

大束流硼离子注入设备改造

张明亮, 韩国威, 刘庆, 黄亚军, 邢波, 李艳, 杨富华, 王晓东

(中国科学院 半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 瓦里安 300XP 型中束流离子注入机广泛应用于标准半导体工艺。但随着科技发展, 该设备由于功能老化逐渐显现出其局限性。通过本次设备改造, 增加离子源的功率, 可获得高浓度的注入离子。升级气体流量计、离子源电源、分析器、源磁场及析出高压的隔离控制, 形成稳定可调节的工作状态。对进样终端及剂量监控系统进行升级改造, 扩大设备的应用范围。通过整体的升级改造, 实现多方面功能的突破。

关键词: 离子注入机; 浓硼掺杂单晶硅; 设备改造

1 引言

掺杂是把杂质原子可控的引入半导体材料晶体结构中, 以改变它的电学性能, 如多数载流子类型、电阻率等, 实现设计的器件功能。离子注入和扩散是最常用的两种掺杂工艺, 由于离子注入能够准确地重复控制每一次掺入杂质的浓度、深度以及杂质分布, 已成为一种标准半导体工艺, 被微电子、光电子、传感器、新材料等领域广泛使用。

瓦里安 300XP 型中束流离子注入机, 配有三氟化硼 (BF_3) 和磷烷 (PH_3) 气体源, 可在 20 - 130 keV 束流加速度下工作, 主要用来对各种半导体材料进行掺杂, 用于制作光电探测、光伏、MEMS、MOS 管、二极管、热电等器件。该仪器应用于高浓度硼注入方面, 需要用高浓度硼掺杂来形成稳定可控的器件结构层, 或者构建更好的电学互联。单晶硅中掺杂硼浓度大于 $5 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 后, 该层硅在碱性溶液中湿法腐蚀速度比正常硅 (电阻率大约在 0.1-100 $\Omega \cdot \text{cm}$ 之间, 掺杂浓度大约在 1×10^{13} 至 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 之间) 小约 2 个量级, 被称作单晶硅腐蚀自停止层。该浓硼掺杂单晶硅层作用类似于 SOI 片的顶层硅, 可用于制作各种微纳电子器件, 还能制作出更多 SOI 无法实现的微纳结构。例如, 用于制作纳米线压阻条, 构建 MEMS 压力传感器、流量传感器、风速传感器; 制作谐振式高精度 MEMS 压力传感器; 制作纳米热电器件; 制作各种纳米谐振器等等。高浓度掺杂形成的电学互联, 不仅连通电阻小, 而且电学互连性能受温度变化影响小, 在越来越多的微纳器件中被采用。

现有离子注入机服役时间已超过 30 年, 经过反复维修, 存在以下问题: 硼离子束流最大仅仅能达到 $15 \mu\text{A}$, 远小于出厂值 $150 \mu\text{A}$; 进样系统的 2 个进样终端都是最大兼容 4 英寸

片，无法做 6 英寸片；离子源控制系统、分析器控制、扫描系统、剂量控制系统及进样系统也会经常出现小故障，或不稳定。通过设备改造，将原离子源供电系统中 500 W 电流源和 450 W 起弧电源升级为 1500 W 电流源和 1500 W 起弧电源，并集成到当前的系统中；将现有的不稳定的气体流量、离子源电源、分析器、源磁场光电隔离控制系统，升级成多通道光纤通讯光端机隔离控制气体流量、离子源电源、分析器、源磁场及析出高压控制系统；将一个 4 寸进样终端改造成 6 寸的，开发一套独立控制剂量监测系统；完成升级后，硼最大束流超过 150 μA ，可调节；利用大束流硼离子注入制备浓硼掺杂单晶硅结构层，应用到 MEMS 压力传感器、热电器件以及纳米谐振子器件中。

2 设计思路

离子注入设备一般包括离子源、引出电极组、分析器、加速管、聚焦系统、扫描系统、工艺室及剂量控制系统。我们从离子源、控制系统、剂量监控系统、进样系统进行改造升级，并对仪器进行工艺上的验证。力求在不影响和改变现有设备功能和技术参数的前提下，升级改造离子源电源、隔离控制、扫描控制、进样系统、剂量监控等重要部件，并整合到整机控制系统中，保证硼离子束流达到新机器出厂水平，提高设备工作效率。

2.1 离子源电源设计、加工

现有瓦里安 300XP 型离子注入机离子源电源老化，性能衰退，无法产生足够浓度的待掺杂元素的离子浓度。根据原设备的电路图，反复论证电源设计，尽可能考虑到全部的安全、控制、可集成等问题，找出最佳方案后，送外协单位加工电源。

2.2 控制系统集成安装及调试

由于元器件、通讯、电互连的老化、失效、不稳定，原设备控制系统经常出现小故障或控制不稳定。采用光电、光电调制原理，利用工业级的光端机模块，实现离子源控制系统、分析器控制、流量控制、析出高压调节等稳定操控。

2.3 剂量监控系统改造

原有的电流积分器是集成在扫描系统和进样系统使用的，由于扫描系统和进样系统的改动，无法再使用原有系统。依原来系统的工作理念，研制开发独立可控的剂量监控系统。

2.4 进样系统升级改造

将两个 4 英寸的进样终端中的一个改造成 6 英寸，主要包括法拉第杯、束流掩模版、注入室等部件，使得可注入基片尺寸到达 6 英寸。

2.5 工艺试验

在确认各单项安装及控制准确无误后，开始整机调试及工艺试验。在获得大束流硼离子后，调节灯丝电流、打弧电压、源气流量、引出磁场、狭缝位置等参数，获得最佳的硼离子束流，测量束流值。调节束流扫描波形，用法拉第杯观察检测均匀性。注入单晶硅片后，经退火激活，用方块电阻测量检查注入的片内及片间均匀性。利用浓硼掺杂层单晶硅制作三种微纳器件。

3 研制效果

此次改造已完成在不影响目前机器性能情况下，将离子源升级改造，并集成到整机中，可调可控。其次，采用稳定的工业组件及控制，优化隔离控制系统的稳定性与控制精度。研制以单片机为核心的自主知识产权的离子注入剂量监控系统。具体仪器改造情况如下。

3.1 离子源供电系统升级

将原离子源供电系统中 500 W 电流源和 450 W 起弧电源升级为 1500 W 电流源和 1500 W 起弧电源，并集成到当前的系统中，结果如图 1 示意。2 台电源的电流、电压均能控制并调节，功能符合预期，运转正常。

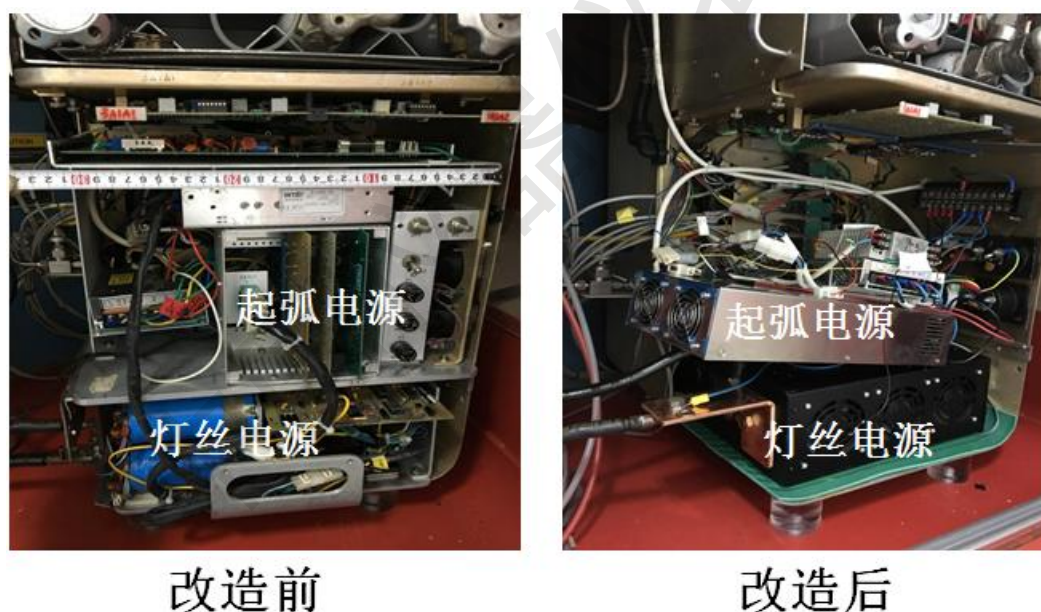


图 1 离子源供电系统改造前后对比图

3.2 控制系统升级

已经将原控制系统中不稳定的光电隔离控制系统拆下，更换成多通道光纤通讯光端机隔离控制系统，结果如图 2 示意。3 对光端机拥有 12 路控制能力，气体流量、离子源电源、分析器、源磁场及析出高压控制均可以正常工作。

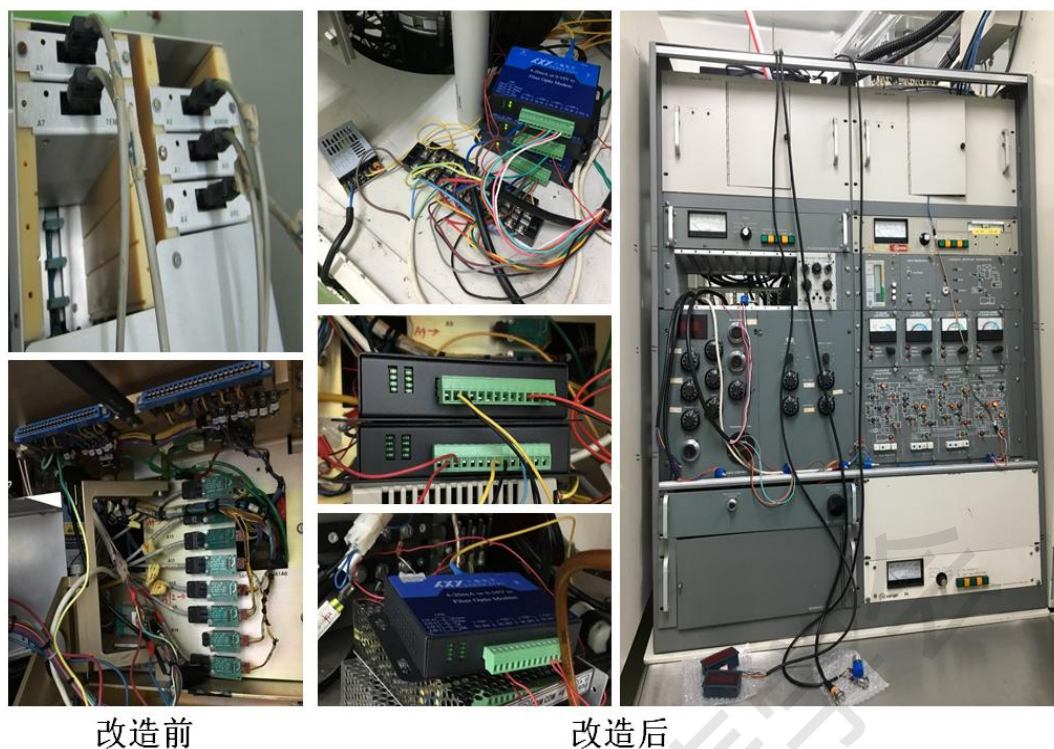


图 2 光电隔离控制系统改造前后对比图

3.3 进样及剂量监控升级

将一个 4 英寸进样终端升级为 6 英寸，将 4 英寸片贴在 6 英寸片上，并固定在进样室内如图 3 示意。系统通电后，手动逐步检查操作，进出样片功能正常。

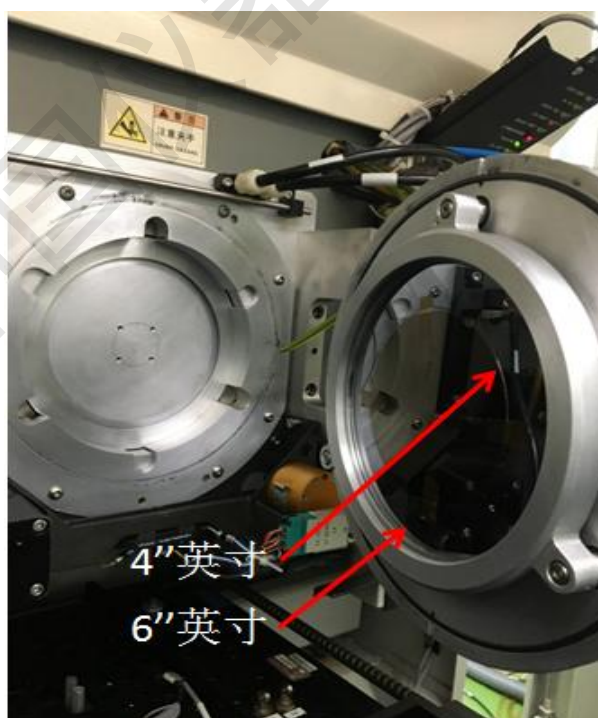


图 3 进样终端改造前后对比图

测试新开发的剂量监控系统，包括电流转电压模块、电压转频率模块、以单片机为核心

的计数比较模块及电磁气动阀束流开关，如图 4 示意。用恒电流源产生的电流模拟离子束束流，检测到剂量监控系统功能与预期一致，运转完全正常。



图 4 剂量监控系统实物图

3.4 硼离子束流

改造后的离子注入整体设备正常运行后，在 140 A 灯丝电流，75 V 起弧电压，20 Torr BF_3 气体下，28 keV 析出电压，束流能量加速到 60 keV，测试结果如图 5 所示，达到 160 μA 。



图 5 设备运转图

4 工艺验证

4.1 仪器调试参数验证

在设备全部正常运转情况下，用硼离子注入单晶硅，退火激活后，测量方块电阻，统计计算如表 1。

表 1 方块电阻参数统计结果

注入元素	能量 (keV)	剂量 (cm ⁻²)	氮气保护下退火激活	平均方阻 (Ω/)	片内均匀性	片间均匀性
B	30	1E15	1000°C30min	330	2.6%	3.1%
B	30	1E16	1000°C30min	27	3.5%	3.2%

用离子注入工艺仿真软件 ICECREAM、SRAM 或 ATHENA (Silvaco 工具包中) 进行仿真评估，结果与实际工艺结果基本一致。

4.2 用浓硼掺杂硅结构层制作器件

利用大束流硼离子注入制备浓硼掺杂单晶硅结构层，应用到 MEMS 压力传感器、热电器件以及纳米谐振子器件中。

在 n 型单晶硅表面注入硼，形成浓硼掺杂层，利用该浓硼层制作硅纳米线压阻，互联成惠斯通电桥，构建出 MEMS 压力传感器芯片，如图 6 示意。

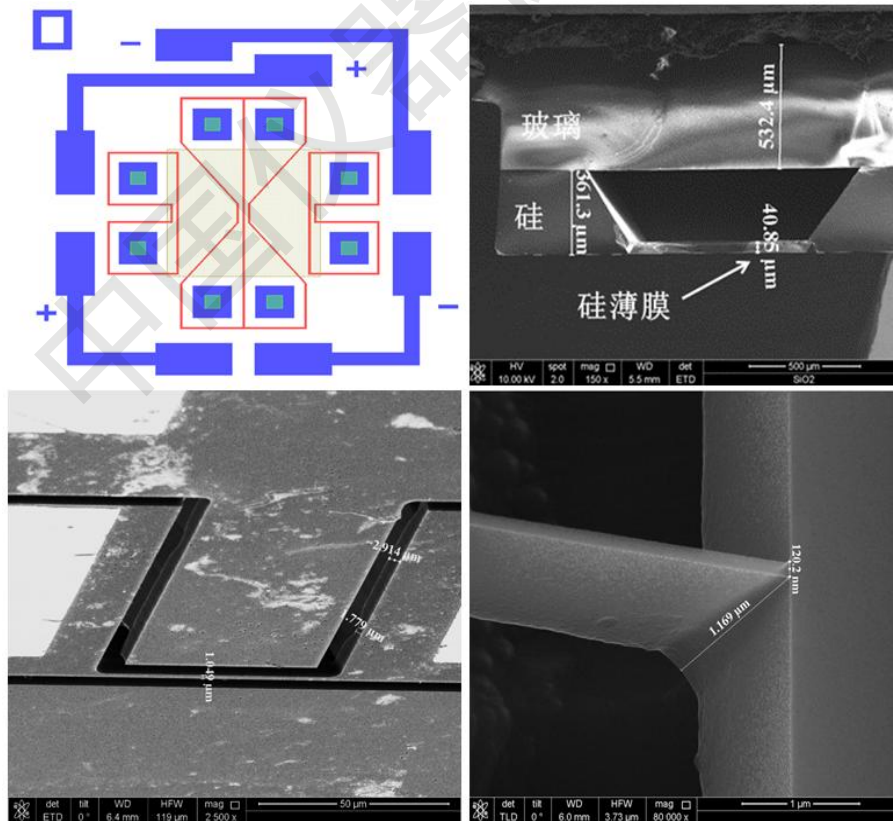


图 6 MEMS 压力传感器芯片示意图

据报道，浓硼掺杂的硅纳米线表现出较大的热电优值。利用离子注入在 n 型单晶硅表面形成浓硼掺杂层，利用自停止腐蚀工艺，制作出硅纳米线热电器件，如图 7 所示。

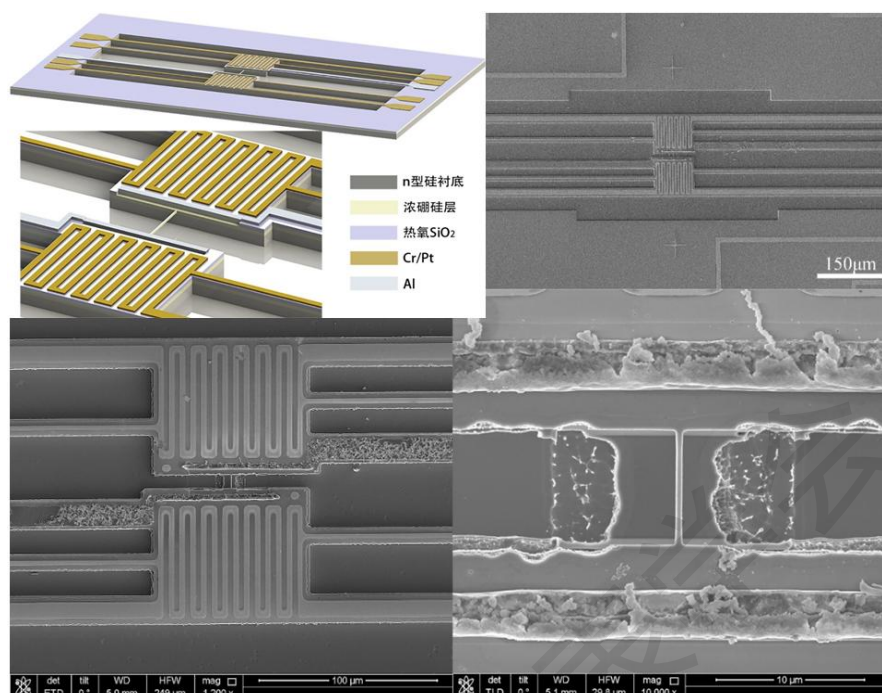


图 7 硅纳米线热电器件示意图

利用离子注入形成浓硼掺杂层，通过电子束光刻和干湿法刻蚀，制作出硅纳米线谐振器，如图 8 所示。

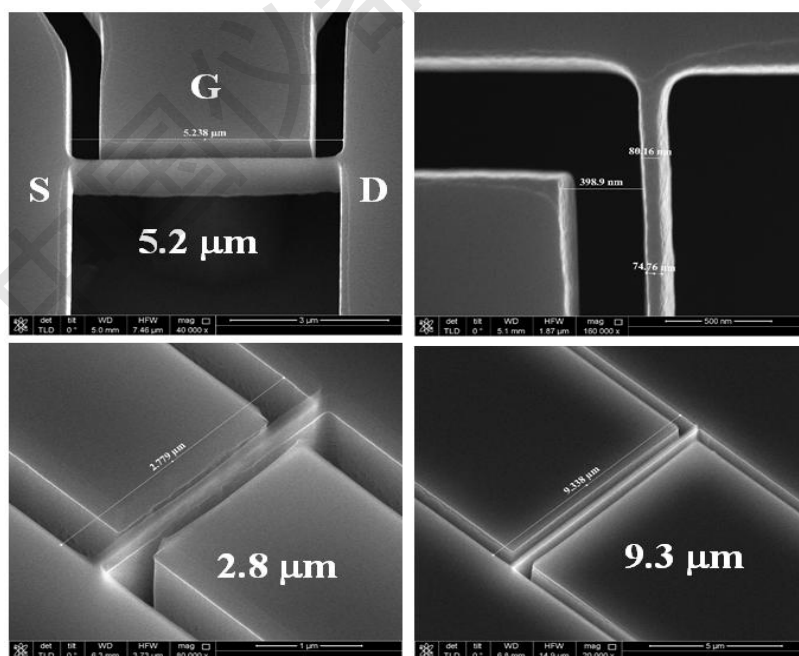


图 8 硅纳米线谐振器示意图

5 结语

通过本次设备功能提升,大大提高了设备的利用率,设备的改造进一步提升了对光电子、微电子、MEMS 器件的加工能力,扩大了该设备的应用领域和适用范围。特别值得一提的是,该设备是所级公共服务中心“半导体集成技术工程研究中心”的重要上网设备,面向国内各科研院所、大学等研究单位开放,通过功能升级,已经为院内外科研提供更优质的工艺加工,为企业产品的试验提供了技术支撑。

中国仪器仪表学会