

文章编号: 1001-3806(2007)01-0098-04

高速脊波导激光器寄生电容的分析

孟桂超¹, 陈国鹰^{1*}, 安振峰², 张世祖², 韩 威¹

(1. 河北工业大学 信息学院, 天津 300130 2 信息产业部 电子第 13 研究所, 石家庄 050051)

摘要: 高速调制半导体激光器光源是光纤通信系统、相控阵雷达等的关键器件。高速激光器的寄生电容是影响其调制带宽的因素之一。为了减小寄生电容, 针对脊波导结构激光器的电容, 采用计算机模拟与实际测试相结合的方法, 进行了理论分析和实验验证。结果表明, 其寄生电容大小不仅与电极金属化面积有关, 还与隔离沟的腐蚀深度有关。当腐蚀至波导层时, 寄生电容减小到 10pF 以下。这一结论对实现激光器的高速调制是非常有意义的。

关键词: 激光器; 金属化; 腐蚀; 寄生电容; 调制带宽

中图分类号: TN248.4 **文献标识码:** A

Analysis of parasitic capacitance of high speed ridge waveguide laser

MENG Gui-chao¹, CHEN Guo-ying¹, AN Zhen-feng², ZHANG Shi-zu², HAN Wei¹

(1. College of Information, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. The 13th Electronic Research Institute, Ministry of Information Industry, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract The high-speed modulated semiconductor lasers are the key devices in the system of high-speed fiber communication and phase control radar systems etc. The parasitic capacitance of the high-speed laser is one of those factors which affect the modulation bandwidth. In order to reduce it, the capacitance of the ridge waveguide structure was analyzed and tested, computer simulation was performed. A conclusion is made that capacitance's value is related to not only the eroded depth of the insulation channel but also the area of the metallization, which is important for the realization of the high-speed modulation of the laser.

Key words lasers; metallization; erosion; parasitic capacitance; modulation bandwidth

引 言

高速调制半导体激光器的应用范围相当广泛, 它不仅是超长距离、超大容量光纤通信系统的关键器件, 而且在高速信号处理系统、高速波分复用系统中也占有非常重要的地位。

高速调制半导体激光器的调制带宽^[1]受多个因素的影响: 芯片的弛豫振荡频率、芯片及组件的寄生参量(包括寄生电容、寄生电感等)等。芯片寄生参量中的寄生电容的大小影响着激光器的工作带宽^[2], 作者对高速脊波导结构激光器的寄生电容进行了分析。

1 寄生电容对调制带宽的影响

电学寄生参数主要包括寄生电容、串联电阻和引线电感等, 它对调制带宽的限制起着根本的作用。寄

生电容的存在限制了注入电流进入有源区, 从而导致了高频下微分效率的降低, 微分效率的降低导致调制速率降低。激光器在高频工作时, 寄生电容是限制调制带宽的主要因素, 它严重地影响着器件的响应速度。如果芯片的寄生电容过大, 即使激光器的张弛振荡频率所决定的 -3dB 调制带宽可以达到数十吉赫兹以上, 但实际的调制带宽仅为几吉赫兹甚至几百兆赫兹, 不同电容激光器的调制特性其模拟结果见图 1。从图

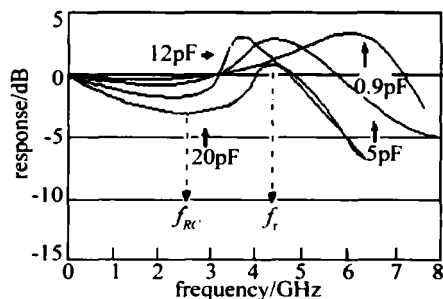


Fig 1 The modulation character of the laser with different capacitance

1中可以看出, 尽管由激光器的张弛振荡频率决定的带宽都在 5GHz 左右, 但是当寄生电容较大时, 由电容和电阻 (resistance and capacitance, RC) 决定的 3dB 调制带宽降低, 导致调制特性曲线提前下降 3dB, 从而使

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60476025); 河北省自然科学基金资助项目 (F2005000084 603080)

作者简介: 孟桂超 (1979-), 女, 硕士研究生, 主要从事半导体激光器的研究。

* 通讯联系人。E-mail: cheng_y@263.net

收稿日期: 2005-12-05; 收到修改稿日期: 2006-02-28

激光器的实际工作带宽减小。

可见,寄生电容对器件的调制带宽有致命影响,对于高速激光器,应在芯片设计上尽可能降低分布电容,脊波导芯片结构是一种既工艺简单,分布电容又比较低的芯片设计,下面将针对脊波导结构设计,实验分析如何获得尽可能小的分布电容。

2 脊波导结构芯片的寄生电容

2.1 器件的制作

器件的整体结构和有源区的结构见图 2。有源区采用金属有机物化学气相沉积技术 (metal oxide chemical vapor deposition MOCVD) 生长的 AlGaInAs 应变补偿分别限制多量子阱结构^[3,4],如图 2a 所示。

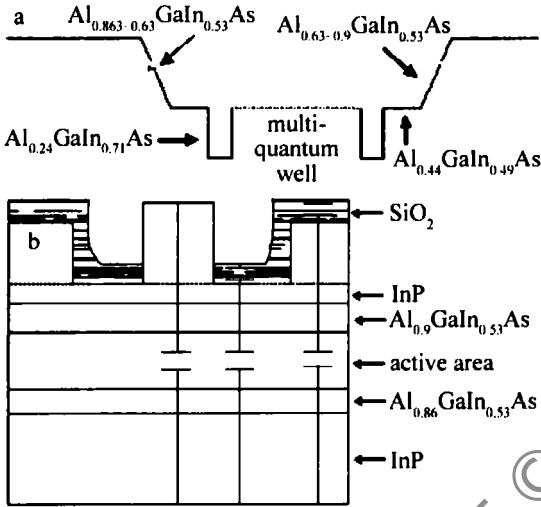


Fig 2 The structure sketch of the ridge waveguide laser a—the structure of material b—the cross section of the chip

芯片大小为 $300\mu\text{m} \times 300\mu\text{m}$, 阱、垒的应变变量分别为 1.2% 和 -0.3%, 阱、垒的宽度分别为 6nm 和 10nm, 量子阱的周期为 6。上、下分别限制层采用非掺杂的 AlGaInAs 体材料, 其厚度分别为 100nm 和 50nm。脊宽取为 $3\mu\text{m}$, 其两侧腐蚀出大约 $30\mu\text{m}$ 宽的隔离槽, 隔离槽腐蚀至 InP 自停止层。一般来说, 脊波导激光器可腐蚀至有源层, 但是因为工艺精确度不易控制, 一旦腐蚀过有源层, 则漏电现象严重, 使有源区的损耗增加, 增益减小。

2.2 寄生电容的理论分析

掩埋异质结激光器的侧向电流限制主要是通过有源区两侧二次外延生长不同折射率的半导体材料来实现, 其寄生电容主要来自电流限制层的 p-n 结串联电容^[5]。而脊波导激光器的侧向电流限制则是通过腐蚀隔离沟、淀积二氧化硅介质层以提供有效折射率差来实现的^[6,7], 其电容的大小与几个因素有关, 下面来分析一下脊波导激光器的电容。

因为材料高掺杂 (大于 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$) 可以视为低

阻区, 即可以看作电极板。图 2b 中脊波导激光器的材料结构中, 自有源区往上各层的掺杂情况如下: 有源区为本征区, $\text{Al}_{0.90} \text{GaIn}_{0.53} \text{As}$ 层的掺杂浓度为 $4 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, InP 层的掺杂浓度为 $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ 。根据脊波导激光器的结构 (见图 2a), 可将脊波导的电容按平板电容来近似分析, 平板电容的公式为:

$$C = \epsilon S / d \tag{1}$$

式中, ϵ 为材料介电常数, S 为上极板面积, d 为上、下极板间的距离。

按电极金属化的面积大小, 可分为点电极 (见图 3a) 和面电极 (见图 3b)。

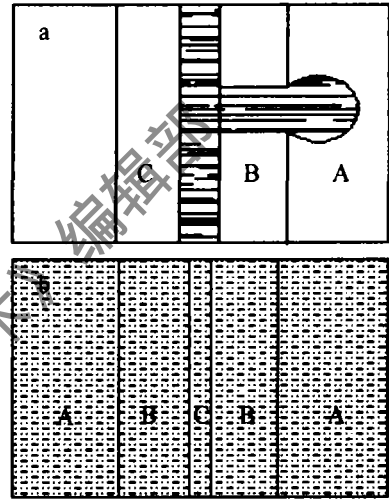


Fig 3 The plan form of the laser chip

另外, 根据其隔离槽腐蚀深度, 脊波导激光器的寄生电容可以分为两种情况。

(1) 若隔离槽腐蚀至 InP 自停止层, 其掺杂浓度为 $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 半导体材料高掺杂区可视为低阻区, 掺杂浓度为 10^{17}cm^{-3} 量级时亦是高掺杂。A, B, C 处的电容关系见图 4 所示。因为 InP 的掺杂高, 可看作是

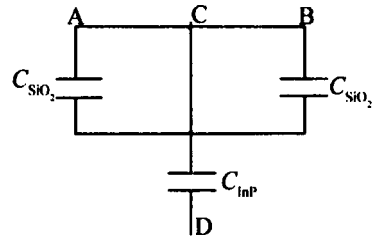


Fig 4 The effective sketch of the capacitance of the chip

电极板, A, B 处电容板被短路, 则芯片电容, 即 C, D 处的电容就是 $C_{\text{tot}} = C_C$ 。将已知数据带入 (1) 式求出各处电容。

点电极情况: A 处电容: $C_{\text{SiO}_2} = (8.85 \times 3.5 \times 100^2 \times 10^{-12}) / (0.43 \times 10^{-6}) = 0.72 \text{pF}$; B 处电容: $C_{\text{SiO}_2} = (8.85 \times 3.5 \times 30 \times 40 \times 10^{-12}) / (0.43 \times 10^{-6}) = 0.864 \text{pF}$; C 处电容: $C_C = (8.85 \times 12.35 \times$

$300^2 \times 10^{-12}) / (0.236 \times 10^{-6}) = 41.68\text{pF}$ 。 $C_{\text{tot}} = C_C = 41.68\text{pF}$ 。

面电极情况: A 处电容: $C_{\text{SiO}_2} = 0.72\text{pF}$; B 处电容: $C_{\text{SiO}_2} = 0.0864\text{pF}$; C 处电容: $C_C = 41.68\text{pF}$ 。 $C_{\text{tot}} = C_C = 41.68\text{pF}$ 。

(2)若隔离槽腐蚀至波导层——非掺杂有源层上端,则 A, B, C 3 处的电容关系见图 5。

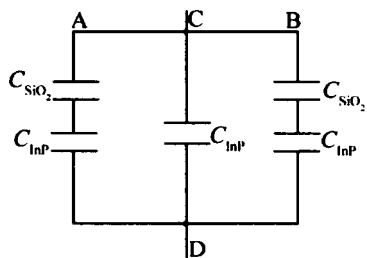


Fig 5 The effective sketch of the capacitance of the chip

点电极情况: A 处电容: $C_{\text{SiO}_2} = (8.85 \times 3.5 \times 100^2 \times 10^{-12}) / (0.43 \times 10^{-6}) = 0.72\text{pF}$, $C_{\text{InP}} = 4.631\text{pF}$ 。由图 5 可知, C_{SiO_2} 与 C_{InP} 为串联关系。根据串联电容的公式可知:

$$1/C_{\text{tot}} = 1/C_{\text{InP}} + 1/C_{\text{SiO}_2} \quad (2)$$

将上述所得结果代入 (2) 式, 可得 $C_A = 0.623\text{pF}$ 。

$$\text{B 处电容: } C_{\text{SiO}_2} = \frac{8.85 \times 3.5 \times 30 \times 40 \times 10^{-12}}{0.43 \times 10^{-6}} =$$

0.0864pF , $C_{\text{InP}} = 0.5558\text{pF}$ 。将上述所得结果代入 (2) 式, 可得 $C_B = 0.0748\text{pF}$ 。

$$\text{C 处电容: } C_C = \frac{8.85 \times 12.35 \times 300 \times 3 \times 10^{-12}}{0.236 \times 10^{-6}} =$$

0.4168pF 。

由图 5 知, 芯片电容为 A, B, C 3 处电容的并联, 根据并联电容的公式得到: $C_{\text{tot}} = C_A + C_B + C_C$ (3) 将上面的计算结果代入 (3) 式, 可得 $C_{\text{tot}} = 1.1146\text{pF}$ 。

面电极情况: 分析过程同上述点电极情况, 将所有数据代入公式, A 处电容: $C_{\text{SiO}_2} = 5.770\text{pF}$, $C_{\text{InP}} = 37.10\text{pF}$ 。将上述所得结果代入 (2) 式, 可得 $C_A = 4.993\text{pF}$ 。同理, B 处电容: $C_B = 1.122\text{pF}$ 。C 处电容: $C_C = 0.4168\text{pF}$ 。所以, $C_{\text{tot}} = C_A + C_B + C_C = 6.5318\text{pF}$ 。

2.3 实验测试结果

使用 LRC 测试仪测芯片的电容, 测试条件为: 零偏压, 交流为 1V, 测试频率为 10MHz。取两种电极

Table 1 The capacitance of chips with different electrode type

type	capacitance/pF					
	surface electrode			point electrode		
	1	2	3	1	2	3
stopping layer	44.75	43.42	44.4	45.7	43.8	43.1
waveguide layer	7.72	8.59	8.09	2.29	2.59	1.19

类型的芯片各 3 个样品, 测试其电容结果如表 1 所示。从表 1 可以看出, 测试结果与理论分析基本相符。

2.4 相应的调制特性曲线

根据 RC 常数决定的 3dB 调制带宽的表达式如下^[8,9]:

$$f_{RC} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4)$$

式中, R 表示电阻, C 表示电容。使用 E8362B 网络分析仪测试由上述芯片制作的器件的调制特性, 隔离槽腐蚀至自停止层时两种芯片的测试曲线见图 6。

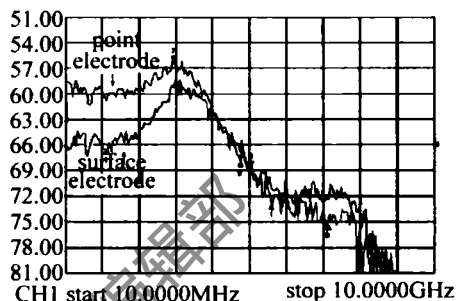


Fig 6 The curve of the modulation character of the laser

将点电极和面电极的调制特性曲线对比, 可以看到, 两者 3dB 工作带宽内的调制特性曲线的形状基本一致, 说明在隔离槽腐蚀至自停止层时, 其寄生电容基本相同, 从而其调制特性也基本一致。

表 1 中芯片 (点电极、隔离槽腐蚀至波导层) 制成器件后, 测得其调制特性曲线见图 7。

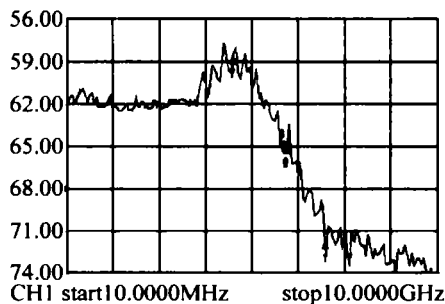


Fig 7 The modulation character of the DFB laser with point electrode

对比图 6 和图 7 可以看到, 当寄生电容较大 (约 40pF) 时, 由 RC 决定得 3dB 带宽大约为 50MHz (其中 $R = 7\Omega$); 当电容较小 (约 1pF), 由其决定的带宽在 20GHz 以上, 不会影响到器件的调制特性。测试结果与图 1 的模拟结果相符。

3 结 论

当腐蚀深度不超过自停止层 (低阻层) 时, 芯片的寄生电容很大, 约 40pF, 且点电极结构不能体现出降低电容的效果, 只有当腐蚀深度超过自停止层时, 点电极才能发挥降低分布电容的作用, 减小至 2pF 左右。这一结论否定了以前认为单纯改面电极的点电极来减小寄生电容的想法和做法。对实现激光器的高速调制

是非常有意义的。

存在的问题是: 如果隔离沟腐蚀过有源层的话, 会引起漏电流的增加, 会降低激光器的有源区的增益^{[10][11]}, 这将成为在减小寄生电容的同时要解决的关键问题。

参 考 文 献

- [1] JIANG J P. Semiconductor laser [M]. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2000. 109~ 124 (in Chinese).
- [2] LIAO X B. Study on the modulation bandwidth of the ultrahigh speed semiconductor lasers [J]. Study on Optical Communications 1990, 2 (1): 36~ 46 (in Chinese).
- [3] ALLOVON M, QUILLLEC M. Interest in AlGaInAs on InP for optoelectronic applications [J]. IEEE Proceedings Optoelectronics 1992, 139 (2): 148~ 152
- [4] TH IJI P J A, THEM IJER L F, BINSMA J J M *et al*. Process on long-wavelength strained-layer InGaAsP quantum-well semiconductor lasers and amplifiers [J]. IEEE J Q E, 1994 30 (3): 477~ 499
- [5] ZHANG B J YIM B, LID H *et al*. High-frequency and high-power InGaAsP/InP SPB-BC lasers [J]. Chinese Journal of Lasers 1998, 25

(上接第 76 页)

难看出, 此新型波导传感器第 $2m-1$ 层薄膜厚度变化范围在 $0.05\mu\text{m} \sim 0.65\mu\text{m}$, 其理论灵敏度都在 0.95 以上, 比均匀传感型波导传感器的灵敏度提高了两个数量级。而且, 与图 7 中的均匀传感型 ARROW 相比, 此新型波导传感器对厚膜技术要求不高, 在一定程度上解决了波导制作技术上的难题。

3 结 论

在传统反谐振反射光波导基础之上, 提出了一种新型结构的光波导。对其反射率和传输损耗进行了模拟, 在理论上获得了性能较好的波导结构, 并对波导的灵敏度进行了估算。与传统的表面均匀传感型波导相比, 此种波导结构是将待测样品直接作为波导层, 并采用周期结构的反谐振层, 灵敏度得到了很大提高, 为波导传感器的制作提供了一定的数值参考。

参 考 文 献

- [1] DUGUAY M A, KOKUBUN Y, KUCH T L. Anti-resonant reflecting optical waveguide in SiO_2 -Si multilayer structures [J]. A P L, 1986,

(5): 385~ 390 (in Chinese).

- [6] POGOSSIAN S P, GALL H E, GERALTOWSKI J *et al*. Determination of the parameters of rectangular dielectric waveguides by new effective methods [J]. Journal of Modern Optics 1995, 42 (2): 403~ 409
- [7] KUMAR A, CLARK D F, CULSHAW B. Explanation of errors inherent in the effective-index method for analyzing rectangular-core waveguides [J]. Opt Lett 1988 13 (12): 1129~ 1131.
- [8] BOWERS J E, KOREN U, MILLER B I *et al*. High speed polyimide-based semi-insulating planar buried heterostructure [J]. Electron Lett 1987, 23 (13): 1263~ 1265
- [9] LIU G L, ZHANG B J, ZHU H L *et al*. High-frequency planar buried-heterostructure DFB lasers fabricated by proton implantation [J]. Semiconductor Optoelectronics 2000, 21 (4): 245~ 248 (in Chinese).
- [10] NAGARAJAN R, FUKUSHIMA T, CORZINE S W *et al*. Effects of carrier transport on high-speed quantum well lasers [J]. A P L, 1991, 59 (19): 1835~ 1837
- [11] GRABMAIER A, HANGLEITER A, FUCHS G *et al*. Low nonlinear gain in InGaAs/InGaAs separate confinement multiquantum well lasers [J]. A P L, 1991, 59 (24): 3024~ 3026

49 (1): 13~ 15.

- [2] BERNINI R, CAMPOPIANO S, ZENI L *et al*. ARROW optical waveguides based sensors [J]. Sensors and Actuators 2004, B100 (2): 143~ 146
- [3] BABA T, KOKUBUN Y. Dispersion and radiation loss characteristics of anti-resonant reflecting optical waveguides—numerical results and analytical expressions [J]. IEEE J Q E, 1992, 28 (7): 1689~ 1700.
- [4] YIN D, BARBER J P, HAWKINS A R *et al*. Integrated optical waveguides with liquid cores [J]. A P L, 2004, 85 (16): 3477~ 3479
- [5] PRIETO F, SEPULVEDA B, CALLE A *et al*. Integrated Mach-Zehnder interferometer based on ARROW structures for biosensor applications [J]. Sensors and Actuators 2003, B92 (2): 151~ 158.
- [6] KUBIA J M. A rigorous design method for anti-resonant reflecting optical waveguides [J]. IEEE Photonics Technology Letters 1994, 6 (12): 1460~ 1462.
- [7] BABA T, KOKUBUN Y, SAKAKI T *et al*. Loss reduction of an arrow waveguide in shorter wavelength and its stack configuration [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1988, 6 (9): 1440~ 1445
- [8] HAN X X, ZHU D Q, NING N *et al*. Investigation on the preparation of advanced polymer thin film for waveguides [J]. Laser Technology 2004, 28 (3): 315~ 318 (in Chinese).
- [9] PRIETO F, LIQBERA A, JMENEZ D *et al*. Design and analysis of silicon anti-resonant reflecting optical waveguides for evanescent field sensor [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 2000, 18 (7): 966~ 972