

# 光控相控阵雷达

*Optically Controlled Phased Array Radar*

张明友 编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

21002  
TN958.92/3

2008

# 光控相控阵雷达

Optically Controlled Phased Array Radar

张明友 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书论述的光控相控阵雷达是近代雷达变革中新技术和新体制的重要内容,它集中了现代电子科学技术和光子技术各学科成就的高科技系统。全书共分6章:第1章 绪论;第2章 光纤及其在雷达中的应用;第3章 光无源器件;第4章 光发射机与光接收机;第5章 光控相控阵雷达的信号处理;第6章 光控相控阵雷达。

本书是电子信息工程、光学工程和光通信工程等专业本科生的选修课程教材。其内容是建立在系统地收集目前国内外相关研究的最新资料的基础上,取材注意结构的完整性,注意理论联系实际,并注意引入新概念和新理论,内容深入浅出,易于读者学习。本书也可供从事信息工程、光学工程和光通信工程等专业的广大科技人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

光控相控阵雷达/张明友编著.—北京:国防工业出版社,2008.4

ISBN 978-7-118-05460-6

I.光... II.张... III.光控制-相控阵雷达 IV. TN958.92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 177606 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 17 字数 388 千字

2008 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 30.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

信息科技的迅猛发展已成为世界科技变革发生和发展的驱动力量。目前,人类已迈入一个高度信息化的社会,高度信息化社会的特征是:信息大爆炸、信息传递非常快捷、信息处理十分迅速、信息存储超级巨大。光和电已经成为信息最先进、最重要的载体。光电子技术是一门新兴的高技术学科,它是光子技术和电子技术相结合的产物,在未来的信息社会中将成为科技发展的基石和支柱之一。

光电子技术在现代高科技战场上的地位和作用很突出,光电子技术武器装备在侦察、监视、预警、定位、导航和通信等方面将发挥举足轻重的作用。尤其是,光电子技术应用于相控阵雷达,可以在大扫描角下实现大瞬时带宽,并在提高雷达的分辨力,识别能力,解决多目标成像,对抗反辐射导弹,简化结构,减小体积、重量,抗恶劣电磁环境,容易维护等方面有巨大的优势。目前光电子技术应用于相控阵雷达还处于新概念的产生和积累阶段。

本书适用于电子信息工程、光学工程和光通信工程等专业的本科生作选修课程教材,硕士研究生也可选用。本教材在内容上,首先对光电子器件和光电子系统中的基本概念、基本方法和组成做了全面阐述,然后介绍了反映目前光控相控阵天线的国外大量文献报道,并提出了光控相控阵雷达的概念设计。本书对从事信息工程、光学工程和光通信工程等专业研究的科技人员也有重要参考价值。

全书共分6章:

第1章是绪论,主要介绍光电子技术的发展现状和光电子技术若干应用领域的动向。

第2章是光纤及其在雷达中的应用,主要介绍光纤的基本原理及应用。

第3章是光无源器件,主要介绍按功能分类的各种光无源器件的工作原理和性能。

第4章是光发射机与光接收机,主要介绍光源、光调制器和光发射机以及光检测器、光放大器和光接收机的组成和工作原理。

第5章是光控相控阵雷达的信号处理,主要介绍光控相控阵雷达信号处理中波束形成的几种类型及光电技术在雷达信号处理中的某些应用。

第6章光控相控阵雷达,主要介绍光控相控阵天线和光控相控阵雷达的概念设计。

作者希望本书对我国光控相控阵雷达的研发有所促进,对从事这类工作的研究人员有所裨益。

在本书编写过程中,万永伦博士提供了大量网上收集的资料,周正欧教授、张玉兴教授、何子述教授也提供了许多资料,在此表示诚挚的感谢。并对肖先赐教授、汪学刚教授、吕幼新教授、张伟副研究员、钱璐讲师、王洪讲师的支持和帮助致以谢意。硕士研究生杨兵为本书初稿作了校正,在此也表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误,殷切希望读者指正。

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 光电子技术的发展现状 .....	1
1.2 光电子技术若干领域的动向 .....	3
1.2.1 光电子元件的动向 .....	3
1.2.2 若干光电子信息装备应用简介 .....	14
1.3 微波声学技术和静磁波技术.....	26
1.3.1 微波声学技术 .....	26
1.3.2 静磁波技术 .....	27
<b>第 2 章 光纤及其在雷达中的应用</b> .....	28
2.1 概述.....	28
2.2 光纤的结构与类型.....	29
2.2.1 光纤的结构 .....	29
2.2.2 光纤的类型 .....	30
2.3 光纤的导光原理简介.....	35
2.3.1 几何光学分析法 .....	35
2.3.2 波动方程分析法 .....	39
2.4 光纤的传输特性.....	51
2.4.1 光纤的衰减特性 .....	51
2.4.2 光纤衰减起因 .....	52
2.5 光纤的色散特性.....	55
2.5.1 光纤色散的概念 .....	55
2.5.2 光纤色散的表示方法 .....	55
2.5.3 光纤色散的种类 .....	55
2.5.4 光纤的传输带宽 .....	58
2.6 光纤的规格代号.....	59
2.7 在微波频率上光纤链路的性能限制.....	60
2.7.1 增益—带宽 .....	61
2.7.2 动态范围 .....	61
2.8 光纤在雷达中的若干应用.....	62
2.8.1 在雷达信息传输中的应用 .....	62
2.8.2 在双(多)基地雷达和雷达网中的应用 .....	63

2.8.3	在光控相控阵雷达的信号处理中的应用	64
<b>第3章</b>	<b>光无源器件</b>	<b>68</b>
3.1	概述	68
3.2	光连接器	68
3.2.1	光纤活动连接器	68
3.2.2	光纤固定连接器	70
3.3	光耦合器	70
3.3.1	全光纤耦合器	70
3.3.2	星形和树形光纤耦合器	71
3.3.3	其他类型的耦合器	74
3.3.4	光纤耦合器的性能参数	75
3.3.5	单模光纤耦合器的若干功能类型	76
3.4	光衰减器	77
3.4.1	光衰减器的分类	77
3.4.2	常用光衰减器举例	78
3.5	光隔离器	80
3.6	光环形器	83
3.6.1	光环行器的工作原理	83
3.6.2	波导型光环行器	84
3.7	光开关	86
3.7.1	光开关的分类	86
3.7.2	机械式光开关	86
3.7.3	非机械式光开关	89
3.7.4	集成光开关	91
3.8	光波分复用(WDM)技术	95
3.8.1	光复用技术概述	95
3.8.2	WDM器的原理与分类	97
3.8.3	WDM系统基本类型	99
3.8.4	WDM系统的基本结构	100
3.8.5	WDM器的特性	101
3.8.6	几种WDM器简介	103
3.9	电光模式转换器	107
3.10	光滤波器	108
3.10.1	光滤波器的功能和分类	108
3.10.2	固定波长滤波器	109
3.10.3	可调谐滤波器	110
<b>第4章</b>	<b>光发射机与光接收机</b>	<b>117</b>

4.1	光源概述 .....	117
4.2	半导体发光二极管 .....	117
4.2.1	LED的基本原理 .....	117
4.2.2	LED的结构与分类 .....	118
4.2.3	LED的工作特性 .....	119
4.2.4	LED与光纤的耦合 .....	121
4.3	激光二极管 .....	123
4.3.1	LD的工作原理 .....	123
4.3.2	LD的工作特性 .....	125
4.3.3	LD结构与类型 .....	127
4.4	光源的调制 .....	133
4.4.1	电光调制 .....	133
4.4.2	声光调制 .....	145
4.4.3	磁光调制 .....	146
4.5	光发射机 .....	147
4.5.1	光发射机的组成 .....	147
4.5.2	光发射机的主要性能指标 .....	148
4.6	光放大器 .....	149
4.6.1	光放大器的分类 .....	149
4.6.2	光纤放大器的主要性能指标 .....	149
4.6.3	几种类型的放大器简介 .....	151
4.7	光电检测器 .....	159
4.7.1	光电检测器的工作原理 .....	159
4.7.2	光电检测器的工作特性 .....	162
4.8	光接收机 .....	165
4.8.1	光接收机的组成 .....	165
4.8.2	光接收机的主要性能指标 .....	166
4.8.3	光接收机的噪声 .....	167
4.8.4	光接收机的灵敏度 .....	169
4.9	光控相控阵天线中的 MMIC 模块和 T/R 组件 .....	169
4.9.1	电—光元件 .....	169
4.9.2	光波—微波 T/R 组件 .....	171
4.9.3	MMIC 相控阵列中的发射模块和接收模块 .....	172
<b>第 5 章</b>	<b>光控相控阵雷达的信号处理 .....</b>	<b>175</b>
5.1	概述 .....	175
5.1.1	波束形成网络的基本概念 .....	175
5.1.2	光分配 .....	176

5.1.3	实时光延迟器件	177
5.1.4	可变光学移相器	177
5.1.5	可变增益放大器	178
5.2	两类光波束形成方法	178
5.2.1	在微波域中的光波束形成	178
5.2.2	在光域中的光波束形成	180
5.3	分立控制元件的光(域)波束形成技术	182
5.3.1	信号处理的一般结构	182
5.3.2	开关移相器光波束形成技术	183
5.3.3	差分延迟网络光波束形成技术	189
5.3.4	相干波束形成技术	190
5.4	非导的光学波束形成技术	192
5.4.1	概述	192
5.4.2	非导光波束形成网络简介	193
5.4.3	一种采用空间光调制的傅里叶波束形成	194
5.5	多波束天线的光波束形成	197
5.5.1	分立控制阵元的多波束天线的光波束形成	197
5.5.2	傅里叶光学多波束形成	197
5.6	相控阵天线零位控制中的光学自适应处理器概念	198
5.7	雷达、通信和电子战射频功能一体化系统中的光子纵横交换机	202
<b>第6章</b>	<b>光控相控阵雷达</b>	<b>204</b>
6.1	概述	204
6.2	光控相控阵天线的分类和组成	205
6.2.1	光控相控阵天线的分类	205
6.2.2	一种光控相控阵雷达天线的基本组成简介	209
6.3	采用实时延迟线的光控相控阵天线的设计例子	215
6.3.1	采用光纤进行实时延迟控制	215
6.3.2	相控阵天线设计	216
6.3.3	光纤时移器网络的设计与性能	218
6.3.4	天线辐射方向图	221
6.4	一种光控宽带阵列天线的设计例子	223
6.4.1	系统分析	224
6.4.2	光学延迟模块	229
6.4.3	阵列设计	231
6.4.4	机械封装	233
6.4.5	阵列性能	234
6.4.6	光学设备的封装问题	239



6.5	光纤馈送的 C 波段有源相控阵天线简介 .....	240
6.6	利用 GaAs MMIC 基光控阵列天线的概念设计 .....	241
6.7	光控阵列设计中关心的主要参数和研究内容 .....	243
6.7.1	关心的主要参数和器件性能 .....	243
6.7.2	关心的若干研究内容 .....	244
6.8	光控相控阵雷达概念设计 .....	245
6.8.1	概述 .....	245
6.8.2	一种 MW(或 MMW)光控相控阵天线的概念设计 .....	246
6.8.3	采用声光技术的光控相控阵雷达信号处理系统的概念设计 .....	247
6.8.4	采用流水线光超正方体互连的雷达信号处理的概念设计 .....	252
<b>参考文献</b>	.....	<b>259</b>

# 第 1 章 绪 论

本章首先从军用和民用角度简介光电子技术的发展现状;然后讨论光电子技术若干应用领域的动向,主要介绍光电子元器件的动向和光电子信息装备应用的动向,以使读者对光电子技术的现状和发展趋势有一个总体概念;最后,简要介绍光控相控雷达的概念;结尾,附带说明与光控相控阵雷达有关的微波声学技术和静磁波技术的概念。

## 1.1 光电子技术的发展现状

21 世纪,人类将迈入一个高度信息化的社会。信息时代的特征是:信息大爆炸、信息传递非常快捷、信息处理十分迅速、信息存储超级巨大。人所共知,电子作为信息的载体已经成为 20 世纪信息领域的主要特征和标志。光子学是近代光学的新开拓,是研究作为信息和能量载体的光子行为及其应用的科学。因此光和电已经成为信息最先进、最重要的载体。光电子技术是一门新兴的高技术学科,它是光子技术和电子技术相结合的产物。近十多年来,光电子技术的发展可以用“突飞猛进”来形容。作为光电子技术核心的各类光电子器件在技术上更新换代,发生了质的变化,其中包括新原理、新材料、新工艺、精密检测以及其他支撑配套技术研究等方面的进展。光电子技术同其他技术的交叉和融合正在增多、加速和扩大,特别是同半导体、微电子技术的密切结合,产生了像具有信号处理和识别能力的红外焦平面阵列探测器。光电子同微机械的结合,产生了微反射镜阵列和微电子机械系统(MEMS)。固体激光器从灯泵发展到二极管泵。光纤放大器和波分复用技术已使光纤网络的通信容量增加了几个量级。短波长半导体激光器和相关技术使光盘的存储密度提高了几个数量级。此外,诸如非线性晶体、有机材料、纳米材料、碳 60 及其他衍生物等新材料给光电子器件带来新的活力。

光电子技术在现代高科技战场上的地位和作用也很突出。从情报侦察、预警到夜袭、精确打击、电子战,从指挥、控制、通信到后勤保障,都离不开光电子技术。光电子技术武器装备在侦察、监视、预警、定位、导航和通信等方面将发挥举足轻重的作用。步入信息时代的战争以信息技术为先导和核心,光电子技术的突出地位和作用是必然的。现以海军光电子信息装备技术为例,按功能不同,可以将海军光电子信息装备分为 5 类:光电侦察告警装备、光电防御装备、光电进攻装备、光通信装备和光导航装备。依照具体技术体制及波段不同,每类装备又有若干种不同形式,见表 1.1。

除表 1.1 所列之外,在军事上常用的光电装备还有:

- ① 天基红外探测预警系统。
- ② 机载红外反导探测系统。
- ③ 激光雷达。

表 1.1 舰载光电信息装备分类

种类	形式	用途
光电探测	红外搜索跟踪	侦察、告警
	激光告警	告警
	光电火控、观测、瞄准	观测、瞄准、潜望
	红外侦察	夜间导航、化学侦察、搜救
	激光雷达	探水雷、搜索潜艇
光电防御	光电隐身	反光电侦察
	红外干扰机	干扰红外点源制导引头
	激光干扰机	干扰红外成像或点源制导引头
	诱饵	导弹诱骗
	烟幕	多波段遮蔽
光电进攻	激光武器	干扰、致盲、致眩光电仪器及人员、摧毁敏感元件或载体
光通信	激光、光纤通信	飞机、潜艇、舰艇激光通信
光导航	激光、光纤陀螺	提供舰船惯性信息

- ④ 强激光干扰机。
- ⑤ 精确光电制导武器。
- ⑥ 星载激光告警系统和导弹告警系统。
- ⑦ 空间激光通信和全光网通信。
- ⑧ MW 或 MMW 光控相控阵雷达等。

光学处理技术还可列出如表 1.2 所列的 10 个光学处理组件和分系统示范产品。

表 1.2 光学处理组件和分系统示范产品

1. 光学电子战通道装置	6. 光子纵横交换机
2. 光信号处理和光脉冲压缩器	7. 光学精密测向机
3. 激光合成孔径雷达	8. 多重变换光学处理机
4. 光学零位控制处理机	9. 光电模/数变换器
5. 光学模式识别装置	10. 数据库用的光存储器

在电子战中,常用到电子战通道装置和精密测向机。常规的测向系统采用不同的接收机分别测量频率和方向,改用光学精密测向只需采用一个接收机和单个脉冲,就可同时测得频率和方位。这种改变使光学处理技术在密集的信号环境中很少出现差错。此外,光学接收机所提供的高方位精度(10°时为 0.1°)有可能只需测定目标的方位,便能有效地控制干扰功率。另外,光控相控阵雷达是目前各国所关注的领域之一,应用光电技术可使在相控阵雷达研制中一些难以解决的问题得以解决,从而使雷达性能有巨大的提升。

目前,在实现包括雷达、通信和电子战的多种射频(RF)功能一体化的系统中,一体化

系统功能的切换技术是总体设计的难题之一。若采用光信号并通过光子纵横交换机来确定用发射阵列天线面的哪部分来发射信号,就为实现射频频综合和孔径综合提供了可能。此外,在神经网络处理机和计算机中采用光学互连和光计算,可使网络和处理机的处理运算能力有更大突破。

光电子技术的应用已渗透到人类社会生活的各个方面。从科研到生产、办公自动化,从医疗保健到环境保护等领域均得到广泛的应用。例如,在通信领域中有光纤通信和激光通信;在民用消费品中有图像传感器和数字摄像机、CCD 和 CMOS 传感器、图像显示和光数字存储等;在制造业中有机械、视觉、半导体制造业(即材料处理)等;在医疗应用方面有激光校正视力、血糖化验、气冲和激光治牙、激光美容、用光荧光疗法治疗癌症以及医用大功率 LD 用于眼科、良性前列腺增生处理、去汗毛、PDT 等手术。

目前,信息传输速率将达到每秒万亿比特(Tb/s),由 Tb/s 信息传输、Tb/s 信息处理和 Tb 信息存储所构成的“三 T”模式将成为人类数字化生存最显著的标志。“三 T”技术的实现在某种程度上改变着人类的生存和发展方式。而这一切都离不开信息光电子技术。由此可见,从经济建设到国防建设无处不在光电子技术,值得注意的是,在许多情况下,光电子技术是以“赋能技术”的形式出现。因此,光电子技术在未来的信息社会中必将扮演重要的角色,将成为 21 世纪科技发展的基石和支柱之一。

## 1.2 光电子技术若干领域的动向

### 1.2.1 光电子元件的动向

光电器件是完成光信息/电信息(光能量/电能量)互换的功能单元,它是光电系统的基本单元和基础。于是,又形成了一个庞大的光电变换效应器件(简称光电器件)产品家族。例如光电导器件即光敏电阻,光生伏特器件(PIN 光电二极管、雪崩发光二极管、硅光电池、光电三极管、色敏光生伏特器件、光生伏特组合器件和光电位置敏感器件)等;光电发射器件即光电倍增管,热辐射探测器件;热敏电阻、热电偶/堆探测器、热释电器件,发光器件(发光二极管 LED、液晶显示屏 LCD 和激光器等)与光电耦合器件;各种类型的光存储器件等。

光电系统正在向薄膜化、微型化和集成化方向发展。光电子元件总的发展趋势可概括为三高、三化和一宽、一低。

#### (1) 三高

- ① 作为发射器件的激光器向高功率(高能量)、高光束质量发展。
- ② 作为探测器向高灵敏度、高探测率和高识别能力发展(即向长线列、大面阵和智能化发展)。
- ③ 作为成像用显示器件以及所有光电子元件向高可靠、长寿命发展。

#### (2) 三化

- ① 固态化:各波段光电探测器已经固态化,激光器以固态化为主流,包括半导体激光器和二极管泵浦的固体激光器。
- ② 微型化:微机械光学的发展有可能将微光学元件、微调制器、光源、探测器及处理

电路集成在一块芯片上,实现光学平台微型化,可用于敌我识别系统、显示装置和光纤开关。尤其适用于诸如微型战场机器人、水下机器人等新一代武器装备发展的需要。

③ 标准化:器件的标准化为适应于光电系统的系列化和模块化,便于系统集成、使用和维修。

(3) 一宽

光电探测器和激光器的工作波长的分布或覆盖波段越来越宽,包括特定波长激光器、双波长激光器、波长可调谐或可在一定范围内任选的激光器、双色或多色探测器。

(4) 一低

要想方设法降低制造成本。

首先说明一下,光电子器件的基本作用、基本元器件、尺度及与其他元器件的连接方式等都与电子器件有区别。这主要是因为两者在工作原理上有差异。表 1.3 中列出了集成光电子器件与电子器件的特征比较。

表 1.3 光电子器件与电子器件的特征比较<sup>[1]</sup>

特征项	光电子器件	电子器件
基本作用	光波导中的光传输及光与电子/晶格的相互作用	衬底表面附近的电子传输与控制
基本元器件	光波导, 半导体激光器	晶体管、电容、电阻
元器件尺寸(厚度方向)	波长量级, 数微米至十微米	数百埃至数微米
元器件尺寸(长度方向)	数百微米至数毫米	数平方微米
与其他部件的连接	稍难——需要较高的位置精度( $\mu\text{m}$ ), 光波导	容易——电气布线, 导体
元器件可靠性	有问题, 通常需要检测全部元器件	几乎没问题, 通常进行抽检
元器件制作工艺	多样, 研究开发中	基本平面工艺, 已成熟

下面对光源、微波光纤、光控微波器件、光纤光栅、集成光电子器件、红外焦平面阵列、液晶显示器件等的动向作简要介绍。

1. 光源<sup>[2,3]</sup>

首先说明一下,光电子学有源部件包括发射二极管光源、二极管激光器光源和二极管激光器阵列以及调制器与检测器等。还应该指出的是,诸如光存储器、光信号处理系统、光计算机网络等子系统以及与有源器件集成的光电子网络等系统都属于光电子学的有源部分。此外,这些器件和系统的任一部分的集成再与其他电子元器件和系统集成而组成的半导体光电集成电路(OEIC)也归于光电子学有源的领域。

LASER 一词是受激辐射引起光放大(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)的缩写,它实质上是由置于合适光谱振器或腔体内的一种放大媒质构成的光振荡器。光学腔体由两片曲面或平面镜构成,它们中的一片或两片为局部透射的。半导体二极管激光器以小尺寸提供直流对光的高效率转换并可输出几毫瓦的光功率,使得它们在许多空载应用和其他微波系统中具有极大的吸引力。

半导体器件物理研究的进展,以及晶体外延生长的新工艺,包括分子束外延、金属有机化学气相淀积和化学束外延等所取得重大成就,使得半导体激光器成功地采用了量子阱和应变量子阱等新结构,出现了诸如量子阱激光器、应变量子阱激光器、垂直腔面发射

激光器及高功率激光器阵列等新器件。

此外,半导体发光(Light - Emitting)二极管已可以覆盖整个光纤通信和光控相控阵雷达系统使用的波长范围。值得关心的是,半导体光源照明技术是绿色的照明技术,将替代目前的照明技术,我国已在部分城市开始实施。

有关光源、光发射机和光接收机等内容将在第4章中介绍。

## 2. 微波光纤<sup>[3]</sup>

光纤是导光纤维的简称,它是一种新型的光波导。该玻璃纤维由两种不同的玻璃制成,其中一种玻璃构成中心部分的纤芯,另一种玻璃构成周围部分的包层。由于纤芯材料的折射率稍大于包层材料的折射率,因而纤芯—包层界面对纤芯中传输的光形成壁垒。根据光的全反射原理,将入射光封闭在纤芯内,光就可以在这种波导结构中传播。

半导体激光技术、光纤以及光的高速调制等方面的进展显示了应用于当代水平的微波系统具有提高其性能的潜力。通过光纤的射频传输可直接用来代替短同轴线或中继线、卫星内的导波开关、天线遥控和相控阵天线单元的馈线。射频信号采用光纤传输提供若干优点,例如不受电磁干扰影响、不需接地回路、无串话和不会被窃听。此外,光纤传播损耗低、质量轻和瞬时带宽大。图1.1比较了几种类型微波传输线的损耗。同轴电缆对于GHz范围的信号具有极大的损耗,而金属波导则体积太大。石英光纤的传播损耗(波长 $1.3\mu\text{m}$ 时,小于 $0.5\text{dB/km}$ )要比RG-122/U同轴线(1GHz时,约 $500\text{dB/km}$ )和0.141半刚性同轴线(5GHz时,约 $700\text{dB/km}$ )低几个数量级。因此用调制光源作发射机和用光电探测器作解调器的微波光纤线路来代替微波和毫米波信号的同轴电缆传输是十分吸引人的。

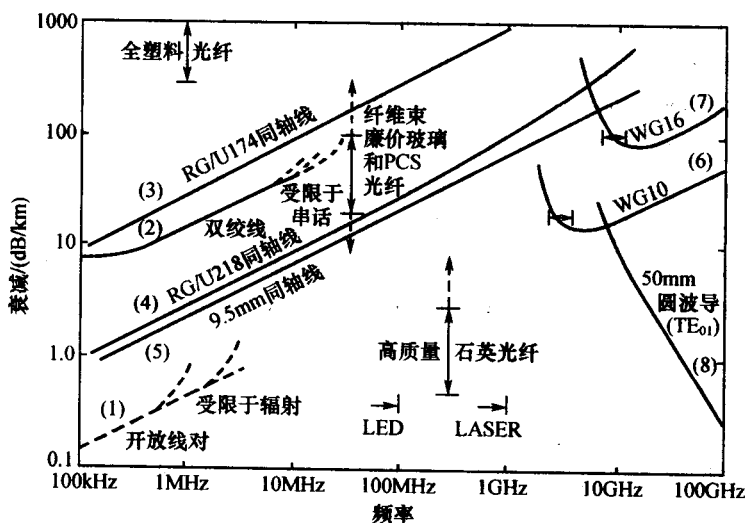


图 1.1 几种微波传输线损耗的比较

光纤系统正在原先只属于微波技术应用的范畴内寻找日益增长的用途。其典型应用为：

- ① 光纤通信网。
- ② 光控相控阵扫描。

- ③ 天线到接收机的轻连接。
- ④ 导弹制导。
- ⑤ 频谱分析。
- ⑥ 信号处理。
- ⑦ 超宽带通信等。

光纤射频延迟线是光控相控阵雷达信号处理的基本组成部分之一。光源的高频调制和超快速的光电探测器使光纤延迟线有可能实现损耗低、延时长和大带宽的传播。石英光纤有大约  $5\mu\text{s}/\text{km}$  的传播延时,而它的传播损耗甚至可小于  $1\text{dB}/\text{km}$ 。于是,在 C 或 X 波段有可能获得延时  $50\mu\text{s}$ ,而衰减值小于  $10\text{dB}$  的延迟线。

有关光纤和光纤链路的内容将在第 2 章中介绍。

### 3. 光控微波器件<sup>[3]</sup>

#### (1) 光调谐

光控微波固态器件可用于许多方面。业已证明,聚焦光束照射微波半导体可实现多种射频控制功能,例如开关、限幅、移相、锁相、振荡器调谐和放大器增益控制。从 IMPATT、双极型晶体管和 MESFET 等器件的试验结果表明,MESFET 器件值得应用推广。若改变 MESFET 栅—源电容就可改变振荡频率;改变沟道电阻就可起到开关作用或放大器增益控制作用。在 MESFET 中的光控产生的电流可用以提供注入锁定信号。而且采用光控法的注入锁定振荡器优于复杂而昂贵的常规的稳频方法。光注入的作用相当于对器件引入一个外加端子。一个工作于  $10.174\text{GHz}$  的光控 MESFET 振荡器在偏离载频  $100\text{kHz}$  处相位噪声约为  $-78\text{dBc}/\text{Hz}$ 。

MMIC 的光调谐是光电子器件将来的一个重要领域。微波信号通过光纤的传输非常类似于调幅射频信号通过同电轴或矩形波导的传输。要发射的微波信号调制一个光载波,该光载波经光纤送到另一端,并用光电探测器使它再现。于是,对于通过光纤发送模拟或数字微波信号和/或应用光纤作延时媒介制造微波延迟线等应用来说,光源的高频调制是必不可少的。既可以通过直接调制光源的偏流(例如发光半导体二极管),也可以通过间接在连续波光源后面的外部调制器(例如氩—氟激光器)来实现光源的调制。激光二极管直接调制较易实现,而且比外调制效率高,但其调制带宽受二极管特性的限制。光的外调制可能有较大的射频工作带宽,但它的损耗较高且需要增加调制器的费用。图 1.2 示出了某种激光二极管的直接调制。

#### (2) 光开关应用

① 两端二极管。光波束已用于碰撞雪崩渡越时间二极管(IMPATT)的相位锁定和转换,而且控制器件所需的功率较小。激光器通过在有源区中激发起光诱导载流子来控制 IMPATT 二极管或任何别的微波振荡器件。这些载流子的密度和分布均影响器件的工作。图 1.3 示出了某种光控 IMPATT 二极管的结构示意图。

脉冲宽度控制、快速通断转换和脉内频偏(线性调频脉冲)都已借助激光照射工作在  $70\text{GHz}$  的脉冲毫米波 IMPATT 二极管振荡器来实现。

② 三端器件。GaAs 场效应晶体管在光照射下的特性与 FET 直流特性的改变是有关的。如果把 FET 从低阻抗转换到高阻抗状态,调整 FET 放大器的增益,则可用极低光功率调谐 FET 振荡器并用 FET 实现高速光探测等。

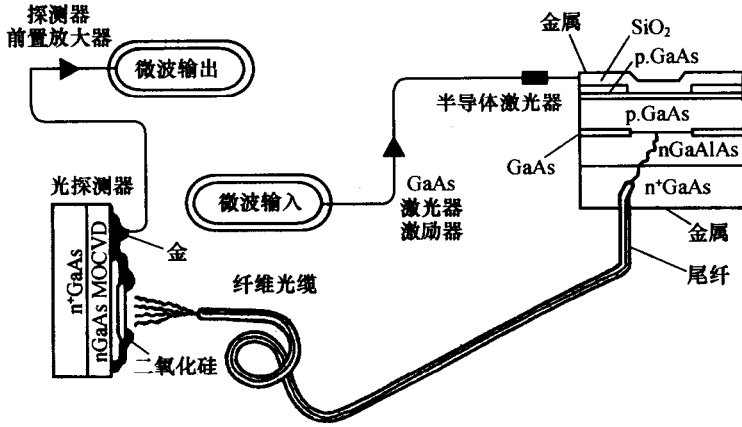


图 1.2 激光二极管的直接调制

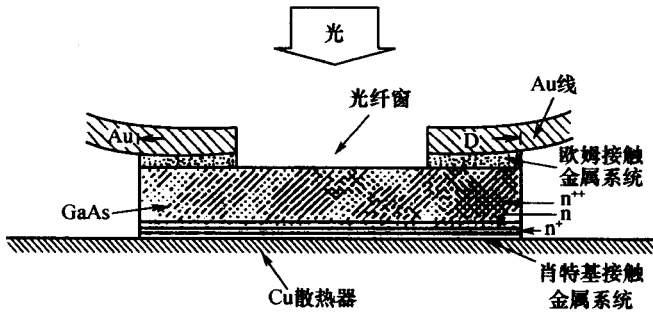


图 1.3 某种光控 IMPATT 二极管

利用皮秒(ps)光电开关的直流—射频直接变换具有产生高输出功率和高切断效率微波频率波形的潜力,可用于超宽带的高分辨力雷达。

### (3) 振荡器调谐

可利用光照射改变 FET 振荡器中器件的栅—源电容进行调谐。数纳瓦(nW)的耦合光功率足以在 10% 带宽内调谐一个 X 波段振荡器。源极串联反馈型式最适合于这一应用。

实现振荡器调谐和调频的另一方案是通过在电路中加入光敏材料,并通过光控制它来改变微波网络的参数。例如,图 1.4 示出了实现光控调谐和调制一介质谐振振荡器的过程。在这里光敏材料淀积在介质谐振器的顶部,从而使光可以从顶部照射它。入射光信号改变介质振荡器样品的电导率,微扰它的电磁场,可导致介质谐振器(DRD)的中心频率偏移。

### (4) 注入锁定

多个自由振荡器的光注入锁定在有源相控阵和其他需要相干检测的电子支援措施系统(ESM)、电子干扰系统(ECM)和电子反干扰系统(ECCM)中是有用的。当入

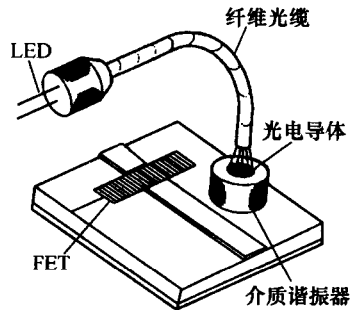


图 1.4 光控介质谐振腔振荡器



射在器件有源区上的光被调制在接近于自由振荡器的频率时,一个自由振荡的 MESFET 振荡器就被注入锁定了。振荡器的锁定范围强烈地依赖于器件有源区内吸收的光功率,并由下式给出:

$$2\Delta\omega = \frac{\omega}{Q} \frac{g}{C_{gs}} \frac{|IL|}{(2G_L P_{out})^{1/2}} \quad (1-1)$$

式中,  $|IL|$  是注入的光流量,  $Q$  是栅极电路的品质因数,  $G_L$  是对 FET 所呈现的负载电导,  $\omega$  是工作频率, 而  $P_{out}$  是振荡器输出功率。对于典型的 FET,  $\Delta\omega$  约为数兆赫 (MHz), 但是, 只要更有效地把射频调制光耦合到器件, 它还能增大。

用调制光信号照射有源器件的办法来实现 FET 振荡器的直接注入锁定, 目前尚限于工作在光源的张弛振荡频率以下。而用分谐波调制的光信号锁定一个频率高于激光器张弛频率的振荡器已取得了一定的成功。

有关光源、光调制和光放大等内容将在第 4 章中介绍。

#### 4. 光无源器件和光纤光栅<sup>[4,5]</sup>

光无源器件包括光隔离器、光纤连接器、光复用/解复用器、电光模式转换器、光极化控制器、光环行器和光滤波器等, 近年来有了迅速的发展, 我们将在第 3 章介绍。

光纤光栅是 20 世纪 90 年代中期出现的一种新型的全光纤器件, 具有独特的滤波性能, 如通带平坦、过渡带陡峭、通路间隔小等。此外, 作为全光纤器件, 它具有与光纤连接方便、连接损耗小、成本低、可批量生产, 波长、带宽、色散可灵活控制等优点, 自问世以来一直备受人们关注。目前已利用光纤光栅的波长选择特性使之成为光纤器件中的无源器件。因随后几章将涉及到光纤光栅的若干应用, 为此, 我们对光纤光栅的概念先作一介绍。

1978 年, K. O. Hill 等人发现, 光纤受到蓝光或者紫外光强烈照射后, 可能永久地改变它们的光学性质, 当掺 Ge 的石英光纤被强激光束照射几分钟后, 光敏效应会导致光纤材料的折射率沿光纤的长度方向作周期性的改变, 从而形成纤芯内的一种衍射光栅。他们发现了这种光纤的光敏性, 从而导致这种所谓布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating) 的新型光纤内纤型无源器件的出现。其中, 在光纤布拉格光栅中衍射的光满足布拉格衍射条件。

光纤光栅的波长选择性工作原理如图 1.5 所示。它利用光纤纤芯的紫外光敏性使纤芯折射率在横向发生永久性的周期性改变, 如果有多个波长入射, 则满足布拉格光栅条件的波长全反射, 其余波长通过。下面对光纤光栅的特性和其波长选择性的特点作一介绍。

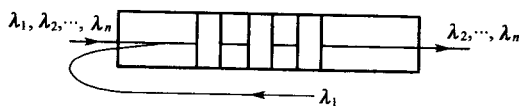


图 1.5 光纤光栅的波长选择性

利用光纤在紫外光照射下产生的光致折射率变化的效应, 在纤芯上形成周期性折射率调制分布 (即在纤芯内形成空间相位光栅), 从而对入射光波中相位匹配的频率产生相干反射, 可以在典型的  $(10^{-1} \sim 10^2)$  nm 的带宽内产生反射, 反射率可达 100%。光纤光栅的这一重要的波长选择特性使之成为光纤器件中一种重要的无源器件, 其在光纤系统中的作用类似于传统光学系统中的镜片。其作用实质上是在纤芯内形成一个窄带的 (透射或反射) 滤波器或反射镜, 使得光在其中传播行为得以改变和控制。它可看作是一种参数