

微机电系统

无线通讯用硅基微小天线的设计与制作^{*}

郭兴龙 蔡苗 刘雷 游淑珍 赖宗声^{**}

(华东师范大学信息学院电子系, 上海, 200062)

2005-12-05 收稿, 2006-01-18 改稿

摘要:采用微电子工艺在高电阻率硅片上设计和制备了一种新颖紧凑共平面波导馈电天线,并对其进行了仿真和测试,模拟和测试结果比较吻合,经过实验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 dB,谐振频率约为3 GHz,此天线有利于天线集成和与CMOS工艺等的兼容,并且对于无人驾驶飞机、卫星等飞行器的雷达和通讯等天线系统的设计具有参考价值。

关键词:微小天线;高电阻率硅片;集成电路工艺

中图分类号:TN92 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-3819(2007)03-361-05

Design and Fabrication of Miniature Antenna Based on Silicon Substrate for Wireless Communications

GUO Xinglong CAI Miao LIU Lei YOU Shuzhen LAI Zongsheng

(School of Information Science and Technology, East China Normal University, Shanghai, 200062, CHN)

Abstract: In this paper, a novel compact CPW-fed slot antenna was designed and fabricated on high-resistivity silicon (HR-Si) by micro-electronics process. The results of simulation are consistent with the results of measurement for the antenna. The mode of the antenna is vertical and horizontal bi-directional radiations. The gain of antenna is 2.5 dB and the resonance frequency approximately is 3 GHz. This fabrication can be compatible with antenna integration and CMOS process. The parameters of this antenna are for reference radar antenna system of Unmanned Aerial Vehicles(UAV), satellite transmission and communication.

Key words: miniature antenna; high-resistivity silicon(HR-Si); IC process

EEACC: 5270B

1 引言

无人驾驶飞机、卫星等飞行器的雷达和通讯需要许多天线系统。而且飞行器对承载物有着严格的重量和尺寸限制。并且随着微型无人机、微纳卫星的出现,机载或星载电子系统的尺寸越来越小,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和有利于系统集成,要求在硅或砷化镓等半导体上制备天线。单晶硅也是一种具有良好的机械特性的基材^[1]。移动通讯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公司

* 基金项目:上海应用材料研究与发展基金项目资助(批准号:06SA11);国家自然科学基金项目(60676047)
** 联系作者:E-mail:zslai@ee.ecnu.edu.cn

的单芯片蓝牙组件^[2],其尺寸仅为9 mm×9 mm。以往以PCB作为天线基底材料也大大限制了频带宽度。Hwang等在GaAs衬底上制备了容易集成的微小狭缝天线^[3],获得了宽频带。Lee Byunqje等利用高阻抗介质基底获得了小的天线尺寸^[4]。

因为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集成等明显优势^[5]。鉴于此,文中采用以高阻硅片为衬底,借助微电子工艺技术,运用微带缝隙辐射机理完成了硅基微尺度天线设计和构造,对天线的集成具有重要的参考价值。

2 天线的设计和制备工艺

2.1 天线设计

图1为天线结构示意图,天线由环缝S、旁枝缝线l、匹配内槽a等组成。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^[6]。环

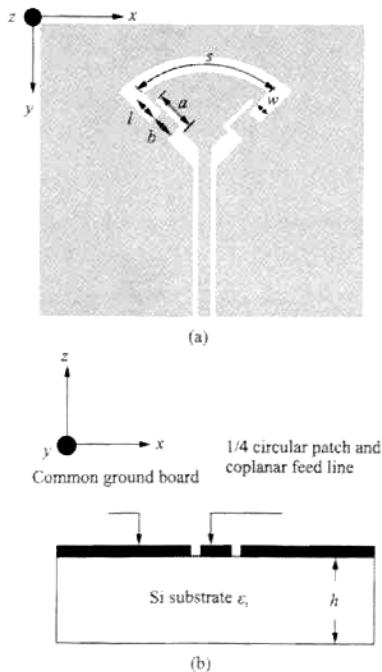


图1 天线的结构示意图:(a)天线的预视图;(b)天线的侧视图($S=18.8\text{ mm}$, $l=3.6\text{ mm}$, $w=2\text{ mm}$, $a=5.5\text{ mm}$, $b=3.2\text{ mm}$)

Fig. 1 Schematic of antenna geometry: (a) Top view of the antenna; (b) Lateral view of the schematic of the antenna ($S=18.8\text{ mm}$, $l=3.6\text{ mm}$, $w=2\text{ mm}$, $a=5.5\text{ mm}$, $b=3.2\text{ mm}$)

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。

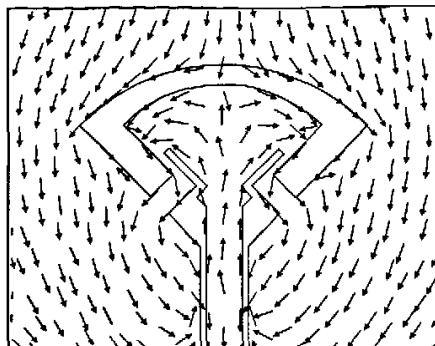


图2 天线电流分布图

Fig. 2 Current distributing schematic of antenna

2.1.1 衬底材料和贴片的选择 选择具有适当厚度的合适的介质基片。制备微型天线的基片采用厚0.5 mm、介电常数 $\epsilon_r=11.9$ 、 $\phi=50\text{ mm}$ 、高电阻率($\rho>1000\Omega\cdot\text{cm}$)的本征<111>抛光硅片,此基片基于微电子加工平台兼有加工精度高和IC集成的优势。为了减少趋肤效应的影响,选金做贴片。在S波段趋肤深度约在1.5 μm左右,为了保证电路的损耗尽可能小,电镀金膜厚为3 μm^[6]。

2.1.2 天线尺寸和工作频率的确定 根据给定的工作频率和衬底的相对介电常数 ϵ_r 、厚度 h 来确定矩形天线尺寸 W 和 L ,这由式(1)和式(2)能够分别给出^[6]:

$$W = \frac{c}{2f_r} \left(\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right)^{-1/2} \quad (1)$$

$$S = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (2)$$

式中 c 是光速, f_r 是谐振频率。式中有效介电常数 ϵ_e 由式(3)得出^[7]:

$$\epsilon_e = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + \frac{12h}{W} \right)^{-1} \quad (3)$$

由于谐振电长度 L 两端有末端延伸效应,线伸长量 ΔL 由式(4)确定^[7]:

$$\Delta L = 0.412 \frac{(\epsilon_e + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_e - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} h \quad (4)$$

获得天线的初步尺寸后,结构参数由Ansoft公司的多层次平面电磁场仿真软件Ensemble8.0进行

模拟优化, 经过多次仿真调试后得到天线的尺寸参数: $S = 18.8 \text{ mm}$, $l = 3.6 \text{ mm}$, $w = 2 \text{ mm}$, $a = 5.5 \text{ mm}$, $b = 3.2 \text{ mm}$ 。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_c 可以由式(5)近似给出:

$$f_c = \frac{c}{2S_T \sqrt{\epsilon_r}} \quad (5)$$

式中, c 为光速, ϵ_r 为有效介电常数, $S_T (S_T = S + 2l)$ 为辐射谐振槽缝总长度。

2.1.3 确定馈电方式 采用共平面波导(CPW)馈电, 馈线和辐射缝隙可以在同一平面上, 其馈入方式的优点为低辐射溢漏(Low radiation leakage), 并能够在波导金属接地上与主动及被动组件轻易地结合而不需任何的钻孔, 免去制程可能造成的不确定性。共平面波导天线比微带天线更容易与微波集成电路整合在一起, 这是因为不需经过钻孔、焊接就可以轻易地与集成电路结合在同一个平面上, 不管与电路的并联或是串联都可以轻易地达成, 是比较合适的硅基集成天线的后选形式。

2.2 天线的制备工艺过程

工艺步骤如下:(1)首先清洗硅片, 然后在氧化温度 1100°C 下对硅片进行氧化, 氧化层厚度为 $1.1 \mu\text{m}$; (2)为了形成天线的金属贴片和硅片的良好黏附性, 先采用真空蒸发淀积 50 nm 厚的铬膜和 150 nm 金膜, 然后电镀金厚至 $3 \mu\text{m}$, 最后采用负胶再次光刻掩模板; (3)先采用 Au 腐蚀液腐蚀金, 再腐蚀铬, 腐蚀好铬金后去胶, 得到硅基天线, 制备所得硅基天线实物如图 3(a), 该天线采用 SMA 连接头与 CPW 连接馈电, 由于 SMA 接头与硅基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。为了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, 如图 3(b)。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。

3 天线的模拟和实验结果

实验中采用 HP 公司的 8408B 网络分析仪($0.5 \sim 18 \text{ GHz}$)测量了天线的 S_{11} 参数(图 4); 采用 AD-

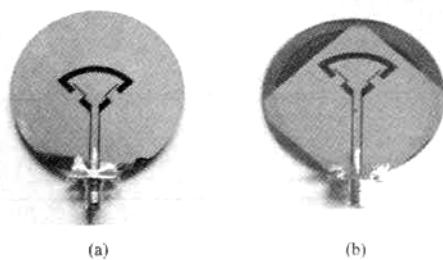


图 3 制备所得硅基天线实物图: (a) 高阻硅基; (b) 多孔硅基 ($S = 18.8 \text{ mm}$, $l = 3.6 \text{ mm}$, $w = 2 \text{ mm}$, $a = 5.5 \text{ mm}$, $b = 3.2 \text{ mm}$, $\phi = 50 \text{ mm}$)

Fig. 3 Graph of antenna fabricated based on silicon substrate ($S = 18.8 \text{ mm}$, $l = 3.6 \text{ mm}$, $w = 2 \text{ mm}$, $a = 5.5 \text{ mm}$, $b = 3.2 \text{ mm}$, $\phi = 50 \text{ mm}$)

VANTEST 公司 R3767A 网络分析仪($0.04 \sim 8 \text{ GHz}$)测量了天线的辐射特性。图 4 给出了天线的 S_{11} 值, 可以看出高阻硅基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: 第一、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; 第二、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, 两者方向图应该完全一致, 而前者增益可能稍低于后者。

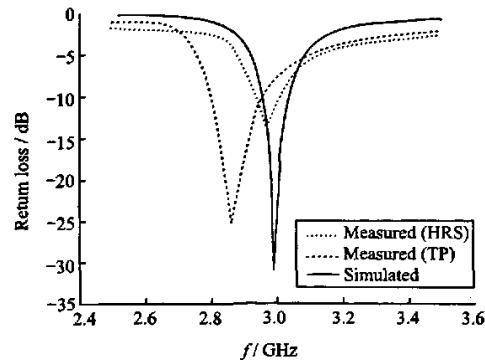


图 4 天线 S_{11} 实测与仿真曲线比较

Fig. 4 Experimental and simulated result comparison for the antenna S_{11}

采用 ADVANTEST 公司 R3767A 网络分析仪($0.04 \sim 8 \text{ GHz}$)测量了天线的辐射特性。图 5 是测试场天线测试系统示意图。考虑到感应耦合, 两个天

线间距离大于 10λ , 其次是收发天线间辐射耦合取 $D \geq 2D^2/\lambda^{[8]}$, 其中 d 为收发天线之间距离, D 为测试中所用的最大天线的口径。为了避免地面反射的

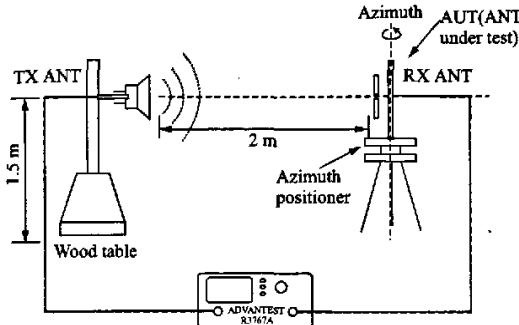


图 5 测试场天线测试系统示意图

Fig. 5 Schematic of testing system for antenna at worksite

影响, 必须满足 $H \cdot D \geq \lambda \cdot d$, 其中 H 为测试平台与地面间的高度。

用发射功率源为 ADVANTEST 3767A 网络分析仪的 SOURCE 端口通过一根 3 m 长的柔性电缆和发射天线相连。发射天线采用 1~10 GHz 的宽带喇叭天线, 增益在 10 dB 以上。这个天线通过根据中心轴相差 90° 的水平和垂直两种放置得到垂直和水平两种极化波。接受终端为 ADVANTEST R3767A 网络分析仪的 B 端口, 通过一个 3 m 长的柔性电缆和测试天线相连。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。

图 6 给出了天线的辐射方向图, 从图中可以看出, 天线为双向辐射, 天线的增益约为 2.5 dB, 谐振频率约为 3 GHz。

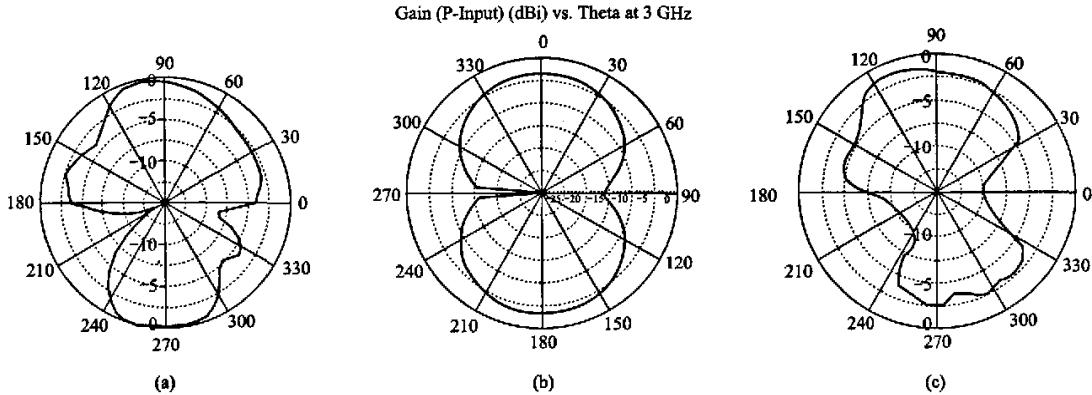


图 6 天线辐射方向图:(a)H 面测量结果;(b)H 面仿真结果;(c)E 面测试结果

Fig. 6 Radiation patterns of the antenna; (a) Measured result of the H plane; (b) Simulated result of the H plane; (c) Measured result of the E plane

4 结 论

采用微电子加工工艺在高电阻率硅片上设计和制备了工作在 S 波段的微小天线, 对天线进行了仿真和测试, 结果比较吻合。测试得到天线为双向辐射, 天线的增益约为 2.5 dB, 谐振频率约为 3 GHz, 此天线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; 能够应用于无人驾驶飞机、卫星等飞行器的雷达和通讯等许多天线系统。

参 考 文 献

[1] Hector J. De Los Santos, Kustantaja. RF MEMS Cir-

cuit Design for Wireless Communications[M]. Artech House Publishers, 2002.

- [2] 刘海文, 石振华. 蓝牙技术及其系统原理[J]. 电信技术, 2000, 9: 6-9.
- [3] Junghwan Hwang, Sungjae Jung, Sungweon Kang, et al. Compact wound-type slot antenna with wide bandwidth[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2004, 14(12): 569-571.
- [4] Byungje Lee, Harackiewicz, Harackiewicz, et al. Miniature microstrip antenna with a partially filled high-permittivity substrate[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 50(8): 1 160-1 162.
- [5] Bhobe A U, Holloway C L, Piket-May M. Coplanar waveguide fed wideband slot antenna[J]. IEEE Electronics Letters, 2000, 36(16): 1 340-1 342.

- [6] 鲍尔 J, 布哈蒂亚 P. 微带天线 [M]. 北京: 电子工业出版社, 1985: 49.
- [7] 林昌禄, 陈海, 吴为公. 近代天线设计 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1990: 593.
- [8] 毛乃宏, 俱新德. 天线测量手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1987.



郭兴龙(GUO Xinglong) 男, 1972 年生, 博士研究生, 主要研究领域为微机电机械系统, 基于 MEMS 开关可重构天线与硅基 MEMS 可重构微小天线的仿真设计和研究制作。



蔡描(CAI Miao) 女, 1982 生, 硕士研究生, 2004 年获华东师范大学通信专业学士学位, 现主要研究方向为射频 MEMS 器件。



赖宗声(LAI Zongsheng) 男, 1943 年生, 终身教授, 博士生导师, 享受政府特殊津贴; 华东师范大学电子电路与系统研究所所长, 上海市电子学会副理事长, 主要从事 VLSI 设计与射频集成电路、RF MEMS 器件等研究工作。

(上接第 349 页)

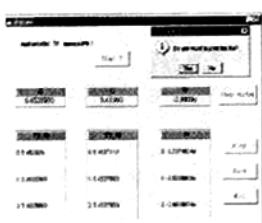


图 6 程序运行的最终界面

Fig. 6 Final interface of program

表 1 中带 * 号为短路法测试数据, 两种方法吻合较好, 平均误差约为 6%。并对样品进行重复检测, 短路法重复误差约为 2.3%, 开路法重复误差为约 1.1%, 显示开路系统测量温度系数的稳定性更好。

4 结 论

带步进电机的新型开放介质谐振器法测试陶瓷材料的温度系数的优势首先是测试速度快, 克服了短路型平行板谐振法一个样品升温一次, 测量耗时长的缺点, 使测试时间大约减少为原有的八分之一。其次, 该测量法将短路型平行谐振腔改为开放型平行谐振腔, 样品与金属平行板未直接接触, 传导损耗降为最小^[3], 此时 Q 值更高, 谐振峰更尖锐, f_0 的测定数据更加精确。样品摆放之后, 所有步骤进入自动测试状态, 不同温度下测量时样品的外界条件完全

一致, 系统误差和人为误差最小。该系统虽然为快速测试陶瓷材料的温度系数而研制, 但若将插入损耗值采集和计算, 就可以同时实现介电常数和介质损耗的测试, 迅速完成被测样品三个主要参数的全测试。综上所述, 文中所研制的温度系数快速检测装置系统误差和人为误差最小, 可实现陶瓷材料温度系数的快速和精确的测量。

参 考 文 献

- [1] 目文中. 平行板谐振法测量微波介质陶瓷介电性能 [J]. 电子元件与材料, 2003, 22(5): 4-6.
- [2] 唐宗熙. 介质谐振器介电参数频响特性及频率温度系数的测量 [J]. 计量学报, 2002, 23(1): 57-61.
- [3] 陈赐海. 微波开放型介质谐振器介电参数的测试 [J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(8s): 29-30.



肖芬(XIAO Fen) 女, 1951 年生于福建漳州, 1975 年毕业于福州大学物理无线电工程系, 现为厦门大学物理学系副教授, 主要研究方向为微波理论及应用。



董晓盈(DONG Xiaoying) 女, 1982 年生于黑龙江省鸡西市。2005 年毕业于厦门大学电子信息科学与技术专业, 获学士学位, 现攻读该专业的硕士学位, 研究方向为微波理论及应用。

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养；后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com)，现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地，成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程，广受客户好评；并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书，帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年，10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养，更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果，又能免除您舟车劳顿的辛苦，学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲，结合实际工程案例，直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>