

国家高技术信息领域
光电子器件与集成技术主题

1989 光电子器件与集成技术 年会论文集



内 容 简 介

本论文集收集了 1989 年光电子器件与集成技术年会的论文 184 篇, 内容涉及激光器、检测器等光通信器件; 其它光电子器件; 器件工艺、测试和应用系统; 光计算方法和器件等方面。这些论文总结了近年来我国光电子器件与集成技术研究的最新成果, 对该领域的科技人员及大专院校师生具有参考意义。

1989光电子器件与集成技术年会论文集

☆

清华大学出版社出版发行

北京 清华园

清华大学印刷厂印刷

☆

开本: 787×1092 1/16 印张: 35 字数: 825 千字

1990 年 3 月第 1 版 1990 年 4 月第 2 次印刷

印数: 601~1200

ISBN 7-302-00645-8/TN·16

定价: 12.00 元

1989 年光电子器件与集成技术年会
各委员会成员

顾问委员会 王大珩 王守武 叶培大 高鼎三 王之江

组织委员会

主席: 张克潜

副主席: 周炳琨 毋国光 钱宗钰

委员: (按姓氏笔画为序)

李克诚 伍树东 陈历学 陈良惠 陈学良 杜宝勋
杜国同 胡雄伟

学术委员会

主席: 王启明

副主席: 李淳飞 金国藩 龚瑾娴

委员: (按姓氏笔画为序)

方祖捷 刘弘度 刘式墉 吴彝尊 范希武 林宗琦
郭奕理 唐晋发 黄德修 谢麟振 蔡伯荣 潘慧珍

论文集编辑委员会

主编: 周炳琨

副主编: 杜宝勋

编委: (按姓氏笔画为序)

王启明 方祖捷 刘弘度 刘式墉 吴彝尊 陈良惠
杜宝勋 李淳飞 周炳琨 金国藩 范希武 张克潜
郭奕理 黄德修 谢麟振

秘书长 杜宝勋 胡雄伟

前 言

信息光电子器件与集成技术的发展,标志着信息技术正在从电子时代走向光电子时代,完全有理由相信,正如 20 世纪是电子产业的时代一样,21 世纪将是光电子产业的年代。

信息光电子器件与集成技术,是国家高技术研究和发展计划的主题项目之一。为了检查和总结工作,为了技术和学术交流,我们计划每年举办一届光电子器件与集成技术年会,面向全国征文,并公开出版年会的论文集。

89 年光电子器件与集成技术年会,于 1989 年 3 月 7-9 日在北京清华大学举行。这本论文集收入了本届年会的论文 184 篇,内容包括:激光器、检测器等光通信器件;其它光电子器件;器件工艺、测试和应用系统;光计算方法和器件。这些论文总结和交流了近年来取得的最新成果,有助于推动我国光电子技术的进一步发展。

论文集的出版,得到了清华大学出版社的热诚支持,中国科学院半导体研究所的王莉同志对该书作了大量的编校工作。但由于时间仓促,对编入的论文在图、文书写的规范化方面尚存疏漏之处,望请批评指正。

《1989 光电子器件与集成技术年会论文集》编辑委员会

1989 年 7 月

目 录

MOCVD 生长 InP 及 GaInP.....	李 景等	1
GaAs/Si 半导体异质结构材料的 MBE 生长与特性	李爱珍等	4
提高量子阱材料发光性能的研究.....	曾一平等	11
应力及膜厚度对 GaAs/Si 性能的影响	陈培毅等	14
MBE 生长 GaAs/Si 的 GaAs MESFET.....	李维中等	17
锗与锗硅合金应变超晶格红外光电集成材料的分子束外延生长.....	盛 麓等	20
GaAs/InP 选择外延生长.....	张国义等	23
非平面半导体衬底液相外延的动力学研究.....	赵东晖等	25
高 Bi 含量的 RIG 的外延生长	何华辉等	27
n-InP 光栅刻蚀的新技术——无掩膜光电化学法.....	伍 杰等	31
WSi _x 膜的制备与应用.....	杨沁清等	33
GaInAsP/InR 分布反馈激光器一级光栅的设计与制作	王舒民等	38
InP 材料准分子激光 APD 刻蚀特性.....	张玉书等	41
硅单片集成光接收器的工艺研究.....	陈学良等	45
用于面发射激光器的平面-平面及平面-球面反射腔体之比较.....	景星亮等	48
1.5μm 脊型波导分布反馈激光器	王 圩等	53
1.55μm DC-PBH 分布反馈激光器研制	蔡开清等	57
AlGaAs/GaAs 低阈值多量子阱激光器	徐俊英等	60
GaAs/Si 上的条形双异质结构激光器*.....	庄婉如等	63
(AlGa)As CSP 单模激光器及其谱线宽度.....	胡衍芝等	66
Al _x Ga _{1-x} As/GaAs CSP 可见光单模激光器	胡衍芝等	71
可见光半导体激光器结构的改进.....	杜国同等	74
P-GaAs 衬底大功率可见光 GaAlAs 激光器.....	张道银等	77
台阶衬底内条形半导体激光器锁相阵列.....	赵方海等	80
输出大于 130mW 的 GaAlAs/GaAs 锁相阵列激光器及其特性测试	方祖捷等	83
GaAs-GaAlAs 半导体激光器锁相阵列的研究.....	刘弘度等	86
一种具有可饱和吸收中心的半导体激光器.....	吴 松等	88
适用于 GaAs 光发射机单片集成的宽接触 BH 激光器的研制	胡礼中等	90
超高速激光二极管组件.....	詹玉书等	92
1.3μm 波长单模激光器实用化组件的研制	张莲英等	96
双区半导体激光器的稳定性理论.....	杜宝勋	100
GaAs/GaAlAs、InP/InGaAsP 双区共腔 (CCTS) 双稳激光器的实验研究	张权生	103
解理耦合腔半导体激光器两种不同工作状态的探讨.....	刘弘度等	106
光电混合集成半导体双稳器件.....	张培亮等	108

1.5 μm 外腔半导体激光器及其拍频的研究.....	惠荣庆等	112
InP/InGaAsP 单片集成光发射器特性的计算机辅助分析.....	李维旦等	115
一个简单光电集成电路的计算机辅助分析.....	陈维友等	118
1.5 μm 外腔单模半导体激光器.....	张汉一等	122
超高速 PIN 长波长探测器.....	石国裕等	127
CdSe-CdTe 快速光导探测器.....	吴乐琦等	128
硅单片集成光接收器的设计研究.....	陈学良等	131
Be 离子注入 InGaAs PINJFET 单片集成.....	李安民等	134
平面型 InGaAs PIN-JFET 单片集成光接收器的研究.....	张永刚等	136
光学互连用 GaAs 单片集成光接收器的设计及工艺研究.....	张永刚等	139
高阻抗 PIN-FET 光接收集成模块.....	王晨等	141
565Mb/s PIN—双栅 FET 前置放大器模块.....	刘连英等	144
GaAs 探测器与放大电路的单片集成.....	杨沁清等	147
准平面高增益 InGaAsP/InP (N-P-N) 异质结双极晶体管.....	李维旦等	151
1—1.6 μm 无栅皮秒条纹变象管的研制.....	高耀龙等	154
GaAs—GaAlAs 行波激光放大器.....	张月清等	159
1.3 μm 行波半导体激光放大器的最佳结构分析与放大实验研究.....	黄德修等	163
行波半导体激光放大器增益谱测量.....	余思远等	165
F-P 型半导体激光放大器的双稳态特性的理论和实验研究.....	董杰等	167
单量子阱渐变折射率波导吸收型光强调制器.....	熊飞克等	169
InGaAsP 相位调制器的研究.....	邬祥生等	171
高速铌酸锂电光相位调制器.....	吴伯瑜等	174
几种与偏振无关的 Ti: LiNbO ₃ M-Z 型调制器.....	余国贤等	178
导波声光 Bragg 调制器的研制.....	周愈波等	181
质子交换 LiNbO ₃ 光波导的研制.....	郭建恩等	184
Ti 离子注入 LiNbO ₃ 光波导.....	许承杰等	186
单模脊形波导模场分布的近似计算.....	周黎明等	188
加载条形波导定向耦合器耦合长度的分析.....	陈若滩等	191
多电极结构 $\Delta\beta$ 倒相定向耦合器调制特性分析.....	汤小泓等	194
用顶层法制作平面光波导偏转元件.....	赵柏秦等	197
Ti: LiNbO ₃ 波导型电光偏振态控制器研究.....	陈鹰等	200
InP/InGaAsP 单片集成光电子开关阵列.....	李维旦等	203
光交换机用开关阵研究.....	李德杰等	207
与偏振无关的 Ti: LiNbO ₃ 光开关及其阵列研究.....	李德杰等	210
Ti: LiNbO ₃ 单模 X 波导电光开关阵列.....	陆荣鑫等	212
1.3—1.6 微米全硅光波导的研制和全硅电光调制光开关的设计.....	刘恩科等	215
两种离子交换型平面微透镜阵列.....	高应俊等	218
塑料自聚焦复合透镜面阵列研究.....	刘德森等	222
GaAs MISHFET 的研制.....	杨沁清等	226

1.088 μm 掺钕光纤激光器的研制	王庆海等	229
稀土掺杂全光纤激光器和放大器	彭江得等	232
玻璃光纤放大器特性	陈泽兴等	236
光纤放大器特性计算	杨祥林等	238
光纤放大器分析的线性模型法	曾庆济等	244
$\lambda=1.52\mu\text{m}$ 光纤波片型单模光纤偏振控制器	李玲等	247
多模光纤在延时自外差线宽测量系统中的运用	柴燕杰等	250
半导体光电子器件的发展与光产业	陈良惠	252
光子交换的原理与进展	郭奕理等	255
1.5 μm 外腔半导体激光器相干光光纤通信实验系统	吴彝尊等	263
140Mb/s 传输系统的研究	高杰等	265
140Mb/s 相干光纤通信系统与中频跟踪锁定系统	江泉等	267
565Mb/s 混合集成光纤通信系统	陈季文等	271
光通信中高次群码型变换的探讨	许谷梅等	274
时分光子交换系统的设计及研究	查开德等	277
空分光交换系统及控制方式	张淑萍等	281
光交换系统“读出门”的设计与实验研究	陈才和等	285
一种光电混合型微型机网开关系统的设计	申铉京等	289
一种光电混合专家系统专用机 HOESM 的设计	申铉京等	292
单模半导体激光器谱宽测量与稳频	高中林等	295
谱线中心频率取样反馈式半导体激光器稳频系统	余思远等	298
InP-InGaAsP BC 激光器高速调制特性的研究	肖建伟等	301
分辨率 $<10\text{kHz}$ 的扫描光纤环形干涉仪谱宽测量技术	岳超瑜等	305
PS 光电导开关与高速光电采样技术的研究	关信安等	308
利用微微秒光电导取样技术测量超快光电探测器的响应时间和联接件的色散展宽	袁树忠等	311
直接调制产生超短脉冲	廖青等	315
用 1.3 微米 GaInAsP/InP 激光器产生的超短光脉冲及其强度自相关测量	贾刚等	317
一种测量超短光脉冲实际波形的新方法	郭凤珍	322
光纤通信用 Ge、Si、InGaAs 光电探测器的微微秒级快速响应测量	李岐旺等	325
高重复率半导体激光脉冲晃动的研究	詹玉书等	330
ns 与 ps 激光脉冲在硅晶体中相干放大	杨向明等	336
将 1.5 μm InGaAsP BH 外腔激光器频率稳定到 NH_3 分子吸收线上	谢毅等	339
使用锁定于铯原子束 D_2 谱线上的 F-P 腔稳定 AlGaAs 激光器的频率	谢川等	342
一种用微微秒激光脉冲实现高分辨率光学探测的新方法	刘玉璞	345
用电负反馈方法压低半导体激光器的 FM 噪声的新实验结果	周建英等	349
用端面耦合技术测量平面光波导特性的实验研究	赵柏秦等	351
利用棱镜耦合方法进行不可见光在非透明波导中的耦合实验	刘用胜等	354
光折晶体 Fe: LiNbO ₃ 的多波混频及在图象处理中的应用研究	赵明君等	356
多功能二进制光学数字处理器	张雷等	361
用二维光双稳阵列完成符号替换光计算	曹明翠等	364

由激光二极管或发光二极管混合双稳态回路构成的光学全加器与多值逻辑	刘树田等	368
先行进位光学并行全加器	陈历学等	370
利用二维空间编码实现光学数值逻辑运算	张 戟等	374
光学符号代换法则 (OSSR) 的应用研究	周少敏等	377
MSD 数字光学运算新方法	陈智勇等	381
光学计算中的真值表查找法	吴 斌等	385
应用液晶光阀的实时光学逻辑运算系统	陈智勇等	388
用傅里叶谱的虚部和实部信息作字符识别	徐克畴等	391
综合联想记忆: 对 Hopfield 模型的一种修改	周菡婴等	394
光学全并行矩阵运算	钱秋明等	396
光学多通投影相关矩阵——矢量乘法器	黄洪欣等	401
光电混合的二维联想存储器	母国光等	405
利用液晶电光开关的实时相联存储器	许克彬等	408
交流液晶光阀的反馈特性和双稳态	赵焕卿等	411
由液晶电光开关构成的光学逻辑器件	王瑞波等	414
全光并行四比特乘法器	卢学农等	416
ZnS 双腔干涉滤光片高对比度光学双稳态	熊 俊等	419
光学双稳干涉滤光片的工艺改进与器件优化	孙寅官等	422
VPE ZnSe 单晶薄膜的光学非线性吸收	张吉英等	425
ZnSe/ZnS _x Se _{1-x} 应变层超晶格的光学非线性吸收	范广涵等	429
ZnSe-ZnS 超晶格及其光电特性	范希武等	433
ZnSe/ZnS、ZnSe/ZnTe 超晶格的 MBE 生长及特性	王海龙等	436
波导型及 F-P 腔型 ZnSe/ZnS、ZnSe/ZnTe 量子阱 BOD 结构	徐 梁等	440
等光强分束器的设计与制造	卢学农等	442
一种实时光学信息处理用空间光调制器——PROM	徐良瑛等	445
PLZT 薄膜空间光调制器的研制	乌蔚曙等	449
GaAs/GaAlAs 量子限制 Stark 效应及自电光效应的室温光电流研究	吴荣汉	451
光栅耦合导波功率限制器	徐 迈等	455
离散取样图形的光学变换	陈岩松等	458
体全息及互连元件的实验研究	刘 畅等	460
全息互连元件的几点考虑	陈西园	465
超大规模集成电路光互连技术的进展	耿完楨等	468
二维空间光调制器的研究和应用	陈益新	474
结构新颖的 InGaAsP/InP 面发射激光器	陈妮兮等	483
Ga _{1-x} Al _x As/GaAs 激光器锁相阵列结温和热阻的实验研究	林岳明等	484
半导体激光器的主动锁模技术	高以智等	486
1.3μm 光纤外腔主动锁模激光器的实验研究(提要)	张位在等	849
集成用高光增益 InGaAs/InP 异质结晶体管	颜迎潮等	491
用掺 Zn-SiO ₂ 乳胶源制造平面型 InP 二极管	姚文卿等	493
1.5μm InGaAsP/InP DFB 激光器光栅研制	刘永智等	494

用激光诱导腐蚀法研制集成半导体激光器的一级光栅	孙成城等	496
反应离子刻蚀中断面轮廓的形成	李建中	498
紫外激光在光电子和集成技术中的应用	楼祺洪等	500
新型封装用基板材料——低温烧结陶瓷	仇英章等	503
量子阱材料中的电致吸收与吸收型量子阱光强调制器调制特性的理论分析	熊飞克等	504
反结构型反射式多量子阱调制器	林世鸣	505
LiNbO ₃ 中 Ti/Mg 双扩散隐埋波导的研制	龚小成等	507
扩 Ti:LiNbO ₃ 光波导开关阵列的设计与制作	龚小成等	507
1.5 μ m X 切 Y 向 Ti:LiNbO ₃ 条波导相位调制器	高福斌等	508
相干法测试半导体调制器的相位移效率	吴学海等	510
GaAs Mach-Zehnder 干涉型电光波导调制器的分析与设计	王明华等	511
SOS 微微秒光导开关研究	潘家齐等	514
单模波导电光调谐带通滤波器	陈新之等	515
具有锯齿槽形的变周期光栅	孙雨南等	518
光学 2-bit A/D 变换器的设计与制作	陈 铮等	519
GaAs 高速差分放大电路	郭书卫等	521
掺铒 [Er ³⁺] 光纤光放大器理论分析	曾庆济等	522
光纤电光开关	胡台光	524
掺稀土离子光纤特性的研究	张 翔等	526
用液相掺杂技术制作稀土掺杂光纤	吴方东等	528
利用迭代 FEM 方法求解任意折射率分布单模光纤的色散参数	张国平等	530
自聚焦型玻璃光波导研究	刘德森等	533
光半导体玻璃非线性理论	张建国	535
无象差波导短程透镜的研制	范清俊等	536
从自聚焦透镜的发展到自聚焦透镜列阵的研制	刘德森	538
集成光学声光频谱分析系统技术	许政权等	540
光学模数转换器的研制	李宝贞等	541
半导体非线性 F-P 标准具对 ns 脉冲的整形	刘玉东等	542
Ⅰ—Ⅵ族材料光学非线性吸收测量技术	陈连春等	544
非线性光学薄膜和 ZnS 光双稳器件的研究	杨树梅等	545
二维空间光调制器的研究和应用	陈益新	546

MOCVD 生长 InP 及 GaInP

李 景 章其麟 关兴国 王苏眉

(机械电子工业部第十三研究所)

一、引 言

近年来, 由于用 GaInP/AlGaInP 异质结构材料制作可见光激光器的成功, GaInP 的生长研究重新受到了人们广泛的重视。MOCVD 作为生长异质结构材料的重要方法, 已在这一领域的研究中取得了令人瞩目的进展, 目前用 MOCVD 法已经制备出了高性能的 GaInP 及 AlGaInP 材料^[1], 并取得了较好的器件结果^[2]。

在国内, 由于原料及设备等方面的原因, MOCVD 的研究进展比较缓慢, 含 In 化合物的生长研究^[3], 只是刚刚开始, 还未见有关 MOCVD 生长 GaInP 的报道。

近几年, 我们研究了 TMIn 的合成及提纯技术, 在国内首先制得了较高纯度的 TMIn, 并用制得的 TMIn 及国产气体源, 在自己组装的设备上进行了 InP 及 GaInP 生长的基础研究。

二、实 验

生长所用的设备是自己制造的, 由气路系统、反应管、高频炉及尾气处理等部分组成。气路有生长路和旁路, 以获得稳定的初始流量及改善生长界面, 气体流量由质量计控制, 反应管包括内管和外管, 外管为圆套管, 内管为方形反应管, 高纯石墨为基座, 反应温度由高频炉温度控制器自动控制。

实验所用 TMGa 和 TMIn 是自己制备的, 用 H₂ 稀释的 PH₃(5%)及 AsH₃(10%)由保定红星单晶厂提供。纯 H₂ 作为主气及 MO 源的携带气体。衬底为(100)偏(110)的半绝缘 GaAs 或 InP。衬底在生长前用常规方法腐蚀、清洗。

外延层厚度解理后用显微镜测量。用 Hall 法, PL 光谱, 扫描电镜能谱及 X射线双晶衍射测量外延层的质量。

三、结果与讨论

1. InP

InP 的生长主要是在 InP 衬底上进行的, TMIn 的温度保持在 25℃(3.34mmHg)。生长温度为 550℃—680℃, V/Ⅲ比为 10-60。外延层表面光亮。

图 1 表示生长速率与 TMIn 量之间的关系。我们看到，生长速率随 TMIn 的增加接近于线性增加。由 TMIn 的浓度及生长速率我们可以得到 InP 的生长效率^[4]约为 $7.5 \times 10^3 \mu\text{m}/\text{mol}$ ，这个生长效率是相当高的。

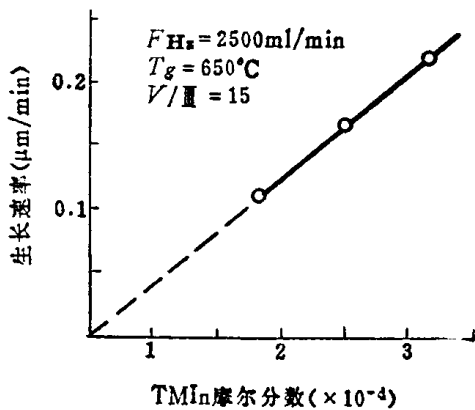


图 1 生长速率与 TMIn 量的关系

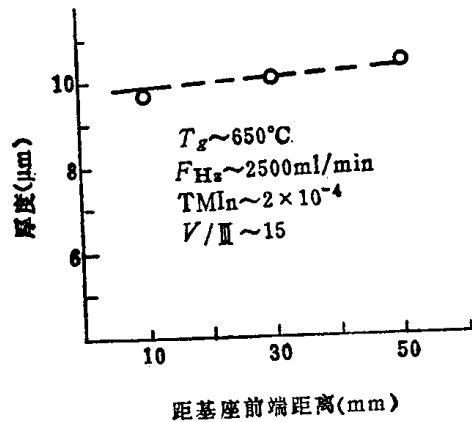


图 2 InP 外延层均匀性

图 2 给出了在基座不同位置处外延层的厚度。从图可以看出，外延层在整个基座范围内有很好的厚度均匀性，其不均匀性 $< 5\%$ 。

实验中我们发现，生长温度及 V/III 比对生长速率影响不大，说明 InP 生长与 GaAs 生长类似，生长速率主要由 TMIn 的浓度决定。

我们知道，在国外早期进行的 MOCVD 生长含 In 化合物，常提到 In 源与 PH_3 的预反应^[1]，这种预反应可导致生长效率很低，并使外延层的均匀性变差（当然，生长效率和均匀性与其它因素如反应管的结构关系很大），人们曾采用各种方法来消除预反应。从我们外延生长速率、外延层厚度均匀性及实验观察来推断，用我们提纯的 TMIn 生长 InP 基本上消除了预反应，并且反应器的形状也是比较合适的。

外延层的电学参数用 Hall 法作了测量。结果表明，外延层全为 P 型电导，P 型浓度为 $10^{16} \sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 之间，典型值为 $1.7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ ，相应的迁移率 μ_p 为 $200 \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，出现 P 型可能主要是因为 TMIn 中 P 型杂质含量过高的缘故。

InP 外延层的 77K PL 光谱如图 3 所示。该图显示外延层有较强的带边峰，在长波方向还可看到宽的发射带。这个发射带的峰值强度随 V/III 比的减小有增大的趋势。它可能来源于外延层中的 C 及其它杂质。

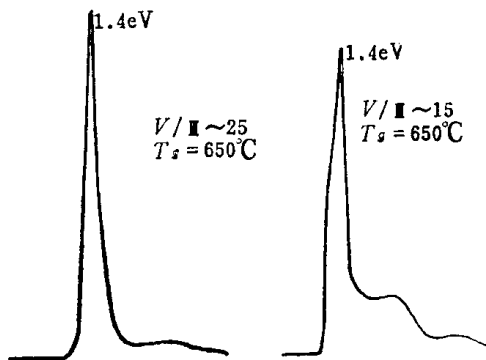


图 3 77K PL 谱

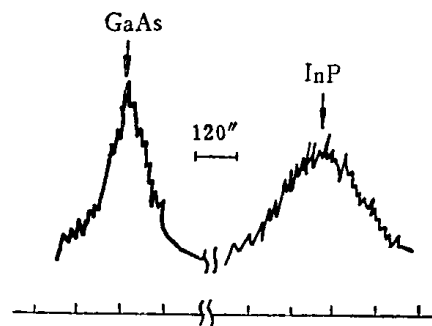


图 4 InP/GaAs X射线双晶衍射图

我们还在 GaAs 衬底上进行了生长 InP 的研究。生长的 InP 表面光亮，接近于同质外延。用 X 射线双晶衍射对样品作了分析，如图 4 所示。结果表明，GaAs 上生长的 InP 晶体质量良好。

2. GaInP

GaInP 的生长是在 GaAs 衬底上进行的。TMGa 温度为 25°C (~16mmHg)，TMIn 的温度为 18°C (~1mmHg)。生长温度为 650°C，TMGa 流量固定在 5ml/min，通过改变 TMIn 的量来改变 GaInP 的组分。

用扫描电镜能谱测量了 GaInP 的化学组分。图 5 表示 GaInP 中 In 含量与气相中 In 含量的关系。可以看到，外延层中 In 的化学组分比计算得到的气相 TMIn 含量明显偏低。我们认为，这种偏离可能是由下面原因造成的：一是可能实际气相组分与计算的化学组分不一致。气相组分是根据平衡蒸汽压算出的，而 TMIn 是固体源，其蒸发量与表面积有关，当流量较大时，可能实际有效蒸汽压比平衡蒸汽压小。二是可能 TMIn 与 PH₃ 发生了预反应。使得一部分 TMIn 消耗在管路中；三是可能在气固界面上 In 与 Ga 的分凝系数不一样。从前面 InP 的生长结果及所掌握的资料来看，后两种因素的可能性较小。如果假设前一种因素是主要的，并假定 TMGa 在 -25°C 下有效蒸汽压仍为 16mmHg，可以推出这种条件下 TMIn 的有效蒸汽压约为 0.45mmHg，据此可对曲线进行修正，图 5 中示出了修正后的曲线，与对角线的关系基本相符。

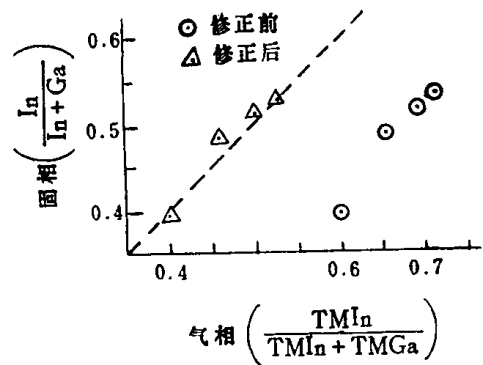


图 5 固相 In 组分与气相 In 组分的关系

图 6 给出了不同基座位置上外延层中 In 的含量，从图可以看出，在基座前部 In 偏大，后部偏小。总体来看，组分的均匀性还是较好的，前后片的组分偏差 < 5%。

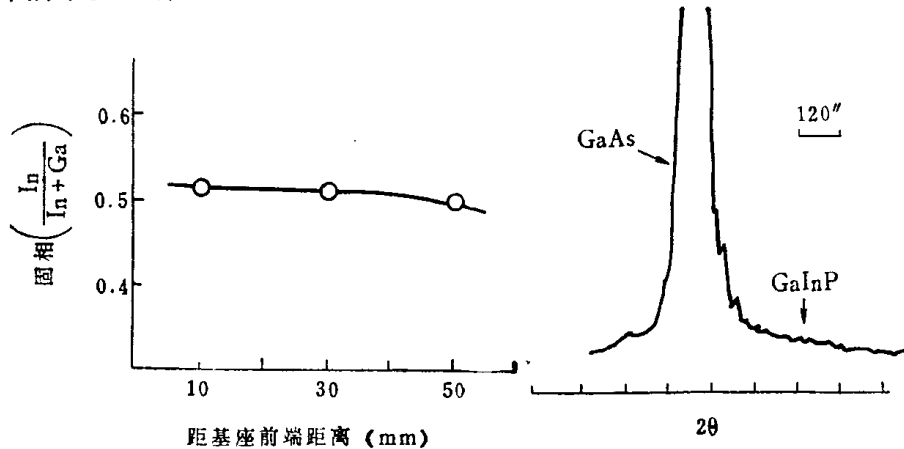


图 6 GaInP 中组分均匀性

图 7 GaInP X 射线双晶衍射曲线

图 7 为 GaInP 外延片的双晶衍射曲线。从该图看不到明显的 GaInP 峰值，只能看到一个小的平台。这说明 GaInP 外延层的纵向组分不均匀，有一个小的分散，产生

这种分散的主要原因可能是 MO 源的蒸发量变化造成的。图中给出的平台边缘处的晶格失配约为 2.5×10^{-3} 。

四、结 论

用自己合成的源及国产 PH_3 、 AsH_3 进行了 InP 及 GaInP 的生长研究, InP 外延层的均匀性好, 生长效率高, 具有较强的 PL 带边峰, 在 GaAs 衬底上生长的 InP 具有良好的晶体质量。GaInP 外延层均匀性好、表面光亮, 经过修正后固相组分与气相组分基本相符, 外延层与衬底晶格失配可 $< 3 \times 10^{-3}$ 。

参 考 文 献

- [1] 见 JCG77 (1986), 347—335
- [2] M. Ikeda et al., A.P.L., 48 (1986), 89
- [3] 元金山等. 一九八七年全国半导体年会文集 (北京平谷)
- [4] G. B. Stringfellow, J. C. G., 70 (1984), 133

GaAs/Si 半导体异质结构材料的 MBE 生长与特性

李爱珍 王建新 邱建华 郑燕兰 梁秉文
王绍渤 杨悦非 李存才 胡福义 胡 伟

(中国科学院上海冶金研究所)

一、引 言

直接跃迁能带结构的 GaAs 化合物半导体, 由于既具有高迁移率、优异的光特性, 很高的抗辐照特性, 又可制成半绝缘材料进行电隔离, 而成为高速、高频微波器件和光电器件的重要材料。元素半导体 Si 则具有高纯度、高完整性、大直径的晶片, 以及高热导率、高强度、易于加工而成为高集成度电路和大功率器件的重要材料。因此, 把这两类重要半导体材料的优点集合于同一芯片上, 构成 GaAs/Si 异质结, 以开拓新型半导体异质结材料和器件及 IC 的新领域, 一直是长期来人们所追求的目标。然而, 尽管 GaAs 和 Si 分别是被研究得最为深入和应用最为广泛的半导体材料, 但在 Si 衬底上直接外延生长 GaAs 构成异质结却是半导体材料科学和工程中难度最大的课题之一。这是由于 GaAs/Si 体系存在如下问题: 1. 晶体结构对称性的不同, 导致反相无序和孪晶生长以及界面电荷不平衡; 2. 晶格常数失配高达 4%, 导致高密度失配位错及晶格畸变; 3. 热膨胀系数失配高达 61%, 在冷却过程中, 在 GaAs 一侧造成张应力, 导致异质结曲翘, 甚至开裂、剥落; 4. 来自 Si 衬底的自扩散; 5. Si 衬底的 SiO_2 在化合

物 MBE 系统中难以去除干净,因而造成多晶生长。由于这些难题,直至 1984 年,美国 IBM 实验室首次报导用 MBE 方法在 Si 衬底上直接生长无反相无序的 GaAs 单晶薄膜获得成功^[1],引起各先进国家的极大关注和兴趣。自 1984 年以来这一体系在材料制备和器件应用上均获得了飞速的发展,而成为国际前沿研究专题,文献[2—5]已对此进行了很好的总结。从材料的进展看,这几年国际上主要集中于解决反相无序生长和失配位错的降低,而对反相无序生长的起因仅限于从晶体结构的对称性来考虑,对 GaAs/Si 体系的电学特性、光学特性、结特性,以及它们和生长参数的关系则报导甚少。由于 GaAs/Si 体系既具有揭开极性/非极性半导体异质结晶体生长奥秘的科学意义,又具有开拓新型半导体异质结材料和复合半导体器件及 IC 的明确应用背景,1984 年,我们在 SiO₂/Si 上进行 GaAs SOI MBE 生长之后,进行了在 Si 衬底上直接分子束外延生长 GaAs 和选择外延生长的初探,于 1985 年选择了 GaAs/Si 课题作为主攻目标,在 1986 年开展了 GaAs/Si 异质结的分子束外延生长与研制,我们首先从起始成核和反相无序生长的起因及其消除途径入手,成功地获得了薄层 GaAs/Si 单晶膜,同时用喇曼谱、背散射构造和俄歇谱开展了界面应力分析和 Si 与 GaAs 互作用的研研^[6-18]。本文着重报导 1987 年以来的结果。自 1987 年开始,我们以研制器件质量水平的 GaAs/Si 材料为目标,综合考虑了 GaAs/Si 体系的特点,解决影响材料质量的关键技术问题和科学问题,建立了有自己特色的生长工艺,成功地制备了很宽浓度范围的厚层 2—10 μ m 的 N 型和 P 型 GaAs/Si 异质结和多层结构材料,同时在国际上首次报导了很宽浓度范围内 N 型和 P 型 GaAs 异质结的电学特性,光学特性、完整性(DCRC 与 EPD)及其与生长参数的关系,这些结果为进一步提高材料质量,为全面开展 GaAs/Si 体系的多数载流子器件、少数载流子器件和混合 IC 以及特殊结构的超晶格量子阱材料的研制打下了扎实的基础。

二、实 验

本工作所采用的分子束外延系统为本所与沈阳科仪厂协作并对样品预处理室、生长室、液氮大冷屏、样品架、束源炉、升华泵系统进行了技术改造和改进的原 FS—II 型国产 MBE 系统。改造后样品尺寸为一英寸,7NGa、7NAs、6NAl、n 型掺杂剂 Si、P 型掺杂剂 Be 分别盛于科学院金属研究所研制的 PBN 坩埚内,衬底分别采用低阻、中阻和高阻 n 型或 P 型区熔 Si 单晶片或直拉单晶片,晶向大多数采用(100)偏(110)⁴°,非极性晶向(110)、(211)、(311)也被用于某些研究。衬底进行有机试剂脱脂清洗,化学腐蚀,去离子水冲洗,过滤 N₂ 气吹干。用 In 作粘结剂将 Si 片贴于 1 英寸的 Mo 块上,装入预处理室,在 200~250 $^{\circ}$ C 下脱气 30 分钟。然后进入生长室,在 850 $^{\circ}$ C 下高温脱气。外延生长采用多步生长法和多周期 AlAs GaAs 应变超晶格作缓冲层,生长速率为 0.2—0.8 μ m/小时,用解理面染色法测外延层厚度。

用光学显微镜观察外延层形貌,用改进的 AB 腐蚀液显示外延层腐蚀坑密度^[19],用高分辨透射电镜观察界面(HRTEM),用俄歇能谱仪结合电化学 C—V 测定 Si 的自扩散深度、浓度与生长条件关系。用电子衍射测定衍射花样,用喇曼谱和背散射离子

沟道测定薄层 GaAs/Si 界面应力, 用范德堡法测定外延层的自由载流子浓度和迁移率, 用低温光致发光谱测定带边峰位置及半峰宽以检验外延层质量, 用双晶扭摆曲线的半峰宽测定 GaAs/Si 异质晶体完整性。综合所有参数, 对 GaAs/Si 异质结质量进行全面评估。还进行了器件验证。

三、结果与讨论

1. 掺 Si N 型 GaAs/Si 异质结材料的 MBE 生长与性质

Si、Sn、Ge 是常见的 MBE GaAs n 型掺杂剂。Sn 和 Ge 可获高掺杂浓度, Sn 具有分凝效应, Ge 的补偿度较大。Si 在 MBE GaAs 中存在饱和溶解度 ($5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$) 问题, 但补偿度小, 可获优质 n 型 GaAs。我们选用 Si 作为 n 型掺杂剂, 在高阻 P 型 Si ($\sim 10^4 \Omega \text{cm}$) 和高阻 n 型 Si 衬底上, 进行掺 Si GaAs 分子束外延生长。用范德堡法测定自由载流子浓度和迁移率。图 1 示出 N 型 GaAs/Si 的室温电子迁移率与电子浓度的关系曲线, 空心圆圈 \circ 为我们的 GaAs/Si 的数据, 三角 \triangle 为文献上发表的 N-GaAs/Si 的数据, 实心圆圈 \bullet 为文献上 MBE N-GaAs/GaAs 的最佳数据^[20]。从图 1 可见, 我们在 Si 衬底上生长的 GaAs 的电学性质已接近在 GaAs 衬底上生长的 GaAs 同质结的电学参数。

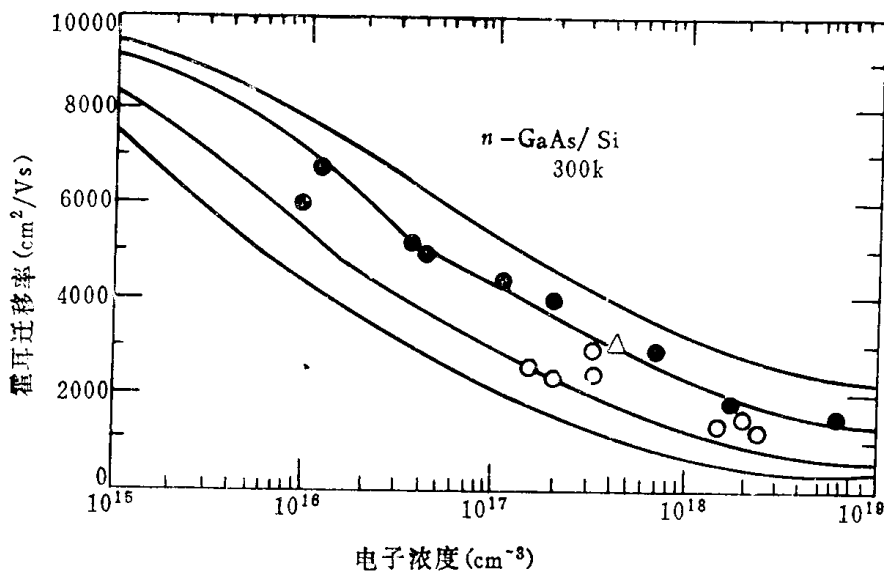


图 1 室温下掺 Si n 型 GaAs/Si 霍尔迁移率与电子浓度的关系
 \circ 为本工作 n-GaAs/Si 数据。 \bullet 为取自文献(7)n GaAs/GaAs 的最佳数据。 \triangle 为文献(2)n-GaAs/Si 数据。

X 射线双晶扭摆曲线的半峰宽 (DCRC 的 FWHM) 是表征异质结外延层完整性的重要方法。我们对不同生长工艺和不同浓度、厚度的 GaAs/Si 异质结进行了 DCRC 测量。外延层的浓度为 $10^{17} - 10^{18} \text{cm}^{-3}$, 厚度为 $1.4 - 10.4 \mu\text{m}$, 其 DCRC 的 FWHM 的最佳值为 175 弧秒, 一般为 210—350 弧秒 ($5 \times 10^{17} - 3 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)。国际上 MBE GaAs/Si 的 DCRC 的 FWHM 最佳值为 180 弧秒^[21], 一般为 300—360 弧秒。图

2 为 DCRK 的半峰宽与外延层厚度的关系,

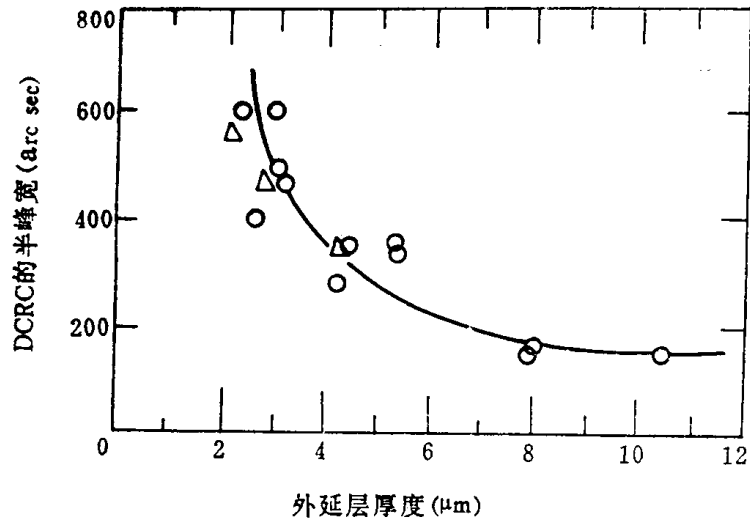


图 2 GaAs/Si X射线双晶扭摆曲线半峰宽与外延层厚度的关系
O 为 n-GaAs/Si, Δ 为 p-GaAs/Si。

低温光致发光谱中带边峰位置及其半峰宽和强度是表征外延层内在质量的重要尺度, 我们对 50 多个样品进行了 23—28K 下的 PL 谱测量。结果表明, 样品具有主峰 A 和杂质峰 B。图 3 为我们的 MBE GaAs/Si 的低温 PL 谱图。为了比较, 同时给

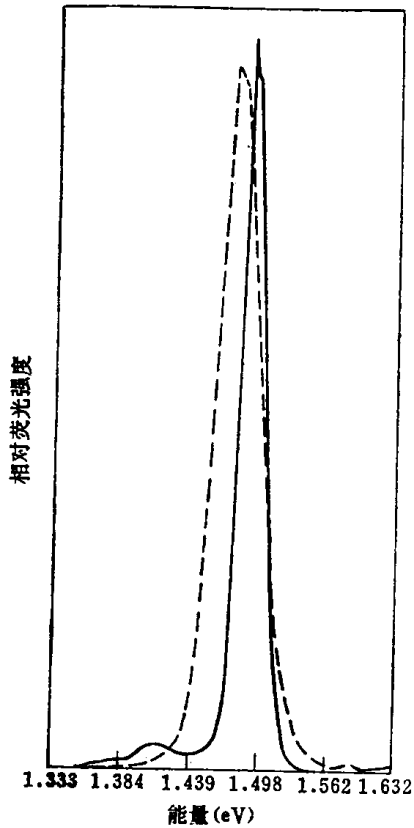


图 3 MBE 掺 SiGaAs/Si PL 谱(28K), $n=3.5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$, 虚线为日本 MOCVD GaAs/Si $n=3.6 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$

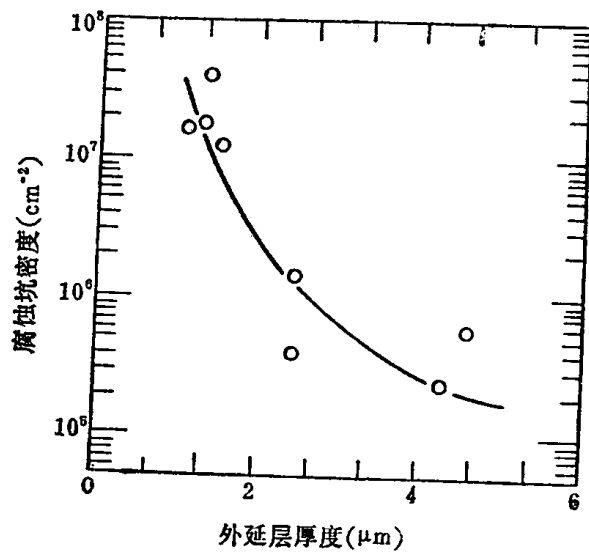


图 4 MBE GaAs/Si 腐蚀坑密度与外延层厚的关系

出在相同条件下我们测量的 1988 年日本 MOCVD GaAs/Si 的谱图。

GaAs/Si 的主峰 A 位于 $1.500\text{--}1.506\text{eV}$ ，具有很强的荧光强度，其位置与相同载流子浓度的 GaAs/GaAs 的带边峰位置相比向低能端位移若干毫电子伏，半峰宽随掺杂浓度增加而展宽， $n = 3.5 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ 的样品，FWHM 为 21meV 。我们认为 GaAs/Si 的带边峰的位移是由于 GaAs/Si 的应力所引起的。同时测量的日本 MOCVD GaAs/Si 的两个样品的主峰 A 的位置分别在 1.474eV 和 1.481eV ，FWHM 为 45meV ($3.6 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$) 和 30meV (10^{16}cm^{-3})。美国 MOCVD GaAs/Si 样品的主峰 A 的位置在 1.489eV 。我们样品的杂质峰初步认为是与空位有关的络合物，其本性正在进一步研究中，关于 GaAs/Si 剩余应力的分析将另文报导^[21]。

腐蚀坑密度 (EPD) 是检验失配体系异质结完整性的重要标志，也是检验生长工艺合理性的重要尺度之一。国际上的 MBE GaAs/Si 体系，早期 (1984 年) 界面的腐蚀坑密度高达 10^{12}cm^{-2} 。目前报导的最佳水平，在 GaAs/Si 异质结中已降到 10^7cm^{-2} ，在量子阱结构中已降到 $2\text{--}5 \times 10^6\text{cm}^{-2}$ 。我们用化学腐蚀法显示不同生长工艺生长的不同外延层厚度和电子浓度的 GaAs/Si 异质结的 EPD，结果列于图 4，EPD 的最佳结果为 $2.3 \times 10^5\text{cm}^{-2}$ 。采用我们建立的新工艺，EPD 可重复地控制在 $10^5\text{--}10^6\text{cm}^{-2}$ 。由于 GaAs 和 Si 的热膨胀系数失配达 61% (相差 260)，国际上报导当外延层生长 $>5\mu\text{m}$ 时将产生碎裂。为考验我们工艺的合理性，我们分别生长了 $5.2\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ 、 $10.4\mu\text{m}$ 的 GaAs/Si。在显微镜下观察， $5.2\mu\text{m}$ 厚的外延层光亮平整，未见任何开裂。厚度为 $8\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 的外延层，可观察到整齐的裂缝。

2. 掺 Be P 型 GaAs/Si 异质结材料的 MBE 生长与性质

Zn、Mg、Mn、Ge 在 MBE GaAs 中，或由于粘附系数等于零，或由于蒸气压过高难以控制，或由于分凝效应，或由于补偿度大，被认为不是理想的 MBE GaAs P 型掺杂剂。Be 虽毒性较大，但可获得高掺杂浓度和高迁移率而被认为是理想的 MBE GaAs P 型掺杂剂。我们选用 Be 作为 P 型掺杂剂。在高阻 n 型 Si 衬底上，进行掺 Be P 型 GaAs 分子束外延生长，用范德堡法测量空穴浓度和空穴迁移率。GaAs/Si 的室温空穴浓度和空穴迁移率关系示于图 5。目前尚未见文献报导 P 型 GaAs/Si 的电学性质。为了比较，图 5 同时以实心圆圈表示出文献上发表的 P—GaAs/GaAs 的最佳数据。从图 5 可见，在 10^{16} 至 $\sim 10^{20}\text{cm}^{-3}$ 很宽的掺杂浓度范围内，具有优良的空穴迁移率。

测定了很宽掺杂浓度范围 (10^{16} 至 10^{20}cm^{-3}) P—GaAs/Si 的 X—射线双晶扭摆曲线，其半峰宽最佳为 280 弧秒 (10^{16}cm^{-3})。一般为 300~370 弧秒。文献上未见 P 型 GaAs/Si 的 DCRC 的报导。DCRC 半峰宽与外延层厚度的关系示于图 2，以三角 \triangle 记号示之。

研究了不同空穴浓度下的低温 PL 谱图 (28K 下)，其带边峰位置、半峰宽和强度随浓度而变化。对于高掺杂样品 ($10^{19}\text{--}10^{20}\text{cm}^{-3}$) 出现很宽的谱峰。关于 P 型 GaAs/Si 的 PL 特性，文献上尚未报导。