

多量子阱非对称法布里珀罗 光调制器的模式波长调整

吴荣汉 陈志标 陈弘达 高文智 赵 军

(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 本文计算了不同折射率膜层下,非对称法布里珀罗腔模式波长随膜层厚度的变化,分析了在膜层折射率较低时,模式波长随层厚的增加反而减小的机理,并在实验中研究这种现象,利用湿法腐蚀的方法移动模式波长,补偿由生长误差引入的模式波长偏差,从而做到模式波长可控,获得高消光比的器件,同时利用湿法腐蚀方法将模式波长调整到不同位置,测量了不同模式波长位置时器件的调制特性

PACC: 4265P, 4280K

1 引言

近十几年来,人们对多量子阱在外加电压下的量子限制 Stark 效应进行了很多的研究,由此而发展起来的多量子阱非对称法布里珀罗 (ASFP, Asymmetric Fabry-Perot) 光调制器、自电光效应器件 (SEED) 以及灵巧像素元 (Smart Pixels) 得到很快的发展^[1~5,11,12],这些器件将在光互连和光交换中发挥重要的作用。这类器件底部一般都有一个反射率高达 90% 以上的 DBR (Distributed-Bragg-Reflector) 膜堆,中间为多量子阱吸收层,顶部的反射率一般在 30% 左右 (GaAs/空气界面),因为顶部和底部的反射率不同,因而构成一个非对称 F-P 腔。ASFP 腔的谐振作用可使吸收效应增强。要获得好的调制特性,模式波长必需位于重空穴激子峰 (e-hh) 的适当位置^[5]。由于生长厚度的偏差,不可避免地使模式波长的位置与设计值发生偏离。虽然高消光比调制器的消光比已达 30dB^[4],但对生长控制十分苛刻,或者只能选择生长片上模式波长合适的一小部分制作器件才能达到高的消光比,而其他部分由于模式波长偏离,只能采用后工艺的处理办法。在一般的文献资料中,往往在器件的顶部镀减反膜以减小或消除 F-P 腔的谐振作用,此时器件消光比将下降。事实上由于减反膜很难真正使顶部的反射率降到零,因此 F-P 腔的谐振作用依然存在,只是较弱而已,因此,分析镀膜时模式波长的移动仍然十分重要。另外也可以采用湿法腐蚀的方法调整模式波长,镀膜实际上是增加了 F-P 腔的腔长,因而可以改变 F-P 腔的模式波长位置,相反,湿法腐蚀

吴荣汉 男,1936 年出生,研究员,国家光电子工艺中心主任,主要从事半导体光电子器件的研究
陈志标 男,1970 年出生,博士生,主要从事半导体光电子器件的研究
1997-03-14 收到,1997-06-02 定稿

减小了 F-P 腔的腔长, 同样可改变模式波长的位置. 采用湿法腐蚀调整 A SFP 腔的模式波长, 目前发表的文献中还未见有这方面的报道. 湿法腐蚀可以补偿生长厚度偏差引起的模式波长偏离, 同时保留 A SFP 腔的谐振吸收作用, 从而制作出高消光比的器件. 高消光比器件用于光互连时, 由于高的信噪比, 只需一个光调制器和光探测器就可传输一路光信号; 而对于消光比低的器件, 必须使之工作在差分方式, 需要两对光调制器和光探测器即共需要四个器件才能完成一路信号的传输, 差分方式工作的 Smart Pixels 电路和光路安排都比较复杂^[3,5].

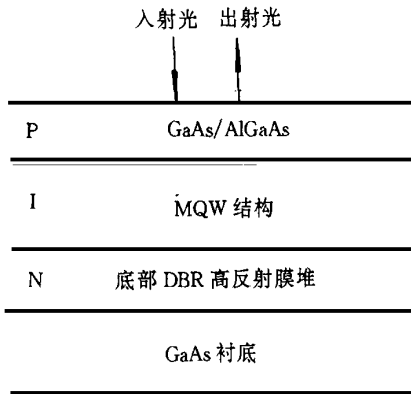
本文计算了湿法腐蚀和镀膜两种方法对移动模式波长的作用, 解释了在镀膜层的折射率较低时模式波长随膜层厚度的增加反而减小的机理, 并在实验中研究这种现象. 利用湿法腐蚀的方法将 2 × 8 列阵型调制器模式波长调整到合适的位置, 从而获得高的消光比. 同时, 利用湿法腐蚀的方法将模式波长调整到不同的位置, 研究了不同模式波长位置时器件的调制特性.

2 镀膜对模式波长的作用

2.1 理论分析

如图 1(a) 所示为多量子阱 A SFP 光调制器的工作原理示意图, 图 1(b) 为器件的结构图 (在图中还给出了按文献[6]所取的折射率值). 对于常关型调制器量子阱的个数一般为 50, 工作波长在 e-hh 峰附近. 器件顶部可以镀 λ/4 减反膜以降低 A SFP 腔的谐振吸收作用. 量子阱反射式电场光调制器等效为一个三层膜, 器件底部的 DBR 高反射膜堆被等效为底部高反射率层, 器件的多量子阱区和 P 型层被等效为具有平均折射率的中间层, 器件顶部膜层和空气层被等效为顶部层, 设从器件中间层向器件底层看的反射相移为 α, 向顶部层看的反射相移为 β, 中间层本身的相移为 γ, 则在模式波长处应有:

$$\alpha + \beta + \gamma = 2k\pi$$



(a) 器件工作原理示意图

	P ⁺ -GaAs	10 nm	<i>n</i> = 3.62	
	P-Ga _{0.7} Al _{0.3} As	240 nm	<i>n</i> = 3.41	
	i-Ga _{0.7} Al _{0.3} As	60 nm		} MQW
	i-Ga _{0.7} Al _{0.3} As	8 nm		
50 ×	i-GaAs	10 nm		} MQW
	i-Ga _{0.7} Al _{0.3} As	8 nm		
	i-Ga _{0.7} Al _{0.3} As	50 nm		
	N-Ga _{0.7} Al _{0.3} As	50 nm		} DBR
	N-AlAs	72.5 nm	<i>n</i> = 2.97	
20 ×	N-Ga _{0.9} Al _{0.1} As	61 nm	<i>n</i> = 3.56	} DBR
	N-AlAs	72.5 nm		
	N-GaAs	1.8 μm		
SI-GaAs 衬底				

(b) 器件结构

图 1 量子阱 A SFP 光调制器示意图

图 2 为膜层折射率分别为 1.5, 1.65, 1.8, 1.9, 2.1, 3.5 时模式波长移动与膜层厚度的关系 (其中 *n* 为 3.5 的那条直线也可以看成是湿法腐蚀时模式波长随腐蚀厚度的变化曲

线, 只是湿法腐蚀时模式波长随腐蚀厚度的增加而减小). 从图中可以看出, 当折射率较大时, 模式波长随膜厚的增加而增加, 当折射率较小, 开始时模式波长随膜厚的增加而增加, 但增大到一定值时, 反而随膜厚的增加而减小. 折射率值的分界线基本上为

$$\sqrt{n_{GaAs}} = \sqrt{3.5} = 1.87$$

其中 n_{GaAs} 取量子阱区和 P 区的平均折射率值

上面的结论也可以从下面的定性分析中得出: 按多层膜反射率的矢量分析法^[7], 从 GaAs 层往顶层看的反射率应为:

$$r = \frac{r_1 + r_2 e^{-i\theta}}{r_1 + r_1 r_2 e^{-i\theta}}$$

此处

$$r_1 = \frac{n_{GaAs} - n_{coating}}{n_{GaAs} + n_{coating}}; r_2 = \frac{n_{coating} - 1}{n_{coating} + 1}; \theta = 4\pi n_{coating} d_{coating} / \lambda$$

式中 n_{GaAs} 为中间层平均折射率; $n_{coating}$ 为膜层的折射率. 当 $\theta = \pi, n_{coating} = \sqrt{n_{GaAs}} = 1.87$ 时, $r = 0$, 当 $n_{coating} > 1.87$, r 的相位随 θ 的增大而增大, 表现为模式波长随镀膜层厚度的增加而增加; 但当 $n_{coating} < 1.87$, r 的相位随 θ 的增加增大到一最大值后下降, 因而模式波长在升到一最大值后反而随膜厚的增加而下降

2.2 镀膜控制模式波长实验

我们所用的膜层材料为 SiN 系材料, 图 3 为镀 SiN 膜所得的实验结果. 曲线 1 为镀膜前外延片的反射谱, 曲线 2 和 3 分别对应膜厚为 95nm 和 135nm 的情形, 膜厚度用椭圆仪测出.

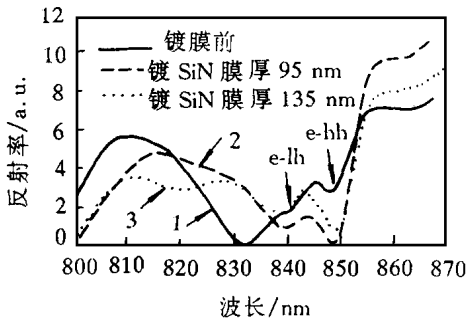


图 3 镀 SiN 膜前后片子的反射谱

从曲线 1 可知, 片子的 e-ll 峰在 840nm, e-hh 峰在 848nm, 模式波长的位置在 832nm. 对于常通型调制器, 模式波长的位置应在 e-hh 峰的长波长方向; 而常关型器件, 模式波长的位置应在 e-hh 峰附近, 而且顶部必须镀减反膜, 否则器件会处于过饱和状态, 降低器件的调制特性^[8]. 由于模式波长位置不合适, 先采用镀 SiN 减反膜的方法来移动模式波长

由曲线 2 膜厚 95nm 的反射谱可知, 模式波长发生了移动, 但由于表面反射率降低, A SFP 腔

的谐振吸收作用和激子吸收相比, 作用比较弱, 因而在曲线上看不到明显的模式波长位置. 用椭圆仪测量可知, 膜层折射率为 1.8 左右, 由上面的理论计算可知模式波长大约移动 10nm, 在 842 nm 左右. 镀膜后, e-hh 峰处的反射率明显降低, 此时虽然模式波长没有在 e-

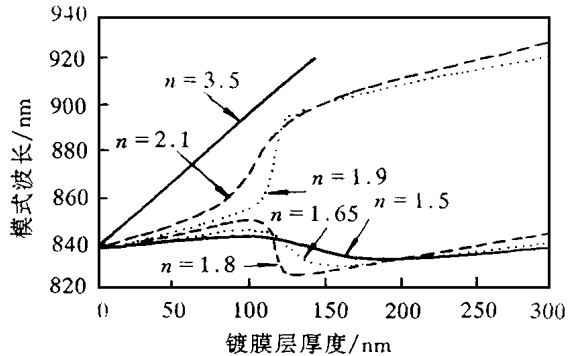


图 2 膜层折射率分别为 1.5, 1.65, 1.8, 1.9, 2.1, 3.5 时模式波长移动与膜层厚度的关系

hh 峰位置,但由于模式波长距激子峰比较近使得 e-hh 峰附近的反射率降低很多.

由曲线 3 膜厚为 135nm 的反射谱可知,与镀膜前的模式波长相比,镀膜后模式波长反而减小了,从原来的 832 nm 变到 820 nm. 膜层折射率为 1.8,从上面的理论分析可知,当折射率为 1.8,膜厚增加到 135nm 时,模式波长会下降约 10nm,曲线 3 应属于这种情况

由于镀膜器件的消光比不可能很高,因此器件一般工作在差分方式,此时调制特性最好的器件应是在同一外加电压下,高低态反射率差最大的器件,而不是消光比最高的器件.为

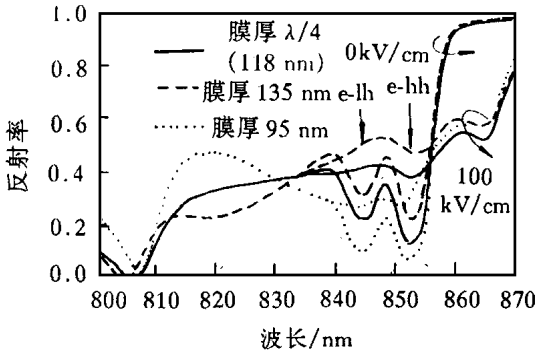


图 4 传输矩阵法计算的不同膜层厚度下器件的调制特性 0 和 100kV/cm 电场

此我们采用传输矩阵法从理论上分析了镀 λ/4 减反膜,镀膜层厚为 95nm 模式波长移到 842nm 和镀膜层厚为 135nm 模式波长变到 820nm 三种情况下的调制特性,如图 4 所示.从 e-hh 峰附近的高低态反射率差来看,三种情况下的值差不多,这表明在差分工作方式下,器件的性能应该是差不多的.从图中也可以看出,镀膜层厚为 95nm 的消光比最高,插入损耗最大;镀 λ/4 减反膜的消光比居中,插入损耗也界于二者之间;而镀膜层厚为 135nm 的消光比最低,插入损耗最小.我们可以根据不同的实际需求来控制镀膜层的厚

度,以便获得所需的器件性能.应该注意的是理论计算是 e-hh 峰的位置在 852nm 左右的情况,与实际器件有差距,但由于我们分析的是 A SFP 模式波长距激子峰相对不同位置时的调制特性,上面的分析还是有实际意义的.

3 湿法腐蚀控制模式波长

镀膜的方法虽然也可以移动模式波长,但由于顶部反射率的降低,A SFP 腔的谐振吸收作用作用减弱了,难于制作高消光比的器件.高消光比的器件一般都是常通型的^[4,9],这是因为常通型器件可以同时做到高的消光比和低的插入损耗.常通型器件要求模式波长在 e-hh 峰的长波方向,如果由于生长厚度的偏差引起模式波长的偏离,必须采用后工艺的方法将模式波长移到合适的位置.

湿法腐蚀既可以使模式波长移动(其移动值从图 2 中 $n = 3.5$ 的那条曲线可知大约为 0.5nm),又使顶部的反射率保持约 30% 不变,因而 A SFP 腔的谐振吸收作用不会因腐蚀而减弱.

采用的腐蚀液为 50 : 1 : 1 的 CH₃OH : H₃PO₄ : H₂O₂,腐蚀的器件为 2 × 8 的列阵,之所以采用列阵,是为了同时察看不同器件的模式波长移动值是否一致.图 5 所示为 2 × 8 列阵器件的湿法腐蚀实验结果,曲线 1 为器件 1,2 腐蚀前的反射谱(器件 1,2 为 2 × 8 的列阵在空间位置上相隔最远的两个器件,相邻器件间距为 400μm).由图 5 可知,腐蚀前器件 1 和 2 的 e-lh 激子峰都在约 840nm 处,e-hh 激子峰都在约 848nm 处,两个器件的模式波长均在约 880nm 处,从曲线 2 和 3 可知两个器件的模式波长移动值基本相同,说明模式波长移动对不同的器件来说是比较均匀的.腐蚀 20s 后,激子峰的位置不动,但是模式波长的位置移

到了约 874nm, 共移动 6nm (0.3nm/s); 再腐蚀 15s 后, 模式波长移动了约 3nm, 到了 870nm (0.26nm/s). 要使常通型器件获得较好的调制特性, 应使模式波长移到距激子峰 10nm 左右的位置, 继续使用 50 : 1 的 CH₃OH : H₃PO₄ : H₂O₂ 腐蚀液腐蚀, 直到模式波长距激子峰约 10nm. 图 6 为腐蚀到模式波长距激子峰约 10nm 时器件的调制特性, 图 6(a) 为器件 1 的电调制反射谱, 图 6(b) 为器件 2 的电调制反射谱. 在外加电压为 15V 时获得大约 5 的消光比, 器件的高态反射率大约为 50%, 器件的插入损耗大约为 3dB, 消光比不是很高, 主要是因为量子阱的数目较少(50 个), 按我们的分析, 量子阱数目应在 70~ 100 左右, 模式波长与激子峰的间距在 10nm 以上, 才可以获得高的消光比和低的插入损耗^[8]. 当然, 如果我们继续腐蚀使模式波长更加靠近 e-hh 峰, 消光比将升高, 但同时插入损耗也将增大(在下面可以看到).

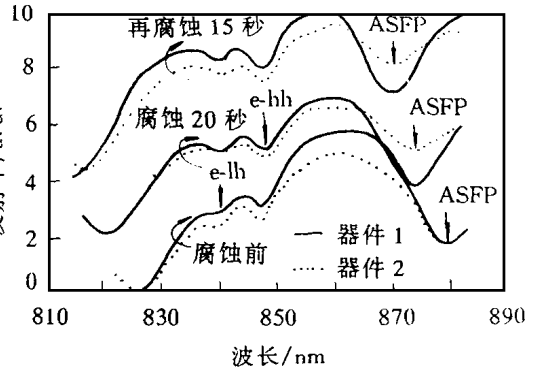


图 5 器件 1, 2 在 50 : 1 的 CH₃OH : H₃PO₄ : H₂O₂ 腐蚀下模式波长的移动. 为了便于观察, 曲线的 0 线位置错开了.

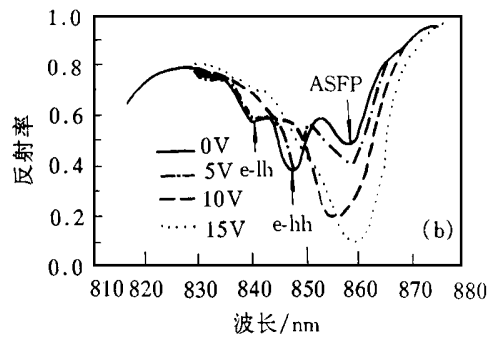
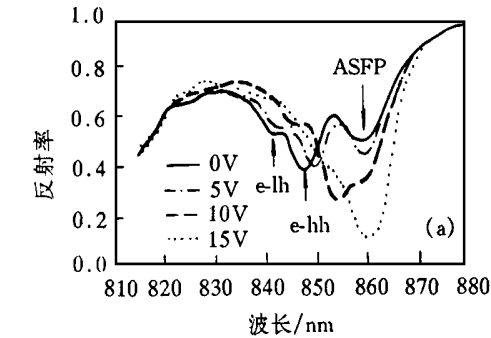


图 6 湿法腐蚀到模式距激子峰约 10nm 时 2 × 8 列阵器件的调制特性
(a) 2 × 8 列阵器件之一; (b) 2 × 8 列阵器件之二

由于我们可以用湿法腐蚀的方法将模式波长调整到任意位置, 因此使得我们可以得知模式波长与激子峰在不同间距时器件的调制特性. 此次我们用的腐蚀液为 30 : 1 的 CH₃OH : H₃PO₄ : H₂O₂, 其腐蚀速率如表 1 所示:

由表 1 可知, 腐蚀时间短时, 模式波长移动小, 但相对来说平均腐蚀速率快; 时间长时, 模式波长移动大, 但平均腐蚀速率慢. 最小的模式波长移动值可达 2nm, 因此可将模式波长控制在 2nm 的范围, 基本满足器件对模式波长控制的需求.

图 7(a)、(b)、(c) 和 (d) 为模式波长距激子峰分别为 8nm, 6nm, 4nm, 以及模式波长在 e-hh 峰短波方向时器件的调制特性. 图 7(a) 中, 器件的消光比在外加电压为 10V 时为 8 左右, 低态反

表 1 30 : 1 的 CH₃OH : H₃PO₄ : H₂O₂ 腐蚀速率 (20 °C)

腐蚀时间/s	模式波长移动/nm	模式波长平均移动速率/(nm · s ⁻¹)
5	2	0.4
10	3.5	0.35
25	6	0.24
35	7	0.2

射率为 5%；图 7(b) 中消光比在 3 左右，低态反射率约为 5%，此位置不适合制作调制器；图 7(c) 中模式波长隔 e-hh 峰仅 4nm，此时由于电致折射率的减小，导致器件的模式波长发生蓝移^[10]，模式波长原来在 844nm，外加电压为 5V 时有一定的蓝移，外加电压为 10V 时，模式波长蓝移十分明显，此时在 ASFP 峰附近消光比大约为 3，低态反射率为 10%；图 7(d) 中模式波长已偏到 e-hh 峰的短波方向，由于模式波长与 e-hh 峰的重叠，模式波长具体位置难以确定，此时消光比大约为 2，低态反射率约为 15%。从上面的分析可以看出，模式波长在 e-hh 峰偏长波方向 8nm 左右时，调制特性比较好，但相隔 8nm 时，插入损耗还是比较大的，为 4dB。要获得更好的调制特性，应象前面分析的那样，增加量子阱的数目到 70~100 个，同时增大模式波长和激子峰的距离到 10nm 以上。

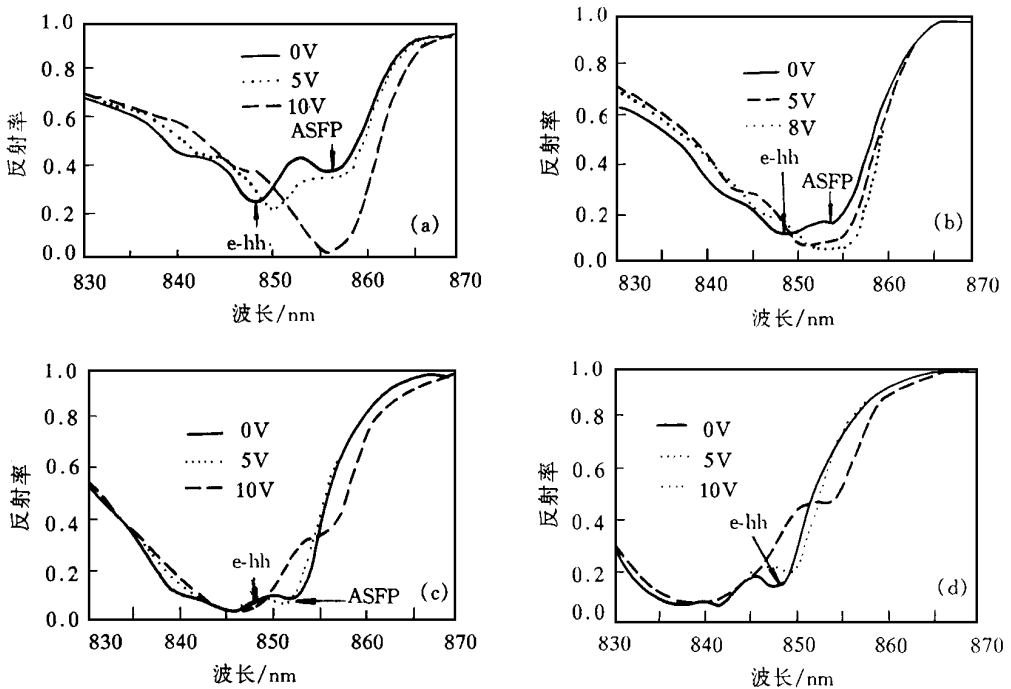


图 7 模式波长在 e-hh 峰不同位置时器件的调制特性

- (a) 模式波长距 e-hh 峰 8nm；(b) 模式波长距 e-hh 峰 6nm；
(c) 模式波长距 e-hh 峰 4nm；(d) 模式波长在 e-hh 峰短波侧

4 结论

本文从理论和实验上研究了采用镀膜和湿法腐蚀两种方法控制模式波长的方法，对于镀膜来说，寻求合适的折射率高的材料比较困难（例如 $n > 2.5$ ），低折射率材料对模式波长的移动量有限。具体对于 SN 来说，其模式波长的移动值在正负 10nm 之间。由于镀膜后器件不可能达到很高的消光比，因而器件只能串起来以差分方式工作，此时对器件性能的评价将是反射率变化的大小。只要膜层的厚度在 $\lambda/4$ 左右，其高低态反射率差是差不多的。不同的在于消光比和插入损耗不一样，我们可以根据不同的实际需求来控制镀膜层的厚度，以便获得所需的器件性能。

如果要获得高消光比的器件则只有采用湿法腐蚀的方法来控制模式波长。利用 CH_3OH 、 H_3PO_4 、 H_2O_2 作腐蚀液, 我们基本上可将模式波长控制在 2nm 的精度, 做到模式波长基本人工可控, 满足器件的需求。不同器件的模式波长移动值基本一致, 2×8 列阵器件在模式波长与激子峰间距为 10nm 时消光比为 5, 进一步将模式波长腐蚀到距激子峰 8nm 处消光比大约为 8。如果要获得更好的器件调制特性, 需要增加量子阱的数目。

参 考 文 献

- [1] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen *et al* , IEEE J. Quantum Electron , 1985, **QE-21**(9): 1462
- [2] A. L. Lentine, D. A. B. Miller, IEEE J. Quantum Electron , 1993, **29**(2): 655
- [3] F. B. McComick, T. J. Cloonan, F. A. P. Tooley *et al* , Appl Opt , 1993, **32**(6): 5153
- [4] S. Gerber, R. Droopad and G. N. Maracas, IEEE Photon Technol Lett , 1993, **5**(1): 55
- [5] F. B. McComick, T. J. Cloonan *et al* , Appl Opt , 1994, **33**(8): 1601
- [6] H. C. Casey, Jr , D. D. Sell and M. B. Panish, Appl Phys Lett , 1974, **24**(2): 63
- [7] 林永昌, 卢维强, 光学薄膜原理, 北京: 国防工业出版社, 1990, 51.
- [8] 陈志标, 高文智, 陈弘达, 吴荣汉, 半导体学报, 1996, **17**(12): 891.
- [9] P. Zouganeci, P. J. Stevens, D. Atkinson *et al* , IEEE J. Quantum Electron , 1995, **31**(5): 927.
- [10] 陈志标, 陈弘达, 吴荣汉, 光子学报, 已接收
- [11] K. W. Goosen, J. A. Walker, L. A. D'Asaro *et al* , IEEE Photon Technol Lett , 1995, **7**(4): 360
- [12] A. V. Krishnamoorthy, A. L. Lentine, K. W. Goosen *et al* , IEEE Photon Technol Lett , 1995, **7**(11): 1288

Mode Position Control of A symmetric Fabry-Perot Optical Modulator With Multiple Quantum Wells

Wu Ronghan, Chen Zhibiao, Chen Hongda, Gao Wenzhi, Zhao Jun

*National Optoelectronic Technology Center, Institute of Semiconductors,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083*

Received 14 March 1997, revised manuscript received 2 June 1997

Abstract The control of A SFP mode position with the thickness of different index coating layers is calculated. The mechanism for blue shift of A SFP mode with the increasing of thickness of low-index coating layer is analyzed and the phenomenon is observed in experiment. With wet-etching method, A SFP model can be tuned and thus the deviation of growth can be compensated. This method is used to improve the contrast ratio of modulator. With A SFP model located at different position relative to the e-hh peak, different modulation characteristics are demonstrated.

PACC: 4265P, 4280K