

特约专栏

基于 FIB-SID 技术的三维金属无源电感制备与测试

毛逸飞¹, 王志强^{1,2}, 赵路睿¹, 吴文刚¹, 徐 军³

(1. 北京大学 微米/纳米加工技术国家重点实验室, 北京 100871)

(2. 北京大学深圳研究院, 广州 深圳 518000)

(3. 北京大学 电子显微镜实验室, 北京 100871)

摘 要: 重点研究了聚焦离子束的相关原理和应用。利用聚焦离子束应力引入致形变(Focused Ion Beam Stress-Introduced Deformation, FIB-SID)技术与常规微加工工艺相结合, 制备微型金属无源螺旋电感的设计方法和工艺流程, 并对其电学性能进行初步高频测试。首先在 SOI(Silicon-on-Insulator)基片上通过光刻、溅射以及各项同性刻蚀等常规工艺制得悬浮的金属悬臂梁, 再利用 FIB 刻蚀原理进行应力引入, 通过控制注入离子剂量、FIB 应力引入的次数、FIB 扫描的间距等试验参数制得不同尺寸结构的三维螺旋金属无源电感。最后, 采用安捷伦网络分析仪与微波探针台, 使用 GSG 结构及相应的去嵌方法, 对微型金属螺旋管电感进行了高频测试。得出了三维螺旋微纳电感的电感值、品质因子、电压驻波比、回波损耗随频率变化关系。

关键词: FIB-SID; 微型金属无源螺旋电感; 高频测试

中图分类号: TN 405 文献标识码: A 文章编号: 1674-3962(2013)12-0742-04

Fabrication and Testing of 3D Metal Passive Inductor Based on FIB-SID Technology

MAO Yifei¹, WANG Zhiqiang^{1,2}, ZHAO Lurui¹, WU Wengang¹, XU Jun³

(1. National Key Laboratory of Micro/Nano Fabrication Technology, Peking University, Beijing 100871, China)

(2. Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518000, China)

(3. Electron Microscopy Laboratory, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The combination of Focused Ion Beam Stress-introduced Deformation (FIB-SID) and micro-fabrication technology is focused on, and the fabrication process and test methods of metal passive micro-helix inductor are described. First of all, the suspended metal cantilever is made on SOI(Silicon-on-insulator) by photolithography, sputtering and isotropic etching. Then, the stress is introduced to fabricate 3D metal passive micro-helix inductor with different sizes by controlling ion dose, FIB stress introduced time, FIB scanning pitch. Finally, the metal passive micro-helix inductor is tested at high frequency with the help of Agilent network analyzers and microwave probe station using GSG test structure and de-embedding process. The relationship between the Inductance value, quality factor, voltage standing wave ratio, return loss of micro-helix inductors against frequency is obtained.

Key words: FIB-SID; metal passive micro-helix inductor; high frequency test

1 前 言

近些年来, 片上系统集成在阻抗匹配网络、模拟和射频系统中起到重要作用。其中重要的金属无源器件——微纳金属无源电感的发展趋势是高频化、宽带

化、微小型化, 而传统的加工工艺在制备微米以及微米以下尺度结构时已有瓶颈。聚焦离子束技术作为一种基于束的纳米加工方法, 被广泛应用在集成电路芯片制造和失效分析^[1]以及微/纳机电系统(Micro-/Nano-Electro-Mechanical Systems, 简称 MEMS/NEMS)等领域^[2]。北京大学吴文刚教授在先期工作中提出了 FIB 应力引入致形变(FIB-Stress Induced Deformation, FIB-SID)技术^[3-4], 利用 FIB 在微米/纳米结构上引入纳米尺度的应力层, 从而使其发生三维形变。

本文中, 我们详细介绍了通过 FIB-SID 技术与常规微加工工艺相结合, 制备多样化微纳金属螺旋电感的制

收稿日期: 2013-08-13

基金项目: 国家级先进制造预研项目; 国家自然科学基金项目(50775001); 国家“863 计划”专题课题(2009AA01Z228)

第一作者: 毛逸飞, 男, 1989 年生, 博士研究生

通讯作者: 吴文刚, 男, 1966 年生, 教授, 博士生导师

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2013.12.05

备过程，重点分析了通过控制相关工艺参数制备出不同尺寸、不同弯曲方向的三维螺旋电感，最后通过 GSG 结构以及去嵌操作测得电感的高频特性。

2 基于 FIB-SID 技术的三维金属螺旋电感制备

该实验用的金属薄膜悬臂梁用作高频天线和电感，因此使用了 SOI 片，将器件层硅腐蚀干净之后，上层的金属元件可以利用 BOX 层的二氧化硅做到互相之间的电学隔离。金属薄膜悬臂梁的制备过程如图 1 所示，第一步在 SOI 硅片表面光刻，制备测量用的 PAD 和悬臂梁的平面图形。第二步使用各向异性的 RIE 刻蚀硅，最后使用各项同性的 RIE 刻蚀硅，其刻蚀过程中的横向腐蚀将金属条悬浮。

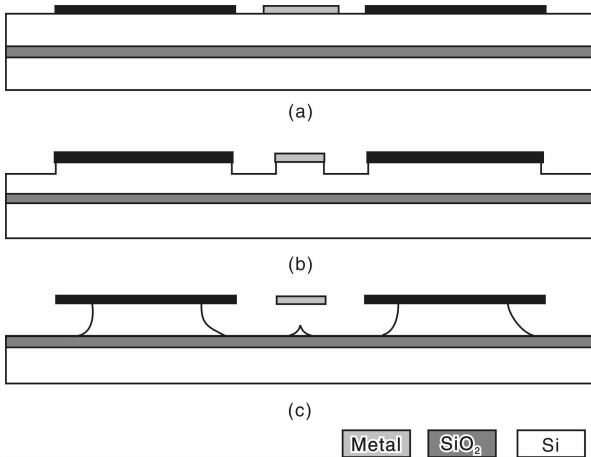


图 1 制作金属薄膜悬臂梁的流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the process of metal film cantilever

值得注意的是，在 FIB 加工的时候往往不把二氧化硅腐蚀干净，而是部分腐蚀，仅仅使其悬浮。这个时候在 FIB 加工的过程中，样品导电，从而不会出现电荷吸附现象，并且更加有利于 SEM 的原位观测。结构制备完成之后再次使用 RIE 腐蚀将器件层腐蚀干净，从而实现电学隔离。RIE 过程对 FIB 制得的金属条形状结构没有影响。

其中图 1a 在 SOI 片上光刻从而定义悬臂梁图形，

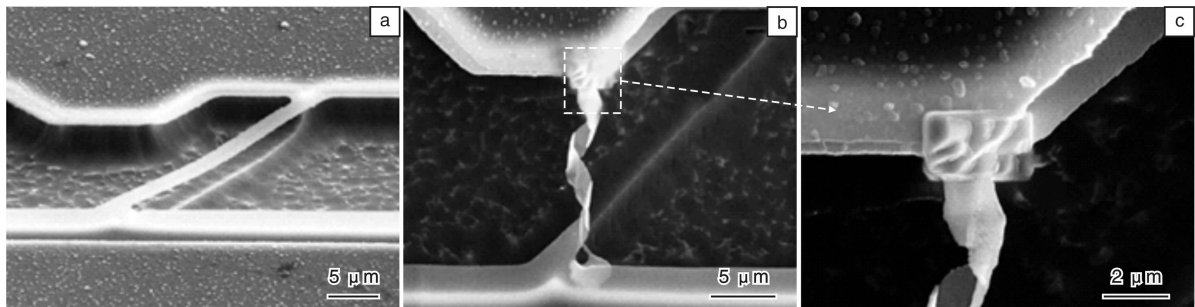


图 3 三维螺旋电感加工过程

Fig. 3 SEM picture of fabrication process of 3D helix

图 1b 各向异性腐蚀 SOI 片 BOX 层中的 Si，图 1c 各向同性腐蚀 SOI 片 BOX 层中的 Si，使悬臂梁电学绝缘。

图 2a 为在垂直于样品方向俯视角度的 FIB 加工悬臂梁的示意图。图 2a 中灰色的区域为在单端固定悬臂梁上串行扫描的区域，其上的数字序号表示扫描的顺序。该图仅为示例所用，真实加工中悬臂梁的长度和 FIB 扫描次数远大于图中示例。图 2b 为悬臂梁其中的一节，灰色为辐照区域，各几何参数标于图中，图 2c 为相应的侧视图，其中结构弯曲角度为负时就是 FIB 致使结构向下弯曲。因此，经过 t 次的 FIB 扫描之后，加工出的螺旋圈数为：

$$n = \frac{(t \cdot |\alpha|)}{2\pi}$$

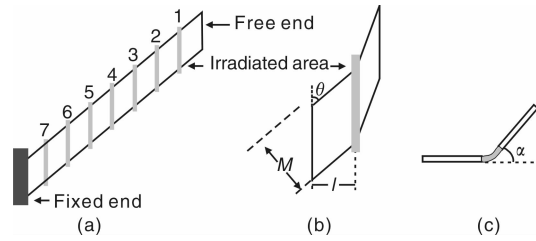


图 2 使用 FIB 制备螺旋的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of FIB process of helix

因此螺旋的螺径(直径)为：

$$D \approx \frac{(t \cdot l)}{n\pi} = \frac{2l}{|\alpha|}$$

螺距为：

$$P = \frac{\pi D}{\tan \theta} = \frac{2\pi l}{|\alpha| \cdot \tan \theta}$$

可以通过控制 FIB 的辐照剂量，也就是单次 FIB 应力引入所致结构弯曲的角度 α 、FIB 应力引入的次数 t 、FIB 扫描的间距 l 以及 FIB 扫描倾斜的角度 θ 制作出有不同参数的螺旋结构。

制造过程如下所述，在 FIB 加工出三维螺旋结构之后，在三维螺旋自由端利用聚焦离子束 Pt 淀积技术，实现三维螺旋结构与 PAD 之间的电学连接，即形成了三维螺旋管电感结构。

如图 3 所示，展示了由悬臂梁(图 3a)到三维螺旋

管电感(图 3b)的过程,图 3c 为电学连接部分放大图。图 4 为利用不同的 FIB 加工参数(离子注入剂量)对同一尺寸悬臂梁(宽 $3.9\ \mu\text{m}$, 长 $41\ \mu\text{m}$)进行加工的结果,所加工得到的三维螺旋管电感的直径为 $1.8\ \mu\text{m}$,

$2.4\ \mu\text{m}$, $3.5\ \mu\text{m}$ 。

3 金属无源电感的测试

测试使用的螺旋电感如图 5 所示,加工成三维螺旋

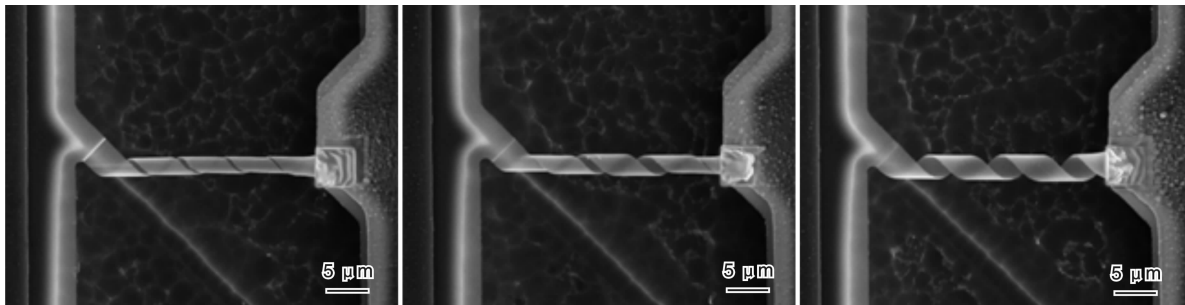


图 4 不同尺寸向下弯曲螺旋样品图

Fig. 4 Sample drawing of down-bending helix with different sizes

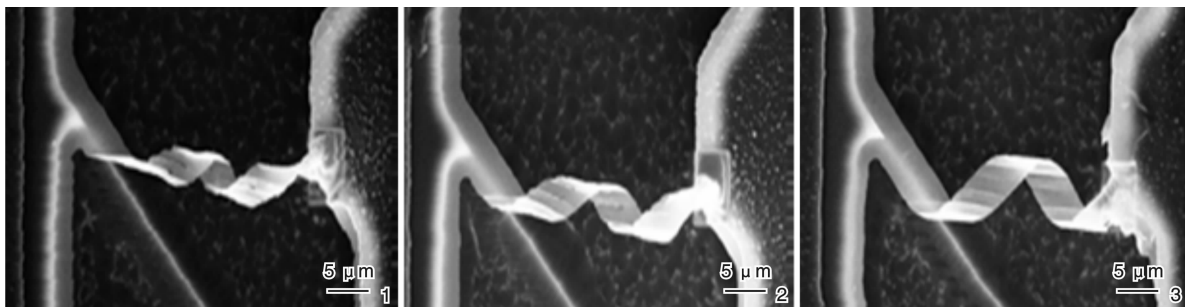


图 5 不同尺寸测试用三维螺旋微纳电感

Fig. 5 3D micro-helix inductor for Test with different sizes

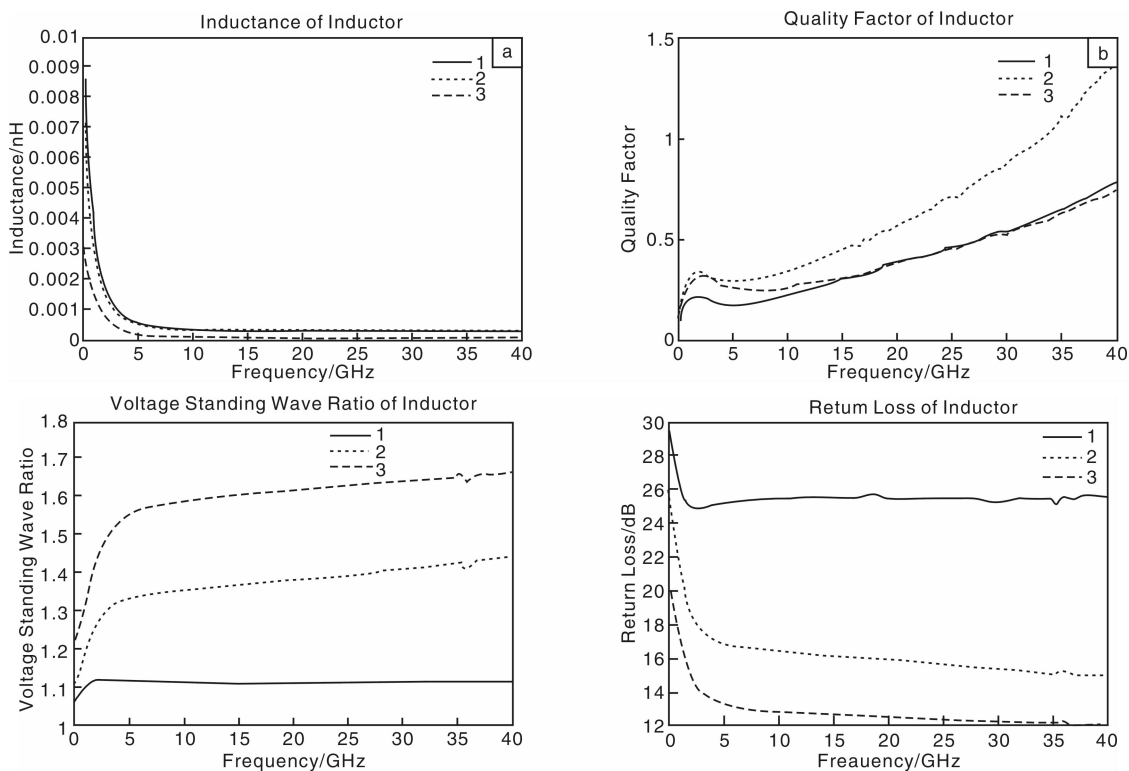


图 6 测得的三维螺旋微纳电感的电学特性随频率变化关系: (a) 电感值, (b) 品质因子, (c) 电压驻波比, (d) 回波损耗

Fig. 6 The electrical properties of the measured 3D micro-helix inductors against frequency: (a) inductance L , (b) quality factor Q , (c) voltage standing wave ratio, and (d) return Loss

微纳电感的悬臂梁的长度为 $41\text{ }\mu\text{m}$, 宽度为 $3.9\text{ }\mu\text{m}$, 厚度为 100 nm 。三维螺旋微纳电感 1, 2, 3 的刻蚀浓度分别为 $5.84 \times 10^{17}\text{ cm}^{-2}$, $4.79 \times 10^{17}\text{ cm}^{-2}$, $3.46 \times 10^{17}\text{ cm}^{-2}$, 螺距分别为 $7\text{ }\mu\text{m}$, $10\text{ }\mu\text{m}$, $11\text{ }\mu\text{m}$, 直径分别为 $4.2\text{ }\mu\text{m}$, $4.8\text{ }\mu\text{m}$, $5.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

采用安捷伦网络分析仪与微波探针台, 使用 GSG 结构及相应的去嵌方法, 对微型金属螺旋管电感进行了测试。所用网络分析仪测试频率为 $100 \sim 40\text{ GHz}$, 频率间隔为 50 MHz 。探针台探针间隔为 $150\text{ }\mu\text{m}$ 。

最终测得的上述 3 种电感的电学特性如图 6 所示, 得到了初步高频性能。实验测试在高频情况下电感值在 1 pH 甚至更小, 品质因数为 1, 在 40 GHz 时的电压驻波比和回波损耗都比较理想。

4 结 语

本文成功地利用 FIB 与常规微加工工艺相结合, 通过控制相应参数, 制备出多种结构的微型金属无源电

感, 其特征尺寸小于 $10\text{ }\mu\text{m}$, 螺旋直径在 $1 \sim 5\text{ }\mu\text{m}$ 不等。并通过 GSG 结构以及去嵌操作对其特性进行测试, 在高频情况下测得的电感值为 1 pH , Q 值为 1, 为后续解决微纳元件和功能结构的单片集成或系统集成的问题提供了基础。

参考文献 References

- [1] Atsuhito S, Tadao I. Growth of Diamond Thin Films by Electron Assisted Chemical Vapor Deposition[J]. *Applied Physics Letters*, 1985, 46(2): 146–147.
- [2] John M. Focused Ion Beam Technology and Applications[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1987, 5(2): 469–495.
- [3] Xia L, Wu W G, Xu J, et al. 3D Nanohe-Lix Fabrication and 3D Nanometer Assembly by Focused Ion Beam Stress-Introducing Technique[R]. Istanbul: Turkey, MEMS, 2006.
- [4] Lai X H, Ding F, Xu Z G, et al. Suspended Nanoscale Solenoid Metal Inductor with Tens-Nh Level Inductance[R]. Tucson: AZ, MEMS, 2008.

美科学家研制出体光伏材料

据物理学家组织网近日报道, 美国科学家研制出了一种体光伏材料, 用其制造的太阳能电池板成本低、效率高。40 多年来, 科学家们一直希望能研制出体光伏材料, 其除了能利用紫外线的能量外, 还能利用可见光和红外线的能量, 新材料的问世终于让他们如愿以偿。

新材料由宾夕法尼亚大学和德雷克赛尔大学的科学家携手研制而成, 其有 3 大突出优势。首先, 它制造出的太阳能电池板比目前占据市场主流的硅基太阳能电池板更薄。第二, 其原材料比目前高端薄膜太阳能电池所用材料更便宜。第三, 这种材料是铁电材料, 这意味着其极性可打开也能关闭, 有助于太阳能电池材料超越目前光电转化效率的理论限制。

太阳能电池板低效的部分原因在于, 从太阳那儿收集到的粒子进入太阳能电池后会四处散落。如果想让所有粒子都朝一个方向流动, 需要多层不同的引导材料, 粒子每通过一层材料都会损失一点, 从而降低了太阳能电池的能效。新式材料制成的太阳能电池引导层更少, 因此能量损失更小; 而且, 铁电材料引导粒子所耗费的能量也更少。

科学家们历时 5 年才最终设计出这种新式材料, 其由铈酸钾和铈酸钡镍组合而成的钙钛矿晶体构成。结果表明, 其性能远胜目前的铁电材料且能吸收 6 倍多的太阳能。研究人员表示, 进一步完善和调整该材料的组成将进一步提高能效。

德雷克赛尔大学材料科学和工程学的乔纳森·斯潘尼尔表示: “新材料令人惊奇, 因为其由廉价无毒且含量丰富的元素组成, 不像目前高效薄膜太阳能电池所使用的复合半导体材料。”

研究人员使用一套工具证明, 新材料能让能量朝一个方向移动而非在层间交错而行, 因此可将能量损失降低到最小。这种能力被称为体光伏效应, 自从 20 世纪 70 年代就为科学家们所知, 但直到现在, 科学家们只在紫外线下观察到这种效应, 而其实, 太阳光的大多数能量位于可见光和红外线光谱内。借助新材料, 他们终于在可见光和红外线内观察到了这一效应。

而且, 他们还证明, 通过调整新材料组成成分的百分比, 能减少该材料的能带隙。斯潘尼尔说: “这种材料的能带隙位于紫外线范围内, 但只需增加 10% 的铈酸钡镍, 就会让其能带隙进入可见光范围内并接近太阳能转化效率的理想值。”

(From <http://www.cutech.edu.cn/cn/gwkj/2013/12/1387215648195255.htm>)