

化合物半导体晶片和器件键合技术进展*

谢生 陈松岩 何国荣

(厦门大学物理系, 厦门, 361005)

2002-12-02 收稿, 2003-03-31 收改稿

摘要: 半导体晶片直接键合技术已成为半导体工艺的一门重要技术, 它对实现不同材料器件的准单片集成、光电子器件的性能改善和新型半导体器件的发展起了极大的推动作用。文中详细叙述了近十年来III-V族化合物半导体键合技术的主要实验方法, 并对各种键合方法的优缺点进行了比较, 结合自己的工作对化合物半导体的键合机理和界面特性做了总结, 针对目前的研究工作和应用做了展望。

关键词: 晶片直接键合; 键合机理; 化合物半导体

中图分类号: TN 305.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3819(2003)03-366-06

Development of Compound Semiconductor Wafer and Device Bonding

XIE Sheng CHEN Songyan HE Guorong

(Department of Physics, Xiamen University, Xiamen, 361005, CHN)

Abstract: Semiconductor wafer direct bonding is an important technique for integrating devices, improving the performance of optoelectronic devices and making new devices. This paper presents the innovative wafer bonding methods of compound semiconductors, analyses the advantages and disadvantages of various methods, then discusses the bonding mechanics and the generic nature of the interfaces. Finally, examples of bonded devices are presented.

Key words: wafer direct bonding (WDB); bonding mechanism; compound semiconductor

EEACC: 2250

1 引言

晶片直接键合(Wafer Direct Bonding, WDB)是将两片表面清洁、原子级平整的同质的或异质半导体材料经表面清洗和活化处理,在一定条件下直接贴合,通过范德华力、分子力甚至原子力使晶片键合而成为一体的技术。利用该技术可实现单片或准单片集成,使系统、电路、器件、材料的一体化优

化设计成为可能。由于该技术与晶片的晶向、晶格常数、结晶形态(单晶、多晶、无定形或非晶)、掺杂类型、掺杂浓度及分布等无关,因此WDB技术的研究具有广阔的应用前景。

目前,半导体键合技术的主要应用两个方向:一个是硅基材料的直接键合:(1)硅-硅之间的键合,用以制造超大规模集成电路和大功率器件的衬底;(2)硅-III-V族材料之间的键合,利用成熟的微电子工艺和III-V族材料的发光特性,实现光电集

* E-mail: xie.sheng96@163.com

基金项目: 本项目得到国家自然科学基金资助(项目编号: 60006004)

成; 另外一个是非硅基材料的键合, 目前主要是 III-V 族材料 (GaAs, InP 等) 之间的异质键合, 通过键合工艺改善光电子器件性能和制造高性能的准单片集成器件。

WDB 技术有如下特点^[1]:

- (1) 构建复合材料, 充分发挥不同材料的优点, 制备新的集成器件;
- (2) 界面位错稳定, 由于晶格失配产生的位错仅局限在键合界面区, 不会迁移到器件有源区影响器件的性能;
- (3) 键合强度大, 键合的材料象体材料一样, 完全适合于解理或切磨抛等机械加工;
- (4) 与 VLSI 技术的兼容性和其自身的灵活性;
- (5) 简化了现有工艺, 降低了光电集成的难度;
- (6) 工艺设备简单, 易于大规模生产。

国外对键合技术的研究较早, 发展也较快。目前, 美国惠普公司的研究人员已开发了一种化合物半导体晶片键合的专利技术。该技术使当前用的 LED 发光效率提高了一倍, 并制成 AlGaInP 双异质结发光二极管, 用“透明”n 型 GaP 衬底代替原来的 GaAs 吸收衬底, 在黄绿到红色 (570 nm 至 640 nm) 的光谱范围内, 其发光效率超过未滤色的 60W 钨灯 ($> 15 \text{ lm/W}$)。另外, 高灵敏度的准单片集成光接收机、光发射机都已实现。

从 20 世纪 90 年代后清华大学^[2]、复旦大学^[3]、中国科学院半导体研究所^[4]等多家科研单位都对晶片键合技术进行了详尽的研究。目前国内对硅/硅键合的实验方法、界面性质、界面键合能以及键合机理等都作了详细的研究^[5-7], 河北工业大学硅-硅键合专利技术已实现了半导体高反压、大功率硅器件衬底制备技术的新突破, 并在 99 (石家庄) 全国专利技术发明博览会上转产。

目前硅-硅键合技术已近成熟, 并在实际生产中得到应用。与国外相比, 国内对硅和 III-V 族材料及 III-V 族材料之间的异质键合研究相对较少, 还不够成熟, 一些键合机理、键合模型尚不十分清楚。

文中对近十年来 III-V 族材料的 WDB 技术作了比较和分析, 并把笔者在此方面获得的一些结果作一总结。

2 键合方法

晶片键合的实验方法大致可以分为高温晶片

熔合、氩原子刻蚀表面键合、表面修正键合、氢原子清洗表面键合等。

2.1 高温晶片熔合

高温晶片熔合是根据晶片在高温下表面熔融, 在一定压力下界面原子 (和/或分子) 之间的距离靠近, 晶片表面的原子 (和/或分子) 相互成键而发生表面再构。

1989 年美国的 Z L. Liao 和 D. E. Mull 利用高温高压使晶片间原子 (或分子) 达到分子间距离, 以此让两片 InP 或 GaAs 晶片面对面地键合在一起^[8]。他们的实验装置巧妙地利用了石英和石墨之间热膨胀系数不同而产生形变应力, 在 $830 \text{ }^\circ\text{C}$ H_2 气氛中使石墨块和石英管之间的晶片在石墨压力和加热装置热传导的作用下, 实现晶片键合, 如图 1 所示。虽然用该方法可以制备部分器件, 但是并不适合实际应用, 因为采用高温、高压会产生许多问题, 如引入杂质、热压, 产生缺陷等, 使器件性能在高温下退化, 甚至失效。因此, 从 90 年代中期, 研究人员开始着手研究低温 WDB 技术。

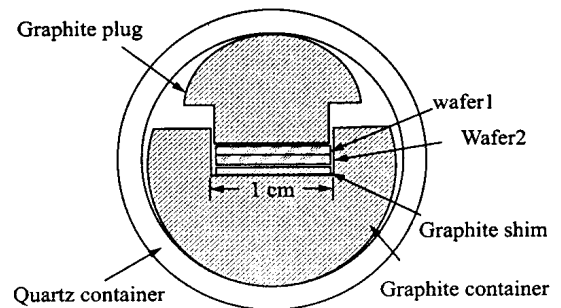


图 1 晶片熔融反应装置剖面图

Fig 1 Schematic cross-sectional view of the fusion reactor

2.2 氩原子刻蚀表面键合

该技术是利用氩原子的情性, 在超高真空中用氩原子刻蚀晶片表面, 在室温把刻蚀后的晶片贴在一起, 对晶片施加一定的压力 ($> 1 \text{ MPa}$), 不用退火, 即可达到键合的目的^[9]。典型的实验条件见表 1。

由于氩原子原子量大, 如果控制不好, 在刻蚀过程中容易造成表面粗糙不平, 刻蚀严重的话, 可能损坏器件, 甚至不能键合, 因此在刻蚀过程中要

表 1 典型的实验条件^[10]

Tab 1 Typical experimental condition

Vacuum pressure/Pa	Voltage/kV	Plasma current/mA	Beam incident angle/°	Etching time/s
10^{-6}	1.2~1.5	15~20	45	30~300

严控刻蚀时间。刻蚀实验的真空腔如图 2 所示。1998 年 Taek Ryong Chung 用该方法成功地将 InP 衬底上生长的 $L = 920 \mu\text{m}, W = 500 \mu\text{m}$ In-GaAs p 脊型波导激光器键合到 GaAs 衬底上^[11,12], 在室温脉冲条件下, 阈值电流密度同用 MOCVD 方法生长在 InP 衬底上的激光器一样, 都为 $500 \text{ A}/\text{cm}^2$ 。

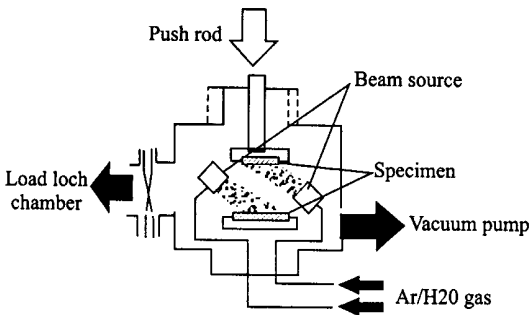


图 2 刻蚀表面键合仪器的结构简图

Fig 2 Vacuum chamber for bonding experiments

2.3 表面修正键合

表面修正键合是根据 SeS_2 对 GaAs 表面钝化作用, 使 GaAs 表面性质稳定, 在其表面活性最佳时刻将两片晶片贴合, 在表面再构时发生强烈的键合。

SeS_2 键合 GaAs/Si 的机理是去除本征氧化之后, 用 SeS_2 处理的 GaAs 表面在 350°C 化学性质最活泼, 为了降低表面能, 表面发生再构, 当两片晶片紧密接触时, 由于键合的表面能比分子再构表面的表面能低, 所以在冷却过程中形成新的化学键 ($\text{SiS}_2, \text{Ga}_2\text{As}_3, \text{GaAs}_x$)。因为只有表面原子参加反应, 而其它部分并没有受键合过程的影响, 所以其结构、光学等特性保持不变。其键合过程的结构简图如图 3 所示。

对键合样品界面特性研究表明, $I-V$ 特性并不理想。在初始偏压下, GaAs/Si 样品界面没有电流通过, 当偏压超过 10 伏后, 有微弱电流。但是在 SeS_2 中掺入少量的 Sn (3%) 后发现, n 型 GaAs/Si

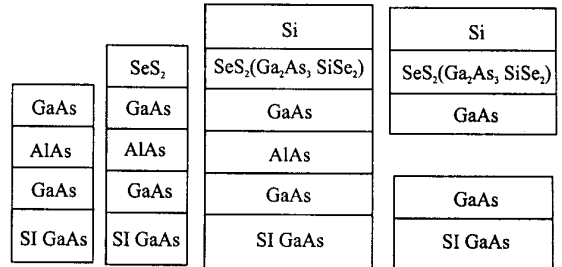


图 3 晶体生长和键合过程示意图: (a)MOCVD 生长; (b) SeS_2 处理; (c) 和 Si 衬底键合; (d) 薄膜转移
Fig 3 Schematic of crystal growth and bonding process: (a) MOCVD growth; (b) SeS_2 treatment; (c) Bonding on Si substrate; (d) Transplantaion of thin film after ELO process

样品的 $I-V$ 特性很接近理想化^[13]。

对 SeS_2 键合 GaAs/Si 样品的研究很多, 比较有代表性的是日本的 Arokia Raj 用 SeS_2 键合 GaAs/Si 样品。键合后的样品表明 GaAs 薄膜和 Si 衬底之间形成了强烈的共价键, 通过 AFM 观测到键合样品表面平整, 界面键合均匀^[13,14], 并用该结构材料制备出了高效串联太阳能电池, 实验测得键合到 Si 基上的双异质结少子寿命为 9.09 ns , 比 Si 基上外延 GaAs 的少子寿命高 3 倍^[17]。同时, 印度的 Pune 大学^[15], 美国的 Wisconsin-Madison 大学^[16]等多家科研单位也对这种方法进行了大量的研究。

2.4 氢原子清洗表面键合

经离子束刻蚀表面的晶片, 可以在室温下键合。但为克服离子束对界面造成的损伤, 减轻界面粗糙不平, 一般采用通入氢气升温, 然后再用电子轰击氢分子得到氢原子, 利用氢原子的强还原性和表面的吸附物质、氧化物及碳氢化合物反应, 去除表面污物, 增强表面活性^[18]。由于氢气易爆炸, 也有的用氮氢混合气体 (10% 氢气, 90% 氮气) 替代氢气, 但这样去除杂质不完全而导致界面无序。用氢

原子清洗晶片键合无需很高的温度就可以得到比较均匀的突变键合界面和较高的界面能。将清洗干净的 GaAs 晶片在 500 ℃ 的 H₂ 中加热 30 分钟, 在 400 ℃ 退火 2 小时, 界面键合能可达 0.74 J/m², 解理成微米量级的晶片而不裂开^[19]。由于氢原子质量较小, 所以界面损伤不大。但这对设备要求很高, 且实验要在高真空下(10⁻⁴ Pa)进行。

除了以上介绍的四种常用方法外, 还有等离子键合^[20, 21], 金属介质键合等实验方法^[22]。

3 键合机理

晶片直接键合(WDB)技术是基于键合表面分子间的范德华(Van der Waals)力, 它是一种短程力, 对表面粗糙度要求严格, 只有当表面紧密接触时, 范德华力才有效。通常以非极性分子团中止的表面, 分子间的吸引力主要是由载流子分布瞬时波动产生极性, 从而使界面间的原子(或分子)形成偶极子。对于极性分子, 特别是带有氢原子的分子团, 比如 H-F, H-O, H-N 等, 晶片间的相互吸引力是氢键形式的双极吸引力。氢键键合的样品中, 表面极性分子中的氢原子同相邻晶片表面电负性强的 O, N, F 等原子相互反应, 从而实现晶片键合。此外, 如果在匹配晶片表面有过剩的极性分子, 不仅极性分子和分子团可以形成氢键, 而且极性分子本身也可以形成氢键, 如 HOH, HF。极性分子的联接也可能是两个相邻表面极性分子形成的桥键, 这是一种长程力, 它对表面粗糙度的要求不是很高^[23]。

目前对于 GaAs、InP 之间及 GaAs、InP 和 Si 之间键合机理的研究不是很多, 主要有三种键合机理:

(1) 低温氢键发生聚合, 由于聚合反应形成共价键是一种普遍现象, 可以应用到各种不同材质的衬底上, 所以对于做亲水处理的晶片表面, 其发生如下聚合反应^[23]:



其中, M 是电负性比较强的 III 族金属, 或者电负性更强的金属, 或过渡金属;

(2) 对于疏水处理的晶片表面, 只要两片晶片的表面足够光滑、平整、清洁, 表面分子都可以通过范德华力在室温下发生键合^[23];

(3) 对于利用中间介质键合的机理因中间介质而异, 但其键合机理都是利用中间介质和两旁晶片

形成金属或共价键^[13, 22]。

笔者利用聚合反应实现了 III-V 族材料的 GaAs、InP 之间的异质键合。首先对样品进行亲水性处理, 由润湿理论可知, 要使晶片表面具有亲水性, 就必须改变晶片表面结构, 提高晶片的表面能。用三种不同的方法对 H₂SO₄ 处理的 GaAs、InP 片进行后处理: (1) 将 GaAs、InP 片浸泡在 HF 溶液中; (2) 将 GaAs 片浸泡在 HF 溶液中, InP 经过 H₂SO₄ 处理后, 用大量冷热去离子水反复冲洗; (3) 将 GaAs 片浸泡在 HF 溶液中, InP 片浸泡在 HCl 溶液中。实验结果表明, GaAs、InP 通过 H₂SO₄ 处理后表面的润湿性很好, 用以上三种处理方法都可在比较低的温度(300 ℃)实现键合。可以认为 H₂SO₄ 不仅能除去表面沾污的金属原子、灰尘、有机物等, 同时还可能改变晶片表面结构, 使晶片表面出现大量的悬浮键, 提高了表面活性。以上三种处理方法, 晶片都是在含有 H⁺ 离子的溶液中处理, 处理后的 GaAs、InP 表面最终被 H⁺ 离子所覆盖。当晶片贴合在一起后, 表面 H⁺ 离子相互作用, 形成三维氢键网络结构。对晶片施加一定的压力后, 晶面距离被进一步拉近, 距离的拉近有助于增加接触面积, 提高成键密度。对晶片退火处理后, 键合强度进一步增强。测试结果表明键合强度很大, 电学性质也很好^[24]。

4 界面性质

对界面性质的研究有利于理解键合特性, 改进实验方法, 提高器件性能, 以及制备新型的半导体器件。对于界面特性的研究主要有以下几方面:

(1) 界面位错。由于不同半导体材料晶格常数差异, 晶片间存在晶格失配、倾斜失配及热失配, 为了释放界面的应变能, 在界面附近形成三组相互正交的位错, 位错的平均距离在 10~100 nm 之间不等。

(2) 界面空洞。通常在界面附近存在多孔层、空洞以及其他的一些杂质。在 InP/GaAs 的键合实验中, 界面附近观察到的空位形状通常为椭圆或倒三角形, 且在 InP 侧较深, GaAs 较浅, 这可能与 In 耗尽有关, 界面处多孔层的存在可能是由于表面清洗不干净, 存在本征氧化或者吸附杂质而造成的。而退火过程中产生的气泡则是空洞存在的主要原因。

(3) 电学特性。键合晶片的电学性质取决于界

面态,反过来电学性质的研究也有助于界面研究。对各种键合样品的 $I-V$ 特性研究表明,在样品界面处存在不同程度的电阻层,这可能是由于无机酸、碱溶液和晶片表面原子反应产生新的物质造成的。

(4) 界面键合能。界面键合能与成键密度和键能有关,一般情况下,界面的表面能 γ 可表示为:

$$\gamma = \frac{1}{2} n E_b$$

其中, n 为成键密度, E_b 为每根键的能量。对于同质键合,键合能定义为表面能的两倍,即等于 2γ ; 对于异质键合,界面能一般定义为键合晶片对的平均表面能。

对界面能的测试主要有拉力测试实验和裂纹分裂法,但这些都是破坏性实验。最近浙江大学的王海军等人采用了一种红外热像法无损测量晶片键合能的方法^[6]。该方法是利用光在键合样品上下表面产生多次反射,反射光与入射光之间干涉而产生明暗相间的干涉条纹。据此不仅可以判断空洞的存在,定量地计算空洞的大小,而且根据透射光强度分布,可以推算出键合片各部分的键合强度。红外热像仪测红外热像的框图如图4所示。

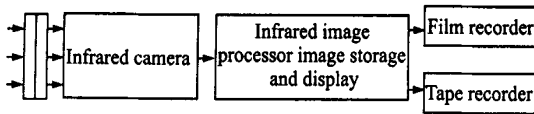


图4 红外热像仪测试系统框图

Fig 4 Schematic of IR test

5 结 论

在过去的十多年间,人们投入了巨大的研究热情,使WDB技术取得了很大的进展,一些高性能的器件和结构相继研制成功,其中比较有代表性的成果有:

1996年, Y. Qian 等用MOCVD在n型InP基上生长多量子阱结构的有源层和包层,在GaAs衬底上生长n型和p型的GaAs/AlAs布拉格反射层,用适当的键合方法将二者键合起来,成功地制备了直径为55 μm 带有双GaAs/AlAs布拉格反射镜面的1.3 μm VCSEL激光器。该激光器在室温、脉冲为200 ns、重复频率为1 kHz条件下,最低阈值电流密度为4.2 kA/cm^2 ,最高的输出功率

达4.6 mW,单纵模工作时,侧模抑制率(SMSR)为40 dB^[25]。

1999年台湾Da-Yeh大学的R. H. Horng等成功地改善了吸收型GaAs基AlGaInP发光二极管。在工作电流为20 mA时,键合器件在600 nm发光亮度为3.050 cd/m^2 ,是传统吸收型GaAs基的三倍^[26]。

2001年, T. Nakahara 等用WDB技术成功键合了Si基CMOS集成电路和GaAs/AlGaAs光电探测器。该电路结构简单紧凑,由于是直接键合,没有寄生电容,所以灵敏度很高,带宽也很大。在没有抗反射膜(AR)覆盖时, GaAs和AlGaAs混合电路灵敏度分别为0.42和0.8 A/W,在5 V偏压下暗电流分别为2.5 pA和20 nA,带宽可以做到1 Gb/s。对0.85 μm 的接收机,10°的误码率下,码速为622 Mb/s和1 Gb/s的灵敏度分别为-30.1和-27.7 dBm,相应传输率下的动态范围是22.2和19.5 dB。对于1.55 μm 的接收机,在同样的误码率下,622 Mb/s和1 Gb/s的灵敏度分别为-31.4和-28 dBm,在相应传输率下的动态范围是22.4和18 dB^[27]。

2002年,美国的H. C. L. N. 和中国台湾的W. H. Wang等人对晶片键合提出了新的想法,在Si衬底上利用AuGeNi/Cr多层金属作为晶片键合的过渡层在320°C成功地键合了1.55 μm VCSEL激光器,30 $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 的VCSEL开启电压在0.8 V左右,发射波长在1.545 μm ^[22]。

随着键合新方法的不断提出,工艺条件的不断改善,晶片键合技术越来越成熟,现在部分产品已实用化或接近实用化,在不久的将来键合技术有望成为继外延剥离技术的又一基本技术。

参 考 文 献

- 1 卢励吉,周洁,封松林等 硅直接键合界面附近的深能级研究 物理学报,1994; 43(5): 785~789
- 2 朱德忠,李阳 硅键合片导热性能的测试 电子工艺技术,1994(6): 3~8
- 3 陈军宁,傅兴华 硅/硅直接键合SDB硅片的减薄研究 半导体技术,1996; 21(1): 40~43
- 4 韩伟华,余金中,王启明 硅键合激光器的研究进展 半导体光电,2000; 21(2): 77~84
- 5 韩伟华,余金中,王启明 直接键合硅片界面键合能的理论分析 半导体学报,2001; 22(2): 40~44

- 6 王海军, 钱照明, 刘宏岩等. 红外热像法无损分析硅片直接键合界面的键合强度. *半导体技术*, 1996; **2**: 12~ 15
- 7 何 进, 陈星弼, 杨传仁等. 直接键合硅片的亲水处理及其表征. *半导体技术*, 1999; **24**(5): 23~ 29
- 8 L iau Z L, M ullD E W afe r fusion: a novel technique for optoelectronic device fabrication and monolithic integration *Appl Phys Lett*, 1990; **56**(8): 737~ 739
- 9 Teak Ryong Chung, L iu Yang, N aoe Hosoda, *et al* Room temperature GaAs-Si and InP-Si wafer direct bonding by the surface activated bonding method *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B* [2], 1997: 203~ 206
- 10 Hideki T A K A G I, Ryutaro M aeda, Teak R Yong Chung, *et al* Effect of surface roughness on room-temperature wafer bonding by Ar beam surface activation *Jpn J Appl Phys*, 1998; **37**(7): 4 197~ 4 203
- 11 Teak Ryong Chung, Neoe H O S O D A, Tadatoma S U G A, *et al* InGaAsP lasers on GaAs fabricated by surface activated wafer bonding method at room temperature *J Appl Phys (Part 1)*, 1998; **37**(3B): 1 405~ 1 407
- 12 Taek Ryong Chung, N aoe S soda, Tadatomo Suga 1.3 μm InGaAs/InP Lasers on GaAs substrate fabricated by the surface activated wafer bonding method at room temperature *Appl Phys Lett*, 1998; **72**(13): 1 565~ 1 566
- 13 Jesudoss A R O K I A R A J, Hiroki O K U I, Hironori T A G U C H I, *et al* Electrical characteristic of GaAs bonded to Si using SeS₂ technique *Jpn J Appl Phys (Part 2)*, 2000; **39**(9A/B): 911~ 913
- 14 A rokiaraj J, Soga T, J inbo T, *et al* SeS₂ assisted bonding of GaAs to Si-A new method for wafer bonding *Applied Surfaces Science*, 2000; **159**~ **160**: 282~ 287
- 15 Beena Annie Kuruvilla, Datta A, Skekhat G S. Evidence for the formation of ordered layers on SeS₂ treated GaAs(110) using atomic force microscopy. *J Appl Phys*, 1999; **85**(2): 969~ 977
- 16 Jingxi Sun, Dong Ju Seo, Brien W L O, *et al* chemical bonding and electronic properties of SeS₂-treated GaAs(110). *J Appl Phys*, 1999; **85**(2): 969~ 977
- 17 A rokiaraj J, Okui H, Taguchi H, *et al* High-quality thin film GaAs bonded to Si using SeS₂-A new approach for high-efficiency tandem solar cells *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2000; **66**(1~ 4): 607~ 614
- 18 Takeshi A ktsu, A ndresa P l B l Heinz Stenzel, *et al* GaAs wafer bonding by atomic hydrogen surface cleaning *J Appl Phys*, 1999; **86**(12): 7 146~ 7 150
- 19 K stner G, A katsu T, Senz S, *et al* Large-area wafer bonding of GaAs using hydrogen and ultrahigh vacuum atmospheres *Appl Phys A*, 2000; **70**: 13~ 19
- 20 肖 龔, 茅盘松, 袁 璟. 用氧等离子激活处理的低温硅片直接键合技术. *半导体技术*, 1999; **24**(5): 19~ 22
- 21 Weinert A, Am irferiz P, Bengtsson S. Plasma assisted room temperature bonding for M ST. *Sensors and Actuators A*, 2001; **92**: 214~ 222
- 22 L N H C, Wang W H, Hsieh K C, *et al* Fabrication of 1.55 μm VCSELs on Si using metallic bonding *Electronics Letters*, 2002; **38**(11): 516~ 517
- 23 Tong Q Y. Wafer bonding for integrated materials *Materials Science and Engineering B*, 2001; **87**: 323~ 328
- 24 谢 生, 陈松岩, 何国荣. GaAs/InP 异质键合的界面性质(待发表)
- 25 Q ian Y, Zhu Z H, Lo Y H, *et al* 1.3 μm vertical-cavity surface-emitting lasers with double-bonded GaAs-AlAs Bragg mirror. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997; **9**(1): 8~ 10
- 26 Horng R H, Wu D S, Wei S C, *et al* AlGaInP/AlGaInBe/glass light-emitting diodes fabricated by wafer bonding technology. *Appl Phys Lett*, 1999; **75**(2): 154~ 156
- 27 Nakahara T, T suda H, Ishihara N, *et al* High-sensitivity 1 Gbit/s CMOS receiver integrated with GaAs or InGaAs photodiode by wafer bonding *Electronics Letters*, 2001; **37**(12): 781~ 783



谢 生(XIE Sheng) 男, 1978 年 10 月生, 博士研究生, 现主要从事 III-V 族化合物半导体异质键合和单片集成光接收机前端的研制。

陈松岩(CHEN Songyan) 男, 1966 年 7 月生, 博士, 副研究员, 现主要从事硅基发光材料及性质的研究。

何国荣(HE Guorong) 男, 1978 年 10 月生, 硕士研究生, 现主要从事硅基材料的异质键合。