

## Attenuation Mechanisms of Microstrip Antenna on Silicon\*

YAO Keming, LIU Xiaoming\*, ZHU Zhonggan ZHAO Mingrui CAO Shijian

(School of Mechatronics Engineering of University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Microstrip antennas based on silicon exist the problems of high-loss, low efficiency, and low gain. Five main parts contribute to the results: 1. The conductor losses of the antenna patch and matching microstrip; 2. Medium dielectric loss; 3. Surface wave loss; 4. Resistive loss of the semiconductor substrate; 5. Interface loss caused by carrier movement at the interface of substrate and insulating layer. Based on the analysis of the attenuation mechanism of each kind of loss, the corresponding loss calculation model and its proportion in the total loss are studied. And proposed effective ways to reduce losses. The experimental results show that the method of growth a layer of polycrystalline silicon thin-film on the substrate can effectively reduce the losses. The substrate is high-resistance silicon mixed with low dielectric constant substrate. All these can be done by micro-mechanical (MEMS) technology. This silicon based microstrip antenna element efficiency can reach 87%, gain up to 8 dB.

**Key words:** microstrip antenna; MEMS antenna; silicon substrate antenna; attenuation

EEACC: 5270

## 硅基微带天线损耗机理分析\*

姚科明, 刘晓明\*, 朱钟淦, 赵明锐, 曹始建

(电子科技大学机械电子工程学院, 成都 611731)

**摘要:** 硅基微带天线存在损耗大、效率低、增益不足等问题。其成因在于以下五种损耗: 1. 金属贴片及匹配微带线的导体损耗。2. 介质的介电损耗。3. 表面波损耗。4. 半导体基底的电阻性损耗。5. 由基底与绝缘层交界面上的载流子运动导致的界面损耗。在深入分析各种损耗的形成机理的基础上, 研究了相应损耗的计算模型及其在总损耗中所占的地位, 并提出了降低损耗的有效途径。实验结果显示, 采用微机械(MEMS)工艺, 在高阻硅与低介电常数介质的混合衬底上, 生长一层多晶硅薄膜的方法, 可有效降低损耗, 使硅基微带天线单元的效率达到 87%, 增益达到 8 dB。

**关键词:** 微带天线; MEMS 天线; 硅基天线; 损耗

中图分类号: TN82; TN3

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)05-0639-04

微带天线由于其重量轻、体积小、剖面薄、能与飞行器共形、易与有源器件和电路集成为单一模块等诸多优点<sup>[1]</sup>, 得到了广泛研究与应用。但是随着频率的升高, 天线的尺寸必然要变小, 制造公差也随之变小, 就使得传统的制造技术不再适合批量生产, 而微机械(MEMS)技术却能在制造小天线上体现出巨大的潜力<sup>[2]</sup>。微机械天线发展的动力, 更来自于系统集成的需要。当越来越多的部件被集成到电路中时, 半导体也越来越多的被选作天线的衬底材料。但是这种材料的介电常数和微波损耗较高, 而且一般来说基底较薄, 所以在选作天线基底时需要对它

进行多方面的改进, 而 MEMS 技术可以很好的解决这些问题<sup>[3]</sup>。

虽然 Büchler 和 Strohm 提出低掺杂硅 ( $< 10^{13} / \text{cm}^3$ ) 很适合作低损耗微波器件的基底材料<sup>[4-5]</sup>, 因为低掺杂硅是体电阻率超过  $1\ 000\ \Omega \cdot \text{cm}$  的高阻硅 (HRS), 但是硅基微带天线的高损耗特性仍然是限制它迈向实用的关键因素。

在项目研制过程中, 我们设计制作了硅基背腔二单元微带阵列天线, 天线实物见图 1。微波暗室实测结果, 在很宽的频带内, 射频信号都几乎无反射的进入天线模块, 但天线辐射出去的能量几乎没有

(-16 dB), 实测驻波比见图2。实验结果表明, 射频信号在很宽的频域内都被硅基底的微波损耗所吸收。

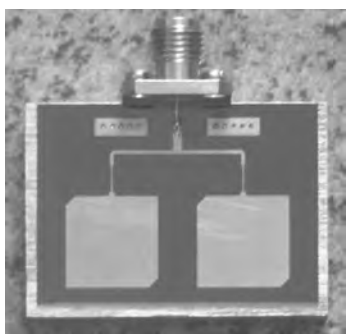


图1 天线实物照片

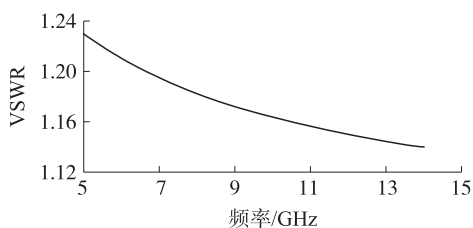


图2 实测驻波比

在这篇论文中, 我们研究了硅基微带天线的损耗机理。首先, 分别分析了各种损耗的形成原理, 以及它在总损耗中的地位, 提出相应的计算方法和分析模型, 并指出了降低各种损耗的有效方法。然后, 实验对比了本文提到的各种降低损耗方法的有效性。实验表明, 综合运用多种降损方法, 可以有效的解决硅基微带天线的高损耗问题, 使天线的辐射效率提高到近90%, 增益达到8 dB以上。使硅基微带天线的性能达到常规基底微带天线的水平。

## 1 损耗机理分析

### 1.1 贴片及馈线的导体损耗

导体损耗( $\alpha_c$ )是由导电媒质的串联电阻引起的。影响导体损耗的主要因素有电流分布、导体电阻和表面粗糙度。Pucel(1968)等人给出了 $\alpha_c$ 一个经过验证的可信的计算公式<sup>[6]</sup>:

$$w/h \leq \frac{1}{2\pi};$$

$$\alpha_c = \frac{8.68R_s}{2\pi Z_0 h} \left[ 1 - \left( \frac{w'}{4h} \right)^2 \right] \left[ 1 + \frac{h}{w'} + \frac{h}{\pi w'} \cdot \left( \ln \frac{4\pi w}{t} + \frac{t}{w} \right) \right]$$

$$\frac{1}{2\pi} < w/h \leq 2;$$

$$\alpha_c = \frac{8.68R_s}{2\pi Z_0 h} \left[ 1 - \left( \frac{w'}{4h} \right)^2 \right] \left[ 1 + \frac{h}{w'} + \frac{h}{\pi w'} \cdot \left( \ln \frac{2h}{t} + 1 \right) \right]$$

$$\left( \ln \frac{2h}{t} - \frac{t}{h} \right) \left[ \right]$$

$$w/h \geq 2;$$

$$\alpha_c = \frac{8.68R_s}{Z_0 h \left\{ \frac{w'}{h} + \frac{2}{\pi} \ln \left[ 2\pi e \left( \frac{w'}{2h} + 0.94 \right) \right] \right\}^2} \cdot \left[ \frac{w'}{h} + \frac{w' / (\pi h)}{2h + 0.94} \right] \left[ 1 + \frac{h}{w'} + \frac{h}{\pi w'} \cdot \left( \ln \frac{2h}{t} - \frac{t}{h} \right) \right]$$

其中:

$$w' = w + \frac{t}{\pi} \ln \left( \frac{4\pi w}{t} + 1 \right); w/h \leq \frac{1}{2\pi}$$

$$w' = w + \frac{t}{\pi} \ln \left( \frac{2h}{t} + 1 \right); w/h \geq \frac{1}{2\pi}$$

表面粗糙是导体损耗的主要原因, 因为电流深入导线表面很浅, 所以会沿着不规则表面流动, 大大延长了电流路径, 导致实际电阻增加。Hammerstad<sup>[7]</sup>等人给出了表面粗糙度( $\Delta$ )与导体损耗之间的简化拟合公式:

$$\alpha_c = \alpha_{c0} \left\{ 1 + \frac{2}{\pi} \arctan \left[ 1.4 \left( \frac{\Delta}{\delta} \right) \right] \right\}$$

$\alpha_{c0}$ 是未修正的导体损耗,  $\delta$ 是导体趋肤深度。

3倍趋肤深度处理了约98%信号总能量, 为了避免电流过于集中, 导体厚度至少应为趋肤深度的3倍, 额外线条厚度不仅没有必要, 而且对性能也有轻微影响<sup>[8]</sup>。

### 1.2 介质的介电损耗

硅介质的介电损耗是指完纯硅的介电损耗( $\epsilon''/\epsilon'$ ), 它在任何一种介质做基底的微带天线中都存在, 主要是由介质分子的极化引起的损耗。本征硅介电损耗求解的复杂性在Afsar和Button(1983)的文献中有详细阐述<sup>[9]</sup>。文中测试了8000  $\Omega \cdot \text{cm}$ 高纯硅, 在400 GHz其损耗角正切为0.0004。由于该部分损耗并不是很大, 而且难以计算, 所以这部分损耗在总损耗中的贡献可以忽略。

### 1.3 表面波损耗

表面波是沿介质基片传播, 而在基片法线方向上按指数衰减的波。通常把表面波功率与馈线系统入射功率之比称为表面波激励效率( $\eta_s$ )。James和Wilson(1977)给出了微带开口端激励表面波的效率<sup>[10]</sup>:

$$\eta_s = \frac{W}{W_e F} \left\{ \left[ k_0 \left( \frac{\epsilon_r}{k_m k_s} \right)^{1/2} + \frac{1}{k_0} \left( \frac{k_m k_s}{\epsilon_r} \right)^{1/2} \right] \cdot \left[ \frac{\sin(k_{y1} h)}{k_{y1} h} \right] \right\}^2$$

R. Garg 等人给出了单层和双层介质基底厚度  $h$  的约束公式<sup>[11]</sup>。在满足该约束的条件下, 表面波只有最低模  $TM_0$  传播, 其它高次模全部截止, 可以将表面波损耗限制到最低。

$$\frac{h}{\lambda_0} < \frac{1}{4\sqrt{\epsilon_r - 1}}$$

$$\tan(k_0 h_1 \sqrt{\epsilon_{r1} - 1}) \tan(k_0 h_2 \sqrt{\epsilon_{r2} - 1}) \leq \sqrt{\frac{\epsilon_{r2} - 1}{\epsilon_{r1} - 1}}$$

### 1.4 硅基底的电阻性损耗

半导体材料的导电性是由自由载流子的运动导致的, 所以载流子的运动是导致硅基底电阻性损耗的主要原因。所以该部分损耗的计算与硅基底中载流子的密度和迁移率有直接的关系, 硅基底电阻性损耗的等效损耗角正切值由下式给出<sup>[12]</sup>:

$$\tan\delta = (2\pi \cdot f \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \rho)^{-1}$$

其中

$$\rho = (qn\mu)^{-1}$$

其中  $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$ ,  $n$  (或  $p$ ) 为自由载流子密度,  $\mu$  为其迁移率。

克服电阻性损耗的方法就是提高基底的电阻率, 采用高阻硅 (HRS) 做基底, 或者使用电阻率比硅高出很多的 GaAs 半导体材料做基底。如果从器件性能考虑, GaAs 材料比高阻硅更加理想, 但从成本考虑, 高阻硅是一个很好的折衷选择。如果选择高阻硅, 则其电阻率不应低于  $1\,000 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

### 1.5 界面损耗

界面损耗是半导体工艺 MIS (金属 - 绝缘层 - 半导体) 结构的表面电场效应造成的。载流子在半导体内部的分布直接影响着其局部电阻率。当半导体衬底接地, 金属层上施加电压时, 半导体表面会形成电荷层 (积累层或反型层), 由于局部载流子浓度的提高, 界面处电阻率相当低。另外, 即便在不加偏压的情况下, 由于二氧化硅层固有的正电荷密度 (通常在每平方厘米  $10^{11}$  量级), 也将导致在硅界面产生感应负电荷层, 从而降低表面电阻率。不管是积累层还是反型层还是感应电荷层的形成, 其所导致的界面电阻率降低, 对硅基微带天线来说, 都将产生严重的影响。

降低这种影响的一种有效方法是提高绝缘层的厚度 (达到  $10 \mu\text{m}$  量级), 具体方法有: (1) 直接增加二氧化硅厚度至  $10 \mu\text{m}$  以上。其缺点是生长速度慢, 成本高。(2) 旋涂一层厚的聚酰亚胺。其缺点是聚酰亚胺具有吸水性, 而且其寿命有限。(3) 在硅上生长一层厚的多孔硅层。另一种降低表面损耗的方法是基于表面损耗形成机理的考虑, 可以在硅

表面生长一层多晶硅薄膜, 然后再生长二氧化硅绝缘层。由于多晶硅内部有许多势阱, 各种方式感应生成的电荷都会陷入势阱而不能自由移动, 从而控制了表面电阻率的降低。

## 2 实验对比

结合以上分析, 我们设计了四种不同配置的硅基微带天线, 以比较其性能。其结构如图 3 所示。

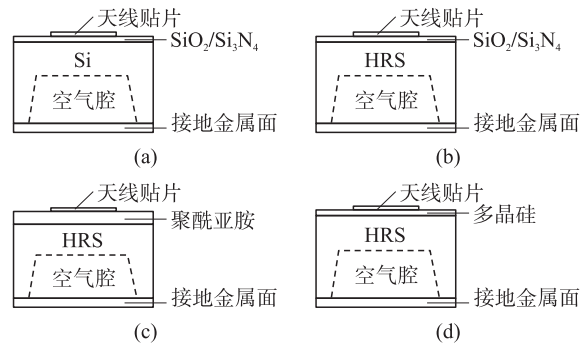


图 3 四种不同配置的硅基微带天线

其中 a 的基底为普通 COMS 用硅片, 电阻率为  $3 \Omega \cdot \text{cm}$ , 天线贴片与硅基之间有  $0.5 \mu\text{m}$  的  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  绝缘层薄膜, 硅片厚度为  $525 \mu\text{m}$ ; b、c、d 都是电阻率为  $3\,000 \Omega \cdot \text{cm}$  的高阻硅, 厚度为  $450 \mu\text{m}$ ; b 的其它配置与 a 相同; c 的绝缘层为  $10 \mu\text{m}$  的聚酰亚胺; d 的天线贴片与硅基之间是  $1 \mu\text{m}$  的多晶硅薄膜和其上的  $0.5 \mu\text{m}$  的  $\text{SiO}_2/\text{Si}_3\text{N}_4$  薄膜。为了降低基底的有效介电常数, 硅的背面都刻蚀一定深度的空腔。其中, a 的空腔厚度为  $250 \mu\text{m}$ , 剩余硅厚度为  $275 \mu\text{m}$ ; b、c、d 的空腔厚度为  $225 \mu\text{m}$ , 剩余硅厚度为  $225 \mu\text{m}$ 。

实验设备为, 江扬科技 (无锡) 有限公司 - 电子科技大学天线与微波技术联合实验室提供的微波暗室, 图 4 为该微波暗室的照片。该设备可测得天线的增益、带宽和效率等参数。图 5 为 b 配置的实测效率曲线。

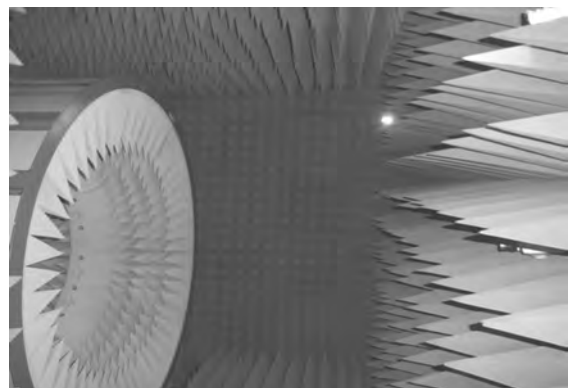


图 4 测试用微波暗室

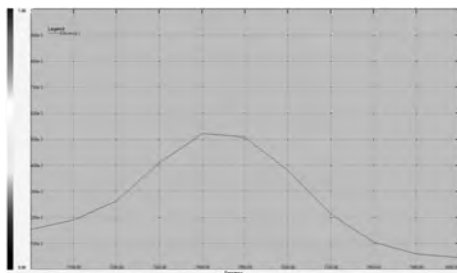


图5 b配置的效率曲线

实验结果如表1所示。

表1 四种不同配置天线的实验数据

配置	增益/dB	带宽/MHz	效率/%
a	-16	-	6
b	2	165	53
c	6	110	77
d	8	80	87

在表1中,配置a的驻波比在测试频域内均小于2,而且随频率升高而降低,(过高的损耗所致),所以未给出带宽。b、c、d三种配置带宽依次降低,是天线效率依次提高,品质因数也随之提高所致。

### 3 结论

由以上数据可以看出,基底的电阻性损耗和界面损耗,是硅基微带天线损耗的两大主要因素。降低基底电阻性损耗的方法是提高基底电阻率;而降低界面损耗的有效方法,一是增加绝缘层厚度,二是生长多晶硅薄膜。其中多晶硅薄膜法工艺简单,效果也较前一种方法显著。用多晶硅薄膜法制作的硅基微带天线,其效率与增益参数可达到常规基底微带天线水平。

### 4 问题与不足

在实验过程中,四种配置的天线均出现实测频率与设计频率相比偏低的现象,最大频偏达1.4 GHz

(17%),发生在a配置的天线上。截止发稿日,作者的考虑是空腔深度的加工误差,以及载流子堆积导致的寄生电容,造成了频偏。其影响因素及比重,尚需进一步对比分析。

### 参考文献:

- [1] [美]I·J·鲍尔,P·布哈蒂亚.微带天线[M].梁联卓,寇廷耀,译.北京:电子工业出版社,1984.
- [2] 刘晓明,朱钟淦.微机电系统设计与制造[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [3] [美]K·J·Vinoy,K·A·Jose著.RF MEMS应用指南[M].赵海松,邹江波,译.北京:电子工业出版社,2005.
- [4] Büchler J, Kasper E, Russer P, et al. Silicon High-Resistivity-Substrate Millimeter-Wave Technology[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. MTT-34, 1986: 1516-1521.
- [5] Strohm K M, Büchler J, Russer P, et al. Silicon Technology for Monolithic Integrated Millimeter Wave Circuits[J]. Mikroellen & HF Mag., 1988, 14(8): 750-769.
- [6] Robert A. Pucel, Daniel J. Masse, Curtis P. Hartwig. Losses in Microstrip[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-16, No. 6, June 1968.
- [7] Hammerstad E O, et al. ELAB Report, STF 44A 74169[R]. University of Trondheim, Norway, 1975: 98-110.
- [8] [美]Richard Brown著.射频和微波混合电路-基础、材料和工艺[M].孙海等译.北京:电子工业出版社,2006.
- [9] Afsar M N, Button K J. Precise Millimeter-Wave Measurements of Complex Refractive Index, Complex Dielectric Permittivity and Loss Tangent of GaAs, Si, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, BeO, Macor, and Glass[J]. IEEE Trans. Microwave Theory Tech. Vol. MTT-31, 1983: 217-223.
- [10] James J R, Wilson G J. Microstrip Antenna and Array Ptl-Fundamental Action and Limitations[J]. IEE. J. Microwave, Optics & Acoustics, 1977(1): 165-174.
- [11] Garg R, Bhartia P, Bahl I, et al. Microstrip Antenna Design Handbook[M]. Boston·London, Artech house, 2001.
- [12] Claus Schöllhorn, Weiwei Zhao. Attenuation Mechanisms of Aluminium Millimeter-Wave Coplanar Waveguides on Silicon[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2002.



姚科明(1981-),男,电子科技大学硕士,研究方向为微波通信、天线、射频微电子机械系统(RF MEMS), kemingyao@yahoo.com.cn;



刘晓明(1949-),女,电子科技大学教授,研究方向为微电子机械系统(MEMS)、射频微电子机械系统(RF MEMS), lxm@uestc.edu.cn.