



高等学校 规划教材
工科电子类

特种固态模拟器件

原理及应用

徐继麟 周先敏 编

特种固态模拟器件原理及应用

679
C4



电子工业出版社

特种固态模拟器件 原理及应用

徐继麟 周先敏 编

電子工業出版社

(京)新登字055号

内 容 提 要

书中介绍了现代四种先进的固态模拟器件——声表面波器件,声电荷传输器件,电荷耦合器件和静磁波器件的基本原理,设计方法,制造工艺及应用。器件设计以CAD为重点。

本书内容涉及声—光—电交叉学科。为便于教学及自学,叙述力求深入浅出,并注重理论联系实际。每章都有相应的实际应用举例,使读者能正确地应用书中的理论方法解决实际问题。

本书除作为高年级本科生及研究生教材外,还可供有关专业的工程技术人员和教师参考。

特种固态模拟器件原理及应用

徐继麟, 周先敏 编

责任编辑: 郭延龄

*

电子工业出版社出版

北京市海淀区万寿路 173 信箱(100036)

电子工业出版社发行 各地新华书店经销

中国科学院印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 12.5 字数: 330 千字

1995 年 4 月第一版 1995 年 4 月北京第一次印刷

印数: 500 册 定价: 7.30 元

ISBN 7-5053-2733-X/G · 212

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作的规定,我部承担了全国高等学校和中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力,有关出版社的紧密配合,从1978~1990年,已编审、出版了三个轮次教材,及时供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要,贯彻国家教委《高等教育“八五”期间教材建设规划纲要》的精神,“以全面提高教材质量水平为中心,保证重点教材,保持教材相对稳定,适当扩大教材品种,逐步完善教材配套”,作为“八五”期间工科电子类专业教材建设工作的指导思想,组织我部所属的八个高等学校教材编审委员会和四个中等专业学校专业教学指导委员会,在总结前三轮教材工作的基础上,根据教育形势的发展和教学改革的需要,制订了1991~1995年的“八五”(第四轮)教材编审出版规划。列入规划的,以主要专业主干课程教材及其辅助教材为主的教材约300余种。这批教材的评选推荐和编审工作,由各编委会或教学指导委员会组织进行。

这批教材的书稿,其一是从通过教学实践、师生反应较好的讲义中经院校推荐,由编审委员会(小组)评选择优产生出来的,其二是在认真遴选主编人的条件下进行约编的,其三是经过质量调查在前几轮组织编写出版的教材中修编的。广大编审者、各编审委员会(小组)、教学指导委员会和有关出版社,为保证教材的出版和提高教材的质量,作出了不懈的努力。

限于水平和经验,这批教材的编审、出版工作还可能有缺点和不足之处,希望使用教材的单位,广大教师和同学积极提出批评和建议,共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

序 言

本书系高等学校工科电子类“八·五”统编教材之一。按无线电技术与信息系统教材编审委员会规定的编审大纲要求编写。供高年级本科大学生和研究生使用。同时可供从事通信、雷达、电视、电子对抗、电子元器件和声电子学等有关方面科技工作者参考。

全书共分七章。从内容上讲可概述为三个部份：第一、三、四和五章为四类特种固态模拟器件——声表面波（SAW）器件、声电荷传输（ACT）器件、电荷耦合器件（CCD）和静磁波（MSW）器件的原理。它们包括器件的物理基础、器件原理和器件的计算机辅助设计；第二章和第六章为这些器件的应用。侧重于它们在作为高稳定频率源、现代信号处理（含信号产生）、通信、电视、摄录像和传感等技术方面的应用；第七章工艺概述，包含器件的工艺实现，以及这些器件的工艺特点，共性工艺技术和工艺水平对器件性能的影响。

本书内容涉及声—光—电。虽然面广，但由于本书比较侧重于基本原理、基本概念和基本方法的叙述，在数学推导上从器件的物理特性出发，采用恰当的理想模型和近似方法，同时辅以适当实例，便于读者加深理解所学内容。书末所附主要参考资料目录，便于读者对有关问题进行深入地钻研。

本课程宜在本科学生掌握一定的专业基础知识后开设。对研究生，本课程作为研究生的专业基础课程。讲授学时 40 学时。

本书由徐继麟、周先敏编写，徐继麟主编。其中导论、第一章、第三章和第六章第二节由徐继麟执笔，其余章节为周先敏执笔。

本书由中国人民解放军电子学院魏志源教授主审。魏教授认真负责地进行了审阅，提出了许多宝贵意见，使书稿质量得以提高。作者表示衷心感谢。

在编写过程中，博士导师黄香馥教授提供了许多宝贵的意见，王光泰副教授在资料方面提供了许多有益的帮助，欧阳非、徐梅在编写中给予了帮助。第二、三章及 6.2 和 6.5 节的写成，与从国家自然科学基金资助的相关研究项目中得到的大量资料和实验结果分不开。在此表示衷心感谢。

作者

1994 年 3 月 成都

目 录

导论	1
一、声表面波	1
二、声电荷传输器件	2
三、电荷耦合器件技术发展概况	2
(一) 引言	2
(二) 发展概况	3
四、静磁波技术发展概况	4
(一) 引言	4
(二) 发展概况	4
第一章 声表面波原理及器件	7
1.1 声表面波	7
1.1.1 各向同性弹性固体表面的声表面波	7
1.1.2 各向异性弹性固体中的声表面波	10
1.2 声表面波器件用的压电材料	11
1.2.1 概述	11
1.2.2 压电材料的声表面波特性	12
1.3 声表面波换能器	15
1.3.1 声表面波换能器	15
1.3.2 声表面波叉指换能器分析	16
1.4 声表面波器件	19
1.4.1 声表面波滤波器	21
1.4.2 电视中频滤波器设计	26
1.4.3 声表面波谐振器	27
1.4.4 匹配滤波器	33
1.4.5 声表面波卷积器	37
1.5 浅体声波器件	39
1.5.1 概述	39
1.5.2 掠面体波器件	40
1.5.3 能陷栅的应用	41
1.6 声光器件	42
1.6.1 引论	42
1.6.2 声表面波—光器件	43
1.7 二阶效应及衍射的影响	44
1.8 声表面波器件的计算机辅助设计	45
1.9 声表面波器件的敏感度	47
第二章 声表面波频率源	49
2.1 声表面波振荡器	49
2.2 声表面波振荡器的频率稳定性	51
2.2.1 短期频率稳定性	51

2.2.2 振动灵敏度	52
2.2.3 温度稳定性	53
2.2.4 长期频率稳定性	53
2.3 声表面波跳频技术	53
2.3.1 注入法实现跳频	54
2.3.2 滤波器组式跳频	55
第三章 声电荷传输器件	57
3.1 声电荷传输器件基本工作原理	57
3.1.1 器件的基本结构	57
3.1.2 电荷包的产生与传输	57
3.2 电荷包的无损读出	59
3.3 声电荷模拟存储器	60
3.4 异质结声电荷传输器件	61
3.5 可能的注入技术	62
3.6 器件参数	62
3.7 ACT 与其它信号处理技术比较	64
3.8 ACT 器件的几个问题讨论	64
第四章 电荷耦合器件	67
4.1 电荷耦合器件原理	67
4.1.1 前言	67
4.1.2 电荷处理容量	69
4.1.3 电荷耦合	69
4.1.4 电荷传输	70
4.1.5 表面态对转移损失率的影响	75
4.2 CCD 的输入-输出结构	77
4.2.1 CCD 的电荷注入	77
4.2.2 光信号注入	78
4.2.3 CCD 的电荷输出	78
4.3 CCD 的物理性能	78
4.3.1 信号处理能力	78
4.3.2 转移损失率	82
4.3.3 噪声	93
4.4 CCD 器件	96
4.4.1 延迟型器件	96
4.4.2 摄像型器件	98
4.4.3 其它 CCD 器件	99
第五章 静磁波器件	101
5.1 静磁波概述	101
5.2 静磁波器件原理	102
5.2.1 静磁波的激励	102
5.2.2 静磁波的控制和检测	104
5.3 常用静磁波器件	106
5.3.1 引言	106
5.3.2 延迟线	107
5.3.3 其它器件	115

第六章 模拟信号处理	119
6.1 声表面波器件的信号处理功能	119
6.2 声电荷传输器件的信号处理功能	120
6.2.1 声电荷传输可编程抽头延迟线	120
6.2.2 ACT 线性调频滤波器	120
6.2.3 可编程 ACT 带通滤波器	121
6.2.4 多功能可编程 ACT 技术	123
6.2.5 ACT 信号微处理器	125
6.3 用 CCD 实现的信号处理技术	127
6.3.1 CCD 自适应滤波	127
6.3.2 时间—展宽压缩技术	136
6.3.3 CCD 摄像	137
6.4 用静磁波器件实现的信号处理技术	140
6.4.1 引言	140
6.4.2 MSW 信号处理能力	140
6.5 混合信号处理	143
6.5.1 数字—SAW 信号处理	143
6.5.2 计算机—数字—SAW 混合系统	146
6.5.3 CCD—SAW 信号处理	147
6.5.4 SAW—光信号处理	151
6.5.5 声表面波成像	155
6.6 声表面波传感技术	157
第七章 工艺概述	159
7.1 集成电路工艺概述	159
7.1.1 集成电路制造	159
7.1.2 常规平面工艺	160
7.1.3 微细加工技术	176
7.2 CCD 器件工艺流程	180
7.2.1 引言	180
7.2.2 铝栅工艺	180
7.2.3 常用的 CCD 工艺	181
7.2.4 CCD 器件工艺流程	183
7.3 声表面波器件工艺流程	183
7.3.1 声表面波器件制作工艺流程	184
7.3.2 ZnO 薄膜声表面波器件工艺	185
7.3.3 沟槽式声表面波器件制作工艺	186
7.4 静磁波器件工艺流程	187
参考文献	188

导 论

一、声表面波

声波是物质质点的机械振动,属机械波类型,体声波是人们认识最早的声波。

1885年英国物理学家瑞利(Lord Reyleigh)发表题为“沿弹性体平滑表面传播的波”的论文,从理论上阐明了除人们早已熟知的在弹性固体内部传播的纵波和剪切波外,还可能存在着另一种形式的声波。这种声波沿半无限厚弹性体表面传播,而且能量集中于表层几个波长之内,这种波引起的粒子位移通常与我们较熟悉的海面波动相似。瑞利最后提出“也许本文所论述的声表面波在地震中起着重大作用”。科学发展历史证明这篇短小的论文成为100年后广泛研究声表面波的起点。

为了纪念瑞利,把这种声表面波(Surface Acoustic Wave,简写SAW)称为瑞利波。瑞利波是(P+SV)形式的声表面波,它包括纵波(P波)分量以及质点位移方向与表面垂直的剪切波(Shear Wave, SV波)分量。后来的研究表明,声表面波除了瑞利波外,还有其它各种波动模式。1911年乐甫(Love)发现当半无限厚的弹性体表面上覆盖有慢声速介质层时,可以存在另一种形式的声表面波,即SH型表面波。这种声表面波仅由质点位移平行于表面的横波(SH波)构成,后来把这种波称为乐甫波。此外晶体中的声表面波的波动模式还有属于SH波之一的电声波;漏波(Leaky Wave)(又叫伪表面波);1977年提出的浅体声波(Surface Skimming Bulk Wave,简写SSBW;或Shallow Bulk Acoustic Wave,简写SBAW);以及兰姆波(Lamb Wave,又叫板波)等。本书主要讨论瑞利波,简写SAW。

进入本世纪四十年代后,SAW的首先应用是无损检测领域。声表面波主要用楔形换能器激励,与地震领域的SAW相比,无损检测所用的频率较高(为MHz量级),并且是单一频率的,在其它方面还无法运用。随着半导体平面工艺的发展和计算机技术的发展,SAW从六十年代中期开始才得以充分开发。

1965年怀特(White)等人指出,在压电晶体表面制作上金属叉指电极能激励和检测SAW之后,SAW的研究在世界范围内便如雨后春笋似地开展起来,用SAW制成的SAW器件才获得广泛实际应用。SAW器件有三个主要的优点:

(1) SAW器件的工作频率范围为10MHz左右直到超过1GHz,填补了集总元件、CCD器件和微波技术的适应频率范围之间的间隙。另外,SAW器件的带宽为10kHz左右直到超过500MHz,能满足现代通讯和雷达的许多要求。

(2) 在SAW器件中,声信号集中在基片的表面,便于取出、引导、反射、聚集和吸收等等。因此这种器件的设计很灵活,具有多功能性,可以在一个器件上同时综合实现幅频和相频特性。

(3) SAW器件用半导体工业的光刻工艺制作,因此批量生产成本低,重复性好,而且是一种坚固的平面元件,很适于与现代的微电子电路一次集成。

由于意识到这一点,1970年前后在世界范围内开始了对SAW器件的广泛研究,至今不

衰。

首先使用的 SAW 器件是 SAW 色散延迟线,用于脉冲压缩雷达,并成为现代雷达系统心脏部分的重要元件;在雷达、电子对抗和通讯中,其它 SAW 器件已得到广泛应用;声表面波电视中频滤波器是改善电视机质量的重要法宝之一,年销售量为几千万只,在电视其它领域和录像机中 SAW 器件越来越显得重要;在传感技术领域,SAW 器件在精密传感方面也逐渐获得应用。

毫不奇怪,有关 SAW、SAW 器件和 SAW 器件应用的文献层出不穷,IEE 专刊已报导了大量的重要文章。自 1972 年以来,IEEE 超声会议文集包括了历年的主要进展。

二、声电荷传输器件

声电荷传输 (Acoustic Charge Transport, 简写 ACT) 器件是八十年代初期才问世的一种将 SAW 技术和半导体技术结合起来的高新技术。1981 年 Augustin 等人报道了单片金属/ZnO/SiO₂/Si 声电荷传输器件^[37]和 1982 年 Hoskins 及 Hunsinger^[38]在研究压电半导体砷化镓 (GaAs) 半导体性质和声学性质时,证明了各向同性材料中的声电荷传输现象为起点,正式启开了 ACT 器件的大门。

从 ACT 基本概念得到证明开始,ACT 技术获得迅速的发展。例如在电荷传输沟道的隔离方法上,早期的 ACT 器件采用台面隔离法,获得的传输效率约为 0.99。经过改进,采用基于肖特基势垒的护轨式沟道隔离法,将传输效率提高到 0.999。后来采用质子隔离法,使传输效率超过 0.9999。

ACT 器件的又一重大突破是异质结声电荷传输 (HACT) 器件。1987 年产生了第一个 HACT 延迟线,它与普通 ACT 器件的主要区别,在于传输沟道的外延层结构和对电荷垂直方向限制的方法不同,从而使它具有极大的优越性,并越来越受到人们的重视。

ACT 器件可以实现几个主要功能的兼容:自动连续高速的输入信号取样、电荷的存储、横向电荷注入和无损电荷读出等,因而使它在数字信号处理和模拟信号处理的应用中得到了很大的扩展。

1991 年 D. A. Fleisch^[8]报导的可编程 ACT 横向滤波器,在一个 GaAs 芯片上实现多种功能的高速实时信号处理,使 ACT 器件的多功能化迈上新台阶,为雷达、电子对抗和通信系统设计师所关注,八十年代末到现在,几种国际重要刊物上每年均有大量的 ACT 文章。

ACT 器件集 SAW 器件的宽带、数字处理器件及技术的灵活性于一体,是一种具有极大潜力的新型器件。

ACT 器件 1990 年前后逐步有较多的应用研究报道。许多问题还待深入研究。

三、电荷耦合器件技术发展概况

(一) 引言

CCD (Charge Coupled Device) 为电荷耦合器件的英文缩写。它与库链器件 (Bucket Brigade Device, BBD) 合称为电荷转移器件 (CTD)。电荷耦合器件发明于 1969 年,此后短短几年就很快趋于成熟^[58]。为什么能获得如此迅速的发展呢?其重要原因之一是电荷耦合器件并非一种新器件,实为一般 MOS 电容器的一种新用法。因此可以认为,在 CCD 发明以前从事 MOS 电容器有关的技术人员,就已经熟悉了电荷耦合器件的基本工艺和物理性质。然

而,它毕竟又不同于一般 MOS 电容器,在其研究发展过程中,会建立相应的理论和有关的技术。就 CCD 而言,这就是几年研究之后建立的以一维势阱模型为基础的非稳态 CCD 基本理论。

如前所述,CCD 本身是运用半导体器件一系列理论、工艺技术,方便地用于 CCD 中,并使成熟的模拟取样数据信号处理的理论在实践中得以更深刻更广泛地运用。

(二) 发展概况

开始时、最简单的 CCD 的结构是一串排布紧密的 MOS 电容阵列。用标准 n 沟 MOS 铝栅工艺制造的器件就作为第一个演示 CCD 性能的器件原型。由于这种结构存在着明显表面势不稳定的缺点,因而它仅在早期使用过,很快地就被其它精巧的结构所代替。

第一次国际 CCD 应用研究学术会议于 1973 年在美国召开。它标志着 CCD 应用技术已成为电子及光电科学的一个重要分支。由于 CCD 生产事业的蓬勃兴起和发展,各种独具特色的 CCD 实用结构进一步扩展 CCD 应用的领域。CCD 性能的迅速提高,造价不断降低,又导致各类不同结构、不同用途的 CCD 真正进入普及实用化阶段。特别是 CCD 图像传感器的研制成功,不仅使传统的光电成像技术产生重大变化,而且对人类社会的生活将会产生深远的影响。

美国最早开发 CCD 技术,投入的人力、物力和财力在目前堪称全球首屈一指。美国在 CCD 应用研究领域一直保持领先地位。其 CCD 研究的发源地是美国贝尔电话实验室。该室在 CCD 图像传感器及电荷域信号处理的研究方面具有权威地位。麻省理工学院林肯研究室 (Lincoln Lab. Massachusetts Inst. of Tech.), 宇航局喷气推进研究室 (NASATPL), 罗姆空间发展中心 (Rome Air Development Centev), 以及 SRI David Sarnoff 研究中心在 CCD 器件及应用等方面的研究中保持很大的优势,而且形成了具有较大规模的实验研究中心。这些单位研究 CCD 都得到美国政府的支持,特别是国防部计划局及空军部战略防御计划的资助。

除以上单位以外,美国的几家著名公司也对 CCD 的应用及开发研究做了大量工作。如无线电公司 (RCA)、通用电气公司 (GEC)、仙童公司 (Fairchild) 及福特航空公司 (Ford Aerospace) 等。以上公司的研究部门在 CCD 应用及工艺研究方面都具有雄厚的实力。

日本是目前世界上 CCD 产品的生产大国,其产量居世界之首。日本政府非常重视 CCD 技术的开发和研究。日本广播协会实施的高清晰度电视计划中,其主攻方向之一就是提高 CCD 摄像器件的分辨率。1979 年,SONY 公司用三片 $242(H) \times 494(V)$ 像元高密度隔行转移 CCD 图像传感器首次实现了 R. G. B 分路彩色摄像机。日立公司在 1980 年又将单片彩色 CCD 摄像机推出。尽管在研究 CCD 方面,日本起步较晚,但发展很快,特别是具有极强竞争力的彩色 CCD 摄像机。

日本生产的 CCD 摄像机价格差不多是美国产品价格的七分之一到四分之一。因而日本的 CCD 产品产量直线上升。仅 SONY 公司 $1/2''$ 、38 万像素的 CCD 月产 50 万个,并打入美国市场。日本的松下、东芝、日立、NEC、NHK 等公司都是开发与生产 CCD 的专业厂家,其产品在全球皆具有吸引力,销路很广。日本的 CCD 生产厂家宣布 8mm CCD 摄像机在九十年代将以高质低价走进千家万户。

在开展 CCD 技术的研究中,法国也是进行得比较早的国家之一。汤姆逊无线电公司 (CSF) 和 EEV 公司是世界上生产和开发 CCD 产品有名的厂家。在 1991 年国际光量子博

览会上,EEV 公司推出了 1/3" 小彩色 CCD 和 2186 × 1152 高分辨彩色摄像机。

除此以外,英国通用电气公司(GEC)和荷兰的菲利普公司(Philips)以及德国、丹麦……等国家在 CCD 技术的研究与开发方面也很出色。而且 CCD 应用技术的研究已在全世界范围内普遍开展。

在当前国际上 CCD 技术研究和开发日益普遍、CCD 产品日新月异、竞争日趋激烈的形势下,我国的 CCD 应用技术也取得了可喜的进展,CCD 的研究和开发也越来越得到有关各方面的普遍重视。许多科研单位、高等学校和工厂都已开展了 CCD 技术的研究和开发工作。并取得了一些成果。

二十多年来 CCD 技术取得了惊人的进展足以说明 CCD 应用技术是一项具有广泛应用前景的新技术。并且它已在摄像、信号处理和存储,特别是在图像传感器应用方面取得了很大的进展,已成为现代光电及现代测试技术中最活跃、最具有成就的新兴领域。

在 CCD 摄像技术的发展方面,主要研究并开发高分辨率 CCD、高速度 CCD、彩色 CCD 以及帧内线转移 CCD、虚相 CCD、亚电子噪声 CCD 等新型器件。

CCD 图像传感器在精密测试等领域的应用方面,主要研究如何提高 CCD 测试精度及数据采集速度。CCD 测试精度与系统的分辨能力有关。除了 CCD 系统的硬件结构限制着 CCD 测试分辨率,微计算机软件处理方式对 CCD 测量精度影响也很大。美国喷气推进实验室在 CCD 目标跟踪系统中采用寻找目标质量中心的算法,使定位精度达到 1/100 像元,测量稳定度优于 1/250 像元。该技术用于卫星发射跟踪器上,精度达到视场的 1/50000,图像分辨率提高了 1~2 个数量级^[63]。这些算法包括平均法、线性质心法及拟合线性传递函数的最小二乘法。人们认为,能否保持准确的光学图像的强度分布是最为重要的。另外,为有效地提高系统的分辨率可采用 CCD 同步视觉方式。此项技术是以图像与 CCD 像敏面作相对微小位移来扩大空间采样范围为原理的。把 CCD 放在压电晶体元件上沿水平方向振动是其最成功的应用。可使 499 × 580 像元的 CCD 拍摄清晰度高达 2994 × 2320 点的图像。

为了提高 CCD 应用系统速度,一方面要采用高速 CCD,另一方面要使微计算机数据采集的速率与之相匹配,高速动态的图像数据采集一般用帧存贮方式,或二值化方式。

CCD 应用技术的研究、开发在其问世二十多年来取得了令人鼓舞的成就,其应用领域涉及到航空航天、天文遥感、尺寸及光谱测量、激光干涉测量、传真和扫描技术、医疗仪器、广播摄像、工业视觉系统及军事电子对抗等众多领域,并以令人瞩目的进展渗透更多的领域。

四、静磁波技术发展概况

(一) 引言

电子技术的发展对新型微波信号处理器件的迫切需要,促使人们进一步研制开发新型器件。声体波延迟线没有空间信号抽头能力,且插入损耗大;电磁波延迟线的插入损耗也很大,并且信号处理能力有限,体积庞大;SAW 延迟线虽然具有优良的信号处理功能,但在微波频段其损耗过大。如图 1,通过尖晶石中的 SAW 和声体波比较的方式显示出外延 YIG 上传播的 $\Delta H = 0.150e$ 的静磁波(Magnetostatic Wave, 简写 MSW)经过计算的最小衰减(dB/ μs)与频率(GHz)的关系。在这种情况下静磁波信号处理技术就应运而生,它可以非常适当地满足微波信号处理的需要。

(二) 发展概况

报导静磁波延迟线的文章始于六十年代。早在1964年 Damon 和 Vander Vaart 报导 X波段静磁波在正常磁化了的 YIG 圆盘上传输的实验情况, Olson 和 Yaeger 观察了轴向磁化 YIG 棒内的传输。这些 YIG 圆盘和棒是用熔融法生长的体单晶制作的。根据这些最初的实验, 可以很清楚地看出 MSW 器件有可能在整个微波区域成为低耗色散延迟线, 并且研究重点是轴化磁化棒。例如 Benett 和 Olson 在1967年报导了时间带宽积为100的脉冲压缩滤波器研究情况, 也报导过 MSW 参量放大器。到1976年, 已有人对两个反向 MSW 的有效卷积进行了观察。

然而, 由于透镜效应、动态范围低和设计控制困难(这些都是所采用的非椭圆形 YIG 几何结构所固有的不均匀场产生的结果), 当时这些器件中没有哪一种能达到生产要求。1970年出现了高质量的 YIG 外延薄膜——在非磁性钆化镓(gadolinium gallium)石榴石上生长, 厚度为 $1\sim 100\mu\text{m}$, 它们具有几乎是均匀的直流内磁场, 使体波 YIG 的问题得到解决。另外 MSW 在薄膜中的传输具有射频场分布(可在薄膜表面看到)。通过多层结构的使用, 导致了波的有效转换、空间抽头和传输特性的改进。

1980年声与超声国际会议上有二百多位专家参加, 并有二十多位作者在会议上宣读了十二篇有关静磁波的论文。此次会议推动了静磁波技术的进一步发展。

体波传输的初步研究表明, 用介质将底面与 YIG 薄膜分开的多层结构, 频率为 2GHz 时, 可以获得 10% 的非色散工作带宽。但所加的偏置场垂直于薄膜平面。X波段非色散静磁体波器件可以从这种结构发展起来。

随着静磁波技术发展而形成的静磁波器件有许多用途和潜在用途:

(1) MSW 器件作成的非色散延迟线, 可用于脉冲振荡器的相位锁定、信号相关、通信线路长度均衡器、速率传感器。

(2) MSW 器件作成的抽头延迟线, 可用于 ECM 欺骗、PSK 匹配滤波器、信号变换。

(3) MSW 器件作成的色散延迟线, 可用于群延迟均衡器、脉冲压缩、压缩式接收机、速率传感器以及频率合成。

(4) MSW 器件作成的波束控向器, 可用于开关控制和频谱分析等。

(5) MSW 器件作成的卷积器, 可用于信号相关和傅里叶变换等。

此外, 由 MSW 器件作成的声延迟线可作窄带可调带通滤波器脉冲选通; 作成的可变延迟线, 可用于目标模拟和电子计时等; 作成的曲线耦合器, 可用于可调带通滤波器; 作成的振荡器可用于稳定的振荡; 作成的谐振器可用于可变频率滤波器和振荡器等。静磁波波导可用作信号通路。

由上可见, 静磁波波导和谐振器以及其它许多用途都使静磁波器件的地位大大提高。

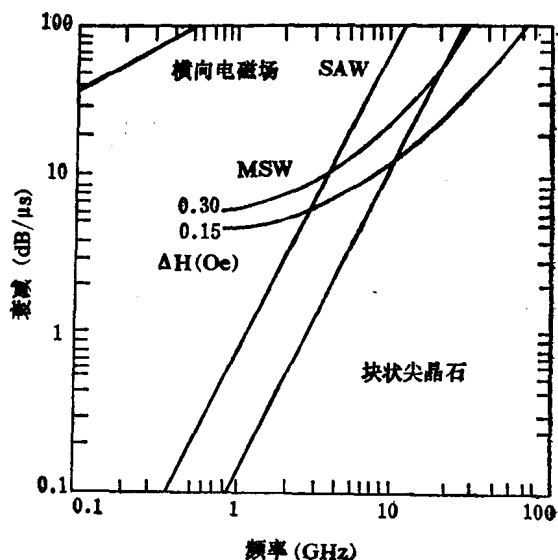


图1 MSW 与 SAW 等在微波频段的衰减情况

静磁波器件目前尚在初始阶段,但具有在微波频段实现许多信号处理功能的潜在能力(目前这些功能在超高频频段可用表面波技术很好地实现),但它们依赖于必要的射频磁场的空间抽头。图 1 所示的静磁波衰减和声表面波及体声波比较说明,在 3GHz 以上,静磁波抽头器件的损耗低于声表面波器件。另外静磁波器件有个重要的优点,即在微波波段内可以用尺寸在光刻限度以内的耦合器有效地激发。

用简单的耦合器激发的低耗静磁波器件,为 3GHz 以上频率的可抽头的 μs 级延迟线,而没有与之竞争者。由于需要偏置场,使器件增加了不希望重量。但因此可得到延迟可变的灵活性,而目前这需要多个声表面波器件才能做到。与声表面波技术相比较,在静磁波技术研究上迄今只花了很少一点力量。因此还需要提高性能,适应用途,在进一步深入上花一定的功夫。

第一章 声表面波原理及器件

声表面波属微波声学范畴，是构成近代先进的声表面波器件的基础。声表面波器件一般用具有压电特性的晶片作基体，用金属叉指换能器激励，是以较低速度传播的波。所以声表面波器件是一种固态的、体积小的无源器件。

下面分九个问题来讨论：(1) 声表面波；(2) 声表面波器件用的压电材料；(3) 声表面波换能器；(4) 声表面波器件；(5) 浅体声波器件；(6) 声—光器件；(7) 二阶效应及衍射的影响；(8) 声表面波器件的计算机辅助设计；(9) 声表面波器件的敏感度。

1.1 声表面波

1.1.1 各向同性弹性固体表面的声表面波

一、声波方程

在各向同性无限大弹性固体中，根据固体的基本弹性性质，建立在 X, Y, Z 直角坐标系上，描述固体中的媒质质点运动的运动方程为：

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 U_x}{\partial t^2} - (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial X} + \mu \nabla^2 U_x \\ \rho \frac{\partial^2 U_y}{\partial t^2} - (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial Y} + \mu \nabla^2 U_y \\ \rho \frac{\partial^2 U_z}{\partial t^2} - (\lambda + \mu) \frac{\partial \Delta}{\partial Z} + \mu \nabla^2 U_z \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中

$$\Delta = \frac{\partial U_x}{\partial X} + \frac{\partial U_y}{\partial Y} + \frac{\partial U_z}{\partial Z}; \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2}{\partial Z^2};$$

U_x, U_y, U_z 分别表示固体中某质点在 X, Y, Z 方向上的位移分量； λ 与 μ 是拉密常数 (μ 也称为切变弹性系数)， ρ 为固体媒质的密度。

引入标量势函数 Φ 和矢量势函数 Ψ ，方程(1-1)可表示为两个独立的方程：

$$\rho \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Phi \quad (1-2)$$

$$\rho \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \Psi \quad (1-3)$$

对于矢量势还可用其分量表示

$$\rho \frac{\partial^2 \Psi_i}{\partial t^2} = \mu \nabla^2 \Psi_i, \quad (i = X, Y, Z) \quad (1-4)$$

由势函数可以确定媒质的质点在各方向上的速度 (V_x, V_y, V_z):

$$V_x = \frac{\partial U_x}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial X} + \frac{\partial \Psi_z}{\partial Y} - \frac{\partial \Psi}{\partial Z} \quad (1-5a)$$

$$V_y = \frac{\partial U_y}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial Y} + \frac{\partial \Psi_x}{\partial Z} - \frac{\partial \Psi_z}{\partial X} \quad (1-5b)$$

$$V_z = \frac{\partial U_z}{\partial t} = \frac{\partial \Phi}{\partial Z} + \frac{\partial \Psi_Y}{\partial X} - \frac{\partial \Psi_X}{\partial Y} \quad (1-5c)$$

从式(1-2)可见,假定媒质中 $\Psi = 0$, 波的传播方向为 X , 而 $\Phi = \Phi_A e^{j(\omega t - K_L X)}$, 于是从式(1-5)可求出媒质质点速度为:

$$\begin{aligned} V_x &= -jK_L \Phi_A e^{j(\omega t - K_L X)} \\ V_Y &= V_z = 0 \end{aligned} \quad (1-6)$$

显然公式(1-6)描述纵波的规律,式中 $K_L = \frac{\omega}{C_L}$, C_L 为纵波的传播速度, $C_L =$

$$\sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \Phi_A \text{ 为常数, } \omega \text{ 为声波的角频率。}$$

同理,从式(1-3)可见,假设波的传播方向仍为 X , 以及 $\Phi = 0$, 而 $\Psi_X = \Psi_Y = 0$, $\Psi_Z = \Psi_A e^{j(\omega t - K_t X)}$, 那么从式(1-5)得到:

$$\begin{aligned} V_x &= V_z = 0 \\ V_Y &= jK_t \Psi_A e^{j(\omega t - K_t X)} \end{aligned} \quad (1-7)$$

它描述了横波的规律,因为它表示了媒质的质点速度(Y 方向)与波的传播方向 X 相垂直,

式中 $K_t = \frac{\omega}{C_t}$, C_t 为横波的传播速度, $C_t = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$, Ψ_A 为常数。

由此可见,当媒质的尺寸与所传播的声波的波长相比较为无限大,固体中可以同时存在(或单独存在其中的一种)两种波型—横波和纵波,它们的波的传播速度只决定于媒质的性质,而与波的频率无关,所以属非色散波。

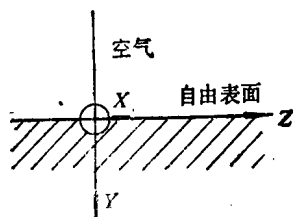


图 1.1 传播声表面波的半无限大固体的横截面图

二、声表面波

声表面波是在固体上出现的,因而描述它的势函数一定要满足固体中的声波方程(1-2)和(1-3)。图 1-1 表示传播声表面波的半无限大固体的横截面图。固体表面为 $Y = 0$ 时的 (X, Z) 平面, Z 为波的传播方向,在 (Y, Z) 二维平面上,设解为:

$$\left. \begin{aligned} \Phi &= \Phi_A e^{-\alpha Y} e^{j(\omega t - K_t Z)} \\ \Psi &= \Psi_Y = \Psi_A e^{-\beta Y} e^{j(\omega t - K_t Z)} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

显然,这种解的形式具有表面传播的特性,当波离表面足够深(即当 Y 足够大)时, Φ 与 Ψ 都趋于零。

式中 $K_t = \frac{\omega}{V_t}$, 而 V_t 也是一种声速,用它描述声表面波的传播速度,所以称它为声表面波速度。

将式(1-8)代入式(1-2)和(1-3),从而确定了满足声波方程所应遵循的一些关系,

$$\alpha^2 = K_t^2 - K_L^2 \quad (1-9a)$$

$$\beta^2 = K_t^2 - K_t^2 \quad (1-9b)$$

引入新的符号 g 和 q ,

$$g = \left(\frac{V_t}{C_t}\right)^2 \quad (1-10a)$$

$$q = \left(\frac{C_t}{C_L}\right)^2 = \frac{\mu}{\lambda + 2\mu} = \frac{1 - 2\sigma}{2(1 - \sigma)} \quad (1-10b)$$

式中 σ 是泊松比，
从而式(1-9)可化为：

$$\alpha = \frac{\omega}{V_s} \sqrt{1 - qg} = \frac{2\pi}{\lambda_s} \sqrt{1 - qg} \quad (1-11a)$$

$$\beta = \frac{\omega}{V_s} \sqrt{1 - g} = \frac{2\pi}{\lambda_s} \sqrt{1 - g} \quad (1-11b)$$

式中 $\lambda_s = \frac{V_s}{f}$ ，为声表面波的波长， $\omega = 2\pi f$ 。

我们的前提是固体存在自由表面，即假定固体的表面与真空或与十分稀疏的媒质(例如空气)相接触，而在真空中不存在应力，于是根据应力平衡条件，在固体表面应力应等于零，即在 $Y = 0$ 处有

$$(T_{YY})_{Y=0} = 0$$

$$(T_{ZY})_{Y=0} = 0$$

从而可导出一代数方程式

$$g^3 - 8g^2 + 8(3 - 2q)g + 16(q - 1) = 0 \quad (1-12)$$

解(1-12)方程式，可以求出声表面波的传播速度 V_s ，再从式(1-11)可以求出待定常数 α 与 β 。

当传声媒质决定时， σ 已知，从(1-10b)式可知， q 为已知，例如，某固体的 $\sigma = \frac{1}{4}$ ，计算 $q = \frac{1}{3}$ ，代入式(1-12)得到

$$(g - 4)(3g^2 - 12g + 8) = 0$$

解得三个实根：

$$g_1 = 4$$

$$g_2 = 2 + \frac{2}{\sqrt{3}}$$

$$g_3 = 2 - \frac{2}{\sqrt{3}} = 0.8453$$

$g > 1$ 的解 g_1 和 g_2 显然不是所要求的，因为这时从式(1-11b)计算出的 β 为虚数，只有 $g < 1$ 的解 g_3 才是需要的解。所以在该材料上传播的声表面波的速度 V_s 为

$$V_s = \sqrt{0.8453} C_s = 0.919 C_s$$

因 C_s 与频率无关，所以 V_s 也是非色散的。同时，在同种材料中， $C_s < C_L$ ，所以声表面波是在固体中传播速度最慢的一种波。

对于玻璃， $q = \frac{1}{3}$ ， $g = 0.8453$ ，也可以计算出

$$\alpha = 0.848 \frac{2\pi}{\lambda_s}$$

$$\beta = 0.796 \frac{2\pi}{\lambda_s}$$

于是在 $Y = \lambda_s$ 处， $e^{-\alpha Y} = e^{-5.33} = 0.00484$ ， $e^{-\beta Y} = e^{-2.49} = 0.0829$ 。由此可见，声表面波在