

基于微纳3D打印

批量化制造高性能银网格柔性透明导电膜

赵佳伟

青岛理工大学
山东省增材制造工程技术研究中心
青岛五维智造科技有限公司

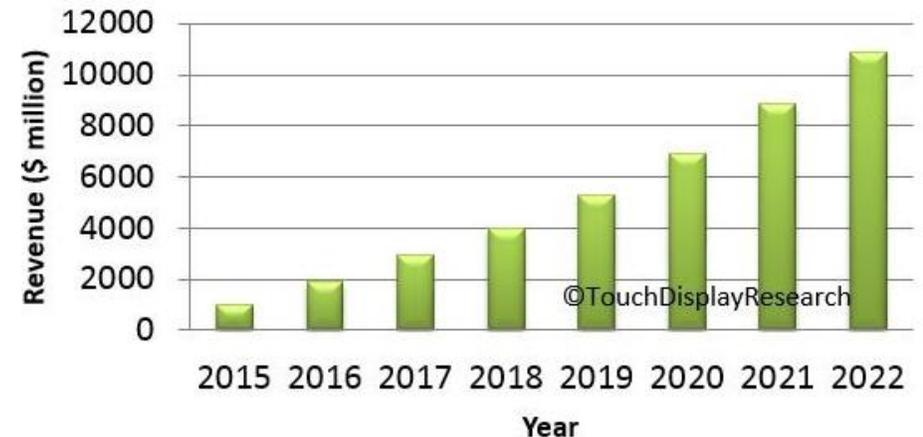
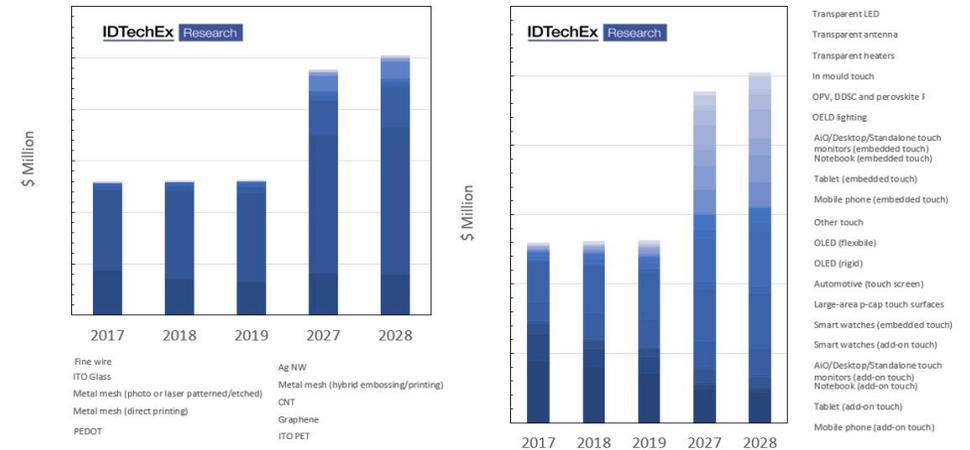
- 一、柔性透明导电膜简介
- 二、项目产品和解决方案
- 三、市场分析与目标客户
- 四、竞争优势
- 五、项目团队
- 六、商业模式与营销策略
- 七、财务业绩预测与融资计划

一、柔性透明导电膜简介

柔性透明导电膜（柔性透明电极）是一种**同时具有良好导电性、高光学透过率、机械柔性好的新型功能性光电材料**。它是柔性智能手机、触摸屏、柔性OLED显示、柔性太阳能电池、柔性OLED照明、智能窗、电子皮肤、透明加热器、透明电磁屏蔽、柔性传感器、可穿戴设备、健康监测等关键组件。

柔性透明导电膜典型应用产品和行业

柔性透明导电膜主要应用产品的市场规模及增长预测



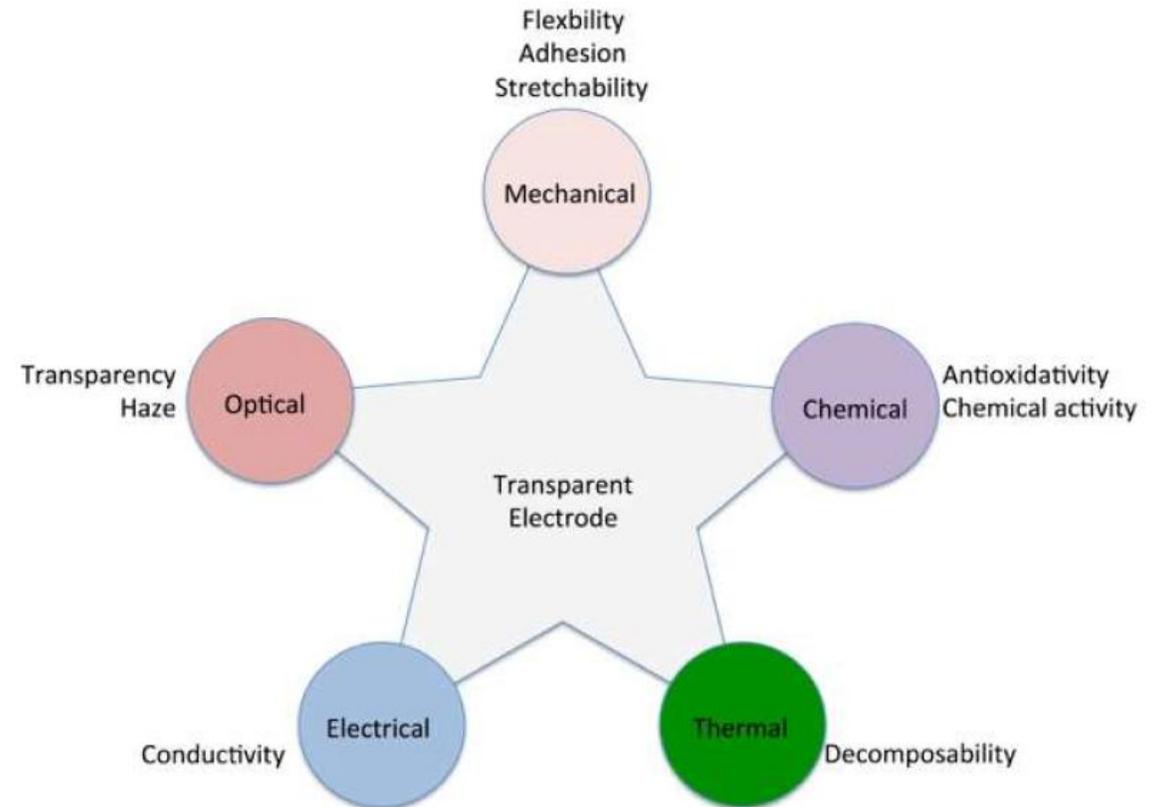
一、柔性透明导电膜简介

柔性透明导电膜性能要求：（1）高透过率（光学性能）；（2）低方阻（电学性能）；（3）弯曲半径小和电阻变化率低（机械柔性和稳定性）；（4）导电材料与基材粘附性能好；（5）化学和环境稳定性。

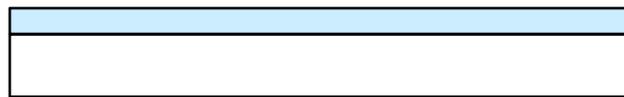
高科技先进材料!!!



柔性透明导电膜各种性能要求



柔性透明导电膜结构类型



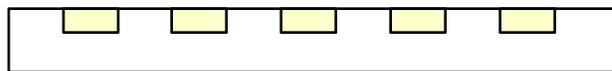
导电薄膜材料
透明柔性薄膜基材

表面/浮雕式结构



导电图案
透明柔性薄膜基材

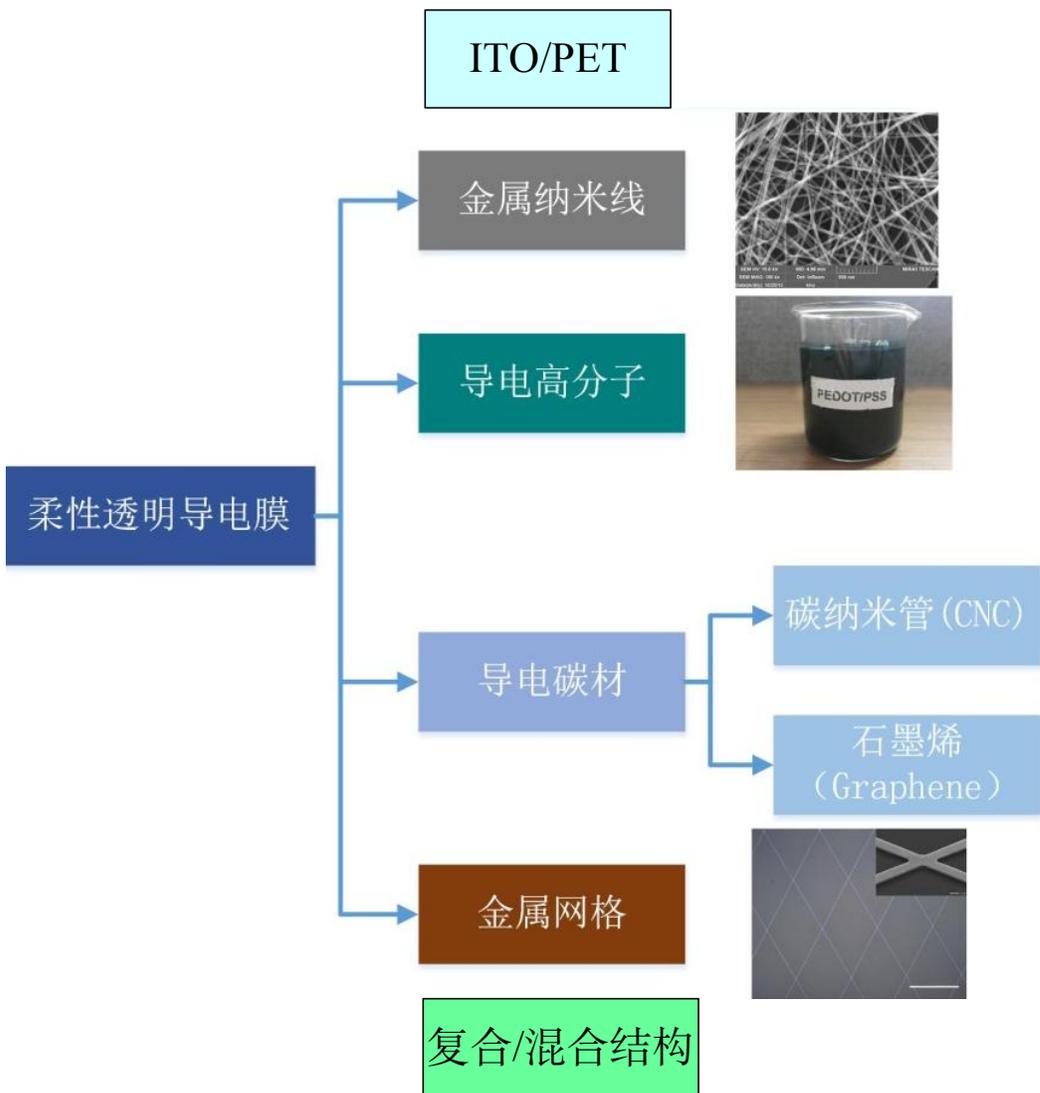
嵌入式结构



导电图案
透明柔性薄膜基材

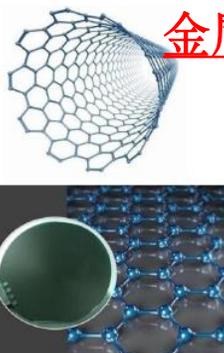
一、柔性透明导电膜简介

现有解决方案

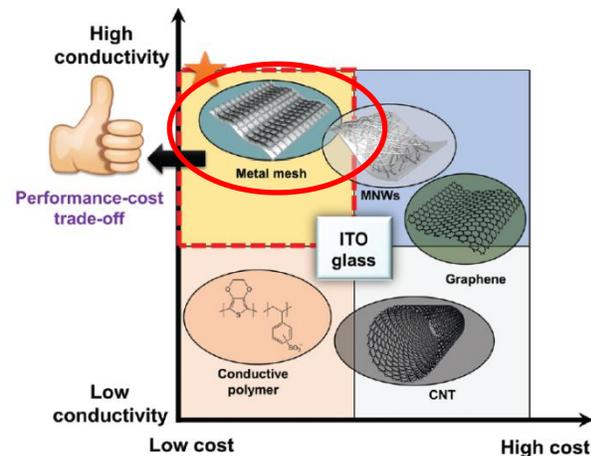


与现有的其它解决方案相比，金属网格柔性透明导电膜的具有以下独特的优势和显著特点：

- (1) 解决了现有其它方案方阻（电学性能）和透过率（光学性能）相互制约的矛盾，在85%以上的透过率下方阻过高而无法满足OLED、柔性光伏产品等应用需求。其能同时实现低方阻和高透过率；
- (2) 易于调控和裁剪光学和电学性能，仅改变图案类型、线宽、周期、高宽比等，满足不同的应用需求；
- (3) 机械柔性好，表面粗糙度低，粘附性高，嵌入式金属网格结构。尤其适合柔性太阳能电池、柔性OLED；
- (4) 稳定性高（多次弯折、环境），一致性好；



金属网格被认为最具有广泛工业化应用的技术。



一、柔性透明导电膜简介

现有解决方案的方阻和透过率比较

导电聚合物/高分子材料

Polymer materials with their sheet resistance and transparency properties.

S. No.	Material	Deposition Technique	Sheet Resistance(Ω /sq)	Transparency(%)
1.	PANI	Spin Coating	166	80
2.	PEI/Ag/PEDOT:PSS	Spin Coating	10	95
3.	PEDOT:PSS	Spin coating, thermal evaporation	39	80
4.	PEDOT:PSS (H2SO4-treated)	Spin coating, dip method	90	85
5.	PEDOT:PSS (methanol treated)	Spin coating, dip - drop method	160	80
6.	PEDOT:PSS-5% DMSO	Drop Cast, Spin coating	12	82
7.	AgNW/PUA	-	15	83
8.	CNT-PEDOT hybrid	Vacuum filtration	80	75
9.	PEDOT:PSS/AgNW/graphene	Spin Coating	181.67	71.21
10.	AgNW/IZO/ PEDOT:PSS	Spin Coating, Sputtering	5.9	86

碳纳米管

CNT TCFs with fabrication techniques and their properties in visible range.

S. No.	Material	Deposition Technique	Sheet Resistance(Ω /sq)	Transparency(%)
1.	MWCNT	Roll to roll-dry	24	83.4
2.	SWCNT	Slot die coating	1000	92
3.	SWCNT	Dip Coating	100	90
4.	SWCNT	Electrophoretic deposition	220	81
5.	CNT	CVD	265	80
6.	CNT-Graphene hybrid	Spin Coating	240	86
7.	RG0/CNT hybrid	Langmuir - Blodgett	183.5	77
8.	RG0/CNT hybrid	Spin coating	631	81.3
9.	SWNT-Ag hybrid	Spray	5	83.7
10.	CNT-PEDOT hybrid	Vacuum filtration	80	75

石墨烯

Graphene and its derivatives with their sheet resistance and transparency properties.

S. No.	Material	Deposition Technique	Sheet Resistance(Ω /sq)	Transparency(%)
1.	Graphene	CVD	280	80
2.	Graphene	Inkjet printing	260	86
3.	Graphene	Transfer layer by layer	40	89.5
4.	RG0	LB	1100	91
5.	Graphene-CNT Hybrid	Spin coating	240	86
6.	Graphene-PEDOT:PSS Hybrid	Spin coating	180	90.9
7.	Graphene coated Cu NT	CVD	23.2	83.4
8.	Graphene silver Hybrid	Hot-pressing process	14	90
9.	Graphene - Metal Nanowire	Spin coating, CVD	33	94
10.	RG0-Au Grid	Spin coating	18	80

金属纳米线

Metal nanowires and their hybrid materials with their sheet resistance and transparency properties.

S. No.	Material	Deposition Technique	Sheet Resistance(Ω /sq)	Transparency(%)
1.	AgNW	Vacuum filtration, Transfer technique	10	85
2.	AgNW	Spin coating	91	94.1
3.	Ni NW	-	19	90
4.	CuNi NW	Solution processing	36	80
5.	Graphene /AgNW	CVD, Spin coating	18	91.3
6.	RG0/ AgNW	Dip coating	27	72
7.	AgNW/IZO/ PEDOT:PSS	Spin coating, Sputtering	5.9	86
8.	AgNWs/AZO	Drop casting, Atomic layer deposition (ALD)	23	83
9.	SWNT-AgNW hybrid	Spray	30	85
10.	Graphene /AgNW/Graphene	CVD, Spin coating	20	88.6

金属网格 (透光率>85%, 方阻低于 $5\Omega/\square$ 的只有金属网格)

Table 1 Features and optoelectronic applications of various metal mesh TCEs prepared via printing techniques

Techniques	Mesh electrodes	Type	T_{50nm} (%)	R_{sheet} (Ω/\square)	FoM (Φ_{TC}) ($10^{-3} \Omega^{-1}$)	FoM (σ_{dc}/σ_{opt})	Pitch (μm)	Line-width (μm)	Height (μm)	Applications
EHD	Ag grid	i	74.6 ^a	3.7	14	319	150	4.6	—	—
EHD	Ag grid	i	81.7 ^a	4.8	27	365	150	7	—	—
EHD	PEDOT:PSS/Ag grid	i	> 80 ^a	—	—	—	478	16.8	—	Diode
EHD	Ag grid	ii	80 ^b	0.5	271	3194	200	10	2	OSCs
EHD	Ag-Au grid	i	94 ^b	8	63	749	200	0.5	1.5	—
Flexo	Ag honeycomb	i	73 ^a	11	4	100	2000	100	0.15	OSCs
Gravure off-set	Ag grid	ii	90 ^b	4	87	871	1000	32	1.3	OSCs, OLEDs
Gravure off-set	Ag grid	ii	93 ^b	13	37	392	2000	39	1.3	OSCs, OLEDs
Gravure off-set	Ag grid	ii	88(@520 nm) ^b	6.9	40	411	1000	35	1.2	OLEDs
Inkjet	Ag grid	i	74 ^c	2.8	17	406	3000	80	0.2	—
Inkjet	Graphene/Ag grid	i	73 ^c	12	3	92	2000	100	0.15	OSCs
Inkjet	PEDOT:PSS/Ag honeycomb	ii	85 ^c	—	—	—	8000	350	0.1	OLEDs
Inkjet	PEDOT:PSS/Ag grid	i	> 90 ^c	22.7	15	153	—	47	0.2	OSCs
Inkjet	Ag grid	i	71 ^c	60	<1	16	2000	132	0.3	OSCs
Laser patterning	Ag grid	i	> 85 ^c	30	<1	0.6	300	11	0.13	TSP
Electroplating	Ag grid	ii	87 ^a	13	19	201	300	10	—	TSP
Electroplating	ITO/Cu grid	ii	82.5 ^c	3.8	38	491	1414	130	—	OLEDs
Reverse offset	Ag grid	i	86 ^a	13	17	185	3200	80	0.2	OSCs
Reverse offset	Ag grid	ii	—	—	—	—	300	30	0.9	TFTs
Reverse offset	Ag grid	i	85 ^a	~0.3-0.6	328	3711	—	10	—	TSP
Photolithography	PEDOT:PSS/Ag honeycomb	ii	~ 67-70 ^a	6.5	4	148	1131	40	15	OSCs
Photolithography	Cu-Au comb	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Photolithography	CNT/Ag grid	i	88 ^b	8.1	34	350	770	12	0.6	TCH
Nanoimprint	PEDOT:PSS/Ag honeycomb	ii	~ 82-86 ^a	~ 3	73	802	180	3	2	PSCs
Nanoimprint	Ag grid	ii	80.3 ^a	6.8	16	238	510	10	10	OSCs
Nanoimprint	Ag-Ni grid	ii	87.5 ^a	49.2	5	55	3200	0.15	0.06	—
Nanoimprint	Cu grid	ii	73 ^c	~ 15	2	73	—	0.12	0.04	OLEDs
Nanoimprint	Cu grid	ii	> 90 ^b	<1	348	3484	50	4	1.8	TCH

#i: embossed surface; ii: embedded surface. ^a Including substrate. ^b Excluding substrate. ^c Not specified.

一、柔性透明导电膜简介

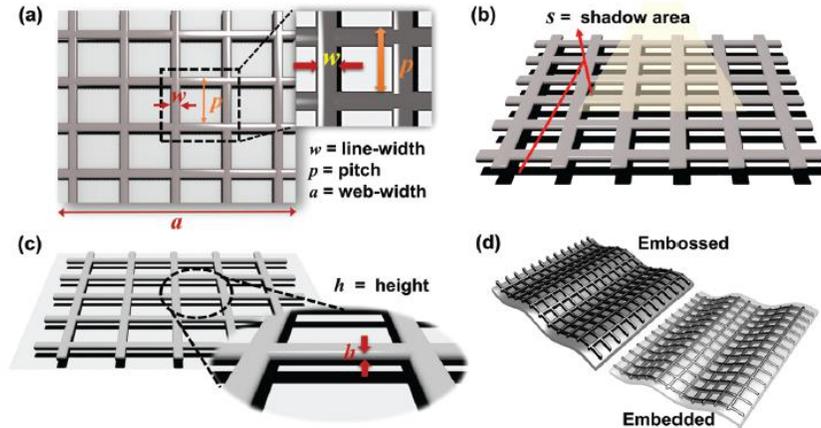
金属网格柔性透明导电膜

在柔性高透过基材表面（或者内部）形成规则导电几何图案（导电性能），未图案化的非金属区域能确保光正常通过（透光性能），从而实现柔性透明导电膜所要求的高导电性和高透过率。

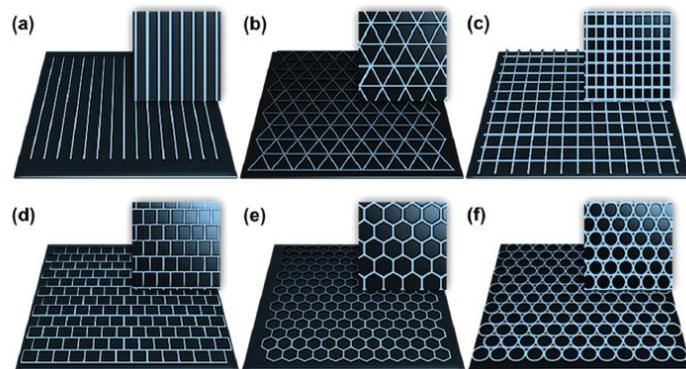
图案几何类型、线宽、周期、高宽比等可以随意调节，实现电学性能和光学性能任意裁剪和调控。

嵌入式金属网格柔性透明导电膜：低表面粗糙度（平滑表面）；机械稳定性和粘附性高；大高宽比；环境稳定性好。

金属网格工艺参数和位置



金属网格几何图案



金属网格柔性透明导电膜制造工艺及其性能指标

Table 1. Dimensional, electrical, and optical properties of various metal-grid transparent electrodes. The sheet resistance (R_s) in this table corresponds to the values for the transmittance (T) greater than 80 % or applied to the device fabrication. Please note that the transmittance values in the references are measured with and without a substrate. For a fair comparison, both transmittance values measured with and without substrates are presented for the thermal-pressed MGETES.

Process	Metal-grid location	Line height/width (μm)	Aspect ratio	R_s (Ω/sq)	T (%)
Selective laser sintering ²³	On surface	0.13/11	0.011	30	85 (w/ Sub.)
Evaporative assembly ²²	On surface	0.09/4.5	0.020	97	92 (w/o Sub.)
Roll-offset printing ²⁴	On surface	0.3/20	0.015	12.9	85 (w/ Sub.)
EHD printing ¹⁹	On surface	1.5/7.5	0.200	9	85 (w/ Sub.)
Inkjet printing ²⁷	On surface	0.2/50	0.004	10.3	73 (w/ Sub.)
Electroless Plating ²⁵	On surface	0.25/30	0.008	8.2	91 (w/o Sub.)
Photolithography ²¹	On surface	0.03/5	0.006	9.1	79 (w/ Sub.)
UV lithography ²⁶	On surface	0.05/15	0.003	51.4	76 (w/ Sub.)
Direct imprinting ³⁴	Embedded	2.1/4.1	0.512	4.7	93 (w/o Sub.)
Gravure offset ³⁵ (Damascene process)	Embedded	1.3/39	0.033	13	93 (w/o Sub.)
Roll-to-roll thermal imprinting ³⁶	Embedded	1/10	0.100	6.8	80 (w/ Sub.)
Thermal-pressing (This work)	Embedded	1.2/9.6	0.125	1.2	82 (w/ Sub.) 94 (w/o Sub.)

一、柔性透明导电膜简介

基于各种打印技术制造金属网格柔性透明导电膜

已经提出金属网格制造技术主要包括：光刻、纳米压印、激光直写、电铸、喷墨打印、精密丝网印刷、凹版印刷、柔版印刷、转印等，这些工艺目前都存在不足和局限性，无法满足柔性透明导电膜实际生产要求：大面积、低成本、高精度（分辨率低于20微米）、绿色环保等。**基于微纳3D打印制造金属网格柔性透明导电膜提供了一种最具工业化应用前景的解决方案。**

已有研究结果证实：

高粘度纳米银浆+电场驱动喷射3D打印在制造大高宽比金属网格结构方面具有突出的优势，首先，制造的单层纳米银网格的高宽比一般都在0.1-0.2之间，远远高于现有的喷墨打印（使用的纳米银墨水，银颗粒直径在50纳米以下，粘度非常低，高宽比0.03-0.002之间）；另外，高粘度纳米银浆+电场驱动喷射3D打印**利用电荷诱导自对正实现多层堆积3D打印**，实现更大高宽比金属网格的制造，而传统喷墨打印无法实现多层堆积（多层堆积导线线宽非常大的增加，影响透光率，另外，存在咖啡环效应，金属网格一致性差）。能实现**超细、大高宽比、大面积网栅制造。**

Table 1 Features and optoelectronic applications of various metal mesh TCEs prepared via printing techniques

Techniques	Mesh electrodes	Type	T_{550nm} (%)	R_{sheet} ($\Omega \square^{-1}$)	FoM (Φ_{TC}) ($10^{-3} \Omega^{-1}$)	FoM (σ_{dc}/σ_{opt})	Pitch (μm)	Line-width (μm)	Height (μm)	Applications
EHD	Ag grid	i	74.6 ^a	3.7	14	319	150	4.6	—	—
EHD	Ag grid	i	81.7 ^a	4.8	27	365	150	7	—	—
EHD	PEDOT:PSS/Ag grid	i	> 80 ^a	—	—	—	478	16.8	—	Diode
EHD	Ag grid	ii	80 ^b	0.5	271	3194	200	10	2	OSCs
EHD	Ag-Au grid	i	94 ^b	8	63	749	200	0.5	1.5	—
Flexo	Ag honeycomb	i	73 ^a	11	4	100	2000	100	0.15	OSCs
Gravure off-set	Ag grid	ii	90 ^b	4	87	871	1000	32	1.3	OSCs, OLEDs
Gravure off-set	Ag grid	ii	93 ^b	13	37	392	2000	39	1.3	OSCs, OLEDs
Gravure off-set	Ag grid	ii	88(@520 nm) ^b	6.9	40	411	1000	35	1.2	OLEDs
Inkjet	Ag grid	i	74 ^c	2.8	17	406	3000	80	0.2	—
Inkjet	Graphene/Ag grid	i	73 ^c	12	3	92	2000	100	0.15	OSCs
Inkjet	PEDOT:PSS/Ag honeycomb	ii	85 ^c	—	—	—	8000	350	0.1	OLEDs
Inkjet	PEDOT:PSS/Ag grid	i	> 90 ^c	22.7	15	153	—	47	0.2	OSCs
Inkjet	Ag grid	i	71 ^c	60	<1	16	2000	132	0.3	OSCs
Laser patterning	Ag grid	i	> 85 ^c	30	<1	0.6	300	11	0.13	TSP
Electroplating	Ag grid	ii	87 ^a	13	19	201	300	10	—	TSP
Electroplating	ITO/Cu grid	ii	82.5 ^c	3.8	38	491	1414	130	—	OLEDs
Reverse offset	Ag grid	i	86 ^a	13	17	185	3200	80	0.2	OSCs
Reverse offset	Ag grid	ii	—	—	—	—	300	30	0.9	TFTs
Reverse offset	Ag grid	i	85 ^a	~0.3-0.6	328	3711	—	10	—	TSP
Photolithography	PEDOT:PSS/Cu-Au comb	ii	~ 67-70 ^a	6.5	4	148	1131	40	15	OSCs
Photolithography	CNT/Ag grid	i	88 ^b	8.1	34	350	770	12	0.6	TCH
Nanoimprint	PEDOT:PSS/Ag honeycomb	ii	~ 82-86 ^a	~ 3	73	802	180	3	2	PSCs
Nanoimprint	Ag grid	ii	80.3 ^a	6.8	16	238	510	10	10	OSCs
Nanoimprint	Ag-Ni grid	ii	87.5 ^a	49.2	5	55	3200	0.15	0.06	—
Nanoimprint	Cu grid	ii	73 ^c	~15	2	73	—	0.12	0.04	OLEDs
Nanoimprint	Cu grid	ii	> 90 ^b	<1	348	3484	50	4	1.8	TCH

#i: embossed surface; ii: embedded surface. ^a Including substrate. ^b Excluding substrate. ^c Not specified.

二、项目产品和解决方案

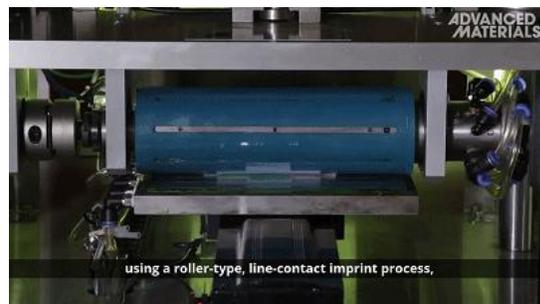
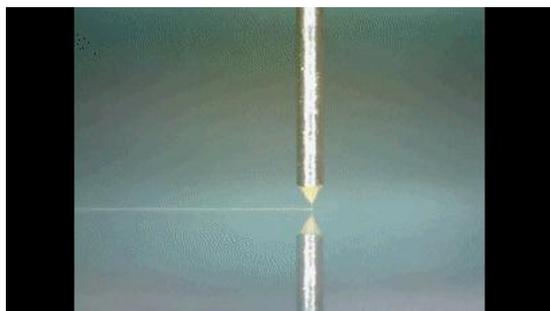
基于微纳3D打印批量化制造高性能银网格柔性透明导电膜整体解决方案

关键技术、生产工艺、装备、材料、应用

原创性核心技术

电场驱动喷射沉积
微纳3D打印

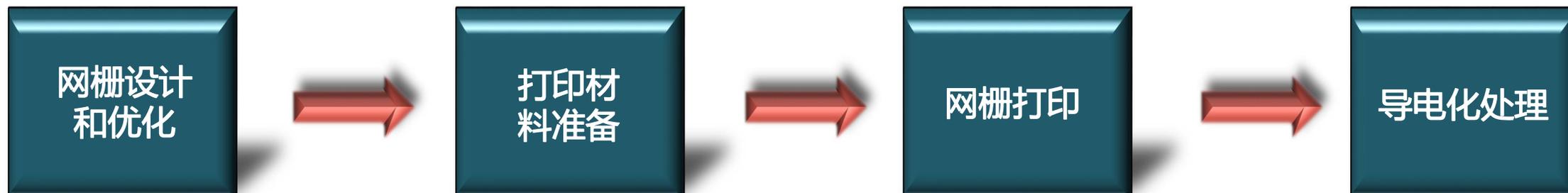
复合纳米压印



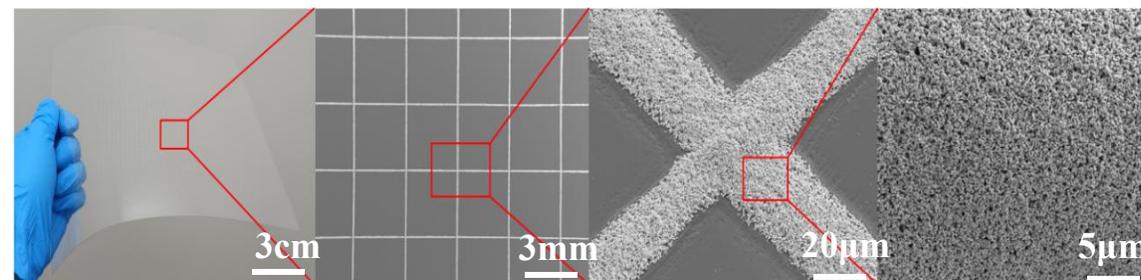
- 技术门槛高，解决卡脖子关键核心技术；
- 完全自主知识产权，授权发明专利36项，美国发明专利3项，国际PCT专利6项；
- 设备、工艺和材料成熟，15年4代产品；
- 设备高精度、低成本、高效率、高可靠性。

二、项目产品和解决方案

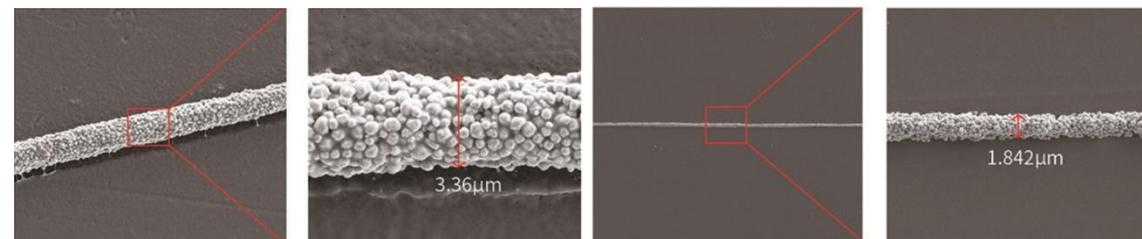
基于电场驱动微纳3D打印浮雕式柔性透明导电膜解决方案



微纳3D打印



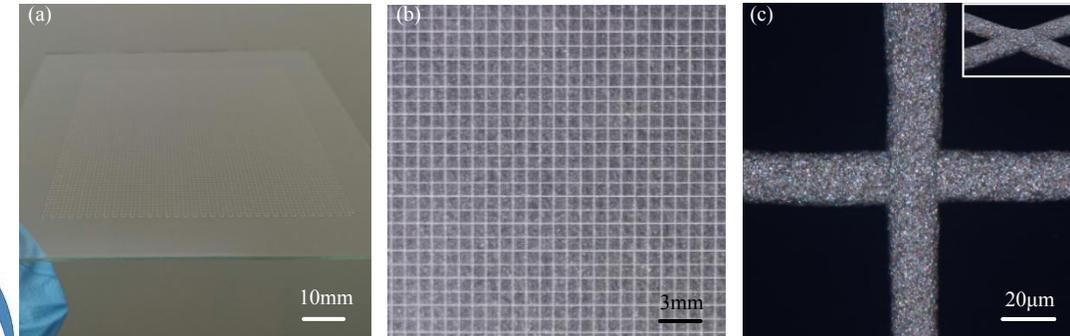
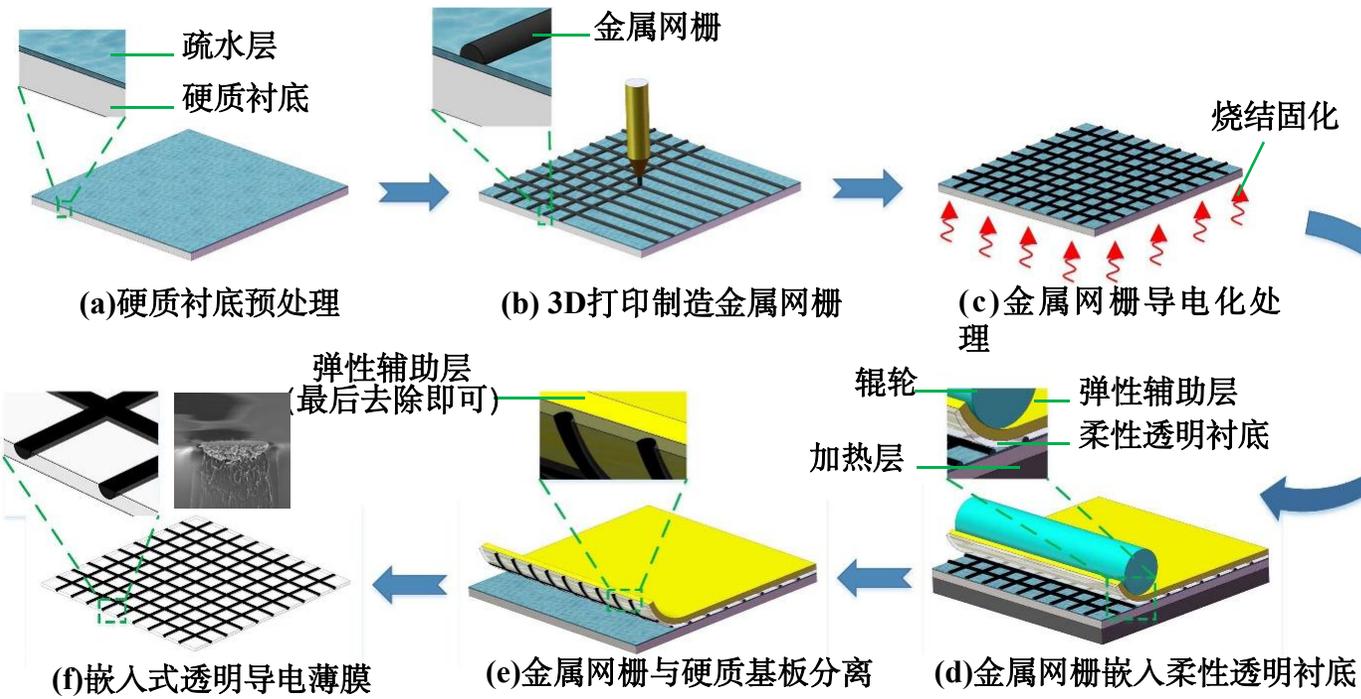
浮雕式金属网格柔性透明导电膜



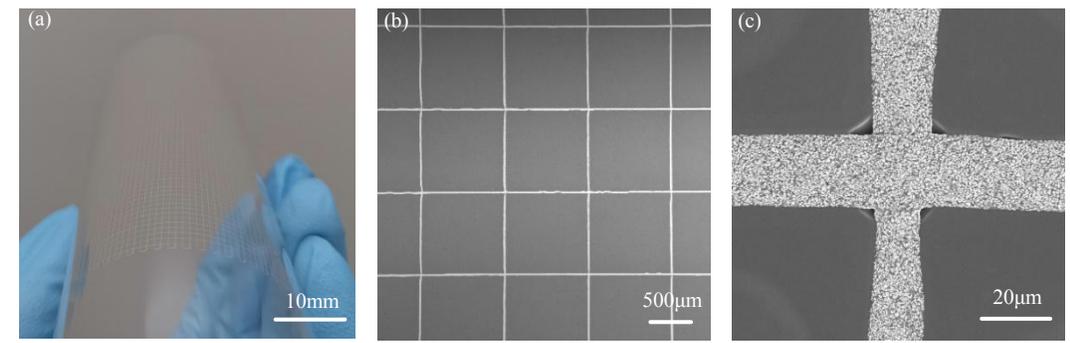
超高分辨率银导电路径打印

二、项目产品和解决方案

基于电场驱动喷射微纳3D打印和复合纳米压印**嵌入式**柔性透明导电膜解决方案



电场驱动喷射沉积微纳3D打印制造金属网格



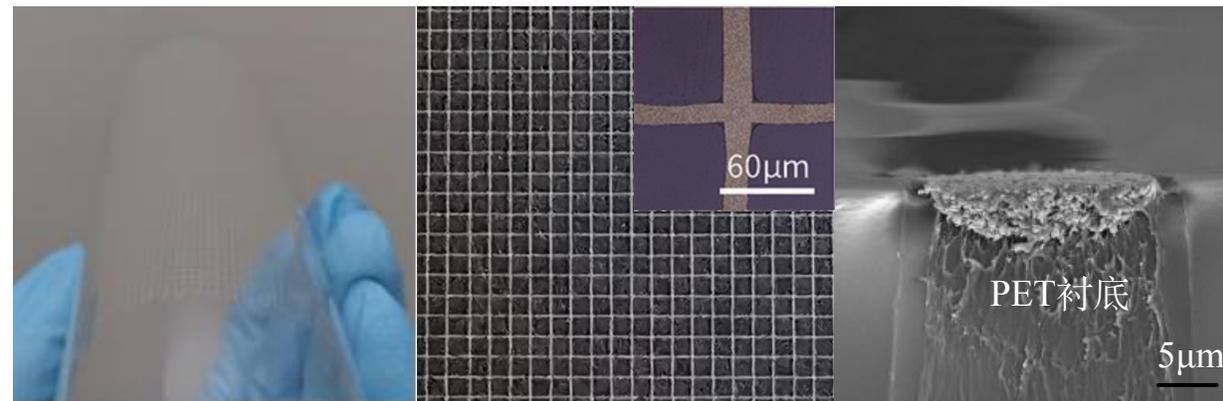
打印金属网格通过复合热压印转移嵌入柔性基材

微纳3D打印 + 复合纳米压印

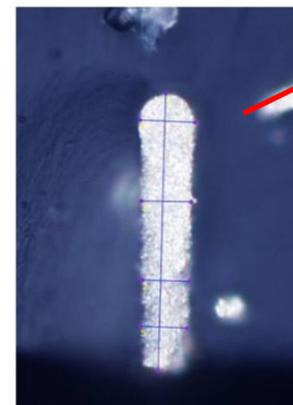
二、项目产品和解决方案

制造金属网格柔性透明导电膜产品展示

任意形状图案



大面积网栅结构制造



PET

多层打印大高宽比银电路

高宽比: **6:1**

编号	结果距离[µm]
✓ 1	84.295
✓ 2	14.274

二、项目产品和解决方案

本项目制造金属网格柔性透明导电膜与现有产品主要性能指标的对比

本产品技术指标显著优于国内外已有产品

现有产品

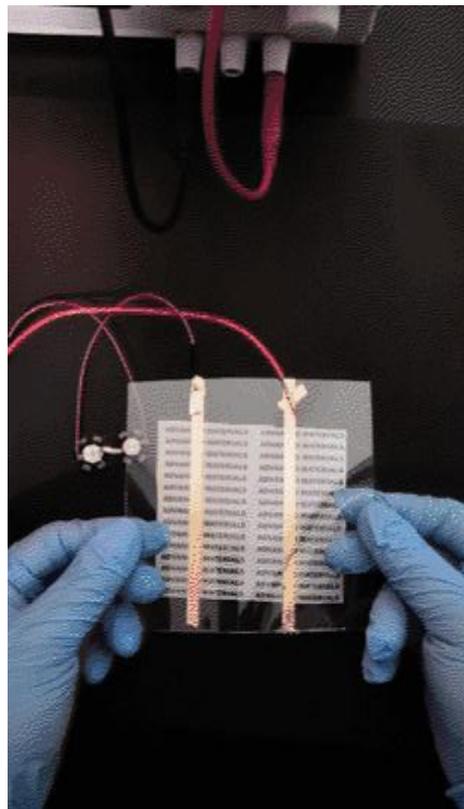
透明导电材料	金属网格	银纳米线	石墨烯	碳纳米管	Ag堆叠薄膜
代表企业	PolyIC Metamaterial(光刻) HSS(Holland)	Cambrios C3 Nano	重庆墨希 微晶科技	汉纳材料 XinNano	TDK
方阻Ω/□	5-30 (PolyIC) 0.1-20(M) 0.2-0.6(HSS)	30 (Ca) 25-35(C3)	150-200(重庆) 25-100 (微晶)	200(汉纳) 150(XinNano)	9
透过率T %	>85%(PolyIC) >99%(M) >80(HSS)	>90%(Ca) >90%(C3)	>89%(重庆) >89-90%(微晶)	>88%(汉纳) >85(XinNano)	>90%
雾度	- <1%(M) -(EMI)	<2%(Ca) <1.3%(C3)	<0.9-1.8(微晶)	<1(汉纳) <1.5(XinNano)	<0.5% Ra<1nm

本公司产品

柔性透明导电膜		
	浮雕式	嵌入式
方阻Ω/□	2-6	0.4-3
透过率T%	>90%	>93%
雾度	<1%	<1%
表面粗糙度	-	<18nm

二、项目产品和解决方案

柔性透明导电膜产品性能测试和表征



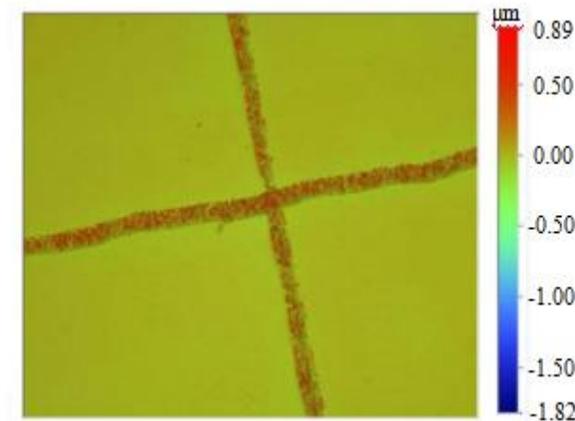
导电膜透光和导电性能展示



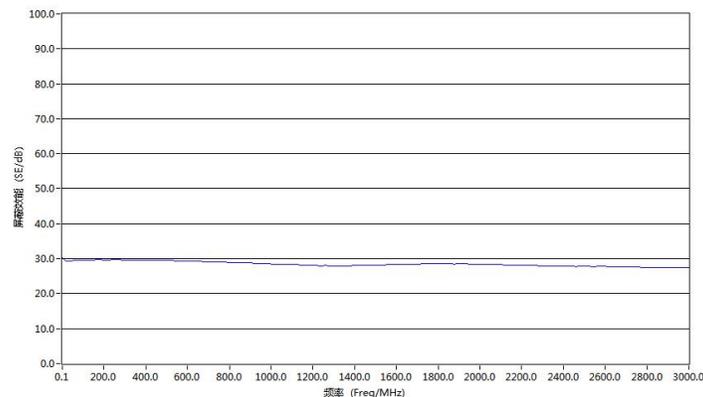
柔性太阳能电池、OLED 等对于导电膜表面粗糙度有苛刻要求，很好满足！

Ra18nm

Surface Status	Measurement Info:
Rq: 47.68 nm	Magnification: 10.13
Rt: 2.72 um	Measurement Mode: HDVSI
	Sampling: 636.48 nm
	Array Size: 1368 X 1024

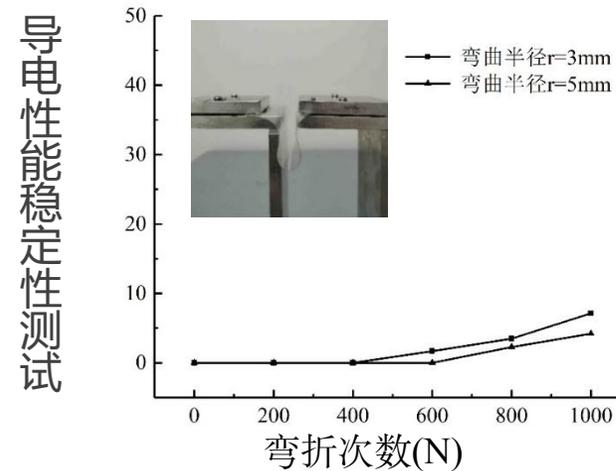


电加热除雾除冰 (导电性能测试)



导电膜电磁屏蔽效能测试

表面粗糙度测试



三、市场分析与目标客户

典型工业应用领域和目标用户



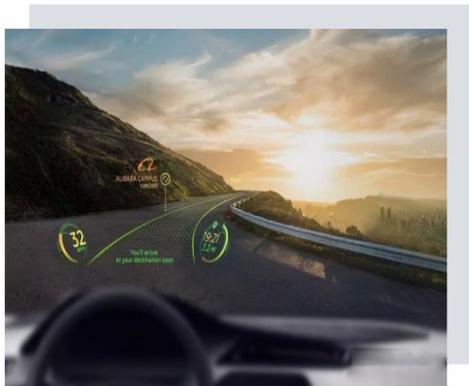
柔性有机太阳能电池板
柔性钙钛矿太阳能电池



OLED柔性透明显示
OLED柔性壁纸显示屏



柔性屏和折叠屏（智能手机）



前挡风玻璃透明电加热
前挡风玻璃透明显示、智能窗



航空航天、国防、医疗等透
明电磁屏蔽窗



电子纸、柔性显示

四、竞争优势

- 1、**原创性技术**，拥有完全自主知识产权，**36**项国内外发明专利，完成专利池建设；
- 2、**技术先进**，采用微纳3D打印和复合纳米压印两项国际先进技术，颠覆性技术，技术门槛高；
- 3、**掌握核心关键技术**，拥有“电场驱动喷射微纳3D打印”和“复合纳米压印”两项独有核心技术；
- 4、**产品性价比高**，产品主要性能（方阻、透光率、表面粗糙度等）和性价比（低成本、大面积）优于国内外同类产品；
- 5、**解决了市场痛点和堵点**，嵌入式金属网格柔性透明导电膜是目前柔性太阳能电场、柔性OLED、柔性透明电加热等行业所亟需柔性透明电极非光刻低成本实现的唯一解决方案；
- 6、**技术成熟度高**，15年的研发，完成4代关键设备开发，已经在国际顶尖期刊“Advanced Materials”（SCI影响因子25.809）、国内顶尖期刊“科学通报”和“中国科学”发表相关研究成果。
7. **定制化服务**：提供一站式定制化服务，根据不同用户和需求，提供包括工艺、设备、材料整体解决方案。

四、竞争优势

相关研究成果发表在国内外顶尖学术期刊

国内顶尖期刊 科学通报

国际顶尖期刊 Advanced Materials: SCI 影响因子25.809

国内顶尖期刊 中国科学: 技术科学

科学通报
论 文

《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS
CrossMark
© 2019 WILEY-VCH

基于电场驱动喷射微3D打印和辊轮辅助热压印制造嵌入式金属网格柔性透明导电薄膜

刘明杨¹, 齐习猛¹, 朱晓阳¹, 许权¹, 张勇波¹, 周贺飞¹, 李洛尘¹, 兰红波^{1*}

1 青岛理工大学山东省增材制造工程技术研究中心, 青岛 266520;
2 西安交通大学机械系统工程国家重点实验室, 西安 710049
* 同等贡献
* 联系人, E-mail: hblan99@126.com

2019-11-15 收稿, 2019-12-30 修回, 2019-12-30 接受, 2019-12-31 网络版发表
国家自然科学基金(51775288, 51705271)和山东省重点研发计划(2018GGX101022)资助

摘要 针对现有技术难以实现高性能嵌入式金属网格柔性透明导电薄膜低成本、快速制造的问题, 提出了一种基于电场驱动喷射3D打印和辊轮辅助热压印制造嵌入式金属网格柔性透明导电薄膜新方法, 阐述了结合电场驱动喷射微3D打印和辊轮辅助热压印工艺制备透明导电薄膜的基本原理和工艺流程; 通过实验揭示了主要工艺参数(打印电压、打印速度、打印气压、压印温度和压力)对制备嵌入式金属网格柔性透明导电薄膜精度和质量的影响及规律; 利用课题组自主研发的电场驱动喷射沉积微3D打印机和复合粉末压印机, 并结合优化的工艺参数, 实现了图案面积70 mm×70 mm, 线宽20 μm, 周期1000 μm的嵌入式正方形金属网格柔性透明导电薄膜制造, 其方阻为3.62 Ω/sq, 可见光波段550 nm处的透过率为92.3%, 表面粗糙度值为18.81 nm, 金属网格与基材的接触等效电阻达5B, 1000次弯折实验后方阻变化率小于8%。

关键词 柔性透明导电薄膜, 嵌入式金属网格, 微3D打印, 热压印, 增材制造

柔性透明导电薄膜是一种既能导电又在可见光谱范围内具有高通光率的薄膜, 是一种将光学透明性能与电学导电性能结合在一起的新型光电功能薄膜材料, 作为一种性能优良的透明导电材料, 它在触摸屏、显示器(尤其是新一代柔性可折叠显示)、有机发光二极管(organic light-emitting diodes, OLEDs)、液晶显示器、薄膜太阳能电池、电子纸等光子领域具有非常广泛的应用。此外, 它还被应用在透明电加热、电磁屏蔽光窗、低辐射玻璃、宽频消隐身、飞机和汽车面罩导热膜(除雾除霜)等诸多领域^[1-10]。目前已经开发的柔性透明导电薄膜主要有: 透明导电氧化铟锡(氧化铟基、氧化锡基和氧化锌基等)、透明导电金属薄

膜、先进高分子透明导电薄膜、金属纳米线(银纳米线、铜纳米线等)透明导电薄膜、石墨烯透明导电薄膜、碳纳米管透明导电薄膜、复合透明导电薄膜、金属网格透明导电薄膜等, 与现有的其他透明导电膜相比, 金属网格透明导电薄膜尤其是纳米银网格柔性透明导电薄膜具有良好的柔韧性; 优良的电学特性(低方阻)和光学特性(高通光率); 尤其是仅仅通过改变网格的线宽、周期、高宽比、形状和排列就能解决透明电极所面临的低方阻和高透光率的矛盾, 并根据实际性能要求对电学性能和光学性能进行协同和调控, 同时确保得到低方阻和高透光率^[11-12]。基于金属网格的柔性透明导电薄膜已经被用于许多领域, 并展示出

COMMUNICATION
Transparent Heaters

ADVANCED MATERIALS
www.adem.de

Fabrication of High-Performance Silver Mesh for Transparent Glass Heaters via Electric-Field-Driven Microscale 3D Printing and UV-Assisted Microtransfer

Xiaoyang Zhu,^{*} Quan Xu, Hongke Li, Mingyang Liu, Zhenghao Li, Kun Yang, Jiawei Zhao, Lei Qian, Zilong Peng, Guangming Zhang, Jianjun Yang, Fei Wang, Dichen Li, and Hongbo Lan^{*}

Great challenges remain concerning the cost-effective manufacture of high-performance metal meshes for transparent glass heaters (TGHs). Here, a high-performance silver mesh fabrication technique is proposed for TGHs using electric-field-driven microscale 3D printing and a UV-assisted microtransfer process. The results show a more optimal trade-off in sheet resistance ($R_s = 0.21 \Omega \text{ sq}^{-1}$) and transmittance ($T = 93.9\%$) than for indium tin oxide (ITO) and ITO substitutes. The fabricated representative TGH also exhibits homogeneous and stable heating performance, remarkable environmental adaptability (constant R_s for 90 days), superior mechanical robustness (R_s increases of only 0.04 in harsh conditions—sonication at 100 °C), and strong adhesion force with a negligible increase in R_s (2–12%) after 100 peeling tests. The practical viability of this TGH is successfully demonstrated with a deicing test (ice cube: 21 cm³, melting time: 78 s, voltage and glass thickness: 4 V, 5 mm). All of these advantages of the TGHs are attributed to the successful fabrication of silver meshes with high resolution and high aspect ratio on the glass substrate using the thick film silver paste. The proposed technique is a promising new tool for the inexpensive fabrication of high-performance TGHs.

nature, and harsh processing conditions of the ITO and the scarcity of the indium limit the further application for the THs^[14]. As such, recent studies have proposed several emerging materials for the next-generation TGH to replace ITO, including carbon-based materials,^[8-9] metal nanowires (NWs) or nanofibers (NFs),^[6-7] metal meshes,^[10-16] conductive polymers,^[16] and hybrid materials.^[3,16-20] However, the cost, mechanical robustness, and trade-off between transmittance (T) and sheet resistance (R_s) of these TGHs remain limited and inconsistent across applications.

The R_s of carbon-based materials and conductive polymers is higher than that of ITO,^[8-9] which restricts their use in high-performance TGHs.^[8] Metal NWs or NFs and metal meshes have been studied extensively in recent years and have been described as the most promising TGH materials due to excellent electrical and optical properties (in some cases superior to ITO). Metal NWs and NFs have been demonstrated as an ITO substitute in flexible optoelectronic applications because of their mechanical flexibility and preferable T - R_s trade-off. However, the resulting THs or TGHs have struggled to achieve $T > 90\%$ and $R_s < 10 \Omega \text{ sq}^{-1}$.^[21] Hsu et al. reported a high-performance TCF with $R_s = 0.36 \Omega \text{ sq}^{-1}$ at $T = 92\%$ by combining mosaiclike Niw with metal NWs,^[22] and Xu et al. produced a copper NF with $T > 90\%$ and $R_s < 0.5 \Omega \text{ sq}^{-1}$ using electrospinning and electroplating methods.^[23] These NWs and NFs exhibit limitations such as excessive surface roughness, low uniformity, high material cost, and unavoidable haze.^[13,16] In addition, adhesion between NWs and commonly-employed substrates is often poor, which makes it difficult to use NWs in harsh environments for extended time periods.^[24] These characteristics hinder the production of low-cost high-performance TGHs, which require low R_s , high T, and strong TCF adhesion.

Metal mesh is considered to be an ideal TCF because of its inherently high T, low haze, high electrical conductivity, good mechanical properties, and low cost.^[15] The T - R_s trade-off in metal meshes can be further optimized by increasing the intrinsic conductivity or the aspect-ratio (AR) of the metal wire

De X. Zhu, Q. Xu, H. K. Li, M. Liu, Z. L. Li, K. Yang, J. Zhao, L. Qian, D. Z. Peng, D. G. Zhang, D. J. Yang, D. F. Wang, Prof. H. Lan Shandong Engineering Research Center for Additive Manufacturing Qingdao University of Technology Qingdao 266520, China E-mail: zhanxian99@qtech.edu.cn; hblan99@126.com Prof. D. Li State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering No. 96 Jiaotong University Xi'an 710029, China

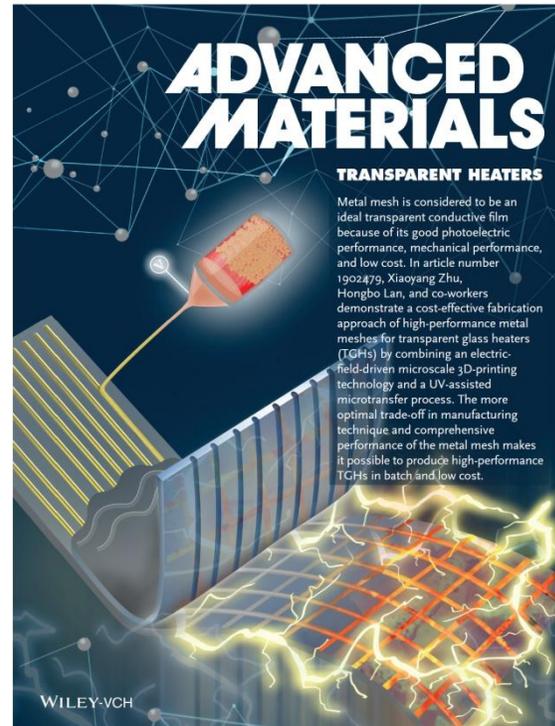
The ORCID identification number(s) for the author(s) of this article can be found under <https://doi.org/10.1002/adma.201902479>.

DOI: 10.1002/adma.201902479

Adv. Mater. 2019, 31, 1902479

1902479 (3 of 9)

© 2019 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim



中国科学: 技术科学
SCIENTIA SINICA Technologica

2018年 第48卷 第7期: 773–782
techon.scichina.com

《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS
CrossMark
© 2019 WILEY-VCH

论 文

电场驱动喷射沉积3D打印

钱鑫¹, 兰红波^{1*}, 赵佳伟¹, 周贺飞¹, 郝淑亭¹, 朱晓阳¹, 李洛尘^{1,2}

1 青岛理工大学青岛微3D打印工程研究中心, 青岛 266503;
2 西安交通大学机械系统工程国家重点实验室, 西安 710049
* E-mail: hblan99@126.com

收稿日期: 2017-07-31; 接受日期: 2018-02-26; 网络版发表日期: 2018-05-23
国家自然科学基金(51775288)、国家重点研发计划“纳米技术的基础研究”重大研究计划(项目编号: 91020203)和山东省重点研发计划(项目编号: 2018GGX10302)资助项目

摘要 多材料多尺度3D打印是当前增材制造的前沿方向, 研究难点和亟待突破的关键技术, 它在组织工程、新材料、新一代电子产品、OLED、印刷电子、软体机器人等诸多领域有着非常广泛的应用, 但是现有的增材制造技术在实现多材料多尺度3D打印面临诸多挑战性问题, 材料喷射沉积成型技术在实现多材料多尺度3D打印具有非常突出的优势和巨大的潜能, 本文提出一种电场驱动喷射沉积3D打印新方法, 它突破了现有材料喷射沉积3D打印在打印材料、接收衬底、喷嘴材料、跨尺度制造等方面的一些不足和限制, 尤其是结合多喷头技术, 能够突破实现跨尺度多材料复杂三维结构一体化制造。首先, 阐述了该方法的基本原理, 并通过理论分析和数值模拟展示了其成形机理; 随后, 通过系统的实验验证, 验证了电场驱动喷射沉积3D打印对于衬底(或者已打印结构)材料、打印高度和位置、导电和非导电喷嘴、打印材料普适性, 以及所提出的两种工作模式在实现跨尺度制造方面的可行性和有效性; 最后, 通过4个典型打印案例, 展示了提出的电场驱动喷射沉积3D打印在实现异质、跨尺度复杂三维结构制造的能力和突出优势, 证明了它在实现多材料多尺度3D打印方面的可行性和有效性。本研究为探索低成本多材料跨尺度3D打印提供了一种全新的解决方案。

关键词 电场驱动喷射沉积, 3D打印, 增材制造, 电流体动力学, 多材料多尺度, 材料喷射

1 引言

多材料多尺度结构的制造是当前制造科学的前沿, 研究难点以及亟待突破的技术, 目前新材料(功能梯度材料、超材料、仿生材料、多孔材料、智能材料、复合材料等)、组织工程(组织支架、毛细血管、组织器官)、微纳机电系统、新一代电子产品(嵌入式电子产品、印刷电子、柔性电子、可穿戴设备、结构

仿生产制造等诸多领域对于多材料、宏/微跨尺度复杂结构一体化制造有着非常广泛的需求和实际工程需求。但是, 现有的制造技术在实现多材料多尺度结构制造方面面临巨大的挑战, 增材制造(3D打印)具有以下4个方面突出的能力和优势: (1) 形状复杂性; (2) 材料复合性; (3) 层次复杂性; (4) 功能复杂性。3D打印为多材料跨尺度复杂三维结构制造提供了一种全新的解决方案。

引用格式: 钱鑫, 兰红波, 赵佳伟, 等. 电场驱动喷射沉积3D打印. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: 773–782.
Qian X, Lan H B, Zhao J W, et al. Electric-field-driven jet deposition 3D printing (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: 773–782. doi: 10.1360/SSR2017-06255

© 2019 《中国科学》杂志社

www.scichina.com

引用格式: 刘明杨, 齐习猛, 朱晓阳, 等. 基于电场驱动喷射沉积3D打印和辊轮辅助热压印制造嵌入式金属网格柔性透明导电薄膜. 科学通报, 2020, 65: 1–11.
Liu M Y, Qi X M, Zhu X Y, et al. Fabrication of embedded metal-mesh flexible transparent conductive film via electric-field-driven jet microscale 3D printing and roller-assisted thermal imprinting (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1–11. doi: 10.1360/77-2019-0746

© 2019 《中国科学》杂志社

www.scichina.com csb.scichina.com

五、项目团队



兰红波教授（博士）

二级教授，博士，博士生导师

山东省增材制造工程技术研究中心主任，青岛市3D打印工程中心主任
西安交通大学 工学博士，德国柏林工业大学 博士后

国务院政府特殊津贴专家，山东省泰山学者特聘专家，山东省有突出贡献专家，教育部新世纪优秀人才，青岛市首批创新领军人才，中国机械工程学会增材制造（3D打印）技术分会常务委员，国际标准化组织（ISO）增材制造(ISO/TC261)标委会委员，全国增材制造标委会（SAC/TC562）委员，**以第一发明人获得美国发明专利3项，国际PCT专利8项，中国发明专利40项，制定增材制造国家标准3项，获软件著作权3项，出版英文学术著作6部，发表高水平学术论文86篇，主持国家和省部级项目13项。**

张广明（博士）

材料研发

国内外著名大学8年材料研究与开发

北京科技大学 材料学博士

美国伊利诺伊大学香槟分校联合培养



彭子龙（博士）

产品研发、装备开发

16年产品开发和自动化控制研究

哈尔滨工业大学 工学博士

美国俄亥俄州立大学高级访问学者



五、项目团队



朱晓阳 (博士)

透明导电膜产品研发

南京理工大学 工学博士

丰富的透明导电膜、透明电极和微纳3D打印经验，以第一作者在国际顶尖期刊AM等发表高水平论文12篇。



钱垒 (博士)

新品研发、工艺优化

香港理工大学博士

拥有多年微纳制造领域经验，熟知多种微纳制造工艺。



赵佳伟 (硕士)

开拓市场、融资、销售等

青岛理工大学 工学硕士

5年从事微纳3D打印、透明导电膜研发和市场推广的经验。



许权 (硕士)

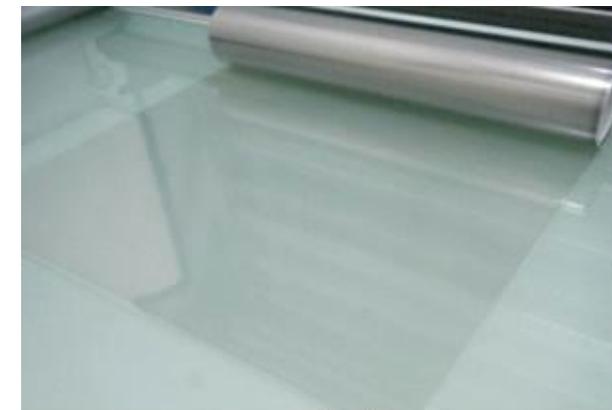
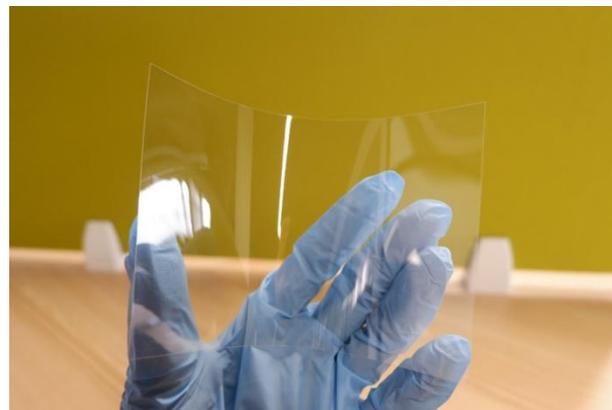
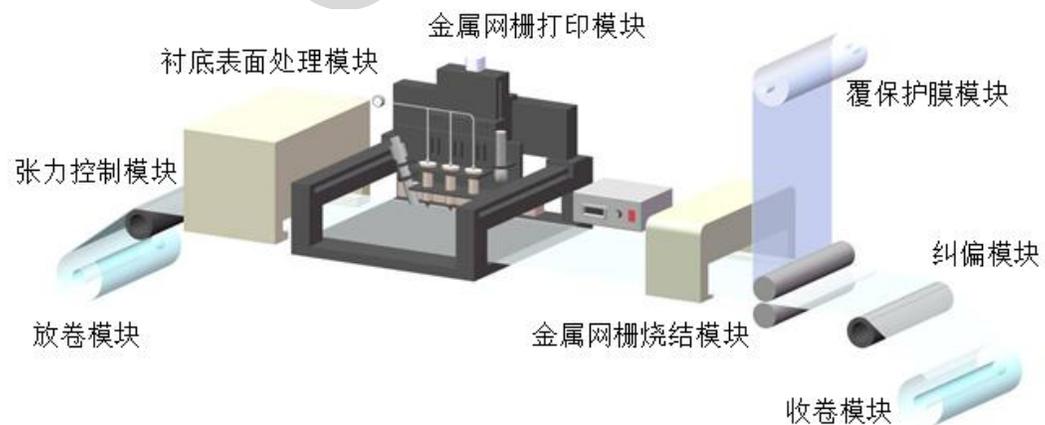
产品生产、售前和售后等服务支持

青岛理工大学 工学硕士

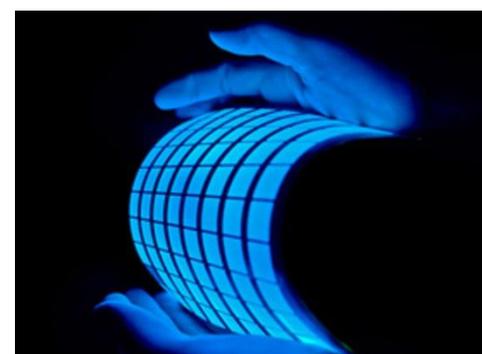
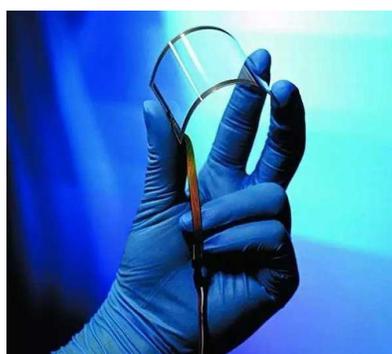
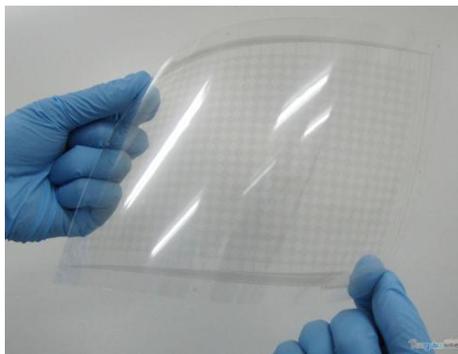
在透明导电膜、纳米压印、微纳3D打印等领域从事5年的产品、设备和研究与开发和生产制造。

六、商业模式与营销策略

1 销售系列化标准型产品



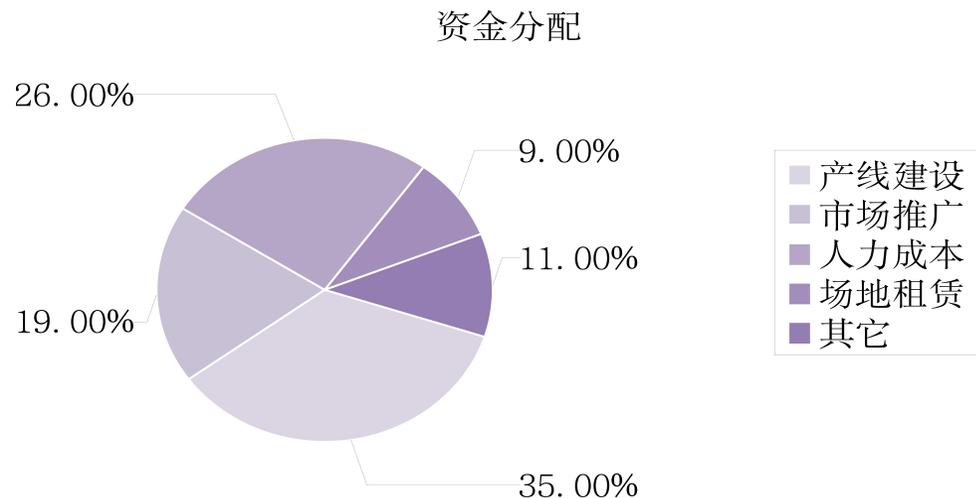
2 为具体行业和特定需求用户提供透明导电薄膜定制化生产



七、财务业绩预测与融资计划

	标准化产品		定制化服务				主营收入	主营成本	利润
	高性能透明导电薄膜 (浮雕+嵌入)		定制化透明导电薄膜		生产透明导电薄膜微 纳3D打印机				
	数量 (万m ²)	收入 (万元)	数量 (万m ²)	收入 (万元)	数量 (台)	收入 (万元)	(万元)	(万元)	(万元)
2020	20	2000	3	450	5	650	3100	1300	1800
2021	40	4000	8	1200	8	1040	6240	2930	3310
2022	70	7000	14	2100	12	1560	10660	4650	6010

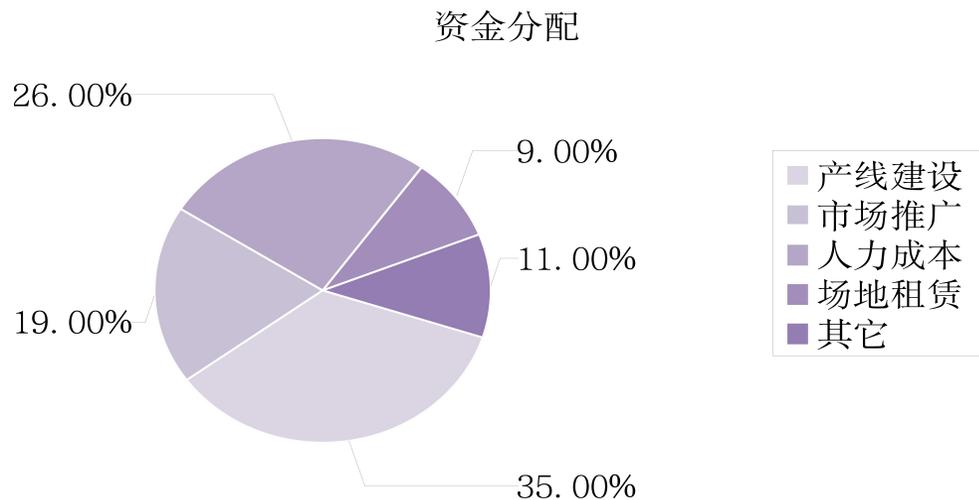
融资计划



融资计划：2000万
释放股份：40%
资金使用：其中1400万用于产线建设；
600万用于市场推广、公司
员工成本以及公司日常运营
投资回报：通过股权转让退出
上市公司并购退出
直接上市后退出现

	标准化产品		定制化服务				主营收入 (万元)	主营成本 (万元)	利润 (万元)
	数量 (万m ²)	收入 (万元)	任意图案透明导电薄膜 数量 (万m ²)	收入 (万元)	微纳3D打印机 数量 (台)	收入 (万元)			
2020	20	2000	3	450	5	650	3100	1300	1800
2021	40	4000	8	1200	8	1040	6240	2930	3310
2022	70	7000	14	2100	12	1560	10660	4650	6010

融资计划



融资计划: 2000万

释放股份: 40%

资金使用: 其中1400万用于产线建设;
600万用于市场推广、公司
员工成本以及公司日常运营

投资回报: 通过股权转让退出
上市公司并购退出
直接上市后退出



谢谢!

青岛理工大学
青岛五维智造科技有限公司

赵佳伟: 15254206582

许 权: 15715329049

wuweizhizao@126.com

<http://www.wuweizhizao.com>