



太赫兹波调控

李九生 著



科学出版社

太赫兹波调控

李九生 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要研究利用外加激励包括电、光、磁、温度等方式改变介质中的载流子浓度、晶格状态从而导致介质的电导率发生改变;利用电、光和温度引起材料的非线性效应,改变材料的折射率;或者利用磁场引起磁光材料的磁光效应,改变材料的磁导率,从而改变器件谐振特性,实现对太赫兹波调制、开关、滤波、功分、分束、吸收、逻辑控制、反射控制以及编码功能,对太赫兹波实现有效调控并阐明其中的调控机制和物理问题。本书共9章,内容主要包括:太赫兹波调控发展及研究现状;太赫兹波调制器;太赫兹波开关;太赫兹波滤波器;太赫兹波功分与偏振分束器;太赫兹波反射控制器;太赫兹波光子晶体逻辑器件;太赫兹波编码器;太赫兹波吸收器等。

本书可作为相关专业高年级本科生、研究生、科研和工程技术人员深入了解太赫兹调控及应用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

太赫兹波调控 / 李九生著. —北京: 科学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-03-058260-7

I. ①太… II. ①李… III. ①电磁辐射-调控 IV. ①O441.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第157767号

责任编辑: 陈 静 / 责任校对: 郭瑞芝
责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

河北鹏润印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年8月第 一 版 开本: 720×1 000 1/16

2018年8月第一次印刷 印张: 22 插页: 16

字数: 443 000

定价: 148.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序

太赫兹技术是国内外热门研究领域，实现太赫兹波有效调控是科研人员的共同目标。李九生教授潜心致力于太赫兹技术研究已有十几年，长期在教学和科研第一线辛勤耕耘，在总结自己多年研究心得的基础上，撰写了专著《太赫兹波调控》，并将多年累积的研究成果以及经验全都倾注于此专著中。我有幸在该书付梓前得到了全部稿件，享尽先睹为快的乐趣。

该专著介绍和处理了许多太赫兹波调控器件的独特问题，如太赫兹波调制、开关、滤波、功分、分束、吸收、逻辑控制、反射控制和编码等器件，对其中涉及的许多数学问题都有详细的推证和演算。通过研读该书，广大读者可以获得丰富的太赫兹相关专业知识，相关科技人员可以全方位了解和把握太赫兹波调控技术及其发展趋势。

我深信，该专著的出版一定会大力推动我国太赫兹技术的教学与研究工作。

姚建铨

天津大学教授、中国科学院院士

2018年6月

前 言

随着太赫兹辐射源和检测技术的突破,太赫兹科学技术得到快速发展。由于其占据特殊的频谱位置,太赫兹波具有频带宽、光子能量低、相干性强、测量信噪比高、安全性好等优点,其在无线宽带通信、雷达、遥感、安全检查、材料表征、环境监测、高分辨成像和医学诊断等领域的应用前景逐渐被人们所熟知。然而,由于大多数自然物质对太赫兹波缺乏强的电磁响应,已有的电子器件和红外/光学器件又无法直接应用于太赫兹频段,导致太赫兹功能器件极度缺乏,严重制约了太赫兹技术及其应用发展。新型太赫兹波电磁调控机理及其关键材料和器件研究一直都是前沿研究热点与挑战,同时也是新材料、新技术与交叉学科发展的机遇。

太赫兹波段处于低能量的电子学和高能量的光子学之间过渡地带,是最后一段被人类了解和认识的电磁波波段,也是目前公认的具备优良特性的电磁波段。太赫兹辐射的产生、传输、调控和探测构成了太赫兹这门新型科学的关键技术,在高速宽带通信、国防安全、医疗诊断、新型材料研发等多个领域具有重要的应用价值。然而,由于太赫兹光子能量较低,很多物质对于太赫兹波响应十分微弱,致使太赫兹功能器件研究和发展仍然相对滞后,高效、主动的太赫兹器件仍然十分匮乏。已报道的太赫兹波调控器件性能远未达到太赫兹系统应用所需要的指标。因此有必要结合现有新材料的发展,发掘和研究更好的太赫兹波调控结构和体系,实现对太赫兹波快速、高效的调控。

本书在撰写过程中得到赵泽江、胡慕姝、余佳培、吴爽、李绍和、史叶欣、陈旭生等研究生协助。特别感谢导师姚建铨院士给予我的指导与帮助。

李九生

2018年4月20日

于中国计量大学

目 录

序

前言

第 1 章 太赫兹波调控发展及研究现状	1
参考文献	4
第 2 章 太赫兹波调制器	7
2.1 DAST 介质太赫兹波调制器	7
2.1.1 测试系统及理论分析	8
2.1.2 实验结果分析	10
2.2 有机光子晶体太赫兹波调制器	11
2.3 复合光子晶体太赫兹波调制器	15
2.3.1 太赫兹波调制器结构	15
2.3.2 计算结果分析	16
2.4 硅光子晶体太赫兹波调制器	18
2.4.1 调制器样品	18
2.4.2 实验装置及测试结果	19
2.5 非线性介质太赫兹波调制器	20
2.5.1 调制器工作原理	20
2.5.2 太赫兹波调制性能	22
2.6 石墨烯开口谐振环太赫兹波调制器	24
2.6.1 石墨烯调制器结构	24
2.6.2 调制特性分析	25
参考文献	29
第 3 章 太赫兹波开关	31
3.1 耶稣式十字架结构光控吸收型太赫兹波开关	31
3.1.1 开关控制机理	31
3.1.2 开关性能曲线	34
3.2 石墨烯圆环结构太赫兹波开关	35
3.2.1 开关结构与原理	35
3.2.2 开关响应特性	37

3.3 石墨烯开口圆环结构太赫兹波开关	39
3.3.1 开关调控模型	40
3.3.2 开关传输特性	42
3.4 S形石墨烯波导太赫兹波开关	46
3.4.1 太赫兹波开关理论分析	46
3.4.2 太赫兹波开关性能	49
3.5 硅光子晶体平板太赫兹波开关	51
3.6 T形光子晶体波导太赫兹波开关	54
3.6.1 T形光子晶体波导太赫兹波开关结构	54
3.6.2 T形光子晶体波导太赫兹波开关响应特性	55
3.7 超材料太赫兹波开关	57
参考文献	59
第4章 太赫兹波滤波器	61
4.1 正四边形排列镂空方形孔太赫兹波滤波器	61
4.2 正六角梅花形排列方形孔太赫兹波滤波器	68
4.3 六边形排列镂空圆孔太赫兹波滤波器	70
4.4 正四边形排列圆孔太赫兹波滤波器	75
4.5 石墨烯腔体结构太赫兹波滤波器	77
4.6 光子晶体太赫兹波滤波器	83
4.7 多通道可调太赫兹波滤波器	90
4.8 可调谐太赫兹波滤波器	99
4.9 温度控制太赫兹带阻滤波器	106
4.10 田字形互补超材料太赫兹波滤波器	110
4.11 单通道快速可调谐太赫兹波滤波器	114
参考文献	119
第5章 太赫兹波功分与偏振分束器	122
5.1 多通道磁控可调太赫兹波功分器	122
5.2 多通道温控可调太赫兹波功分器	127
5.3 四通道太赫兹波功分器	130
5.4 多通道耦合太赫兹波功分器	135
5.5 可调谐双波长太赫兹功分器	139
5.6 多模干涉光子晶体太赫兹波偏振分束器	143
5.7 硅平板光子晶体太赫兹波偏振分束器	147
5.8 全带隙光子晶体太赫兹波偏振分束器	152

5.9 双光子晶体谐振腔太赫兹波偏振分束器	156
5.10 级联多模干涉结构太赫兹波偏振分束器	162
参考文献	166
第 6 章 太赫兹波反射控制器	167
6.1 光栅结构太赫兹波反射强度控制器	167
6.2 双层石墨烯电控太赫兹波反射强度控制器	175
6.3 V 形槽温控太赫兹波反射强度控制器	181
6.4 石墨烯光电双控太赫兹波反射强度控制器	187
6.5 温控棱镜耦合太赫兹波反射位移控制器	193
6.6 磁控棱镜耦合太赫兹波反射位移控制器	200
6.7 电控棱镜耦合太赫兹波反射位移控制器	204
6.8 石墨烯棱镜耦合太赫兹波反射位移控制器	210
参考文献	215
第 7 章 太赫兹波光子晶体逻辑器件	217
7.1 光子晶体太赫兹波 S-R 锁存器	217
7.1.1 光子晶体太赫兹波 S-R 锁存器设计原理	217
7.1.2 光子晶体太赫兹波 S-R 锁存器传输特性	221
7.2 二维光子晶体太赫兹波逻辑解码器	224
7.2.1 二维光子晶体太赫兹波逻辑解码器结构	224
7.2.2 二维光子晶体太赫兹波逻辑解码器解码特性	226
7.3 光子晶体太赫兹波逻辑编码器	229
7.3.1 光子晶体太赫兹波逻辑编码器模型	229
7.3.2 光子晶体太赫兹波逻辑编码器稳态输出结果	231
7.4 光子晶体太赫兹波逻辑半加器	234
7.4.1 光子晶体太赫兹波逻辑半加器结构	234
7.4.2 光子晶体太赫兹波逻辑半加器稳态输出结果	235
7.5 光子晶体太赫兹波触发器	238
7.5.1 光子晶体太赫兹波触发器结构与原理	238
7.5.2 光子晶体太赫兹波触发器传输状态分析	240
7.6 太赫兹波逻辑与门和异或门	243
7.6.1 太赫兹波逻辑与门和异或门结构及稳态场	243
7.6.2 太赫兹波逻辑与门和异或门传输曲线	247
参考文献	249

第 8 章 太赫兹波编码器	250
8.1 开槽轮结构太赫兹波编码器	250
8.1.1 1bit 太赫兹波编码器	253
8.1.2 2bit 太赫兹波编码器	255
8.1.3 3bit 太赫兹波编码器	257
8.2 方格形宽频带太赫兹波编码器	259
8.2.1 编码结构单元设计	259
8.2.2 偏振不敏感性分析	264
8.3 风车形结构太赫兹波频率编码器	267
8.3.1 1bit 太赫兹波频率编码器	269
8.3.2 2bit 太赫兹波频率编码器	272
8.3.3 非周期太赫兹波频率编码器	275
8.4 正方形结构的太赫兹波频率编码器	277
8.4.1 1bit 太赫兹波频率编码器	279
8.4.2 2bit 太赫兹波频率编码器	281
8.4.3 非周期太赫兹波频率编码器	284
8.5 Pancharatnam-Berry 相位太赫兹波编码器	286
8.5.1 编码单元性能分析	287
8.5.2 编码器的设计与仿真	290
参考文献	297
第 9 章 太赫兹波吸收器	299
9.1 光可调太赫兹波吸收器	299
9.1.1 光可调太赫兹波吸收器工作原理	299
9.1.2 光可调太赫兹波吸收器性能	301
9.2 温控太赫兹波吸收器	304
9.2.1 温控太赫兹波吸收器工作原理	304
9.2.2 温控太赫兹波吸收器特性	305
9.3 双开口谐振环太赫兹波吸收器	307
9.3.1 双开口谐振环太赫兹波吸收器工作原理	307
9.3.2 双开口谐振环太赫兹波吸收器特性	310
9.3.3 双开口谐振环太赫兹波吸收器加工制作	313
9.3.4 器件性能测试	317
9.4 方形开口谐振环太赫兹波吸收器	318
9.4.1 方形开口谐振环太赫兹波吸收器结构及等效电路	318

9.4.2	计算结果分析	319
9.4.3	样品测试及分析	323
9.5	十字架形结构太赫兹波吸收器	324
9.5.1	十字架形结构太赫兹波吸收器设计及等效电路	324
9.5.2	结构优化及计算	325
9.5.3	样品加工及测试	329
9.6	对称 C 形结构太赫兹波吸收器	330
9.6.1	对称 C 形结构太赫兹波吸收器结构设计及优化	330
9.6.2	性能仿真与测试	333
9.7	磁可调太赫兹波吸收器	336
9.7.1	磁可调太赫兹波吸收器结构与理论分析	336
9.7.2	器件吸收特性计算	337
	参考文献	339

彩图

第1章 太赫兹波调控发展及研究现状

太赫兹 (THz, $1\text{THz} = 10^{12}\text{Hz}$) 波是指频率在 $0.1\sim 10\text{THz}$ 区间范围内的电磁波, 介于毫米波与红外光之间频谱范围的电磁波谱, 其波长范围跨越高达 10 个数量级, 由于其独特的频谱特性而倍受国内外研究人员关注, 在生物医学、安检、物质探测及无线宽带通信等领域都拥有十分重要的研究价值和应用前景^[1-6]。当前, 太赫兹波应用主要分为太赫兹光谱与传感、太赫兹成像与近场显微技术以及太赫兹雷达与通信三大主流方向。

太赫兹光谱与传感主要用于研究材料的物理特性, 通过测量太赫兹波经过被测材料后, 太赫兹波的幅度及相位变化, 从中得到被测材料的吸收、反射和透射等特性, 计算出被测材料的介电常数和吸收系数等物理参数, 进而根据 Drude (德鲁德) 模型计算得出材料的载流子浓度等信息。很多物质和生物组织中的分子振动和转动能级所对应的吸收谱都在太赫兹频率波段, 有着独特的指纹波谱性质, 因此, 通过对被测材料的太赫兹吸收谱线可以鉴别其内部包含的不同物质或分子。相比傅里叶红外光谱技术, 利用太赫兹波谱建立物质的图谱数据库或特征谱来实现对物质定性和定量分析, 鉴别的手段和方法更加多样, 对物质的测量和分析更加全面可靠。另外, 太赫兹波入射到多层结构物体的表面时, 在不同介质的交界面处会产生不同传输时间差的反射太赫兹波, 由于太赫兹波在不同介质层传输时间差在检测介质的折射率和吸收系数等光学特性的微小变化时十分敏感, 因此, 通过测量与分析太赫兹波的传输时间差能够很好地解析物体内部层结构。太赫兹成像与近场显微技术主要是利用太赫兹波在有机物材料或其他非极性材料中的高透过率特性, 实现对不同材料内部结构成像^[7-9], 得到被测材料的成分和形貌等多重信息。另外, 利用太赫兹成像与近场显微技术不仅可得到物体的形貌, 还可以得到物体内部构成信息, 从而实现无损检测。成像技术是当代医疗诊断不可或缺的主要辅助工具, 如超声成像、X 射线成像、核磁共振成像等, 太赫兹成像与近场显微技术以其独特的性质使得它在医学成像和医学诊断方面显示出无可比拟的优势。而且, 太赫兹波可以深入到无极性非金属材料对包裹内物体成像, 有效的检测和识别在各种遮盖物下的金属材质物品、复合材料、陶瓷、塑料、爆炸物、化学有毒试剂、液体等违禁品, 这种非接触式测量手段在国家安防领域有很好的应用前景。此外, 采用探针扫描方式可以实现太赫兹波的近场成像, 分辨率可达亚毫米量级, 该成像方法可以突破衍射极限, 用来探究介质局部太赫兹电磁响应,

实现惠更斯次级衍射面太赫兹电磁重构。太赫兹雷达与通信是太赫兹技术最具潜力的应用领域之一。太赫兹波段具有频谱丰富、带宽广、传输速率高的优势,对非极性材料具有较高的穿透性,例如在塑料、沙尘、纸片等材料中它的传输吸收与衰减率较低,太赫兹波尤其适合于星际间通信、短程大气通信以及局域网和室内宽带无线通信等领域^[10-13]。在星际间通信领域,太赫兹波比微波能做到的带宽和信道数要多得多,而相对于光通信而言,其波束较宽,容易对准,量子噪声较低。由于星际之间没有水蒸气的干扰,太赫兹通信更加自由,通过太赫兹源发射小功率就可以实现长距离的通信,相应的功能器件可以实现小型化和高度集成化。在大气范围内,太赫兹通信技术可以对重返大气层的飞行器如导弹、人造卫星、宇宙飞船等进行通信和遥测,太赫兹波因其穿透等离子体的能力成为克服“黑障”(Ionization Blackout)现象的唯一有效的通信工具。在地面短距离无线通信方面,尽管水分对太赫兹波的吸收非常严重,但是在太赫兹 870 μm 、620 μm 、450 μm 、350 μm 等波长处存在有太赫兹波透射窗口,使得长距离的太赫兹通信成为可能,太赫兹波可以获得 10Gbit/s 以上无线传输速度,这要显著优于当前超宽带技术,可以满足未来 10~20 年无线通信技术需要。考虑到目前移动通信技术所遇到的技术瓶颈,以太赫兹波为通信载体的新一代通信系统具有大容量、高传输速率、低窃听率、高抗干扰性、全天候工作等突出优点,未来地面短距离无线通信向太赫兹频段靠近是一种必然。另外,短距离内太赫兹波通信具有很强的抗干扰能力,不受远方电子干扰影响,甚至第三方在当地也很难接收太赫兹通信信号。由于太赫兹波相比微波拥有更短的波长和更宽的谱宽,所以太赫兹雷达具有更高的横向分辨率和更高的目标成像识别能力。当前隐形飞机尚无针对太赫兹波段进行设计,因此可以利用太赫兹技术设计太赫兹雷达,实现反隐形探测。

近年来,太赫兹波源和探测技术取得了长足发展,但是关于太赫兹快速、高效调控一直面临着各种问题,在一定程度上阻碍了太赫兹相关系统的应用与发展。一直以来,如何对太赫兹波进行有效动态调控受到各国科研人员高度关注。对于可靠和灵活的太赫兹应用系统而言,需要足够的核心部件实现对太赫兹波控制。太赫兹波位于电磁波谱中微波和红外光的过渡区,虽然微波和光学的部分理论适用于太赫兹波段,但是现有的微波和光学调控技术及其器件并不能直接适用于太赫兹波,因此需要采用全新的手段和材料来实现对太赫兹波的调控。太赫兹波调控器件包括太赫兹波分束器、太赫兹波滤波器、太赫兹波调制器、太赫兹波编码器和太赫兹波开关等^[14-18],可以通过电、光、热及非线性等多种方式对太赫兹波进行调控,也可以对太赫兹波的振幅、相位、频谱、空间和时间等参数进行控制,实现对太赫兹波有效调控。这些器件主要对太赫兹波的传输方向如偏振极化状态、波束能量、光谱带宽分布等电磁特性进行操控,实现对太赫兹波控制。

已有的太赫兹波控制器件主要通过对人工超材料结构与掺杂半导体材料、铁电薄膜、高电子迁移晶体管以及石墨烯(graphene)等单一或者多种介质结合,利用外加电场或光激励改变材料的光电特性,进而控制人工超材料结构的频率响应特性,实现对太赫兹波调控。2004年,德国 Braunschweig 大学 Kleine-Ostmann 等^[19]通过电调控二维电子气实现了太赫兹波透射强度调控。2007年捷克科学院 Kuzel 等采用光控一维砷化镓(GaAs)光子晶体实现对太赫兹波调制^[20]。接着提出了基于钛酸锶(SrTiO_3)材料的太赫兹波强度控制器,外加偏压高达 67kV/cm ^[21]。美国 Los Alamos 国家实验室 Chen 等采用电控亚波长金属孔阵列结构来调制太赫兹波^[22-24];紧接着他们通过在 GaAs 基体上制作超材料结构,利用斩波器控制激光辐照 GaAs 基体获得对太赫兹波调控^[25],并完成了多像素太赫兹波调控器件设计与测试^[26]。丹麦 Cooke 等利用光激励镀膜硅平板波导结构实现了对太赫兹波调制^[27]。法国巴黎大学 Martin 等尝试采用两束激光通过光混频技术来产生太赫兹波并同时进行调控,由于产生的太赫兹波功率为纳瓦量级,传输距离十分有限^[28]。2009年,德国 Kaiserslautern 大学 Paul 等采用电压控制超材料阵列获得对太赫兹波调制^[29]。2010年,日本 Nishimura 等利用双栅高电子迁移率晶体管中的二维等离子体效应实现了对太赫兹波控制^[30]。2011年,韩国 Yoo 等设计了基于有机共轭薄膜材料的太赫兹波控制器^[31]。美国 Michigan 大学 Berry 等在硅(Si)基体上设计重构双层亚波长金属狭缝阵列结构实现了对太赫兹波宽带控制^[32]。美国 Rice 大学 Shu 等在硅基体表面的金属薄膜上加工圆环缝隙实现对太赫兹波高对比度调控^[33]。Sensale-Rodriguez 和 Lee 等分别提出了基于晶体管与石墨烯的太赫兹波调控技术^[34-39]。Lee 等^[40]提出将石墨烯和周期金属环阵列组成复合结构对太赫兹波调控。电子科技大学 Wen 和 Liu 等^[41-42]采用光控石墨烯实现对太赫兹波控制。Shen 等^[43]将掺杂硅与具有多个谐振开口环的人工微结构结合,实现了对太赫兹波两种谐振模式之间的光切换。天津大学 Li 等^[44]提出利用石墨烯与硅片组成混合二极管结构,获得电控太赫兹波器件。Gu 等^[45]将电磁感应透明(electromagnetically induced transparency, EIT)现象应用于太赫兹波段光控调制器。四川大学 Zhang 等^[46]利用二氧化钒(VO_2)薄膜与人工电磁结构结合实现对太赫兹波的调控。南开大学 Chen 等^[47]利用硅基体上单层二氧化钼(MoS_2)介质实现了对太赫兹波光控制。Cao^[48]在硅基体上加工多层 MoS_2 实现了对太赫兹波调制。

太赫兹波段处于低能量的电子学和高能量的光子学之间的过渡地带,是最后一段被人类了解和认识的电磁波波段,也是目前公认的具备很多优良特性的波段。太赫兹辐射的产生、传输、调控和探测构成了太赫兹科学这门新型科学的关键技术,在高速宽带通信、国防安全、医疗诊断、新型材料研发等多个领域具有重要的应用价值。然而,由于太赫兹光子的能量较低,很多物质对于太赫兹光的响应

十分微弱,致使太赫兹功能器件的研究和发展仍然相对滞后,高效、主动的太赫兹器件仍然十分匮乏。已报道的太赫兹波调控器件性能远未达到太赫兹系统应用所需要的指标。因此有必要结合现有新材料的发展,发掘和研究更好的新型太赫兹波快速调控结构和体系,实现对太赫兹波快速、高效的调控。本书主要介绍课题组多年来在太赫兹波调控方面研究成果,通过利用外加激励包括电、光、磁、温度等方式改变介质中的载流子浓度、晶格状态从而导致介质的电导率发生改变;利用电、光和温度引起材料的非线性效应,改变材料的折射率;或者通过利用磁场引起磁光材料的磁光效应,改变材料的磁导率,从而改变器件谐振特性,实现对太赫兹波调制、开关、滤波、功分、分束、吸收、逻辑控制、反射控制以及编码,对太赫兹波实现有效调控并阐明其中的调控机制和物理问题。

参 考 文 献

- [1] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology. *Nature Photonics*, 2007, 1: 97-105.
- [2] Xu J Z, Zhang X C. Terahertz wave reciprocal imaging. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(15): 26.
- [3] Kim J Y, Boenawan R, Ueno Y, et al. Quantitative mapping of pharmaceutical crystals within cellulose by terahertz spectroscopy. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32: 3768-3773.
- [4] Ahmed O S, Swillam M A, Bakr M H, et al. Efficient optimization approach for accurate parameter extraction with terahertz time domain spectroscopy. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(11): 1685-1692.
- [5] Liu H B, Plopper G, Earley S, et al. Sensing minute changes in biological cell monolayers with THz differential time-domain spectroscopy. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007, 22(6): 1075-1080.
- [6] Federici J F, Brian S, Feng H, et al. THz imaging and sensing for security applications: Explosives, weapons and drugs. *Semiconductor Science and Technology*, 2005, 20(7): S266-S280.
- [7] Pickwell E, Wallace V P. Biomedical applications of terahertz technology. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(17): R301.
- [8] Guillet J P, Recur B, Frederique L, et al. Review of terahertz tomography techniques. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2014, 35(4): 382-411.
- [9] Redo-Sanchez A, Laman N, Schulkin B, et al. Review of terahertz technology readiness assessment and applications. *Journal of Infrared: Millimeter and Terahertz Waves*, 2013, 34(9): 500-518.
- [10] Federici J, Moeller L. Review of terahertz and subterahertz wireless communications. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107(11): 6-323.
- [11] Piesiewicz R, Kleine-Ostmann T, Krumbholz N, et al. Short-range ultra broadband terahertz communications: Concept and perspectives. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, 2007, 49: 24-39.

- [12] Koch M. Terahertz communications: A 2020 vision. *Nato Science for Peace & Security*, 2007: 325-338.
- [13] Piesiewicz R, Jacob M, Koch M, et al. Performance analysis of future multi-gigabit wireless communication systems at THz frequencies with highly directive antennas in realistic indoor environments. *IEEE Journal of Selected Topics Quantum Electronics*, 2008, 14: 421.
- [14] Marco P. Tuning terahertz lasers via graphene plasmons. *Science*, 2016, 351(6270): 229-231.
- [15] Chen F, Goodfellow J, Liu S, et al. Ultrafast terahertz gating of the polarization and giant nonlinear optical response in BiFeO₃ thin film. *Advanced Materials*, 2015, 27: 6371.
- [16] Vicarelli L, Vitiello M S, Coquillat D, et al. Graphene field-effect transistors as room-temperature terahertz detectors. *Nature Materials*, 2012, 11: 865.
- [17] Low T, Avouris P. Graphene plasmonics for terahertz to mid-infrared applications. *ACS Nano*, 2014, 8: 1086.
- [18] Tassin P, Koschny T, Soukoulis C. Graphene for terahertz applications. *Science*, 2013, 341: 620-621.
- [19] Kleine-Ostmann T, Dawson P, Pierz K, et al. Room temperature operation of an electrically driven terahertz modulator. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(18): 3555-3557.
- [20] Fekete L, Kadlec F, Kuzel P, et al. Ultrafast opto-terahertz photonic crystal modulator. *Optics Letters*, 2007, 32: 680.
- [21] Skoromets V, Kadlec F, Kadlec C, et al. Tuning of dielectric properties of SrTiO₃ in the terahertz range. *Physical Review B*, 2011, 84(17): 5324-5326.
- [22] Chen H T, Palit S, Tyler T, et al. Hybrid metamaterials enable fast electrical modulation of freely propagating terahertz waves. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(9): 26.
- [23] Chen H T, O'Hara J F, Azad A K, et al. Experimental demonstration of frequency-agile terahertz metamaterials. *Nature Photonics*, 2008, 2: 295-298.
- [24] Chen H T, Lu H, Azad A K, et al. Electronic control of extraordinary terahertz transmission through subwavelength metal hole arrays. *Optics Express*, 2008, 16(11): 7641.
- [25] Chen H T, Padilla W J, Cich M J, et al. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator. *Nature Photonics*, 2009, 3: 148-151.
- [26] Chan W L, Chen H T, Taylor A J, et al. A spatial light modulator for terahertz beams radiation. *Applied Physics Letters*, 2009, 94(21): 26.
- [27] Cooke D, Jepsen P. Optical modulation of terahertz pulses in a parallel plate waveguide. *Optics Express*, 2008, 16(19): 15123-15129.
- [28] Martin M, Mangeney J, Crozat P, et al. Gigahertz modulation of tunable terahertz radiation from photomixers driven at telecom wavelength. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(13): 1937.
- [29] Paul O, Imhof C, Lagel B, et al. Polarization-independent active metamaterial for high-frequency terahertz modulation. *Optics Express*, 2009, 17(2): 819.
- [30] Nishimura T, Magome N, Otsuji T. An intensity modulator for terahertz electromagnetic waves utilizing two dimensional plasmon resonance in a dual-grating-gate high-electron-mobility transistor. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, 49(49): 311-333.
- [31] Yoo H K, Kang C, Yoon Y, et al. Organic conjugated material-based broadband terahertz wave

- modulators. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(6): 97.
- [32] Berry C W, Moore J, Jarrahi M. Design of reconfigurable metallic slits for terahertz beam modulation. *Optics Express*, 2011, 19: 1236-1245.
- [33] Shu J, Qiu C, Astley V, et al. High contrast terahertz modulator based on extraordinary transmission through a ring aperture. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26666-26671.
- [34] Sensale-Rodriguez B, Fang T, Yan R, et al. Unique prospects for graphene-based terahertz modulators. *Applied Physics Letters*, 2011, 99: 113104.
- [35] Sensale-Rodriguez B, Yan R, Rafique S, et al. Extraordinary control of terahertz beam reflectance in graphene electro-absorption modulators. *Nano Letters*, 2012, 12(9): 4518-4522.
- [36] Sensale-Rodriguez B, Yan R, Kelly M M, et al. Broadband graphene terahertz modulators enabled by intraband transitions. *Nature Communications*, 2012, 3: 1-7.
- [37] Lee C C, Suzuki S, Xie W, et al. Broadband graphene electro-optic modulators with subwavelength thickness. *Optics Express*, 2012, 20: 5265-5269.
- [38] Sensale-Rodriguez B, Rafique S, Yan R, et al. Terahertz imaging employing graphene modulator arrays. *Optics Express*, 2013, 21(2): 2324-2330.
- [39] Yan R, Sensale-Rodriguez B, Liu L, et al. A new class of electrically tunable metamaterial terahertz modulators. *Optics Express*, 2012, 20: 28664-28671.
- [40] Lee S H, Choi M, Kim T T, et al. Switching terahertz waves with gate-controlled active graphene metamaterials. *Nature Materials*, 2012, 11: 936.
- [41] Wen Q Y, Tian W, Mao Q, et al. Graphene based all-optical spatial terahertz modulator. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7409.
- [42] Liu J B, Li P J, Chen Y F, et al. Flexible terahertz modulator based on coplanar-gate graphene field-effect transistor structure. *Optics Letters*, 2016, 41(4): 816-819.
- [43] Shen N H, Massaouti M, Gokkavas M, et al. Optically implemented broadband blueshift switch in the terahertz regime. *Physical Review Letters*, 2011, 106(3): 037403.
- [44] Li Q, Tian Z, Zhang X, et al. Active graphene-silicon hybrid diode for terahertz waves. *Nature Communications*, 2015, 6: 7082.
- [45] Gu J Q, Singh R J, Liu X J, et al. Active control of electromagnetically induced transparency analogue in terahertz metamaterials. *Nature Communications*, 2012, 3: 1151.
- [46] Zhang Y, Qiao S, Sun L, et al. Photoinduced active terahertz metamaterials with nanostructured vanadium dioxide film deposited by Sol-Gel method. *Optics Express*, 2014, 22: 11070.
- [47] Chen S, Fan F, Miao Y, et al. Ultrasensitive terahertz modulation by silicon-grown MoS_2 nanosheets. *Nanoscale*, 2016, 8: 4713.
- [48] Cao Y, Gan S, Geng Z, et al. Optically tuned terahertz modulator based on annealed multilayer MoS_2 . *Scientific Reports*, 2016, 6: 22899.

第2章 太赫兹波调制器

面对低频频谱资源逐渐枯竭和无线通信对带宽需求激增矛盾的日益加剧,太赫兹波通信技术因可提供宽带频谱而成为研究热点。研究发现太赫兹波是现有无线通信频段资源日趋稀缺后的热门频段,太赫兹频段无线通信的开发可为大容量的无线传输提供一个可行的技术途径,可以极大缓解目前无线通信频段拥挤的问题,成为拓展未来无线传输的重要发展方向^[1-11]。最近国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)已指定 0.12THz、0.22THz、0.28THz 和 0.42THz 等频段用于下一代地面无线通信和卫星间通信。美国 IEEE802.15 短程无线通信技术标准委员会也设立了太赫兹波研究小组,主要探讨利用 0.1~10THz 频段开展无线通信。以太赫兹波为通信载体的新一代通信系统正以其传输速率高、带宽大、抗干扰性强等优点而备受国内外相关研究单位关注。近几年,随着太赫兹波源和太赫兹波探测器基础问题的逐渐解决,作为太赫兹通信关键功能器件之一的太赫兹波信号调制器成为研究热点^[12-19]。

2.1 DAST 介质太赫兹波调制器

本节提出了一种基于二乙胺基三氟化硫(DAST)介质太赫兹波调制器^[1],图 2.1(a)为制备好的 DAST/Si 太赫兹波调制器样品。由于 DAST 的化学结构容易被高温或离子轰击损坏,并且很难与多壁碳纳米管(MWCNTs)均匀混合,因此制备高质量的 DAST 薄膜并不容易。为了克服这些问题,将 DAST 产品溶解在甲醇中以获得稀释的用于膜沉积 DAST 溶液,使用已经预处理的 Si(100)晶片作为沉积基底,通过旋涂进行 DAST 介质沉积,并在最佳条件下通过进行 MWCNTs 喷涂沉积,所有的薄膜沉积均在大气环境中进行。制备获得 DAST 薄膜厚度约为 100~200nm。图 2.1(b)表示 DAST 薄膜表面的扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)图像。图 2.1(c)为利用拉曼光谱仪测量获得的 DAST 薄膜介质的拉曼光谱特征图。从图 2.1(c)可以看出,制备的 DAST 介质 C—H 环内振动模式的拉曼特征峰分别位于 1212cm^{-1} 、 1181cm^{-1} 和 1167cm^{-1} ; 对称 CH_3 振动模式的拉曼特征峰为 1346cm^{-1} ; C=C 环振动模式的拉曼特征峰分别为 1620cm^{-1} 、 1552cm^{-1} 、 1437cm^{-1} 和 1322cm^{-1} ; CH_3 不对称振动模式的拉曼特征峰为 1480cm^{-1} ;