



“十二五”科学技术专著丛书

光透明薄膜 天线技术

姚远 著

GUANG TOUMING BOMO

TIANXIAN JISHU



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

十二五科学技术专著丛书

光透明薄膜天线技术

姚 远 著



北京邮电大学出版社
[www. buptpress. com](http://www.buptpress.com)

内 容 简 介

本书是专门阐述光透明薄膜天线技术的专著。全书共分7章,主要包括:光透明薄膜的基本特性、光透明薄膜天线仿真方法、光透明薄膜天线效率提高方法、光透明薄膜天线馈电方法、光透明缝隙耦合微带天线设计、光透明超宽带单极子天线、光透明环天线以及定向辐射光透明天线技术研究等。

本书适于从事天线技术、雷达技术、无线通信技术的工程技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业或者从事相关课题研究的本科生、研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

光透明薄膜天线技术 / 姚远著. — 北京:北京邮电大学出版社, 2016.7

ISBN 978-7-5635-4742-5

I. ①光… II. ①姚… III. 薄膜光学—天线 IV. ①TN82

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第076807号

书 名: 光透明薄膜天线技术

著作责任者: 姚 远 著

责 任 编 辑: 满志文

出 版 发 行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路10号(邮编:100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京九州迅驰传媒文化有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 6.75

字 数: 125千字

版 次: 2016年7月第1版 2016年7月第1次印刷

ISBN 978-7-5635-4742-5

定 价: 15.00元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

前 言

天线技术从德国科学家赫兹验证电磁波的存在开始,已经发展了 120 多年。天线作为一种将导行波和自由空间波进行相互转换的换能器,在通信过程中发挥着至关重要的作用。随着现代无线通信技术的迅猛发展,越来越多的科学家投入大量精力开发高性能的天线。同时,将其他学科的最新进展与天线技术相结合,从而形成天线的独特功用成为了天线技术的重要发展方向。本书就是针对一种新型材料—光透明薄膜材料,探讨将其应用于天线技术后的技术解决方案和应用解决方案。以期能够为天线技术领域带来一个新的研究和发展点。书中给出了多种光透明薄膜天线技术的实用场景和结构形式,所有这些结构形式均基于作者多年来的研究和实践经验,希望能对此领域内的读者有所帮助。

全书分为 7 章,对光透明薄膜天线研究和设计中的难点问题进行了剖析,给出了材料特性和电特性的分析方法和结论,针对辐射效率低下、馈电困难、无法定向辐射等问题给出了解决方案,并通过实际的应用范例验证所给出的设计方法的正确性和有效性。

第 1 章为绪论,介绍了课题的背景、难点、当前研究进展、以及论文的主要工作和各章节的组织关系。第 2 章介绍了光透明薄膜的基本特性,包括它的制备方法、分析方法、测量方法等。第 3 章首先给出了光透明薄膜材料电特性的分析方法和重要的指标参数。接下来针对光透明薄膜天线技术的两大难点问题,即提高辐射效率和解决馈电连接问题,给出了解决方案。第 4 章结合应用给出了具体的设计实例,以微带天线类型为基础,以超高频 RFID 应用为需求背景,系统的给出了设计、仿真、加工、测试全过程的方法。通过这样的实例验证了光透明薄膜天线的可实现性和可行性。第 5 章则以超宽带单极子天线技术为基础,将光透明薄膜技术应用到其中,给出了设计方法和流程。第 6 章

针对超高频 RFID 对于同时远近场读写器天线的需求,设计了一款新型的光透明薄膜读写器天线。最后,第 7 章针对光透明薄膜天线技术面临的另一个挑战,即如何实现定向辐射展开讨论,给出了一种创新性方法来作为这个问题的一个解决方案。

在本书的写作过程中,作者得到了众多师长、学生、领导、亲人以及朋友们的支持、鼓励和帮助,作者在此表示由衷的谢意。

首先,要感谢我的单位领导——北京邮电大学的俞俊生教授和英国伦敦大学玛丽女王学院的陈晓东教授,他们在我的科研工作中给我大力的支持,生活中给我始终如一的关怀,是我能够对天线技术进行更深入、更广泛研究的信心与动力。

其次,要感谢我的研究生:曾奕星、何乃潇、陈晚忠,他们创新性的工作是本书重要的基础。

我要特别感谢北京邮电大学出版社的马晓仟编辑,没有马编辑的帮助,此书是无法与大家见面的。

我要感谢我的父母,岳父母,他们给了我无微不至的关怀。特别要感谢我的爱人——王丽婷女士,为了能让我顺利完成此书的写作,她付出了很多。更要感谢我那可爱的女儿,她是我执着前行的动力。

本书的内容仅代表个人的观点和见解,肯定有不少疏漏,恳请读者批评指正(作者邮箱:yao. boyu@gmail. com)。

姚 远

2016 年 5 月于北京邮电大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 ITO 光透明薄膜天线技术	4
1.2.2 AgHT 光透明薄膜天线研究	6
1.2.3 金属网格光透明薄膜天线研究	8
1.3 本书主要内容和组织结构	9
本章参考文献	10
第 2 章 光透明薄膜的基本特性	15
2.1 ITO 薄膜天线的制备方法	15
2.1.1 ITO 粉末的制备	15
2.1.2 ITO 制靶工艺	16
2.1.3 ITO 薄膜的制备	17
2.1.4 ITO 薄膜天线的制备	18
2.2 理论分析	19
2.3 薄膜性能的测量	23
2.3.1 薄膜厚度测量	24
2.3.2 薄膜电学性能测量	24
2.3.3 薄膜光学性能测量	26
2.4 多层薄膜	28
2.4.1 单层结构的光透明薄膜	28

2.4.2 多层结构的光透明薄膜 29

本章参考文献 30

第3章 光透明薄膜天线技术研究 32

3.1 引言 32

3.2 光透明导电材料的趋肤效应和表面阻抗 32

3.3 光透明薄膜天线仿真方法 38

3.4 光透明薄膜天线效率提高方法 40

3.4.1 光透明单极子天线效率提高方法 40

3.4.2 光透明微带天线效率提高方法 46

3.5 光透明薄膜天线馈电方式研究 49

3.5.1 接触式馈电 49

3.5.2 耦合馈电 51

本章参考文献 51

第4章 光透明缝隙耦合微带天线设计 53

4.1 引言 53

4.2 微带天线理论 54

4.2.1 微带天线辐射原理 54

4.2.2 微带天线馈电方式 55

4.2.3 微带天线圆极化技术 56

4.3 光透明线极化微带天线设计 56

4.3.1 天线结构 57

4.3.2 天线测试 58

4.3.3 天线测试结果分析 60

4.3.4 参数分析 64

4.4 光透明圆极化微带天线设计 65

4.4.1 天线结构 66

4.4.2 天线圆极化实现原理 68

4.4.3 结果分析 69

4.4.4 参数扫描 75

本章参考文献	78
第 5 章 光透明超宽带单极子天线	79
5.1 设计原则	79
5.2 光透明超宽带单极子天线仿真设计	81
第 6 章 光透明环天线	84
6.1 环天线简介	84
6.2 光透明同时近远场 RFID 环天线设计	87
第 7 章 定向辐射光透明天线技术研究	92
7.1 引言	92
7.2 定向辐射光透明天线技术研究	92
本章参考文献	97

第1章 绪 论

1.1 背景与意义

天线是一种将导行波和自由空间波进行相互转换的换能器,在通信过程中发挥着至关重要的作用。随着车载通信、全球定位卫星导航(GNSS)、蓝牙、WiMax(全球微波互联接入)等无线通信技术的迅猛发展,越来越多的科学家投入大量精力来开发高性能的天线。为了使天线能够获得良好的共形和隐蔽特性,以便集成在汽车或者卫星上而达到更佳的安全性能和美观特性,1997年,美国国家航空和航天管理局(NASA)的科学家们提出了使用光透明薄膜材料来制作天线的设想^[1]。如果天线可以实现光透明的特性,那么无论是在军事领域还是民用领域,都势必可以解决诸多的天线难题。

近年来,随着移动通信事业的快速发展,世界上多个国家的通信运营商已纷纷采用第四代移动通信技术(4G-LTE),它能够为我们提供更好的传输质量和更快的传输速度,是集第三代移动通信技术(3G)和 WLAN 于一体的最新一代移动通信技术^[2]。为了实现在多径复杂的无线信道和有限的频谱带宽下高容量和高速率的要求,4G 中采用了多输入多输出(MIMO, Multiple-Input Multiple-Output)的关键技术^[3-6]。MIMO 系统采用在接收和发送端使用多个天线来控制信号的空间分布,并在相同频率和时间上利用多天线提供并行信道用于增加系统的容量。不难想象,在未来的第五代移动通信技术(5G)中,MIMO 技术仍具有很大的应用和发展潜力。4G 技术的发展促使移动终端设备不断涌现,终端天线也向着多频化、小型化不断发展。此外,目前移动终端向着超薄化和多功能发展,手机等终端设备中预留给天线的设计空

间极其有限,并且随着集成的各种芯片和部件越来越多,设计空间进一步的减小,过于小的设计空间对于多天线和多功能的要求是矛盾的。但是如果有了光透明薄膜天线技术,这个问题就可以得到有效的解决。由于天线是用光透明薄膜制作而成,这种材料具有光透明特性,可以直接将其安装在移动终端显示屏的下方,光透明材料厚度非常小,方便集成在移动终端上,而显示屏的位置面积足够大,可以很容易设计出性能优异的多频段终端天线。

对于安装在汽车和飞机上的导航和通信天线,由于技术和制作工艺的限制,大多数只能将天线安装在它们的外部。对于一些特种车辆,硕大的外置天线也不利于隐蔽和安全,并且影响其美观性。对于飞机,考虑到空气动力学的影响,也希望天线能够内置。在车载通信中,可行的解决方法是将光透明薄膜材料制作的天线集成在汽车挡风玻璃上,由于汽车挡风玻璃的面积很大,这样不仅可以设计各种性能的天线,而且也可实现更好的美观和隐蔽特性^[7]。需要考虑的问题是如何设计可集成在玻璃上的高性能定向性光透明薄膜天线,并且尽量减小天线对汽车内部的辐射。

随着全球步入信息化社会,卫星技术对于定位导航^[8]、地球气象监测^[9]和宇宙空间研究^[10]发挥着重要的作用。卫星已不再是从前简单的单一转发中继台,而是演变成了集成很多复杂系统的多功能设备。一个成功的卫星系统,除了能够实现复杂的功能外,它的造价和重量往往也是科学家们需要考虑的重要问题。目前许多的研究机构和公司致力于研究小型化的卫星,随着人类需求的不断扩展,这些卫星集成了越来越多的空间探测以及通信设备。同时为了给卫星进行供电,通常会附带足够空间的太阳能电池板。卫星上有限的空间和实现复杂的功能往往是相互矛盾的,过于追求低成本和小型化,对于卫星上的一些外置设备带来了很大的局限性,比如卫星天线。有限的空间对于卫星天线的设计带来了很多的困难,为了解决这个难题,科学家势必会设计更加复杂的天线系统,这同时也增加了设计时间和成本以及卫星潜在的故障危险。因此,如何在卫星上实现复杂设备的集成往往是需要折中考虑的。为了解决这个问题,国外一些科学家提出了将天线集成在太阳能电池板上的方法。目前主要有两种方法,第一种是在太阳能电池板的背部设计缝隙型的天线^[11]。但是这种方法要求对太阳能电池板进行复杂的改进,这并不现实并且过于昂贵。第二种是使用网格状的金属天线,将它集成在太阳能电池板的上面^[12]。主要是将薄金属制作成网格状,使其具有一定的光透明特性。

这种形式的天线还处于研究的起步阶段,现在还无法保证良好的天线性能。对于现成的太阳能电池板,采用光透明薄膜制作的天线可以很方便地集成在电池板的表面,并且无须对太阳能电池板进行复杂的改进。光透明薄膜具有很高的光透性和良好的导电特性,优秀的共形特性,在不影响太阳能电池板正常工作的情况下,又可以实现良好的天线性能,这无疑是一个非常吸引人的解决方案。

光透明薄膜天线同样也可应用在射频识别技术(RFID)上。RFID技术是利用射频信号与目标进行通信,并获取相应的数据。由于其具有非接触识别和较高的读取速率等特点,受到了人们的广泛关注^[13]。现如今,RFID技术广泛应用于后勤支持、供应链管理、工厂物流管理等方面,以及身份识别和交通领域。随着物联网技术的兴起,射频识别技术得到了飞速发展。目前,超高频段的RFID技术的研究和应用更为广泛,这个频段主要集中在840~960 MHz,主要通过空间电磁波的方式进行信息和能量的交换。它具有更远的读取距离和更快的读取速度,可以读取大批量的标签,因此广泛应用在物流等领域。随着超高频段RFID技术走入人们的日常生活,比如超市、购物商场等,在为商家节约成本,提高利润的同时,如何提高客户的服务和感知体验,也是设计人员需要考虑的问题。大量的金属标签和读写器天线势必会带给消费者糟糕的购物体验。为了解决这个问题,人们提出了智能体验系统。消费者在商场购买衣服时,商家为了带给顾客更好的体验,当顾客在试衣间进行试衣时,试衣镜可以自动显示衣服的相关信息,譬如衣服的尺寸、材料、产地、价钱等。而这一切是通过试衣间中的RFID系统来实现的,集成在试衣镜上的光透明天线通过读取衣物上的远场标签,从而将相关的信息显示在试衣镜上面。光透明天线的隐蔽特性和便于集成的特点很好的解决了金属天线笨重和遮挡视线的缺点。本文针对以上所述的智能试衣间系统,研究和实现可用的光透明RFID系统的读写器天线。

1.2 国内外研究现状

光透明薄膜天线技术最早是由美国国家航空和航天管理局(NASA)的两位科学家 Simmons 和 Lee 在 1997 年提出的,他们设想利用这项技术使得天

线在某些领域的应用更加的便捷和有效。并通过实验初步验证了利用光透明薄膜材料制作天线的可能性。经过十几年的发展,国外的一些学者针对这一技术做了一系列的研究和探索。目前,光透明薄膜在天线方面的研究仍处于探索阶段,可用于制作天线的光透明薄膜材料大致可以分为三种,铟锡氧化物(ITO)为代表的金属氧化物薄膜、AgHT 系列的多层薄膜和以铜、银、金等金属为主的金属薄膜。

1.2.1 ITO 光透明薄膜天线技术

光透明薄膜技术提出以后,科学家们首先需要解决的问题是找到可以用于制作天线的光透明薄膜材料。在 2000 年,法国雷恩第一大学的 N. Outaleb^[14]的研究团队率先提出了利用铟锡氧化物薄膜(ITO, Indium Tin Oxide film)来制作光透明薄膜天线。ITO 薄膜利用溅射镀膜技术在透明玻璃或者透明塑料上镀上一层金属氧化物薄膜,它具有很高的光透性,光透过率可以达到 80%以上,而且它同时具有很好的高频导电特性^[15]。

同一年,加拿大特伦特大学的 Mias^[16]利用不同的透明导电材料制作了微带线形式的偶极子天线,如图 1-1 所示。利用铝、铜、银、金和 ITO 光透明薄膜这五种不同的材料制作偶极子天线,并比较其性能。Mias 利用蚀刻技术将 ITO 薄膜印制在玻璃介质上,玻璃介质厚度为 0.7 mm。并同时制作了利用银和金的高导电率金属制作的偶极子天线,因为这两种金属的涂覆厚度很小,在一定程度上是具有光透明特性。将这三种材料的光透明天线和传统的铜或者铝制天线比较,薄的金属层制作的天线具有良好的性能,但是光透性较低,利用 ITO 制作的天线虽然有很高的光透性,但是天线效率低,还需要进一步改进和研究。

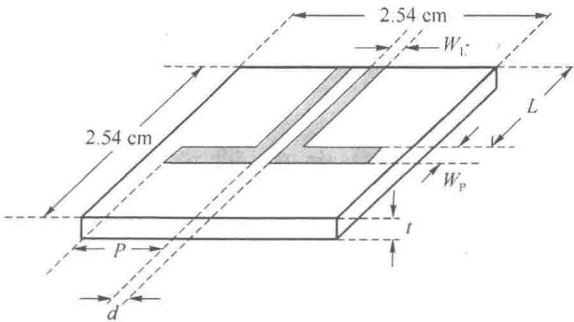


图 1-1 光透明偶极子天线结构图

随后,Chen-Tin Lee^[17]设计了一款单极子形式的光透明薄膜天线。天线的辐射枝节和地面均利用 ITO 光透明薄膜制作而成。天线工作在 2.1 GHz (WCDMA)频段和 5.2 GHz(WLAN)频段,具有比较好的阻抗带宽和全向性辐射特性。但是论文中并没有给出天线的效率和增益。

ITO 薄膜具有很大的表面阻抗,它的阻抗特性对天线的性能到底有什么样的影响,一直以来都是研究人员所关心的重要问题。直到 2007 年,日本千叶大学 Koichi Ito 教授的课题组率先对这一问题进行了详细的研究^[18]。图 1-2 所示为待研究天线的结构图和实物图。天线采用了比较简单的单极子天线的形式,蝶形的单极子辐射枝节垂直放置在天线地板上。辐射枝节由 ITO 光透明薄膜制成,将薄膜材料涂敷在厚度 1.1 mm,相对介电常数 4.8 的透明玻璃介质上。研究过程中使用了同样尺寸和工作频率的铜制单极子天线进行对比。图 1-3 为天线的测试结果图,图 1-3(a)为天线的驻波比测试图,图 1-3(b)为天线在 yz 坐标面上的增益图。从测试结果可以看出,ITO 薄膜材料的表面阻抗越小,结果和铜制的天线越相近。但由于这种材料的电导率比铜的要小,因此用 ITO 制作的天线增益比铜制天线小。与此同时,还必须关注光透明薄膜的表面阻抗和光透过率之间的关系。由图 1-4 可以看出,光透明薄膜的表面阻抗越大,薄膜的光透过性越好。但是表面阻抗增大会减小天线的增益。Ito 教授的研究给出的重要结论是,光透明薄膜天线的光透过率和天线的增益之间是相互矛盾的关系。因此,在设计光透明薄膜天线时,需要在光透性和天线增益之间进行折中选择。

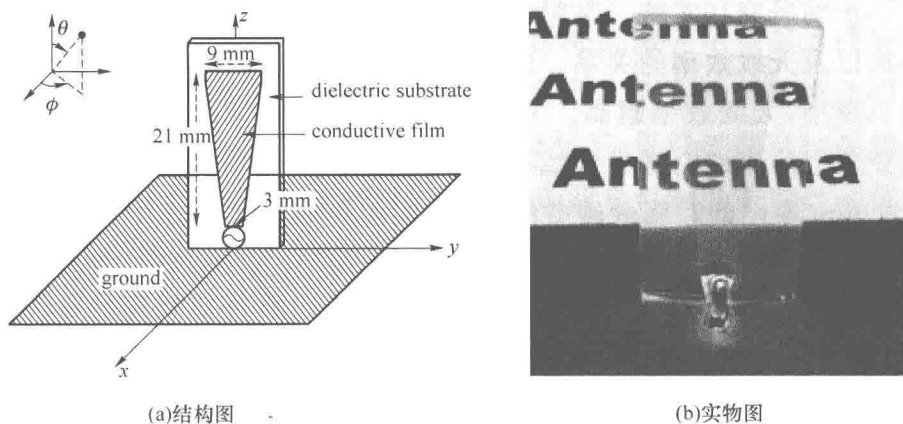


图 1-2 光透明单极子天线

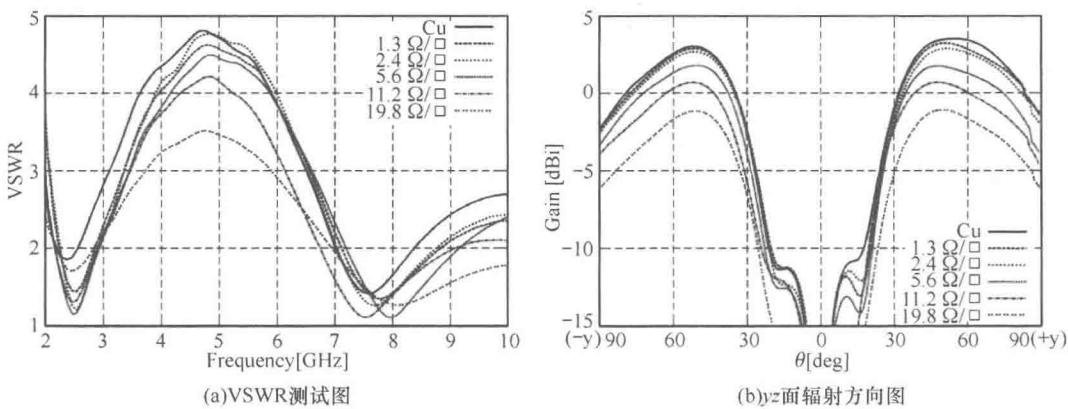


图 1-3 光透明单极子天线

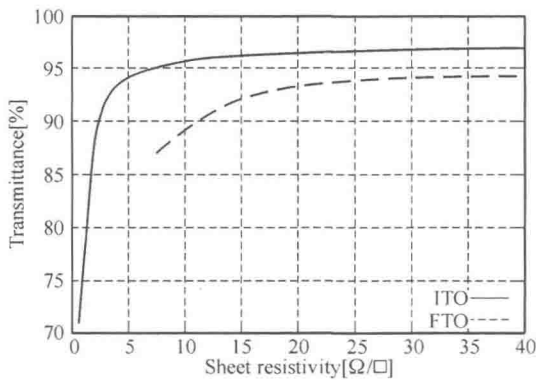


图 1-4 光透过率随薄膜表面阻抗的变化

Ito 教授获得的这一重要结论,使得研究人员利用光透明材料设计天线更加自信。此后,一些科学家和学者对 ITO 光透明薄膜材料制作天线的技术进行了进一步的研究和实验。文献^[19,20]研究了 ITO 薄膜材料的电子迁移率和表面阻抗以及天线效率的关系。薄膜材料的电子迁移率越大,则薄膜材料的表面阻抗越小,天线效率越高。文献^[21]使用 ITO 材料设计了两种涂敷在不同透明介质上的光透明微带天线,透明介质分别使用的是 1.2 mm 厚度的玻璃和 0.7 mm 厚度的透明聚碳酸酯,测试表明使用玻璃介质的光透明天线在 2.4 GHz 的工作频率下增益可以达到 3.1 dB,并且在 550 nm 的波长范围内光透率可以达到 86%。

1.2.2 AgHT 光透明薄膜天线研究

2009 年,英国伦敦大学玛丽女王学院的 Katsouranos 发表了《光透明超

宽带天线的应用》一文,这是光透明薄膜材料首次应用在超宽带天线的领域^[22]。Katsournaros 在研究中使用的是 AgHT-4 的光透明薄膜材料。它是一种多层膜结构的透明材料,主要分为三层,中间一层是薄金属银,上下两层为氧化锡。这种多层结构的材料由于加入了金属银,因此相比 ITO 具有更高的导电率,但是它的光透过率较小。图 1-5(a)是光透明超宽带天线的实物图,采用的是共面波导馈电的单极子形式,工作频率覆盖 1 GHz 到 8.5 GHz。与此同时,文中还设计了相同尺寸和结构的金属铝制超宽带天线作为对比。图 1-5(b)是光透明天线和金属铝天线的增益对比图,可以看出光透明天线的增益比铝制天线的增益低 5 dB 左右,这是因为光透明材料的导电率比金属铝更低。

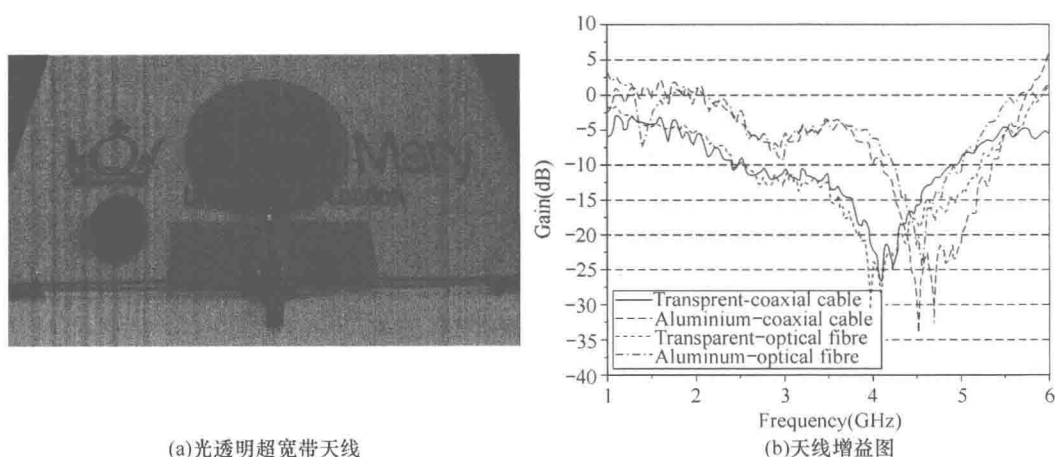


图 1-5 光透明超宽带天线的实物图

英国布鲁内尔大学的 Thomas Peter 博士在光透明超宽带天线应用领域做了很多的探索和研究^[23-26]。他通过实验验证了利用 AgHT 光透明薄膜材料制作的超宽带天线,在弯折或者形变的情况下,天线仍然可以保持良好的性能,而金属天线无法做到这一点。光透明天线良好的隐蔽特性和抗形变特性,使得光透明超宽带天线在单兵通信等军事领域有着更好的应用前景。考虑到光透明薄膜材料较低的导电率会影响天线的辐射效率, Peter 博士通过在天线结构中引入谐振环结构来增加光透明超宽带天线的辐射效率。在最新的一篇论文中提出了利用光透明薄膜超宽带天线实现“绿色天线”的功能。它是将 AgHT 薄膜制作的光透明超宽带天线集成在太阳能电池板上,天线在实现通信功能的同时,会收集空间中的电磁能量并通过连接在天线后面的整

流电路转化为电能。电能又可以提供给整个系统使用。

此外,美国 Cohen 博士的团队成功研制了第一款商用的宽带光透明薄膜天线^[27]。利用 AgHT 材料设计了可集成在建筑物或者汽车玻璃上的透明天线。他们声称这种天线具有非常宽的工作频段并且具有更大的增益。天线具有比较小的尺寸,能够方便地集成在汽车上,由于它良好的隐蔽特性,可以广泛应用在军事通信等领域。图 1-6 为悍马汽车上集成的光透明天线的示意图。然而,这种天线的工作频率被限制在了 9 GHz 到 11 GHz,在无线通信领域中这些频段并不常用。

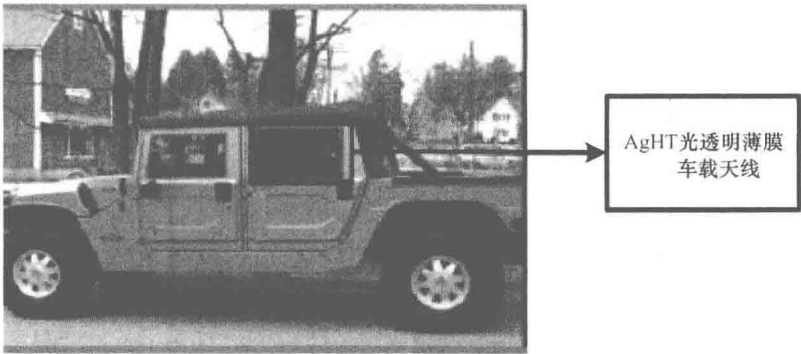


图 1-6 车载光透明薄膜天线

1.2.3 金属网格光透明薄膜天线研究

金属在一般情况下是不透明的,但是当金属薄膜的厚度足够小的时候,这种材料同样具有一定的可见光性。目前,以金、银、铜等金属为主的金属薄膜也用于光透明薄膜天线的研究。但是值得一提的是这种金属薄膜材料价钱昂贵,加工和制作工艺比较复杂,因此研究和应用还比较少。

Julien Hautcoeur 的科研团队在金属网格光透明天线方面做了一些研究和设计的工作。文献^[28]介绍了一种利用金属薄膜制作的单极子光透明天线。图 1-7 所示为金属薄膜材料的示意图,这种材料是由 6 μm 厚度的金属银和 5 nm 厚度的超薄金属钛通过射频磁控溅射技术喷射在 0.7 mm 厚度的透明玻璃上,并通过光刻腐蚀的过程将金属薄膜制成网格状,这样金属网格材料就具有了很好的光透性。通过测试得出材料的表面阻抗只有 0.054 Ω/sq ,光透率达到 81.3%。利用这种金属网格材料制作的单极子天线具有很高的辐

射效率和良好的光透过性。文献^[29,30]利用这种金属银网格薄膜研究了光透明超宽带天线和可用于基站的透明缝隙天线,所设计天线均具有比较高的辐射效率。这是显而易见的,因为这种光透明材料本质上是金属,是通过网格化实现了材料的光透性。

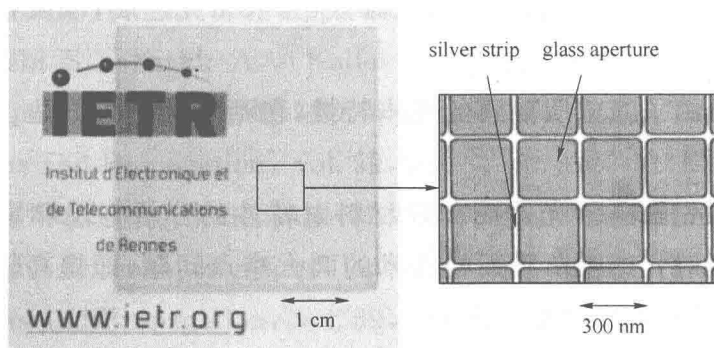


图 1-7 金属银网格光透明薄膜示意图

Ning Guan^[31]利用铜网格设计了工作在 2.4 GHz 的 WLAN 天线。天线具有较高的辐射效率和一定的透明特性,同时金属网格越大,天线效率越低,光透过性越好。此外,还有学者将金属网格天线与太阳能电池板结合,研究光透明薄膜天线在卫星上的应用^[32,33]。文献^[34]研究了 60 GHz 的光透明天线,利用金属网格材料设计了共面波导馈电的单极子天线,研究表明 60 GHz 的网格型光透明单极子天线和常规金属天线的性能接近。

光透明薄膜天线技术诱人的应用前景,得到了越来越多科研人员的关注。除了上述三种常见的光透明薄膜材料之外,美国德雷塞尔大学的科研团队还发明了一种利用喷绘打印机制作光透明天线的技术,它是将导电油墨直接打印在柔性介质材料或者透明介质上^[35,36]。他们利用这种技术设计了 RFID 标签天线和 MIMO 天线,天线可以使用喷墨打印机直接喷涂在透明介质表面,制作非常简单,但是为了保证导电油墨较高的导电率牺牲了天线的光透特性。

1.3 本书主要内容和组织结构

本书对光透明薄膜天线研究和设计中的难点问题进行了剖析,给出了材