

柔性单晶锗 PIN 二极管在关态下的建模研究*

王飞 秦国轩

(天津大学 电子信息工程学院 天津 300072)

摘要:介绍了柔性单晶锗纳米薄膜(GeNM)PIN二极管的制备方法和反向偏置下对应不同弯曲状态下的射频特性。为了定量研究在反向偏置下机械弯曲对柔性PIN二极管射频特性的影响,分别搭建了不同弯曲半径下的等效电路模型。通过研究不同机械应力作用下模型中的各个参数的变化得到二极管内部电阻,寄生电感,p+p-结的电阻以及p-n+结的电容为影响其射频特性的主要因素,机械弯曲使这些参数值单调变化,导致柔性单晶锗PIN二极管关态下的射频特性变好。这在应变测量领域显示出很大的发展应用潜力。

关键词: 锗二极管;柔性;弯曲;关态;等效电路模型

中图分类号: TN315⁺.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.3030

Modeling research of flexible single crystal germanium
PIN diode under off state

Wang Fei Qin Guoxuan

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This letter presents the fabrication method of flexible single-crystalline germanium nanomembrane (GeNM) p-intrinsic-n (PIN) diodes on plastic substrate and radio frequency (rf) characterization under off state of various bending strains. In order to quantitatively research the RF characteristic variations with different mechanical stress applied on the flexible PIN diode under reverse mode, accurate equivalent circuit models were set up under different bending radius. After researching the model parameters of the diode varying with the mechanical stress, it can be obtained internal resistance, parasitic inductance, p+p- junction resistor and p-n+ junction capacitance are the main factors affecting the rf characteristics. Mechanical bending makes these parameters change monotonously, which results the rf characteristics of flexible single-crystal germanium PIN diode getting better under the off state. It also shows great potential in the strain measurement field.

Keywords: germanium diode; flexible; bending; off state; equivalent circuit model

1 引言

柔性电子相对于硬质电子有很多独特的性质,比如重量轻,抗弯折,可附着到不平整的表面等^[1-3]。柔性电子器件最常用的有机聚合物等材料的载流子迁移率相对较低,只适用于低速的电子纸和显示设备中^[4-6]。然而越来越多的应用需要工作在高速甚至射频(RF)条件下,比如射频标识(RFID)、表皮电子和可穿戴的电子生理监测装置等^[6-9]。硅和锗等单晶无机半导体具有很高的载流子迁移率并且兼容于目前的半导体制造工艺,它们成为制造高性能柔性电子很好的选择,很多研究都在致力于实现基于这些材料的柔性电子器件的高速化和高性能化^[10-11]。近些年迅速发展

起来的转移技术和柔性单晶薄膜极大地推进了柔性电子的高速化,由此制造了许多高性能的柔性电子有源和无源器件^[10-11]。

基于转移技术的单晶锗纳米薄膜(GeNM)不仅体现了柔性可机械弯曲的特性,还与当前的锗集成电路制造工艺有很好的兼容性。柔性电子器件通常需要工作在机械应力的条件下,因此需要依次测试柔性电子器件在不同弯曲条件下的射频特性。半导体器件建模方法有多种^[12-14],柔性PIN二极管建立不同弯曲半径下的等效电路模型不仅是柔性集成电路的设计和制造的需要,这也有助于研究不同应力条件对柔性单晶锗二极管射频特性的影响。光电二极管等器件已经应用在电子测量领域^[15],柔性半导体器件的弯

收稿日期:2015-10

* 基金项目:国家自然科学基金(61376082)、天津自然科学基金(13JCZDJC25900)资助项目

曲应变导致射频特性的变化在应变测量领域也显示出很大的应用潜力,不同弯曲状态下等效电路模型的建立将极大地深入柔性器件在应变测量方向的研究。

本文将根据测试得到的柔性单晶锗纳米薄膜 PIN 二极管在关态时不同弯曲半径下的射频特性,建立器件在关态下对应不同机械弯曲状态的等效电路模型。通过研究不同弯曲半径下射频特性参数的变化找出等效电路模型中对应的参数值的变化,从而分析得到施加的应力影响柔性单晶锗纳米薄膜 PIN 二极管射频特性的主要参数。

2 器件的制造和测试

柔性单晶锗纳米薄膜 PIN 二极管的制造过程是与柔性单晶硅纳米薄膜 PIN 二极管完全兼容的^[5-6]。实验首先在 4 inch 的具有 250 nm 厚的单晶锗模板层上淀积 250 nm 厚的氧化层,在氧化层的顶层淀积 250 nm 厚的单晶锗薄膜,形成锗绝缘体(GOD)晶片。然后在衬底的(001)晶向等离子干法刻蚀形成 n 型和 p 型区域,接着分别用磷离子和硼离子注入形成重掺杂的 p 区和 n 区。在 700 °C 氮气环境中退火 20 min,这种处理使接触电阻和表面电阻大幅减低从而减小了寄生效应^[5]。将样品至于氢氟酸溶液中腐蚀掉掩埋氧化层,释放出顶层的 GeNM,使其自然地与底层操作锗基以范德华力相结合。然后用去离子水将样品彻底清洗,随后将 GeNM 与表面旋涂着 SU-8 环氧基聚酯的 PET(厚度为 175 μm)紧密贴合。由于 SU-8 与 GeNM 之间的结合力比锗-锗键的结合力大,GeNM 层将翻转贴附在 PET 衬底上从锗基板上分离,最后在紫外线的曝光下将 SU-8 层固化^[6]。接下来形成金属电极和金属互联线,电极和互联金属的宽度分别大约是 100 μm 和 30 μm ,整个过程温度不超过 120 °C。P 区和 N 区之间的本征区域的长度为 5 μm 。制造好的锗二极管是由有两个相同的并联的 pin 沟道构成的^[5]。

柔性单晶锗 PIN 二极管制造完成后,对器件在关态下的射频特性进行了测试。将电路等效为一个二端口网络,用安捷伦 E8364A 网络分析仪和 GSG 探针测试二极管的射频特性。其中选择的匹配电阻为 50 Ω ,扫描频率从 0.045~20 GHz(步长为 199.55 MHz)。首先测得二极管平态时关态下的小信号散射参数(S-parameters),接着对二极管进行机械弯曲实验,将器件附着在不同弯曲半径的圆柱形装置上进行凸起弯曲测试,使器件的弯曲方向平行于 pin 沟道,选择的弯曲半径分别为 77.5 mm、28.5 mm 和 15.5 mm,从而得到这 3 个弯曲半径下的小信号散射参数。测得的结果如图 1 所示。

从平态到弯曲半径为 77.5 mm、28.5 mm 和 15.5 mm,所加的机械应力在逐渐加大,弯曲度在逐渐增大。由于机械应力是直接施加到沟道上的,弯曲应变对射频性能会产生比较大的影响,因此,沿着 PIN 方向的机械弯曲使二极管的性能和模型参数值都有比较大的变化。从图 1 可看

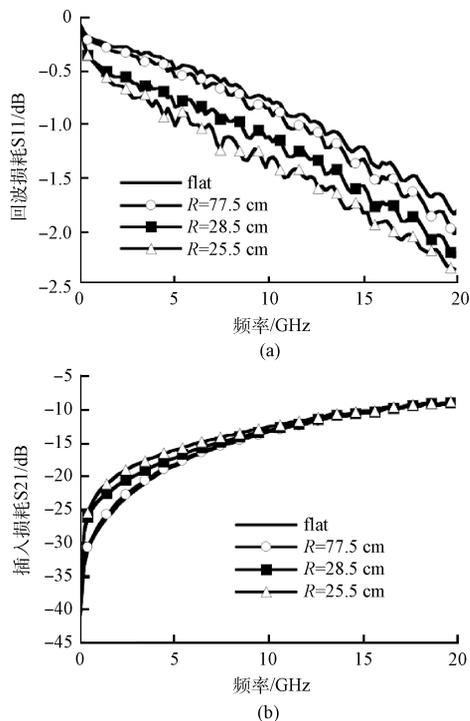


图 1 不同弯曲状态下的柔性单晶锗 PIN 二极管的射频特性曲线(关态)

到,插入损耗(S21)和回波损耗(S11)随着加在器件上的机械应力的加大呈现出单调变化的趋势。图 1(a)显示随着弯曲应力的逐渐加大,回波损耗的大小在逐渐增大。从图 1(b)得到,随着弯曲应力的逐渐变大,插入损耗的大小在低频时逐渐减小,而在高频时几乎保持不变。

3 等效电路模型的建立

为了深入分析机械应力对柔性二极管射频特性的影响,搭建了基于柔性单晶锗纳米薄膜 PIN 二极管结构的适用于关态的射频等效电路模型。由于制造的柔性二极管的结构和硬质二极管一样,只有衬底不同,所以选取的模型为硬质基板上通用的 PIN 二极管等效电路模型,如图 2 所示。制造的二极管主要形成 2 个结:p-n+结和 p+p-结, R_1 、 C_1 和 R_2 、 C_2 分别为这两个结的等效电阻和电容。 R_i 为本征电阻和串联寄生电阻的总和, C_{ps} 是在输入和输出连接金属之间的寄生电容, L_s 主要是互联金属引起的寄生电感^[11]。

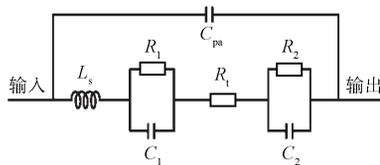


图 2 PIN 二极管反偏时的等效电路模型

根据此模型的结构在 ADS(Agilent Advanced Design

System) 软件中分别匹配测得的不同弯曲半径下的柔性单晶锗纳米薄膜 PIN 二极管的射频特性数据, 仿真设置和实验测试数据时的设置一样。通过调整模型中的各个参数可以得到平态, 弯曲半径为 77.5 mm、28.5 mm 和 15.5 mm 下的等效电路模型。模型与实验数据匹配结果如图 3 和 4 所示, 其中图 3 表示的是平态和弯曲半径为 77.5 mm 时模型的匹配情况, 图 4 表示的是弯曲半径为 28.5 mm 和 15.5 mm 时模型的匹配情况, 从图中可以得到在反向截止状态下, 柔性二极管的实验数据和等效电路模型的仿真结果在各个弯曲状态下均拟合的很好。仿真中不同弯曲状态下的模型的主要参数值如表 1 所示。

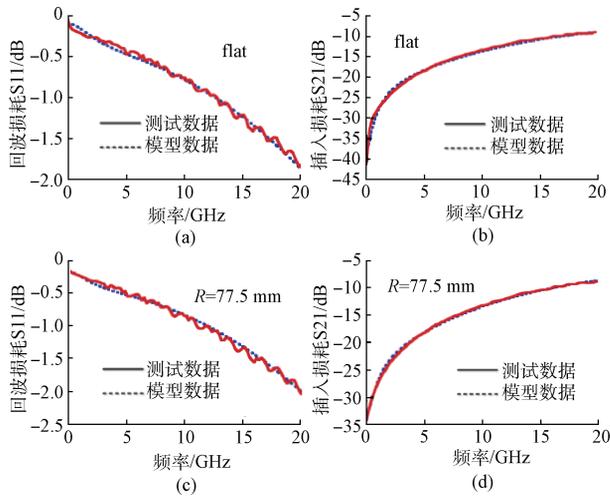


图 3 平态和弯曲半径为 77.5 mm 时的建模结果

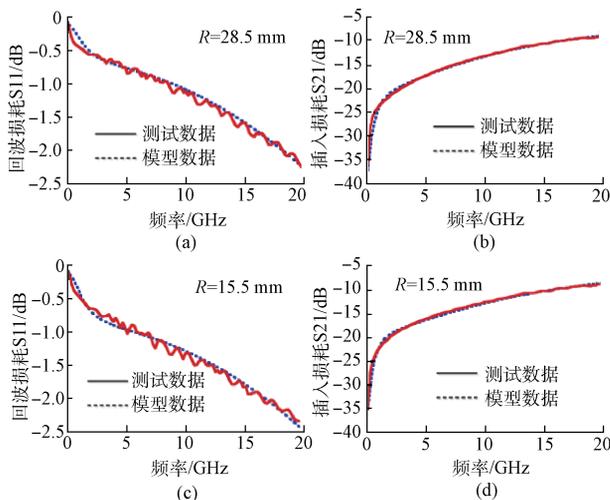


图 4 弯曲半径为 28.5 mm 和 15.5 mm 时的建模结果

由以上模型结构和建模结果可以看出, 在反向偏置下, $p-n+$ 结相对于 $p+p$ 结是主要的, pn 结反偏, R_1 值很大相当于开路, 而 C_1 逐渐加大, 这是由于机械弯曲导致 $p-n+$ 结等效电容的有效距离减小, 电容相对的有效面积增大, 所以

表 1 模型在不同弯曲状态下主要参数的值

弯曲半径/ mm	C_{pn}/pF	C_1/pF	R_2/Ω	L_s/nH	R_1/Ω
平态	0.02	0.051	1 024	1.30	176
77.5	0.02	0.072	988	1.23	158
28.5	0.02	0.12	720	1.11	144
15.5	0.02	0.156	595	1.05	110

导致 C_1 有明显加大的趋势。而 $p+p$ 结在 p 区, 等效电容 C_2 本身就很小, 因此没有明显的变化, 更多的是表现为等效电阻, 由于在机械弯曲下, 载流子空穴迁移率增加^[1], 并且有效长度变短, 因此 R_2 电阻值在逐渐减小。 R_1 是机械弯曲影响射频特性的主要因素, 在逐渐减小, 原因和 R_2 相似, 也是因为由于机械应力引起的压缩应变是沿着 PIN 方向的, 所以在压缩应力下, 本征区的载流子迁移率(主要是空穴迁移率)增加, R_1 的有效长度变短, 因此电阻值在逐渐减小。由于在此弯曲方向上, 输入和输出电极之间的有效距离没有什么变化, 因此 C_{pn} 并没有什么变化。而由于机械弯曲导致引起电感效应的金属之间有效相对的面积减小, 因此电感效应变小, L_s 减小。

4 结 论

本文介绍了柔性单晶锗 PIN 二极管的制备方法和反向偏置下对应不同弯曲状态的射频特性变化。根据在反向偏置下器件的结构和射频特性数据, 分别搭建了不同弯曲半径下的等效电路模型。通过调整在弯曲应力作用下模型的各个参数值, 在实践和理论上证明了模型中的内部电阻, 寄生电感, $p+p$ 结的电阻以及 $p-n+$ 结的电容为影响其射频特性的主要因素, 机械应力的加大使这些参数值发生单调性的变化。这对于柔性单晶锗二极管弯曲应变的研究和柔性集成电路的设计与制造都有很大的指导意义, 柔性器件的弯曲应变导致射频特性的变化应用也在应变测量领域显示出了很大的发展潜力。

参考文献

- [1] ZHANG K, SEO J H, ZHOU W, et al. Fast flexible electronics using transferrable silicon nanomembranes[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(14): 143001-143001-14.
- [2] ROGERS J A, LAGALLY M G, NUZZO R G. Synthesis, assembly and applications of semiconductor nanomembranes [J]. Nature, 2011, 477 (7362): 45-53.
- [3] 邓元, 张义政, 王瑶, 等. 柔性热电薄膜器件的研究进展[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2733-2746.
- [4] 张冬至, 童俊, 刘哲, 等. 基于电活性聚合物薄膜柔性器件的触觉传感特性[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2151-2158.

- [5] QIN G, ZUO K, SEO J H, et al. On the bending characterization of flexible radio-frequency single-crystalline germanium diodes on a plastic substrate[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(4): 043504-043504-4.
- [6] QIN G, YUAN H C, QIN Y, et al. Fabrication and characterization of flexible microwave single-crystal germanium nanomembrane diodes on a plastic substrate[J]. Electron Device Letters, IEEE, 2013, 34(2): 160-162.
- [7] KIM J, BANKS A, CHENG H, et al. Epidermal electronics with advanced capabilities in near-field communication[J]. Small, 2015, 11(8): 906-912.
- [8] 孙一心, 钟莹, 王向鸿, 等. 柔性电容式触觉传感器的研究与实验[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(12): 1394-1400.
- [9] MA Z. An electronic second skin[J]. Science, 2011, 333(6044): 830-831.
- [10] QIN G, YUAN H C, CELLER G K, et al. Flexible microwave PIN diodes and switches employing transferrable single-crystal Si nanomembranes on plastic substrates[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42(23): 234006-234006-9.
- [11] QIN G, YUAN H C, CELLER G K, et al. RF model of flexible microwave single-crystalline silicon nanomembrane PIN diodes on plastic substrate[J]. Microelectronics Journal, 2011, 42(3): 509-514.
- [12] WILLIAMS T, SAINI R, MATHIAS S, et al. 非线性器件的建模与测试[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(8): 14-20.
- [13] 李树, 陈潇, 段晓萌, 等. 基于集总电路元件电磁特性的建模及分析[J]. 磁性材料及器件, 2014, 45(3): 43-46.
- [14] 何伟铭, 宋小奇, 甘屹, 等. 传感器校正的优化灰色神经网络建模方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 504-512.
- [15] 王阳恩, 肖靖. 基于单片机的光电无接触转速测量仪的设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(9): 83-86.

作者简介

王飞, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性微波电子器件的制造和建模。

E-mail: wangfei0925@tju.edu.cn

秦国轩, 1984 年出生, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为柔性微波电子器件与电路的设计、建模与制造。

E-mail: gqin@tju.edu.cn

NI 推出 802.11ax 无线测试解决方案

WLAN 测量套件为支持新无线局域网标准草案的主要特性而更新

2016 年 6 月 16 日-NI(美国国家仪器, National Instruments, 简称 NI)作为致力于为工程师和科学家提供解决方案来应对全球最严峻的工程挑战的供应商, 今日宣布推出 WLAN 测量套件抢先体验版, 以支持 IEEE 802.11ax(草案 0.1)高效率无线标准草案。WLAN 测量套件结合了 NI RF 矢量信号收发仪(VST), 帮助工程师在 802.11 物理层标准进行重大修改后仍能够有效地测量 802.11ax 设计的性能。

WLAN 测量套件为研究人员、工程师和技术专家提供了强大且灵活的功能, 帮助生成和分析 802.11a/b/g/n/j/p/ac/ah/af 等各种 802.11 波形。该测量套件专门针对 802.11ax 进行了更新, 这些用户将可大幅加快其 802.11ax

设备的研发工作。软件支持 802.11ax 的主要特性, 包括更窄的子载波间距、1024-QAM 和多用户正交频分多址接入(OFDMA)。更新后的测量套件还包含了 LabVIEW 系统设计软件范例代码, 以帮助工程师更快速、更轻松地实现 WLAN 测量自动化。

NI 基于平台的方法使得工程师只需通过简单的软件更新即可更新现有 PXI RF 测试系统, 以确保支持 802.11ax 设备测试, 而且将随着 802.11ax 标准化进程的演变而不断更新。工程师可以利用这个更智能的 RF 测试方法来降低测试成本, 更好地为未来的无线连接和蜂窝标准化项目(比如 5G)做好准备。