

“基底-立柱-岛体”型结构化基体的尺寸对柔性太阳能电池的影响

张义哲, 师明星

(西南交通大学力学与工程学院, 成都 610031)

摘要:将柔性太阳能电池基体的基底与岛体之间增加一个方形立柱来隔离基底的变形,使基体形成了“基底-立柱-岛体”的结构,此结构的尺寸对柔性太阳能电池的延展性有显著影响。应用有限元方法分析发现:(1)立柱的宽度对界面力和 GaAs 电池应变的影响特别显著,且立柱宽度小于 300 μm 时基底以上的结构因立柱失稳而倾斜;(2)立柱与岛体的厚度对界面力和 GaAs 电池应变的影响程度比立柱的宽度影响要小,基底高度的影响相比于立柱的宽度可以忽略不计;(3)保护膜厚度越大对 GaAs 电池和界面力的影响都会增大。研究成果为太阳能电池基体的优化设计提供了理论依据。

关键词:柔性电子;太阳能电池;结构化基体;方形立柱;有限元分析

中图分类号:TB115

文献标志码:A

引言

通过长达几十年的研究工作,无机材料(例如单晶硅和 GaAs)的可靠电学性能得到了研究者的广泛认可^[1-3]。柔性基体取代传统刚性基板,这一设计使得施加在整个电子器件上的大尺度变形基本上全部通过柔性基体的变形和交联导体的面外失稳或扭曲大变形消化掉,核心电子元器件相对而言变形很小^[4-6]。既克服了无机材料的低延展性,又充分发挥了它良好的电学性能。这种方法在电子眼相机、柔性无机 LED、电子皮肤^[7-10]等柔性器件中有所应用。从力学角度来说,这样的设计隔离了基体在拉伸变形时对脆性材料的影响。在网状平板结构柔性太阳能电池的设计中^[11],基体(substrate)为一个平板,连接 GaAs 电池的导线则向平板面外弯曲。而结构化基体是在平板结构基础上^[12],将平板基体上增加一个“岛体(island)”形成“基底(basement)-岛体”型结构化基体。在这个基体

中,岛体与岛体之间的槽(trench)吸纳了大部分的应变,连接 GaAs 电池的导线则向槽里弯曲,从而使岛体的表面变形减小,因此 GaAs 电池与基体的界面力也减小。在结构化基体设计基础之上,分别将“岛体”的四边挖去一个槽口(notch)^[13],这为导线向下弯曲提供了较大的伸展空间,这种设计在减小界面力的同时,也增加了 GaAs 电池的覆盖率。然而这两种方案分别在柔性性与电池覆盖率上有了一定的提高,但是当前的设计对变形的隔离效应有一定的局限性。因此,非常有必要对基体进行优化,使基体的表层部分几乎“感觉”不到整个基体的变形,从而提高结构化基体的变形隔离效应。

这里给出一种新的优化设计方案,同样是基于结构化基体设计基础之上,将基体上的岛体进行切割,使基体形成“基底-立柱(cube)-岛体”的形状。这里增加的方形立柱可以有效地隔离基底的变形,使岛体的顶部变形大大减小,从而达到增大柔性的目的。再

收稿日期:2016-03-25

基金项目:国家自然科学基金(11472229)

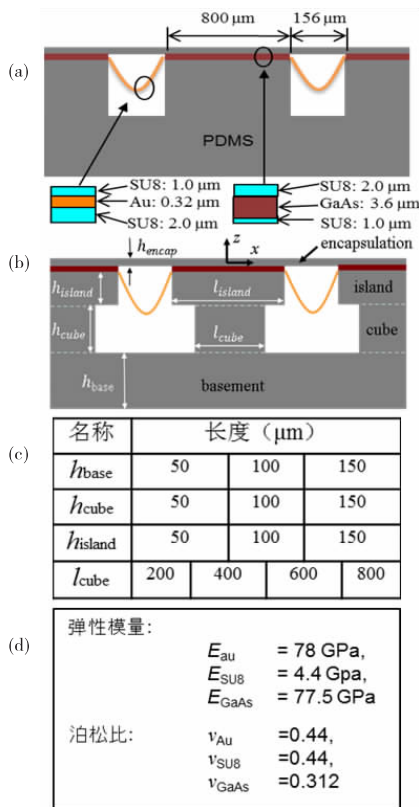
作者简介:张义哲(1991-),男,四川眉山人,硕士生,主要从事柔性太阳能电池器件的结构优化和疲劳分析方面的研究,(E-mail)yz_zhang1991@163.com;

师明星(1972-),男,山西朔州人,教授,博士,主要从事柔性电子器件和微纳材料方面的研究,(E-mail)shimingxing1972@163.com

通过有限元模拟的方法,分别讨论立柱的厚度、宽度,以及基底和岛体的厚度(宽度已经确定)对界面力与 GaAs 电池应变的影响。

1 有限元分析模型及分析过程

图 1(a)所示为结构化基体柔性太阳能电池的侧视图,改进后的模型如图 1(b)所示。这样基体总共分为三个部分,由下到上分别为基底(basement)、立柱(cube)和岛体(island)。其中岛体的宽度 $l_{island} = 800 \mu\text{m}$,相邻岛体间的距离为 $l_{trench} = 156 \mu\text{m}$ 。为了定性研究基底的厚度 h_{base} ,岛体的厚度 h_{island} ,以及立柱的宽度 l_{cube} 与厚度 h_{cube} 的大小对 GaAs 电池的影响,将这几个量的取值设定为如图 1(c)所示的值。材料以及属性如图 1(d)所示。



(a) 柔性太阳能电池结构化基体侧视图; (b) “基底-立柱-岛体”型基体侧视图; (c) 基底各部分的几何尺寸; (d) 材料参数

图 1 太阳能电池有限元分析模型

与结构化基体相比,这种设计增加了方形立柱,而立柱可以隔离基底的应变,使岛体的顶部受基底变形的影响减小,从而减小了对 GaAs 电池的影响。

根据制造工艺流程分三个步骤来分析。第一步,将基体拉伸 20%,分别测量岛体顶部沿 x 方向的应变 ϵ_{xx} ,以及岛体的顶部翘曲绕 y 轴(y 轴为垂直于 xz 面,

方向指向面外)所转过的角度 θ 来控制岛体顶部的变形量。第二步,将 GaAs 电池粘贴在预拉伸的基体上,然后使基体自由缩回,测量 GaAs 电池沿 x 方向的应变 ϵ_{GaAs} ,以及界面正应力 σ_{xx} 与界面切应力 σ_{xy} 。第三步,将连有导线的 GaAs 电池粘贴在预拉伸的基体上,然后让基体自由缩回,测量 GaAs 电池的应变 ϵ_{GaAs} 以及界面切应力 σ_{xy} 与正应力 σ_{xx} 。

利用 ABAQUS 有限元软件对整个过程进行分析。

2 结果与讨论

2.1 不同尺寸的基体对电池的应变及界面力的影响

2.1.1 将基体拉伸 20%,测量岛体顶部的变形

此步骤为装配过程的第一步,先将基体拉伸 20%,然后测量岛体顶部的变形。为了定性研究 h_{base} , l_{cube} , h_{cube} 以及 h_{island} 的大小对岛体顶部变形的影响,因此分别将这四个量的取值有序组合,并用有限元软件进行模拟计算,通过分析得到如下结果:如图 2 所示,图中横坐标均表示立柱宽度与岛体宽度的比值 l_{cube}/l_{island} ,纵坐标表示岛体顶部沿 x 方向的应变 ϵ_{xx} 。可以看出图 2.1.1 ~ 图 2.3.3 类似于一个三阶对称矩阵,横向的变化值为 h_{island} ,纵向的变化值为 h_{cube} ,而每幅图中不同颜色的曲线代表不同的 h_{base} 。由图示可知, h_{base} 仅在 $l_{cube}/l_{island} > 0.5$ 时才对 ϵ_{xx} 有略微的影响;横向对比可知 h_{island} 由 $50 \mu\text{m}$ 增加到 $150 \mu\text{m}$ 时, ϵ_{xx} 的值有显著减小(最大值由 5.7% 减小到 -1.2%),而纵向对比发现 h_{cube} 对 ϵ_{xx} 的影响与 h_{island} 极其相似。 l_{cube}/l_{island} 变化时对 ϵ_{xx} 的影响特别明显,且 $l_{cube}/l_{island} < 0.25$ 时, ϵ_{xx} 逐渐趋近于零。

图 3 纵坐标表示岛体顶部翘曲绕 y 轴的转角。从图 3 中可以看出, h_{base} 仅当 $l_{cube}/l_{island} > 0.5$ 时对 θ 的影响才出现, h_{base} 与 h_{island} 增大时 θ 略微变小。然而 l_{cube}/l_{island} 增大时 θ 的变化特别明显。上述结果表明: l_{cube} 的大小对 ϵ_{xx} 和 θ 的影响要比 h_{cube} 和 h_{island} 大一些; h_{cube} 和 h_{island} 又要比 h_{base} 对 ϵ_{xx} 和 θ 的影响大一些。

2.1.2 粘贴 GaAs 电池并使基体自由缩回,测量电池的应变及界面力

在此步骤中,先将 GaAs 电池粘贴在预拉伸 20% 的基体上,再让基体自由缩回,然后测量 GaAs 电池的应变及界面力。图 4 纵坐标表示 GaAs 电池的应变 ϵ_{GaAs} ,从图 4 中可以看出 h_{base} 在 $l_{cube}/l_{island} < 0.75$ 时对 ϵ_{GaAs} 的影响几乎可以不计;随着 h_{cube} 增大, ϵ_{GaAs} 的值成倍减小,而 h_{island} 对 ϵ_{GaAs} 的作用与 h_{cube} 相似; l_{cube}/l_{island} 变化时 ϵ_{GaAs} 对的影响极其显著。图 5 与图 6 纵坐标分别表示界面切应

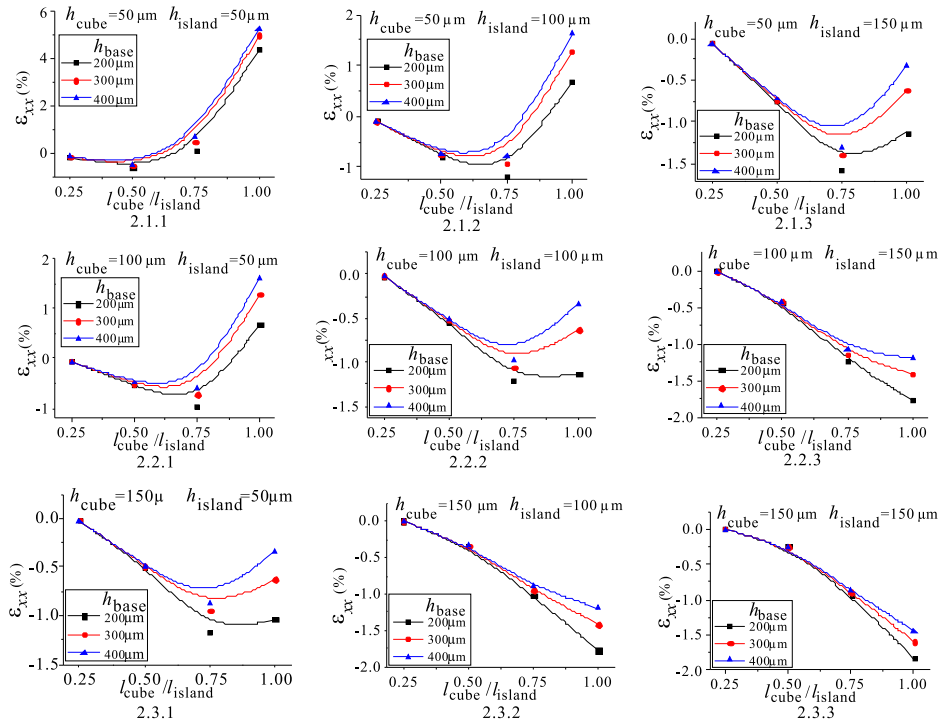


图2 岛体顶部应变 ε_{xx}

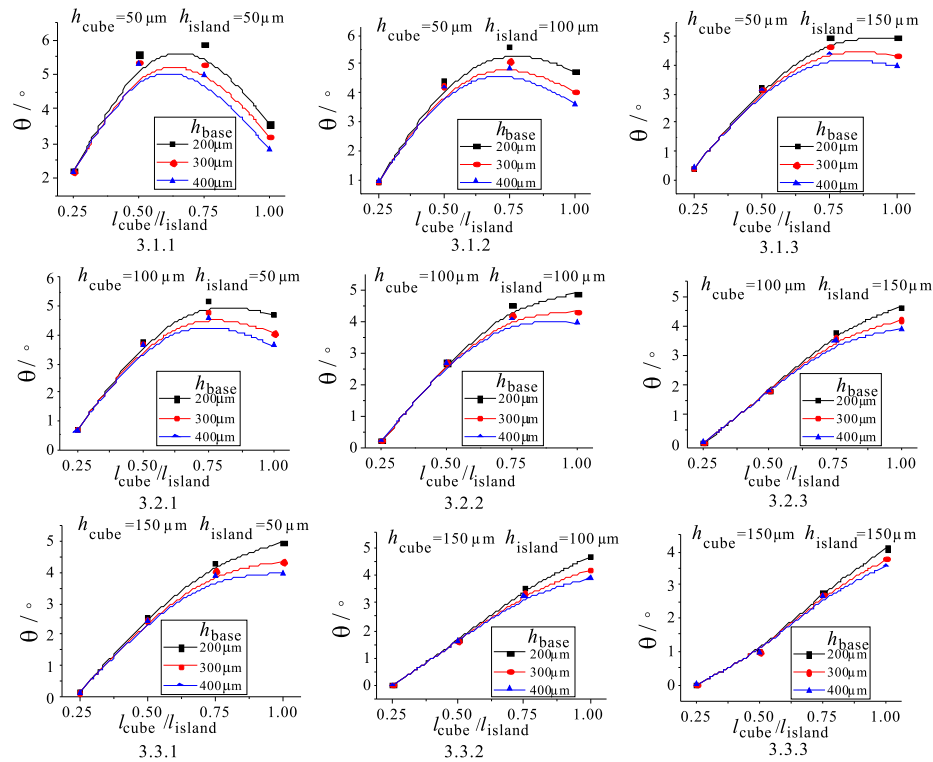


图3 岛体的顶部翘曲线 y 轴的转角 θ

力 σ_{xz} 与正应力 σ_{zz} , 由图示可知, h_{base} 对界面应力的影响非常小; 随着 h_{cube} 与 h_{island} 的增大, σ_{xz} 和 σ_{zz} 逐渐减小; 当 l_{cube} 增大时 σ_{zz} 、 σ_{xz} 也增大。通过比较可以得出以下结论: l_{cube} 的大小对 GaAs 电池的应变 ε_{GaAs} 以及界面力 σ_{zz} 、 σ_{xz} 的影响要比 h_{cube} 和 h_{island} 大, 而 h_{base} 的影响几乎可以忽略。

2.1.3 安装导线并使基体自由缩回, 测量 GaAs 电池的应变及界面力

将导线连接在电池的两端, 再将其粘贴在预拉伸 20% 的基体表面, 然后使基体自由缩回, 测量 GaAs 电池的应变及界面力。在 $h_{cube} + h_{island} = 100 \mu\text{m}$ 这一种情形

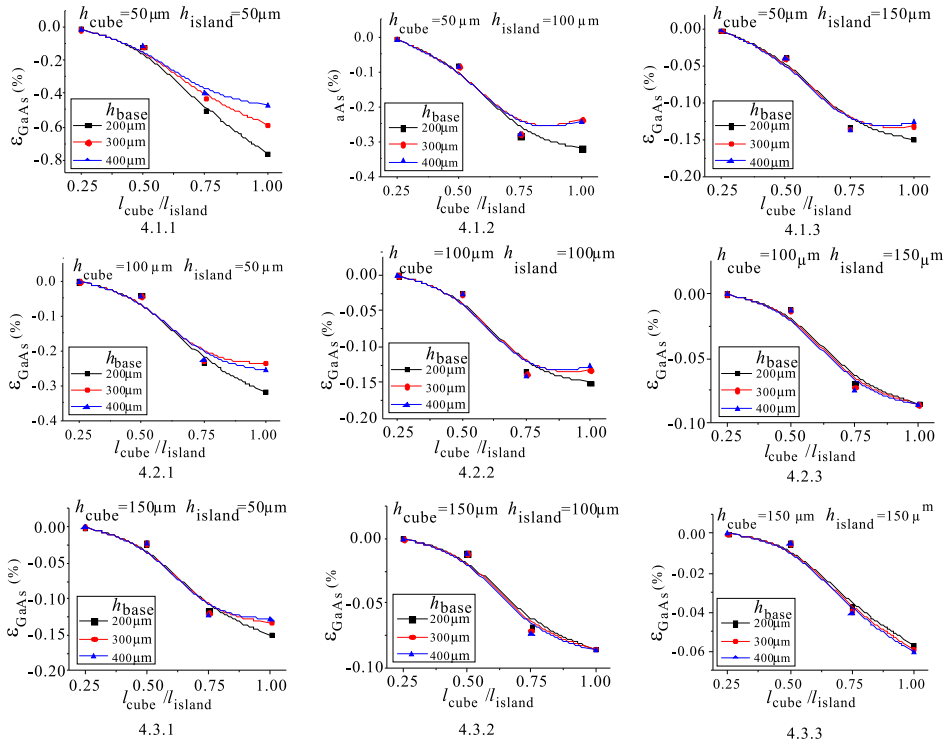


图 4 GaAs 电池的应变 $\varepsilon_{\text{GaAs}}$

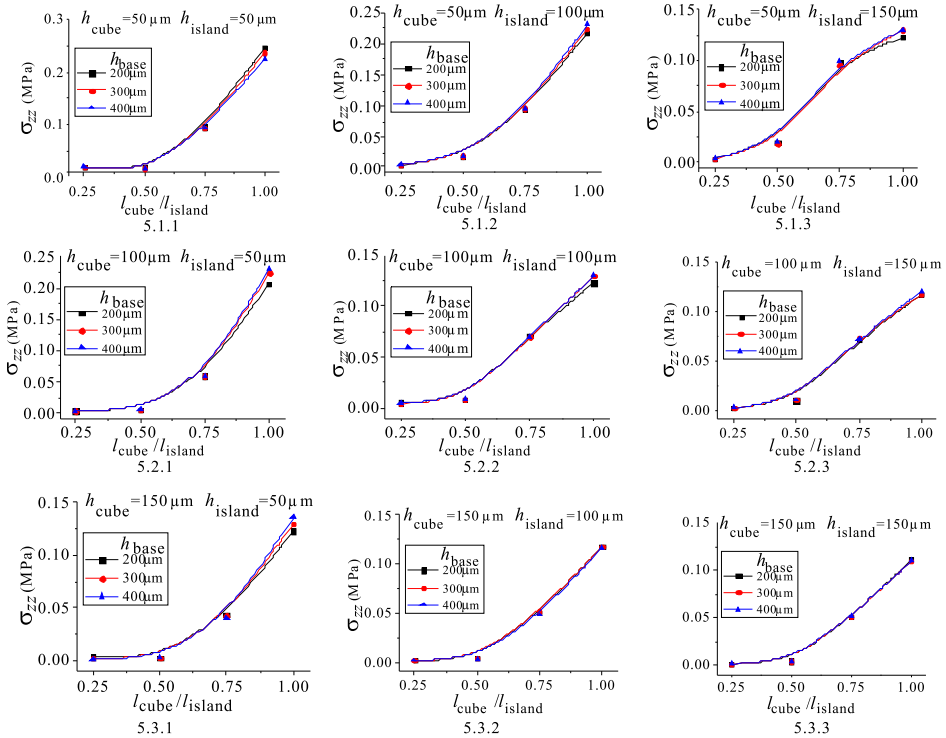


图 5 界面正应力 σ_{zz}

下,导线向下弯曲时会与基底表面接触,加之在前文的讨论中, $h_{\text{cube}} + h_{\text{island}} = 100 \mu\text{m}$ 相对于 $h_{\text{cube}} + h_{\text{island}} \geq 150 \mu\text{m}$ 无论是 $\varepsilon_{\text{GaAs}}$ 还是 σ_{zz} 、 σ_{xz} 都非常大。因此对于 $h_{\text{cube}} + h_{\text{island}} = 100 \mu\text{m}$ 的情形在此步骤中就不再做讨论。如图 7 所示,纵坐标表示 GaAs 电池的应变 $\varepsilon_{\text{GaAs}}$, 其趋势

以及大小与没有导线的时候几乎相同,表明导线对 GaAs 电池应变的影响很小。

而界面正应力 σ_{zz} 和切应力 σ_{xz} 与图 5 和图 6 几乎一致,因此就不再给出图示。从而可以知道,加装导线后的界面力大小与没有导线时并无明显的变化。综上可知,导

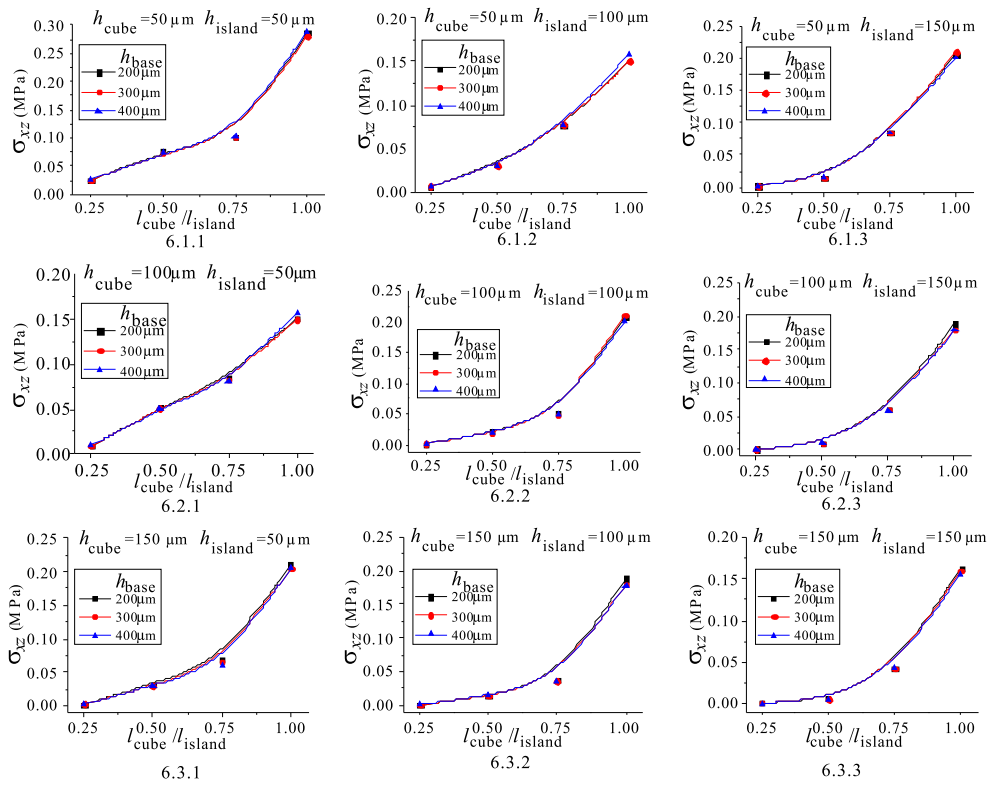


图6 界面切应力 σ_{yz}

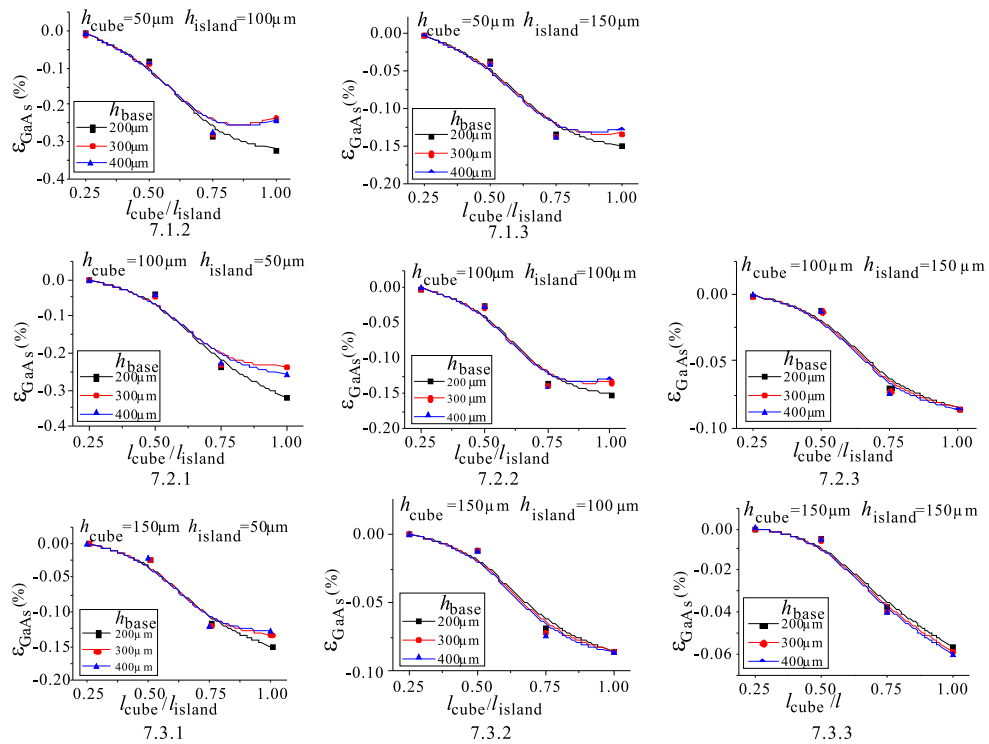


图7 GaAs 电池的应变 ϵ_{GaAs}

线对 GaAs 电池应变以及界面力的影响可以忽略不计。

2.2 立柱宽度 l_{cube} 的估计

当基体回缩时会受到导线弯曲所带来的张力作用,因此基体在回缩后会有一定程度的弯曲,然而这个弯

曲程度需要控制在一定范围以内,图 8(a) 所示为基体回缩后发生弯曲的示意图。在图 8(b) 中,纵坐标 k 表示弯曲的弧度,横坐标 l_{cube} 为立柱的宽度。从图示可知,当 $l_{\text{cube}} < 300 \mu\text{m}$ 时 k 变小,其原因是由于立柱的宽度太小,

泊松效应弱,使基底以上的结构发生了失稳,而基底收缩程度较大,因此基体的弯曲率减小。当 $l_{cube} > 300 \mu\text{m}$ 时,随着 l_{cube} 的增大泊松效应越强,基体弯曲程度越小, κ 也逐渐变小。由此可以知,为确保基底以上部分不发生倾斜,且弯曲弧度必须满足许可要求,因此 l_{cube} 的取值应当要大于 $300 \mu\text{m}$ 。

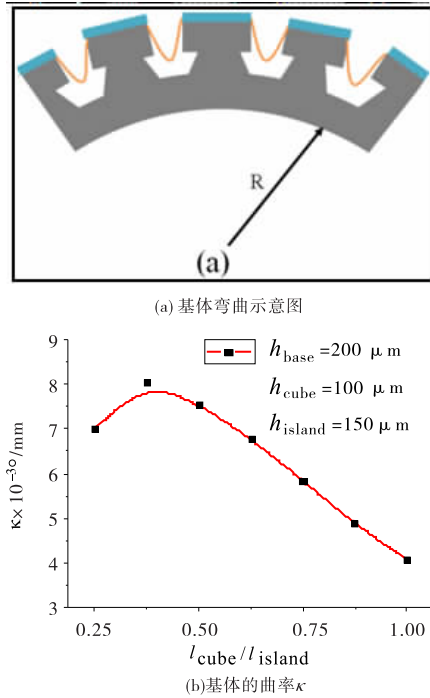


图 8 基体弯曲情况

2.3 添加保护薄膜,测量界面力的变化

基于 2.1.3 节的情形下将保护薄膜加在整个基体上,然后将组装好的整个基体拉伸 20%,测量保护薄膜 (encapsulation) 对 GaAs 电池的应变以及界面力的影响。图 9 为 $h_{base} = 200 \mu\text{m}$, $h_{cube} = 100 \mu\text{m}$, $h_{island} = 150 \mu\text{m}$, $l_{cube} = 400 \mu\text{m}$ 时的情形。图 9(a) 横坐标表示保护膜的厚度 h_{encp} , 纵坐标表示 GaAs 电池沿 x 方向的应变 ε_{xx} , 从中可以看出 ε_{xx} 随着 h_{encp} 的增加而增大。图 9(b) 的纵坐标为界面力正应力 σ_{zz} , 图 9(c) 纵坐标表示界面切应力 σ_{xz} , 由图可知 σ_{zz} 、 σ_{xz} 随着 h_{encp} 增加而增大。综上,可以得出 h_{encp} 越大 GaAs 电池的应变以及界面应力也会随着增加。因此,保护膜的厚度应当取较小的值。

3 结论

本文对结构化基体柔性太阳能电池的基体进行了改进,通过建立有限元模型,从装配的三个步骤分别探讨了不同尺寸的基体对 GaAs 电池应变以及界面力的影响,分析得出:

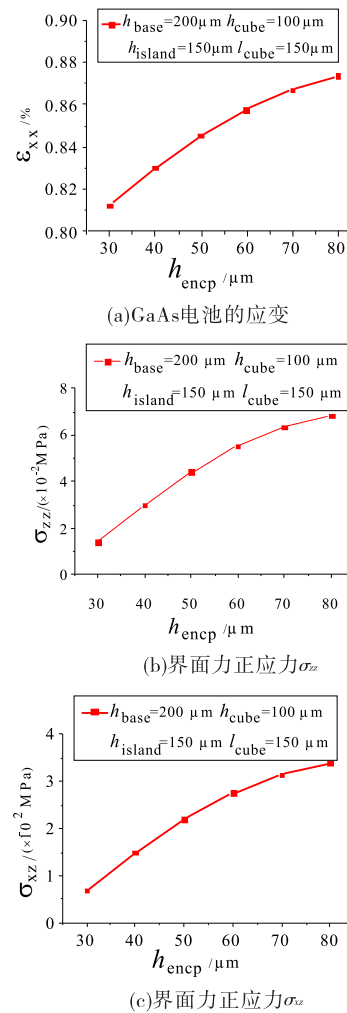


图 9 添加保护膜界面力变化情况

(1) h_{cube} 对 GaAs 电池应变以及界面影响特别显著, l_{cube} 越小影响就越小,但 l_{cube} 的取值应当大于 $300 \mu\text{m}$ 。 l_{cube} 对电池以及界面影响大于 h_{cube} 与 h_{island} , 而 h_{base} 与 l_{cube} 相比,其影响可以忽略不计。

(2) h_{base} 仅当 $l_{cube}/l_{island} > 0.5$ 时对 GaAs 电池应变以及界面的影响才逐渐出现,且对 GaAs 电池应变以及界面的影响并不大。

(3) h_{cube} 与 h_{island} 相似,当 h_{cube} 与 h_{island} 增大时对 GaAs 电池应变以及界面影响越小。

(4) h_{encap} 越大对 GaAs 电池应变以及界面力影响会增大。

参考文献:

[1] HU B, CHEN W, ZHOU J. High performance flexible sensor based on inorganic nanomaterials [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 176(1): 522-533.

[2] CHENG H, WU J, YU Q, et al. An analytical model for

- shear-enhanced adhesiveless transfer printing[J].Mechanics Research Communications,2012,43:46-49.
- [3] KIM H S, BRUECKNER E, SONG J, et al. Unusual strategies for using indium gallium nitride grown on silicon(111) for solid-state lighting.[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2011,108(25):10072-10077.
- [4] ZHANG Y, WANG S, LI X, et al. Experimental and theoretical studies of serpentine microstructures bonded to prestrained elastomers for stretchable electronics[J]. Advanced Functional Materials,2014,24(14):2028-2037.
- [5] ZHANG Y, FU H, SU Y, et al. Mechanics of ultra-stretchable self-similar serpentine interconnects [J]. Acta Materialia,2013,61(20):7816-7827.
- [6] KALTENBRUNNER, M. Ultrathin and lightweight organic solar cells with high flexibility[J]. Nat Commun,2012(3):770-777.
- [7] WANG S, HUANG Y, ROGERS J A. Mechanical designs for inorganic stretchable circuits in soft electronics[J]. IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology,2015,5(9):1-1.
- [8] JEONG C K, LEE J, HAN S, et al. A hyper-stretchable elastic-composite energy harvester[J]. Advanced Materials,2015,27(18):2866-2875.
- [9] XIE K, WEI B. Materials and Structures for Stretchable Energy Storage and Conversion Devices[J]. Advanced Materials,2014,26(22):3592-3617.
- [10] ROGERS J A, SOMEYA T, HUANG Y. Materials and mechanics for stretchable electronics [J]. Science, 2010,327(5973):1603-1607.
- [11] SONG J, HUANG Y, XIAO J, et al. Mechanics of non-coplanar mesh design for stretchable electronic circuits[J]. Journal of Applied Physics,2009,105(12):123516-123521.
- [12] LEE J, WU J, SHI M, et al. Stretchable GaAs photovoltaics with designs that enable high areal coverage[J]. Advanced Materials,2011,23(8):986-991.
- [13] LEE J, WU J, RYU J H, et al. Stretchable semiconductor technologies with high areal coverages and strain-limiting behavior: demonstration in high-efficiency dual-junction GaInP/GaAs photovoltaics [J]. Small, 2012,8(12):1851-1856.

The Effect of “Basement-Cube-Island” Structured Substrate Size on Stretchable Photovoltaics

ZHANG Yizhe, SHI Mingxing

(School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A partially hanging island structure is realized by inserting a cube between the basement and the island, and thus a support structure of basement-cube-island is formed, the dimensions of which have direct effects on the stretch ability of whole photovoltaics. Finite element method is then employed to carry out parameter analyses. It is shown that, as the interface stress and the strain of GaAs layer are concerned, the cube's width has significant effects, and the structure above the basement will be inclined due to instability of the cube when the width of cube is less than 300 μm . The heights of the cube and the island are much less dominant than the width of cube, and the influence of basement height can be ignored. What is more, as the height of encapsulation becomes larger, the interface stress and the strain of GaAs layer increase as well. All the investigation results can serve as the theoretical foundation for optimization design on substrate of stretchable photovoltaics.

Key words: stretchable electronics; photovoltaic; structured substrate; cube; finite element analysis