

GaAs 基太阳能电池的工艺技术

刘雯

(中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘要: 作者从事 III-V 族高效太阳能电池、表面微纳米陷光结构等领域研究在本案例中, 主要介绍了 GaAs 基太阳能电池的整体工艺技术; 可增强光伏电池的光吸收陷光结构; 应用于 III-V 族薄膜太阳电池中的研究的外延剥离技术; GaAs/Si 低温直接键合工艺; 表面微纳米陷光结构制备工艺。

关键词: GaAs 基太阳能电池的工艺技术

1 专业技术成果介绍

1.1 GaAs 基单结及多结太阳能电池的整体工艺流程开发

开发了完整的 GaAs 基太阳能电池的工艺技术, 最终制备的多结太阳能电池: $\text{Eff} > 25.6\%$ 、 $\text{FF} > 84\%$; 在理论模拟方面对正面电极进行了优化设计, 证明了间距不等的折线电极效果最优; 并对关键工艺进行了重点研究及开发: 帽层的选择性腐蚀 (选择比 $> 100:1$)、欧姆接触、隔离槽技术等。

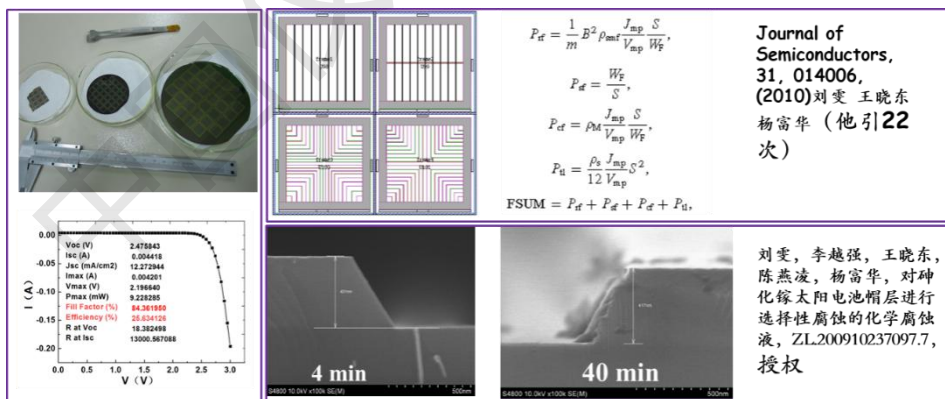


图 1 GaAs 基单结及多结太阳能电池整体工艺流程相关结果

1.2 陷光结构增强光伏电池的光吸收

我们提出了多层陷光、混合陷光、倾斜纳米锥、周期性打破等新型纳米陷光结构, 并通过模拟发现其光吸收效率可超出朗博极限 (Y-Limit), 有效增强了薄膜太阳能电池的光吸收; 并且在 GaAs 薄膜太阳能电池上进行了相关的实验研究: 我们首次研究了采用热退火方式制

备金属纳米颗粒增强 GaAs 电池的光吸收；进行了系统的表面等离子体增强光吸收机制的分析，获得了最优的金属膜厚度；发现了表面等离子体波红移的现象，给出了表面等离子体波移动的物理机制。

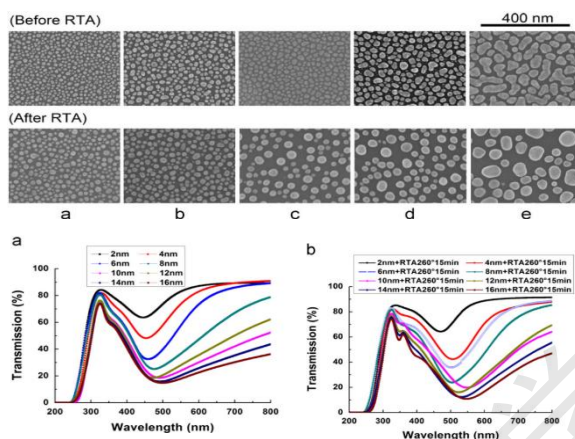


图 2 表面等离子体激元增强 GaAs 薄膜太阳能电池实验研究相关结果 (Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2011, 95, 693)

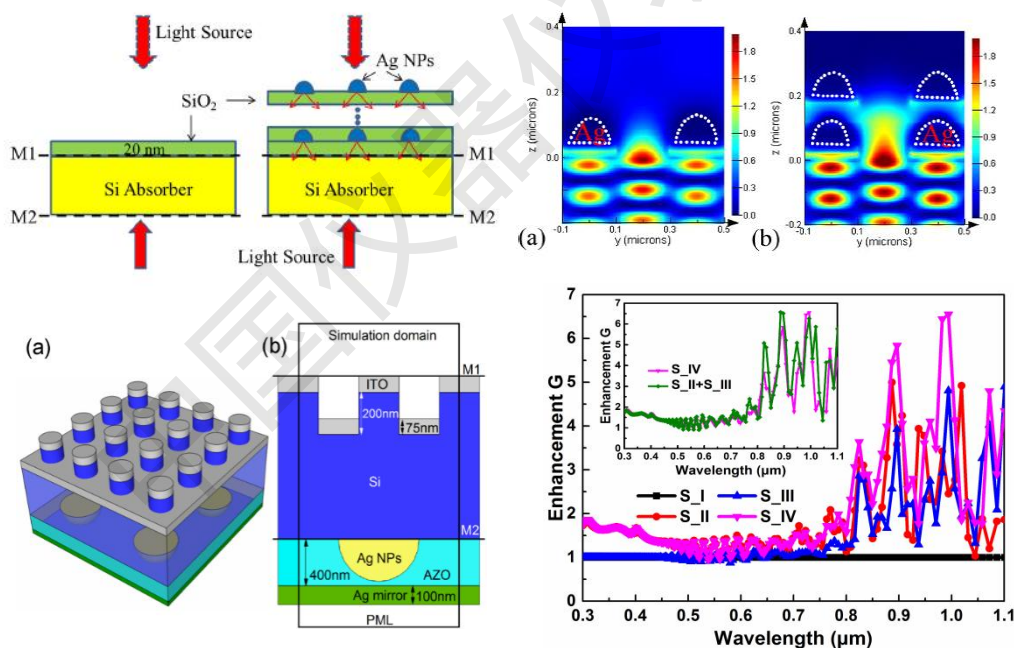


图 3 纳米陷光结构增强薄膜太阳能电池相关理论模拟研究结果 (J. Appl. Phys. 113, 176101 (2013), Phys. Status Solidi A 212(2), 312-316 (2014), Journal of Optics 16(7), 075706 (2014).)

1.3 外延剥离技术在 III-V 族薄膜太阳能电池中的应用研究

在 GaAs 薄膜电池的外延衬底剥离工作中，我们采用质量分数为 37% 的浓盐酸作为腐蚀液，成功的实现了 GaAs 外延层与衬底的剥离，图 3 为实验中采用的外延剥离技术的试验片

结构。实验中我们从牺牲层厚度、刻蚀剂浓度和活性剂三个方面对外延剥离技术进行了探索。最终我们通过尝试在 HCl 中加入丙酮作为活性剂来提高刻蚀速率，发现当 HCl 和丙酮比例为 1:1 时，刻蚀速率大幅提高，室温下 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 大小的试验片剥离时间大约为 1.5 小时，与纯 HCl 作为刻蚀剂时相比刻蚀速率提高了 60% 以上。

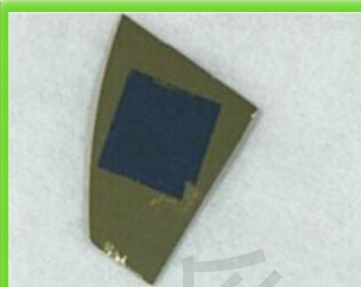
N-GaAs接触层 ($1 \mu\text{m}$, $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)	
AlInP牺牲层 (50 nm, 100 nm两种)	
N-GaAs缓冲层 (500 nm , $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)	
N-GaAs衬底	

图 4 外延剥离技术中采用的实验片结构，及剥离后效果图（外延剥离技术在III-V族薄膜太阳能电池中的应用，2015，硕士论文）

1.4 GaAs/Si 低温直接键合工艺的研究

我们系统研究了采用不同的化学活化疏水性直接键合的方法进行 GaAs/Si 晶片的直接键合，并进一步对 GaAs/Si 的等离子体活化键合工艺展开了深入和系统的研究。成功制备了晶圆级、高强度、电学性能良好的 GaAs/Si 键合晶片。提出了利用晶圆键合机进行金属电极与键合晶片退火的方法，实现了金属与键合晶片的低电阻率欧姆接触。使用掺杂浓度低于 10^{19} cm^{-3} 的 GaAs 与 Si 晶圆制备得到了具有线性欧姆接触特性的 GaAs/Si 键合晶片。

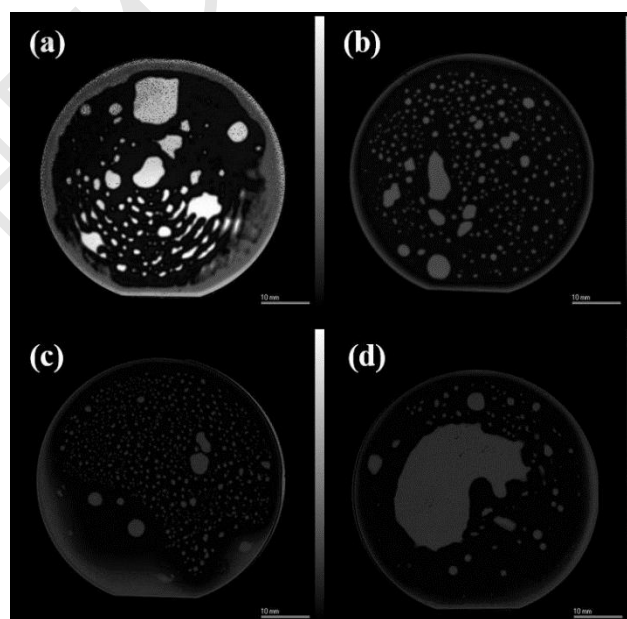


图 5 不同活化时间和功率下 GaAs/Si 直接键合晶片的 SAM 图像（Materials Science in Semiconductor Processing 143 (2022) 106481）

1.5 表面微纳米陷光结构制备工艺

在表面微纳米陷光结构制备工艺研究中，我们采用 ICP 干法刻蚀技术分别对 Si 和 GaAs 材料开发了纳米针尖结构的制备技术。对于 Si 材料，我们通过将 AAO 模板与 ICP 刻蚀工艺相结合，成功制备出尖端尺寸 ~ 10 nm 的硅纳米针尖结构，该方法制备工艺简单、成本低、可以大面积制备。并进一步采用无掩膜干法刻蚀技术开发了高效、低成本的黑 GaAs 制备工艺，研究了无掩膜 ICP 刻蚀技术中功率、气体组成和流量配比等关键参数对刻蚀结果的影响，制备的无掺杂黑 GaAs 表面的太阳加权反射率低至 1.01%。

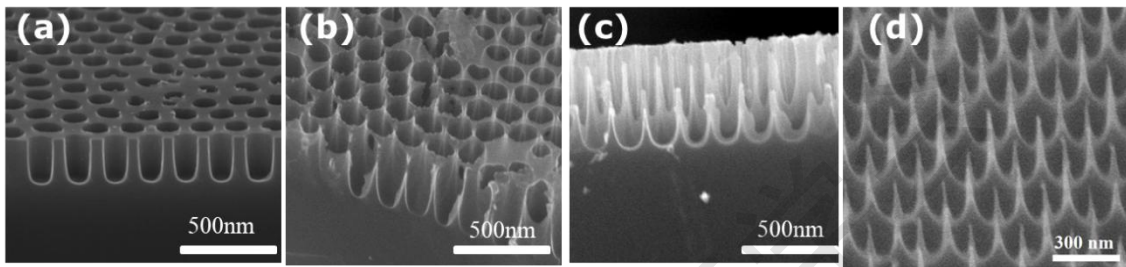


图 6 周期性 Si 纳米针尖制备工艺 (Nanoscale, 2019, 11:20194; 纳米针尖结构、复合结构及其制备方法, 申请号: 202010189070.1)

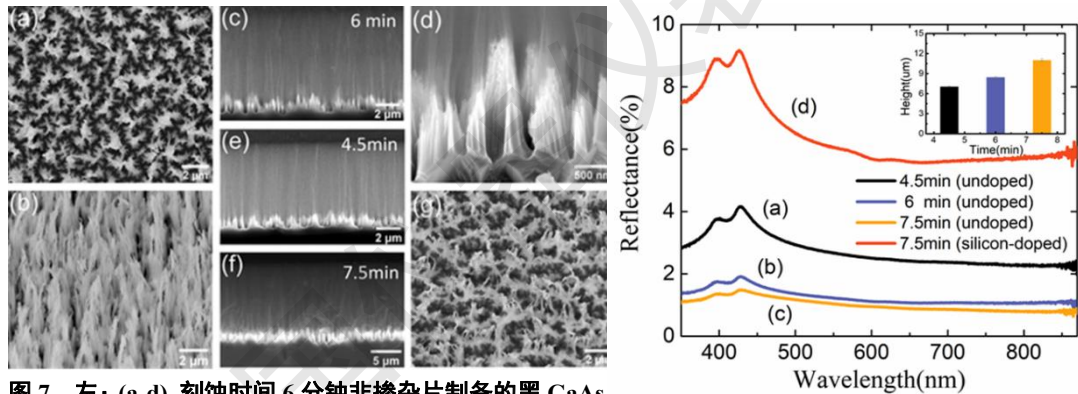


图 7 左: (a-d) 刻蚀时间 6 分钟非掺杂片制备的黑 GaAs SEM 图片; (e-f) 刻蚀时间 4.5 分钟和 7.5 分钟非掺杂片制备的黑 GaAs SEM 图片。 (g) 刻蚀时间 7.5 分钟掺杂片制备的黑 GaAs SEM 图片。右: 不同刻蚀时间制备黑 GaAs 样片的表面反射曲线; 插图为不同刻蚀时间制备的黑 GaAs 表面结构平均高度。(J. Vac. Sci. Technol. B 40, 022205 (2022))

2 专业技术人才介绍

2.1 个人简介

刘雯，女，副研究员，博士，硕士生导师。2007 年山东大学信息学院获学士学位，2012 年毕业于中科院半导体所并获得工学博士学位，之后在半导体所集成技术工程研究中心工作至今。主要研究领域有 III-V 族高效太阳能电池、表面微纳米陷光结构等。近年来作为项目负责人及子课题负责人承担了国家自然科学基金青年项目、国家重点研发计划等 3 个项目，作为研究骨干参与国家自然科学基金面上项目和中科院项目等 3 项，负责项目和骨干项目经费共

526 万元。协助指导博士生 3 名，硕士生 2 名，共发表论文 30 余篇，其中 SCI 和 EI 论文 25 篇，申请专利 8 项，授权 3 项。

2.2 专业技术研究方向

- (1) 高效太阳能电池工艺技术研究；
- (2) 表面微纳米陷光结构制备工艺。

3 承担科技项目及代表论著

3.1 在研/完成项目：

(1) 国家重点研发计划，差分高能电子衍射仪在分子束外延中的应用示范，2018 年～2021 年，课题负责人。

(2) 国家重点研发计划，三基色 LD 在线检测及老化筛选技术，2018 年～2022 年，子课题负责人。

(3) 国家自然科学基金青年项目，界面具有欧姆电学特性的大尺寸 GaAs/Si 低温键合机理及其在光伏电池上的应用研究，2016 年～2018 年，项目负责人。

3.2 代表性论文或著作：

Y.Q. Zhao, **W. Liu**, Y.D. Bao, X.D. Wang, F.H. Yang, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2022,143 (3) 106481-146487.

Y.D. Bao, **W. Liu**, Y.Q. Zhao, L. Wei, X.L. Chen, F.H. Yang, X.D. Wang, *J. Vac. Sci. Technol.* 2022,40(4): 22205-22208.

S.Y. Zhang, M. Liu, **W. Liu**, Y.S. Liu, X.D. Wang, F.H. Yang, *JOURNAL OF OPTICS*, 2017,19(10):13-18

J. Ma, **W. Liu**, Z. Ma, P.S. Song, Y.Q. Zhao, F.H. Yang and X.D. Wang, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*,2019,489(8):67-69.

J. Ma, **W. Liu**, S.Y. Zhang, Z. Ma, P.S. Song, F.H. Yang and X.D. Wang, *Nanomaterials*, 2018, 8(6):422-427.

J. Ma, Y.F. Ai, L. Kang, **W. Liu**, Z. Ma, P.S. Song, Y.Q. Zhao, F.H. Yang and X.D. Wang, *Nanoscale Research Letters*, 2018,13(1):332-336.

S.Y. Zhang, M. Liu, **W. Liu**, Y.S. Liu, Z.F. Li, X.D. Wang, and F.H. Yang, *Journal of Physics Communications*, 2018,2(5):56-61.

3.3 授权专利

(1) 刘雯, 李越强, 王晓东, 陈燕凌, 杨富华, 对砷化镓太阳能电池帽层进行选择性的化学腐蚀液, ZL.200910237097.7。

(2) 杨添舒, 刘雯, 时彦朋, 马静, 王晓东, 杨富华, 具有减反射膜的太阳能电池元件及其制备方法, ZL.201410031339.8。

(3) 李越强, 王晓东, 徐晓娜, 刘雯, 陈燕凌, 杨富华, 一种基于自组织量子点的存储器及其制备方法, ZL.201010520266.0。

4 获奖及荣誉

北京信息电子技术大型仪器区域中心 2020 年度“优秀集体”硅基刻蚀组, 刘雯、常春、白云霞。

中国仪器仪表表学会