

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.07.022

可延展电子金属导线通用互连结构 延展性表征研究*

左 锋, 潘开林*, 秦 晴, 杨 帆, 蒋廷彪
(桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:针对当前可延展电子互连结构性能分析复杂、结构设计不确定性等问题,将国内外常用的互连结构图形进行了总结分析,提出了一种通用互连结构图形,通过改变该图形的结构参数可以变成常用的一些互连结构,在此基础上基于梁结构理论针对提出的图形结构,采用能量法推导计算自由状态下通用互连结构的拉伸位移公式和弯曲位移公式,同时根据胡克定理结合推导的位移公式推导出了相应的拉伸刚度和弯曲刚度。为了验证该通用互连结构拉伸刚度和弯曲刚度的正确性及通用性,建立了有限元数值仿真模型进行验证。验证结果表明:该通用互连结构图形的刚度公式是正确性且具备通用性,金属导线通用互连结构的延展性起到一定的表征作用,为可延展电子金属互连导线的结构设计提供一定参考价值。

关键词:可延展电子;金属导线;通用互连结构;拉伸刚度;弯曲刚度;

中图分类号:TM241;TN304.9

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)07-0888-07

Research on characterization of stretchability for metal universal interconnect structure in stretchable electronics

ZUO Feng, PAN Kai-lin, QIN Qing, YANG Fan, JIANG Ting-biao
(Mechanical and Electrical Engineering College, GuiLin University of Electronic Technology
GuiLin 541004, China)

Abstract: Aimed at a series of problems of interconnect structure such as complexity of performance analysis and uncertainty of structure design in stretchable electronics, a universal interconnect structure, through which common interconnect structures can be formed by changing its geometric parameters was proposed by the means of summary and analysis of the common structures. Based on the beam structure theory and aimed at the proposed structures, tensile displacement and bending displacement formula were derived by energy method in free condition. Furthermore, their corresponding tensile stiffness and bending stiffness were calculated according to Hooke's law and combining the displacement formula above. The finite element numerical simulations model were built to verify the validity and generality of the stiffness formula. Finally the validation results indicate that the tensile stiffness and bending stiffness formula of universal interconnect structure is correct and characterization of stretchability for universal interconnect structure is proved. This research provide a meaningful design guide for interconnect structure design.

Key words: stretchable electronics; metallic conductors; universal interconnect structure; tensile stiffness; bending stiffness;

0 引 言

传统的无机电子产品,因材料本身的属性,即刚

性和脆性等特点,导致其应用范围受到了很大的限制。因此柔性电子技术在光伏、显示、传感器等领域得到了很大的发展,如柔性太阳能电池板、柔性

收稿日期:2015-03-28

基金项目:国家自然科学基金面上项目(61474032)

作者简介:左 锋(1990-),男,湖北武汉人,研究生,主要从事可延展柔性电子方面的研究. E-mail: zuofeng901222@126.com

通信联系人:潘开林,男,博士,教授. E-mail: PankL@guet.edu.cn

OLED、电子纸、柔性智能标签等应用。这些应用的出现为实现便携式智能电子设备提供了条件。但是目前的柔性电子应用只能直线一定程度的弯曲,其有限的柔性还达不到人们的追求。因此能实现任意曲面变形的电子产品需求刺激了电子技术的创新。可延展电子(Stretchable Electronics)其在保持传统平面、刚性电子器件或系统功能的同时^[1],具备一定程度的拉伸、扭曲等形变能力,能够直接应用于三维自由曲面工作环境。

对于可延展/柔性电子和光电子学在机械和材料上的研究进展表面带有高性能半导体功能系统能够允许极端的机械变形^[2-15],例如像橡皮筋一样拉伸、像绳子一样扭转、像纸片一样弯曲。这种技术创造了许多应用机会,这些应用机会是现有的技术无法解决的。从“表皮”的健康监控^[16-18],到柔性的手术器械^[19-23],到眼球状数码相机^[24-25],到机器人皮肤^[26-29],同时可延展电子也可应用于军事领域。根据 IDTechEx 最新的关于可穿戴技术(wearing technology)的报告,自 2014 至 2024 年,穿戴式电子市场将得到高速的发展,其中多数将采用可延展电子技术。未来的可延展电子产品将极大满足人们的需求。

实现可延展电子有两种基本结构,第一种是将减薄的刚性半导体器件转印到受预应力的弹性基底上^[30-31],当释放预应力后,半导体器件黏附在基底上形成波纹状结构。第二种是将刚性有源器件作为“岛屿”^[32-35],以可延展导线作为“桥”来连接各个刚性器件,这种结构被称作“岛桥”结构。“岛桥”结构结合了现有的高性能电子元器件,与传统制造工艺相兼容,并且可以通过不同结构设计的互连导线改变其延展性能,其拉伸率通常高于第一种方法。因此本研究主要针对第二种“岛桥”结构中的互连导线进行研究。

对于通过弹性基底及可延展的金属导线获得延展性的“岛桥”结构而言,如若采用直桥形结构其延展性有限,Alaca B E 等人^[36-37]发现的纳米级厚度的金属薄膜拉伸时的断裂伸长率约是 1% ~ 2%。因此需要通过可延展互连结构尽可能大的变形来提高整体结构的延展性能。为了提高结构的延展性,学者们往往通过设计分析某一种不同的互连结构使其能达到更大的延展性能。比利时的 Gonzalez 等人^[38]首先设计了面内弯曲(正弦波形、“U”形以及马蹄形等)的金属导线,并对其进行了平面应力分析。此外,为进一步提高柔性电路的最大延伸率,在马蹄形的基础上,他们提出了一种新的互连结构^[39]。马蹄形互连结构虽然具有较

好的延展性,但是其又具有一定的局限性,例如对于 I/O 较多的器件,因为其接口间距较小,而马蹄形结构属于内开口形式的互连结构到使其无法运用到该情况下,因此 Z 形、外梯形、正弦形等开口朝外的互连结构图形能改满足该情况。

在互连结构的力学分析方面。Bavani Balakrisnan 等人^[40]针对集中常用的互连结构,采用梁理论推导了自由状态下导线结构的拉伸和弯曲的刚度计算公式,简化了这类图形拉伸和弯曲的变形分析。利用推导的公式,分析了导线结构的各参数对结构刚度的影响,从而优化参数提高结构延展性能。Yung-Yu Hsu 等人^[41]也对类似的 Z 字形结构进行了分析他们采用了能量法求出了自由状态下 Z 字形拉伸方向的位移公式,以及拉伸方向导线可承受的最大拉伸应力公式。Yihui Zhang 等人^[42]针对自行设计了可延展自相似矩形导线结构,在忽略整体结构的平面外变形上,采用能量法推算了自由状态下的结构在平面内变形时的刚度矩阵以表征结构的延展性。

综上所述,学者们通常只针对某一种图形互连结构进行延展性分析,而没有针对一种通用的互连结构(这种通用结构可通过改变其结构参数,可以得到某一特定的互连结构)形式进行分析研究,因此针对通用互连结构的研究分析对互连结构的设计具有重要的研究意义。

鉴于此,本研究将结合常用的互连导线结构提出一种通用互连图形结构,同时根据弯曲平面假设,推导出自由状态下通用互连结构拉伸位移、弯曲位移和与之相对应的拉伸刚度、弯曲刚度公式来表征自由状态下互连结构的延展性,并通过对比分析和仿真验证,表明公式的正确性及通用性。

1 可延展电子金属导线通用互连图形结构拉伸位移及弯曲位移

可延展电子通用互连结构延展性表征,主要是基于梁结构理论,通过自由状态下互连结构的拉伸刚度来表征其延展性能,即通过理论算出来的互连结构的拉伸刚度越大,则延展性相对越小。因此,本研究结合目前常用的互连结构,提出一种通用的互连结构,然后通过理论力学,材料力学等理论,推导出自由状态下通用互连结构的拉伸位移和弯曲位移,得出相应的拉伸刚度和弯曲刚度,以此来表征延展性能。

1.1 通用互连导线

根据目前国内外常采用的互连图形结构,可推断

存在这样的图形,当增加或减少某些特定值时可以得到好几种互连结构,换言之,常用的几种互连结构的几何参数之间存在一定的相互转化的关系。其中 H 、 R 、 T 、 α 的变化会改变互连导线的图形结构。当 H 为 0 时,可变成马蹄形结构,当 R 为 0 时,可变成内梯形结构,当 H 和 R 为 0 时,可变成 Z 字形。通过改变角度 α 可以变成其他常用的图形。综上所述,通用图案可通过改变其几何参数获得其他图案,因此,本研究认定由通用图案推出自由状态下的位移及刚度公式同样也适用于其他图案。

通用互连结构图形如图 1 所示。

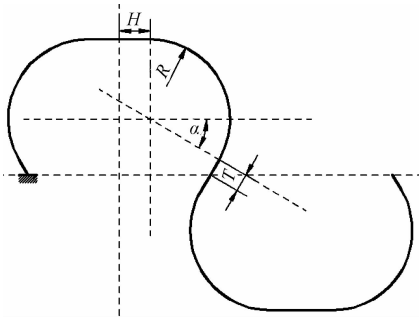


图 1 通用互连结构图形

$$\delta_x = \left\{ \begin{aligned} & \frac{F}{EA} \left\{ T \sin^2 \alpha + \frac{1}{4} R [2\alpha - \sin(2\alpha)] + \frac{\pi}{4} R + H \right\} + \\ & \frac{F}{EI} \left\{ \frac{1}{3} T^3 \cos^2 \alpha + \alpha R (T \cos \alpha + R \sin \alpha)^2 + 2R^2 (T \cos \alpha + R \sin \alpha) \cos \alpha + \right. \\ & \left. \frac{1}{4} R^3 [2\alpha - \sin(2\alpha)] + \frac{\pi}{2} R (T \cos \alpha + R \sin \alpha)^2 + \frac{1}{4} \pi R^3 \right. \\ & \left. + H (T \cos \alpha + R \sin \alpha + R)^2 \right\} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式中: E — 弹性模量, A — 互连结构的横截面积, I — 互连导线的转动惯量。

由于本研究分解均是将一个周期的图案分为 4 份,则当相求 n 个周期的 X 方向的总位移时,总有:

$$\delta_{x\text{总}} = n \times 4\delta_x \quad (2)$$

式中: δ_x — 公式(1) 解析结果。

1.3 通用互连导线弯曲位移推导

相对于 X 轴的拉伸位移,合理地分析估算弯曲位移需要更加复杂的计算,由于整个图形结构的力臂不是常数,而是由该段结构到末端的距离决定的,力和力臂造成的变形量和弯曲量必须被考虑进去。垂直力通用图形互连结构示意图如图 3 所示。图 3 显示了不同段和力分布,其中定义半个周期为一段,一周期可以分解成一样的两段。

其中第 i 段力臂长度是:

$$L_i = 2(2n - i)(R \cos \alpha - T \sin \alpha + H) \quad (3)$$

1.2 通用互连导线拉伸位移推导

由于杆件中存在曲杆结构,现代材料力学中没有曲杆弯曲拉伸的直接求解公式,本研究采用能量法中的卡氏定理求解。

根据通用图形结构,及其受力情况本研究首先将结构简化并受力分析,一个周期的通用形互连结构可以分解成四部分,根据受力情况,可知每段受力的情况是一样,因此,只要求出其中一段的位移情况,则一个周期的通用图形位移也可以获得,而且其值等于 4 段结构位移之合。

一个周期通过用图形及其简化示意图如图 2 所示。

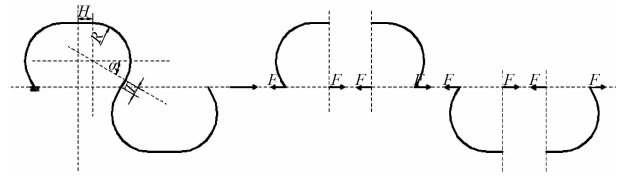


图 2 一周期通用图形及其简化示意图

本研究单独选出其中一部分,对其进行理论推导得到的 1/4 受水平力下的拉伸位移如下所示:

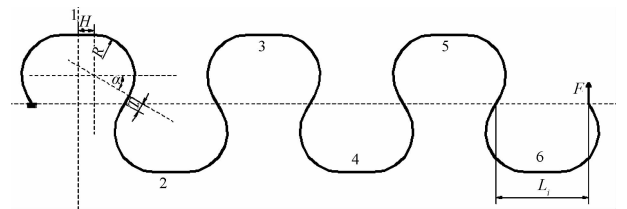


图 3 垂直力通用图形互连结构示意图

式中: n — 图形结构的周期数。

针对其受力情况,本研究将互连结构进行简化如通过通用图形结构简化,一周期通用图形 Y 方向力分解过程示意图如图 4 所示。

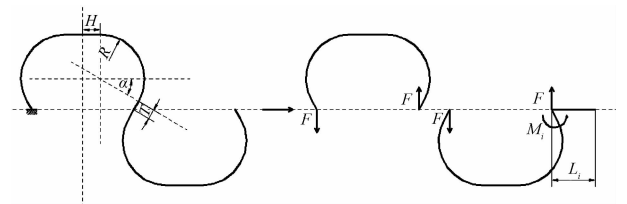


图 4 一周期通用图形 Y 方向力分解过程示意图

预拉伸刚度类似,此处笔者选取半周期进行计算, 得出第 i 段的垂直方向的位移如下所示:

$$\delta_{y_i} = \left\{ \begin{aligned} & \frac{F}{EA} \left\{ 2T \cos^2 \alpha + \frac{1}{2} R [2\alpha + \pi + \sin(2\alpha)] \right\} + \\ & \left[\begin{aligned} & 2L_i^2 \left[H + T + R \left(\alpha + \frac{\pi}{2} \right) \right] + \\ & 4L_i (R \cos \alpha - T \sin \alpha + H) \left[H + T + R \left(\alpha + \frac{\pi}{2} \right) \right] + \\ & T^2 \sin^2 \alpha \left[\frac{8}{3} T + 2H + R(2\alpha + \pi) \right] + \\ & \frac{F}{EI} \left\{ R^2 \cos^2 \alpha [4T + 2H + R(2\alpha + \pi)] - \right. \\ & 2HT \sin \alpha \cos \alpha [3T + 2H + R(2\alpha + \pi)] - \\ & HT \sin \alpha [6T + 4H + R(4\alpha + 2\pi)] + \\ & HR \cos \alpha [8T + 4H + R(4\alpha + 2\pi)] + \\ & H^2 [4T + \frac{8}{3} H + R(4\alpha + 2\pi)] + \\ & \left. \frac{1}{2} R^3 [2\alpha + \pi + \sin(2\alpha)] + 4HR^2 (\sin \alpha + 1) \right\} \end{aligned} \right] \end{aligned} \right. \quad (4)$$

则 n 个周期的 Y 方向的总位移为:

$$\delta_{y_{\text{总}}} = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \cdots + \delta_{2n-1} + \delta_{2n} \quad (5)$$

2 通用刚度公式的对比验证

2.1 通用结构的拉伸刚度和弯曲刚度

那么在根据刚度公式, n 个周期互连导线的拉伸刚度和弯曲刚度为:

$$k_x = \frac{F_x}{\delta_{x_{\text{总}}}} = \frac{F_x}{n \times 4\delta_x} \quad (6)$$

$$k_y = \frac{F_y}{\delta_{y_{\text{总}}}} \quad (7)$$

将式(1)代入式(6)可得拉伸刚度,将式(4,6)代入式(7)可得弯曲刚度。

2.2 建模与仿真

本研究基于 Python 的参数化建模,建立二维平面通用互连图形进行仿真计算,由于不考虑结构的平面外变形,故采用二维的平面模型进行仿真计算。材料属性方面,本研究仿真的互连导线材料是铜箔,仅将其视为线弹性材料,其杨氏模量 $E = 85 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.3^{[43]}$ 。边界条件与载荷方面,本研究限制所有结构左端的 x, y 拉伸移动的自由度,并在结构右端限制其 y 拉伸移动的基础上,施加 x 拉伸位移载荷。根据胡克定律(仿真时必须保证结构变形量小和属于线弹性范围),设定导线拉伸率为原长的 3%。

网格方面,本研究采用四节点平面应力单元(CPS4R)。通过对模型的切割,进行扫掠网格划分。

在结果后处理方面,本研究提取位移加载端的位

移拉伸反力曲线,通过拟合获得曲线的斜率即为刚度。由于所采用的为二维平面结构,故需要设置结构的平面外厚度,以避免在提取加载位移拉伸反力时出现错误的值。

2.3 通用刚度公式的验证

笔者分析推导出的拉伸刚度、及弯曲刚度的参数均是互连导线的结构参数,确定参数是第一前提,所确定的数值对应生成的图案不发生交联,拉伸后导线不发生平面外变形。但是在这一条件下每个参数可取值的范围仍然很大,为了减小取值范围,笔者设定边界条件:

(1) 在不考虑导线宽度时,图案振幅均为 $V = 1.2 \text{ mm}$,均为两个周期图案,且图案最大总长 $L = 5.816 \text{ mm}$,导线结构尺寸示意图如图 5 所示。

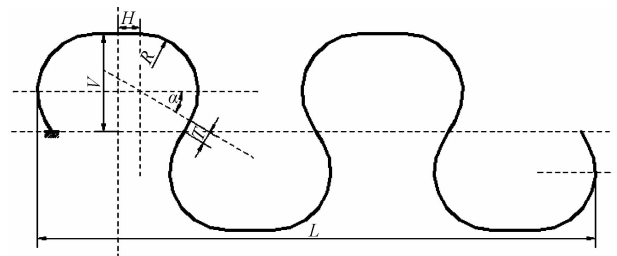


图5 导线结构尺寸示意图

(2) 依据目前互连导线梁结构的特点,选择导线截面为矩形,且 $I = wt^3/12$,其中导线振幅为厚度、宽度的 25 倍,即厚度 $t =$ 宽度 $w = 0.048 \text{ mm}$,杨氏模量 $E = 85000 \text{ MPa}$ 。

基于上述边界条件,计算结果和仿真结果的误差最大只有 5%,最小有 0.1%,平均误差为 3%,均在可

允许误差范围内。计算与仿真对比结果如表 1 所示。

表 1 刚度计算仿真对比结果

图案	参数				理论拉 伸刚度	仿真拉 伸刚度	拉伸刚 度误差	理论弯 曲刚度	仿真弯 曲刚度	弯曲刚 度误差
	α (rad)	H (mm)	R (mm)	T (mm)	Kx1 (N/mm)	Kx2 (N/mm)	100%	Kx1 (N/mm)	Kx2 (N/mm)	100%
悬臂梁	$-\pi/2$	0.727	0	0	33 673	33 643	0.089 1	0.573 4	0.56	2.33
Z 字形	-0.540	0	0	1.4	6.984 3	6.80	6.9	0.303 7	0.29	4.5
	-0.500	0.064	0	1.367	6.283 9	6.15	2.13	0.297 3	0.29	2.45
	-0.400	0.212	0	1.303	5.048 4	4.92	2.54	0.280 1	0.27	3.60
	-0.300	0.348	0	1.256	4.257 7	4.15	2.53	0.263 9	0.25	5.2
外梯形	-0.200	0.476	0	1.224	3.694 5	3.51	4.99	0.248 1	0.24	3.2
	-0.100	0.599	0	1.206	3.396 3	3.26	4.01	0.232 5	0.23	1.07
	0	0.720	0	1.200	2.914 0	2.79	4.25	0.217 1	0.21	3.27
内梯形	0.100	0.810	0	1.206	2.692 9	2.65	1.59	0.223 9	0.22	1.74
	0.200	0.902	0	1.224	2.493 0	2.36	5.33	0.230 7	0.22	4.51
	0.300	0.998	0	1.256	2.304 1	2.21	4.08	0.237 7	0.23	3.24
	0.400	1.100	0	1.303	2.126 6	2.06	3.13	0.245 8	0.24	2.36
U 形	0	0	0.720	0.480	4.318 6	4.20	2.74	0.255 8	0.25	2.27
	0.1	0	0.751	0.377	4.234 5	4.10	3.18	0.258 2	0.25	3.17
	0.2	0	0.772	0.279	4.206 8	4.10	2.54	0.260 4	0.25	3.99
	0.25	0	0.781	0.233	4.175 9	4.10	1.82	0.259 8	0.25	3.77
马蹄形	0.3	0	0.788	0.188	4.156 0	4.10	1.35	0.259 4	0.25	3.62
	0.35	0	0.793	0.144	4.147 6	4.00	3.56	0.259 2	0.25	3.54
	0.4	0	0.796	0.102	4.143 4	4.00	3.46	0.259 7	0.25	3.73
	0.45	0	0.799	0.06	4.131 2	4.00	3.17	0.258 7	0.25	3.36
	0.5	0	0.800	0.019	4.132 2	4.00	3.20	0.258 5	0.25	3.28
	0.524	0	0.800	0	4.131 6	4.00	3.18	0.258 5	0.25	3.28

(注:角度前的正负号表示的是通用公式中对角度增加方向的定义,根据公式需求,定义正值表示顺时针增加,负值表示逆时针增加。)

误差来源是仿真图案与计算图案的误差,由于仿真建模采用的是参数化建模,而代码是通用的,在部分图案中会存在特殊值,例如水平线段为零等,但实际仿真中,一旦建立的实体就不能赋“零”值,因此在之后刚度对比仿真中,当需要取值为零时,会取允许取的最小单元值。如水平、斜边最小取值为 0.006。而关于曲率半径 R ,由于实际生产制造也不会存在绝对零值,因此 R 最小值为当时导线宽度。总体而言,误差均为可接受误差,由此证明本研究推导的通用刚度计算公式是正确的。

3 结束语

本研究结合目前国内外常用的互连结构图形,提出了一种通用的互连结构图形,能通过改变通用图形的结构参数变换成目前常用的互连图形结构。根据提出的通用互连结构图形,首先采用能量法理论推导出适用于自由状态下 Z 字形、外梯形、马蹄形、内梯形、矩形、U 型、正弦形等互连导线结构的通用互连结构的

拉伸位移和弯曲位移,其次,基于胡克定律,根据推导出的拉伸位移和弯曲位移推导出相对应的拉伸刚度和弯曲刚度。最后,基于 Python 语言建立了平面通用互连结构的参数化模型,根据建立的模型验证了推导的拉伸刚度和弯曲刚度。

验证结果表明,该通用互连结构的刚度公式具备通用性,为互连结构的设计提供一定的参考设计。

参考文献(References):

[1] SOMEYA T. Stretchable Electronics[J]. **Gomu.** 2012,85 (3):101-106.

[2] LACOUR, S. P. JONES, J. WAGNER, S. et al. Stretchable interconnects for elastic electronic surfaces[J]. **IEEE.** 2005,93(8):1459-1467.

[3] KHANG, D. Y. JIANG, H. Q. HUANG, Y. et al. A stretchable form of single-crystal silicon for high-performance electronics on rubber substrates [J]. **Science**, 2006, 311 (57,58):208-212

- [4] LACOUR, S. P. WAGNER S, NARAYAN, R. J. et al. Stiff subcircuit islands of diamondlike carbon for stretchable electronics [J]. **Applied Physics**, 2006, 100 (1): 0149131-0149136.
- [5] H. Q. JIANG, D. Y. KHANG, J. Z. SONG, et al. Finite deformation mechanics in buckled thin films on compliant supports[J]. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 2007, 104 (40): 15607-15612
- [6] JIANG, H. Q. KHANG, D. Y. FEI, H. Y. et al. Finite width effect of thin-films buckling on compliant substrate; experimental and theoretical studies [J]. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 2008, 56 (8): 2585-2598.
- [7] SEKITANI, T. NAKAJIMA, H. MAEDA, H. et al. Stretchable active-matrix organic light-emitting diode display using printable elastic conductors[J]. **Nature Materials**, 2009, 8(6): 494-499.
- [8] ROGERS, J. A. SOMEYA, T. H. VANG, Y. et al. Materials and mechanics for stretchable electronics [J]. **Science**, 2010, 327(5973): 1603-1607.
- [9] HUANG, Y. A. WANG Y-OUAN, X. M. et al. Controllable self-organization of colloid microarrays based on finite length effects of electrospun ribbons [J]. **Soft Matter**, 8 (32): 8302-8311.
- [10] Yang, S. LU. N. S. Gauge factor and stretchability of silicon-on-polymer strain gauges [J]. **Soft matter**, 2013, 13 (7): 8577-8594.
- [11] YONGQING D, YONGAN H, ZHOUPING Y, et al. Non-wrinkled, highly stretchable piezoelectric devices by electrohydrodynamic direct-writing. [J]. **Nanoscale**, 2014, 6 (6): 3289-325.
- [12] KIM. RAK-HWAN, KIM. DAE-HYEONG, XIAO. JIAN-LIANG et al. Waterproof AlInGaP optoelectronics on stretchable substrates with applications in biomedicine and robotics[J]. **Nature Materials**, 2010, 9(11): 929-937.
- [13] LEE. CHUL-HO, KIM. YONG-JIN, HONG, YOUNG-JOON, et al. Flexible inorganic nanostructure light-emitting diodes fabricated on graphene films [J]. **Advanced Materials**, 2011, 23(40): 4614-4619.
- [14] DARREN LIPOMI. J, MICHAEL VOSGUERITCHIAN, ZHE NAN BAO, et al. Stretchable organic solar cells[J]. **Advanced Materials**, 2011, 23(15): 1171-1175.
- [15] Nelson. E. C, Dias. N. L, Bassett. K. P, et al. Epitaxial growth of three-dimensionally architected optoelectronic devices[J]. **Nature Materials**, 2011, 10(9): 676-681.
- [16] DAE-HYEONG KIM. , NANSHU LU. , RUI MA, et al. Epidermal Electronics [J]. **Science**, 2011, 333 (6044): 838-843.
- [17] KALTENBRUNNER, M. Sekitani, T. REEDER, J. et al. An ultra-lightweight design for imperceptible plastic electronics[J]. **Nature**, 2013, 499(7459): 458 - 463.
- [18] SCHWARTZ. GREGOR, WANG HUI LIANG, BAO ZHENAN, et al. Flexible polymer transistors with high pressure sensitivity for application in electronic skin and health monitoring[J]. **Nature Communications**, 2013, 4(5): 54-56.
- [19] COTTON, D. P. J. GRAZ, I. M. LACOUR, S. P. et al. A multifunctional capacitive sensor for stretchable electronic skins [J]. **IEEE Sensors Journal**. 2009, 9 (12): 2008-2009.
- [20] ZHE YU, OLIVER GRAUDEJUS, CANDICE TSAY, et al. Monitoring hippocampus electrical activity in vitro on an elastically deformable microelectrode array[J]. **Journal of Neurotrauma**, 2009, 26(7): 1135-1145.
- [21] VIVENTI, J. KIM, D. H. MOSS J. D. et al. A conformal, bio-interfaced class of silicon electronics for mapping cardiac electrophysiology [J]. **Science Translational Medicine**, 2010, 2(24): 180-186.
- [22] OLIVER. Graudejus, CEIAR GOLETIANI, ZHE YU, et al. Encapsulating elastically stretchable neural interfaces: yield, resolution, and recording/stimulation of neural activity[J]. **Advanced Functional Materials**, 2012, 22 (3): 640-651.
- [23] DAE-HYEONG, KIM. SHUODAO WANG. , HOHYUN KFUM, et al. Thin, flexible sensors and actuators as ‘instrumented’ surgical sutures for targeted wound monitoring and therapy[J]. **Small**, 2012, 8(21): 3263-3268.
- [24] HEUNG CHO KO. , MARK P STOYKOVICH. , JI ZHOU SONG, et al. A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics[J]. **Nature**, 2008, 454(7205): 748-753
- [25] YOUNG MIN SONG, YIZHU XIE, VIKTOR MALYARCHUK, et al. Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye [J]. **Nature**, 2013, 497(7447): 95-99.
- [26] SOMEYA. T, SEKITANI. T, TAKAO SOMEYA, TSUYOSHI SEKITANI, YUSAKU KATO, et al. A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications [J], **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 2004, 101(27): 9966-9970.
- [27] Wagner. S, LACOUR. SP, SIGURD WAGNER, JOYELLE JONES, ZHIGANG SUO, et al. Electronic skin: architec-

- ture and components[J], **Physica E-low-dimensional Systems & Nanostructures**, 2004, 25(2-3):326-334.
- [28] STEFAN C. B MANNSELD., BENJAMIN C-K Tee., RANDALL M. STOLTENBERG, et al. Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers[J]. **Nature Materials**, 2010, 9(10):859-864.
- [29] NANSHU LU, CHI Lu, SHI XUAN YANG, et al. Highly sensitive skin-mountable strain gauges based entirely on elastomers[J]. **Advanced Functional Materials**, 2012, 22(19):4044-4050.
- [30] KIM D. H. ROGERS, J. A. DAE HYEONG KIM, JOHN A. ROGERS. Stretchable electronics: Materials strategies and devices[J]. **Adv. Mater.**, 2008, 20(24):4887 - 4892.
- [31] KIM, D. XIAO, J. SONG, J. et al. Stretchable, curvilinear electronics based on inorganic materials[J]. **Adv. Mater**, 2010, 22(19):2108-2124.
- [32] MANDLIK, P. LACOUR, S P. W. J. Li, et al. Fully elastic interconnects on nanopatterned elastomeric substrate[J]. **IEEE Electron Device Lett**, 2006, 27(8):650-652.
- [33] LACOUR, S. P. JONES, J. SUO, Z. et al. Design and performance of thin metal film interconnects for skin-like electronic circuits[J]. **IEEE Electron Device Lett**, 2004, 25(4):179-181.
- [34] GRAY, D. S. Tien, J. CHEN. C. S. High-conductivity elastomeric electronics[J]. **Adv. Mater.**, 2004, 16(6):393-397.
- [35] BROSTEAUX, D. AXISA, F. Gonzalez, M. et al. Design and fabrication of elastic interconnections for stretchable electronic circuits[J]. **IEEE Electron Device Lett**, 2007, 28(7):552-554.
- [36] ALACA B E, SAIF M T A, SEHITOGLU H. On the interface debond at the edge of a thin film on a thick substrate[J]. **Acta Materialia**, 2002, 50(5):1197-1209.
- [37] HUANG H B, SPAEPEN F. Tensile testing of free-standing Cu, Ag and Al thin films and Ag / Cu multilayers[J]. **Acta Materialia**, 2000, 48(12):3261-3269.
- [38] GONZALEZ M, AXISA F, BULCKE M. Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits[J]. **Microelectronics Reliability**, 2008, 48(6):825-832.
- [39] GONZALEZ M, AXISA F, BULCKE M V, et al. Design of Metal Interconnects for Stretchable Electronic Circuits using Finite Element Analysis[J]. **International Conference on, Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation Experiments in Microelectronics and Micro-Systems**, 2007, 48(6):1-6.
- [40] BALAKRISNAN B, NACEV A, BURKE J M, et al. Design of compliant meanders for applications in MEMS, actuators, and flexible electronics[J]. **Smart Materials and Structures**, 2012, 21(7):416-422.
- [41] HSU Y, GONZALEZ M, BOSSUYT F, et al. In situ observations on deformation behavior and stretching-induced failure of fine pitch stretchable interconnect[J]. **Journal of Materials Research**, 2009, 24(12):3573-3582.
- [42] ZHANG Y, FU H, SU Y, et al. Mechanics of ultra-stretchable self-similar serpentine interconnects[J]. **Acta Materialia**, 2013, 61(20):7816 - 7827.
- [43] NEGGERS J. Investigation of interface integrity in stretchable electronics[D]. Eindhoven; Eindhoven University of Technology, Department of Mechanical Engineering, 2009.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

左 锋, 潘开林, 秦 晴, 等. 可延展电子金属导线通用互连结构延展性表征研究[J]. 机电工程, 2016, 33(7):888 - 894.

ZUO Feng, PAN Kai-lin, QIN Qing, et al. Research on characterization of stretchability for metal universal interconnect structure in stretchable electronics[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016, 33(7):888 - 894.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>