

文章编号: 0258-7025(2001)01-0025-04

光子吸收诱导无序技术的光荧光光谱研究*

黄晓东 黄德修 刘雪峰

(华中理工大学光电子工程系 武汉 430074)

摘要 运用 1.064 μm 连续输出的 Nd:YAG 激光器,对与 InP 晶格匹配的 InGaAsP 四元系量子阱材料进行了光子吸收诱导无序(PAID)技术的研究。通过光荧光光谱(PL)的测量,证明有量子阱混合现象产生。衬底预加热和聚焦激光束结果表明,PAID 中辐照时间与衬底温度、辐照的平均功率密度密切相关。聚焦激光照射后的荧光双峰表明 PAID 有一定的定域处理能力。

关键词 光子吸收诱导无序, Nd:YAG 激光器, 光荧光光谱, 量子阱混合

中图分类号: TN 248.1+3; O 433.5+9; O 438 文献标识码: A

Photoluminescence Study of Photoabsorption Induced Disordering

HUANG Xiao-dong HUANG De-xiu LIU Xue-feng

(Department of Optoelectronics Engineering, Huazhong University of
Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract The photoabsorption induced disordering (PAID) on lattice matched InGaAsP quaternary quantum wells is investigated using cw 1064 nm Nd:YAG laser. Quantum wells intermixing (QWI) is demonstrated by photoluminescent (PL) spectrum. The process time could be reduced by heating the sample in advance or focusing the laser beam. Two peaks of PL show that PAID technique could be used for processing the quantum wells locally on the wafer.

Key words photoabsorption induced disordering, photoluminescence, Nd:YAG laser, quantum well intermixing

1 引言

通信系统高速、大容量的要求使光子集成(PIC)与光电子集成(OEIC)成为光通信技术发展的必然趋势。近年来,量子阱混合(QWI)作为一种后工艺手段以其能简单有效地改变量子阱结构的禁带宽度而成为 PIC 和 OEIC 中的热门研究领域。

自 W. D. Ladig 等^[1]于 1981 年提出量子混合方法以后,对 QWI 的研究在材料方面主要集中于 AlGaAs/GaAs 的以 GaAs 为衬底的三元系量子阱结构,运用的方法主要有杂质诱导无序(IID)^[1]和无杂质空位扩散(IFVD)^[2],其原理为在有源区或其周围引入杂质或空位,降低组份原子互扩散的激活能 E_0 ,达到增进扩散的目的。J. H. Marsh 等^[3]发现,基于 InP 衬底的 InGaAsP 四元系材料热稳定性较差,由此, C. J. McLean 等^[4]遂于 1991 年提出了

以 InP 为衬底的 InGaAsP 四元系量子阱材料的光子吸收诱导无序(Photoabsorption Induced Disordering, PAID)技术。其思路的新颖之处在于,它是通过激光照射产生量子阱区的高温来增进量子阱结构中阱、垒间组份原子的扩散。由于处理过程中没有缺陷的引入,这种方法对材料的电学性能影响较小,在 PIC 和 OEIC 将有很大应用前途。

PAID 技术利用了 Nd:YAG 激光器连续输出波长为 1.064 μm 的激光对 InGaAsP 量子阱外延片进行辐照。由于 InGaAsP 量子阱片的缓冲层、上下覆盖层一般来说都是由禁带宽度较大的材料(如 InP)构成,相对来说是透明的,可以认为激光束的能量在其中基本上不被吸收;而有源区半导体 InGaAsP 的带隙一般在 1.3 ~ 1.5 μm 附近,当受到 1.064 μm 激光束照射时,将产生强烈的光吸收导致温度升高。经实验测量^[4],在 1 ~ 5 W/mm² 的辐照功率密度下,有源区温度相当于 800°C 左右。由于 InGaAsP 量子阱材料在 550°C 以上就会出现较为明显的 QWI 现象^[3],所以当 InGaAsP 四元系的量子阱

* 国家自然科学基金(编号 69586002)资助项目。

收稿日期:1999-07-19;收到修改稿日期:1999-09-27

材料经 1.064 μm 激光辐照后,从理论上来说是会产生 QWI 的,实验结果也证实了这一点。

PAID 技术的优越性在于,由于是通过连续输出激光的辐照,没有杂质和缺陷的引入,可以预计其电学性能不会有太大的退化。另外,由于激光的特性,使 PAID 技术有直接写入的潜在可能性,有很大的应用前途。

本文给出了运用波长为 1.064 μm 以连续方式输出的 Nd:YAG 激光器对与 InP 晶格匹配的 InGaAs/InGaAsP 超晶格结构材料进行了 PAID 的一些实验,得到了量子阱混合的结果。运用衬底加热和聚焦激光束的方法,成功地减少了激光辐照的时间。而采用聚焦光束照射外延片所得到的结果,表明 PAID 能定域性地改变量子阱的带隙。

2 实验及测试

实验采用的样品是晶格与 InP 匹配的 InGaAs/InGaAsP 超晶格结构外延片,采用 AIXTRON 公司的金属有机化合物气相外延(MOCVD)系统在(001)取向的 InP 衬底上生长,依生长次序各层的组份及厚度分别为:约 0.1 μm 激射波长 λ_g = 1.15 μm 的 In_{0.82}Ga_{0.18}As_{0.38}P_{0.62} 的下波导层;20 周期无应变超晶格结构,由 5 nm 的 In_{0.53}Ga_{0.47}As 势阱和 10 nm 的 In_{0.82}Ga_{0.18}As_{0.38}P_{0.62} 势垒组成;约 0.1 μm 的 In_{0.82}Ga_{0.18}As_{0.38}P_{0.62} 上波导层。为消除杂质引起的 QWI,各层均未作掺杂。外延片结构及导带底形状如图 1 所示。实验中,采用 1.064 μm 的 Nd:YAG 激光器对样品进行光子吸收诱导无序研究。为减小激光辐照功率,对外延片进行预加热,使其恒温于 300℃ 附近。

实验首先采用连续输出,功率为 6.8 W,直径 2 mm 的激光束对编号为 SL700 的超晶格外延片进行辐照,平均辐照功率密度约 2 W/mm²,分别对样品辐照 10 min 和 12 min。其后对超晶格片 SL708 进行聚焦辐照,为避免光束过于集中而损伤有源区,

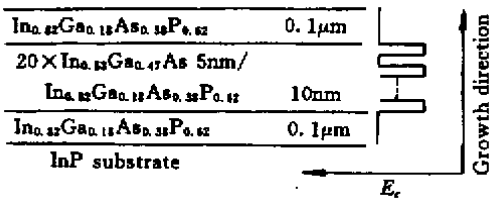


图 1 超晶格片的结构

Fig. 1 Structure of superlattice wafer

使样片有一定的负离焦。光斑直径约为 1 mm,辐照功率仍选用 6.8 W,平均功率密度约 9 W/mm²,辐照时间设为 5 min。

为得到激光辐照前后超晶格结构带隙的变化,分别对照射前后的样片进行了光荧光谱(PL)的测量,测量是在 BIORAD 公司的 PL6120 光荧光谱仪上进行的,激发光源为氩离子激光器,作为探测器的锗探头浸于液氮中以降低信号噪声。

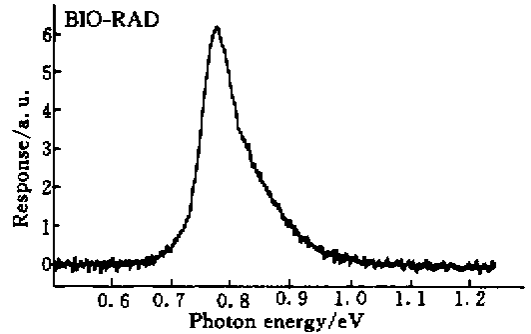


图 2 超晶格外延片 SL700 室温光荧光谱

峰值位置 0.771 eV,FWHM 32 meV

Fig.2 Photoluminescence spectra of SL700

peak energy : 0.771 eV , FWHM : 32 meV

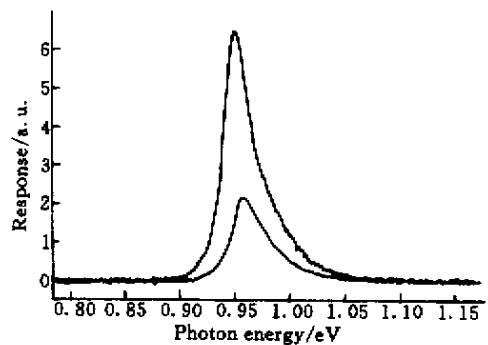


图 3 激光辐照后 SL700 室温光荧光谱

峰值位置 0.948 eV 和 0.957 eV,FWHM 33 meV 和 37 meV

Fig.3 Photoluminescence spectra of SL700 after

laser process

peak energy : 0.948 eV and 0.957 eV ,

FWHM : 33 meV and 37 meV

非聚焦激光束辐照的样片 SL700 在处理前后的 PL 谱分别如图 2 和图 3 所示。激光处理前,PL 的峰值位置为 0.771 eV,对应于激射波长为 λ_g = 1.608 μm,谱线的半高全宽(FWHM)为 32 meV。辐照后 PL 峰位移至 0.948 eV 和 0.957 eV,即有 177 meV 和 186 meV 的蓝移,而 FWHM 由 32 meV 展宽为 33 meV 和 37 meV。

聚焦的 Nd:YAG 激光辐照前后 SL708 超晶格外延片的 PL 谱见于图 4 和图 5。辐照前, PL 峰值位于 0.7609 eV ($\lambda_g = 1.630\mu\text{m}$), FWHM 为 82 meV, 辐照后峰值位置出现了 0.769 eV 和 0.945 eV 一大一小两个峰值位置。其中, 大峰与原始峰位置相差无几, 而小峰相对于图 4 的原始峰有约 184 meV 的蓝移。

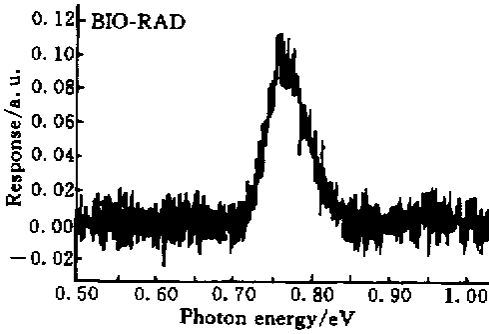


图 4 超晶格外延片 SL708 室温光荧光谱
峰值位置 0.7609 eV, FWHM 82 meV

Fig.4 Photoluminescence spectra of SL708
peak energy : 0.7609 eV, FWHM : 82 meV

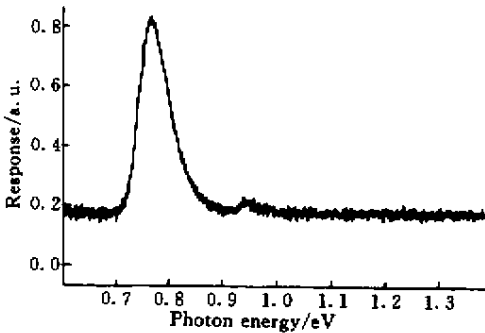


图 5 聚焦激光辐照后 SL708 室温光荧光谱
峰值位置 0.769 eV 和 0.945 eV

Fig.5 PL spectra of SL708 after focused laser process
peak energy : 0.769 eV and 0.945 eV

3 结果与讨论

由于量子限制效应和 MOCVD 生长时换气过程中有 PH_3 残存于生长室内导致阱组份含有少量 P。图 2 和图 4 中超晶格外延片 SL700 和 SL708 峰值位置偏离标准 $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ 体材料峰位 ($\lambda_g = 1.653\mu\text{m}$) 是可以理解的。对于 SL700 样片来说, 激光辐照后峰值位置的蓝移说明量子阱的禁带宽度有所增大, 而 FWHM 的展宽进一步表明量子阱结构有所改变, 即可认为量子阱异质结已由刚生长

时的突变形式演化为渐变形式。从以上两点可以看出经过激光辐照后样品 SL700 有 QWI 产生。因为扩散的程度取决于有源区吸收的热量, 所以给衬底以一定的预加热, 可以减少激光辐照的能量。在混合效果相同情况下, 这意味着辐照时间的减少和功率密度的降低。我们的辐照时间只要 10 min 左右, 远远少于文献 [4] 所报道的 30 min, 平均功率密度也仅 2 W/mm^2 , 而得到的荧光峰的蓝移并不小于其结果, 表明适当的衬底温度对于减少辐照激光的光强和时间是有利的。

由于激光辐照的时间较长, 可以预料, 在辐照区域产生的热量必然会与周围的介质形成一个较为稳定的温度梯度场。鉴于 InP 的热导远大于晶格与之匹配的合金相四元系 $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ 的热导 (表 1), 可以预计热流主要将沿 InP 方向流动, 也即温度梯度主要分布在外延片的生长方向上。另外, 激光束的光强并不是简单的均匀分布, 以最简单的 TEM_{00} 模的高斯分布来说, 近 80% 的能量集中在光斑中心的 60% 区域, 所以就辐照效果而言, 只有光斑中心区域才会产生 QWI。SL708 的片子是运用聚集光束照射的, 所以预计 SL708 外延片上将有一部分被 Nd:YAG 激光辐照的地方不会产生 QWI。

从 PL 谱上来看, 图 5 的两个峰值正好印证了以上分析。在 PL 测量中, Ar^+ 光源的光斑直径约大于 1 mm, 是大于进行 PAID 处理的聚焦 Nd:YAG 光束有效光斑的, 因此可以认为 Ar^+ 光源激发了产生和未产生 QWI 的两部分材料的价带电子, 从而产生了两个荧光峰。其中未产生 QWI 的 $\text{In}_{0.57}\text{Ga}_{0.43}\text{As}$ 量子阱在 Ar^+ 光源的激发下所产生的荧光对应于图 5 中的低能峰 0.769 eV, 与 Nd:YAG 激光辐照前的峰值位置较为接近。其少许位移有可能归因于处理过程中热流的侧向扩散, 也可能是光荧光谱的测量误差。而因被 Nd:YAG 聚焦光束照射而产生了 QWI 外延片中心部分, 在 Ar^+ 激光的激发下显现出峰位位于 0.945 eV 的荧光峰。由于较窄带隙的未产生 QWI 的材料的价带电子优先激发, 使得 PL 谱上的高能峰峰值较小, 但高能峰的存在证明在 Nd:YAG 激光照射后确有 QWI 出现。两个峰的存在说明垂直于生长方向的侧向热流是比较小的, 致使产生 QWI 的区域局限于会聚激光束的有效光斑附近。以上分析表明 PAID 有一定的定域处理能力, 暗示其有作为直接写入技术的可能性, 有应用于 PIC 和 OEIC 的广泛前景。

表 1 晶格与 InP 匹配的四元系 InGaAsP 的热导率(300 K)

Table 1 Thermal conductivity of InGaAsP quaternary material lattice matched to InP

y	α (InP)	0.6 ($\lambda_g = 1.3 \mu\text{m}$)	0.85 ($\lambda_g = 1.55 \mu\text{m}$)	κ (In _{0.53} Ga _{0.47} As)
κ /W/K·cm	0.68	0.044	0.043	0.063

另外,由于对辐照光束采取了会聚,相当于增大了辐照光的平均辐照密度,所以照射时间比未会聚光束的时间可以缩短许多,这也相应减少了侧向热流对非辐照区量子阱的损害。

综上所述,经过对晶格与 InP 匹配的 InGaAsP 超晶格外延片进行 PAID 处理的光荧光谱分析,证明运用连续 Nd:YAG 激光辐照量子阱结构可以获得 QWI 的效果。而对衬底的预加热可以减少激光的辐照时间并获得不亚于长时间照射所得到的 QWI 效应。对激光束加以会聚,不但可以增大平均功率密度,从而减少辐照时间,而且表明激光直接写入的 PAID 工艺是有应用于 PIC 和 OEIC 可能的。

参 考 文 献

- 1 W. D. Laidig, N. Holonyak Jr, M. D. Camras *et al.*. Disorder of an AlAs-GaAs superlattice by impurity diffusion. *Appl. Phys. Lett.*, 1981, **38**(10):776~778
- 2 D. G. Deppe, L. J. Guido, N. Holonyak Jr *et al.*. Stripe-Geometry quantum well heterostructure Al_xGa_{1-x}As-GaAs lasers defined by defect diffusion. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, **49**(9):510~512
- 3 J. H. Marsh, S. A. Bradshaw, A. C. Bryce *et al.*. Impurity induced disordering of GaInAs quantum wells with barriers of AlGaInAs or of GaInAsP. *J. Electron. Mater.*, 1991, **20**(12):973~978
- 4 C. J. McLean, J. H. Marsh, R. M. De La Rue *et al.*. Layer selective disordering by photoabsorption induced thermal diffusion in InGaAs/InP based multiquantum well structures. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(12):1117~1119