

## 四川省科学进步奖公示

项目名称：亚纳米级超高精度光学面形干涉测量设备及应用

主要完成人：吴永前 刘锋伟 李运锋 白剑 侯宝路 晋凯 陈小君 陈强 徐燕 肖向海

主要完成单位：中国科学院光电技术研究所 上海微电子装备有限责任公司 浙江大学

提名单位：中国科学院成都分院

### 项目简介

半导体是国家战略性产业，但核心制造装备几乎全部依赖进口，对国民经济和国防安全构成了重大安全隐患，是国家公布“卡脖子”技术中的“心腹大患”。近年来中美贸易战给我国相关领域带来巨大的冲击。习主席多次强调要“尽早解决卡脖子问题，把技术和发展的主动权牢牢掌握在自己手里”。亚纳米级超高精度光学面形干涉测量设备是半导体产业中核心曝光光学系统、照明系统、晶圆制备等方面最关键和基础性的设备之一。国外发达国家对此高度重视，已在该领域提前十几年甚至几十年进行攻关，其测量精度已推进到 RMS 100pm 以下。正是掌握了高精度检测核心技术，使相关产业得到了快速发展，推动光刻技术到达 5nm 线宽甚至更小。鉴于该项技术的重要性，国外研制成功的亚纳米或更高精度测量设备均不对外出售，精度优于 RMS2nm 的测量设备被列入美国商业管制清单。我国能够引进的设备，其精度只有 RMS 5nm 量级。虽然可以通过一定的误差标定手段将引进的设备进行技术升级，但由于无法知晓其内部结构，精度的提升空间有限，只能部分满足 DUV 光刻需要，尚未在 28nm 线宽的光刻机上得到验证，对于更先进的 EUV 光刻则更无能为力。随着国际形势的发展，测量设备面临更严峻的形势，引进渠道有被全面封锁的风险，只有立足于自主创新与自主知识产权，实现超高精度检测技术的大跨越，才能满足我国对高精度检测的需求。该技术不仅是芯片制造业的核心技术，同时也是其它如先进光源、引力波探测等大科学工程的关键技术。

本项目基于学科发展和我国现有产业需求，对超高精度光学表面检测共性和重大科学问题进行了长达 XX 年的持续攻关和探索，在国家科技部重大专项及中科院重大项目的支持下，研制成功了亚纳米级高精度检测设备，核心指标优于同类进口设备，达到国际一流水平；核心技术全部自主可控，在国产光刻机研制、先进光源核心器件研制等方面发挥了重要作用。取得的主要创新如下：

- 1、提出了激光超稳腔及频率锁定方法，实现了 10KHZ 的超窄线宽光源，建立了测量精确基准；

2、提出了基于时空域融合的数据处理技术，实现皮米精度的相位解调；设计了无衍射迭代运算的高精度波前复原模型，基于半解析衍射理论实现了大 NA 元件的波前检测；

3、提出了无应力支撑系统设计和重力卸载方案，实现了超稳定干涉测量系统，系统重复性达到 RMS25 皮米，完成了像素级绝对标定技术，精确实现了系统误差与被测面的分离，绝对测量精度优于 RMS0.15nm，并通过液面物理基准验证了测量方法的准确性。

围绕项目核心技术，获得发明专利 53 件，发表学术论文 67 篇。项目成果已在光刻机研制、先进光源、空间光学等领域得到广泛应用，近年来累计实现经济效益 7 亿元，项目实现了亚纳米级超高精度光学面形干涉测量设备国产化零的突破，解决了“卡脖子”问题并促进了多个相关领域的科技进步，也为四川省现代产业体系升级、融合创新进入新阶段做出了实际贡献。

### 主要知识产权

序号	知识产权（标准）具体名称	知识产权（标准）类别	国家（地区）	证书编号（标准批准发布部门）	授权号（标准编号）	授权（标准发布）日期	发明人（标准起草人）	权利人（标准起草单位）	发明专利（标准）有效状态
1	发明专利	一种菲索型准共光路结构的同步相移干涉测量装置及方法	中国	2417084	ZL201410263744.2	2017/3/15	吴永前、刘峰伟	中国科学院光电技术研究所	有效
2	发明专利	基于点衍射波的干涉测量系统的系统误差标定装置和方法	中国	4186881	ZL201910176201.X	2021/1/5	刘锋伟、吴永前、万勇建、陈强、闫锋涛、徐燕	中国科学院光电技术研究所	有效
3	发明专利	一种基于相位恢复的宽频段	中国	4270399	ZL201910406693.7	2021/2/26	白剑、赵磊、黄潇、周骧东、侯晶	浙江大学	有效

		波前误差检测装置及检测方法							
4	发明专利	一种光刻投影物镜及光刻机	中国	5280166	ZL201910752824.7	2022/7/5	侯宝路、王彩红、王进霞	上海微电子设备(集团)股份有限公司	有效
5	发明专利	一种折反式逆补偿器	中国	1215163	ZL201110324192.8	2013/6/12	吴永前、张雨东	中国科学院光电技术研究所	有效
6	发明专利	一种同时适用于平面和球面的标定回程误差的方法	中国	5738408	ZL202210452516.4	2023/2/14	陈小君、吴永前、刘峰伟、赵彦、肖向海	中国科学院光电技术研究所	有效
7	发明专利	基于模式复原的快速大动态范围波前检测装置及检测方法	中国	5094959	ZL202011386690.0	2022/4/19	白剑、赵磊、费蕾、侯晶	浙江大学	有效
8	发明专利	大视场成像物镜	中国	5357138	ZL201911206582.8	2022/8/2	李润芝、于大维、侯宝路、李运锋	上海微电子设备(集团)股份有限公司	有效
9	发明专利	一种标定干涉法测量面形中的回程误差的装置及方法	中国	5264615	ZL202110318218.1	2022/6/28	刘锋伟、邓婷、陈强、吴永前、覃蝶、徐淑静	中国科学院光电技术研究所	有效

10	发明专利	一种提高 Littman 结构可 调谐外 腔半导 体激光 器输出 功率的 方法	中国	5573943	ZL202110 241556.X	2022/1 1/11	吴永前、周 平	中国科学院 光电技术研 究所	有效
----	------	---	----	---------	----------------------	----------------	------------	----------------------	----

### 论文专著目录

序号	论文专著名	刊名	类型	出版 / 发表地区	影响因子	级别	发表时间 (年月日)	年卷页码 (xx年xx卷xx页)	作者	第一作者 (含共同)	通讯作者 (含共同)	国内作者	SCI 他引次数	他引总次数	论文署名单位是否包含国外单位	检索数据库
1	Precise phase demodulation of single carrier-frequency interferogram by pixel-level Lissajous figure and ellipse fitting	Scientific Reports	论文	国外	4.997	SCI 收录	2018/1/9	2018年8卷106-15页	Fengwei Liu, Yongqian Wu, Fan Wu, Niels König, Robert Schmit, Yongjian Wan, Yan Xu	Fengwei Liu	Fengwei Liu	Fengwei Liu, Yongqian Wu, Fan Wu, Yongjian Wan, Yan Xu	9	10	否	
2	Generalized phase shifting interferometry based on Lissajous calibration technology	OPTICS AND LASERS IN ENGINEER	论文	国外	5.666	SCI 收录	2016/8/15	2016年83卷106-115页	Fengwei Liu; Yongqian Wu; Fan Wu; Weihong Song	Fengwei Liu	Fengwei Liu	Fengwei Liu; Yongqian Wu; Fan Wu;	13	14	否	

3	Correction of phase extraction error in phase-shifting interferometry based on Lissajous figure and ellipse fitting technology	Optics Express	论文	国外	3.83 3	SCI 收录	2015/4/ 20	2015年 23卷 10794- 10807页	Liu Fengwei;W u Yongqian; Wu Fan	Liu Fengwei	Liu Feng wei	Liu Fengwei; Wu Yongqian ;Wu Fan	40	42	否	
4	Modal-based nonlinear optimization algorithm for wavefront measurement with under-sampled data	Optics Letters	论文	国外	3.56	SCI 收录	2020/9/ 1	2020年 45卷 5456- 5459页	Zhao Lei; Bai Jian; Hao Yan; Jing Hou; Wang Chen; Lu Binjie; Liang Yiyong; Wang Kaiwei	Zhao Lei	Zhao Lei	Zhao Lei; Bai Jian; Hao Yan; Jing Hou; Wang Chen; Lu Binjie; Liang Yiyong; Wang	8	8	否	
5	Amplitude compensation using homodyne detection for inverse synthetic aperture LADAR	Applied Optics	论文	国外	1.90 5	SCI 收录	2021/11 /1	2021年 60卷 pp. 10594 -10599	Xu Chen; Jin Kai; Jiang Changchun ; Li Jian; Song Anpeng; Wei Kai; Zhang Yudong	Xu Chen	Xu Chen	Xu Chen; Jin Kai; Jiang Changchu n; Li Jian; Song Anpeng; Wei Kai; Zhang Yudong	1	1	否	