

直接键合 InP-GaAs 结构界面的特性研究^{*}

劳燕锋 吴惠桢[†]

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所信息功能材料国家重点实验室, 上海 200050)

(2004 年 12 月 19 日收到, 2005 年 2 月 28 日收到修改稿)

通过对直接键合 InP-GaAs 结构的红外吸收光谱分析以及断面扫描电子显微镜观察发现, 样品制备过程中不均匀的外加强压导致 InP-GaAs 交界面局部出现了不连续过渡的空间层, 实验上将熔融石蜡渗透并被填充到该空间层, 利用其对 $3.509\mu\text{m}$ 波长光的强烈吸收特性可表征这种局部的键合不连续区域, 二维扫描测试样品不同区域的吸收谱得到 $3.509\mu\text{m}$ 波长吸收强度等值线图, 从而描绘出外加强压的不均匀分布. 实验上通过改进键合装置的施压均匀性, 得到了连续过渡界面且均匀键合的 InP-GaAs 结构, 利用这种均匀键合技术有望制备大尺寸器件例如光学微腔等.

关键词: 晶片直接键合, 界面, 红外吸收光谱

PACC: 7280E, 6848, 4225B

1. 引 言

由于化合物半导体的键合技术可以整合两种不同材料的优点, 它在提升器件性能方面有着很大优势, 近年来成为化合物半导体材料研究的热点之一. 键合是指两种具有清洁、平整表面的固体材料相互叠合, 在一定外界条件下如压强、温度等通过化学键而结合在一起. 键合技术可以追溯到人类很久以前的历史^[1], 例如冷焊技术是最古老的键合技术之一. 到了 20 世纪 80 年代该技术被成功应用于硅基材料的键合中^[2], 由于器件要求键合界面呈原子级接触形成化学键以保证其性能, 键合不再像其早期的发展而成为一项高科技领域内的技术, 检测手段的发展及键合机理的研究^[3-5], 使得如今硅基材料键合技术相当成熟, 广泛用于商用 SOI 材料的制备. 之后键合技术又被引入到化合物半导体器件的研制上, 如 InP-Si 基^[6], GaAs-Si^[7]基, InP-GaAs^[8]基材料键合器件结构均已实现. 与传统外延方法研制的器件相比^[9,10], 键合方法整合了两种材料的优点, 因而其制备的器件性能更加优越. 虽然化合物半导体键合技术已有十多年的发展历史以及实验室规模上器件研制的成功, 然而关于其键合机理以及相关键合质量

的检测手段却未有充分地发展, 这使得键合技术在化合物半导体键合器件中的应用仍存在着不可知因素, 其商业化仍具有一定困难.

红外成像技术在硅基材料键合质量检测及其机理研究中起到了很大的作用^[4], 利用红外成像技术可以直接获取晶片键合界面图像, 直观地定位界面缺陷及观察其均匀性, 它业已成为硅基材料键合实验中常用检测手段之一. 然而, 检测过程中红外光线的光学损失主要是由于界面反射、界面缺陷(空气隙)的吸收及散射、未键合区域界面干涉引起的, 红外成像技术只能观察到键合界面缺陷位置及形状大小, 并不能表征缺陷厚度分布.

本文采用高温直接键合方法实现了化合物半导体 InP-GaAs 结构的键合, 我们实验发现样品制备过程中外加强压的不均匀性会导致 InP-GaAs 交界面局部出现数十纳米到数微米量级不连续过渡的空间层, 熔融石蜡能渗透并填充到存在空间层的区域, 而且石蜡对 $3.509\mu\text{m}$ 波长红外光具有强烈吸收特性, 我们用红外光谱方法对经过石蜡处理过的化合物半导体 InP-GaAs 直接键合结构进行了吸收特性研究. 根据测试区域红外吸收光谱上是否观察到 $3.509\mu\text{m}$ 波长吸收峰而判断该区域的质量(是否存在空间层), 实验表明, 当空间层厚度在纳米量级时仍能被

^{*} 国家重点基础研究发展计划(批准号: 2003CB314903)资助的课题.

[†] E-mail: hzwu@mail.sim.ac.cn

很好地表征.与石蜡中间层对 $3.509\mu\text{m}$ 波长的强烈吸收特性相比,界面反射、界面缺陷(对于高温键合而言,缺陷由空气泡及界面两侧材料的分解物构成)的吸收及散射、未键合区域界面干涉引起的光损失可以忽略不计,考虑到吸收强度与厚度的对应关系,二维扫描测试键合样品的红外吸收光谱并作出 $3.509\mu\text{m}$ 吸收强度等值线图,则可得到晶片不连续空间层沿整个界面的厚度分布图.

2. 实 验

键合晶片采用沿 $\langle 110 \rangle$ 晶向解理成约 $7\text{mm} \times 7\text{mm}$ 大小的 InP 与 GaAs 衬底片,晶片经过清洗、表面氧化物的去除、边对边叠合在一起后,被置于键合装置中以对晶片表面施加压力,随后立即放入退火炉进行高温退火以完成键合过程,最后退火炉自然降温至 100°C 以下取出样品.实验中,退火时间固定为 35min ,采用改进施压均匀性前制得的样品(温度为 560°C ,压强约为 5MPa)作为键合装置压强不均匀性的表征,在改进施压均匀性后,使用温度为 620°C 及压强分别约为 2 和 50MPa 制得的样品进行吸收光谱测试,以验证压强均匀性对键合质量的影响,同时观察键合均匀性受压强大小的影响以优化样品制备条件.键合后的晶片与石蜡一起加热到其熔化的温度,由于熔融石蜡具有很好的渗透性,它渗透并被填充到存在空间层的界面而充当检测介质.红外吸收光谱($1.0\text{—}4.0\mu\text{m}$)由 NICOLET 860 傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)测试得到,测试过程中采用叠合在一

起的 InP 和 GaAs 衬底作为背景信号扣除样品信号中衬底的影响, $3.509\mu\text{m}$ 波长吸收强度等值线图由测试晶片表面不同区域谱线并截取各测试点的 $3.509\mu\text{m}$ 波长吸收强度构图得到.键合样品的横断面图由 JEOL JSM-6700F 场发射扫描电子显微镜(FESEM)观察得到.

3. 结果及讨论

3.1. 红外吸收光谱检测原理

图1为红外吸收光谱检测原理示意图,假设 d_A, d_B, d_I 和 $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_I$ 分别为键合样品 InP 侧、GaAs 侧以及石蜡中间层的厚度和吸收系数, d_{A0}, d_{B0} 分别为背景样品 InP 侧和 GaAs 侧的厚度, I_0, I_S, I_B 分别为入射到样品、从键合样品出射以及从背景样品出射的光信号,则有关系式:

$$I_S = I_0 e^{-\alpha_I d_I - (\alpha_A d_A + \alpha_B d_B)}, \quad (1)$$

$$I_B = I_0 e^{-(\alpha_A d_{A0} + \alpha_B d_{B0})}, \quad (2)$$

以及

$$I_S = I_B e^{-[\alpha_A(d_A - d_{A0}) + \alpha_B(d_B - d_{B0})]} \cdot e^{-\alpha_I d_I}. \quad (3)$$

定义光吸收

$$A = 1 - \log_{10}(I_S/I_B) = C + \log_{10}^e \cdot \alpha_I d_I, \quad (4)$$

其中

$$C = 1 + [\alpha_A(d_A - d_{A0}) + \alpha_B(d_B - d_{B0})] \cdot \log_{10}^e. \quad (5)$$

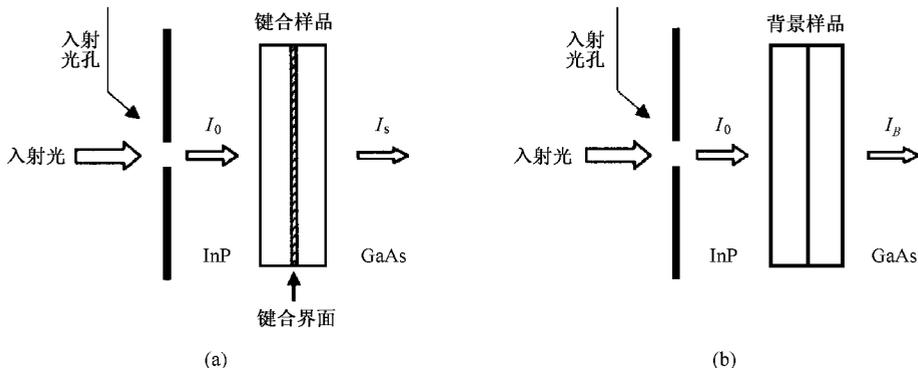


图1 红外吸收光谱测试原理示意图 (a)键合样品透射光信号测试 (b)背景样品透射光信号测试

(4)式中加入常数'1'只为方便数据处理.实际测试中 I_S 还包含界面反射、界面缺陷的吸收及散射、未键合区域界面干涉引起的光损失等,因其值相对于

石蜡中间层的吸收而言比较小,在以上各式推导中被忽略了. InP 与 GaAs 体材料禁带宽度对应波长分别为 $0.92\mu\text{m}$ 和 $0.87\mu\text{m}$,因此,即使键合样品与背景

样品的 InP 与 GaAs 厚度不相同,取测试波长 $> 1\mu\text{m}$ 时 C 项的影响也是比较小的.当选定测试波长为 $3.509\mu\text{m}$ 时(4)式中的吸收系数 α_l 是一个固定值,光吸收 A 与石蜡中间层也即未键合区域空间层的厚度 d_l 成正比;对于键合好的区域不存在界面空间层,因而不会有石蜡存在,吸收光谱谱线上不出现 $3.509\mu\text{m}$ 的峰位;若对晶片表面进行红外吸收光谱的二维扫描测试,并截取 $3.509\mu\text{m}$ 吸收强度数据作出等值线图,就可描绘出不连续空间层在键合界面的厚度分布图,间接反映出键合质量及其均匀性.

3.2. InP-GaAs 键合界面质量分析

图 2 为石蜡与 InP 及 GaAs 衬底样品的红外吸收光谱,图中实线为 InP 衬底上涂敷一层薄薄的石蜡的吸收光谱,吸收光谱中出现了三个强烈的吸收峰 $3.383\mu\text{m}$ 、 $3.426\mu\text{m}$ 和 $3.509\mu\text{m}$,而在其他波长表现出均匀吸收.但是,如图所示干净的 InP 与 GaAs 衬底样品不存在吸收峰;在键合样品的检测中利用了 $3.509\mu\text{m}$ 吸收峰来表征键合界面的质量.

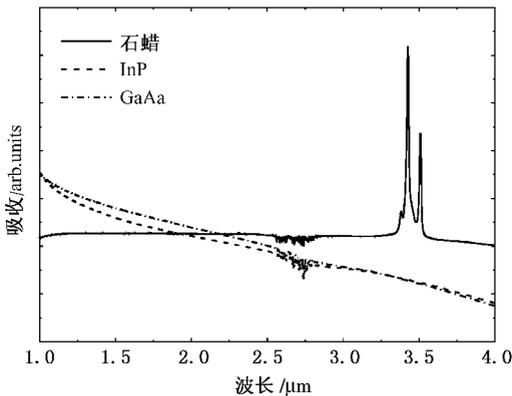


图 2 石蜡与 InP 及 GaAs 衬底样品的红外吸收光谱

在实验上,将 InP-GaAs 键合样品与石蜡一起加热到石蜡熔化温度,石蜡将渗透并被填充到由 InP 与 GaAs 表面形成的隙缝即未键合区域中;至于键合好的区域由于 InP 与 GaAs 两种材料呈连续过渡,不出现界面空间层而不会被石蜡所填充,因此通过检测红外吸收光谱上是否出现石蜡的 $3.509\mu\text{m}$ 吸收峰可判别出未键合区域.图 3(a)是用石蜡处理过的 InP-GaAs 键合样品的红外吸收光谱,其中三条谱线分别对应测试的三个区域,该样品的键合条件是:温度为 560°C 、压强约为 5MPa .同时该样品沿着测试区域被解理开,并用扫描电子显微镜观察区域 1、2 和 3 的横断面,如图 4(a)、(b)和(c).由图 3(a)及图 4

可以得到两个结论,一是具有红外吸收峰特性的区域 1 和 2 分别存在着约 20nm 和 10nm 的界面空间层,且空间层厚度与吸收强度有着对应关系,而不出现红外吸收峰的区域 3 其 InP-GaAs 交界面上无空间过渡层出现,这与(4)式是一致的,说明在键合过程中该晶片右侧受到的压强大于左侧,使得样品右侧区域界面接触紧密而左侧区域出现隙缝;二是利用石蜡作为探测未键合区域的介质,其灵敏度可到纳米量级厚度的空间层,如图 3(a)中的谱线 2,该谱线中的吸收峰 $3.509\mu\text{m}$ 仍能很好地被区分出来.因此,利用石蜡处理过的键合样品的红外吸收光谱上是否出现 $3.509\mu\text{m}$ 波长吸收峰以及在该波长位置的吸收强度可以判定 InP-GaAs 键合界面是否存在空间层及其厚度分布,从而对键合质量进行了评估.

3.3 利用红外吸收光谱方法表征 InP-GaAs 直接键合质量

图 3(b)是二维扫描测试图 3(a)经石蜡处理过的键合样品不同区域的红外吸收光谱,并抽取各测试点 $3.509\mu\text{m}$ 波长吸收强度值作出的等值线图.其中深颜色区域代表吸收较大区域,虚线以左区域出现界面空间层,可以看出从右到左空间层逐渐变厚,因而键合过程中作用在晶片上的压力分布从右到左依次减小,图 3(b)等值线图相当于一张作用在晶片上的压力分布图,深颜色区域代表压力较小区域.局部界面空间层的存在不利于键合器件的制作,一方面可能导致该区域上下结构的电绝缘,无法用于器件的制备,同时它的存在改变了微腔器件结构的光学谐振腔长,另一方面它会导致键合后样品在剥离 InP 衬底过程中 InP 基外延薄膜的脱落,难于进行后工艺处理,因此,为了键合制备高性能器件,界面空间层的出现是必须避免的,这就需要改进键合装置施力的均匀性.

一般地,施加压力的方法有:通过物体自重加压、外界通过媒介施压或通过两种材料热膨胀系数不同产生压力等,总的来说这些施力形式可以归结为如图 5(a):力通过一个具有平整表面的物体施加于晶片表面,自重施压可以认为是外力为零的情形;考虑施力物块仅充当施力媒介的作用即忽略其重量对压力的影响,分成两种情形:一是外界施力装置与物块固定在一起,这种情况下外界施力方向偏离垂直方向时致使物块微小倾斜如图 5(b),造成晶片表

面压力分布的不均匀,进而导致晶片边缘局部区域接触不紧密,第二种情形是施力装置与物块可以联

动,即外界施力方向微小倾斜时,物块仍保持原来位置如图5(c),此时垂直作用在晶片上的压力虽然其

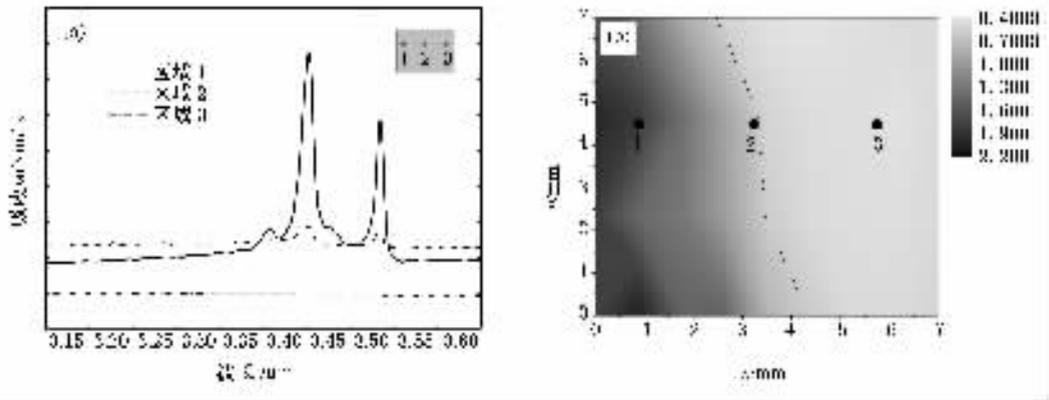


图3 退火温度为 560℃、压强约为 5MPa 下采用改进前装置键合的 InP - GaAs 结构在经过石蜡处理后的界面红外吸收特性 (a)区域 1、2 和 3 的红外吸收光谱 (b) 3.509 μm 波长吸收强度等值线图

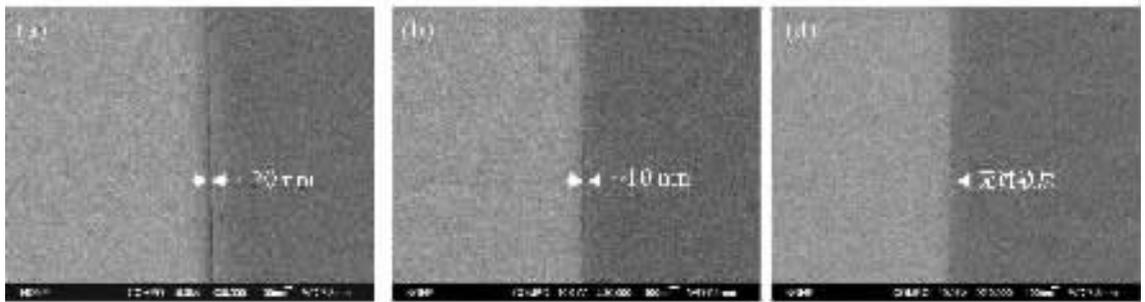


图4 键合温度为 560℃、压强约为 5MPa 下采用改进前装置键合的 InP-GaAs 结构的断面 FESEM 观察图 (a)(b)和(c)分别对应于图 3(b)中区域 1、2 和 3 的横断面图

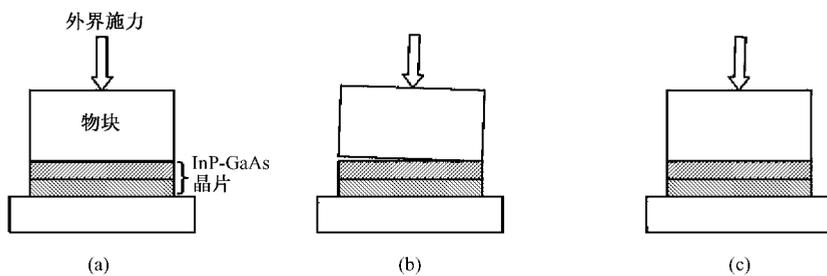


图5 键合施压原理示意图 (a)压强垂直作用于晶片表面 (b)外界施力装置与物块固定 (c)外界施力装置与物块联动

大小发生变化但仍保持均匀分布。

我们实验中根据图 5(c)原理改进了装置施力的均匀性,并分别键合得到了键合温度为 620℃、压强约为 50MPa 以及键合温度为 620℃、压强约为 2MPa 条件下的 InP-GaAs 结构。图 6(a)是压强约为 50MPa 经石蜡处理过的键合样品的 3.509 μm 波长吸收强度等值线图,其中不同区域吸收谱线均未有吸收峰出现,表明界面不存在空间层,FESEM 断面观

察图同时证实了这一点,如图 6(b)。图 7 是压强约为 2MPa 经石蜡处理过的键合样品的 3.509 μm 波长吸收强度等值线图,其中不同区域吸收谱线均未有吸收峰出现,同样表明界面不存在空间层;图 6(a)和图 7 的吸收光谱上 3.509 μm 吸收强度所有测试数据点的标准偏差分别为 0.0525 和 0.0453,说明适当减小压强对于提高键合结构的均匀性可能是有利的。因此均匀的键合压强对于获取无界面空间层且

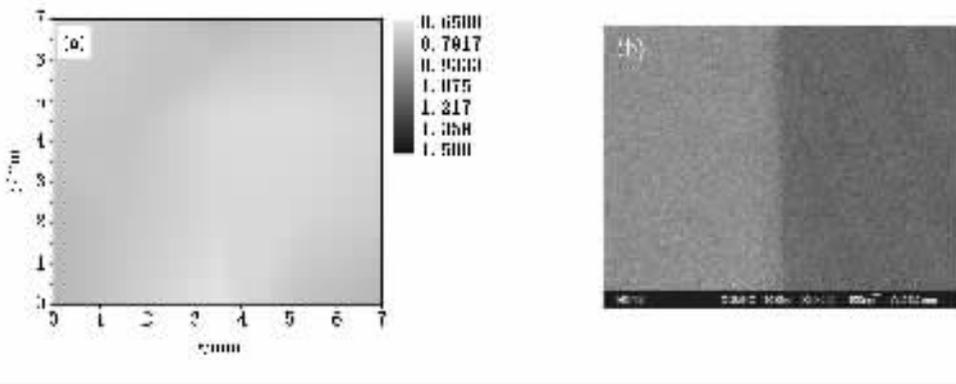


图 6 键合温度为 620℃、压强约为 50 MPa 下采用改进后装置键合的 InP-GaAs 结构在经过石蜡处理后的界面质量表征 (a) 3.509 μm 波长吸收强度等值线图, 各测试点吸收强度标准偏差为 0.0525 (b) 扫描电子显微镜横断面图

均匀性良好的 InP-GaAs 键合结构是很重要的。

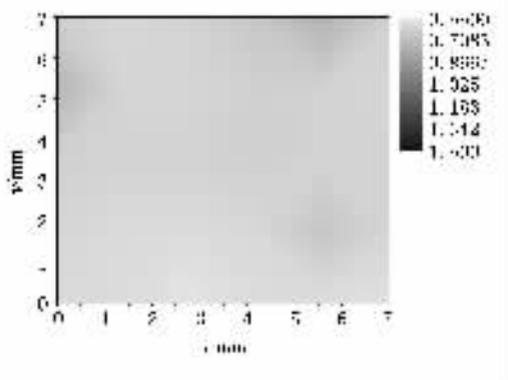


图 7 键合温度为 620℃、压强约为 2MPa 下采用改进后装置键合的 InP-GaAs 结构在经过石蜡处理后的 3.509 μm 波长吸收强度等值线图, 各测试点吸收强度标准偏差为 0.0453

4. 结 论

本文采用红外吸收光谱技术分析了 InP-GaAs 直接键合结构的界面质量. 扫描电子显微镜的断面观察发现, 在不均匀外加压力下制得的 InP-GaAs 键合样品局部区域出现了不连续的界面空间层. 将熔融石蜡渗透并填充到这样的区域, 利用石蜡对 3.509 μm 波长的强烈吸收特性进行了该空间层的检测. 二维扫描测试晶片表面的红外吸收光谱, 并截取 3.509 μm 吸收强度数据作出等值线图, 从而描绘出了不连续空间层在键合界面的厚度分布图, 反映了键合质量及其均匀性. 我们通过改进施加压力的均匀性, 使螺杆施加于晶片上的力始终与晶片表面垂直的办法, 达到了键合装置施加于键合样品上压力均匀的目的, 并制得了不存在界面空间层且均匀性良好的键合样品, 有望应用于光学微腔等键合器件的制备.

- [1] Haisma J and Spierings G A C M 2002 *Materials Science and Engineering R* **37** 1
- [2] Lasky J B 1986 *Appl. Phys. Lett.* **48** 78
- [3] Weldon M K, Chabal Y J, Hamann D R, Christman S B, Chaban E E and Feldman L C 1996 *J. Vac. Sci. Technol. B* **14** 3095
- [4] Piotrowski T and Jung W 2000 *Thin Solid Films* **364** 274
- [5] Hirsekorn S, Koka A, Wegner A and Arnold W 2000 *AIP Conf. Proc.* **509** 1367
- [6] Mori K, Tokutome K, Nishi K and Sugou S 1994 *Electron. Lett.* **30** 1008
- [7] Lo Y H, Bhat R, Hwang D M, Chua C and Lin C H 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 1038
- [8] Liao Z L and Mull D E 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 737
- [9] Li H Q, Zhang J, Cui D F et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2986 (in Chinese) [李惠青、张杰、崔大复等 2004 物理学报 **53** 2986]
- [10] Xin G F, Chen G Y, Hua J Z et al 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1293 (in Chinese) [辛国锋、陈国鹰、花吉珍等 2004 物理学报 **53** 1293]

Study on infrared absorption of interfaces in direct wafer bonded InP-GaAs structures^{*}

Lao Yan-Feng , Wu Hui-Zhen[†]

(*State Key Laboratory of Functional Materials for Informatics , Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology ,
Chinese Academy of Sciences , Shanghai 200050 , China*)

(Received 19 December 2004 ; revised manuscript received 28 February 2005)

Abstract

Direct wafer bonded InP-GaAs structures are studied by FTIR infrared absorbance spectra and FESEM cross-sectional observations. Experiments show that the non-uniformity of bonding pressure during the fabricating step results in the appearance of a spacer-layer at the InP-GaAs interface. By melting wax and filling it into this spacer-layer, locally unbonded areas can be characterized upon the optical absorbance peaks at 3.509 μm . The 3.509 μm absorbance-intensity mapping images the non-uniform distribution of bonding pressure, which was obtained by two-dimensionally scanning measurement of infrared spectra of samples. Uniformly bonded InP-GaAs structures with uninterrupted interface are fabricated after improving the uniformity of pressure of fixture, which will be prospect of preparing for large scale wafer bonding structures such as optical micro-cavity structures.

Keywords : direct wafer bonding , interfaces , infrared absorption spectrum

PACC : 7280E , 6848 , 4225B

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China(Grant No.2003CB314903).

[†] E-mail hzwu@mail.sim.ac.cn