

## 综述

## 可延展柔性无机微纳电子器件原理与研究进展\*

冯雪<sup>1)2)†</sup> 陆炳卫<sup>1)2)</sup> 吴坚<sup>1)2)</sup> 林媛<sup>3)‡</sup> 宋吉舟<sup>4)</sup> 宋国锋<sup>5)</sup> 黄永刚<sup>6)</sup>

1)(清华大学航天航空学院, 应用力学教育部重点实验室, 北京 100084)

2)(清华大学先进力学与材料中心, 北京 100084)

3)(电子科技大学, 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 成都 610054)

4)(美国迈阿密大学机械与航空工程系, 迈阿密, 佛罗里达 33146)

5)(中科院半导体研究所, 集成光电子学国家重点联合实验室, 北京 100083)

6)(美国西北大学机械工程系, 埃文斯顿, 伊利诺伊 60208)

(2013年9月25日收到; 2013年10月22日收到修改稿)

为适应下一代电子产品便携性、形状可变性、人体适用性等方面的进一步需求, 近年来基于无机电子材料的可延展柔性电子技术成为全球电子产业界与学术界关注的新焦点. 与有机柔性电子学器件不同, 可延展柔性无机电子器件指的是建立在柔性基底上的无机电子组件. 这种具有柔性的集成电路利用力学设计提供大变形, 在保持无机脆性电子器件高性能和高可靠性的同时, 具备形状可弯曲、可伸缩等柔性能. 本文综述了近年来无机柔性电子器件的进展, 包括力学设计原理、基于界面黏附的转印集成方法以及柔性大变形下的失效机理等, 并展望了未来的应用和发展.

**关键词:** 可延展柔性电子器件, 无机半导体材料, 屈曲, 黏附

**PACS:** 42.82.Cr, 61.82.Fk, 62.20.mq, 68.35.Np **DOI:** 10.7498/aps.63.014201

## 1 引言

微纳电子器件是信息的基础单元, 实现其柔性及可延展化, 并能够适应非平面的工作环境(比如人体), 将突破现在电子器件的应用范围, 促进信息与人的融合. 考虑到柔性电子独特的特性及潜在的应用价值, 国内外多个研究机构已展开了柔性电子技术的研究. 美国国防预研局(DARPA)与航天局(NASA)分别启动了针对柔性电子技术的庞大计划, Harvard、Princeton、UIUC、UCLA、Argonne 国家实验室等著名大学和顶级国家实验室参与其中<sup>[1,2]</sup>. 欧盟的信息技术协会(ITS)在FP6和FP7也启动柔性可延展电子技术专项, 并成立产业与学

术界结合的联盟, 广泛推动这一项目. 在工业界, IBM、Intel、飞利浦、柯达、爱普生、索尼等大公司都将此技术视为电子产业的革命性解决方案, 并投入了大量人力与资源进行相关研发<sup>[3-5]</sup>.

柔性电子器件概念的提出可追溯到对有机电子学(organic electronics)的研究. 人们试图通过有机半导体替代硅, 有机高分子聚合物往往具有很好的柔韧性, 从而使得有机电子器件具有柔性的特点<sup>[6]</sup>. 普林斯顿大学著名的微电子学家Forrest教授2004年在Nature上发表论文综述了有机电子学的研究现状与发展方向, 并提出了概念性设计与概念性制造方法, 如图1所示的笔状柔性可卷曲显示器<sup>[7]</sup>.

在过去的几十年中柔性有机电子技术蓬勃发

\* 国家自然科学基金(批准号: 11320101001, 10820101048, 11222220, 10902059, 11372272)和清华信息科学与技术国家实验室(筹)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: fengxue@tsinghua.edu.cn

‡ 通讯作者. E-mail: linyuan@uestc.edu.cn

展, 部分成果初步形成产业, 如有机发光二极管等. 但是有机半导体材料的迁移率和器件工作频率比无机半导体低几个数量级<sup>[8,9]</sup>, 无机金属导线的导电率比有机导电聚合物高几个数量级, 比如铜的导电率为  $5.96 \times 10^5$  S/cm, 而导电聚合物的导电率一般小于 200 S/cm, 日本东京大学 Someya 研究组 2008 年在 Science 期刊和 2009 年在 Nature Materials 报道的单壁碳纳米管掺杂的聚合物导电率也分别只有 60 S/cm<sup>[10]</sup> 和 102 S/cm<sup>[11]</sup>. 基于有机半导体的光电能量转换器件和发光器件转换效率远不及无机半导体器件, 比如砷化镓锗太阳能电池的

能量转换效率高达 41.1%<sup>[12]</sup>, 而根据美国 National Energy Renewable Laboratory (NREL) 的数据, 有机太阳能电池达到的最高能量转换效率仅有 8.3%<sup>[13]</sup>, 所以无机太阳能电池比有机太阳能电池的能量转换效率高几倍; 无机 LED 比有机 LED 具有更高的能量效率和更长的使用寿命<sup>[14]</sup>, 比如 In-GaN 蓝光 LED 外部量子效率可以达到 60%<sup>[15]</sup>, 使用寿命长达 50000 h 以上<sup>[16]</sup>, 而 Kim 等 2010 年报道的蓝光有机 LED 的外部量子效率仅有 4.8%<sup>[17]</sup>, 并且有机 LED 的使用寿命一般小于 15000 h.



图1 笔状可弯曲显示器<sup>[7]</sup>

因此, 对于传统的有机柔性电子技术, 由于有机半导体材料特性受限, 极大限制其在高速电子系统中的发展和应用. 虽然有机电子器件能够承受弯曲、拉伸等变形, 但是它们的电学等物理学性能还是不能与无机半导体器件相比. 硅等传统的无机半导体材料往往是脆性的, 在弯曲、拉伸等变形作用下容易发生断裂, 但它们具有优越的电学等物理学特性. 使传统无机微电子器件具备柔性, 传统有机柔性电子器件具备高性能, 一直是微电子器件工作者的梦想.

以传统硅材料为基体的无机微纳电子器件, 一旦实现柔性将会极大拓展微电子器件的应用范围和领域, 并改变人类的生活方式. 另一方面, 从微电子器件和集成电路的发展来看, 微电子器件与集成电路越来越智能化、易用化、便携化. 以计算机为例, 从最初占地庞大的机器发展为现在灵巧的移动终端, 而在可预期的未来, 微电子器件将会更加以人为中心、更加易用便携, 逐渐实现与人体的集成; 另外柔性无机电子技术的发展可以满足不同形状物体的使用, 如高速发展的物联网需要的柔性电子标签等. 这必然要求微电子器件及其集成电路是柔

性并适应各种非平面环境. 因此, 柔性无机电子技术是微电子与集成电路革新性发展的方向之一, 对其基础问题的研究和解决, 可以形成具有自主知识产权的柔性无机集成电路, 推进传统信息产业革新和产业升级.

柔性可延展无机电子技术并非用于取代目前的硅芯片技术, 而是对硅基载体的结构进行改进. 现在国际上最新的柔性无机电子技术, 是将硅基体置于柔性基体(如 Kapton、PET 或 PDMS 等高分子聚合物)上, 通过力学结构设计并利用基体的柔性实现整体的可弯曲与可延展. 这种设计理念可以克服非柔性的硅基芯片较厚、易脆的缺点, 使得柔性可延展电子产品除具备轻、薄与高可靠性的特性外, 同时可以使硅基体被大量低廉的高分子聚合物基片替代, 成本也大大降低. 因此柔性无机电子器件技术可以开创全新的应用领域, 用以设计各种形状更贴近人体、易于使用的电子产品, 比如柔性显示器、柔性电子标签、人工肌肉和可穿戴电子衣等. 柔性电子器件的研究及应用必将对人类的生活产生巨大的影响.

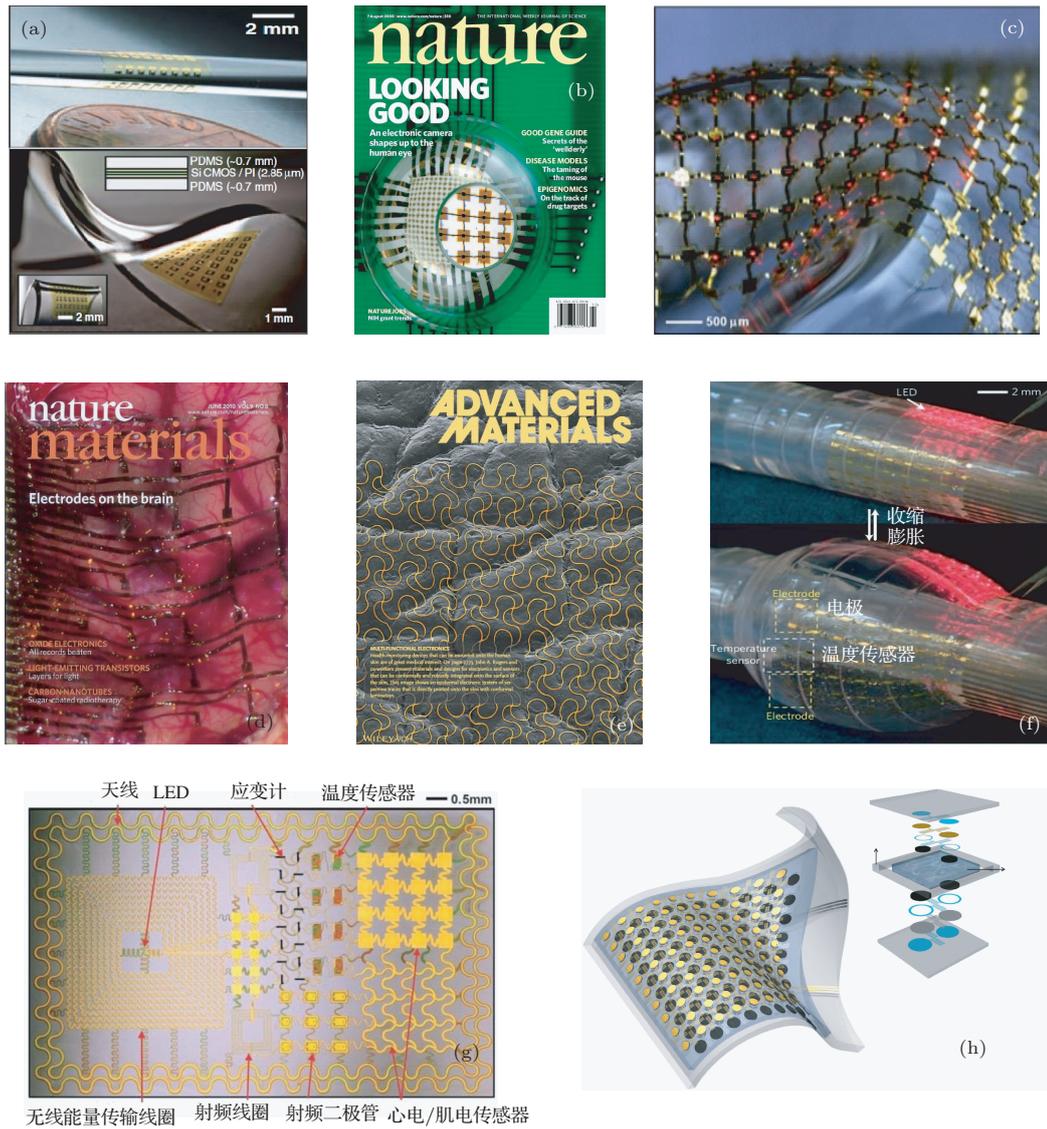


图2 各种柔性无机电子器件 (a) 可折叠硅集成电路 [18]; (b) 半球状电子眼相机 [19]; (c) 柔性无机 LED 显示 [14]; (d) 脑电极 [20]; (e) 直接与皮肤接触的皮肤电子 [21]; (f) 柔性多功能导管 [23]; (g) 皮肤电子 [22]; (h) 可延展锂离子电池 [24]

近年来, 伊利诺伊大学 Rogers 教授研究组与西北大学 Huang 教授研究组合作, 在可延展柔性无机电子器件的研究上取得长足的进步, 他们精巧利用力学屈曲原理将无机器件中的导线或者功能组件变为波浪状, 从而实现了不同形式、不同功能的可延展柔性电子器件, 如图 2 示. 柔性单晶硅集成电路将无机功能部件分割为岛状集成在柔性基体上, 通过屈曲的金属导线互连, 从而实现拉伸、扭转和折叠变形 [18]; 电子眼相机在硅基片上将单晶硅制备成感光 CMOS 阵列器件, 然后转印到半球状的柔软基体上, 可以像生物的眼球一样获得更大的视角和更小的图形畸变 [19]; 柔性 LED 显示器在柔性基底上将无机 LED 阵列用屈曲的金属线互连形成网状岛桥结构, 通过金属互联线的大变形来实现

显示器的延展性 [14]; 脑电极将金属电极制备在可溶解的柔软的丝纤蛋白薄层上, 然后器件贴合在脑组织表面, 丝纤蛋白的溶解和再吸收所产生的毛细管力使得电极很好地包裹在组织表面, 通过电极可扫描脑组织的电位图 [20]; 多功能皮肤电子在超薄网状柔性电路的结点处集成电位传感器、温度传感器、应变传感器, 通过 PVA 层的溶解实现与皮肤表面的密切黏合, 再增加无线射频控制电路和天线, 便可实现无线传感 [21,22]; 多功能气囊导管将温度、血流量、压力、光学和电位学的传感器集成在极薄的气囊导管上, 通过气囊导管的变形使传感器更好地与被测组织接触, 配上射频电极针可以对局部病变组织进行切除 [23]; 可延展锂离子电池通过特别设计的自相似互连导线设计, 将电池的可拉伸量提

高到300%<sup>[24]</sup>. 这些研究是对传统微电子、光电子、生物健康检测和生物集成等领域的一个全新探索, 其成果令我们看到了一个美好的前景.

## 2 可延展柔性无机电子器件原理

### 2.1 理论基础

柔性无机电子器件主要基于结构设计, 使基于传统无机半导体材料的功能电子器件与柔软的承

载基体集成, 并在系统变形中隔离基体变形对无机功能部件的影响. 这种结构设计保留了半导体器件的优越特性, 并采用传统的半导体材料生长与加工工艺, 维持产品的低成本, 又使得器件具有适应环境大变形的能力, 极大扩充了器件的应用范围.

柔性器件设计的关键是结构的柔性化设计. 以塑料直管和波纹管为例, 塑料直管的可拉伸量和弯曲量很小, 但波纹管通过波纹结构的伸缩特性使得结构具有很大的拉伸和弯曲变形能力.



图3 波纹管比直管获得更高的拉伸和弯曲性能

受此启发, 屈曲模型成为了柔性可延展器件一种可能的实现形式. 在力学上, 对于屈曲现象早有相关的研究. Chen等<sup>[25]</sup>针对二维人字纹状的屈曲模式作了分析, 论证这种结构是使得系统的能量最低的状态, 解释了波纹状屈曲的物理机理. Huang等<sup>[26]</sup>建立一维的正弦状屈曲模型分析不同基底薄膜厚度和模量下硬薄膜的屈曲波长和波幅, 进一步针对二维有限厚度基底, 建立模型同时计算薄膜的二维屈曲形状和三维基体的弹性场. 另外, 针对不同形式的屈曲也被广泛研究<sup>[27-29]</sup>. 2006年, 伊利诺伊大学Rogers教授与黄永刚教授合作成功通过预应变控制方法在PDMS基底上制备波纹状单晶硅条<sup>[2]</sup>. 该成果成功地通过屈曲结构实现柔性功能半导体器件, 测试结果显示器件在承受较大的变形的情况下电学性能并无明显下降. 这一奠基性工作为无机电子器件可延展柔性化奠定基础, 被MIT Technology Review评为当年十大突破性技术之一<sup>[30]</sup>. 屈曲理论后来被广泛地研究, Jiang<sup>[31,32]</sup>和Song<sup>[33,34]</sup>等针对硬薄膜黏接在柔性基体上的屈曲模型做了详细的分析, 从理论上定量预测硅纳米条带波浪屈曲的波长和幅值. 以纳米条带的一维屈曲为例, 介绍其主要的分析过程.

Song<sup>[35]</sup>等在其综述文章中给出了无机柔性电子器件的力学分析, 其过程如图4所示, 硅薄膜条

被制备在硅片上, 通过氢氟酸刻蚀硅条下方的二氧化硅, 用被预拉伸后长为 $L + dL$ (原长为 $L$ )的PDMS软厚基体将条带从硅基片上黏起, 缓慢释放PDMS的拉伸应变, 硅条在PDMS表面形成沿拉伸方向波纹状的结构. 此波纹结构可承受再拉伸或压缩, 通过改变结构构型从而提供延展性.

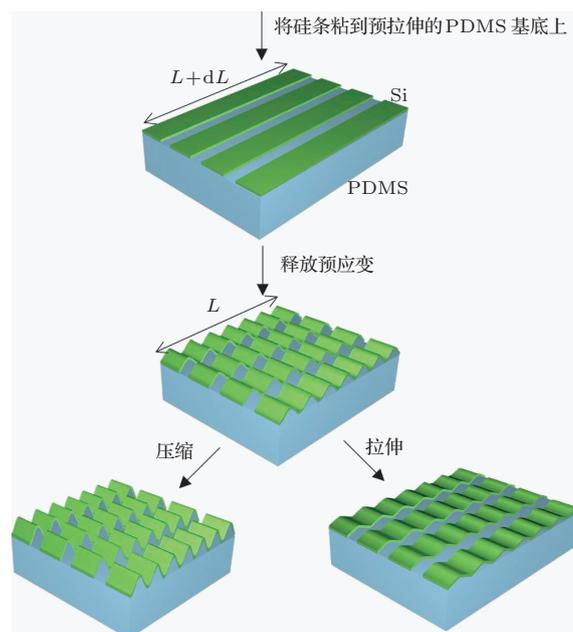


图4 屈曲硅条的制备及拉伸/压缩测试示意图<sup>[35]</sup>

屈曲硅条中性面的离面位移可用余弦函数表示

$$w = A \cos\left(\frac{2\pi x_1}{\lambda}\right), \quad (1)$$

其中  $A$  和  $\lambda$  分别为屈曲的幅值和波长,  $x_1$  为硅条长度方向坐标. 将硅条简化为 Von Karman 梁, 基体为半无限大固体, 则薄膜/基体系统变形能包含三部分: 薄膜弯曲变形能、薄膜应变能及基体变形能. 薄膜的弯曲变形能为

$$\begin{aligned} U_b &= L_0 \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda \frac{\overline{E}_f h_f^3}{24} \left(\frac{d^2 w}{dx^2}\right)^2 \\ &= \frac{\pi^4 \overline{E}_f h_f^3 A^2}{3\lambda^4} L_0, \end{aligned} \quad (2)$$

其中  $L_0$  为薄膜的原长,  $h_f$  为薄膜的厚度,  $E_f$  是薄膜的杨氏模量,  $\nu_f$  是薄膜的泊松比,  $\overline{E}_f = \frac{E_f}{1 - \nu_f^2}$  为薄膜的平面应变模量. 根据 Huang 等<sup>[26]</sup> 的分析, 薄膜-基体间界面上的剪力可忽略, 由此薄膜中性面的轴向应变为常值并且可得薄膜的轴向应变能(或称膜应变能)为

$$\begin{aligned} U_m &= L_0 \frac{1}{\lambda} \int_0^\lambda \frac{1}{2} N_{11} \varepsilon_{11} dx \\ &= \frac{1}{2} \overline{E}_f h_f \left(\frac{\pi^2 A^2}{\lambda} - \varepsilon_{\text{pre}} + \varepsilon_{\text{app}}\right)^2 L_0, \end{aligned} \quad (3)$$

其中  $\varepsilon_{\text{pre}}$  为基体的预应变,  $\varepsilon_{\text{app}}$  为基体释放预应变后所施加的应变. 根据弹性力学, 长度为  $L_0$  的半无限大基体的变形能为

$$U_s = \frac{\pi}{4\lambda} \overline{E}_s A^2 L_0, \quad (4)$$

系统达到稳定时, 系统总能量  $U_m + U_b + U_s$  对  $A$  和  $\lambda$  求偏导数为零可以得到

$$\lambda = 2\pi h_f \left(\frac{\overline{E}_f}{3\overline{E}_s}\right)^{1/3}, \quad (5a)$$

$$A = h_f \sqrt{\frac{\varepsilon_{\text{pre}} - \varepsilon_{\text{app}}}{\varepsilon_c} - 1}, \quad (5b)$$

其中  $\varepsilon_c = \frac{1}{4} \left(\frac{3\overline{E}_s}{\overline{E}_f}\right)^{2/3}$  为导致薄膜屈曲的临界应变. 从理论结果来看, 屈曲波长与预应变  $\varepsilon_{\text{pre}}$  和施加应变  $\varepsilon_{\text{app}}$  无关, 而屈曲的幅值与  $\varepsilon_{\text{pre}}$  和  $\varepsilon_{\text{app}}$  有关, 这是由于以上理论中采用基体小变形的假设.

根据曲率计算屈曲峰处的弯曲应变  $\varepsilon_{\text{bending}} = \frac{2\pi^2}{\lambda^2} A h_f$  得到薄膜的最大弯曲应变  $2\sqrt{(\varepsilon_{\text{pre}} - \varepsilon_{\text{app}}) \varepsilon_c}$ . 薄膜的膜应变保持为常数  $-\varepsilon_c$ , 通常是一个非常小的数(例如对于硅/PDMS 系统

为  $10^{-5}$ ). 由此薄膜中的最大应变可近似为

$$\varepsilon_{\text{peak}} \approx 2\sqrt{(\varepsilon_{\text{pre}} - \varepsilon_{\text{app}}) \varepsilon_c}.$$

由此看出屈曲后薄膜的最大应变比预应变小很多, 因此系统能够经受大的变形.

在后续的实验中观察到, 波长与预应变和施加应变是相关的. 为此, 针对有限变形, Jiang<sup>[31]</sup> 和 Song<sup>[34]</sup> 等指出波长的应变相关性是与有限大变形相关的. 他们新的有限变形模型中, 考虑了屈曲构型和未屈曲构型的映射关系, 修正了前面的小变形结果, 构型转换如图 5 所示.

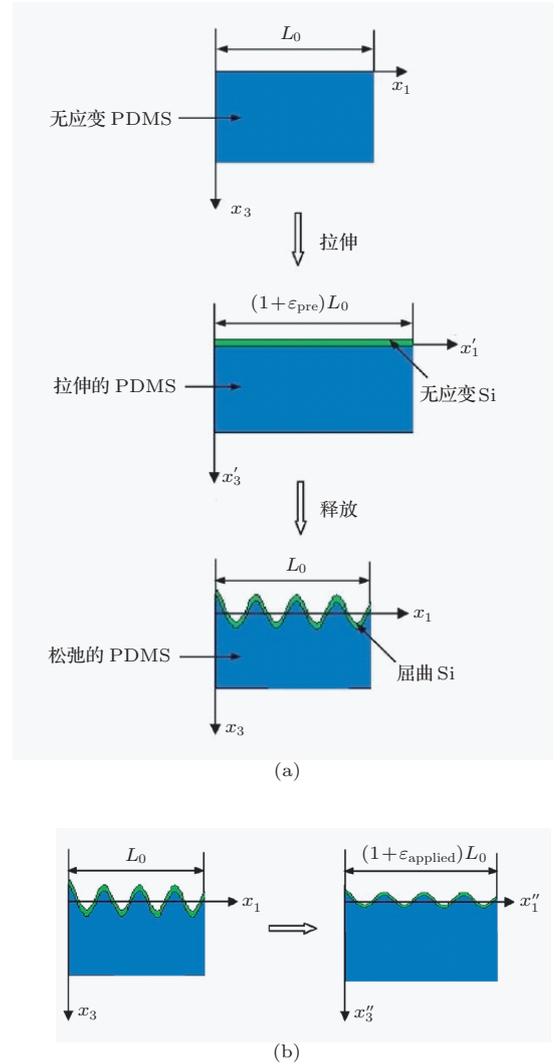


图 5 硅条在半无限大基体上的屈曲模型示意图 (a) 屈曲过程; (b) 后屈曲<sup>[34]</sup>

同样假设薄膜的中面位移为

$$\begin{aligned} w &= A'' \cos\left(\frac{2\pi x_1''}{\lambda''}\right) = A'' \cos\left[\frac{2\pi(1 + \varepsilon_{\text{app}})x_1}{\lambda''}\right] \\ &= A'' \cos\left[\frac{2\pi(1 + \varepsilon_{\text{app}})x_1'}{(1 + \varepsilon_{\text{pre}})\lambda''}\right], \end{aligned} \quad (6)$$

其中  $x_1$  和  $x'_1$  分别对应基体和薄膜的零应变构型. 相应的薄膜应变能  $U_m$ , 弯曲应变能  $U_b$  和基体应变能  $U_s$  可分别表示为

$$U_b = \frac{\pi^4}{3} \overline{E}_f h_f^3 A'^2 \left[ \frac{1 + \varepsilon_{app}}{(1 + \varepsilon_{pre}) \lambda''} \right]^4 \times (1 + \varepsilon_{pre}) L_0, \quad (7a)$$

$$U_m = \frac{1}{2} \overline{E}_f h_f \left[ \left( \frac{1 + \varepsilon_{app}}{1 + \varepsilon_{pre}} \right)^2 \frac{\pi^2 A'^2}{\lambda''^2} - \frac{\varepsilon_{pre} - \varepsilon_{app}}{1 + \varepsilon_{pre}} \right]^2 (1 + \varepsilon_{pre}) L_0, \quad (7b)$$

$$U_s = \frac{\pi}{3} \frac{E_s A'^2}{\lambda''} (1 + \varepsilon_{app}) \left[ 1 + \varepsilon_{app} + \frac{5}{32} \frac{\pi^2 A'^2}{\lambda''^2} (1 + \varepsilon_{app})^2 \right] L_0. \quad (7c)$$

由系统总能量对  $A''$  和  $\lambda''$  求偏导数为零可以得到有限变形条件下波长  $\lambda''$  和幅值  $A''$  为

$$\lambda'' = \frac{\lambda (1 + \varepsilon_{app})}{(1 + \varepsilon_{pre}) (1 + \varepsilon_{app} + \zeta)^{1/3}}, \quad (8)$$

$$A'' \approx \frac{A}{\sqrt{1 + \varepsilon_{pre}} (1 + \varepsilon_{app} + \zeta)^{1/3}}, \quad (9)$$

其中  $\zeta = \frac{5}{32} (\varepsilon_{pre} - \varepsilon_{app}) (1 + \varepsilon_{pre})$ ,  $A$  和  $\lambda$  为 (5) 式中小变形的结果. 硅条的薄膜应变仍可近似为  $-\varepsilon_c$  而最大应变可近似为

$$\varepsilon_{peak} \approx 2 \sqrt{(\varepsilon_{pre} - \varepsilon_{app}) \varepsilon_c} \frac{(1 + \varepsilon_{app} + \zeta)^{1/3}}{\sqrt{1 + \varepsilon_{pre}}}.$$

在和实验及有限元计算结果的对比中也证实, 在小变形时, 前期的模型是近似可用的; 而对于较大变形, 应采用上述的有限变形模型, 波长将依赖于预应变和施加应变, 如图 6 示. 结果表明系统的延展性 ( $\sim 10\%$ ) 远远大于硅条的断裂应变 ( $\sim 1\%$ ) [35].

### 2.2 可延展柔性无机微纳器件的几何构型设计

无机微纳电子器件结构主要包含两部分, 执行计算或命令的物理功能部分与电信号传输的导线部分. 基于上面的分析可以看出, 实现无机电子器件的柔性化可以有不同的形式, 总的来说可以将基于硅基的器件整体实现屈曲波浪状或者将物理功能部分小型化而传输导线实现屈曲波浪状.

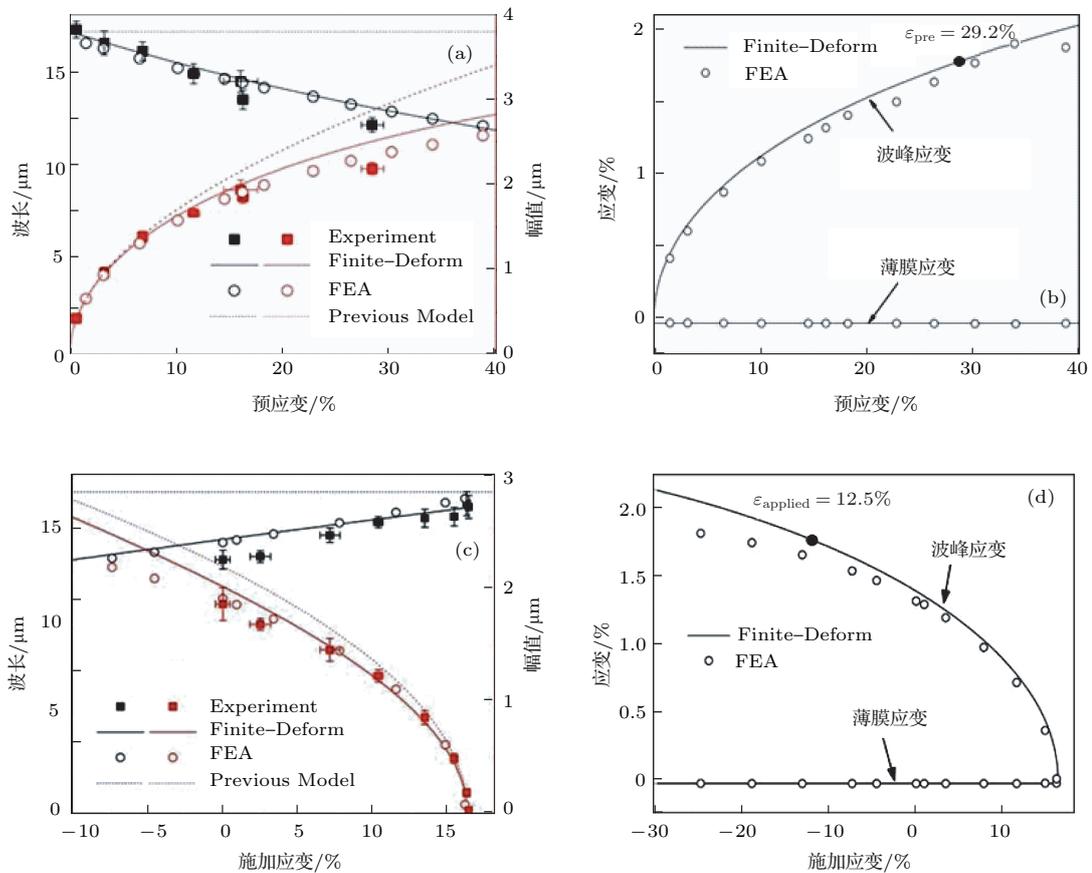


图 6 在  $\varepsilon_{app} = 0$  时, (a) 预应变与波长和幅值关系, (b) 预应变与薄膜应变和最大应变关系, 在  $\varepsilon_{pre} = 16.2\%$  时, (c) 施加应变与波长和幅值关系, (d) 施加应变与薄膜应变和最大应变关系 [34,35]

### 2.2.1 全黏结无机薄膜电子学器件的柔性化设计

最早提出基于传统无机半导体硅制备柔性电子器件是美国伊利诺伊大学Rogers教授和Huang教授, 2006年他们合作在Science及Nature Materials上发表的论文<sup>[2,36]</sup>展示了一个非常巧思的设计方法: 将条带状硅薄膜转移印刷 (transfer printing) 到受预拉伸的柔性聚合物 (聚二甲基硅氧烷, PDMS) 基体上, 通过释放基体所受的预拉变形, 使得硅薄膜发生屈曲变为连续性波纹形状 (图7), 实现了脆性硅薄膜在不改变其电学性能的情况下, 整个电子器件结构具有柔性和延展性, 可以承受弯曲、拉伸等变形. 这一设计思想利用现有半导体硅工艺制备无机功能部件, 然后将其转印到柔性基体, 在释放预拉伸应变的收缩作用下将无机功能部件整体屈曲, 形成波浪状, 从而使得整个电子器件具备可延展柔性. 这一方法的优点是不改变当前硅工艺, 只是增加了转印这一过程, 一旦工业化则对整个半导体工业的升级冲击最小. 然而这一方法虽然简便易行, 但是不利于集成电路的大规模集成, 同时其可延展性能较低, 由于薄膜与柔性基体都是保持百分之百的黏结, 器件的延展性仅有5%—10%.

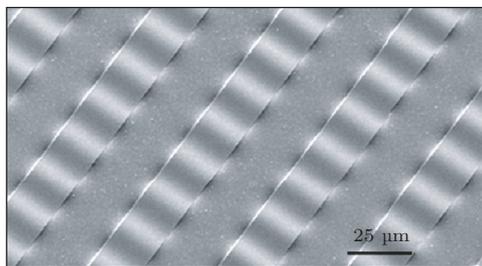


图7 硅薄膜在PDMS基体上屈曲的SEM照片<sup>[2]</sup>

### 2.2.2 基于薄膜网格几何结构的延展性设计

为了进一步提高电子器件的柔性和延展性, Rogers教授研究组与黄永刚教授研究组合作又提出新的延展性设计方法: 1) 构建薄膜成为一个开放的网格几何结构; 2) 选择性黏结网格到一个预拉的柔性基底上, 随着柔性基底预拉伸的释放, 岛部分 (功能部分) 仍与基体保持良好的黏结, 而互连导线发生屈曲变形从基体上拱起, 桥的屈曲变形承受了柔性基底所释放出的预拉变形. 采用薄膜网格几何结构设计的电子器件除了增强柔性外其延展性提高到50%<sup>[37-39]</sup>.

薄膜网格几何结构的提出, 尤其是互连导线屈曲拱起, 使得柔性器件的延展率有了很大的提高.

互连导线的设计对延展性起着非常重要的作用, Wagner教授针对可延展电子器件的互连导线的变形以及延展性展开了研究<sup>[40-43]</sup>. 互连导线的尺寸受元件岛间距的约束, 因此无法通过延长互连导线来实现延展性的提高. 由蛇形结构的互连导线替换了直杆的互连导线, 蛇形互连导线在受拉/压情况下发生的是侧向屈曲变形 (图9(b)). 蛇形互连导线的引入大大的提升电子器件的延展率, 可达到100%<sup>[44,45]</sup>. 2011年Kim等<sup>[22]</sup>在Science上发表的仿表皮的电子器件, 将薄膜网格几何结构的设计思想用到了极致, 跟随皮肤一起褶皱. 清华大学黄克智院士研究了薄膜网格几何结构中互连线发生屈曲变形的机理, 建立了相应的理论模型, 提出了互连线设计指导理论<sup>[46]</sup>.

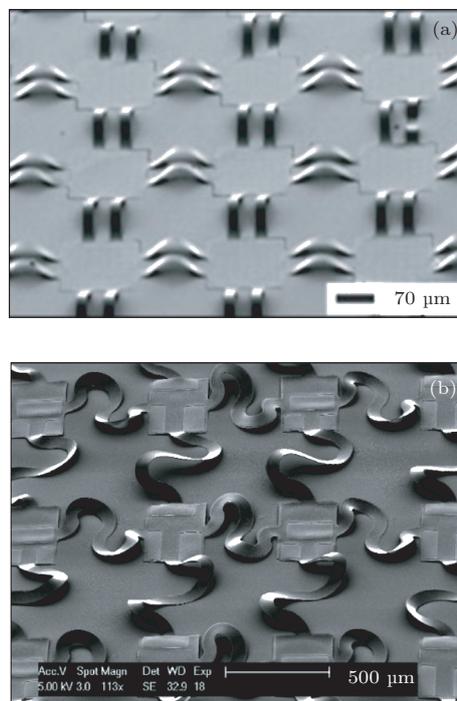


图8 薄膜网格结构的柔性电子器件 (a) 直互连导线的薄膜网格结构; (b) 蛇形互连导线的薄膜网格结构<sup>[45]</sup>

对于直互连导线网格结构, Song等<sup>[47]</sup>分析了岛桥各自的应变, 并给分析结构的延展性, 如图9示.

互连导线的最大应变

$$\epsilon_{\text{bridge}}^{\text{max}} = 2\pi \frac{h_{\text{bridge}}}{L_{\text{bridge}}^0} \sqrt{\frac{\epsilon_{\text{pre}}}{1 + \epsilon_{\text{pre}}}}; \quad (10a)$$

岛中的最大应变为

$$\epsilon_{\text{island}}^{\text{max}} = \frac{(1 - \nu_{\text{island}}^2) E_{\text{bridge}} h_{\text{bridge}}^2}{E_{\text{island}} h_{\text{island}}^2} \epsilon_{\text{bridge}}^{\text{max}}. \quad (10b)$$

其中,  $h_{\text{bridge}}$  是桥的厚度,  $L_{\text{bridge}}^0$  是初始时刻桥的长度,  $h_{\text{island}}$  是岛的厚度,  $E_{\text{bridge}}$  和  $E_{\text{island}}$  分别是

桥和岛材料的弹性模量,  $\nu_{\text{island}}$  是岛材料的泊松比. 由于  $h_{\text{bridge}} \ll L_{\text{bridge}}^0$ , 依据 (10a) 式, 互连导线中的应变远比基底中的预应变小, 因此器件可以实现很大的拉伸. 依据 (10b) 式, 硬而厚的岛可以降低传递到其上的应变.

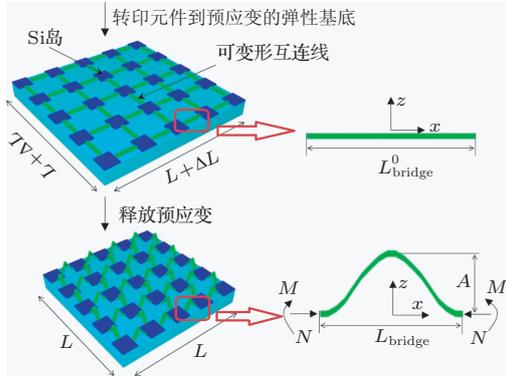


图9 直互连导线岛桥结构分析示意图 [47]

### 2.2.3 柔性基体几何结构设计

获取更大可延展柔性的设计思想是采用将无机薄膜划整体为局部, 通过互连导线来连接各个功能部分. 由于薄膜的分割以及柔性互连导线的引入, 使得薄膜在整个器件中所占的有效面积降低, 这会影响器件的功能化和集成化的效率, 尤其是对器件功能化与元件的面积相关的器件, 比如太阳能电池. 太阳能电池的光电转换功率与它的工作面积是密切相关的, 有效面积越大光电转换的功率就越大.

为了解决电子器件电学功能的效率与其延展性之间的这一矛盾, 柔性基体几何结构的优化设计被引入到电子器件的柔性设计中. 基于薄膜及其网格结构的电子器件柔性设计都是将薄膜或其网格结构直接转印到平的柔性基体上. 新的柔性设计方法对柔性基体的表层进行拓扑结构优化设计 (图 10 (a)), 在柔性基体表层出现凸岛、沟槽和槽口等结构. 薄膜网格结构转印在相应的柔性基体上, 互连导线向沟槽内屈曲变形 (图 10 (b)). 新方法所设计的电子器件既满足了较高的延展性和功能薄膜的较高的表面占有率, 又使器件易于封装 [48, 49].

对于沟槽屈曲互连结构, Lee 等 [48] 对互连线、岛和结构压缩率给出了分析,

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{\text{interconnect}} \\ &= 4\pi y_{\text{interconnect}} \frac{[\varepsilon_{\text{pre}}(l_{\text{island}} + l_{\text{trench}})]^{1/2}}{[\varepsilon_{\text{pre}}l_{\text{island}} + (1 + \varepsilon_{\text{pre}})l_{\text{trench}}]^{3/2}}, \end{aligned} \quad (11a)$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{\text{deviceisland}} \\ &= 4\pi y_{\text{deviceisland}} \frac{[\varepsilon_{\text{pre}}(l_{\text{island}} + l_{\text{trench}})]^{1/2}}{[\varepsilon_{\text{pre}}l_{\text{island}} + (1 + \varepsilon_{\text{pre}})l_{\text{trench}}]^{3/2}} \\ & \times \frac{(EI)_{\text{interconnect}}}{(EI)_{\text{deviceisland}}}, \end{aligned} \quad (11b)$$

$$\begin{aligned} & \text{contraction} \\ &= \frac{\nu\varepsilon_{\text{pre}}}{\frac{l_{\text{trench}}}{l_{\text{island}} + l_{\text{trench}}} \left( 1 + \frac{l_{\text{trench}}}{l_{\text{island}} + l_{\text{trench}}} \frac{h_{\text{trench}}}{h_{\text{base}}} \right)}, \end{aligned} \quad (12)$$

公式中桥的长度  $l_{\text{island}}$ 、沟槽的跨度  $l_{\text{trench}}$ 、沟槽部分厚度  $h_{\text{base}}$  和沟槽深度  $h_{\text{trench}}$  如图 10 (c) 所标示.

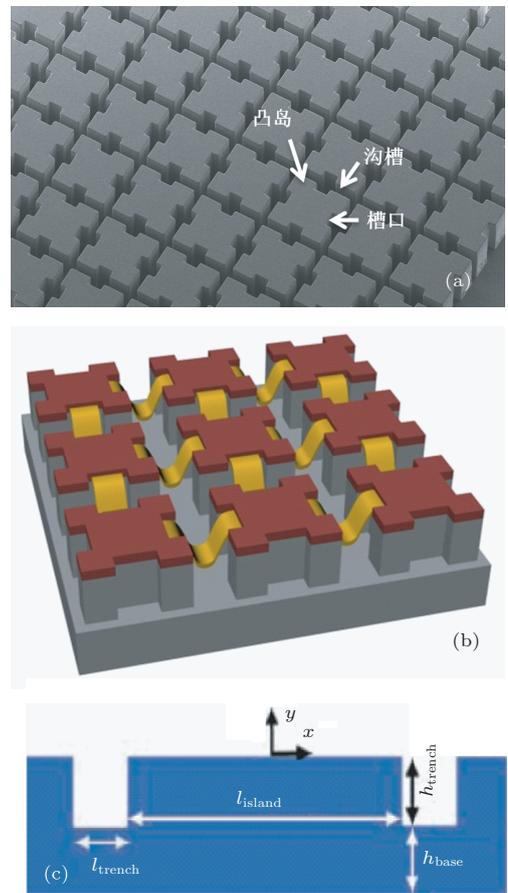


图10 基体拓扑优化的电子器件 (a) 沟槽结构 SEM 照片; (b) 沟槽互连结构示意图; (c) 沟槽几何尺寸示意图 [48,49]

## 3 基于转印的刚/柔异质界面集成方法

转印 (transfer printing) 是无机柔性电子最重要的集成方法, 首先将无机功能部分在硅片上制备, 通过界面黏附将其从硅片上剥离, 并将被剥离的功能部分印到柔性基体进行集成与封装, 从而

形成无机柔性电子器件. 这一过程中, 涉及到不同材料界面的黏附与脱黏问题, 需要动态调控界面的黏附.

### 3.1 转印技术的流程

转印技术通常是指在施主基体 (donor substrate) 上蚀刻好所需的器件 (一般是薄膜材料), 通过柔性图章 (通常使用 PDMS) 将这些器件从基体脱离并放置在受主基体上 (receive substrate) 的合适位置, 从而构成功能器件 [36,50–52]. 这种技术能够行之有效地将独立制备、不同种类的离散器件进行大规模集成, 进而形成空间有序的功能系统, 其通过对 PDMS 图章与薄膜器件之间的界面黏结力进行运动学控制来实现器件从一个基体向另一个基体的转移 [36]. 图 11 给出了转印的通用流程:

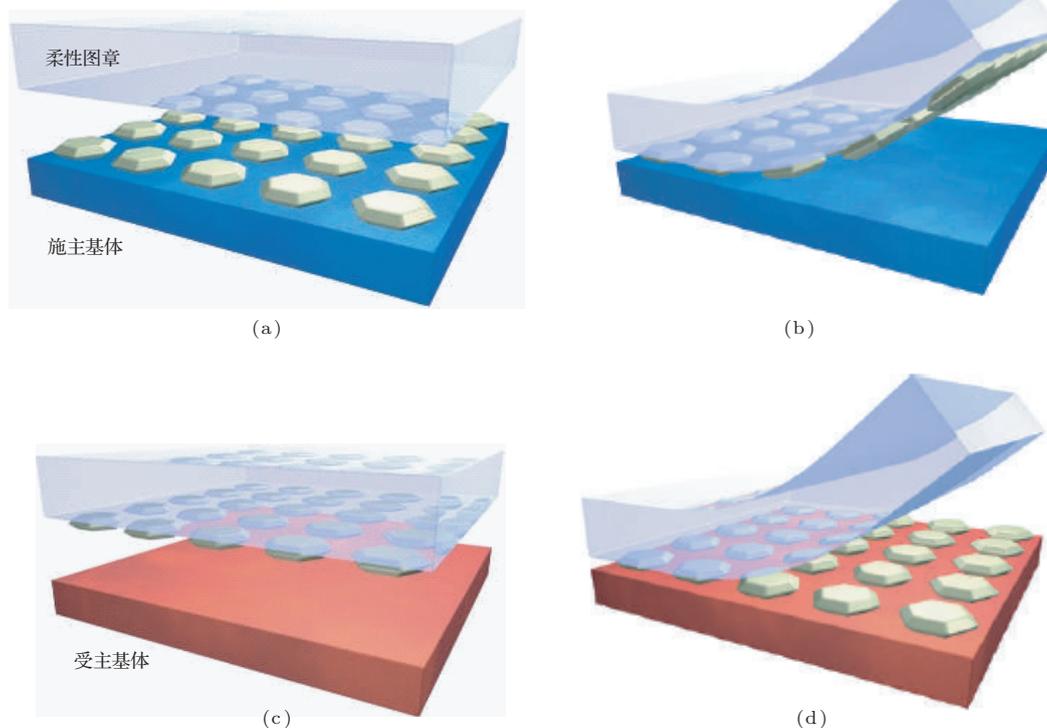


图 11 转印过程示意图 [36]

### 3.2 转印技术的控制机理

转印技术的操作过程简单, 但其中涉及的物理、力学原理是比较复杂的, 例如微结构的形状、尺寸、分布, 基底的表面粗糙度、化学性质、界面缺陷, 以及温度等因素都可能影响到转印的质量. 转印过程中的撕起速度是控制整个流程的一个关键因素, 决定着转印过程的成功率.

转印过程中, 柔性图章与微结构紧密接触, 其

1) 在施主基体上制备好完全成形的、有序的微结构集合. 制备过程采用传统的微加工技术, 例如减加工工艺、添加工艺、自组装或者其他的方法.

2) 将柔性图章和需要转印的微结构集合的表面按照预定要求进行处理, 然后将柔性图章紧密贴合在微结构集合表面上, 以足够大的速度将柔性图章从施主基体上撕起, 保证柔性图章与微结构集合之间的黏结力足够大, 使微结构集合能够跟随柔性图章一起被撕起.

3) 将黏有微结构集合的柔性图章与经过处理的受主基体表面紧密贴合, 按压一定时间, 使硅表面与受主基体表面形成黏结力.

4) 以缓慢的速度将柔性图章撕起, 保证需要转印的微结构留在受主基体上.

界面的黏结力主要由范德华力控制 [53,54], 由于柔性图章的黏弹性效应, 图章与微结构之间的黏结力是率相关的, 因此可以通过调节速度实现微结构从施主基体转移到受主基体 [36,55].

图 12 表示了由图章、薄膜、基体组成的简单转印系统 [55], 此系统涉及两个界面: 图章/薄膜界面和薄膜/基体界面. 在不同的分离速度下, 两个界面发生分离所对应的临界能量释放率的相对大小会

发生变化, 形成“竞争断裂”, 这两种界面的竞争断裂是实现转印过程的基本原理. 当薄膜/基底之间的临界能量释放率小于图章/薄膜之间的临界能量释放率时, 薄膜/基底界面更容易发生断裂, 薄膜随同柔性图章一起被撕起, 称为撕起 (pick-up); 反之, 图章/薄膜基底界面更容易发生断裂, 薄膜保留在基底上, 称为印制 (printing).

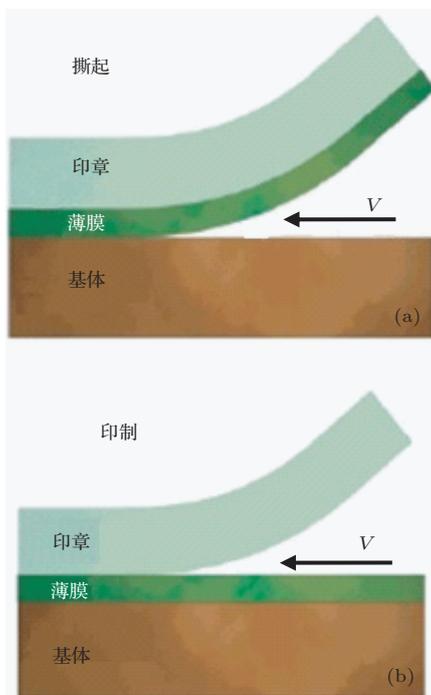


图 12 转印两个过程示意图 (a) 转移; (b) 印制<sup>[55]</sup>

Meitl 等<sup>[36]</sup>指出图章与薄膜之间的临界能量释放率是剥离速度的增函数, 而薄膜与基底之间的能量释放率与剥离速度无关. Feng 等<sup>[55]</sup>通过采用如下幂指数形式的图章/薄膜临界能量释放率, 首次定量研究了速度控制机理下的转印技术的基本原理:

$$G_{crit}^{stamp/film}(v) = G_0 \left[ 1 + \left( \frac{v}{v_0} \right)^n \right], \quad (13)$$

其中,  $G_{crit}^{stamp/film}(v)$  为称为本征能量释放率,  $G_0$  表示剥离速度趋于零时的临界能量释放率.  $v$  称为参考剥离速度,  $v_0$  表示临界能量释放率为本征能量释放率两倍时的剥离速度,  $n$  为待定参数, 可以通过实验数据拟合得到.

在幂指数形式的图章/薄膜临界能量释放率假设下, 可以得到如图 13 所示的结果. 转印过程中, 存在临界剥离速度  $v_c$  (曲线与中间水平线的交点), 当  $v < v_c$  时,  $G_{crit}^{stamp/film}(v) < G_{crit}^{film/substrate}$ , 图章与薄膜界面断裂, 实现印制 (Printing) 过程; 当

$v > v_c$  时,  $G_{crit}^{stamp/film}(v) > G_{crit}^{film/substrate}$ , 薄膜与基底界面断裂, 实现撕起 (Pick-up) 过程. 另外, 对于非常弱的薄膜/基底界面 (如图 13 底部的水平线所示), 无论剥离速度为多大,  $G_{crit}^{stamp/film}$  总是大于  $G_{crit}^{film/substrate}$ , 薄膜只会被撕起, 而不能实现印制; 相反, 对于非常强的薄膜/基底界面, (如图 13 顶部的水平线所示), 在实验能达到的剥离速度范围内,  $G_{crit}^{stamp/film}$  总是小于  $G_{crit}^{film/substrate}$ , 薄膜不能被撕起. 在这两种情况下, 转印过程不能通过动力控制实现.

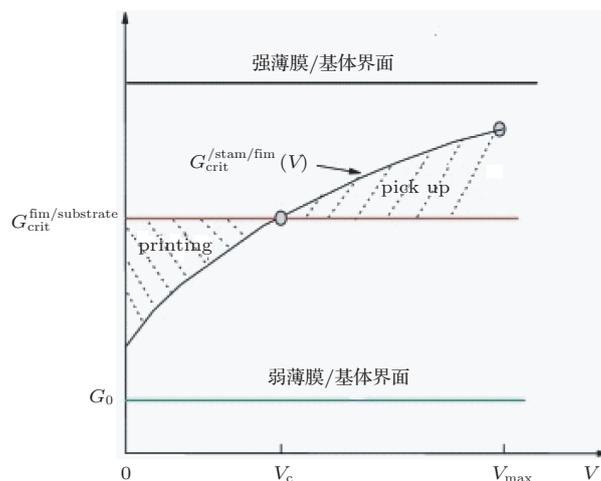


图 13 能量释放率与撕起速度之间的关系曲线<sup>[55]</sup>

### 3.3 界面强度的调控机理

从以上分析可以看出, 用于集成柔性电子器件系统的转印技术, 其核心在于图章与无机电子器件间界面黏附强度的控制.

剥离实验 (peeling test) 是确定界面强度最简单、最有效、应用最为广泛的方式之一. 一般地, 我们可以通过能量平衡关系导出剥离力和界面能量释放率的关系. 对于弹性问题, 自从 Spies<sup>[56]</sup> 首先对剥离过程的力学机理进行了系统的研究以来, 许多科研者都在此方面不断尝试新的理论以提高对真实力学机理描述的准确性<sup>[57-64]</sup>. 对于弹性变形我们可以直接建立起剥离力和界面强度的关系. 但是对于出现了塑性变形的例子, 我们需要考虑附加的黏性耗散和界面形成过程中的残余应变能. Chang 等<sup>[65]</sup>, Chen 和 Flavin<sup>[66]</sup> 以及 Gent 和 Hame<sup>[67]</sup> 都对弹塑性剥离问题进行了分析, Corcombe 和 Adams<sup>[68,69]</sup> 等通过有限元模型计算了弹塑性剥离问题中界面尖端的应力分布, Atkins 和 Mai<sup>[70]</sup> 则强调了残余应变能在剥离过程中的重要

影响, 1990 年 Loukis 和 Aravas<sup>[71]</sup> 给出了弹塑性剥离和黏弹性剥离的轴向不可压缩近似. 但是, 他们都没有精确地求得黏弹性界面的能量释放率.

Chen 等<sup>[72]</sup> 采用了稳态剥离假设, 忽略了剪力对黏弹性梁的变形带来的影响, 建立了黏弹性梁的平衡方程. 根据剥离臂的力矩平衡建立起了力矩和转角的微分关系. 另一方面, 通过材料的本构关系, 并且在计算中通过忽略了弯矩集中处的轴向应变对微元沿弧长方向移动速度的影响, 建立起了力矩关于转角的表达式, 并将其代入上述微分方程, 求解出转角沿弧长的数值解. 通过一系列数值计算以及能量平衡, 最终建立起了基于实验测定剥离臂初始转角和剥离速度确定材料与弹性块状物体间能量释放率的理论方法. 在小应变情况下, 证明了在 90° 剥离试验中  $G = F/b$  仍然近似成立.

另一方面, 学者们也从界面设计的角度提出许多界面强度控制的方法和理论<sup>[73-81]</sup>. 一种最常用的策略就是界面化学性质的设计, 即用某些特定涂层对界面进行化学改性以增强界面的断裂强度<sup>[82,83]</sup>, 但是这种方法对构成界面物质的化学性质依赖极强, 因此也存在很大的局限性. 例如在转印过程中, 我们不能对微电子结构表面进行涂层处理, 而 PDMS 图章表面经过涂层处理后又会对黏弹性性质产生影响, 以致对整个剥离过程的控制产生负面的作用. 而近年来许多学者受生物力学的启发, 提出了通过设计界面微结构设计的理论来控制界面的强度的理论. Arzt 等<sup>[81]</sup> 通过 JKR 理论对微接触调控界面黏附力进行了系统的分析. 而 Persson 和 Gorb<sup>[75,76]</sup> 通过研究表明, 纤维状界面结构更有利于使界面形成紧密接触, 提高界面强度. 学者们也进行了大量的实验来研究纤维状结构是如何增强界面强度的. 例如, Ghatak 等<sup>[77]</sup> 对具有刀口图样的 PDMS 弹性层和柔性板件的黏性性能进行了研究, 作者在文中提到在上述基体上的复合型裂纹的停滞和扩展将在软弹性体的断裂时导致附加的弹性能耗散. 如果采用具有图案的长度尺寸足够小 (通常小于弹性体内应力的衰减长度) 的二维纹理的表面, 我们能够观察到界面断裂强度有很大的增强. 同时, Poulard 等<sup>[74]</sup> 通过对圆柱形图案对黏性的调控进行了系统的研究中指出由于纤维状结构比光滑的块状材料变形能力更强, 因此容易形成更紧密的界面, 另一方面, 能量耗散机制的不同也将导致纤维状界面的强度有所增加.

Chen 等<sup>[72]</sup> 通过能量分析发现, 图案 (如图 14 所示) 对界面强度的影响是由于图案在剥离

过程中会与另一表面产生附加的黏性力作用, 使得图案本身及它周围衬底发生变形, 以增大剥离时需要的能量; 另一方面, 图案的存在会改变界面的实际接触面积, 从而改变界面的宏观强度. 最终基于光滑界面的能量释放率得到带小圆柱图案界面的能量释放率 (如图 15 所示)

$$G_{\text{pattern}} = \begin{cases} G \frac{9.42h_{\text{pillar}} + 15.1R}{A} R, & \lambda < 0.864, \\ G \frac{9.42h_{\text{pillar}} + 15.1R}{A} R + \frac{a - 2R}{a} \left[ G\bar{c}(\lambda) - \gamma \frac{\bar{U}(\lambda)}{\lambda} \right], & \lambda > 0.864, \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $G$  是光滑界面的能量释放率,  $R$  为图案圆柱半径,  $A$  为每个图案圆柱对应的基底面积,  $a$  为相邻圆柱的最大距离,  $\bar{c}(\lambda)$  和  $\bar{U}(\lambda)$  是有关  $\lambda$  的无量纲函数 (如图 16 所示)

$$\lambda = \frac{\gamma a}{E(\infty) h_{\text{pillar}}^2} \frac{a}{a - 2R} \times \ln \left[ \left( \frac{\pi a - 2R}{2a} \right) \right], \quad (15)$$

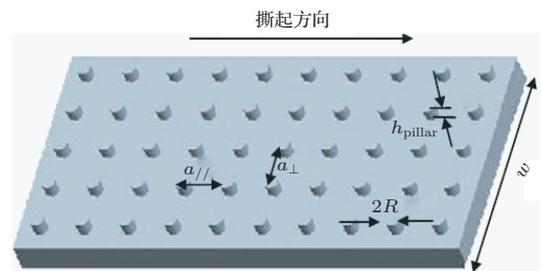


图 14 带小圆柱图案界面的示意图<sup>[72]</sup>

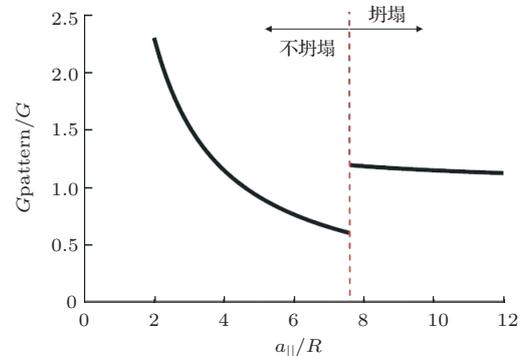


图 15 无量纲化后能量释放率随着界面图案间距的变化<sup>[72]</sup>

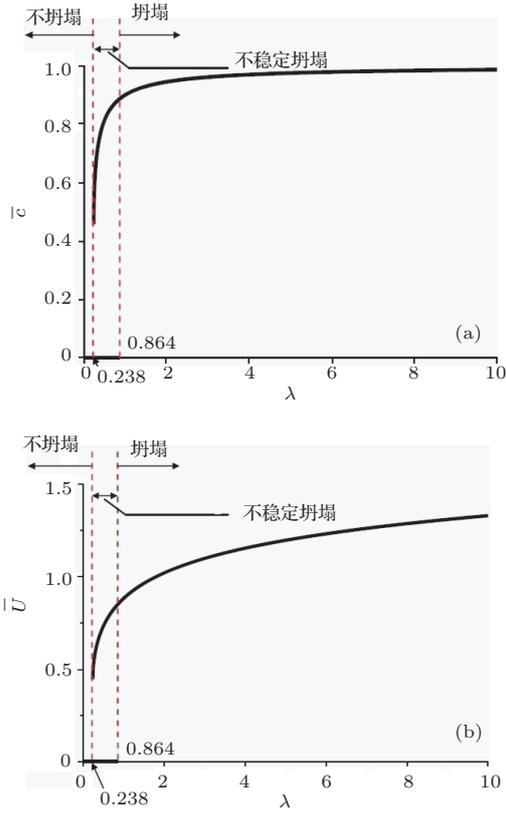


图 16  $\bar{c}(\lambda)$  与  $\bar{U}(\lambda)$  的数值解 (a)  $\bar{c}(\lambda)$ ; (b)  $\bar{U}(\lambda)$  [72]

通过有效的图案设计, 能够按照需求很好的实现增加和降低界面强度, 从而实现通过图案对转印过程进行定量的调控 [72].

## 4 可延展柔性无机电子器件的物理学性能及失效机理

### 4.1 力学性能评估

柔性电子器件与传统的电子器件相比, 优势就在于能够适应更大的变形. 器件的变形和应力分析是器件设计和性能评估的重要内容. 针对单晶硅条黏接在 PDMS 基底表面形成屈曲结构的柔性可延展器件, Jiang [31] 和 Song [34] 等做了大量关于屈曲和后屈曲的理论分析, 屈曲薄膜的最大应变

$$\epsilon_{\text{peak}} \approx 2\sqrt{\epsilon_{\text{pre}}\epsilon_c} \frac{(1+\xi)^{1/3}}{\sqrt{1+\epsilon_{\text{pre}}}}, \quad (16)$$

$$\epsilon_{\text{peak}} \approx 2\sqrt{(\epsilon_{\text{pre}} - \epsilon_{\text{applied}})\epsilon_c} \times \frac{(1+\epsilon_{\text{applied}} + \zeta)^{1/3}}{\sqrt{1+\epsilon_{\text{pre}}}}, \quad (17)$$

其中,  $\epsilon_{\text{pre}}$  为制备器件时施加的预拉伸应变,  $\epsilon_{\text{applied}}$  为在结构形成屈曲后所施加的整体应变,

$$\xi = \frac{5}{32}\epsilon_{\text{pre}}(1+\epsilon_{\text{pre}}),$$

$$\zeta = \frac{5(\epsilon_{\text{pre}} - \epsilon_{\text{applied}})(1 + \epsilon_{\text{pre}})}{32}.$$

硅本身的断裂应变是 1.8%, 针对 100 nm 的硅黏接在 PDMS 表面的屈曲结构, 可以承受的最大预应变可以达到 29%, 如图 17 所示.

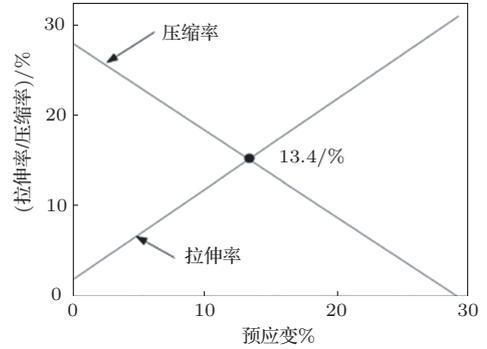


图 17 拉伸/压缩应变与预应变的关系 [34]

对于单拱屈曲网状互连结构, Kim 等 [37] 通过有限元分析器件的应变分布, 如图 18 示, 对器件进行拉伸、扭转测试, 观察到器件完好. 通过理论分析, 得出器件的最大预应变

$$(\epsilon_{\text{pre}})_{\text{max}} = \frac{L_{\text{bridge}}^0}{L_{\text{island}}^0 + L_{\text{bridge}}^0} \times \left( \frac{L_{\text{bridge}}^0 \epsilon_{\text{fracture}}}{2\pi h_{\text{bridge}}} \right)^2. \quad (18)$$

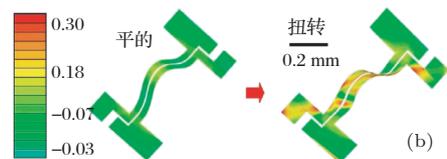
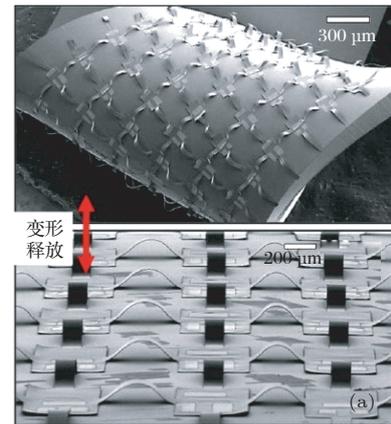


图 18 直互连线网状器件 (a) 器件 SEM 图; (b) 器件扭转应力分布 (FEM) [37]

### 4.2 电子学性能测试

有机材料比无机半导体具有更好的韧性和延展性, 但其电学特性、电子学效率却比无机材料差

很多. 通过巧妙的结构设计制备得到的可延展无机电子器件, 既保留无机半导体的高效特性又能适应大的变形. 电子学性能是柔性化设计是否成功的关键.

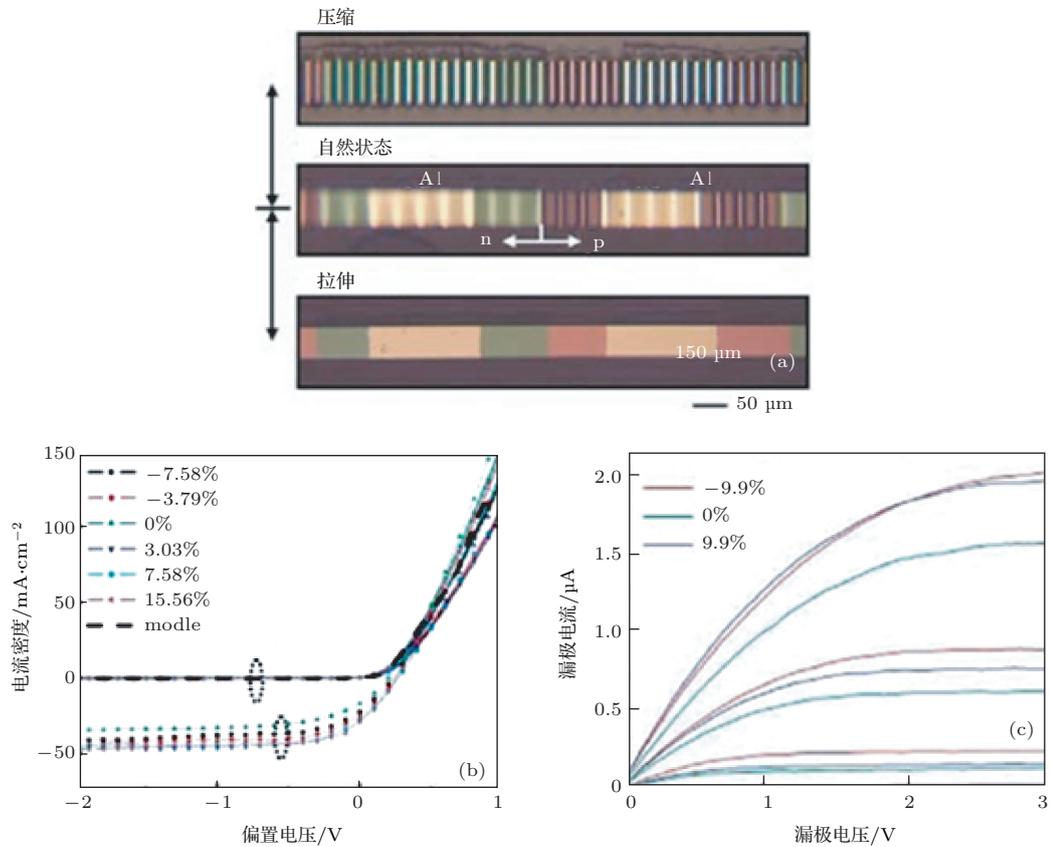


图 19 柔性硅二极管 (a) 柔性单晶硅二极管在拉伸和压缩应变下的显微镜照片; (b) 不同应变下柔性单晶硅二极管的  $I$ - $V$  曲线; (c) 门电压从 0 变化到  $-5$  V, 柔性硅晶体管的  $I$ - $V$  特性 [2]

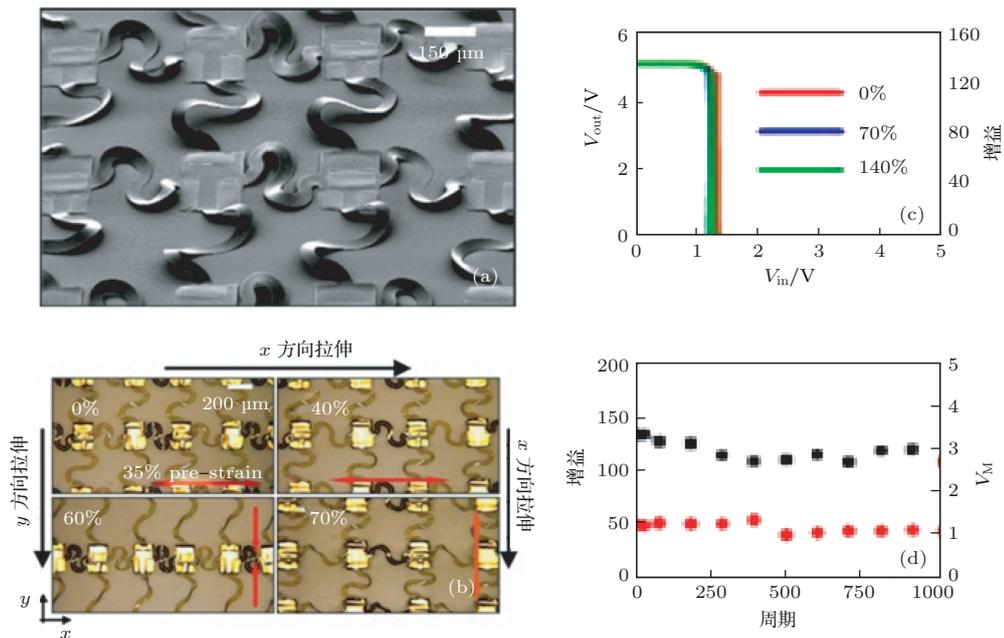


图 20 CMOS 反向器 (a) 蛇形互连网状器件 SEM 图; (b) 不同拉伸应变下器件光学显微照片; (c), (d) 不同拉伸应变和循环加载下器件的电学特性 [37]

Khang 等<sup>[2]</sup>在 Science 上所报道的制备在 PDMS 上的屈曲状硅单晶器件. 如图 19(b) 所示, 在不同的应变作用下二级管的  $I-V$  曲线没有大的改变; 图 19(c) 所展示的在 0 到  $-5$  V 的栅极电压下, 屈曲单晶硅晶体管与生长在硅基片上的晶体管的伏安特性没有大的改变. 由这两种典型的电子器件说明屈曲柔性无机电子的电学性能几乎不受影响.

Kim 等<sup>[37]</sup>设计由蛇形翘曲互连金属连接阵列器件的网状结构, 并通过晶体管阵列、CMOS 反向器、环状振荡器和差分放大器的电学性能测试, 说明了这是一种实现高效柔性电子器件的好途径. 图 20 展示了 CMOS 反向器的测试结果. 图 20(a) 为该互连结构 SEM 图, 图 20(b) 展示了预应变为 35% 的器件分别在横向拉伸 40%、纵向拉伸 60% 和 70% 时的器件表面的变形状况; 图 20(c) 展示了拉伸应变 70% 和 140% 时反向器的转换特性和增益值, 图 20(d) 展示了在循环加载过程反向器的增益和栅极电压的变化. 从测试结果来看, 在大的应变下 (大于 100%) 器件在超过 1000 次的循环加载后仍然保持优异的电学性能.

### 4.3 界面失效

将硅基半导体与具有柔性的基体结合能够使得结构具有可弯曲与可延展性, 同时也具有很好的电学性能, 并能在产生巨大经济、社会价值的同时, 也有效利用现有电子制备工艺与设备. 但柔性电子

器件有其特点: 1) 结构上, 膜厚度相对很小, 几乎可以忽略; 2) 材料性能上, 基体为柔性材料, 弹性模量相比硅薄膜非常小, 因而薄膜与基体之间形成的这种软界面将使结构的破坏具有新的特点.

Park 等<sup>[84]</sup>通过压曲实验对这种具有平直界面的结构进行观察, 实验过程中固定基底一端, 压缩基底的另一端, 使基底发生向上的失稳, 直到薄膜与基底之间发生失效. 实验结果表明在薄膜/柔性基体结构中, 当固定基体厚度不变时, 随着薄膜厚度的变化, 结构的破坏模式也将发生变化 (如图 21 所示).

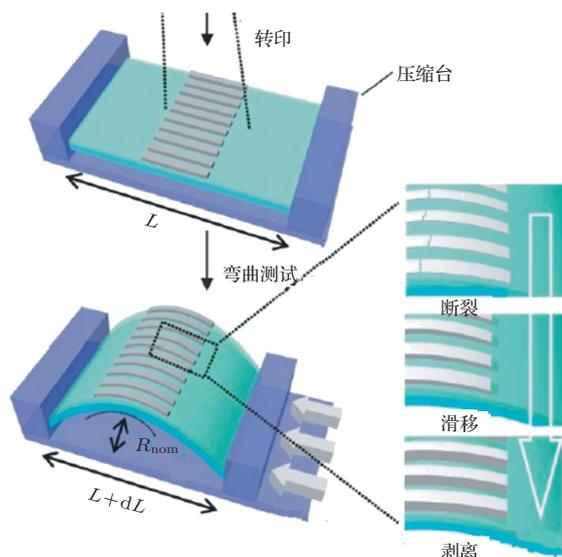


图 21 压曲实验及破坏模式演变示意图<sup>[84]</sup>

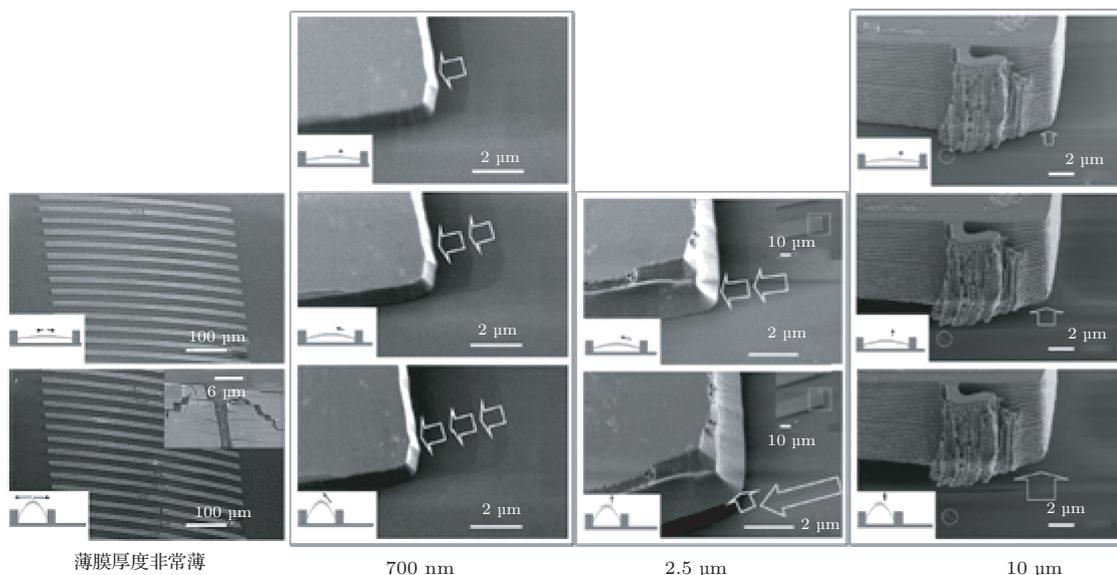


图 22 薄膜/基底柔性结构破坏的电镜观察图片<sup>[84]</sup>

图 22 中给出了几种典型薄膜厚度时的实验观察的电镜照片. 当薄膜非常薄时, 随着外载的不断增大薄膜中会出现裂纹, 最终导致薄膜断裂. 当薄膜厚度增大一些并处于一定范围内时, 结构的破坏模式将会改变为界面上发生滑移, 导致薄膜中出现一段滑移区. 当薄膜厚度进一步增大到一定值之后, 结构界面上的破坏模式将由滑移变为分层, 并随着外载不断增大而扩展, 最终导致薄膜从基体上脱离. 在破坏模式从滑移向分层过渡时, 还会在滑移区内出现分层的情况.

采用弹性本构的理论进行描述, 将上层薄膜、和基底描述为梁模型, 中间胶层描述为剪力滞后模型得到了界面的最大应力与硅膜厚度的关系, 得到了薄膜-基底结构界面失效模式随薄膜厚度的变化趋势, 如图 23 所示.

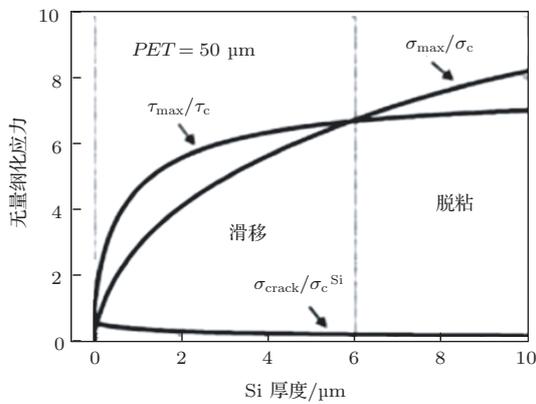


图 23 Si 薄膜厚度与应力的关系 [84]

在 Park 等 [84] 的试验中, 发现了薄膜/柔性基底结构中当薄膜厚度相比于基底处于某一范围时, 结构经常会发生界面滑移现象, 并且随着外载的增大, 滑移区域也将逐渐扩大. 当薄膜厚度比处于某个范围时, 随着外载的不断增大, 滑移区内将会出现分层现象. 这表明尽管出现了滑移破坏, 当即使是在滑移区内结构仍然具有抵抗分层破坏的能力. 说明就这种软界面而言, 滑移的物理机制与分层是截然不同的, 不能用宏观尺度下的 II 型裂纹来解释, 需要建立新的力学模型对这种软界面滑移破坏问题加以描述. Dai 等 [85] 采用断裂力学的分析方法, 建立了具有抵抗分层破坏能力的滑移模型 (如图 24 所示), 得到能量释放率的解析解.

戴结合有限元模拟及 Gauss 积分得到不同薄膜厚度情况下, 界面滑移裂纹扩展时的裂尖附近的应力状态, 从而经数值计算得到裂纹尖端的相位角, 进而求出裂尖的应力强度因子, 并与相应的断

裂韧性进行比较, 从而在已知薄膜厚度情况下得到相应的临界外载, 如图 25 所示. 由图可以看出, 薄膜厚度越小结构所能承受的临界曲率半径越小, 表明薄膜厚度越小结构的可弯曲能力越强.

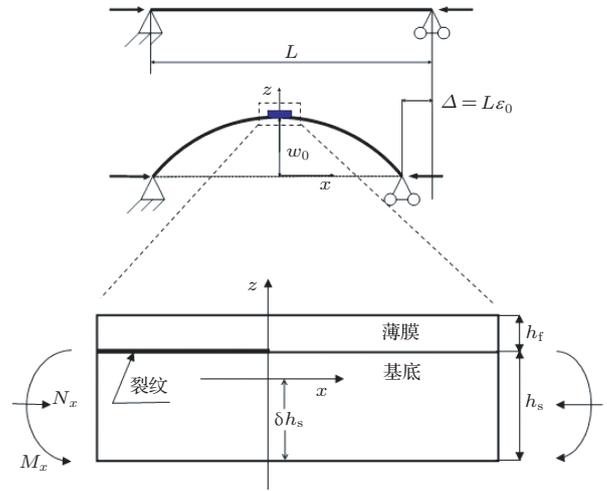


图 24 柔性电子器件界面失效模型 [85]

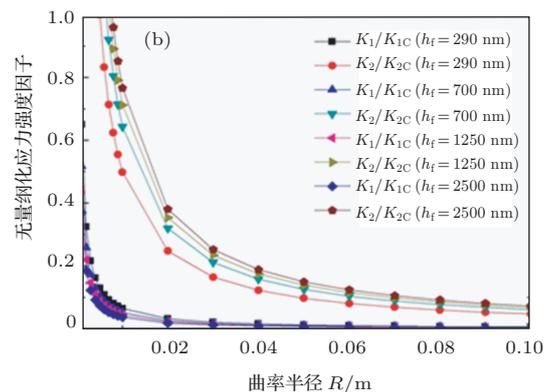
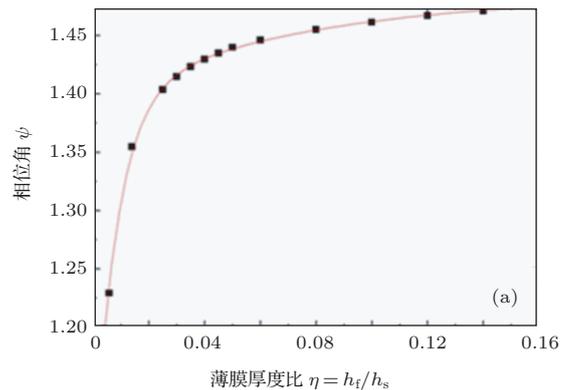


图 25 (a) 有限元模拟得到的不同薄膜厚度情况下的裂尖相位角; (b) 几种薄膜厚度时的裂尖应力强度因子随曲率半径的变化曲线 [85]

结合 Dai 等的理论推导, Huang 等 [86] 发展了测量界面断裂滑移韧性的方法, 并进一步定量表征了界滑移失效后进一步抵抗界面分层能力, 图 26

蓝色线条给出了能量释放率随着外加应变增长的变化趋势。

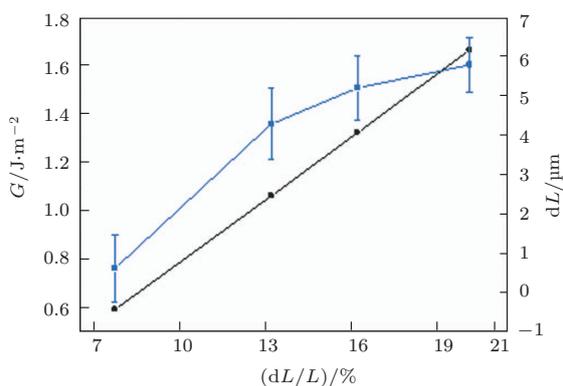


图 26 能量释放率随着外加应变的增加的变化趋势 [86]

## 5 未来应用及展望

伴随着社会信息化的加速, 人与信息的有机融合是未来的发展趋势, 而作为信息载体的各种微电子器件一旦实现柔性化, 必将从本质上促进人与信息的高效交互, 另一方面信息量及其处理也必然要求电子器件高速化、智能化. 因此, 同时具备高速与柔性的无机柔性电子器件在人机融合过程中起到至关重要的作用.

在当前情况下, 柔性电子器件最有可能实现在医疗器件领域的突破. 随着集成电路技术和生物医学的不断创新与进步, 威胁老龄化人口和亚健康人群的心血管疾病、糖尿病及神经系统疾病的治疗越来越依赖于植入式医疗电子器件, 从植入式心脏起搏器、植入式心房除颤器, 到用于帕金森病、癫痫、老年痴呆等神经系统疾病治疗的植入式脑起搏器及电极等, 这为治疗心脑血管系统疾病及人类健康做出了重要贡献. 随着医疗水平的提高, 这些植入式医疗器件与相应组织器官的结合度越来越高, 这就需要医疗电子器件具有柔性, 使其更贴近、更适合柔性组织器官的结构. 另外, 人们的医疗模式已经逐渐从以诊断为主转变为以预防为主; 从疾病的治疗和管理转变为疾病的预防和健康的管理; 从住院方式治疗疾病转变为日常保健预防疾病. 通过这种医疗模式的转变, 人们需要可穿戴的柔性电子器件随时随地、连续动态地检测自己的身体状况, 并从专家那里得到相应的指导与帮助. 这种需求又进一步推动了柔性、可植入式医疗电子器件的发展, 如贴于心脏表面的无线心脏监护仪、实时脑血管监测仪、实时血压监测仪、远程生命监护仪、植入性神经信

息检测仪等. 这些柔性的医疗电子传感器可以与人体或人体器官集成, 进而节约医疗成本和发挥更好的疗效, 甚至及时预知疾病.

无机柔性电子器件由于其同时具备高速与适应非曲面环境的能力, 极大拓展了传统无机电子器件的功能和应用, 是电子器件发展的革新性方向之一.

## 参考文献

- [1] Briseno A L, Tseng R J, Ling M M, Falcao E H L, Yang Y, Wudl F, Bao Z 2006 *Adv. Mater.* **18** 2320
- [2] Khang D Y, Jiang H Q, Huang Y, Rogers J A 2006 *Science* **311** 208
- [3] Reuss R H, Chalamala B R, Moussessian A, Kane M G, Kumar A, Zhang D C, Rogers J A, Hatalis M, Temple D, Moddel G, Eliasson B J, Estes M J, Kunze J, Handy E S, Harmon E S, Salzman D B, Woodall J M, Ashraf Alan M, Murthy J Y, Jacobsen S C, Olivier M, Markus D, Campbell P M, Snow E 2005 *IEEE* **93** 1239
- [4] <http://www.stella-project.de/>
- [5] <http://www.usdc.org/>
- [6] Crone B, Dodabalapur A, Lin Y Y, Filas R W, Bao Z, LaDuca A, Sarpeshkar R, Katz H E, Li W 2000 *Nature* **403** 521
- [7] Forrest S R 2004 *Nature* **428** 911
- [8] McAlpine M C, Ahmad H, Wang D, Heath J R 2007 *Nat. Mater.* **6** 379
- [9] Baca A J, Ahn J H, Sun Y G, Meitl M A, Menard E, Kim H S, Choi W M, Kim D H, Huang Y, Rogers J A 2008 *Angew. Chem. Int. Ed.* **47** 5524
- [10] Sekitani T, Noguchi Y, Hata K, Fukushima T, Aida T, Someya T 2008 *Science* **321** 1468
- [11] Sekitani T, Nakajima H, Maeda H, Fukushima T, Aida T, Hata K, Someya T 2009 *Nat. Mater.* **8** 494
- [12] Guter W, Schone J, Philipps S P, Steiner M, Siefer G, Wekkeli A, Welser E, Oliva E, Bett A W, Dimroth F 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 223504
- [13] Nicholson P G, Castro F A 2010 *Nanotechnology* **21** 492001
- [14] Park S, Xiong Y, Kim R H, Elvikis P, Meitl M, Kim D H, Wu J, Yoon J, Yu C J, Liu Z, Huang Y, Hwang K C, Ferreira P, Li X L, Choquette K, Rogers J A 2009 *Science* **325** 977
- [15] Kim H S, Brueckner E, Song J, Li Y H, Kim S, Lu C F, Sulkin J, Choquette K, Huang Y H, Nuzzo R G, Rogers J A 2011 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **108** 10072
- [16] Chen G, Craven M, Kim A, Munkholm A, Watanabe S, Camras M, G?tz W, Steranka F 2008 *Phys. Status. Solidi. A* **205** 1086
- [17] Kim S O, Lee K H, Kim G Y, Seo J H, Kim Y K, Yoon S S 2010 *Synth. Met.* **160** 1259
- [18] Kim D H, Ahn J H, Choi W M, Kim H S, Kim T H, Song J, Huang Y, Liu Z, Lu C, Rogers J A 2008 *Science* **320** 507

- [19] Ko H C, Stoykovich M P, Song J, Malyarchuk V, Choi W M, Yu C J, Geddes J B III, Xiao J, Wang S, Huang Y, Rogers J A 2008 *Nature* **454** 748
- [20] Kim D H, Viventi J, Amsden J J, Xiao J, Vigeland L, Kim Y S, Blanco J A, Panilaitis B, Frechette E S, Contreras D, Kaplan D L, Omenetto F G, Huang Y, Hwang K C, Zakin M R, Litt B, Rogers J A 2010 *Nat. Mater.* **9** 511
- [21] Yeo W H, Kim Y S, Lee J, Ameen A, Shi L, Li M, Wang S, Ma R, Jin S H, Kang Z, Huang Y, Rogers J A 2013 *Adv. Mater.* **25** 2773
- [22] Kim D H, Lu N, Ma R, Kim Y S, Kim R H, Wang S, Wu J, Won S M, Tao H, Islam A, Yu K J, Kim T, Chowdhury R, Ying M, Xu L Z, Li M, Chung H J, Keum H, McCormick M, Liu P, Zhang Y W, Omenetto F G, Huang Y, Coleman T, Rogers J A 2011 *Science* **333** 838
- [23] Kim D H, Lu N, Ghaffari R, Kim Y S, Lee S P, Xu L Z, Wu J, Kim R H, Song J, Liu Z, Viventi J, Graff B D, Elolampi B, Mansour M, Slepian M J, Huang S, Moss J D, Won S M, Huang Y, Litt B, Rogers J A 2011 *Nat. Mater.* **10** 316
- [24] Xu S, Zhang Y H, Cho J, Lee J, Huang X, Jia L, Fan J A, Su Y, Su J, Zhang H, Cheng H, Lu B, Yu C J, Chuang C, Kim T, Song T, Shigetani K, Kang S, Dagdeviren C, Petrov I, Braun P V, Huang Y, Paik U, Rogers J A 2013 *Nat. Commun.* **2553** 1
- [25] Chen X, Hutchinson J W 2004 *J. Appl. Mech.* **71** 597
- [26] Huang Z Y, Hong W, Suo Z 2005 *J. Mech. Phys. Solids* **53** 101
- [27] Li C R, Cao Z X, Chen X 2008 *Physics* **37** 215 (in Chinese) [李超荣, 曹则贤, 陈曦 2008 物理 **37** 215]
- [28] Zhang H W, Hong L, Wang J B 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1506 (in Chinese) [张洪武, 王磊, 王晋宝 2007 物理学报 **56** 1506]
- [29] Liu P S 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** (in Chinese) [刘培生 2010 物理学报 **59** 8801]
- [30] <http://www2.technologyreview.com/tr10/?year=2006>
- [31] Jiang H, Khang D Y, Song J, Sun Y, Huang Y, Rogers J A 2007 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **104** 15607
- [32] Jiang H, Sun Y, Rogers J A, Huang Y 2008 *Int. J. Solids Struct.* **45** 2014
- [33] Song J, Jiang H, Choi W M, Khang D Y, Huang Y, Rogers J A 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 014303
- [34] Song J, Jiang H, Liu Z, Khang D Y, Huang Y, Rogers J A, Lu C, Koh C G 2008 *Int. J. Solids Struct.* **45** 3107
- [35] Song J, Jiang H, Huang Y, Rogers J A 2009 *J. Vac. Sci. Technol. A* **27** 1109
- [36] Meitl M A, Zhu Z T, Kumar V, Lee K J, Feng X, Huang Y, Adesida I, Nuzzo R G, Rogers J A 2006 *Nat. Mater.* **5** 33
- [37] Kim D H, Song J, Choi W M, Kim H S, Kim R H, Liu Z, Huang Y, Hwang K C, Zhang Y W, Rogers J A 2008 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **105** 18675
- [38] Yoon J, Baca A J, Park S, Paulius E, Geddes J B III, Li L, Kim R H, Xiao J, Wang S, Kim T H, Motala M J, Ahn B Y, Duoss E B, Lewis J A, Nuzzo R G, Ferreira P M, Huang Y, Rockett A, Rogers J A 2008 *Nat. Mater.* **7** 907
- [39] Kim D H, Kim Y S, Wu J, Liu Z, Song J, Kim H S, Huang Y, Hwang K C, Rogers J A 2009 *Adv. Mater.* **21** 3703
- [40] Wagner S, Lacour S P, Hsu P H I, Sturm J C, Suo Z G 2003 *61st Device Research Conf. Digest, IEEE* 195
- [41] Lacour S P, Huang Z Y, Suo Z G, Wagner S 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 2404
- [42] Jones J, Lacour S P, Wagner S, Suo Z G 2004 *J. Vac. Sci. Technol. A* **22** 1723
- [43] Lacour S P, Jones J, Wagner S, Li T, Suo Z G 2005 *P. IEEE* **93** 1459
- [44] Ko H C, Shin G, Wang S, Stoykovich M P, Lee J W, Kim D H, Ha J S, Huang Y, Hwang K C, Rogers J A 2009 *Small* **5** 2703
- [45] Kim D H, Xiao J, Song J, Huang Y, Rogers J A 2010 *Adv. Mater.* **22** 2108
- [46] Su Y, Wu J, Fan Z, Hwang K. C, Song J, Huang Y, Rogers J A 2012 *J. Mech. Phys. Solids* **60** 487
- [47] Song J, Huang Y, Xiao J, Wang S, Hwang K C, Ko H C, Kim D H, Stoykovich M P, Rogers J A 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 123516
- [48] Lee J, Wu J, Shi M, Yoon J, Park S, Li M, Liu Z, Huang Y, Rogers J A 2011 *Adv. Mater.* **23** 986
- [49] Lee J, Wu J, Ryu J H, Liu Z, Meitl M, Zhang Y W, Huang Y, Rogers J A 2012 *Small* **8** 1851
- [50] Menard E, Lee K J, Khang D Y, Nuzzo R G, Rogers J A 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 5398
- [51] Ahn J H, Kim H S, Lee K J, Jeon S, Kang S J, Sun Y, Nuzzo R G, Rogers J A 2006 *Science* **314** 1754
- [52] Baca A J, Ahn J H, Sun Y, Meitl M A, Menard E, Kim H S, Choi W M, Kim D H, Huang Y, Rogers J A 2008 *Angew. Chem. Int. Ed.* **47** 5524
- [53] Hsia K J, Huang Y, Menard E, Park J U, Zhou W, Rogers J A, Fulton J M 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 154106
- [54] Huang Y Y, Zhou W X, Hsia K J, Menard E, Park J U, Rogers J A, Alleyne A G 2005 *Langmuir* **21** 8058
- [55] Feng X, Meitl M A, Bowen A M, Huang Y, Nuzzo R G, Rogers J A 2007 *Langmuir* **23** 12555
- [56] Spies G J 1953 *Aircr. Eng. Aerosp. Technol.* **25** 64
- [57] Chang F S C 1960 *Trans. Soc. Rheol.* **4** 75
- [58] Yurenka S 1962 *J. Appl. Polym. Sci.* **61** 36
- [59] Nicholson D W 1977 *Int. J. Fracture.* **13** 279
- [60] Saubersre E B, Durney C J, Hajdu J, Bastenbeck E 1965 *Plating* **52** 982
- [61] Kaeble D H 1960 *Trans. Soc. Rheol.* **4** 45
- [62] Kaeble D H 1959 *Trans. Soc. Rheol.* **3** 161
- [63] Gent A N, Hamed G R 1975 *J. Adhes.* **7** 91
- [64] Gardon J L 1963 *J. Appl. Polym. Sci.* **7** 643
- [65] Chang M D, Devries K L, Williams M L 1972 *J. Adhes.* **4** 221
- [66] Chen W T, Flavin T F 1972 *IBM J. Res. Dev.* **16** 203
- [67] Gent A N, Hamed G R 1977 *J. Appl. Polym. Sci.* **21** 2817
- [68] Crocombe A D, Adams R D 1981 *J. Adhes.* **12** 127
- [69] Crocombe A D, Adams R D 1982 *J. Adhes.* **13** 41
- [70] Atkins A G, Mai Y W 1986 *Int. J. Fracture.* **30** 203
- [71] Loukis M J, Aravas N 1991 *J. Adhes.* **35** 7

- [72] Chen H, Feng X, Huang Y, Huang Y, Rogers J A 2013 *J. Mech. Phys. Solids* **61** 1737
- [73] Kim T W, Bhushan B 2008 *J. R. Soc. Interface* **5** 319
- [74] Poulard C, Restagno F, Weil R, Leger L 2011 *Soft Matter* **7** 2543
- [75] Persson B N J 2003 *J. Chem. Phys.* **118** 7614
- [76] Persson B N J, Gorb S 2003 *J. Chem. Phys.* **119** 11437
- [77] Ghatak A, Mahadevan L, Chung J Y, Chaudhury M K, Shenoy V 2004 *P. Roy. Soc. A-Math. Phys.* **460** 2725
- [78] Lamblet M, Verneuil E, Vilmin T, Buguin A, Silberzan P, Leger L 2007 *Langmuir* **23** 6966
- [79] Majumder A, Ghatak A, Sharma A 2007 *Science* **318** 258
- [80] Vajpayee S, Jagota A, Hui C Y 2010 *J. Adhes.* **86** 39
- [81] Arzt E, Gorb S, Spolenak R 2003 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **100** 10603
- [82] Kazayawoko M, Balatinez J J, Matuana L M 1999 *J. Mater. Sci.* **34** 6189
- [83] Gilbert M J, Awaja F, Kelly G L, Fox B L, Brynolf R, Pigram P J 2011 *Surf. Interface Anal.* **43** 856
- [84] Park S, Ahn J H, Feng X, Wang S, Huang Y, Rogers J A 2008 *Adv. Funct. Mater.* **18** 2673
- [85] Dai L C, Feng X, Liu B, Fang D N 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 221903
- [86] Huang Y, Feng X, Qu B R 2011 *Rev. Sci. Instrum.* **82** 104704

## REVIEW

# Review on stretchable and flexible inorganic electronics\*

Feng Xue<sup>1)2)†</sup> Lu Bing-Wei<sup>1)2)</sup> Wu Jian<sup>1)2)</sup> Lin Yuan<sup>3)‡</sup> Song Ji-Zhou<sup>4)</sup>  
 Song Guo-Feng<sup>5)</sup> Huang Yong-Gang<sup>6)</sup>

1) (AML, Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2) (Center for Mechanics and Materials, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

3) (State Key Laboratory of Electronic Thin films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

4) (Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Miami, Miami, Florida 33146, USA)

5) (Institute of Semiconductor, Chinese Academy of Science, Beijing 100083, China)

6) (Department of Civil and Environmental Engineering and Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, IL 60208, USA)

( Received 25 September 2013; revised manuscript received 22 October 2013 )

### Abstract

In order to meet the further demand of the next-generation electronic devices in the transplantable, lightweight and portable performances, flexible and stretchable inorganic electronics attract much more attention in both industry and academia in recent years. Compared to organic electronics, stretchable and flexible inorganic electronics are fabricated with the integrated structures of inorganic components on compliant substrates, which own the stretchability and flexibility via mechanical design. Thus stretchable and flexible inorganic electronics have the high electron mobility and excellent conformability to non-planar environment subjected to large deformation. This paper reviews the recent progress on principle, design based on mechanics, integration based on transfer printing and the reliability analysis of stretchable and flexible inorganic electronics. Finally, the prospective is also described for future application in bioengineering and medicine.

**Keywords:** stretchable and flexible electronics, inorganic semiconductor, buckling, adhesion

**PACS:** 42.82.Cr, 61.82.Fk, 62.20.mq, 68.35.Np

**DOI:** 10.7498/aps.63.014201

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11320101001, 10820101048, 11222220, 10902059, 11372272), and the National Laboratory of Information Science and Technology of Tsinghua University.

† Corresponding author. E-mail: [fengxue@tsinghua.edu.cn](mailto:fengxue@tsinghua.edu.cn)

‡ Corresponding author. E-mail: [linyuan@uestc.edu.cn](mailto:linyuan@uestc.edu.cn)