光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260316001

柔性硅光电晶体管性能的多物理场研究

李选瑞[1]，纳　旺[1]，崔　凡[1]，徐　浩[1,2*]

（电子科技大学 1. 物理学院，成都 611731；2. 长三角研究院（湖州），湖州 313001）

摘　要： 柔性硅光电探测器凭借硅材料的天然优势，已成为智能穿戴、电子皮肤、折叠显示等柔性电子领域的核心元器件，但关于其在机械形变下的性能演变机制研究尚不充分。文章构建了“光-电-力”的多物理场耦合模型，系统研究不同有源层厚度（4.0～6.0 μm）的硅双极型光电晶体管（BJPT）在单轴拉伸弯曲条件下（曲率半径由平展至10 mm）的光谱特性与光电瞬态响应。研究结果表明，器件的光电性能与抗机械疲劳能力之间存在“厚度-应变”平衡规律。较厚的6.0 μm器件由于表面距离力学中性层更远，承受更剧烈的非均匀应变梯度，在10 mm弯曲下光电流下降16.5%，受缺陷诱导的暗电流增加55.1%，开关比降低46.0%。相比之下，4.0 μm厚的器件因其几何结构更贴近力学中性面，能够有效释放宏观晶格应力，其光电流衰减被限制在6.0%以内，比探测率维持在1.07×10^{12} Jones。该研究揭示了柔性硅器件不同厚度几何设计在抑制非对称能带畸变与缺陷累积中的本征物理规律，为高可靠性、抗应力漂移的柔性硅光电传感系统提供了具有普适性的理论支撑。

关键词： 柔性电子；硅薄膜；多物理场仿真；应力效应；电子-声子耦合

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868（2026）04－0607－09

Multiphysics Study on the Performance of Flexible Silicon Phototransistors

LI Xuanrui[1], NA Wang[1], CUI Fan[1], XU Hao[1,2]

（1. School of Physics, Chengdu 611731, CHN; 2. Yangtze Delta Region Institute (Huzhou), University of Electronic Science and Technology of China, Huzhou 313001, CHN）

Abstract: Leveraging the inherent advantages of silicon, flexible silicon photodetectors have become core components in flexible electronics applications, such as smart wearables, electronic skins, and foldable displays. However, performance evolution mechanisms of pure silicon flexible optoelectronic devices under mechanical deformation remain insufficiently explored. In this work, a multiphysics coupling model encompassing “optical-electrical-mechanical” fields is established to systematically investigate the spectral characteristics and photoelectric transient responses of silicon bipolar junction phototransistors (BJPTs) with varying active layer thicknesses (4.0～6.0 μm) under uniaxial tensile bending conditions (curvature radii ranging from flat to 10 mm). The results reveal a “thickness-strain” tradeoff between the photoelectric performance and mechanical fatigue resistance of the devices. Thicker devices of 6.0 μm thickness, whose surfaces are located farther from the neutral mechanical plane, experience nonuniform strain gradients. Under bending at a 10 mm radius, the photocurrent decreases by 16.5%, and the on/off ratio drops by 46.0% owing to a 55.1% increase in defect-induced dark current. In contrast, devices with an active layer thickness of 4.0 μm

收稿日期：2026－03－16.

基金项目：四川省海聚计划项目（2024JDHJ0007）；湖州市公益性应用研究项目（2024GZ52）.

* 通信作者：徐　浩

feature geometries closer to the neutral mechanical plane and release macroscopic lattice stress. Consequently, their photocurrent attenuation is limited to within 6.0%, and the specific detectivity is maintained at Jones. This study revealed the physical mechanisms by which designs of varying thickness suppress asymmetric band distortion and defect accumulation, providing theoretical support for the development of highly reliable, stress-drift-resistant pure silicon flexible optoelectronic sensing systems.

Key words: flexible electronics; silicon membranes; multiphysics simulation; strain effects; electron - phonon coupling

0 引言

柔性电子技术致力于将高性能电子元器件与可弯曲、可拉伸的力学基底相融合，在人体传感网络、电子皮肤以及脑机接口等前沿领域催生了应用范式[1-2]。作为光电信号转换的核心枢纽，柔性光电探测器在无创血氧监测、健康体征追踪、折叠显示等柔性电子应用场景扮演着重要角色[3-7]。传统的高性能光电传感系统高度依赖以单晶硅为代表的无机半导体材料。尽管硅基材料具备极高的量子效率、优异的载流子迁移率以及极为成熟的CMOS集成工艺，但大块硅材料的固有刚性与脆性难以满足生物组织、异形空间等动态形变场景的柔性贴合需求。

为突破这一瓶颈，近年来大量研究转向了低维纳米材料或有机高分子半导体[8]。例如，Konstantatos等报道了利用石墨烯与量子点构筑的低维杂化结构，实现了超高灵敏度的柔性光电器件[9]；鲍哲南团队提出一种基于本征可拉伸有机聚合物半导体的高密度晶体管阵列，显著推动了柔性电子皮肤的集成化[10]；Someya课题组开发了基于超薄有机高分子半导体的柔性光电探测器，并成功应用于人体生命体征的无创监测[11]。尽管这些新兴材料展现出了优异的本征柔性潜力，但其较低的载流子迁移率、严重的低频噪声以及与现代集成电路制造工艺的兼容性不足，导致其在大规模阵列化制备中面临技术壁垒。相比之下，当单晶硅材料的厚度减薄至50 μm甚至亚微米量级时，其物理形态将由“刚性”转变为“柔韧”，不仅能继承块体硅优良的本征物理特性，还能获得承受较小弯曲半径的机械形变能力[12-13]。“超薄化”策略为高性能硅基集成电路的柔性化演进确立了最切实可行的理论基础。然而，超薄硅基芯片在实际复杂的共形贴敷与动态弯曲过程中，不可避免会承受沿不同晶向的显著外部应力。这些机械形变会直接改变单晶硅的晶格周期势场，引发复杂的力电耦合效应[14-15]。首先，晶格畸变破坏了硅材料的高度对称性，导致能谷退简并，进而改变了载流子的有效质量与声子散射率，即经典的压阻效应[16-17]。其次，减薄的硅器件受到的力学调制机制更为复杂：纵向与横向应力会导致载流子迁移率产生各向异性漂移[18-19]；高应力区域容易产生微观缺陷与晶格微裂纹，这些损伤在禁带中引入深能级陷阱，充当了非辐射复合中心，缩短了少数载流子的有效寿命[20]。针对柔性硅器件的应力干扰问题，早期研究多侧重于直流电学特性表征。例如，Nicoleta等[18]与杨洪等[17]分别从力学有限元仿真与纯电学模型角度，证实了机械弯曲会引起阈值电压的漂移与漏极电流的退化；Gupta与Mensz等[8,16]则针对超薄芯片在封装过程中的机械可靠性进行了定量建模。然而，现有文献多聚焦于场效应晶体管（MOSFET）的电学稳态响应，对于具备更复杂输运机制的光电探测器件，特别是内部增益较高的双极结型光电晶体管（BJPT），在“光-电-力”多物理场耦合下的响应规律尚缺乏系统研究。

为此，本文以标准的0.35 μm Bipolar-CMOS-DMOS工艺为基础，构建了基于垂直NPN结构的三维硅光电晶体管的多物理场耦合仿真模型。系统探讨了不同有源层厚度的BJPT器件在连续单轴弯曲下的稳态光谱特性与瞬态光开关演变规律，旨在从微观载流子散射与复合机制出发，阐明柔性光电器件抗疲劳特性演化的物理机制，为高可靠性传感系统的微型化设计提供理论支撑。

1 应力作用下的硅器件载流子输运模型

1.1 应力对半导体输运特性的调制

外部机械弯曲会使单晶硅晶格发生形变，改变

能谷的简并状态并导致载流子有效质量偏移。在宏观层面，这种由形变引起的电阻率张量变化被称为压阻效应[13]。对于硅 BJPT 器件而言，其光电转换效率高度依赖内部载流子的迁移率μ。在微小应变前提下，电阻率的相对变化与二阶应力张量呈近似线性关系，其本构方程为[12]：

$$\frac{\Delta\rho_{ij}}{\rho_0}\approx\sum_{k,l}\Pi_{ijkl}\sigma_{kl} \tag{1}$$

式中，ρ_0为无应力状态下的电阻率，σ_{kl}为二阶应力张量分量，Π_{ijkl}为四阶压阻系数张量。尽管二阶压阻效应在极端高压下存在，但在常规柔性弯曲形变（应变小于1%）的研究中，通常忽略高阶项，仅保留线性主导项以优化仿真收敛性[13]。

1.2　基于晶体对称性的模型简化与坐标变换

当建立硅基器件的力-电耦合模型时，需要考虑单晶硅材料的各向异性特征。由于硅属于立方晶系，其压阻效应不能简单用单一标量描述，而是一个四阶张量系统[13]。然而，在实际的 COMSOL Multiphysics 器件仿真中，直接处理完整的 36 分量张量不仅计算量大，且容易导致收敛困难。因此，利用晶体的对称性进行简化是物理建模的关键步骤。根据晶体物理学原理，硅晶格的高度对称性使得其压阻张量Π_{ijkl}中仅存在三个独立的非零分量[14]。在以晶轴为参考坐标系（即图 1 中的X_1-X_2坐标系）下，这三个分量分别为：纵向压阻系数Π_{11}，表征电场与应力平行且均沿主晶轴方向时的电阻变化；横向压阻系数Π_{12}，表征电场与应力垂直时的电阻变化；剪切压阻系数Π_{44}，表征剪切应力对电阻率的调制作用。这种简化极大降低了模型的复杂度，通过这三个参数可构建出描述任意应力状态的本构方程。

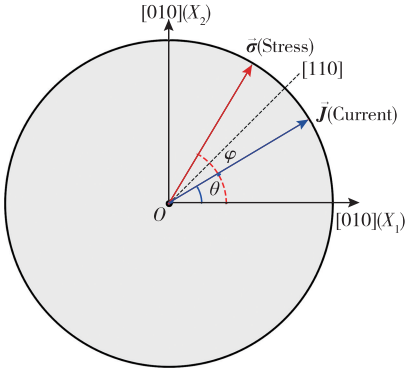


图 1　（001）晶面硅上电流密度矢量$\boldsymbol{J}$与单轴应力矢量$\boldsymbol{\sigma}$的坐标变换示意图

在现代集成电路工艺中，BJPT 电流传输方向往往并不直接沿[100]主晶轴（例如标准 CMOS 工艺常沿[110]方向），且柔性器件在使用过程中受到的弯曲应力$\boldsymbol{\sigma}$方向也是任意的。为了在仿真中准确描述这种几何失配，需要建立从“晶圆坐标系”到“器件坐标系”的映射关系[14]。如图 1 所示，定义（001）晶面上的参考基准为[100]晶轴。在此平面内：设器件内部电流密度矢量$\boldsymbol{J}$与[100]晶轴的夹角为θ；设施加的单轴外部应力$\boldsymbol{\sigma}$与[100]晶轴的夹角为φ。基于张量旋转理论，任意方向的纵向应力所引发的电阻率变化率$\Delta\rho/\rho$，可以通过上述角度进行投影计算。经过推导，适用于（001）晶面的等效压阻系数$\Pi^{(001)}$可表达为[15]：

$$\begin{aligned}\Pi^{(001)}=&\Pi_{11}\left(\cos^2\theta\cos^2\varphi+\sin^2\theta\sin^2\varphi\right)+\\&\Pi_{12}\left(\cos^2\theta\sin^2\varphi+\sin^2\theta\cos^2\varphi\right)+\\&2\Pi_{44}\left(\sin\theta\cos\theta\sin\varphi\cos\varphi\right)\end{aligned} \tag{2}$$

公式（2）揭示了器件放置方向与受力方向对性能退化的决定性影响。在仿真实验过程中，无需针对每一个弯曲角度重新建立物理场，只需根据器件版图确定θ，并根据力学模块计算出的应力主方向确定φ，即可动态更新半导体模块中的迁移率修正参数。这种方法既保证了物理机制的准确性，又实现了计算效率的最优化。

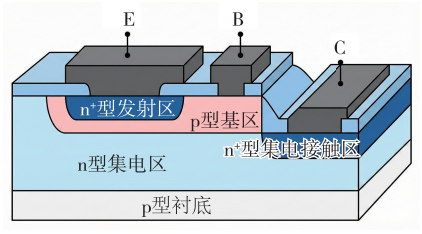
1.3　光电性能演化的参数耦合与仿真实现

在光电探测及信号放大应用中，应力导致的迁移率变化$\Delta\mu$将影响 BJPT 的基区输运效率。对于 BJPT 光电性能，应力不仅改变集电极电流，还会影响基区少数载流子的扩散长度L_n（$L_n=\sqrt{D_n\tau}\propto\sqrt{\mu_n}$）。在 COMSOL 仿真设置中，由于器件有源区尺寸远小于弯曲半径，可采用均值应力近似法。通过固体力学模块计算出的平均应力场$\bar{\boldsymbol{\sigma}}$，结合上述优化后的$\Pi$模型，动态更新半导体模块中的迁移率参数。这比传统的固定迁移率模型更能真实反映器件在拉伸或压缩状态下的光电响应演变趋势[10]。

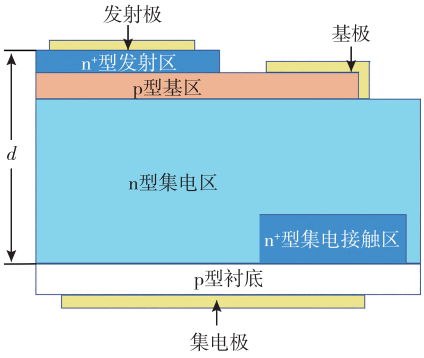
2　器件结构

在 COMSOL 环境中搭建了基于垂直 NPN 结构的三维 BJPT 仿真模型，设定器件长为 10 μm，宽为 10 μm。结合修改后的器件剖面图（如图 2（b）所示）可知，本研究中的“器件厚度”定义为器件的纵

向物理尺寸，即从器件顶层表面（包含发射区与基区接触面）至底层集电极边界的整体纵向距离。为系统评估该几何跨度对器件力学形变特征及载流子输运的影响，模型厚度被分别设置为4.0 μm，4.5 μm，5.0 μm，5.5 μm和6.0 μm，用以准确模拟不同后端减薄工艺制备的单晶硅薄膜，整体结构模型如图2所示。



（a）器件理论图



（b）器件模型剖面图

图2 晶体管结构图

3 仿真结果与分析

3.1 仿真参数设计

为深入探究柔性硅BJPT器件在机械形变下的光电性能演化机制，基于COMSOL Multiphysics平台构建了光-电-力的多物理场耦合模型。考虑到张应力作为柔性电子皮肤和可穿戴传感器在实际贴合应用中主要承受的外力之一，仿真重点设定为单轴拉伸，状态如图3所示[17]，以模拟器件在弯曲工况下的真实物理响应[18]。

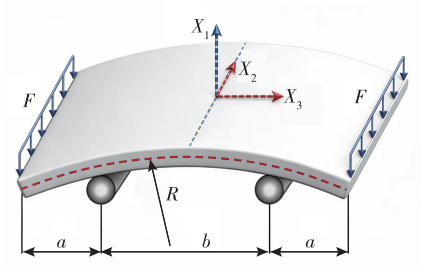


图3 拉伸仿真示意图

在力学边界条件设置中，基于欧拉-伯努利梁理论，当硅芯片发生纯弯曲形变时，其有源区表面所受的标称拉伸应变ϵ与弯曲半径R存在如下几何映射关系[19]：

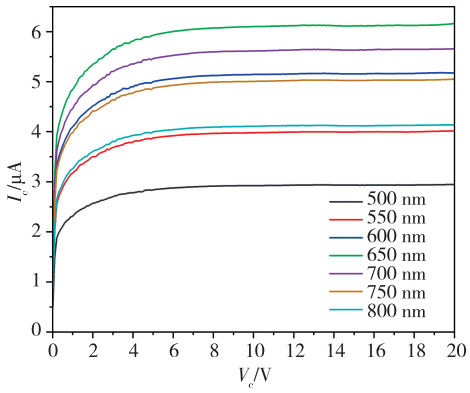
$$\epsilon=\frac{h_{sub}}{2R}\times 100\% \tag{3}$$

式中，h_{sub}为硅衬底的厚度，设定为50 μm。为了覆盖从轻微弯曲到极限形变的全范围光电特性测试，依次选取5组典型的弯曲半径：30 mm，25 mm，20 mm，15 mm及10 mm。根据公式（3）重新计算，对应的表面拉伸应变分别为0.083%，0.100%，0.125%，0.167%，0.250%。仿真流程采用“稳态应力-光电输运”两步耦合策略。利用固体力学模块计算不同弯曲半径下衬底内部的应力张量分布，将提取的应力数据耦合至半导体模块。由于应力会造成硅材料能带结构的退简并及载流子有效质量的变化，进而调制光生载流子的迁移率μ_{eff}[14]。与传统纯电学仿真不同，本研究引入了应力相关的光学产生率G_{opt}和复合率模型，重点关注应力对光电流的非线性调制作用。通过求解泊松方程与载流子连续性方程，最终获得不同拉伸应变状态下的光电响应I-V曲线。该模型能够比传统方法更准确地预测柔性光电器件在弯曲状态下的量子效率漂移与响应度退化趋势[15]。

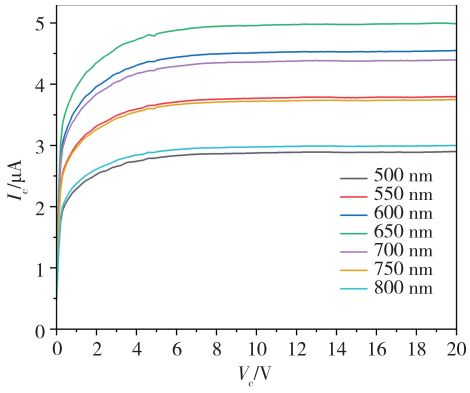
3.2 BJPT器件仿真分析

结合公式（1）～（3）建立的多物理场理论模型，在COMSOL仿真平台中以0.1 V的偏置电压增量，系统提取了柔性硅BJPT的集电极电流-电压输出特性曲线。不同弯曲半径与平展状态下的光、暗电流响应对比如图4所示。在平展无应变状态下，器件的光电转换性能表现出几何厚度依赖性。随着有源层厚度由4.0 μm增加至6.0 μm，器件的光子吸收路径延长，其饱和光电流峰值从5.02 μA稳步提升至6.18 μA，增幅约为23.1%，如图4（a）和（b）所示；同时，暗电流也呈现出约17.4%的同向增长，如图4（c）和（d）所示。这一现象直观地表明，光生载流子的激生效率以及热激发载流子的本底浓度均与活性层体积呈强正相关，该仿真结果与基于Beer-Lambert定律的光吸收理论及经典体电阻导电模型契合[20]。

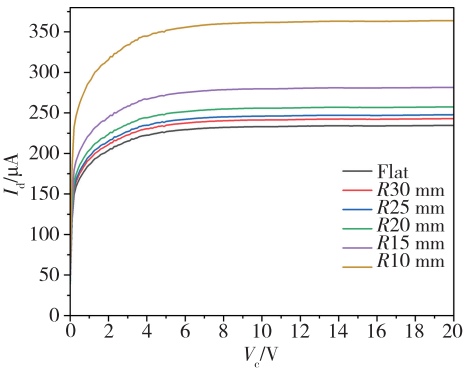
在引入单轴拉伸应力后，器件在弯曲曲率较小的范围内表现出优异的光电力学稳定性。当弯曲半



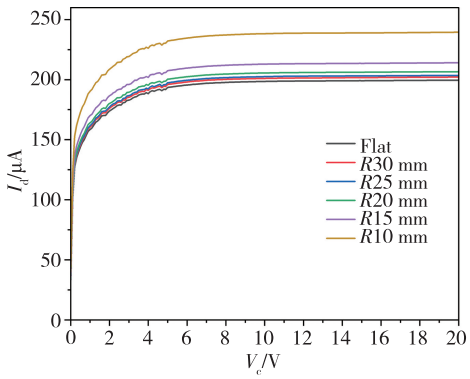
（a）0～20 V 扫描电压条件下 500～800 nm 厚度为 6.0 μm 光电流



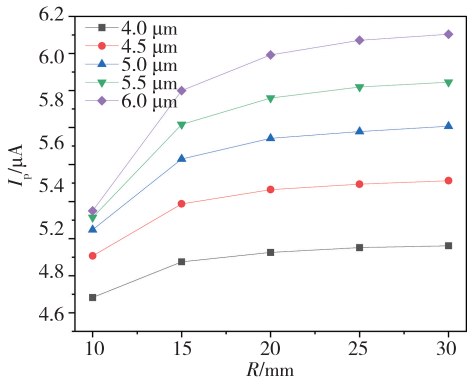
（b）0～20 V 扫描电压条件下 500～800 nm 厚度为 4.0 μm 光电流



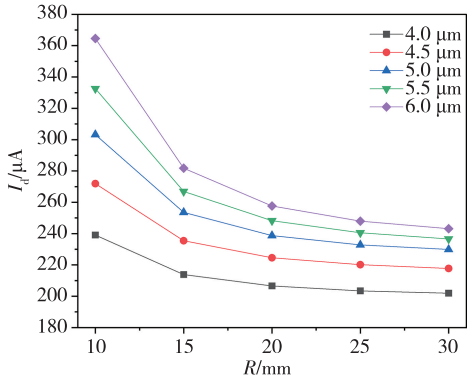
（c）6.0 μm 不同弯曲半径 BJPT 暗电流曲线



（d）4.0 μm 不同弯曲半径 BJPT 暗电流曲线



（e）不同厚度随弯曲半径变化光电流曲线



（f）不同厚度随弯曲半径变化暗电流曲线

图 4　BJPT 的仿真响应 I_c-V_c 曲线

径减小至 10 mm 临界值时，器件的光暗电流发生退化。具体而言，相较于平展状态，4.0 μm 器件在 10 mm 弯曲下展现出较强的鲁棒性，其光电流仅微幅下降 6.0%，暗电流增加 20.0%；而 6.0 μm 较厚器件在同等弯曲下，光电流衰减扩大至 16.5%，暗电流增幅为 55.1%，如图 4(e)和(f)所示。这一现象表明，弯曲应力对载流子输运与迁移率具有抑制作用，且器件厚度的增加会加剧表面拉伸应力导致的能带收缩与性能退化。从能带理论的机制来看，单轴拉伸应变打破了单晶硅晶格原有的立方对称性，导致导带底的六重简并能谷发生显著的退简并[21]。这种周期势场的畸变不仅加剧了谷间的电子-声子散射，还促使导带电子自发向能量更低，且在输运方向上具有更大有效质量的子能谷转移与聚集，两者的协同作用在宏观上表现为光生载流子有效迁移率的下降。同时，强烈的拉伸晶格畸变使得导带底向下偏移、价带顶向上偏移，引发了有效带隙收缩。由于半导体中的热激发本征载流子浓度与带隙宽度呈指数级负相关$\left(n_i \propto \exp\left(-E_g/2kT\right)\right)$，这种由应变诱发的能带收缩直接造成了暗电流成分的增加。6.0 μm 器件由于表面偏离力学中性层更远，承受了

更为剧烈的拉伸应力与更深层次的能带畸变，其暗电流的恶化程度明显高于4.0 μm器件。该仿真规律揭示了厚度设计在缓解应变诱发能带收缩中的核心作用，为进一步评估系统的光电开关特性提供了理论依据。

图5展示了利用COMSOL提取的BJPT器件内部有效载流子迁移率随晶格应变的演变趋势。结果表明，迁移率的退化并非单纯受弯曲半径支配，也呈现出明显的厚度依赖性。在10 mm的极限弯曲工况下，4.0 μm器件的迁移率衰减幅度为15.0%，而6.0 μm器件的衰减幅度则进一步扩大至17.25%。依据欧拉-伯努利梁理论，在纯弯曲状态下，柔性薄膜内部的局部应变幅值ε与该点至力学中性层的垂向距离y呈严格的正比关系（即$\varepsilon=y/R$）。由于6.0 μm器件的纵向厚度更大，其表层有源区（即光生载流子的主要输运通道）偏离中性层更远。因此，在相同的极限弯曲曲率下，6.0 μm器件表面承受了远比4.0 μm器件更为剧烈的拉伸应变场与应力梯度。其次，这种被几何厚度放大的宏观应变会通过压阻效应直接调制载流子的底层输运物理[22]。拉伸晶格畸变打破了单晶硅原有的立方对称性，引发周期势场变形，这种形变产生了双重抑制作用：一方面，能谷退简并导致电子大量转移至具有更大“有效质量”的低能态能谷中；另一方面，原子的位移错乱显著增加了能谷间的电子-声子散射概率[21]。有效质量的增加与散射弛豫时间的缩短，共同导致了材料本征迁移率的下降。综上所述，柔性器件的几何厚度通过欧拉-伯努利力学机制决定了应变场的空间梯度强度，而该应变场又作为物理输入，通过压阻效应与能带畸变主导了迁移率的衰减速率。这一力电耦合机制揭示了6.0 μm器件在同等宏观弯曲半径下表现出更显著的载流子输运阻滞与力学疲劳特性。

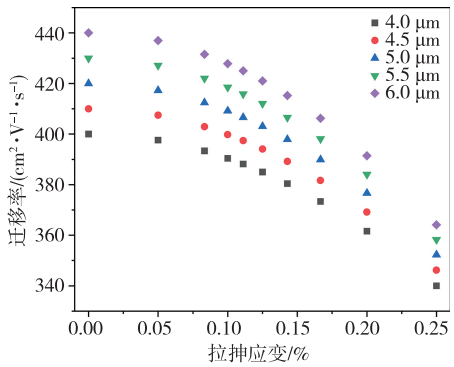
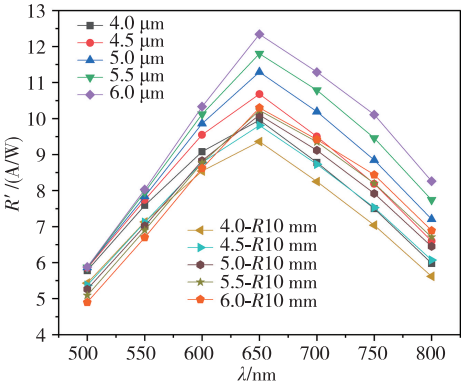
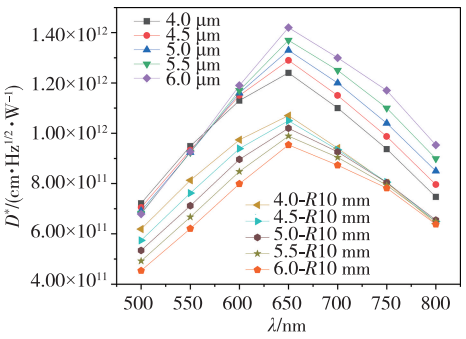


图5 迁移率随应力程度变化

图6(a)和(b)分别展示了不同有源层厚度(4.0～6.0 μm)的柔性硅BJPT器件在20 V偏置下，500～800 nm波段的响应度(R')与比探测率(D^*)曲线，并重点对比了平展与极限弯曲(R=10 mm)状态下的性能差异。在平展无应变状态下，6.0 μm器件因具备更充分的光吸收路径，在650 nm波长处取得了最高的光电转换效率，其响应度峰值与比探测率分别达到12.34 A/W和1.42×10^{12} Jones。然而，当经受R=10 mm的单轴拉伸应变时，该器件的响应度衰减至10.30 A/W，比探测率降至9.54×10^{11} Jones。相比之下，4.0 μm器件表现出更优异的光电力学鲁棒性：在同等极限弯曲条件下，其响应度仅从9.96 A/W降至9.36 A/W，相应的比探测率由1.24×10^{12} Jones降至1.07×10^{12} Jones，仍稳定维持在1×10^{12}数量级的高探测水平。



(a) 500～800 nm波段平展与弯曲半径10 mm状态下响应度对比



(b) 500～800 nm波段平展与弯曲半径10 mm状态下探测率对比

图6 柔性硅BJPT平展与极限弯曲状态下的响应度和探测率

为了进一步验证多物理场仿真模型模拟光电性能演化机制的准确性，将650 nm波长下柔性晶体管的比探测率随拉伸应变的变化趋势与Zhou等[23]的实验结果进行归一化对比，均呈现出衰减趋势，如图7所示。Zhou等制备了柔性p-Si/n-ZnO垂直

薄膜异质结光电器件，并在单轴拉伸条件下系统表征了其光电响应。尽管该文献采用的是硅基异质结体系，但拉伸应力诱发的性能衰减核心机制仍为非对称晶格形变导致的局域能带畸变，从而阻碍光生载流子的纵向收集，该机制与本研究硅 BJPT 的力电耦合行为相一致。相较之下，本研究中 4.0 μm 器件展现出更好的抗应力鲁棒性，其归一化比探测率始终维持在较高水平；而 6.0 μm 器件因表面偏离中性面更远，探测率退化更为显著。

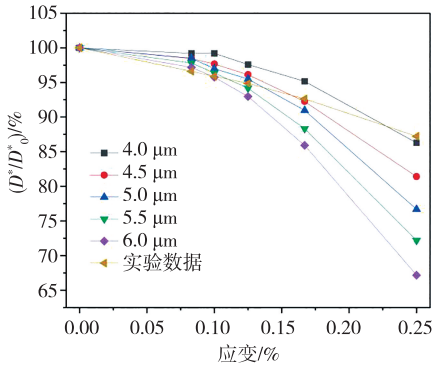
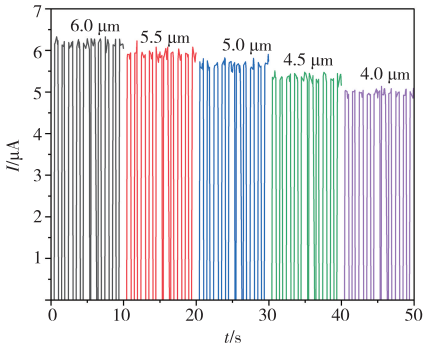


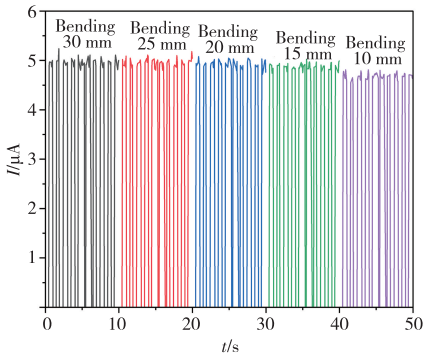
图 7　仿真不同厚度归一化比探测率随应力变化与实验数据[23]对比图

如图 8(a)提取了器件在多周期 650 nm 交替光照下的瞬态开关响应。为真实反映内部载流子输运的高频动态，时域分析采用分段局部特征提取策略，避免了全局平滑算法带来的数据失真。在平展状态下，6.0 μm 器件的光暗电流比(On/off ratio)达到 26 300。图 8(b)～(f)记录了各厚度器件在弯曲半径缩减至 10 mm 过程中的动态开关演变。为了更直观量化这一机械形变带来的影响，将上述动态开关数据提取为开关比随弯曲半径的变化趋势，如图 8(g)所示。随着形变加剧，器件开关比呈现退化：当弯曲半径 R 缩减至 10 mm 时，6.0 μm 器件的开关比降至 14 200，衰减幅度为 46.0%；而 4.0 μm 器件有效释放了宏观晶格应力，其开关比自 24 900 降至 19 500，衰减幅度为 21.7%，表现出更优异的机械鲁棒性。这种光电开关比特性的退化，主要由宏观晶格畸变与微观缺陷增殖协同主导。一方面，沿厚度方向的非均匀应变梯度破坏了晶格周期势场，加剧了电子-声子耦合，降低了有效迁移率；另一方面，拉伸应力易在薄膜内诱发深能级陷阱与复合中心，增加了暗电流中的热激发-复合(G-R)成分[16]。

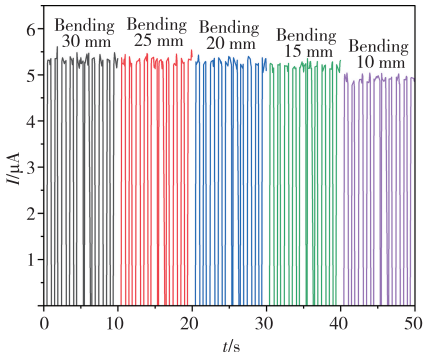
这一由微观形变引发的退化规律在以往的实验研究中得到了验证。根据 Sun 等[24]对柔性晶体管进行的应变测试结果表明，在 0%～0.8% 的拉伸应变区间内，拉伸应力诱发的位错与表面缺陷会显著提升器件的暗电流，导致器件的光暗开关比随拉伸应变的增加呈现出对数级的衰减趋势。观察图 8(g)中提取的开关比变化可知，在 0%～0.25% 的单轴拉伸应变，对应平展至 10 mm 弯曲半径范围内，多物理场仿真揭示的“开关比随拉伸形变加剧而下降”的物理趋势，与上述文献在同等拉伸象限内的实测演变规律保持一致。这不仅证实了本模型在描述力电耦合退化机制方面的准确性，也从瞬态开关的角度进一步佐证了如下规律：将有源层厚度减薄，可有效降低非对称应变梯度导致的能带畸变与缺陷累积，从而在复杂动态形变下维持稳定的高信噪比。



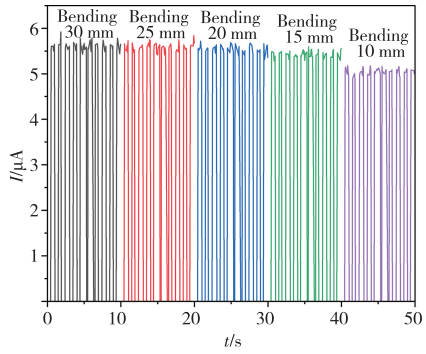
(a) 650 nm 光和 20 V 偏置电压下不同厚度光开关行为



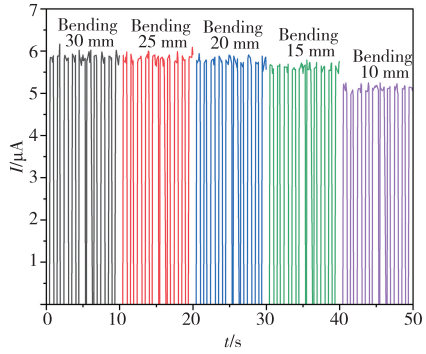
(b) 650 nm 光和 20 V 偏置电压下 4.0 μm 不同弯曲半径光开关行为



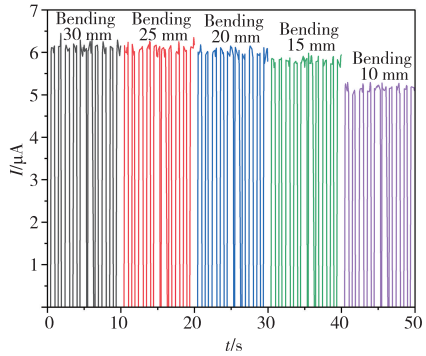
(c) 650 nm 光和 20 V 偏置电压下 4.5 μm 不同弯曲半径光开关行为



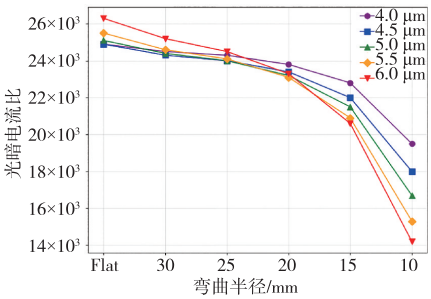
（d）650 nm光和20 V偏置电压下5.0 μm不同弯曲半径光开关行为



（e）650 nm光和20 V偏置电压下5.5 μm不同弯曲半径光开关行为



（f）650 nm光和20 V偏置电压下6.0 μm不同弯曲半径光开关行为



（g）不同厚度开关比随弯曲半径变化趋势

图8 柔性器件的瞬态光开关行为

3.3 电极形变的寄生影响

当综合评估柔性光电器件的系统性能时，不仅需要考虑硅有源层的本征物理演变，还须关注电极结构在弯曲形变下的寄生劣化效应。在本文的器件几何设计中，顶层发射极与基极金属触点，以及底层集电极，处于器件厚度方向的最外层，距离力学中性面最远。根据欧拉-伯努利梁理论，这意味着电极层承受着全器件最大的宏观拉伸应变。在实际弯曲情况下，这种极值应力可能在金属电极薄膜内部诱发微裂纹，或在金属-半导体交界面引发微观剥离，从而产生额外的性能衰减。

这一电极形变的寄生影响已在硅柔性光电器件的实验研究中得到验证。Kim等[25]在集成聚合物凸块与衬底的柔性硅封装电学可靠性研究中指出，机械弯曲会使应力高度集中于金属互连与电极结构处；随着应变程度增加或处于循环弯曲工况下，金属层内部会产生不可逆的塑性变形，导致接触电阻上升和性能衰退。Li等[26]在柔性InGaAs纳米膜光电探测器的研究中，通过机械形变测试表征了电极-半导体界面的结构完整性，当弯曲半径减小至10 mm时，电极的微裂纹以及金属与半导体界面的层间剥离成为主导器件失效的核心机制。这些研究表明，电极形变可通过诱发微裂纹或界面剥离产生寄生效应，进而影响器件的光电性能。

对于本研究中的6.0 μm器件，其表面电极偏离中性面更远，所承受的应变极值和应力梯度远高于4.0 μm器件。因此，由电极劣化引起的寄生效应与硅薄膜本征的能带畸变产生同向叠加，进一步放大性能退化趋势。在器件设计中通过选用更具柔韧性的电极材料、优化金属-半导体界面结合强度或进一步调整中性面位置，可有效缓解电极结构质量劣化对光电流、暗电流、响应度等整体光电性能的影响，为高可靠性柔性硅光电传感系统提供更全面的理论与工程指导。

4 结论与展望

本文基于标准0.35 μm BCD工艺，构建了厚度为4.0～6.0 μm的硅BJPT三维“光-电-力”多物理场耦合模型，系统仿真并分析了器件在单轴拉伸弯曲状态下的光电性能演化规律与物理机制。根据仿真结果分析得出，柔性光电晶体管的探测灵敏度与抗机械疲劳能力之间存在“厚度-应变”平衡关系。在平展状态下，6.0 μm器件具备更充分的光吸收路径与更高的光电转换增益。但在10 mm极限弯曲半径的单轴拉伸下，其表面承受了更为剧烈的非均匀应变梯度，光电流衰减达16.5%，且受缺陷诱导的暗电流明显上升影响，开关比下降了46.0%。相比之下，4.0 μm器件因其几何结构更贴近力学中

性面，有效释放了宏观晶格应力，其光电流衰减被限制在6.0%以内，比探测率维持在1.07×10^{12} Jones。器件光电性能的退化主要源于压阻效应与微观缺陷的双重作用：空间非均匀应力场引发周期势场畸变，加剧了电子-声子耦合从而降低了有效迁移率；同时，应力诱发深能级陷阱，增加了暗电流中的热激发-复合成分。仿真结果对定量分析柔性硅基光电器件在复杂形变下的物理响应提供了有益的参考，为下一步研制高可靠性、抗应力漂移的微型柔性光电传感系统打下了理论基础。

参考文献：

[1] Das R, Harrop P. Printed, Organic & Flexible Electronics: Forecasts, Players & Opportunities 2016-2026 [EB/OL]. IDTechEx, 2016 [2026-03-16]. https://www.idtechex.com.

[2] Dahiya R S, Gennaro S. Bendable ultra-thin chips on flexible foils[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(10): 4030-4037.

[3] Hassan M U, Rempp H, Hoang T, et al. Anomalous stress effects in ultra-thin silicon chips on foil [C]//2009 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM), 2010: 1-4.

[4] van den Ende D A, van de Wiel H J, Kusters R H L, et al. Mechanical and electrical properties of ultra-thin chips and flexible electronics assemblies during bending [J]. Microelectronics Reliability, 2014, 54(12): 2860-2870.

[5] Kim D H, Lu N, Ma R, et al. Epidermal electronics [J]. Science, 2011, 333(6044): 838-843.

[6] Gao W, Emaminejad S, Nyein H Y Y, et al. Fully integrated wearable sensor arrays for multiplexed *in situ* perspiration analysis [J]. Nature, 2016, 529(7587): 509-514.

[7] Chortos A, Liu J, Bao Z. Pursuing prosthetic electronic skin [J]. Nature Materials, 2016, 15(9): 937-950.

[8] Gupta S, Heidari H, Vilouras A, et al. Device modelling for bendable piezoelectric FET-based touch sensing system [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2016, 63(12): 2200-2208.

[9] Konstantatos G, Badioli M, Gaudreau L, et al. Hybrid graphene-quantum dot phototransistors with ultrahigh gain [J]. Nature Nanotechnology, 2012, 7(6): 363-368.

[10] Wang S, Xu J, Wang W, et al. Skin electronics from scalable fabrication of an intrinsically stretchable transistor array [J]. Nature, 2018, 555(7694): 83-88.

[11] Yokota T, Zalar P, Kaltenbrunner M, et al. Ultraflexible organic photonic skin [J]. Science Advances, 2016, 2(4): e1501856.

[12] Smith C S. Piezoresistance effect in germanium and silicon[J]. Physical Review, 1954, 94(1): 42-49.

[13] Kanda Y. A graphical representation of the piezoresistance coefficients in silicon [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1982, 29(1): 64-70.

[14] Bradley A T, Jaeger R C, Suhling J C, et al. Piezoresistive characteristics of short-channel MOSFETs on (100) silicon [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2001, 48(9): 2009-2015.

[15] Wacker N, Richter H, Hassan M U, et al. Compact modeling of CMOS transistors under variable uniaxial stress [J]. Solid-State Electronics, 2011, 57(1): 52-60.

[16] Vilouras A, Heidari H, Gupta S, et al. Modeling of CMOS devices and circuits on flexible ultrathin chips [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(5): 2038-2046.

[17] 杨　洪，张正元，陈　仙，等. 超薄柔性硅CMOS器件及无源元件性能退化仿真研究[J]. 微电子学，2023，53(1)：139-145.
Yang Hong, Zhang Zhengyuan, Chen Xian, et al. Simulation research on performance degradation of ultra-thin flexible silicon CMOS devices and passive components[J]. Microelectronics, 2023, 53(1): 139-145.

[18] Wacker N, Richter H, Hoang T, et al. Stress analysis of ultra-thin silicon chip-on-foil electronic assembly under bending [J]. Semiconductor Science and Technology, 2014, 29(9): 095007.

[19] Bong J H, Kim C, Hwang W S, et al. A quantitative strain analysis of a flexible single-crystalline silicon membrane [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(3): 033105.

[20] Sze S M, Ng K K. Physics of Semiconductor Devices [M]. New York: Wiley, 2006.

[21] Chu M, Sun Y, Aghoram U, et al. Strain: a solution for higher carrier mobility in nanoscale MOSFETs [J]. Annual Review of Materials Research, 2009, 39: 203-229.

[22] Kim T W, Kim J M, Yun H J, et al. Electrical reliability of flexible silicon package integrated on polymer substrate during repeated bending deformations [J]. Journal of Electronic Packaging, 2022, 144(4): 041017.

[23] Zhou Y, Zhang Y, Ding Z, et al. Modulating the photoresponse performance of the flexible Si/ZnO film heterojunction photodetectors by piezo-phototronic effect [J]. Applied Physics Letters, 2021, 119(12): 121104.

[24] Sun Y, Menard E, Rogers J A, et al. Gigahertz operation in flexible transistors on plastic substrates [J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(18): 183509.

[25] Kim S Y, Bong J H, Kim C, et al. Mechanical stability analysis *via* neutral mechanical plane for high-performance flexible Si nanomembrane FDSOI device [J]. Advanced Materials Interfaces, 2017, 4(21): 1700618.

[26] Li X, Zhang J, Yue C, et al. High performance visible-SWIR flexible photodetector based on large-area InGaAs/InP PIN structure[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 7681.

作者简介：

李选瑞(2001—)，男，在读硕士研究生，主要研究方向为柔性硅光电晶体管；

徐　浩(1990—)，男，博士，研究员，主要从事光电探测与传感研究。