



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

集成电路设计丛书

硅基毫米波集成电路与系统

池保勇 马凯学 虞小鹏◎著



科学出版社
龍門書局



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

集成电路设计丛书

硅基毫米波集成电路与系统

池保勇 马凯学 虞小鹏 著



科 学 出 版 社
龍 門 書 局
北 京

内 容 简 介

本书以硅基毫米波集成电路与系统涉及的关键技术为主线,结合三位作者所在团队的科研工作,详细讨论在毫米波元器件、毫米波核心单元电路及毫米波集成系统等方面的关键技术和科研进展。

全书共分 10 章。第 1 章介绍毫米波的应用和毫米波集成电路面临的主要技术挑战;第 2 章讨论硅基片上集成毫米波无源元件的电学特性;第 3 章~第 5 章讨论宽带毫米波前端、毫米波功率放大器和毫米波信号源产生电路的设计技术;第 6 章介绍一款 77GHz 数模混合 FMCW 雷达信号源的设计技术;第 7 章讨论毫米波相控阵芯片的工作原理和国内外科研进展情况;第 8 章介绍全集成毫米波通信收发机芯片的设计技术;第 9 章讨论毫米波雷达收发机技术的基本原理、基本架构和国内外科研进展情况;第 10 章介绍一款 77GHz FMCW 相控阵雷达收发机芯片的设计技术。

本书可以作为高等院校工科微纳电子、集成电路设计、通信与电子系统等专业研究生的教材或参考书,也可作为毫米波集成电路、毫米波通信或雷达系统工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

硅基毫米波集成电路与系统 / 池保勇, 马凯学, 虞小鹏著. —北京: 龙门书局, 2020.3

(集成电路设计丛书)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 国家出版基金项目

ISBN 978-7-5088-5714-5

I. ①硅… II. ①池… ②马… ③虞… III. ①硅基材料-微波集成电路 IV. ①TN454

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2020)第 041943 号

责任编辑: 赵艳春 / 责任校对: 王 瑞

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 蓝 正

科 学 出 版 社 出 版
龙 门 书 局

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

三河市春园印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2020 年 3 月第 一 版 开本: 720 × 1000 B5

2020 年 3 月第一次印刷 印张: 19 插页: 1

字数: 380 000

定价: 148.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《集成电路设计丛书》编委会

主 编：郝 跃

副 主 编：黄 如 刘 明 魏少军 杨银堂

常务副主编：朱樟明

编 委：(按姓氏拼音排序)

胡向东 廖怀林 林福江 龙世兵 马凯学

毛志刚 时龙兴 孙宏滨 孙玲玲 王志华

尹首一 虞小鹏 曾晓洋 张 波 赵元富

邹雪城

序

集成电路无疑是近 60 年来世界高新技术的最典型代表，它的产生、进步和发展无疑高度凝聚了人类的智慧结晶。集成电路产业是信息技术产业的核心，是支撑经济社会发展和保障国家安全的战略性、基础性和先导性产业，也是我国的战略性新兴产业。当前和今后一段时期，我国的集成电路产业面临重要的发展机遇期，也是技术攻坚期。总体上讲，集成电路包括设计、制造、封装测试、材料等四大产业集群，其中集成电路设计是集成电路产业知识密集的体现，也是直接面向市场的核心和制高点。

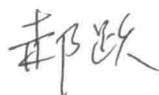
“关键核心技术是要不来、买不来、讨不来的”，这是习近平总书记在 2018 年全国两院院士大会上的重要论述，这一论述对我国的集成电路技术和产业尤为重要。正是由于集成电路是电子信息产业的基石和现代工业的粮食，对国家安全和工业安全具有决定性的作用，我们必须、也只能立足于自主创新。

为落实《国家集成电路产业发展推进纲要》，加快推进我国集成电路设计技术和产业发展，多位院士和专家学者共同策划了这套《集成电路设计丛书》。这套丛书针对集成电路设计领域的关键和核心技术，在总结近年来我国集成电路设计领域主要成果的基础上，重点论述该领域的基础理论和关键技术，给出集成电路设计领域进一步的发展趋势。

值得指出的是，这套丛书是我国中青年学者近年来学术成就和技术攻关成果的总结，体现集成电路设计技术和应用研究的结合，感谢他们为大家介绍总结国内外集成电路设计领域的最新进展，每本书内容丰富，信息量很大。丛书内容包含了先进的微处理器、系统芯片与可重构计算、半导体存储器、混合信号集成电路、射频集成电路、集成电路设计自动化、功率集成电路、毫米波及太赫兹集成电路、硅基光电片上网络等方面的研究工作和研究进展。本书旨在使读者进一步了解该领域的研究成果和经验，吸引和引导更多的年轻学者和科研工作者积极投入到集成电路设计这项既具有挑战又有吸引力的事业中来，为我国集成电路设计产业发展做出贡献。

感谢撰写丛书的各领域专家学者。愿这套丛书能成为广大读者，尤其是科研工作者、青年学者和研究生十分有用的参考书，使大家能够进一步明确发展方向

和目标，为开展集成电路的创新研究和工程应用奠定重要基础。同时，希望这套丛书也能为我国集成电路设计领域的专家学者提供一个展示研究成果的交流平台，进一步促进和推动我国集成电路设计领域的教学、科研和产业的深入发展。



2018年6月8日

前 言

毫米波技术具有通信带宽宽、探测精度高和对非导体材料穿透能力强的优点,在超高速通信、高精度雷达探测、无源成像、交通、医疗和监控等国民经济重要领域具有广泛的应用前景。特别地,毫米波作为第五代(5G)移动通信系统中提供 Gbit/s 以上数据率的有效技术方案,随着第五代移动通信系统的持续推进,其受到工业界和学术界日益广泛的关注,并吸引了更多的研究人员投入此方面的研究当中。但原采用 GaAs 等 III-V 族工艺实现的毫米波系统受限于有限的集成度,系统装配复杂,成本高昂,系统体积和功耗难以满足未来毫米波应用的需求。而随着硅基工艺(CMOS 或 SiGe)的发展,晶体管的 f_{\max} 和特征频率(f_T)均已超过 300GHz,已能支撑实现高集成度、低成本的毫米波集成电路。

国内外的研究者已在硅基毫米波集成电路方面进行了大量的研究,取得了很多研究成果。随着技术的日益成熟,基于硅基工艺实现的毫米波集成电路开始进入真正的产品开发阶段,如 TI 于 2018 年 4 月推出了基于 CMOS 工艺实现的 77GHz 车载毫米波雷达芯片产品。与此相适应,工业界对硅基毫米波集成电路设计人才的需求也越来越大。本书正是在这样的背景下完成的,它以硅基毫米波集成电路与系统涉及的关键技术为主线,结合三位作者所在团队的科研工作,详细讨论在毫米波元器件、毫米波核心单元电路及毫米波集成系统等方面的关键技术和科研进展,期望能让读者对硅基毫米波集成电路与系统的关键技术和发展现状具有较为清晰的了解,并能为从事此方面科学研究或技术开发工作的研究生或工程师提供技术参考。

全书共分 10 章。第 1 章是毫米波集成电路概论,介绍毫米波的应用和毫米波集成电路面临的主要技术挑战。

第 2 章是片上集成毫米波无源元件,介绍常用硅基集成毫米波无源元件及其基本特性,并结合我们的研究工作,讨论基于耦合谐振腔的宽带无源网络和人工电介质传输线(DiCAD)以及它们在毫米波电路中的应用,最后对毫米波芯片封装技术与封装天线进行简单的讨论。

第 3 章~第 6 章讨论核心毫米波模块电路的设计技术。其中,第 3 章讨论宽带毫米波前端的设计技术,通过引入一种适用于毫米波收发开关与毫米波前端模块的联合优化方法,降低了在片上集成收发开关对收发机性能的影响,并扩展了毫米波前端模块的带宽。第 4 章以两款毫米波功率放大器芯片为例,讨论硅基毫

米波功率放大器的设计技术。第 5 章讨论毫米波信号源产生电路中的毫米波振荡器、毫米波分频器等核心电路模块以及毫米波锁相环的设计技术。第 6 章在第 5 章所介绍内容的基础上, 结合我们的科研工作, 详细介绍一款 77GHz 数模混合 FMCW 雷达信号源芯片的设计考虑和设计过程。

第 7 章~第 10 章讨论毫米波系统芯片的设计技术。其中, 第 7 章讨论毫米波相控阵芯片的工作原理和国内外科研进展情况。第 8 章在前面各章内容的基础上, 结合我们的科研工作, 详细讨论两款 60GHz 毫米波通信收发机芯片的设计技术。第 9 章讨论毫米波雷达收发机技术的基本原理、基本架构和国内外科研进展情况; 第 10 章在第 9 章所介绍内容的基础上, 结合我们的科研工作, 详细介绍一款 77GHz FMCW 相控阵雷达收发机芯片的设计考虑和设计过程。

本书由清华大学池保勇教授统筹全书内容, 第 5 章由浙江大学虞小鹏教授撰写, 第 7 章和第 9 章由天津大学马凯学教授撰写, 其余各章由池保勇教授撰写。在撰写过程中, 三位作者进行了广泛讨论, 在各部分撰写完后, 三位作者又交叉审阅了全部书稿并进行了修正。可以说, 本书是三位作者通力合作的结晶。

本书是对三位作者所在团队多年的科研工作进行总结和整理后形成的, 部分内容取材于贾海昆、况立雪和林健夫的博士或硕士学位论文, 宋政、刘兵、赵俊炎参与了部分章节的文字整理工作, 多年的科研工作还得到王志华教授、张春副研究员、姜汉钧副教授等的帮助和支持, 在此一并表示感谢。

限于作者水平, 书中难免存在不足之处, 恳请读者批评指正。

作者

2019 年 2 月

目 录

序

前言

第 1 章 毫米波集成电路概论	1
1.1 毫米波应用	2
1.2 毫米波集成电路的主要技术挑战	5
参考文献	14
第 2 章 片上集成毫米波无源元件	17
2.1 常用无源元件	17
2.2 基于耦合谐振腔的宽带无源网络	23
2.3 数字控制人工电介质传输线	40
2.4 毫米波芯片封装技术与封装天线	46
参考文献	49
第 3 章 宽带毫米波前端	50
3.1 高阶 LC 网络宽带匹配技术	50
3.2 宽带毫米波前端的电路实现与联合优化	52
3.3 芯片测试结果	59
参考文献	63
第 4 章 毫米波功率放大器	65
4.1 基于变压器的毫米波功率放大器	65
4.1.1 电路结构	65
4.1.2 芯片测试结果	67
4.2 基于晶体管堆叠技术的双模功率放大器	68
4.2.1 晶体管堆叠技术	68
4.2.2 共源共栅技术	69
4.2.3 双模功率放大器技术	70
4.3 双模功率放大器的电路实现	70
4.3.1 电路结构	70
4.3.2 功率可配置的输出级	71
4.3.3 高增益的驱动级	76

4.3.4 芯片测试结果	77
参考文献	80
第 5 章 毫米波信号源产生电路	82
5.1 毫米波振荡器	82
5.1.1 负阻振荡器	85
5.1.2 行波压控振荡器	94
5.2 毫米波分频器	99
5.2.1 注入锁定分频器	100
5.2.2 其他毫米波段分频器的设计	105
5.3 毫米波锁相环	108
参考文献	123
第 6 章 77GHz 数模混合 FMCW 雷达信号源	125
6.1 毫米波雷达信号源研究现状	126
6.2 77GHz 数模混合 FMCW 雷达信号源的系统设计	126
6.2.1 系统结构	126
6.2.2 单比特单环 3 阶 $\Delta\Sigma$ 调制器	128
6.2.3 混合型 FIR 滤波技术	132
6.2.4 型 III 调频斜率估计技术	134
6.3 77GHz 数模混合 FMCW 雷达信号源的电路设计	137
6.3.1 数字电路	137
6.3.2 电流舵型数模转换器	137
6.3.3 电流模 2 分频器	140
6.4 77GHz 数模混合 FMCW 雷达信号源芯片测试结果	142
6.4.1 相位噪声	142
6.4.2 参考杂散	144
6.4.3 调制频谱	145
6.4.4 调制线性度	146
参考文献	148
第 7 章 毫米波相控阵技术	150
7.1 毫米波相控阵技术的发展与应用	150
7.1.1 军事对抗	150
7.1.2 智能驾驶	151
7.1.3 5G 移动通信系统	152
7.2 相控阵基础理论	154
7.2.1 相位扫描原理	154

7.2.2 相控阵系统结构	157
7.3 毫米波相控阵芯片实例分析	162
7.3.1 国内硅基毫米波相控阵芯片实例	163
7.3.2 国外硅基毫米波相控阵芯片实例	166
7.4 小结	179
参考文献	179
第8章 全集成毫米波通信收发机	181
8.1 毫米波通信收发机系统设计	181
8.1.1 频率规划	181
8.1.2 链路预算	184
8.1.3 带宽分配	185
8.2 全集成 60GHz QPSK 无线收发芯片	186
8.2.1 系统结构及设计考虑	186
8.2.2 收发开关设计	189
8.2.3 宽带接收通路设计	191
8.2.4 宽带发射通路设计	196
8.2.5 时钟网络设计	198
8.2.6 芯片测试结果	200
8.3 IEEE 802.11ad 无线收发芯片	209
8.3.1 系统结构及设计考虑	209
8.3.2 高线性度的收发开关	212
8.3.3 芯片测试结果	218
8.3.4 小结	223
参考文献	224
第9章 毫米波雷达收发机技术	226
9.1 毫米波雷达收发机概述	226
9.1.1 全集成毫米波雷达收发机的作用	227
9.1.2 全集成毫米波雷达收发机发展状况	228
9.1.3 国内全集成雷达的发展形势	229
9.2 全集成毫米波雷达收发机主要质量指标	230
9.2.1 发射机参数	230
9.2.2 接收机参数	233
9.3 全集成毫米波雷达收发机分类及测量原理	235
9.3.1 脉冲雷达	235
9.3.2 连续波雷达	236

9.4 全集成毫米波雷达收发机基本原理及架构	239
9.4.1 全集成毫米波雷达发射机	239
9.4.2 全集成毫米波雷达接收机	240
9.4.3 脉冲雷达整体架构	242
9.4.4 连续波雷达	244
9.5 现有雷达收发机介绍	246
9.5.1 文献中成品雷达收发机架构以及分析	246
9.5.2 现有成品雷达收发机架构以及分析	250
参考文献	258
第 10 章 77GHz FMCW 相控阵雷达收发机	259
10.1 系统规划	259
10.1.1 频率规划	260
10.1.2 FMCW 信号产生方案	261
10.1.3 相控阵移相方案	262
10.1.4 链路预算	262
10.1.5 自校准方案	265
10.2 系统架构	266
10.3 发射机电路设计	267
10.3.1 小数型锁相环设计	267
10.3.2 发射通路的二倍频器	267
10.3.3 功率放大器	269
10.4 接收机电路设计	269
10.4.1 低噪声放大器及混频器	269
10.4.2 移相器	270
10.4.3 模拟基带设计	272
10.5 本振馈线网络设计	273
10.6 收发机芯片的自校准方案	275
10.7 收发机芯片的布局规划	276
10.8 芯片测试结果	278
10.8.1 发射机测试	279
10.8.2 接收机测试	283
10.8.3 性能总结与讨论	290
参考文献	291

第 1 章 毫米波集成电路概论

随着技术的发展，人们的日常生活中出现了各种各样的无线应用，这些应用的工作频率一般限于 6GHz 以下的频段。虽然经过近 10 年的发展，以低频段射频集成电路芯片为核心的无线应用发展已经相对比较成熟，市场上出现了很多成熟的产品，成为集成电路行业和电子产业的主要推动力之一。但由于频谱是一种稀缺资源，低频段的无线应用所能分配的频谱资源极为有限，限制了每一种无线应用的信号带宽和通信速率，已经无法满足人们日益增长的高速数据访问的需求。同时，低频段的频谱资源已经近似得到完全利用，很难为新型无线应用的开发分配频谱资源。拥挤的低频段无线应用也导致了各种无线应用之间的互相干扰，限制了无线应用的性能。可以看到，由于低频段的固有局限，低频段无线系统存在各种难以解决的难题，无法满足未来人们的更高需求。

为了克服低频段无线应用存在的这些固有局限，可以把工作频段提高到毫米波段。毫米波段频谱资源非常丰富，可以为每一种无线应用分配很宽的频谱资源(如 60GHz 短距离无线通信系统可以分配 7GHz 的带宽，77GHz 车载雷达系统可以分配 2~4GHz 的带宽)；目前各个国家对毫米波频段频谱资源的分配近似是统一的，这为开发世界范围内通用的无线应用系统提供了条件；毫米波频段丰富的频谱资源可以支持各种新型的无线应用，毫米波频段覆盖范围为 30~300GHz，非常宽，可以为各种无线应用分配很宽的频谱资源，支持新型无线应用的开发；目前毫米波频段受到的干扰很少，因此毫米波前端电路的开发不需要考虑很复杂的干扰问题，大大降低了毫米波电路系统结构的复杂性，同时由于每一种无线应用可以得到较宽的频谱资源，所以不用采用复杂的调制方案就可以得到高速数据率，降低了基带实现的复杂性，更进一步降低了系统成本；而毫米波电路本身的微小尺寸也可以减小芯片面积，天线尺寸也变得很小，甚至可以实现片上集成的毫米波天线，将进一步缩小毫米波无线系统的尺寸并降低成本。

毫米波应用的不利方面在于其空中传输损耗比较高，远高于低频段的传输损耗，如图 1.1 所示。高的传输损耗限制了无线应用的工作距离，但通过采用相控阵技术来实现空中波束合成，可以有效解决传输距离的问题。由于毫米波电路及天线的尺寸很小，毫米波频段更容易实现大规模的相控阵阵列单元。同时，相控阵所提供的波束扫描功能在定向通信、高精度成像或雷达中具有特别的用途。

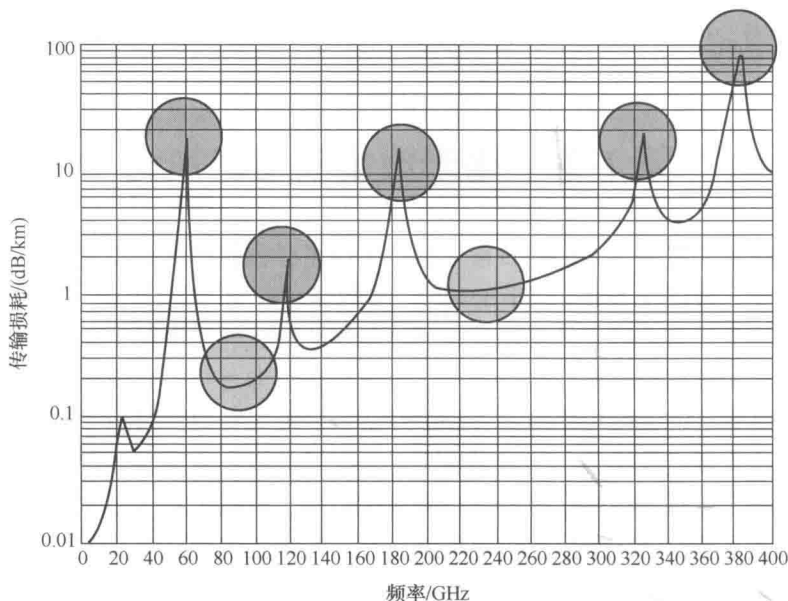


图 1.1 不同频段电磁波在海平面处测得的空中传输损耗

从图 1.1 可以看到，毫米波段中的不同频段表现出不同的空中传输特性，这是空气中的氧气、水分等对不同频段电磁波的吸收率不同而造成的。例如，在 35GHz、87GHz、140GHz 和 220GHz 附近，传输损耗相对较低，形成有利于长距离传输的传输窗口，可以用来实现长距离无线应用。而在 60GHz、120GHz 和 185GHz 附近，传输损耗相对较高，不利于长距离传输，可以利用这些频段来实现高保密性短距离无线应用系统。毫米波频段同时拥有适于长距离通信和短距离通信的频带，可以满足不同的应用需求。

1.1 毫米波应用

由于以上所提到的这些优点，人们对毫米波段的研究兴趣越来越浓，而各种关于毫米波段的应用也越来越多。毫米波段的应用是随着人们对毫米波的认识逐渐扩展的，相信将来更多的毫米波段应用会陆续出现。目前，毫米波段的应用可以主要分为以下几类。

(1) 高数据率无线通信：由于毫米波段无线通信系统具有很宽的带宽(如 60GHz 无线系统可以占用 7GHz 的带宽)，数据率很容易就能达到 Gbit/s 量级。如果再采用多载波技术，数据率则可以提高到 10Gbit/s 以上。这么高的数据率，使毫米波无线通信系统可以用来代替光纤实现点对点宽带无线接入。高数据率毫米波无线通信系统的另一个典型应用是实现多媒体家庭网络系统，将数字高清电视

机、音频设备、因特网、电话等采用无线的方式连接起来,组成一个可移动的家庭娱乐环境。它可支持无压缩数字高清电视音频/视频数据流从DVD播放机、计算机、个人掌上电脑(personal digital assistant, PDA)或者移动性媒体播放器到数字高清电视机的传输,或者计算机到投影仪之间的高速数据传输,它还可以支持计算机与外围设备(如打印机、数码相机、PDA等)之间的文件传输。在未来的第五代(5G)移动通信系统中,毫米波也作为实现Gbit/s以上传输数据率的有效技术途径纳入5G标准中。图1.2给出了5G毫米波通信的典型应用场景,基站与基站之间通过回传(backhaul)网络实现数据交互,而基站与移动终端之间通过毫米波相控阵技术实现高速数据传输^[1]。

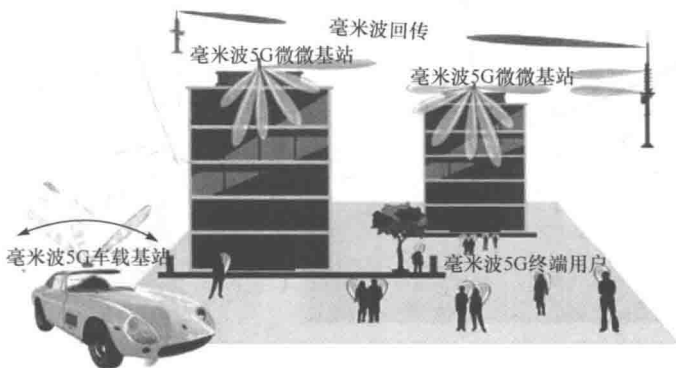


图 1.2 5G 毫米波通信的典型应用场景

(2) 毫米波雷达相关的应用: 由于毫米波电路具有精度高、尺寸小等优点,毫米波在雷达相关的应用中引起了广泛注意,工作频段从24GHz、77GHz、100GHz到220GHz,这种雷达的检测精度可以达到亚毫米级,可以用在军事、公共安全、危机管理、雷达探矿、危险物品检测等具有重大意义的领域。在车载应用领域,24GHz毫米波短距离雷达(short range radar, SRR)可以用于盲点监测、启停和倒车、停车辅助等;长距离雷达(long range radar, LRR)可用于自动巡航(adaptive cruise control, ACC);中距离雷达(middle range radar, MRR)可用于变道辅助等(图1.3),可有效避免交通事故的发生,具有广阔的市场前景。

(3) 应用于安防、环境监控等领域的毫米波成像系统及传感器: 任何物体均会向外自然辐射包括毫米波频段的无线电波,利用毫米波技术可以实现毫米量级精度的微波成像;与可见光成像技术相比,毫米波可以穿透雨、雾等障碍物,从而实现全天候成像应用;与金属探测器相比,毫米波成像系统还可以探测到藏匿于障碍物之后的非金属武器,可以广泛应用于安防系统中;与X射线技术相比,毫米波成像系统可以被动式成像,因此具有很高的安全性;可以广泛应用于安防、环境监控等领域(图1.4),具有极高的应用价值。

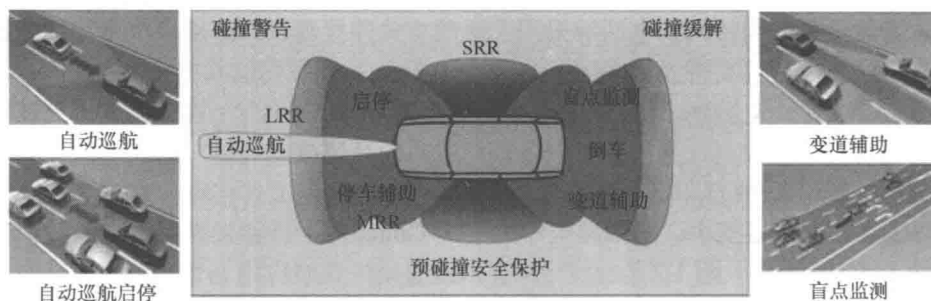


图 1.3 车载毫米波雷达

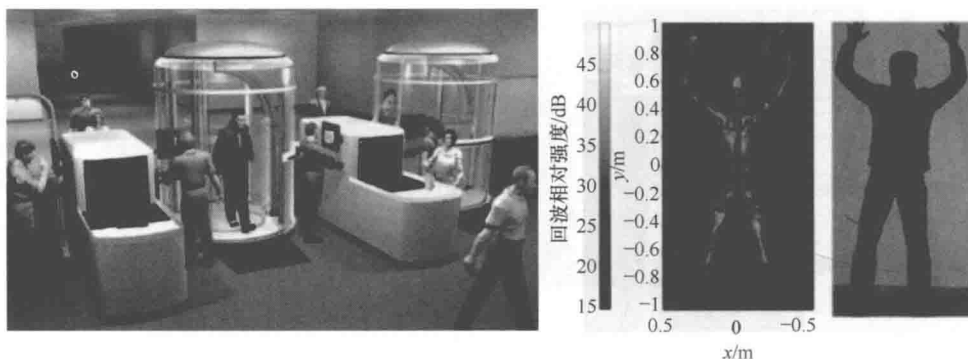


图 1.4 毫米波安检仪

(4) 特殊应用, 如星际通信、高能量无线电波(可用于开发高能毫米波武器或者高能毫米波手术刀等), 但这些应用面相对比较狭窄。

到目前为止, 真正商用的毫米波系统还不是很多, 这主要是由于目前绝大多数毫米波电路都采用 GaAs、InP 等特殊材料和工艺制作, 产品成本居高不下, 限制了这类应用的推广。如果能够采用便宜的硅基工艺实现毫米波电路, 产品价格将大幅下降, 应用将很快得到推广, 并走近普通消费者的生活。从历史上无线局域网和蓝牙的发展历程就很容易看到这一点。因此, 毫米波电路大范围、高密度应用的关键是低的产品成本, 而这只能基于价格便宜的硅基工艺实现才能将产品成本降低到普通消费者可以承受的水平。

随着硅基工艺技术的发展, 28nm N 沟道金属-氧化物-半导体(N-channel metal-oxide semiconductor, NMOS)晶体管和异质结双极型晶体管(heterojunction bipolar transistor, HBT)的特征频率 f_T 和最高振荡频率 f_{max} 均已超过 300GHz(图 1.5), 可以支持高达数百 GHz 的毫米波集成电路实现。因此, 在目前工艺技术的支持下, 进行硅基毫米波集成电路的研究具有可实现的前提条件, 并为未来毫米波产品的开发和应用打下良好的基础。

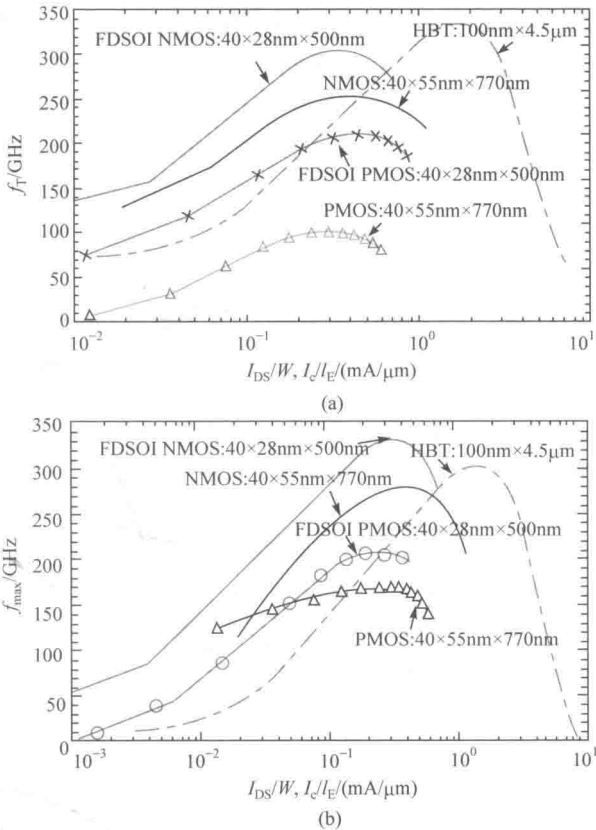


图 1.5 硅基工艺晶体管的特征频率和最高振荡频率与电流密度之间的关系曲线^[2]

1.2 毫米波集成电路的主要技术挑战

毫米波电路的工作频率高，波长仅有几毫米，电磁场效应明显，电路工作频率接近晶体管的特征频率 f_T 或最高工作频率 f_{max} ，导致毫米波电路的性能受到严重影响。在硅基工艺下，高损耗的衬底严重恶化了片上无源元件的品质因子，进一步限制了大量采用无源元件的毫米波电路的性能。以上这些因素使毫米波集成电路的设计面临严重的技术挑战。

1) 硅基工艺下晶体管高频性能的限制

图 1.6 给出了各种工艺下晶体管特征频率随特征尺寸的变化情况。可以看到，随着硅基工艺技术和晶体管特征尺寸的不断缩小，硅基晶体管的特征频率持续提高，130nm 双极-互补-金属-氧化物-半导体(bipolar-complementary-metal-oxide-semiconductor, BiCMOS)工艺和 65nm 互补金属-氧化物-半导体(complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)工艺下晶体管的特征频率不到 200GHz，而 90nm