

# 无线通讯用硅基微小天线

郭兴龙, 金妍, 刘蕾, 欧阳炜霞, 赖宗声\*

华东师范大学微电子电路与系统研究所, 上海 200062

\* E-mail: [zslai@ee.ecnu.edu.cn](mailto:zslai@ee.ecnu.edu.cn)

收稿日期: 2007-05-02; 接受日期: 2007-11-11

国家自然科学基金(60676047)、上海应用材料研究与发展基金(06SA11)资助项目

**摘要** 采用微电子加工工艺在高电阻率硅片上设计和制备了微小天线, 并对其进行了仿真和测试, 模拟和测试结果比较吻合, 测试得到天线为水平和垂直双向辐射, 天线的增益约为 2.5 dBi, 谐振频率约为 3 GHz, 能够满足通讯系统中天线系统的要求, 并且文章对天线的制作工艺进行了详细的介绍, 此天线有利于天线集成和与 CMOS 工艺等的兼容.

**关键词**

微小天线  
高电阻率硅片  
IC 工艺

无人驾驶飞机、卫星等飞行器的雷达和通讯系统需要许多天线系统, 而且飞行器对承载物有着严格的重量和尺寸限制. 随着微型无人机、微纳卫星的出现, 机载或星载电子系统的尺寸越来越小, 因此要求天线尺寸小、重量轻. 此外, 当工作波段进入毫米波和亚毫米波以后, 天线结构尺寸变得极其细小, 常规的精密机械加工技术已经不太适用. 为了与微电子技术相兼容, 要求用硅或砷化镓等半导体制备天线, 这不仅有利于系统集成, 而且单晶硅也是一种具有良好的机械特性的基材<sup>[1]</sup>. 移动通信中无线收发芯片尺寸的缩小也迫切需要新型微型天线, 例如, Ericsson(爱立信)公司的单芯片蓝牙组件<sup>[2]</sup>, 其尺寸仅为 9 mm×9 mm. 以往以 PCB 作为天线基底材料大大限制了频带宽度. Hwang 等<sup>[3]</sup>在 GaAs 衬底上制备获得了容易集成的微小狭缝天线和宽频带. Lee 和 Harackiewicz<sup>[4]</sup>利用高阻抗介质基底获得了小的天线尺寸.

共面波导狭缝天线为微波器件提供了宽波段、良好的阻抗匹配低辐射损耗和易于与 MMICs(microwave monolithic integrated circuits)集成等明显优势<sup>[5]</sup>. 鉴于此, 本文首次以高阻硅片为衬底, 借助于微电子工艺技术, 运用微带缝隙辐射机理完成了硅基微尺度天线的设计和构造, 对天线的集成具有重要的参考价值.

## 1 天线的设计和制备工艺

### 1.1 天线设计

图 1 为天线结构示意图. 天线通过环缝 S 切断传导电流, 产生位移电流激励场, 对空间辐

射电磁波. 这种天线可以用分布在缝上的等效环流来分析<sup>[6]</sup>, 环缝天线产生线极化场, 其电流分布如图 2 所示, 这种共平面微带缝隙天线的优点在于: 能够产生双向辐射; 用宽缝作为辐射元带宽较宽, 寄生辐射和表面波激励均较弱, 对于天线辐射效率影响较小; 馈线和辐射缝隙可以在同一平面上, 是比较合适的硅基集成天线的候选形式, 选用 1/4 圆形环结构可在边长 $(S+2l)$ 满足 $\lambda/2$  辐射谐振条件下具有较小的面积, 并且有利于获得最佳的尺寸带宽积. 两边对称的旁枝缝线 $l$ 的增减可调节有效谐振电长度, 其内槽 $a$ 对天线的输入阻抗起到了宽带匹配的作用. 其谐振频率 $f_r$ 可以由公式(1.1)近似给出. 式中,  $c$ 为光速,  $\epsilon_e$ 为等效介电常数,  $S_T$ 为辐射谐振槽缝总长度 $S_T = S + 2l$ .

$$f_r = \frac{c}{2S_T \sqrt{\epsilon_e}} \quad (1.1)$$

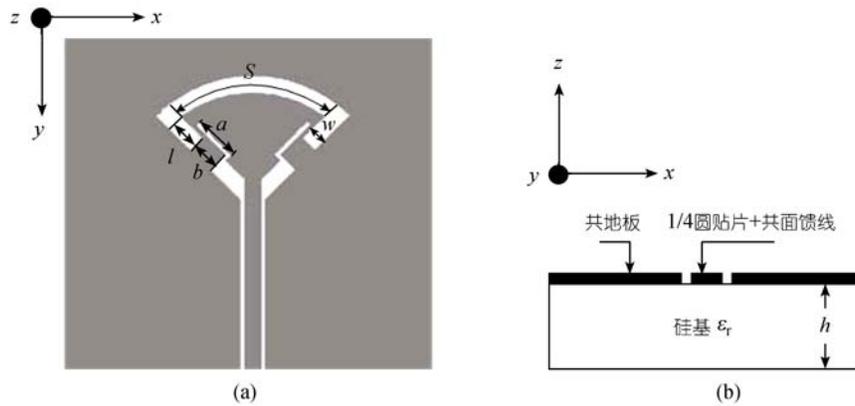


图 1 天线的结构示意图

$S=18.8 \text{ mm}$ ,  $l=3.6 \text{ mm}$ ,  $w=2 \text{ mm}$ ,  $a=5.5 \text{ mm}$ ,  $b=3.2 \text{ mm}$

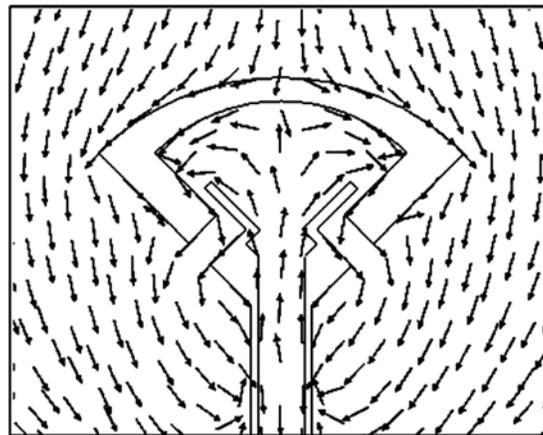


图 2 天线电流分布图

## 1.2 天线的制备工艺过程

制备微型天线的基片采用厚 0.5 mm、硅片的介电常数 $\epsilon_r=11.9$ 、高电阻率( $\rho > 1000 \Omega\cdot\text{cm}$ )的本征<111>抛光硅片及新型材料——多孔硅, 基于微电子加工平台兼有加工精度高和IC集成的优势. 工艺步骤如下: 首先检查表面质量(表面应平整、光亮、无机械损伤), 其次用一号液(27% $\text{NH}_4\text{OH}$ :30% $\text{H}_2\text{O}_2$ :去离子水=1:2:5)、二号液(37% $\text{HCl}$ :30% $\text{H}_2\text{O}_2$ :去离子水=1:2:8)清洗硅片; 然后在氧化温度 1100℃, 氧气流量 500 ml/min下, 先干氧氧化 10 min, 再进行湿氧氧化 45 min, 最后干氧氧化 10 min. 测得氧化层的厚度为 1.1  $\mu\text{m}$ ; 为了形成天线的金属贴片, 采用真空蒸发淀积铬金膜, 铬的厚度为 0.05  $\mu\text{m}$ , 金的厚度为 0.15  $\mu\text{m}$ . 继续进行正胶光刻掩模板, 前烘 80℃、15 min, 曝光时间 26 s, NaOH显影 45 s, 坚膜 110℃、30 min. 光刻完打底膜, 再用等离子体的方法去掉仍可能存在的薄层胶(氧气流量 30 ml/min, 电压 900 V, 时间 30 s), 使后道工序选择性电镀金的粘附性更好; 由于金在S波段趋肤深度约在 1.5  $\mu\text{m}$ 左右, 为了保证电路的损耗尽可能小, 至少应使膜厚为金属材料趋肤深度的 3~5 倍, 因为真空蒸发膜的厚度很薄, 故采用电镀的方法加金厚至 3  $\mu\text{m}$ , 电镀完后, 用丙酮剥离正胶; 最后采用负胶再次光刻掩模板. 先采用 Au 腐蚀液( $\text{KI}:\text{I}_2:\text{H}_2\text{O}=20\text{g}:6\text{g}:100\text{ml}$ )腐蚀金, 时间 30~45 s再用铬腐蚀( $\text{K}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]:\text{KOH}:\text{H}_2\text{O}=30\text{g}:5\text{g}:100\text{g}$ )腐蚀铬, 时间 30 s~1 min. 腐蚀好铬金后去胶, 得到硅基天线. 该天线采用 SMA 连接头馈电, 结构参数由 Ansoft 公司的多层平面电磁场仿真软件 Ensemble 8.0 进行模拟优化. 制备所得硅基天线实物如图 3(a), 由于 SMA 接头与硅基共面波导的连接实现比较困难, 这里我们选用可应用于微波元件引线连接的导电胶. 为验证本设计的正确性, 在微波复合介质(TP)单面覆铜箔基片( $\epsilon_r=11.6$ ,  $h=0.5 \text{ mm}$ )上制作了同样的天线以进行比较. 由于共面波导的连接实现比较困难, 这里选用可应用于微波元件引线连接的导电胶, 如图 3(b).

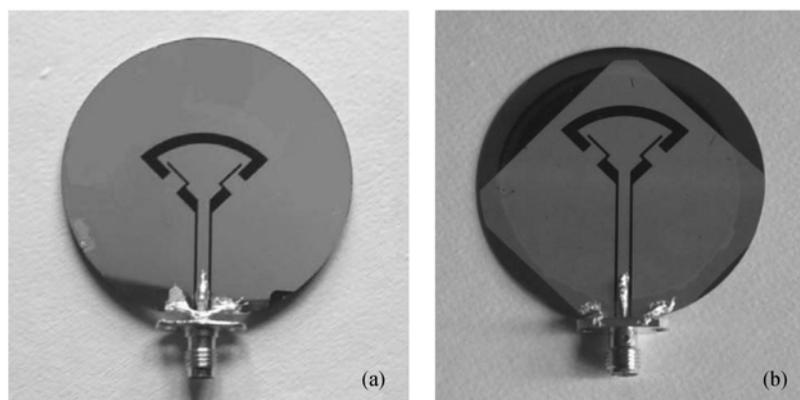


图 3 制备所得硅基天线实物图

(a) 高阻硅基; (b) 复合介质(TP)

## 2 天线的模拟和测试结果

图 4 给出了天线的 $S_{11}$ 值, 可以看出高阻硅基(high resistivity silicon-HRS)天线中心频率实测值和模拟值比较吻合, 而在 $S_{11}$ 幅值方面的差异主要有以下两个原因: 1) 由于工艺加工条件

限制金属层厚度不够, 未完全满足频段 3 GHz 左右膜厚趋肤深度的要求; 2) 导电胶特性不理想, 造成接头处存在附加的阻抗失配和接触损耗. 而复合介质基片(铜箔厚 18  $\mu\text{m}$ )天线消除了以上两个因数的影响, 能够获得较佳的驻波比(VSWR). 由于硅基天线极易损坏, 由介质基片天线替代进行辐射特性测试. 由天线理论可知, 两者方向图应该基本一致, 而前者增益可能稍低于后者. 天线测试平台如图 5, 采用 HP 公司的 8408B 网络分析仪(0.5~18 GHz)测量了天线的  $S_{11}$  参数; 从图 4 的  $S_{11}$  的测试曲线可以看到在以微波复合介质(TP)单面覆铜箔为基片天线的谐振频率在 2.86 GHz, 以高阻硅为基底材料的天线的谐振频率在 2.96 GHz, 它们 10 dB 带宽均大于 20 MHz, 满足无人驾驶飞机、卫星等飞行器的雷达和天线通讯系统要求. 采用 ADVANTEST 公司 R3767A 网络分析仪(0.04~8 GHz)测量了天线的辐射特性, 仪器见图 5. 对天线进行测试时, 在收、发天线之间地面上的适当位置处放置多个角锥形吸收材料, 用以消除地面反射的影响. 同时放置收发天线间距离  $d$  大于  $10\lambda$ , 为使收发天线之间的辐射耦合减小到可以忽略的程度, 取  $d \geq 2D^2/\lambda$ ,  $\lambda$  为天线的谐振波长,  $D$  为测试中所用的最大天线的口径; 为避免地面反射的影响, 设置  $H \cdot D \geq d \cdot \lambda$ , 其中  $H$  为测试平台与地面间的高度. 图 6 给出了以高阻硅为基底材料的天线的  $H$  面辐射方向图, 从图中可以看出, 天线为双向辐射, 天线的增益约为 2.5 dBi, 谐振频率约为 3 GHz. 实测的天线方向图和仿真的有所差别, 这与测试支架的金属连接件和接线电缆的尺寸比被测天线大很多有直接的关系. 再者, 周围物体的反射、阻抗失配也在一定程度上影响了天线效率的测试值. 由于被测天线尺寸远小于连接的仪器的大小, 两者之间产生地电磁耦合也对天线的辐射特性产生影响, 并且天线加工时引起其本身结构的少许不对称性导致电流传播分布沿缝隙不均匀性也会引起天线辐射方向图不对称.

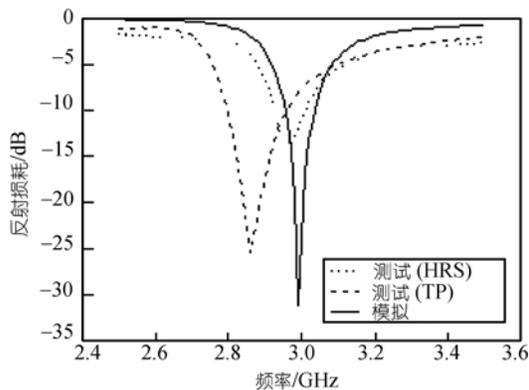
图 4 天线  $S_{11}$  实测与仿真曲线比较图

图 5 测试用的 ADVANTEST R3767A 矢量网络分析仪

### 3 结论

本文采用微电子加工工艺在高电阻率硅片上设计和制备了微小天线, 对天线的模拟和测试结果比较吻合; 测试得到天线为双向辐射, 增益约为 2.5 dBi, 谐振频率约为 3 GHz, 此天线

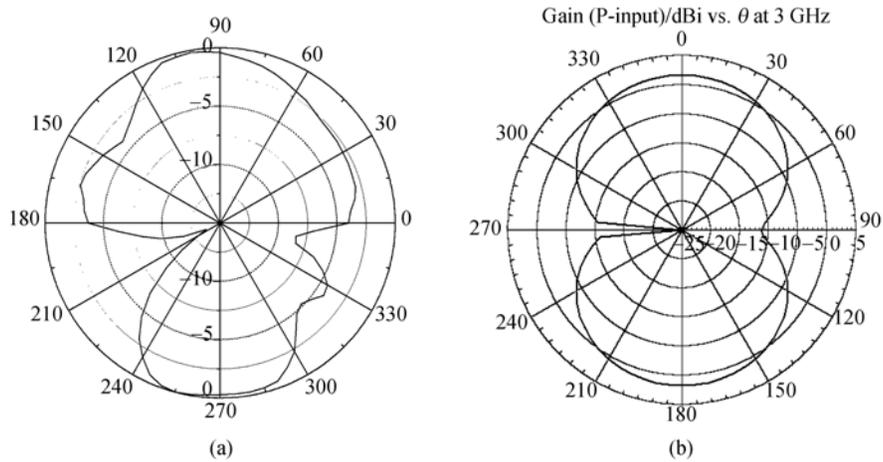


图6 天线H面辐射方向图  
(a) 测量结果; (b) 仿真结果

的设计制造有利于天线的集成和与 CMOS 工艺等的兼容, 并且兼有加工精度高和 IC 集成的优势. 文章还重点对天线的制作工艺进行了详细地介绍, 对于以后此类研究具有一定的参考价值.

## 参考文献

- 1 Hector J, De Los S. RF MEMS Circuit Design for Wireless Communications. Boston: Artech House, 2002. 6—7
- 2 刘海文, 石振华. 蓝牙技术及其系统原理. 电信技术, 2000, 9: 6—9
- 3 Hwang J H, Jung S H, Kang S W, et al. Compact wound-type slot antenna with wide bandwidth. IEEE Micro Wirel Compon Lett, 2004, 14(12): 569—571 [DOI](#)
- 4 Lee B, Harackiewicz F J. Miniature microstrip antenna with a partially filled high-permittivity substrate. IEEE Trans Antenn Propag, 2002, 50(8): 1160—1162 [DOI](#)
- 5 Bhobe A U, Holloway C L, Picket M M. Coplanar waveguide fed wideband slot antenna. IEEE Electron Lett, 2000, 36(16): 1340—1342 [DOI](#)
- 6 鲍尔 I J, 布哈蒂亚 P. 微带天线. 梁联倬, 寇廷耀, 译. 北京: 电子工业出版社, 1984. 211—212