InGaAsP, $\alpha=0$, 而对于 InP, $\alpha=0.3$ ^[7]. 由图可见, $F(z)$ 的值越大, 表明参与生长的区域越小. 在 NSAG-MOCVD 中, 当掩膜宽度小于阈值掩膜宽度时, 在气相粘滞层中不存在 SiO_2 表面与半导体表面的有机源浓度差, 即不存在侧向气相扩散作用, 速率增强因子仅由半导体(111) B 晶面和(100) 晶面的不同注入效率决定. 则速率增强因子表示为^[4]:

$$R = 1 + DL_m \left(1 - \exp\left(-\frac{W_m}{2L_m}\right) \right)$$

其中 D 是与粘滞系数有关的参量; W_m 为阈值掩膜宽度; L_m 是III族源在介质膜表面的迁移长度。当掩膜宽度大于阈值掩膜宽度时, 侧向气相扩散和表

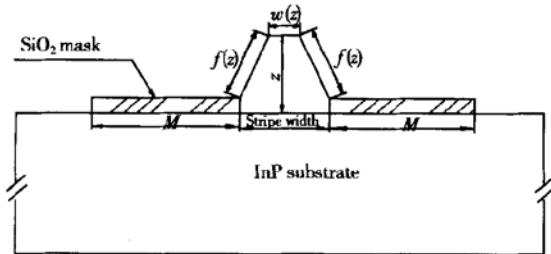


图 3 计算填充因子参数示意图

Fig. 3 Schematic diagram for parameters used to calculate the filling factor

面迁移都对速率增强因子起作用。对于侧向气相扩散作用, 速率增强因子与III族源气相扩散常数 D 和III族原子在半导体表面的吸附系数 k 的比值相关, III族源的质量输运是生长速率的决定因素。对于表面迁移作用, 速率增强因子由III族原子在(111)B面与(100)面不同的反应速率决定, 反应动力学是速率决定步骤。根据以上分析, 对于 NSAG-MOCVD, 综合侧向气相扩散作用和表面迁移作用, 其速率增强因子应表示为:

$$R = 1 + 0.05 \times \frac{w(z) + 2\alpha f(z)}{F(z)}$$

其中各参数所指与前面公式相同。图 4 分别给出 InGaAsP 计算和实验所得的速率增强因子随填充因子的变化关系。其中, R_{22} 和 R_3 是计算所得速率增强因子, $R_{InGaAsP}$ 是测试所得结果。图 4 表明, 计算结果与实验结果吻合得很好, 表明我们给出公式的有效性。当然我们需注意到, 根据 F 因子得到的速率增

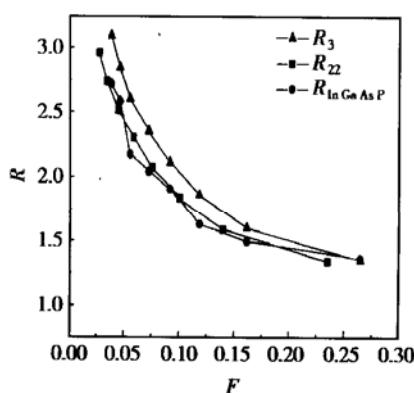


图 4 速率增强因子与填充因子的关系

Fig. 4 Relation ship between R and F

强因子是生长厚度 z 或生长时间 t 的函数, 是一瞬时值, 而测量所得是生长厚度内的平均值, 因而可能有一些差别。

3.3 InP 系材料的速率增强因子

图 5 给出利用以上公式计算的 InP 和 InGaAsP 的速率增强因子随填充因子的变化关系。对于 InP, R_1 是 $t = 0$ 时的速率增强因子, R_{21} 是 $t = 15\text{min}$ 时的速率增强因子; 对于 InGaAsP, R_{22} 是 $t = 0$ 时的速率增强因子, R_3 是 $t = 15\text{min}$ 时的速率增强因子。从图

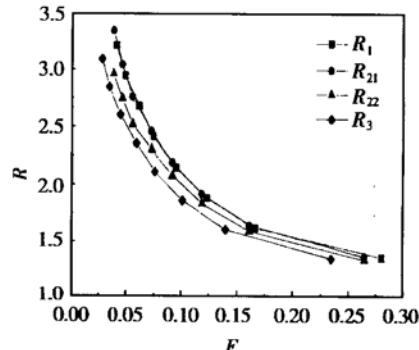


图 5 InP、InGaAsP 速率增强因子随填充因子的变化关系

Fig. 5 Dependence of growth rate enhancement factor on corresponding filling factor for InP, InGaAsP

中可以看出, 无论 InP, 还是 InGaAsP, 其速率增强因子均随填充因子的增加而减少, 这与前人研究结果类似。而且, R_1 和 R_{21} 曲线几乎重叠, 表明 InP 的速率增强因子与生长厚度(时间)关系不大, 主要取决于填充因子, 这时, 采用掩膜宽度就可直接准确地描述它们之间的关系。在相同的掩膜宽度下, 对于 InGaAsP, 生长 15min 后的填充因子大于未生长的填充因子。同时, R_3 也明显大于 R_{22} , 并且随着掩膜宽度的增加(填充因子的减小), $R_3 - R_{22}$ 也变大。表明 InGaAsP 的速率增强因子不仅与填充因子相关, 而且与生长厚度(时间)密切相关, 且填充因子越小, 这种依赖性越强。这种差异是由于 InP 和 InGaAsP 不同的生长特性决定的。对于 InP, 不仅存在(100)面的生长, 同时也存在(111)B 面的生长, 结果其有效生长区域并没有发生太大的变化, 因而其速率增强因子对生长厚度(时间)的依赖性不强。对于 InGaAsP, 随着生长厚度(时间)的增加, (100)面的生长区域在不断变窄, (111)B 面在不断加宽, 可是

(111)B 面对于 InGaAsP 是非生长晶面, 即相当于掩膜表面, 因而其填充因子在不断减小, InGaAsP 的速率增强因子在不断增加, 导致速率增强因子对生长厚度(时间)依赖性加强。而且, 掩膜宽度越宽, 下面 InP 生长的越厚, (100) 面越窄, (111)B 面越宽, 对 InGaAsP 速率增强因子影响越大。可见, 对于 InGaAsP, 引进填充因子, 才能准确客观地反应速率增强因子的情况。

4 结论

本文在国内首次报道了 NSAG-MOCVD 技术生长的 InP 系材料, 并引进填充因子的概念, 给出速率增强因子的经验公式, 得到与实验相吻合的结果, 并利用该经验公式得出, InP 的速率增强因子对生长厚度的依赖关系较弱, 可以用掩膜宽度描述速率增强因子的关系; InGaAsP 的速率增强因子对生长厚度的依赖关系较强, 且掩膜条宽越宽, 这种依赖关

系越强, 引进填充因子才能准确客观地描述速率增强因子的变化。并认为该种现象是 InP 和 InGaAsP 在(111)B 面生长行为不同所致。

参考文献

- [1] Sakata Yasutaka, Hosoda Tetsuya, Sasaki Yoshihiro, et al. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(3): 368
- [2] Kitamura Shotaro, Hatakeyama Hiroshi, Hamamoto Kiichi, et al. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1999, 35(7): 1067
- [3] Kudo Kodi, Yashiki Kenichiro, Sasaki Tatsuya, et al. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(3): 242
- [4] Sakata Yasutaka, Inomoto Yasumasa, Komatsu Keiro, J Cryst Growth, 2000, 208: 130
- [5] Mori Kazuo, Hatakeyama Hiroshi, Hamamoto Kiichi, et al. J Cryst Growth, 1998, 195: 466
- [6] Caenegem T V, Moerman I, Demeester P. Prog Crystal Growth and Charact, 1997, 35(2~4): 263
- [7] Galechet Y D, Roentgen P, Graf V. J Appl Phys. 1990, 68(2): 560

Growth Rate Enhancement Factor for InP-Based Materials Narrow-Stripe Selective Area Metal-Organic Chemistry Vapor Deposition*

Zhang Ruiying, Dong Jie, Zhou Fan, Bian Jing, Feng Zhiwei and Wang Wei

(National Research Center For Optoelectronic Technology, Institute of Semiconductors,
The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: It is the first time that the high quality InP-based materials are successfully grown by use of NSAG-MOCVD technology in China, and that the empirical formula about the growth rate enhancement factor is proposed. The calculation results in terms of this formula coincide with experimental data basically. The growth rate enhancement factor for InGaAsP is dependent on both dielectric mask width and the growth thickness (time). The wider the dielectric mask, the stronger the dependence of growth rate enhancement factor on the growth thickness (time). So it is necessary for InGaAsP to induce the filling factor to describe the relationship between the growth rate enhancement factor and patterned substrate. However, for InP, it seems irrelevant with the growth rate and it is enough to only use the mask width to express the relationship between the growth rate enhancement factor and patterned substrate.

Key words: narrow-stripe selective area growth; MOCVD; InP-based materials; growth rate enhancement factor

EEACC: 0510D, 2520D, 4270

Article ID: 0253-4177(2002)04-0399-04

* Project supported by the National 973 Project (Grant No. G20000683-1)

Zhang Ruiying female, PhD candidate. She is engaged in the research on fabrication of semiconductor optical amplifier and narrow selective area MOVPE technology.

Wang Wei male, academician of The Chinese Academy of Sciences. He is engaged in the research on narrow selective growth, SOA, optics-electronics integration and photonics integration.