

一、综合评价意见

2021 年 02 月 23 日，装备项目管理中心组织验收委员会（名单附后），在北京对北京交通大学承担的《高精度微位移测量技术（414030102）》项目进行了验收。验收委员会听取了项目总结报告，查阅了测试意见和资料审查意见，经讨论和质疑，形成意见如下：

（1）该项目完成了亚波长高均匀光栅结构设计与制作、高稳定光源及高效光纤耦合、高灵敏度低噪声光学读数头、高细分衍射干涉信号处理、三维光栅位移集成检测及系统误差源分析等技术研究内容，突破了亚波长高均匀高对比度光栅结构设计与制作、高稳定自动补偿光源、高可靠性单模光纤耦合、高细分衍射干涉信号处理及三维光栅位移集成检测等关键技术，研制出基于光栅尺的高精度微位移传感系统原理样机，达到了合同规定的技术指标，实现了项目研究目标。

（2）该项目创新性地提出了亚波长高均匀高对比度光栅结构，利用光纤导入式高精度无源读数头，将光栅测量技术推进到纳米量级，实现纳米/亚纳米级的测量分辨率，并在实验环境中得到了验证。

（3）项目组织措施得当，工作衔接有序，有力保障了项目顺利实施；提交的技术文档完整规范，符合验收要求。

验收委员会同意该项目通过验收。

意见或建议：

验收委员会 主任： 

验收分数		等级	A.优 B.良 C.中 D.差
------	--	----	-----------------

合同编号:

技术开发（委托）合同

项目名称: 激光测长干涉仪研制

委托方（甲方）: 长春国科精密光学技术有限公司

受托方（乙方）: 复旦大学

签订时间: 2021年3月11日

签订地点: 吉林省长春市

有效期限: 2021年3月11日至2023年3月20日

中华人民共和国科学技术部印制

以下无正文

签 署 页

甲方: 长春国科精密光学技术有限公司 (盖章)

法定代表人/委托代理人: 李保明 (签名)

年 月 日

乙方: 复旦大学 (盖章)

委托代理人: 武利强 (盖章)

2021年3月11日

技
骑
第

技 术 开 发 合 同

项目名称: SOI 基光波导显微技术研究

委托人: 中国科学院微电子研究所
(甲方)

研究开发人: 北京交通大学
(乙方)

签订地点: 北京 省(市) 朝阳区(县)
签订日期: 2021 年 09 月 27 日
有效期限: 2021 年 09 月 27 日至 2021 年 12 月 24 日

中国计量测试学会科学技术进步奖应用证明

应用成果名称	高精度微位移测量关键技术	
应用单位名称	中国科学院微电子研究所	
应用单位联系人	李博	联系电话 13811102028
成果应用起始时间	2019-2022	
应用情况	本单位于 2019 年立项的科技委重点项目“某材料、器件与集成电路技术研究”,面向下一代航天抗辐照电路需求,主要研究 CSOI 先进材料与器件,为下一代装备中抗辐照芯片的研发提供技术支撑。 本项目采用了北京交通大学研制的高精度微位移测量技术,搭建了 CSOI 先进材料与器件测试平台,为项目中 CSOI 先进器件的亚纳米级别表征与分析提供了重要支持。该技术解决了 CSOI 复合材料界面特性的亚单层精度测量难题,在分子尺度揭示了 CSOI 材料结构与特性的关联;该平台具有亚纳米级的分辨力,可提供材料与器件的关键实验检测手段,为下一步研制高可靠器件与电路提供了重要技术支撑。	
声明	我单位保证上述提供的应用情况真实无误。如有不符,本单位愿意承担相关责任并接受相应的处理。 单位财务专用章 法人单位公章 年 月 日 2022 年 6 月 3 日	

注:如表中所填内容不涉及经济效益情况,只需加盖应用单位法人公章。

订单号: BF-2109-003

购销合同

需方: 上海玉闾光电科技有限公司 供方: 上海拍频光电科技有限公司

供需双方经过友好协商, 签订合同如下, 以资共同遵守。

一、所需产品名称、型号、指标、数量及价格:

序号	名称/型号	型号/主要指标	数量	单价 (RMB)	小计 (RMB)
1	导光元件	全反射镜和分光镜	8	3626	29008
2	导光元件可调底座	实现对导光元件3自由度调节	8	1960	15680
3	光纤耦合器	FC/PC	15	2156	32340
4	光纤	5米	15	1470	22050
5	参考反射镜可调底座	定制, 两个角度可调	2	1960	3920
总计:					¥102998.00

注: 本价格含 13% 税。 合计金额 (大写 RMB): 壹拾万贰仟玖佰玖拾捌元整

二、付款方式和交货期:

供方需在签订合同后 30 天内准备好合同规定的全部产品, 并拍摄产品实物照片给需方, 需方确认照片后支付全款。收到全款后, 供方在 2 天内通过快递方式发货给需方, 并提供快递单号。

三、质量及功能要求: 供方应按本合同条款一所规定的指标进行生产, 质保期一年。

四、运输方式: 顺丰快件送达, 供方负责运费。

五、违约责任:

1. 如供方无法交付合同规定的产品, 应提前通知需方, 需方有权取消合同, 并要求供方在 5 日内退还所有预付款, 本合同即告终止。

2. 其他违约责任按合同法有关条款协商解决。

六、协议纠纷的解决:

本合同依照《中华人民共和国合同法》签订。本合同在履行过程中发生争议, 由当事人双方协商解决。协商不成, 可依法诉讼解决。

七、本协议一式两份, 供需双方各执一份。

八、合同生效日期: 自双方代表签字盖章之日起本合同生效。本合同传真件、扫描件同样具有法律效力。

需方: 上海玉闾光电科技有限公司
税号: 91310416579124685Y
地址: 上海市嘉定区菊园新区环城路 2222 号 1 幢 J3476 室
电话: 021-60766075
传真:
开户银行: 上海银行曹杨支行
帐号: 31658603001646458
授权代理人: 张玉

供方: 上海拍频光电科技有限公司
税号: 91310000MA1H3RMX4E
地址: 中国 (上海) 自由贸易试验区临港新片区环湖西二路 888 号 C 楼
电话: 021-61230550
传真:
开户银行: 交通银行上海市北工业区支行
帐号: 310066247013003710668
授权代理人: 高为富

日期: 2021 年 9 月 5 日

附件 2

中国计量测试学会科学技术进步奖应用证明

应用成果名称	分离式无热源亚纳米位移测量技术		
应用单位名称	上海玉闾光电科技有限公司		
应用单位联系人	张玉	联系电话	18616773316
成果应用起始时间	2018.01.01-2021.12.01		
应用情况	上海玉闾光电科技有限公司成立于 2011 年, 专注于为光通信和光纤传感领域的客户提供专业的设备器件。 基于北京交通大学与上海拍频光电科技有限公司联合开发的研究成果“分离式无热源亚纳米位移测量技术中”的高精度可调底座, 本司开发了光通信器件纳米精度光芯片调节系统。 该系统 2018 年实现产品化, 2019 年为本司创造经济效益 210 余万元, 2020 年为本司创造经济效益达 350 余万元, 2021 年为为本司创造经济效益达 500 余万元, 预计未来会成逐年递增趋势。		
声明	我单位保证上述提供的应用情况真实无误。如有不符, 本单位愿意承担相关责任并接受相应的处理。 单位财务专用章 2022 年 6 月 2 日 法人单位公章 2022 年 6 月 2 日		

注: 如表中所填内容不涉及经济效益情况, 只需加盖应用单位法人公章。

合同登记编号: □□ □□□□ □□ □□□□□□

技术开发合同
(2003 版)

项目名称: 复旦-上海精测联合实验室-计划大承载宽频谱激振台研制

委托人: 上海精测半导体技术有限公司

(甲方) _____

研究开发人: 复旦大学

(乙方) _____

签订地点: 上海 省(市) 杨浦区(县)

签订日期: 2020 年 9 月 28 日

有效期限: 2020 年 9 月 28 日至 2022 年 4 月 3 日

上海市科学技术委员会
上海市工商行政管理局

开发(1)

		开发(6)	
委 托 人 (甲 方)	名称(或姓名)	上海精测半导体技术有限公司 (签章)	
	法定代表人	彭赛 (签章)	
	委托代理人	(签章)	
	联系(经办)人	(签章)	
	住所 (通讯地址)	上海市青浦区赵巷镇沪青公路 3398 号 1 幢 2 层 Q 区 202 室	邮政 编码
	电 话		
	开户银行		
	帐 号		
研 究 开 发 人 (乙 方)	名称(或姓名)	复旦大学 (签章)	
	法定代表人	许宁生 (签章)	
	委托代理人	武利民 (签章)	
	联系(经办)人	沙昱彤 (签章)	
	住所 (通讯地址)	上海市浦东新区金科路 4560 号 金创大厦 2 号楼 1012 室	邮政 编码
	电 话	17821440816	
	开户银行	中国农业银行上海市五角场支行营业部	
	帐 号	033267-08017003441	
丙 方	单位名称	(签章)	
	法定代表人	(签章)	
	委托代理人	(签章)	
	联系(经办)人	(签章)	
	住所 (通讯地址)		邮政 编码
	电 话		
	开户银行		
	帐 号		

技术合同专用章
或
单位公章



年 月 日

技术合同专用章
或
单位公章



2020 年 9 月 21 日

技术合同专用章
或
单位公章

年 月 日

附件2 应用证明
附件2-5: 上海隐冠半导体技术有限公司

上海拍频光电科技有限公司

合同编号: BF210714-001A

采购合同

签订日期: 2021年10月08日

签订地点: 上海市浦东新区

订立合同双方:

甲方(买方): 上海隐冠半导体技术有限公司

乙方(卖方): 上海拍频光电科技有限公司

地址: 中国(上海)自由贸易试验区金海路1000号47幢

地址: 中国(上海)自由贸易试验区临港新片区环湖西二

1楼

路888号C楼

电话: 021-61659561

电话: 18621774959

邮编: 200120

邮编: 200436

开户行: 中国建设银行股份有限公司上海高科路支行

开户行: 交通银行上海市北工业区支行

账号: 31050161394100000412

账号: 310066247013003710668

税号: 91310115MA1HAEXQXP

税号: 91310000MA1H3RMX4E

法人代表或授权人:

法人代表或授权人:

盖章:

盖章:

甲乙双方本着平等互利、协商一致的原则, 签订本合同, 以资双方信守执行。

第一条 合同清单: 《商品名称、种类、规格、单位、数量》

序号	产品名称	型号及指标	单 价	数量	总价
1	大气版干涉仪零部件，包括：			1	
1.1	光纤准直器	型号：FC1001T	¥ 2,160.00	11	¥23,760.00
1.2	多模光纤	型号：FO100A5，长度 5 米	¥ 540.00	11	¥ 5,940.00
1.3	大气版 5 轴干涉仪	定制，光纤入光	¥ 361,200.00	1	¥ 361,200.00
1.4	大气版 4 轴干涉仪	定制，光纤入光	¥ 299,100.00	1	¥ 299,100.00
总价		690,000.00 元人民币			
人民币含税成交价：陆拾玖万元整（含 13% 增值税发票）					

第二条 交货时间与地点

- 交货时间: 收到第一笔预付款后8周;
- 发货方式: 快递发货, 费用由乙方承担;
- 交货地址及收货人: 上海市浦东新区康桥镇康桥东路1369号D栋107号申辰 13917439352

第三条 付款方式

- 合同签订后一周内, 甲方以银行转账方式向乙方支付40%预付款, 计人民币276,000.00 (大写: 贰拾柒万陆仟元整)。余款50%甲方应在乙方发货前支付完毕, 计人民币345,000.00 (叁拾肆万伍仟元整)。甲方向客户供货并在客户验收合格后支付10%, 计人民币69,000.00 (陆万玖仟元整)。
- 乙方收到全部货款后向甲方开具等额增值税发票。

第四条 包装和运输

- 包装方式: 原厂包装
- 运输费用及保险由乙方承担。

第五条 质量保证

上海拍频光电科技有限公司

合同编号: BF211009-001A

购销合同

签订日期: 2021年10月09日

签订地点: 上海市浦东新区

订立合同双方:

甲方(买方): 上海隐冠半导体技术有限公司

乙方(卖方): 上海拍频光电科技有限公司

地址: 中国(上海)自由贸易试验区金海路1000号47幢

地址: 中国(上海)自由贸易试验区临港新片区环湖西二

1楼

路888号C楼

电话: 021-61659561

电话: 18621774959

邮编: 200120

邮编: 200436

开户行: 中国建设银行股份有限公司上海高科路支行

开户行: 交通银行上海市北工业区支行

账号: 31050161394100000412

账号: 310066247013003710668

税号: 91310115MA1HAEXQXP

税号: 91310000MA1H3RMX4E

法人代表或授权人:

法人代表或授权人:

甲乙双方本着平等互利、协商一致的原则, 签订本合同, 以资双方信守执行。

第一条 合同清单: 《商品名称、种类、规格、单位、数量》

序号	产品名称	型号及指标	单 价 (元)	数量	总价
1	温度传感器探头	PT100	1,500.00	8	12,000.00
2	四通道温度采集模块	TSM04	7,500.00	2	15,000.00
3	光束调节器	BAA02	1,500.00	16	24,000.00
4	双轴干涉仪（直入射）	PIF0204T	60,000.00	4	240,000.00
5	VME 轴卡	ELAB0410V/1024	158,350.00	2	316,700.00
6	多模光纤	F0100A5/10 米	1,875.00	12	22,500.00
7	光纤准直器	FC1001T	1,650.00	12	19,800.00
总价		650000.00 元人民币			
人民币含税成交价: 陆拾伍万元整 (含 13%增值税发票)					

第二条 交货时间与地点

- 交货时间: 收到第一笔预付款后12周;
- 发货方式: 快递发货, 费用由乙方承担;
- 交货地址及收货人: 上海市浦东新区康桥镇康桥东路1369号D栋107号申辰 13917439352

第三条 付款方式

- 合同签订后一周内, 甲方以银行转账方式向乙方支付40%预付款, 计人民币260,000.00 (大写: 贰拾陆万元整)。余款50%甲方应在乙方发货前支付完毕, 计人民币325,000.00 (叁拾贰万伍仟元整)。甲方向客户供货并在客户验收合格后支付10%, 计人民币65,000.00 (陆万伍仟元整)。
- 乙方收到全部货款后向甲方开具等额增值税发票。

中国计量测试学会科学技术进步奖应用证明

应用成果名称	分离式无热源亚纳米位移测量技术		
应用单位名称	国防科技工业大扭矩一级计量站		
应用单位联系人	李 涛	联系电话	13761170123
成果应用起始时间	2018.04-2022.04		
应用情况	国防科技工业大扭矩一级计量站是我国最早从事力学扭矩技术研究的专业机构。长期以来，为武器装备的计量检测、测量测试和产品服务。 北京交通大学，复旦大学，中国计量科学研究院，上海市计量测试技术研究院，上海拍频光电科技有限公司联合研制的分离式无热源亚纳米位移测量技术，是具有自主知识产权的高精度位移测量技术。 近几年来，为本站提供了大量的校准和标定服务，为相关系统量值的准确性提供了溯源依据和有力的技术保障。同时，为一些极端条件下武器装备的计量检测、测量测试提供了有力的技术支撑。		
声明	我单位保证上述提供的应用情况真实无误。如有不符，本单位愿意承担相关责任并接受相应的处理。  法人单位公章 年 月 日		

注：如表中所填内容不涉及经济效益情况，只需加盖应用单位法人公章。

签订地点：上海
拟定日期： 2021 年 06 月 21 日

物资采购合同

甲方（买方）：上海坚亥半导体设备有限公司 地址：上海浦东新区惠南镇东征路 133 号 电话：186-2157-8289 邮编：201203 开户行：兴业银行股份有限公司上海浦东支行 账号：216230100100176444 税号：91310115MA1H8R5891 法人代表或授权人： 盖章：	乙方（卖方）：上海拍频光电科技有限公司 地址：中国（上海）自由贸易试验区临港新片区环湖西二路 888 号 C 楼 电话：18621774959 邮编： 开户行：交通银行股份有限公司上海市北工业区支行 账号：310066247013003710668 税号：91310000MA1H3RMY4E 法人代表或授权人： 盖章：
--	--

一、标的物（可另附合同清单）		单位：元				
序号	名称及规格型号	单位	数量	单价	行总价	备注
1	三轴平镜干涉仪	个	2	137, 517	275, 034	
2	分光镜	个	6	3, 743	22, 458	
3	导光光纤	根	6	415	2, 490	
4	准直器	个	6	1, 498	8, 988	
5	三轴激光外差数字解调器	套	2	85, 515	171, 030	
合同总价（大写）：人民币：肆拾捌万元整		（注：此价格为含 13% 税价格）				

二、交货时间：交货期为 2021 年 09 月 10 日。每迟交 1 天，扣全款的 0.5%，扣除总额按迟交天数累计。

三、交货方式、地点：乙方负责送货上门，费用由乙方承担。甲方不承担收到货物前货物的毁损风险。

四、质量要求：乙方提供的产品必须符合相关的行业标准（包括甲方提出的技术设计要求），附有相应的使用说明书和质量保证书，并可提供必要的技术服务。特殊需要的产品，可附技术合同。

五、检验验收：对已到货的产品，甲方在检验期内严格按照合同约定的标准检验，如发现不合格品，乙方须无条件及时退换。

六、售后服务：产品保修（质）期截止日期为：2022 年 9 月 10 日，保修（质）期内（非人为损坏），乙方提供免费售后服务。保修（质）期过后，乙方须及时提供售后服务，甲方支付应付费用。在合同有效期（含质保期）内，乙方应在接到故障通报后 8 小时内受理并反馈，并根据客户指定的时间提供现场支持服务；对于所有非甲方使用不当造成的故障，乙方须提供免费维修服务，并无偿提供备件更换（如需）；由于甲方操作不当引起的故障，乙方可按照合理的收费标准向甲方提供有偿维修服务。保修（质）期内，乙方提供安装维修服务。

七、付款条件：合同金额为含税（13%）后的交货价，签订合同一周内支付总合同额的 100% 货款。

八、本合同解除条件：
1、乙方不能按质按量及时交付合同中所订产品（不可抗力原因除外），甲方有权单方解除合同。
2、双方协商一致可解除合同，因一方不履行或履行合同不符合约定而致使合同解除的，守约方有获得赔偿的权利，数额为因提前终止合同给对方造成的损失。

九、违约责任：
1、合同一方或双方当事人不履行或不履行合同任一条款均构成违约，违约方应赔偿对方因此而造成的损失。

附件 2

中国计量测试学会科学技术进步奖应用证明

应用成果名称	分离式无热源亚纳米位移测量技术		
应用单位名称	上海坚亥半导体设备有限公司		
应用单位联系人	张婷婷	联系电话	18721097978
成果应用起始时间	2018 年 11 月 01-2021 年 12 月 01		
应用情况	上海坚亥半导体设备有限公司是一家集产品研发、制造、销售及售后为一体的高新技术公司，提供超精密测量系统方案及配套服务、半导体光刻机设备及维修维护服务、航空航天专用设备。上海拍频光电科技有限公司与北京交通大学研究成果“分离式无热源亚纳米位移测量技术”中的关键模块三轴干涉仪及数字解调器，成功替代了进口，为本司承担的某航天专项解决了卡脖子技术，实现了关键模块的国产化。		
声明	我单位保证上述提供的应用情况真实无误。如有不符，本单位愿意承担相关责任并接受相应的处理。 法人单位公章 2022 年 4 月 6 日		

注：如表中所填内容不涉及经济效益情况，只需加盖应用单位法人公章。

附件 2

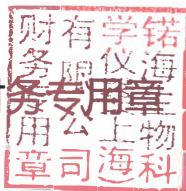
中国计量测试学会科学技术进步奖应用证明

应用成果名称	分离式无热源亚纳米位移测量技术		
应用单位名称	格物致和生物科技（北京）有限公司		
应用单位联系人	许俊泉	联系电话	010-6472-6050
成果应用起始时间	2020.01-2022.12		
应用情况	格物致和生物科技（北京）有限公司致力于构建数字化生物多组学平台，研发并产业化一系列高灵敏、自动化分子检测系统和配套试剂，对疾病早期的预警预防、精准诊断，以及药物开发等提供全流程的创新技术产品和服务。 北京交通大学和上海拍频光电科技有限公司研制的分离式无热源亚纳米位移测量技术为格物致和生物科技（北京）有限公司，提供了亚微米位移测量模块，用于工作台三维精确定位，实现高速、高分辨、大视场的荧光图像采集，打破了国外公司技术垄断。		
声明	我单位保证上述提供的应用情况真实无误。如有不符，本单位愿意承担相关责任并接受相应的处理。  2022年 05月 15日		

注：如表中所填内容不涉及经济效益情况，只需加盖应用单位法人公章。

附件 2

中国计量测试学会科学技术进步奖应用证明

应用成果名称	分离式无热源亚纳米位移测量技术		
应用单位名称	诺海生物科学仪器（上海）有限公司		
应用单位联系人		联系电话	
成果应用起始时间	2019.01-2022.10		
应用情况	诺海生物科学仪器（上海）有限公司，致力于打造完整的生命科学研究、制造、服务生态体系。公司提供组织透明化、免疫荧光标记、高分辨大组织 3D 成像、图像分析与存储，一站式科研服务；纳米药物制备系统及纳米药物制备、检测服务—从处方筛选到制剂表征全线过程。 北京交通大学，复旦大学，中国计量科学研究院，上海市计量测试技术研究院，上海拍频光电科技有限公司联合研制的分离式无热源亚纳米位移测量技术为诺海生物科学仪器有限公司，提供了高精度微位移定位技术，用于显微工作台精确定位，满足了荧光分析准确定位的需求。 该技术 2019 年为本司创造经济效益达一百余万元，2020 年为本司创造经济效益近三百万元，2021 年为本司创造经济效益达三百余万元。		
声明	我单位保证上述提供的应用情况真实无误。如有不符，本单位愿意承担相关责任并接受相应的处理。  单位财务专用章  法人单位公章 2022 年 05 月 30 日 2022 年 05 月 30 日		

注：如表中所填内容不涉及经济效益情况，只需加盖应用单位法人公章。

附件 2

中国计量测试学会科学技术进步奖应用证明

应用成果名称	分离式无热源亚纳米位移测量技术		
应用单位名称	中国计量大学		
应用单位联系人	罗哉	联系电话	13575736355
成果应用起始时间	2018.01-2022.12		
应用情况	北京交通大学，复旦大学，中国计量科学研究院，上海市计量测试技术研究院，上海拍频光电科技有限公司联合研制的分离式无热源亚纳米位移测量技术，利用导入式光纤无热源读数头概念，实现了亚纳米级精度的微位移测量系统。 利用此技术，我们开展了微位移测试方面的研究工作和初步的计量研究工作，培养了数名研究生及工程人员。为我校高精度测试相关项目提供了重要的技术支撑。		
声明	我单位保证上述提供的应用情况真实无误。如有不符，本单位愿意承担相关责任并接受相应的处理。 法人单位公章 2022年6月6日		

注：如表中所填内容不涉及经济效益情况，只需加盖应用单位法人公章。

附件 2

中国计量测试学会科学技术进步奖应用证明

应用成果名称	分离式无热源亚纳米位移测量技术		
应用单位名称	中国石油大学（华东）		
应用单位联系人	于连栋	联系电话	13856061480
成果应用起始时间	2019.01-2022.12		
应用情况	北京交通大学，复旦大学，中国计量科学研究院，上海市计量测试技术研究院，上海拍频光电科技有限公司联合研制的分离式无热源亚纳米位移测量技术，实现了自主可控的 SOI 光波导光栅分离式无热源亚纳米位移测量新系统。 该技术为我们承担的仪器项目提供了高精度微位移模块。利用该系统，我们开展了三坐标测试、微纳传感方面的研究工作，培养了数名研究生。		
声明	我单位保证上述提供的应用情况真实无误。如有不符，本单位愿意承担相关责任并接受相应的处理。 法人单位公章 年 月 日 		

注：如表中所填内容不涉及经济效益情况，只需加盖应用单位法人公章。

附件 2

中国计量测试学会科学技术进步奖应用证明

应用成果名称	分离式无热源亚纳米位移测量技术		
应用单位名称	北京迪达斯汀矿冶科技有限公司		
应用单位联系人	单伟明	联系电话	13601270522
成果应用起始时间	2020.03.01-2021.12.01		
应用情况	北京迪达斯汀矿冶科技有限公司专注于矿冶技术与相关设备的研发与销售。从 2020 年开始, 本公司采用上海拍频光电科技有限公司与北京交通大学研究成果“分离式无热源亚纳米位移测量技术中”的精密微位移检测传感器, 实时监测金属材料在不同压力、不同温度下的形变, 为公司在工程材料特性及相关设备研发方面提供了有力支撑。 该传感器系统 2020 年为本司创造经济效益达二百余万元, 2021 年为为本司创造经济效益四百余万元。		
声明	我单位保证上述提供的应用情况真实无误。如有不符, 本单位愿意承担相关责任并接受相应的处理。  单位财务专用章 2022 年 03 月 24 日  法人单位公章 2022 年 03 月 24 日		

注: 如表中所填内容不涉及经济效益情况, 只需加盖应用单位法人公章。

附件 2

中国计量测试学会科学技术进步奖应用证明

应用成果名称	分离式无热源亚纳米位移测量技术		
应用单位名称	上海智冶光电科技有限公司		
应用单位联系人	肖李青	联系电话	18217672231
成果应用起始时间	2018. 12. 01-2021. 12. 01		
应用情况	上海智冶光电科技有限公司成立于 2018 年, 专注于为光通信、光电传感、光纤器件等领域的客户提供专业的设备器件。 本公司开发的“光纤形变传感系统”, 采用了北京交通大学与上海拍频光电科技有限公司的研究成果——“分离式无热源亚纳米位移测量技术”。本司利用该亚纳米位移测量技术对自研产品进行校准和标定, 极大地提高了本公司产品的测量精度。 该系统于 2019 年正式产品化, 2020 年为本公司创造经济效益达两百余万元, 2021 年为本公司创造经济效益达三百多万元, 预计未来会成逐年递增趋势。		
声明	我单位保证上述提供的应用情况真实无误。如有不符, 本单位愿意承担相关责任并接受相应的处理。  单位财务专用章 2022 年 6 月 7 日  法人单位公章 2022 年 6 月 7 日		

注: 如表中所填内容不涉及经济效益情况, 只需加盖应用单位法人公章。



证书号第 844817 号



发 明 专 利 证 书

发 明 名 称: 一种用于微纳米坐标测量的多测头测量方法与装置

发 明 人: 李源; 陈欣; 雷李华; 王丽华

专 利 号: ZL 2010 1 0136223.2

专利申请日: 2010 年 03 月 30 日

专 利 权 人: 上海市计量测试技术研究院

授权公告日: 2011 年 09 月 28 日

本发明经过本局依照中华人民共和国专利法进行审查, 决定授予专利权, 颁发本证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。

本专利的专利权期限为二十年, 自申请日起算。专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年 03 月 30 日前缴纳。未按照规定缴纳年费的, 专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

专利书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长

田力普



2011 年 09 月 28 日

证书号第 1649596 号



发 明 专 利 证 书

发 明 名 称: 一种用于微纳米尺度二维尺寸测量的微触觉测头

发 明 人: 吴俊杰;李源;吴佳欢;简黎;范国芳;陈欣;雷李华;毛辰飞

专 利 号: ZL 2012 1 0557870. X

专利申请日: 2012 年 12 月 20 日

专 利 权 人: 上海市计量测试技术研究院

授权公告日: 2015 年 04 月 29 日

本发明经过本局依照中华人民共和国专利法进行审查, 决定授予专利权, 颁发本证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。

本专利的专利权期限为二十年, 自申请日起算。专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年 12 月 20 日前缴纳。未按照规定缴纳年费的, 专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长
申长雨

申长雨



证书号第 10890533 号



实用新型专利证书

实用新型名称：一种基于四象限光电探测器的三维微接触式测量装置

发 明 人：吴俊杰;李源;王阳;傅云霞;蔡潇雨;魏佳斯;周勇;孙恺欣

专 利 号：ZL 2019 2 1943497.5

专 利 申 请 日：2019 年 11 月 12 日

专 利 权 人：上海市计量测试技术研究院

地 址：200040 上海市静安区长乐路 1226 号

授权公告日：2020 年 07 月 03 日

授权公告号：CN 210922540 U

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法经过初步审查，决定授予专利权，颁发实用新型专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长
申长雨

申长雨



证书号第 10885838 号



实用新型专利证书

实用新型名称：一种基于悬臂梁结构的改进光波导传感器结构

发 明 人：井亚超;范国芳;李源;王目光;张泽平;王荣伟

专 利 号：ZL 2019 2 2292246.1

专 利 申 请 日：2019 年 12 月 19 日

专 利 权 人：北京交通大学

地 址：100044 北京市海淀区西直门外上园村 3 号

授权公告日：2020 年 06 月 30 日

授权公告号：CN 210893173 U

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法经过初步审查，决定授予专利权，颁发实用新型专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。



局长
申长雨

申长雨





210000

南京市雨花台区宁双路 19 号云密城 10 号楼(E 栋)6 层-B 区
南京禾祁专利代理事务所(普通合伙) 黄天天(17315333561)

发文日:

2021 年 12 月 16 日



申请号或专利号: 202111532927.6

发文序号: 2021121600064630

专 利 申 请 受 理 通 知 书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 38 条、第 39 条的规定, 申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日、申请人和发明创造名称通知如下:

申请号: 202111532927.6

申请日: 2021 年 12 月 15 日

申请人: 上海拍频光电科技有限公司

发明创造名称: 一种放置稳定的便携式光学干涉仪

经核实, 国家知识产权局确认收到文件如下:

说明书 每份页数:7 页 文件份数:1 份

专利代理委托书 每份页数:2 页 文件份数:1 份

说明书摘要 每份页数:1 页 文件份数:1 份

实质审查请求书 每份页数:1 页 文件份数:1 份

发明专利请求书 每份页数:4 页 文件份数:1 份

权利要求书 每份页数:2 页 文件份数:1 份 权利要求项数: 7 项

说明书附图 每份页数:2 页 文件份数:1 份

提示:

1. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时, 可以向国家知识产权局请求更正。
2. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 再向国家知识产权局办理各种手续时, 均应当准确、清晰地写明申请号。
3. 国家知识产权局收到向外国申请专利保密审查请求书后, 依据专利法实施细则第 9 条予以审查。

审 查 员: 自动受理

审查部门: 专利局初审及流程管理部

200101
2019. 11

纸件申请, 回函请寄: 100088 北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 国家知识产权局受理处收
电子申请, 应当通过电子专利申请系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定外, 以纸件等其他形式提交的文件视为未提交。



210000

南京市雨花台区宁双路 19 号云密城 10 号楼(E 栋)6 层-B 区
南京禾祁专利代理事务所(普通合伙) 黄天天(17315333561)

发文日:

2021 年 12 月 20 日



申请号或专利号: 202111557735.0

发文序号: 2021122000426950

专 利 申 请 受 理 通 知 书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 38 条、第 39 条的规定, 申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日、申请人和发明创造名称通知如下:

申请号: 202111557735.0

申请日: 2021 年 12 月 20 日

申请人: 上海拍频光电科技有限公司

发明创造名称: 一种精准型固件位移测量设备

经核实, 国家知识产权局确认收到文件如下:

专利代理委托书 每份页数:2 页 文件份数:1 份

实质审查请求书 每份页数:1 页 文件份数:1 份

发明专利请求书 每份页数:4 页 文件份数:1 份

说明书 每份页数:7 页 文件份数:1 份

权利要求书 每份页数:2 页 文件份数:1 份 权利要求项数: 8 项

说明书附图 每份页数:4 页 文件份数:1 份

说明书摘要 每份页数:1 页 文件份数:1 份

提示:

1. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时, 可以向国家知识产权局请求更正。
2. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 再向国家知识产权局办理各种手续时, 均应当准确、清晰地写明申请号。
3. 国家知识产权局收到向外国申请专利保密审查请求书后, 依据专利法实施细则第 9 条予以审查。

审 查 员: 自动受理

审查部门: 专利局初审及流程管理部



210000

南京市雨花台区宁双路 19 号云密城 10 号楼(E 栋)6 层-B 区
南京禾祁专利代理事务所(普通合伙) 黄天天(17315333561)

发文日:

2021 年 12 月 23 日



申请号或专利号: 202123259432.9

发文序号: 2021122302241540

专 利 申 请 受 理 通 知 书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 38 条、第 39 条的规定, 申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日、申请人和发明创造名称通知如下:

申请号: 202123259432.9

申请日: 2021 年 12 月 23 日

申请人: 上海拍频光电科技有限公司

发明创造名称: 一种高精度双频激光干涉仪

经核实, 国家知识产权局确认收到文件如下:

说明书 每份页数:5 页 文件份数:1 份

权利要求书 每份页数:2 页 文件份数:1 份 权利要求项数: 6 项

专利代理委托书 每份页数:2 页 文件份数:1 份

摘要附图 每份页数:1 页 文件份数:1 份

实用新型专利请求书 每份页数:4 页 文件份数:1 份

说明书附图 每份页数:4 页 文件份数:1 份

说明书摘要 每份页数:1 页 文件份数:1 份

提示:

1. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时, 可以向国家知识产权局请求更正。
2. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 再向国家知识产权局办理各种手续时, 均应当准确、清晰地写明申请号。
3. 国家知识产权局收到向外国申请专利保密审查请求书后, 依据专利法实施细则第 9 条予以审查。

审 查 员: 自动受理

审查部门: 专利局初审及流程管理部



210000

南京市雨花台区宁双路 19 号云密城 10 号楼(E 栋)6 层-B 区
南京禾祁专利代理事务所(普通合伙) 黄天天(17315333561)

发文日:

2021 年 12 月 27 日



申请号或专利号: 202123298186.8

发文序号: 2021122700598960

专 利 申 请 受 理 通 知 书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 38 条、第 39 条的规定, 申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日、申请人和发明创造名称通知如下:

申请号: 202123298186.8

申请日: 2021 年 12 月 27 日

申请人: 上海拍频光电科技有限公司

发明创造名称: 一种频差稳定可调的双频激光器

经核实, 国家知识产权局确认收到文件如下:

摘要附图 每份页数:1 页 文件份数:1 份

实用新型专利请求书 每份页数:4 页 文件份数:1 份

权利要求书 每份页数:2 页 文件份数:1 份 权利要求项数: 6 项

专利代理委托书 每份页数:2 页 文件份数:1 份

说明书附图 每份页数:4 页 文件份数:1 份

说明书摘要 每份页数:1 页 文件份数:1 份

说明书 每份页数:5 页 文件份数:1 份

提示:

1. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时, 可以向国家知识产权局请求更正。
2. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 再向国家知识产权局办理各种手续时, 均应当准确、清晰地写明申请号。
3. 国家知识产权局收到向外国申请专利保密审查请求书后, 依据专利法实施细则第 9 条予以审查。

审 查 员: 自动受理

审查部门: 专利局初审及流程管理部

200101
2019. 11

纸件申请, 回函请寄: 100088 北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 国家知识产权局受理处收
电子申请, 应当通过电子专利申请系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定外, 以纸件等其他形式提交的文件视为未提交。



210000

南京市雨花台区宁双路 19 号云密城 10 号楼(E 栋)6 层-B 区
南京禾祁专利代理事务所(普通合伙) 黄天天(17315333561)

发文日:

2021 年 12 月 29 日



申请号或专利号: 202123350644.8

发文序号: 2021122903441780

专 利 申 请 受 理 通 知 书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 38 条、第 39 条的规定, 申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日、申请人和发明创造名称通知如下:

申请号: 202123350644.8

申请日: 2021 年 12 月 29 日

申请人: 上海拍频光电科技有限公司

发明创造名称: 一种减振光纤干涉仪设备

经核实, 国家知识产权局确认收到文件如下:

实用新型专利请求书 每份页数:4 页 文件份数:1 份

摘要附图 每份页数:1 页 文件份数:1 份

权利要求书 每份页数:2 页 文件份数:1 份 权利要求项数: 7 项

专利代理委托书 每份页数:2 页 文件份数:1 份

说明书 每份页数:5 页 文件份数:1 份

说明书附图 每份页数:4 页 文件份数:1 份

说明书摘要 每份页数:1 页 文件份数:1 份

提示:

1. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时, 可以向国家知识产权局请求更正。
2. 申请人收到专利申请受理通知书之后, 再向国家知识产权局办理各种手续时, 均应当准确、清晰地写明申请号。
3. 国家知识产权局收到向外国申请专利保密审查请求书后, 依据专利法实施细则第 9 条予以审查。

审 查 员: 自动受理

审查部门: 专利局初审及流程管理部

200101
2019.11

纸件申请, 回函请寄: 100088 北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 国家知识产权局受理处收
电子申请, 应当通过电子专利申请系统以电子文件形式提交相关文件。除另有规定外, 以纸件等其他形式提交的文件视为未提交。



210000

南京市雨花台区宁双路 19 号云密城 10 号楼(E 栋)6 层-B 区
南京禾祁专利代理事务所(普通合伙) 黄天天(17315333561)

发文日:

2021 年 12 月 29 日



申请号或专利号: 202123350642.9

发文序号: 2021122903439960

专 利 申 请 受 理 通 知 书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 38 条、第 39 条的规定,申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日、申请人和发明创造名称通知如下:

申请号: 202123350642.9

申请日: 2021 年 12 月 29 日

申请人: 上海拍频光电科技有限公司

发明创造名称: 一种适配性高的位移测量仪

经核实,国家知识产权局确认收到文件如下:

说明书 每份页数:5 页 文件份数:1 份

权利要求书 每份页数:2 页 文件份数:1 份 权利要求项数: 6 项

专利代理委托书 每份页数:2 页 文件份数:1 份

摘要附图 每份页数:1 页 文件份数:1 份

实用新型专利请求书 每份页数:4 页 文件份数:1 份

说明书摘要 每份页数:1 页 文件份数:1 份

说明书附图 每份页数:4 页 文件份数:1 份

提示:

1. 申请人收到专利申请受理通知书之后,认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时,可以向国家知识产权局请求更正。
2. 申请人收到专利申请受理通知书之后,再向国家知识产权局办理各种手续时,均应当准确、清晰地写明申请号。
3. 国家知识产权局收到向外国申请专利保密审查请求书后,依据专利法实施细则第 9 条予以审查。

审 查 员: 自动受理

审查部门: 专利局初审及流程管理部

附件4 其他知识产权证明
附件4-1: 软件著作权-数字精准
微位移测量软件

中华人民共和国国家版权局

计算机软件著作权登记证书

证书号: 软著登字第9199185号

软件名称: 数字精准微位移测量软件
V1.0

著作权人: 上海拍频光电科技有限公司;王宁;张志平;高为宫

开发完成日期: 2021年08月16日

首次发表日期: 2021年08月16日

权利取得方式: 原始取得

权利范围: 全部权利

登记号: 2022SR0244986

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定, 经中国版权保护中心审核, 对以上事项予以登记。



No. 10221762



2022年02月18日

中华人民共和国国家版权局

计算机软件著作权登记证书

证书号: 软著登字第9191141号

软件名称: 微位移测量电子细分传感器调试软件
V1.0

著作权人: 上海拍频光电科技有限公司; 张文华; 张志平; 高为宫

开发完成日期: 2021年09月10日

首次发表日期: 2021年09月10日

权利取得方式: 原始取得

权利范围: 全部权利

登记号: 2022SR0236942

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定, 经中国版权保护中心审核, 对以上事项予以登记。



No. 10212127



2022年02月16日

中华人民共和国国家版权局

计算机软件著作权登记证书

证书号: 软著登字第9199251号

软件名称: 微位移测量电子细分参数分析软件
V1.0

著作权人: 上海拍频光电科技有限公司;王宁;张志平;高为宫

开发完成日期: 2021年10月20日

首次发表日期: 2021年10月20日

权利取得方式: 原始取得

权利范围: 全部权利

登记号: 2022SR0245052

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定, 经中国版权保护中心审核, 对以上事项予以登记。



No. 10221959



2022年02月18日

报告编号：20221100300265000

科技查新报告

项目名称：悬臂 SOI 光波导光栅分离式无热源亚纳米位移测量技术

委托人：北京交通大学

委托日期：2022 年 5 月 9 日

查新机构：机械工业信息研究院

(科技查新专用章)

完成日期：2022 年 5 月 27 日



七、查新结论

根据用户提供的资料和委托要求,我们针对“悬臂 SOI 光波导光栅分离式无热源亚纳米位移测量技术”课题,进行国内外联机检索,利用了 30 个有关数据库及互联网相关网站,检索到相关文献 20 篇,经比较、分析、鉴别,可以得出结论如下:

在本次检索到的国内外公开发表的专利与非专利文献中,已有关于可调量程拉绳式光纤布拉格光栅位移传感器的报道,其中提到了设计基于悬臂梁结构的可调量程拉绳式光纤布拉格光栅位移传感器,悬臂梁两侧对称粘贴两个不同中心波长的光纤光栅。已有关于拼接光栅位移测量系统及测量方法的报道,其中提到了测量光与参考光分别通过光纤耦合输出模块进入读数头;参考光与测量光在光纤耦合接收模块内发生干涉形成干涉信号;光纤耦合接收模块将干涉信号上传至信号处理系统进行处理,获得光栅运动的位移量。已有关于基于条纹相移光栅干涉仪定位系统超精密位移测量方法与实验研究的报道,其中提到了基于光栅干涉相位移动扫描原理的纳米级位移测量系统;利用光栅干涉仪实现光学四倍频,再利用条纹移相机构实现信号细分,使得系统获得亚纳米级的分辨率。已有关于无线小型化高分辨率光学位移传感器的报道,其中提到了无源光学读取头和固定光电源/探测器模块。

而该项目查新点具有以下特征:

1. 采用导入式光纤,将读数头与光源和控制器等热源物理隔离,提出并实现无热源读数头结构。
2. 采用剥离工作区硅衬底,减薄二氧化硅背后至微米量级等方法,改进传统 SOI 结构,提出悬臂 SOI 光波导光栅位移传感结构,实现高分辨力的悬臂 SOI 光波导光栅位移传感。
3. 采用衍射探测与干涉探测手段联用,融合高倍电子细分技术与弱光电探测技术,测量量程 0.55mm 范围内,实现 0.1nm 分辨力。
4. 采用无热源读数头、空间光纤高效率耦合、高稳定波长输出等多模块耦合,搭建无热源位移测量系统,实现悬臂 SOI 光波导光栅分离式无热源亚纳米位移测量系统,测量量程 0.55mm 范围内,实现 0.04%线性度,0.4nm 定标精度,0.1nm 分辨力。

经国内外文献检索并对相关文献分析对比,除该查新项目委托方及合作方发表的文献和项目介绍外,在其他相关文献中未见有与该项目所述查新点所述技术特征相同的报道。

查新员(签字):

姜伟迪

职称:

工程师

审核员(签字):

苗健毅

职称:

教授级高工

(科技查新专用章)

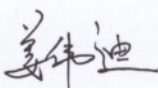
2022 年 5 月 27 日

八、查新员、审核员声明

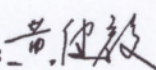
1. 我们按照 GB/T 32003—2015《科技查新技术规范》进行查新和审核，并作出上述查新结论。

2. 我们获取的报酬与本报告中的分析、意见和结论无关，也与本报告的使用无关。

3. 本报告仅用于申报奖励。

查新员（签字）：

2022 年 5 月 27 日

审核员（签字）：

2022 年 5 月 27 日

九、附件清单

检索到文献 20 篇，详见附件。

十、备注

1. 机械工业信息研究院是国家一级科技查新单位。
2. 本报告无“查新专用章”和骑缝章无效。
3. 本报告涂改、部分复印无效。
4. 检索结果及报告结论仅供参考。



An optical waveguide microcantilever sensor with a dual-output waveguide readout

Hongru Zhang^a, Guofang Fan^{a,*}, Shi Li^b, Gaoshan Jing^c, Yuan Li^d, Zhiping Zhang^{e,*}

^a Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

^b National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

^c Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100444, China

^d Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, National Center of Measurement and Testing for East China, National Center of Testing Technology, Shanghai 201203, China

^e The Academy for Engineering & Technology, Fudan University, Shanghai, 200433, China

ARTICLE INFO

Keywords:

Optical waveguide microcantilever
Sensor
Integrated optics

ABSTRACT

An optical waveguide microcantilever sensor with a dual-output waveguide readout is developed to obtain a linear response for the deflection of cantilever. A finite element method is employed to characterize the optical waveguide microcantilever sensor. A systematic and detailed discussion has been presented to describe an optical waveguide cantilever sensor with a dual-output waveguide. One can see that most of the results are interesting, even very different from general opinions. The design is a tradeoff of the sensitivity, linearity and operation range. These will be helpful for an optimized design of the microcantilever sensor.

1. Introduction

Microcantilever-based sensors can be operated in different modes which yield different information and which when combined can be used to obtain a unique set of data. The sensors are versatile and can measure phenomena such as change in surface stress [1], temperature [2] and mass [3]. In order to detect minute deflection signals of cantilever, several read-out methods have been investigated. Capacitive, piezoresistive and optical leverage principle are the commonly used read-out system for Atomic Force Microscope (AFM) [4–7]. These methods are robust and well established but rather bulky, less sensitivity and incompatible processes.

Nowadays, to pursue high sensitivity, fast response, higher integration and lower cost advantages, optical waveguide sensing technology which owns high index contrast and CMOS-compatibility has attracted widespread attention [8–10]. To date, several schemes for combining the microcantilever transduction system with the integrated optical waveguide technology have been used in many fields [11]. The initial configuration of the whole SiO₂ cantilever acting as waveguides was presented in 2006 by Zinoviev et al. [12]. In the following years, other materials, such as polymer [13], InP [14] and Si [15], were employed by other groups to improve the bend-feeling properties of the end-to-end coupling cantilever waveguide. Another configuration was that the waveguide system was integrated in perpendicular direction upon the cantilever [16,17]. There were two gaps sited on the transmit path

of light. The number of optical waveguides in this concept could be further extended for measuring the multi points of the beam, making it possible to more accurately measure the movement of the cantilever. In a different idea, a non-end coupling scheme was proposed for higher sensitivity. A straight waveguide or a grating waveguide was perpendicular fabricated on the substrate with a short separation distance to cantilever. A surface plasmon waveguide was the cantilever itself or mounted under the surface of it [18,19]. The vertical coupling mode was affected by the displacement of the cantilever, further for changing the output light intensity signal [20–22]. The aforementioned cantilever optical waveguide mechanisms laid the foundation for the development of this field.

However, the Gaussian-like response were shown in the output signal results changing with the cantilever bending for the traditional optical waveguide microcantilever sensor. The Gaussian-like response will lead to lack of sensitivity in the middle position occurred in the entire deflection range [23]. Also, the Gaussian-like response means non-linearity. High linearity is desired for the sensor, which can facilitate the conversion between output signal and cantilever deflection, also greatly simplify the data processing system and improve the response speed of the sensing system [24,25].

Herein we propose a type of integrated optical readout method aiming at improving the monotonic and linear dependence in the entire cantilever deflection range. By capturing the output optical signal from the end of the cantilever waveguide using a dual-output waveguide,

* Corresponding authors.

E-mail addresses: gffan@bjtu.edu.cn (G. Fan), zzp8101@163.com (Z. Zhang).

ORIGINAL ARTICLE

Integrated opto-mechanical cantilever sensor with a rib waveguide

Hongru Zhang¹  | Guofang Fan¹  | Shi Li²  | Xiaoyu Cai³ | Jiasi Wei³ | Gaoshan Jing⁴ | Yuan Li³ | Zhiping Zhang⁵

¹Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing, China

²National Institute of Metrology, Beijing, China

³National Center of Measurement and Testing for East China, National Center of Testing Technology, Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai, China

⁴Institute of Microelectronics of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

⁵The Academy for Engineering & Technology, Fudan University, Shanghai, China

Correspondence

Guofang Fan and Zhiping Zhang, Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China.

Email: gffan@bjtu.edu.cn; zzp8101@163.com

Funding information

National Key R&D Program of China, Grant/Award Number: 2021YFF0600905

Abstract

An integrated opto-mechanical cantilever sensor with a rib waveguide is reported in this paper. The device consists of a rib waveguide cantilever with buried waveguides on silicon. The rib cantilever is introduced to match better with the buried waveguide, further for increasing the interface coupling efficiency. With this configuration, single-mode operating can be achieved in transverse direction without decreasing the width of optical waveguide cantilever. The system sensitivity is $1.1 \mu\text{m}^{-1}$ which is increased by about 21%, compared with the conventional structure.

KEYWORDS

coupling efficiency, opto-mechanical cantilever sensor, rib waveguide, sensitivity

1 | INTRODUCTION

The microcantilever has received increasing attention in the field of biological and chemical sensing due to a tiny sensor area, a label-less detection method, low-cost fabrication and mass production and compatibility with CMOS (complementary metal-oxide semiconductor) technology.^{1–7} The microcantilever sensor is carried out by reading out the displacement of a cantilever under a stress

generated on its surface. There are many types of readout methods.^{8–10} In which, optical method is characterised by high sensitivity.^{11,12} However, low integration level of optical readout method cannot meet the development requirement of biosensor technology.

An optical waveguide microcantilever (OWC) sensor is developed through combination of microcantilever and optical waveguide technology, which shows a high integration as a biosensor device.^{13,14} There are many reports

An integrated optical waveguide micro-cantilever system for chip-based AFM

Xinxin Tang¹ | Guofang Fan¹  | Hongru Zhang¹ | Xingang Dai¹ | Yanjun Hu¹ | Zhiping Zhang³ | Yuan Li²

¹ Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing, China

² National Center of Measurement and Testing for East China, Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, National Center of Testing Technology, Shanghai, China

³ Academy for Engineering & Technology, Fudan University, Shanghai, China

Correspondence

Guofang Fan, Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China.
Email: gffan@bjtu.edu.cn;
liyuan@simt.com.cn

Abstract

An optical waveguide cantilever system with a tip is introduced as the displacement detection system of chip-based atomic force microscopy (AFM) system. A chip-based AFM on optical waveguide is demonstrated with sensitivity of up to $4.0 \times 10^{-2} \text{ nm}^{-1}$, which is mainly constructed by a 210 nm thick optical waveguide cantilever with a nano-tip. The nano-tip is a height of 1.2 μm and diameter of 140 nm. This integrated on-chip system provides a displacement range of approximately $\pm 0.4 \mu\text{m}$, which makes it possible for the device to be used for AFM imaging and paves the way for further performance improvement.

KEYWORDS

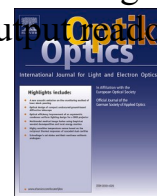
atomic force microscopy (AFM), chip-based, integrated optical waveguide cantilever system, nano-tip

1 | INTRODUCTION

Atomic force microscopy (AFM) has been widely used in many fields^{1–6} since its invention in 1986.⁷ However, the limited scanning rate due to micro-scale and bulky structure hinders further development of traditional AFM. The large size of traditional AFM is mainly due to the use of optical beam deflection (OBD) detection mechanism⁸ with high sensitivity. Many researchers work hard to miniaturise the AFM by integrating actuators and systems to realise on-chip AFM.^{9–15} Essentially, the detection mechanism is the critical technique to the integration level. The integrated AFM system using optical lever technique⁹ was reported with cantilevers arrays, which is difficult to adjust, so the method cannot be considered as a highly integrated approach. The piezoelectric methods¹¹ are highly integrated devices requiring less alignment and adjustment. Low sensitivity is the drawback of the

piezoelectric method. The static deflections as small as 5 nm were registered by highly integrated MOSFETs,¹² which is large compared with the detection limit of a standard AFM technique. Interferometric methods¹³ demonstrated the best sensitivity, but so far were not commercialised.

In this manuscript, to solve the low integration of cantilever arrays using optical lever technique, an optical waveguide cantilever system with a tip is introduced as the displacement detection system of chip-based AFM system. A tip is designed with the optical waveguide cantilever as the probe of AFM. A theoretical analysis model is developed. An analysis for an optical waveguide cantilever system with a tip is carried out. The results show that an optical waveguide cantilever system with a tip can be used in the application of AFM by evaluating the relationship between the cantilever displacement and the device sensitivity.



Original research article

Quasi-linear response of an integrated optical waveguide sensor by a double output readout method



Hongru Zhang^a, Guofang Fan^{a,*}, Xiaoyu Cai^b, Jiasi Wei^b, Gaoshan Jing^c, Shi Li^d, Zhiping Zhang^e, Yuan Li^b

^a Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

^b Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, National Center of Measurement and Testing for East China, National Center of Testing Technology, Shanghai 201203, China

^c Institute of Microelectronics of the Chinese Academy, Beijing 100444, China

^d National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

^e The Academy for Engineering & Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China

A B S T R A C T

This paper reports quasi-linear response of the signal with cantilever deflection for an integrated optical waveguide biosensor by a double output readout method. The readout method uses a double output waveguide structure to divide the received light into two power signals, further for achieving the differential signal as the operating signal. With this method, the operation signal has a good monotonicity with cantilever deflection in range of $\pm 0.4 \mu\text{m}$.

1. Introduction

Optical waveguide sensors have a wide variety of applications due to the high sensitivity and high integration density, which is based on the interaction of the evanescent field with the surrounding media changing with the external factors [1–4]. Many sensing mechanisms on the optical waveguide have been proposed, including interferometric sensor [5–7], surface plasmon sensor [8,9], photonic crystal [10,11], microcavity-based sensor [12,13] and grating-based sensor [14,15].

Especially, the optical waveguide micro-cantilever sensors have received increasing attention in the field of biological, chemical, and environmental due to their high sensitivity, low-cost and label-free operation [16–19]. The optical waveguide cantilever sensor was first proposed by Lechuga's group, which was based on the dependence of coupling efficiency between two butt-coupled waveguides on their misalignment with respect to each other [20]. Following this initial work, many approaches have been developed to further improve the performance of microcantilever-based sensors. Nordström et al. fabricated a polymeric rather than Si cantilever-based biosensor with integrated optical read-out [21,22]. Polymer cantilever opens up for an increase in sensitivity since the softer material bends more for the same applied surface stress. On the contrary, a softer material also means that the cantilever will have difficulties to support itself. Fariña's group introduce an extra cladding layer to reduce the optical losses. They designed a clamping region between the input waveguides and microcantilever to avoid generation of stress and increase the coupling of light [23, 24]. These groups work hard to improve the performance of the sensor. However, a challenge for an optical waveguide cantilever sensor is that the approach suffers from lack of sensitivity in the middle of the measurement range where the cantilever waveguide is

* Corresponding author.

E-mail address: gffan@bjtu.edu.cn (G. Fan).

Received March 17, 2020, accepted March 25, 2020, date of publication March 30, 2020, date of current version April 15, 2020.

Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2020.2984058

Analysis for an Improved Nanomechanical Microcantilever Sensor on Optical Waveguides

YACHAO JING¹, GUOFANG FAN¹, RONGWEI WANG¹, ZEPING ZHANG¹, MUGUANG WANG¹,
XIAOYU CAI², JIASI WEI², XIN CHEN³, HONGYU LI⁴, AND YUAN LI²

¹Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

²National Center of Testing Technology, National Center of Measurement and Testing for East China, Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China

³Department of Instrument Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

⁴College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

Corresponding authors: Guofang Fan (gffan@bjtu.edu.cn) and Yuan Li (liyuan@simt.com.cn)

This work was supported in part by the National Key Scientific Instrument and Equipment Development Projects of China under Grant 2014YQ090709, and in part by the Key Research and Development Project of Shandong Province under Grant 2019GHY112072 and Grant 2019GHY112051.

ABSTRACT An analysis model for an optical waveguide microcantilever sensor is developed combining the optical and mechanical models. An improved optical waveguide microcantilever sensor with a buffer is provided and taken as an example to explore using the analysis model. A systematic and detailed discussion about the couplers for the input waveguide to optical waveguide cantilever and the optical waveguide cantilever to the output waveguide of the improved waveguide cantilever sensor is presented. The sensitivity of an improved optical waveguide cantilever sensor is evaluated by analyzing the input/output waveguide, buffer, microcantilever, and gap. An improved optical waveguide microcantilever sensor by adding a buffer shows a sensitivity of $5.7 \times 10^{-4} \text{ nm}^{-1}$, which is improved by 51.3%, compared with a conventional optical waveguide microcantilever sensor. The design of an optical waveguide cantilever sensor is a trade-off of different design parameters. These will be helpful for the study of an optical waveguide cantilever sensor.

INDEX TERMS Optical waveguide cantilever, buffer, analysis model.

I. INTRODUCTION

Nano-mechanical sensors [1] have become paramount tools as transducers for highly sensitive biomolecule detection, such as viruses [2], proteins [3], cancer cells [4], and small molecules [5]–[7]. It performs real-time detection and readout by changing the mechanical behavior of the transducer. As a kind of nanomechanical sensors, integrated optical waveguide microcantilever-based sensors have received increasing attention [8]–[11] due to the advantages of high sensitivity, small size and easy integration for multiple detection [12]–[15]. In an optical waveguide cantilever sensor, the optical waveguide cantilever (OWC) works for the mechanical response generation and light propagation as an optical waveguide, the sensor detects the mechanical response by observing the output optical power of the optical waveguide cantilever with different bending displacements

in return [13]. As a relatively new nanomechanical cantilever sensor, the researchers focus on the material of the optical waveguide microcantilever sensors to improve the performance [16]–[21]. However, few detailed analysis has been performed for the nanomechanical microcantilever sensors on optical waveguides.

In this paper, a detailed analysis of nanomechanical microcantilever sensors on optical waveguides was developed using mechanical and optical models. A finite-element method (FEM) was employed to analyze the nanomechanical microcantilever sensors. We took an improved optical waveguide cantilever system [22] as an example to explore the analysis. Following this introduction, in Section II, the principle of the optical waveguide cantilever sensor was presented, the model for the optical waveguide cantilever was developed. Section III provided a discussion about the results and their comparison with the conventional structure. The conclusion was described in Section IV.

The associate editor coordinating the review of this manuscript and approving it for publication was Sukhdev Roy.



Article

Improved Optical Waveguide Microcantilever for Integrated Nanomechanical Sensor

Yachao Jing ¹, Guofang Fan ^{1,*}, Rongwei Wang ¹, Zeping Zhang ¹, Xiaoyu Cai ², Jiasi Wei ², Xin Chen ³, Hongyu Li ⁴ and Yuan Li ^{2,*}

¹ Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network, Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 18120074@bjtu.edu.cn (Y.J.); 18120020@bjtu.edu.cn (R.W.); 18125090@bjtu.edu.cn (Z.Z.)

² Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, National Center of Measurement and Testing for East China, National Center of Testing Technology, Shanghai 201203, China; caixiaoyu@simt.com.cn (X.C.); weijis@simt.com.cn (J.W.)

³ Department of Instrument Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; xchen.ie@sjtu.edu.cn

⁴ College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; lihy08@gmail.com

* Correspondence: gffan@bjtu.edu.cn (G.F.); liyuan@simt.com.cn (Y.L.)

Received: 19 August 2019; Accepted: 3 October 2019; Published: 8 October 2019



Abstract: This paper reports on an improved optical waveguide microcantilever sensor with high sensitivity. To improve the sensitivity, a buffer was introduced into the connection of the input waveguide and optical waveguide cantilever by extending the input waveguide to reduce the coupling loss of the junction. The buffer-associated optical losses were examined for different cantilever thicknesses. The optimum length of the buffer was found to be 0.97 μm for a cantilever thickness of 300 nm. With this configuration, the optical loss was reduced to about 40%, and the maximum sensitivity was more than twice that of the conventional structure.

Keywords: optical waveguide cantilever sensor; buffer; sensitivity

1. Introduction

In recent years, the development of micro processing and manufacturing technology has accelerated the research progress of nanomechanical sensors [1–5]. Nanomechanical sensors have been widely studied in biological, chemical, and environmental protection sensor applications because of their high sensitivity and capacity for integration [6–8]. The sensitivity of nanomechanical sensors is mainly affected by the readout method, relying on optical sensors used in atomic force microscopy or interference methods [9]. An alternative method has been developed that uses an optical waveguide cantilever (OWC) to detect the deflection or resonance change of cantilevers [10–13]. In this method, the light coupled into the optical waveguide cantilever and emitted from the free-end of the cantilever travels across a small gap and is captured by an output waveguide (OW). The major benefit of this method is the higher integration of cantilever arrays that can provide highly sensitive readouts. There are many reports about optical waveguide cantilevers based on different material platforms, for example, SiO_2 [10], polymer [14], InP [15], and Si [16] as the cantilever waveguide.

In this study, we examined material platforms using Si_3N_4 as the optical waveguide and SiO_2 as the cantilever to explore an optical waveguide cantilever system. An improved optical waveguide cantilever system was developed to improve optical sensitivity. Unlike the conventional structure, the proposed structure extends the input waveguide (IW) on the optical waveguide cantilever to

Numerical study on an optical waveguide cantilever sensor

Guofang Fan,^a Yuan Li,^{b,*} Chunguang Hu,^c Lihua Lei,^b and Hongyu Li^{d,*}

^aBeijing Jiaotong University, Institute of Lightwave Technology, Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Beijing, China

^bShanghai Institute of Measurement and Testing Technology, National Center of Measurement and Testing for East China, National Center of Testing Technology, Shanghai, China

^cTianjin University, State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin, China

^dShandong University of Science and Technology, College of Mechanical and Electronic Engineering, Qingdao, China

Abstract. An optical waveguide cantilever sensor is introduced, which is determined by monitoring the coupling efficiency between a waveguide cantilever and a waveguide receptor through the cantilever bending. A straightforward model is developed for an optical waveguide cantilever sensor, in which the coupling efficiency between the cantilever and receptor is calculated using the overlap integral. An effective index is introduced to analyze the thickness of input/output waveguides and cantilever for a maximum coupling with a fiber keeping the single-mode operation. The relationship of the optical waveguide sensor (cantilever, gap, and output waveguide) and the sensitivity is presented. As a consequence, we take an optical waveguide cantilever sensor structure of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2/\text{Si}$ as an example, and an optimized design is reported. Moreover, the analysis model is compared with a finite-difference beam propagation method. The result means that our model has a similar accuracy but is more simple, intuitive, and time-saving. © 2017 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) [DOI: [10.1117/1.JNP.11.026007](https://doi.org/10.1117/1.JNP.11.026007)]

Keywords: cantilever sensor; optical waveguide; coupling efficiency.

Paper 16203 received Dec. 27, 2016; accepted for publication Apr. 24, 2017; published online May 12, 2017.

1 Introduction

Recently, cantilever-based sensors have received increasing attention for applications requiring detection of ultraweak forces, which possess high sensitivity, and highly parallel, real-time, and label-free detection.¹⁻³ Most of the cantilever-based sensors are based on the principle of the atomic force microscopy (AFM),^{4,5} in which a laser beam deflected off the cantilever surface is readout by a position-sensitive photodetector. The detection of cantilever displacement can be determined by optical levers,⁶ piezoresistive,⁷ piezoelectric,⁸ capacitance readout,⁹ and integrated MOSFET transistors.¹⁰ Among the most known readout methods, the optical lever is characterized by high sensitivity used in AFM; however, a low integration level complicates performance of the experiments in series.¹¹ Some methods have been developed to resolve the problem. For example, the piezoelectric and piezoresistive detection methods allow a higher and simpler integration when working with arrays of microcantilevers, but they have lower sensitivity.¹² The cavity optomechanics have a higher sensitivity and integration but are relatively complex.¹³

A cantilever sensor with an optical waveguide readout method is introduced.¹⁴⁻¹⁷ The sensor shows a high sensitivity and integration, in which the transducer is integrated with the receptor on one chip, and no preliminary alignment or adjustment is needed. In recent years, by other

*Address all correspondence to: Yuan Li, E-mail: gffan@bjtu.edu.cn; Hongyu Li, E-mail: skdlhy@163.com



8 x 8 wavelength router of optical network on chip

GUOFANG FAN,^{1,2,*} REGIS OROBTCHOUK,^{2,*} BING HAN,² YUAN LI,³ AND HONGYU LI⁴

¹Key Laboratory of All Optical Network and Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

²Institut des Nanotechnologies de Lyon, INSA-Lyon, Université de Lyon, F-69621 Villeurbanne, France

³Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, National Center of Measurement and Testing for East China, National Center of Testing Technology, 201203 Shanghai, China

⁴College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, China

*gffan@bjtu.edu.cn

Abstract: An integrated 8 x 8 wavelength router based on the micro-ring resonators using 2 x 2 multi-interference (MMI) crossing is demonstrated on silicon-on-insulator (SOI) technology, which is manufactured with microelectronics equipment. Experimental results show a free spectral range (FSR) about ~37 nm, an on/off contrast larger than 20 dB, an imbalance among the channels less than 2 dB, a crosstalk of channels smaller than -10 dB, a spacing between close channels about 3.6 ± 0.7 nm and an output efficiency of every channel smaller than 20 dB.

© 2017 Optical Society of America

OCIS codes: (130.3120) Integrated optics devices; (060.4250) Networks.

References and links

1. H. Subbaraman, X. Xu, A. Hosseini, X. Zhang, Y. Zhang, D. Kwong, and R. T. Chen, "Recent advances in silicon-based passive and active optical interconnects," *Opt. Express* **23**(3), 2487–2510 (2015).
2. P. Lorenzo and D. J. Lockwood, eds., *Silicon Photonics III: Systems and Applications*, (Springer Science & Business Media, 2016).
3. A. Kazmierczak, W. Bogaerts, E. Drouard, F. Dortu, P. Rojo-Romeo, F. Gaffiot, D. Van Thourhout, and D. Giannone, "Highly Integrated Optical 4x4 Crossbar in Silicon-on-Insulator Technology," *J. Lightwave Technol.* **27**(16), 3317–3323 (2009).
4. J. W. Zhang, C. Yin, C. Song, R. T. Liu, and B. Li, "Numerical simulation and experiments on mono-polar negative corona discharge applied in nanocomposites," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **24**(2), 791–797 (2017).
5. N. Sherwood-Droz, H. Wang, L. Chen, B. G. Lee, A. Biberman, K. Bergman, and M. Lipson, "Optical 4x4 hitless silicon router for optical networks-on-chip (NoC)," *Opt. Express* **16**(20), 15915–15922 (2008).
6. Fan G F, Orobtcchouk R, Fedeli J M., "Highly integrated optical 8x8 lambda-router in silicon-on-insulator technology: comparison between the ring and racetrack configuration," *SPIE Photonics Europe*, 77190F–8 (2010).
7. Y. Ye, J. Xu, B. Huang, X. Wu, W. Zhang, X. Wang, M. Nikdast, Z. Wang, W. Liu, and Z. Wang, "3-D Mesh-Based Optical Network-on-Chip for Multiprocessor System-on-Chip," *IEEE Trans. J. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems* **32**(4), 584–596 (2013).
8. D Dang, B Patra, R Mahapatra, M Fiers, " Mode-division-multiplexed Photonic Router for High Performance Network-on-Chip," *IEEE Intl Conf. in VLSI Design*, 111 (2015).
9. M. P. Earnshaw, J. B. D. Soole, M. Cappuzzo, L. Gomez, E. Laskowski, and A. Paunescu, "8 x 8 optical switch matrix using generalized Mach-Zehnder interferometers," *IEEE Photonics Technol. Lett.* **15**(6), 810–812 (2003).
10. S. C. Nicholes, M. L. Mašanović, B. Jevremović, E. Lively, L. A. Coldren, and D. J. Blumenthal, "An 8 × 8 InP Monolithic Tunable Optical Router (MOTOR) Packet Forwarding Chip," *J. Lightwave Technol.* **28**(4), 641–650 (2010).
11. M.-J. Kwack, T. Tanemura, A. Higo, and Y. Nakano, "Monolithic InP strictly non-blocking 8×8 switch for high-speed WDM optical interconnection," *Opt. Express* **20**(27), 28734–28741 (2012).
12. K. Suzuki, K. Tanizawa, T. Matsukawa, G. Cong, S. H. Kim, S. Suda, M. Ohno, T. Chiba, H. Tadokoro, M. Yanagihara, Y. Igarashi, M. Masahara, S. Namiki, and H. Kawashima, "Ultra-compact 8 × 8 strictly-non-blocking Si-wire PILOSS switch," *Opt. Express* **22**(4), 3887–3894 (2014).
13. R. Stabile, A. Rohit, and K. A. Williams, "Monolithically Integrated 8 × 8 Space and Wavelength Selective Cross-Connect," *J. Lightwave Technol.* **32**(2), 201–207 (2014).

Optical Waveguides on Three Material Platforms of Silicon-on-Insulator, Amorphous Silicon and Silicon Nitride

Guofang Fan, Regis Orobitchouk, Bing Han, Yuan Li, Chunguang Hu, Lihua Lei, Hongyu Li, Ling Xu, Yanchuan Guo, and Qi Wang

Abstract—Optical waveguides on three material platforms of silicon-on-insulator (SOI), amorphous silicon (a-Si:H) and silicon nitride are analyzed for realization of an optical compact link compatible with CMOS technology. The three material properties are presented. The optical components on the three potential material platforms are put together for a comparison, in which, straight, bent waveguides, and multimode-interference beam splitters for an optical link are designed, fabricated, and measured. The comparison results of simulation and measurement show that a-Si:H has a similar performances with SOI material but lower cost and good feasibility of photonic integration on silicon.

Index Terms—Optical waveguide, three material platforms.

I. INTRODUCTION

WITH increasing demand for high frequency operation and size reduction of the integrated circuits, the micro-

Manuscript received August 21, 2015; revised October 13, 2015; accepted October 20, 2015. This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 11574328), European Union through the FP7 project WADIMOS, National Key Scientific Instrument and Equipment Development Projects of China (No. 2014YQ090709), Projects PIL1304 of State Key Laboratory of Precision Measuring Technology, Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (No. 11401585) and Instruments, and China National Coal Association Instructional Project (No. MTKJ2013-362).

G. Fan is with the Key Laboratory of Photochemical Conversion and Optoelectronic Materials, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China, and also with the Institut des Nanotechnologies de Lyon, INSA-Lyon, Université de Lyon, Villeurbanne F-69621, France (e-mail: fanguofang@mail.ipc.ac.cn).

R. Orobitchouk is with the Institut des Nanotechnologies de Lyon, INSA-Lyon, Université de Lyon, Villeurbanne F-69621, France (e-mail: regis.orobitchouk@insa-lyon.fr).

B. Han is with Shenyang Ruigang Science & Technology Co. Ltd., Shenyang 110011, China and also with the Institut des Nanotechnologies de Lyon, INSA-Lyon, Université de Lyon, Villeurbanne F-69621, France (e-mail: binghb2@hotmail.com).

Y. Li and L. Lei are with the Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, National Center of Measurement and Testing for East China, National Center of Testing Technology, Shanghai 201203, China (e-mail: liyuan@simt.com.cn; leilh@simt.com.cn).

C. Hu is with the State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China (e-mail: cghu@tju.edu.cn).

H. Li is with the College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China (e-mail: lihy08@gmail.com).

L. Xu is with the School of Economics and Management, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China (e-mail: chwang@upc.edu.cn).

Y. Guo and Q. Wang are with the Key Laboratory of Photochemical Conversion and Optoelectronic Materials, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China (e-mail: cim408llh@gmail.com).

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

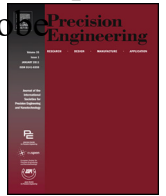
Digital Object Identifier 10.1109/JSTQE.2015.2494681

electronic technologies will face difficulties in the future [1]. One solution to these difficulties will be optical interconnects [2], which become more and more attractive for on-board and intra-chip connections. Silicon photonics play a significant role in optical interconnects [3], [4] due to all the photonic components fabrication using standard silicon processing. In the silicon photonics, the three material platforms of SOI, SiNx and a-Si:H receive attention because they have the availability of thin dielectric films with large refractive index difference (between the refractive index of the core and cladding material), compatibility with conventional silicon technology, and can withstand the process conditions (purity, temperature, stability, compatibility and functionality). Many published works have reported the three material platforms as optical waveguide of optical interconnects [5]–[7], and presented much better performances than the results of this manuscript. For example, ref. [5] presented the propagation losses of 0.026 dB/cm for a SOI waveguide. Ref. [6] reported the propagation losses of 3.2 ± 0.2 dB/cm for TE mode of a-Si:H waveguides at 1550 nm and ref. [7] has propagation losses at 1544 nm of about 4.5 dB/cm for Si₃N₄ waveguides. However, to our knowledge, few manuscript compares the optical component of optical interconnects on the three platforms together.

In this manuscript, we focus on comparison of the optical components using SOI, a-Si:H and SiNx waveguides. First, different material proprieties are reported. Second, design, fabrication and measurement of optical components on the three materials are presented. Finally, the optical components of optical interconnect on the three material platforms are compared and discussed.

II. THE THREE MATERIAL PLATFORMS

SOI is of prime importance for integrated optoelectronic circuits as it offers potentiality for monolithic integration of optical and electronic functions on a single substrate. First, Si can be used to fabricate low-loss optical waveguides because silicon is transparent at wavelengths larger than 1.1 μm [8]. Second, extremely high refractive index contrast between the silicon core ($n = 3.5$) and silica cladding ($n = 1.45$) allows the waveguide core to be shrunk down to a submicron cross-section, while still maintaining single mode propagation at the wavelengths of 1.3–1.55 μm . At the same time, such extreme light confinement allows the minimal bent radius to be reduced to the micron range. Although SOI waveguide shows superiority



A nano measurement machine equipped with a 3D piezo-resistive micro tactile probe



Xiaoyu Cai^{a,b}, Yuan Li^b, Lihua Lei^b, Guofang Fan^{c,*}, Li Jian^b, Xuedian Zhang^a, Songlin Zhuang^a

^a Shanghai Key Laboratory of Contemporary Optics System, College of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, 200093 Shanghai, China

^b Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, National Center of Measurement and Testing for East China, National Center of Testing Technology, Zhangheng Road 1500, 201203 Shanghai, China

^c Key Laboratory of Photochemical Conversion and Optoelectronic Materials, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 9 December 2013

Received in revised form 9 January 2015

Accepted 23 March 2015

Available online 1 April 2015

Keywords:

Nano Measurement Machine

Piezo-resistive effect

Traceable dimensional measurement

ABSTRACT

A 3D micro tactile probe based on piezo-resistive effect is developed for dimensional metrology and a detailed analysis on the hysteresis, resolution, crosstalk and uncertainty of the probe is presented. A Nano Measurement Machine (NMM) equipped with the 3D micro tactile probe is proposed as a new high precision zero-point indicator for micro- and nano-scale traceable dimensional measurement, which is calibrated according to the standard characteristic curve. In 1 mm step-height standard measurement experiment using the 3D piezo-resistive micro tactile probe, the experimental results show a standard deviation of 37 nm in the vertical tactile direction and one of 104 nm in transverse tactile direction while the standard deviation is 40 nm in the vertical direction in the 2 mm step-height standard measuring experiment.

© 2015 Elsevier Inc. All rights reserved.

1. Introduction

Recently, the dimensional metrology for micro- and even nanoscale objects becomes increasingly important in semiconductor and optical industries, mechanical engineering, biology and medicine [1]. Micro/nano structures to be measured become more complex, for example, with smaller widths and higher aspect ratios in increasingly larger surface regions and potentially highly curved surfaces. Various techniques have been developed for the measurement of the micro and nanoscale structures, such as scanning electron microscopes (SEM), scanning probe microscopes (SPM), and scatterometry. However, these techniques have some limits on accuracy, measured objects or measurement range due to the working principle and the measurement performances are prone to be impaired by the environmental conditions such as air temperature, pressure, air vibration and humidity [2].

Micro/nano coordinate measurement machine technology is a potential solution for the limitations above. It can realize measurements range up to hundreds of millimeters with nanometre

precision, which focus on the development of acquisition probe and positioning systems [3,4]. Some of the micro/nano coordinate measurement machines developed by PTB (The Physikalisch-Technische Bundesanstalt) use the piezo-resistors as the probes which are attached by the silicon thin film [5–8]. Due to the internal stress of the silicon thin film, it is difficult to evaluate the mechanical and thermal properties of the probes. And, the large area of silicon thin film (the thickness less than 50 μm) makes the probe prone to crack in the fabrication process. Moreover, the membrane structure is a statically indeterminate structure. Hence, a stylus with high rigidity and hardness is needed to undertake most of the load applied on it, which makes the fabrication of the stylus no easy task.

In order to avoid these shortages, a 3D micro tactile probe by attaching the piezo-resistors to the strain beam is designed and fabricated. A detailed analysis is provided about the hysteresis, resolution and crosstalk of the probe. A NMM (SIOS NMM-1) is equipped with the 3D micro tactile probe for a new high precision zero-point indicator [8]. Because NMM is a typical metrology instrument using three homodyne laser interferometers to measure the displacement along three axes in a volume of 25 mm × 25 mm × 5 mm, the measurement results can be traced to the “meter” definition directly [9,10]. Some measurement

* Corresponding author. Tel.: +86 13001931753.

E-mail address: fanguofang@mail.ipc.ac.cn (G. Fan).