

前 言

以光为信息载体的无线光通信技术具有高带宽、低延迟、高传输速率及宽频谱范围等优点，根据光传输信道不同，无线光通信可分为紫外光通信、可见光通信及水下光通信等。由于信道环境对光传输影响较大，如何抑制信道环境对激光传输的影响并对影响进行补偿一直是无线光通信研究的重点。

本书共 10 章，对无线光通信原理进行详细介绍。主要涉及无线光通信原理、光信号的编码调制、各类光信道传输特性、捕获对准跟踪技术，并对部分相干光传输原理及未来通信技术做了详细的阐述。

本书是作者在受聘西安文理学院荣誉教授期间的工作，也是西安文理学院西安市无线光通信及其组网技术院士工作站的研究成果，感谢西安文理学院为本书的顺利出版所提供的便利与支持。

本书的研究工作得到了国家自然科学基金项目(61377080)、陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2024JC-YBMS-562)、陕西数理基础科学研究项目(23JSQ024)、陕西省教育厅专项科研计划项目(25JK0638)、西安市科技计划项目(25XKJC08)、西安市科学技术协会青年人才托举计划项目(0959202513173)的支持，谨致谢意。

感谢本书参考文献的作者，以及没有列入参考文献的研究者所做的贡献，他们的工作给作者以深刻的启迪。

由于作者学识有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 无线光通信系统	1
1.1 无线光通信模型	1
1.1.1 发射机	1
1.1.2 接收机	2
1.1.3 光信道	2
1.2 激光光源	3
1.2.1 半导体激光器的工作原理	3
1.2.2 半导体激光器的基本特性	4
1.2.3 非线性校正	5
1.2.4 光电探测器	7
1.3 半导体激光器和光电探测器的响应特性	8
1.3.1 半导体激光器的响应特性	8
1.3.2 PIN 光电探测器的响应特性	12
1.4 表面等离激元	17
1.4.1 表面等离激元的概念	17
1.4.2 表面等离激元结构	17
1.4.3 结论	20
1.5 信号检测	20
1.5.1 直接检测	20
1.5.2 直接检测极限	21
1.6 光放大器	22
1.6.1 光放大器的分类	22
1.6.2 掺铒光纤放大器	23
1.6.3 半导体光放大器	24
1.7 空间光-光纤耦合技术	26
1.7.1 单透镜耦合	26

1.7.2 光纤阵列耦合	28
1.7.3 特种光纤耦合	29
1.8 光学天线与望远镜	29
1.8.1 折射式望远镜	29
1.8.2 反射式望远镜	30
1.8.3 折反射望远镜	31
1.8.4 收发一体化光学天线	31
1.8.5 一点对多点发射天线	31
1.9 总结与展望	33
思考题一	33
习题一	34
参考文献	38
第2章 相干光通信	41
2.1 相干光通信的基本原理	41
2.1.1 基本原理	41
2.1.2 零差探测	43
2.1.3 外差探测	44
2.1.4 调幅信号的外差探测	45
2.1.5 双平衡探测	46
2.2 相干调制与解调	47
2.2.1 相干系统的光调制	47
2.2.2 相干解调	49
2.2.3 系统性能	52
2.3 影响检测灵敏度的因素	53
2.3.1 相位噪声	53
2.3.2 强度噪声	53
2.3.3 偏振噪声	54
2.3.4 相干光通信系统的关键技术	54
2.3.5 检测灵敏度的极限	54
2.4 光外差检测的空间相位条件	55
2.4.1 空间相位条件	55
2.4.2 光外差检测的频率条件	57

2.4.3 光外差检测的偏振条件	58
2.5 自适应光学波前畸变校正	59
2.5.1 波前畸变校正系统	59
2.5.2 波前测量和波前校正	60
2.5.3 无波前测量波前畸变校正系统	64
2.5.4 波前传感与坏点剔除	65
2.6 总结与展望	67
思考题二	68
习题二	68
参考文献	72
第3章 调制、解调与编码	73
3.1 调制技术	73
3.1.1 基本概念	73
3.1.2 模拟调制与数字调制	74
3.1.3 直接调制与间接调制	74
3.1.4 内调制与外调制	74
3.2 外调制技术	75
3.2.1 电光调制	75
3.2.2 声光调制	79
3.2.3 磁光调制	81
3.3 逆向调制	83
3.3.1 “猫眼”效应	83
3.3.2 逆向调制原理	84
3.3.3 “猫眼”逆向调制系统	86
3.3.4 逆向调制的传输特性	87
3.4 类脉冲位置调制	89
3.4.1 类脉冲位置调制原理	89
3.4.2 同步技术	94
3.5 光源直接调制	96
3.5.1 单端转差分部分	96
3.5.2 电平调整部分	97
3.5.3 激光器驱动部分	98

3.5.4	光反馈原理	101
3.6	副载波强度调制	102
3.6.1	副载波强度调制原理	102
3.6.2	BPSK 副载波调制	103
3.6.3	FSK 副载波调制	105
3.6.4	互调失真与载噪比	107
3.7	正交频分复用	109
3.7.1	基本原理	109
3.7.2	OFDM 中离散傅里叶变换实现	111
3.7.3	保护间隔和循环前缀	113
3.7.4	峰均功率比及其降低方法	115
3.8	空时编码	115
3.8.1	空时编码的演变	116
3.8.2	无线光通信中的空时编码	118
3.8.3	无线光通信中的空时译码	119
3.9	非正交多址	120
3.9.1	非正交多址原理	120
3.9.2	功率分配	120
3.9.3	信号检测	121
3.10	轨道角动量复用通信	122
3.10.1	OAM 复用通信系统	122
3.10.2	基于 MIMO 均衡算法的 OAM 复用通信系统	125
3.11	信道编码	126
3.11.1	信道编码及其分类	126
3.11.2	线性纠错码	126
3.11.3	卷积码	127
3.12	总结与展望	130
	思考题三	130
	习题三	131
	参考文献	133
第 4 章	大气信道、信道估计与信道均衡	136
4.1	大气衰减效应	136

4.1.1	大气衰减系数与透过率	136
4.1.2	大气分子吸收与散射	137
4.1.3	大气气溶胶粒子吸收与散射	138
4.1.4	大气窗口	139
4.1.5	衰减系数估算	139
4.1.6	传输方程	140
4.2	大气湍流模型	140
4.2.1	大气湍流	141
4.2.2	大气湍流信道模型	142
4.2.3	Log-normal 湍流模型	142
4.2.4	Gamma-Gamma 湍流模型	146
4.2.5	负指数分布湍流模型	149
4.2.6	大气结构常数	150
4.2.7	大气湍流引起的误码率	151
4.3	分集接收	152
4.3.1	最大比合并	153
4.3.2	等增益合并	153
4.3.3	选择合并	153
4.4	信道估计	154
4.4.1	信道估计的概念	154
4.4.2	最小二乘信道估计算法	155
4.4.3	MMSE 准则的信道估计	155
4.5	信道均衡	155
4.5.1	码间干扰与信道均衡	156
4.5.2	时域均衡	156
4.5.3	线性均衡	157
4.6	大气湍流对误码率的影响	159
4.7	信道容量界	161
4.7.1	信道模型	161
4.7.2	具有峰值光强约束的信道容量	163
4.7.3	信道复用	166
4.8	湍流对光传输的影响	167

4.8.1	光强闪烁	167
4.8.2	光斑漂移	168
4.8.3	光束扩展	170
4.8.4	瞄准误差	171
4.9	总结与展望	172
思考题四		172
习题四		172
参考文献		176
第 5 章	白光 LED 通信与组网	179
5.1	LED 发光原理	179
5.1.1	白光 LED	179
5.1.2	LED 发光原理	179
5.1.3	白光 LED 发光原理	180
5.1.4	白光 LED 发光模型	181
5.2	车联网环境可见光通信系统的背景光噪声模型	182
5.3	可见光通信系统乘性噪声模型	186
5.4	光源最优化布局	189
5.4.1	光源经典布局	189
5.4.2	光源随机布局	190
5.5	室内可见光信道	191
5.6	接收机与检测技术	194
5.6.1	接收机前端	194
5.6.2	接收阵列设计	197
5.7	可见光通信的上行链路	197
5.7.1	射频上行链路	197
5.7.2	红外光上行链路	197
5.7.3	激光上行链路	198
5.7.4	可见光上行链路	198
5.8	可见光通信定位技术	198
5.8.1	光信号接收强度定位法	199
5.8.2	指纹识别定位法	199
5.8.3	LED 标签(LED-ID)定位法	199

5.8.4 可见光成像定位技术	199
5.9 室内混合 VLC/RF 通信系统	200
5.9.1 室内混合 VLC/RF 通信系统用户接入策略	200
5.9.2 室内 VLC/RF 通信系统资源分配	201
5.9.3 室内可见光通信/Wi-Fi 网络切换机制	203
5.10 可见光异构网络	206
5.10.1 VLC/RF 异构网络架构	206
5.10.2 异构网络中的分配策略	207
5.11 OWC/RF-THz 混合中继通信系统	209
5.11.1 系统模型	209
5.11.2 系统性能分析	209
5.12 可见光定位+惯导的组合导航	212
5.12.1 热图优化卷积神经网络定位方法	212
5.12.2 EKF/LSTM 组合导航融合	213
5.13 板间无线光通信	214
5.13.1 系统组成	214
5.13.2 三维板间无线光通信	216
5.13.3 关键技术	216
5.14 总结与展望	218
思考题五	218
习题五	219
参考文献	220
第 6 章 水下光通信	225
6.1 概述	225
6.2 水下激光通信系统	226
6.2.1 水下激光通信原理	226
6.2.2 水下信道	226
6.2.3 水下激光通信的特点	227
6.3 激光对潜通信	227
6.3.1 激光对潜通信的形式	227
6.3.2 各介质层的传输	228
6.3.3 时间扩展	230

6.3.4 能量方程	230
6.4 复眼接收天线	231
6.4.1 LED 光源在水中的传输模型	231
6.4.2 复眼透镜光学接收天线的结构	233
6.5 发射端恒流驱动	237
6.5.1 大功率 LED 驱动主控电路	237
6.5.2 主控芯片	238
6.5.3 NMOS 管驱动电路	240
6.5.4 LED 灯珠	241
6.6 光在海水中的传输特性	241
6.6.1 光学特性	241
6.6.2 吸收特性	242
6.6.3 散射特性	244
6.7 非直视传输	246
6.7.1 NLOS 传输覆盖范围	246
6.7.2 散射链路模型	253
6.8 水下湍流对激光传输性能的影响	256
6.8.1 闪烁指数	256
6.8.2 光束漂移	258
6.8.3 水速与 Greenwood 时间常数	260
6.8.4 误码率	263
6.8.5 中断概率	264
6.9 总结与展望	265
思考题六	266
习题六	266
参考文献	267
第 7 章 紫外光通信	270
7.1 紫外光及其信道特性	270
7.1.1 紫外光	270
7.1.2 紫外光的特点	270
7.1.3 紫外光大气信道	271
7.1.4 紫外光大气信道特性	272

7.2 紫外光非直视传输特性	274
7.2.1 椭圆坐标系	274
7.2.2 紫外光散射通信的过程	275
7.2.3 非直视散射特性	277
7.3 日盲紫外光非直视通信组网	278
7.3.1 无线 Mesh 通信网络	278
7.3.2 无线紫外光 Mesh 通信网络	279
7.4 紫外光背景噪声模型	280
7.4.1 光子的能量	281
7.4.2 黑体辐射模型	282
7.4.3 太阳辐射模型	283
7.4.4 大气透明度	284
7.4.5 日盲区紫外背景光辐射模型	286
7.5 紫外光通信路径损耗模型	289
7.5.1 单次散射模型	289
7.5.2 多次散射模型	292
7.5.3 紫外光通信路径损耗分析	295
7.6 总结与展望	298
思考题七	298
习题七	298
参考文献	299
第 8 章 捕获、瞄准和跟踪技术	301
8.1 APT 系统	301
8.1.1 APT 的概念	301
8.1.2 APT 的工作原理	302
8.2 自动捕获	303
8.2.1 开环捕获模式	304
8.2.2 扫描方式	305
8.2.3 捕获单元性能指标	309
8.3 自动跟踪	310
8.3.1 跟踪系统	310
8.3.2 复合轴控制系统	311

8.3.3 粗跟踪单元精度分析	312
8.3.4 精跟踪光束伺服单元	312
8.4 发射-接收端非共光轴快速对准	312
8.4.1 问题的提出	312
8.4.2 快速对准方案	313
8.5 瞄准误差对通信性能的影响	316
8.5.1 光功率衰减模型	316
8.5.2 指向误差条件下高斯光束几何衰减模型	318
8.5.3 指向误差下平均几何衰减模型	320
8.6 总结与展望	321
思考题八	321
习题八	321
参考文献	323
第9章 部分相干光传输	324
9.1 光束的基本参数	324
9.1.1 发射光束	324
9.1.2 互相干函数	325
9.1.3 光束的扩展、漂移与强度起伏	329
9.2 部分相干光模型	330
9.2.1 部分相干光描述	330
9.2.2 部分相干光波束	333
9.3 光束在大气湍流中的传输	334
9.3.1 光束的扩展与漂移	334
9.3.2 水平传输光束的漂移与扩展	339
9.3.3 斜程传输光束的漂移与扩展	343
9.3.4 到达角起伏	345
9.3.5 光束漂移与扩展对通信系统的影响	349
9.4 部分相干光探测	350
9.5 总结与展望	355
思考题九	355
习题九	355
参考文献	358

第 10 章 未来的通信技术	361
10.1 X 射线空间通信	361
10.1.1 X 射线通信背景	361
10.1.2 X 射线通信系统	362
10.1.3 发展方向与展望	365
10.2 轨道角动量复用通信	365
10.2.1 涡旋光束	365
10.2.2 涡旋光束的产生	367
10.2.3 轨道角动量复用通信系统	370
10.3 中微子通信	373
10.3.1 中微子	373
10.3.2 中微子通信原理	373
10.3.3 中微子通信系统	374
10.3.4 中微子通信的关键技术	374
10.3.5 中微子通信的特点	375
10.4 引力波通信	375
10.4.1 引力波的探测	376
10.4.2 引力波的产生	378
10.4.3 引力波探测的主要困难	378
10.5 太赫兹波通信	379
10.5.1 太赫兹波及其优点	379
10.5.2 太赫兹波发射天线	380
10.5.3 太赫兹波探测器	381
10.5.4 太赫兹波调制器	382
10.5.5 太赫兹波在大气中的传输	383
10.6 总结与展望	384
思考题十	384
习题十	385
参考文献	385

第 1 章 无线光通信系统

光通信是以光波为载波的通信方式。光通信可以有波导，也可以没有波导。光纤通信就是光沿着波导(光纤)传输的通信方式。无线光通信不需要波导，光在自由空间传输。无线光通信，即自由空间光通信(free-space optical, FSO)融合了光纤通信与微波通信的优点，通信容量大又不需要铺设光纤，也无须频谱许可。本章介绍无线光通信系统的模型以及基本概念。

1.1 无线光通信模型

无线光通信端机由光学天线(望远镜)、激光收发器、信号处理单元、自动跟瞄系统等部分组成。发送器的光源采用激光二极管(laser diode, LD, 也称为半导体激光器)或发光二极管(light-emitting diode, LED)，接收器主要采用 PIN 或 APD(avalanche photo diode, 雪崩二极管)。无线光通信模型如图 1.1 所示。

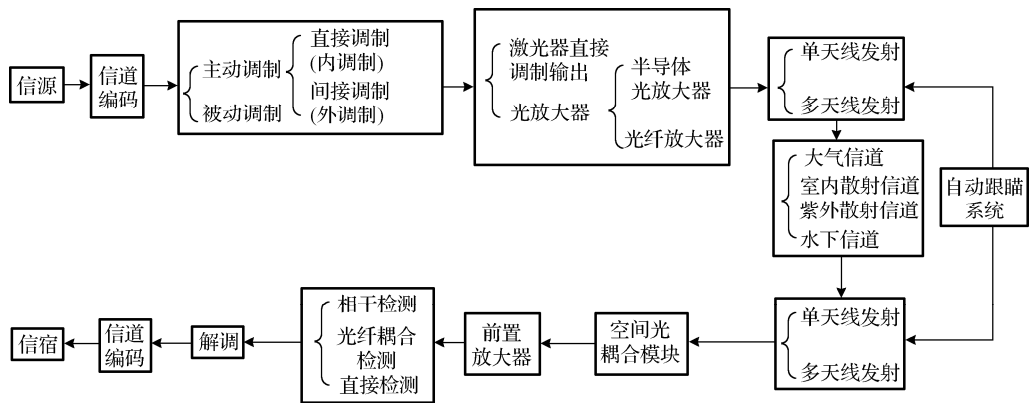


图 1.1 无线光通信模型

1.1.1 发射机

将信源产生的某种形式的信息(如时变的波形、数字符号等)调制到光载波上，载波(称为光束或光场)通过大气或自由空间发射出去，这就是发射机。发射机包括信道编码、信源编码、调制、光信号放大以及发射天线。

信道编码的过程是在源数据码流中加插一些冗余码元，从而达到在接收端进行判错和纠错的目的。降低误码率是信道编码的基本任务。信道编码的本质是增加通

信的可靠性,但由于加入了冗余而使有用的信息数据传输率降低。

调制是信号的变换过程,是按编码信号的特征改变光信号的某些特征值(如振幅、频率、相位等)并使其发生有规律(这个规律是由信源信号本身的规律所决定的)的变化。这样光信号就携带了信源信号的相关信息。调制的目的是便于信息在信道中传输。

调制可以分为主动调制与被动调制。如果光源和调制信号同在发射端,就是主动调制;如果光源和调制信号不在同一端,就是被动调制,也称为逆向调制(modulating retro-reflector, MRR)。如果对激光器电源进行调制,则称为直接调制;如果对激光器发出的波束进行调制,则称为间接调制,也称为外调制。

如果通信距离要求较远,激光器直接输出的光功率不足,则采用光放大器对光信号进行放大。光放大器有半导体光放大器和光纤放大器。

发射天线有多天线发射/多天线接收、单天线发射/单天线接收。多天线发射/多天线接收可以抑制大气湍流的影响。

1.1.2 接收机

接收机包括光信号接收天线、空间光-光纤耦合单元、前置放大器、检测器、解调器等。

接收天线把发射机发送的光信号收集起来,空间光-光纤耦合是将接收机收集的信号光耦合进光纤中,由光纤探测器实现光电转换。光信号耦合进光纤的过程中会有能量损失。

有时耦合进光纤的信号非常微弱,需要采用前置光放大器对其进行预放大后再进行光电转换。

信号检测有探测器直接检测、空间光-光纤耦合检测、分布式检测以及相干检测。光检测器直接接收天线汇集光信号的检测方式称为直接探测。由光电检测器检测空间光耦合进光纤中的信号,就是空间光-光纤耦合检测。由于光纤端面小,光电转换器感光面积小,需要的光信号强度也小,因此空间光-光纤耦合检测的速率高,检测灵敏度也高^[1]。

1.1.3 光信道

无线光信道包括大气信道、室内信道、紫外光散射信道和水下信道。大气信道是最复杂的信道,大气湍流及复杂气象条件对光信道影响最大。信道传递函数可以表示为

$$H(f) = H_T(f)H_c(f)H_r(f) \quad (1.1)$$

式中, $H_T(f)$ 、 $H_c(f)$ 和 $H_r(f)$ 分别表示发射机、信道和接收机的传递函数。对应的时域表达式为

$$h(f) = h_T(f)h_c(f)h_r(f) \quad (1.2)$$

式中, $h_T(t)$ 、 $h_c(t)$ 和 $h_r(t)$ 分别表示发射机、信道和接收机的单位冲激响应。信道模型如图 1.2 所示。

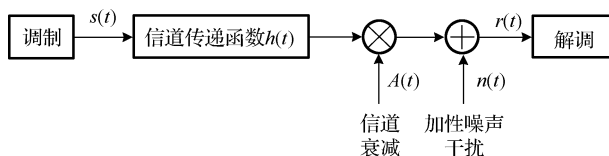


图 1.2 信道模型

解调器输入的信号可以表示为

$$r(t) = A(t)[s(t) * h(t)] + n(t) \quad (1.3)$$

式中, $A(t)$ 表示信道的衰落; $s(t)$ 是调制器输出的信号; $*$ 表示卷积。对于大气激光通信, $A(t)$ 主要来源于大气湍流; 对于紫外光非直视通信, $A(t)$ 主要由大气分子对紫外光的单次散射以及多次散射产生光强的起伏; 对于室内可见光通信, $A(t)$ 主要由室内光的反射产生。对于水下光通信, $A(t)$ 主要源于水的流动和水中浮游生物的散射。当不考虑信道衰落的时候, 接收信号可以表示为

$$r(t) = s(t) + n(t) \quad (1.4)$$

式中, $n(t) \sim (\mu_N, \sigma^2)$ 是高斯分布的白噪声, 一般表示接收机探测器及其附属电路的电子噪声, μ_N 是随机噪声均值, 一般 $\mu_N \neq 0$ 。

1.2 激 光 光 源

半导体激光器(LD)是一种能够直接将电能转化为光的固态半导体器件。其他激光器如气体激光器、液体激光器也可以作为光源, 但以半导体激光器最为常见。

1.2.1 半导体激光器的工作原理

半导体激光器是用半导体材料作为工作物质的发光器件。常用工作物质有硫化镉(CdS)、砷化镓(GaAs)、磷化铟(InP)、硫化锌(ZnS)等。由于工作物质结构上的差异, 产生激光的具体过程会有不同。激励方式有电子束激励、电注入和光泵浦三种形式。半导体激光器可分为单异质结、双异质结(double heterojunction, DH)、同质结等几种。同质结激光器和单异质结激光器室温时多为脉冲器件, 而双异质结激光器室温时可实现连续工作。半导体激光器的基本结构是双异质结平面条形结构, 如图 1.3 所示。所谓异质结, 是指由两种带隙宽度不同的半导体材料组成的 P-N 结(也可能是 P-P 或 N-N 结)。普通 P-N 结也称为同质结^[2]。

粒子数反转(population inversion)是激光产生的前提。两能级间受激辐射概率与两能级粒子数差有关。通常处于低能级(E_1)的原子数大于处于高能级(E_2)的原子数, 这种情况下不产生激光。要产生激光就必须使高能级(E_2)上的原子数目大于低能级(E_1)上的原子数目, 因为高能级(E_2)上的原子多而发生受激辐射, 导致光增强(也叫

作光放大)。为了达到这个目的,必须设法把处于基态的原子大量激发到亚稳态(E_2),处于高能级(E_2)的原子数就可以大大超过处于低能级(E_1)的原子数。这样就在两个能级之间实现了粒子数的反转。

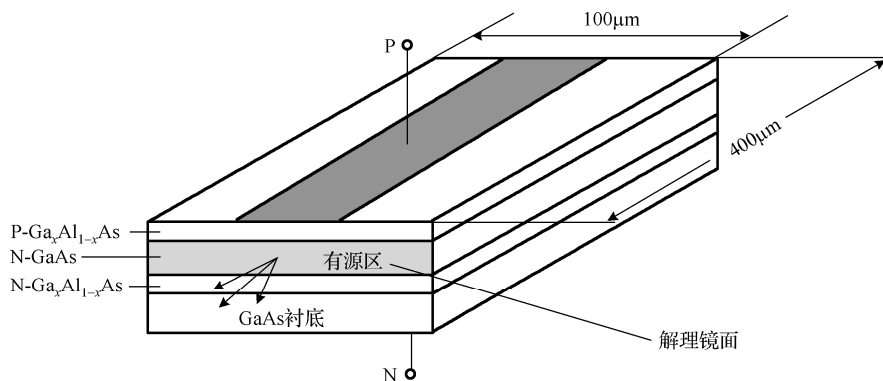


图 1.3 双异质结平面条形半导体激光器的基本结构

激光器必须有增益介质、谐振腔和泵浦源,才可以在一定条件下产生激光。同质结 LD 对半导体材料的要求是重掺杂而且必须是“直接带隙”的半导体材料。电子由导带跃迁至价带,受激辐射将起主导作用,发出的光就是激光。由于重掺杂,简并半导体的有源区束缚电子和空穴的能力较弱,需要很大的注入电流密度才能实现粒子数反转,所以难以实现室温下连续工作,只能在低温下工作。为了降低电流密度阈值,人们研究了单异质结和双异质结半导体激光器。不同半导体材料的带隙差也使有源区的折射率高于邻近的介质,这样使光子也限制在有源区内,载流子和光子的束缚使得激光器的阈值电流密度大幅度下降,从而实现了室温连续工作。

1.2.2 半导体激光器的基本特性

半导体激光器是以一定的半导体材料为工作物质而产生受激发射作用的器件。其工作原理是通过一定的激励方式,在半导体物质的能带(导带与价带)之间,或者半导体物质的能带与杂质(受主或施主)能级之间,实现非平衡载流子的粒子数反转。当处于粒子数反转状态的大量电子与空穴复合时,便产生受激发射作用^[3]。半导体激光器的激励方式主要有三种:电注入式、光泵式和高能电子束激励式。电注入式半导体激光器一般是由砷化镓(GaAs)、硫化镉(CdS)、磷化铟(InP)、硫化锌(ZnS)等材料制成的半导体面结型二极管,沿正向偏压注入电流进行激励,在结平面区域产生受激发射;光泵式半导体激光器一般以 N 型或 P 型半导体单晶(如 GaAs、InAs、InSb 等)为工作物质,以其他激光器发出的激光作光泵激励;高能电子束激励式半导体激光器以 N 型或者 P 型半导体单晶(如 PbS、CdS、ZnO 等)为工作物质,通过由外部注入高能电子束进行激励。半导体激光器是阈值器件,当注入电流小于阈值

电流时, 谐振腔增益不足以克服损耗, 有源区内不能实现粒子数反转, 自发辐射占主导地位, 发出普通的荧光, 与 LED 相似; 随着注入电流增大, 达到或超过阈值后, 有源区内实现了粒子数反转, 受激辐射占主导地位, 发出谱线尖锐、模式明确的激光。半导体激光器对温度很敏感, 其输出功率随温度变化很大, 其主要原因是半导体激光器的外微分量子效率和阈值电流都随温度而变化。

半导体激光器是以半导体材料为工作物质的一类激光器件。它除了具有激光器的共同特点外, 还具有以下特点: 体积小、重量轻、驱动功率和电流较低、效率高、工作寿命长、可直接电调制、易于与各种光电子器件实现光电子集成。

1.2.3 非线性校正

激光器是具有阈值特性的非线性器件, 其非线性会在调制信号的激励下产生谐波失真。

1. 静态非线性对副载波调制的影响

输入电流与输出光功率之间关系的 I - L 特性曲线可以用来表征激光器的非线性失真。如图 1.4 所示, 非线性失真可以简单地概括为在无失真信号的激励下, 输出响应信号在时域中产生了波形畸变, 在频域中则出现了新的谐波分量。

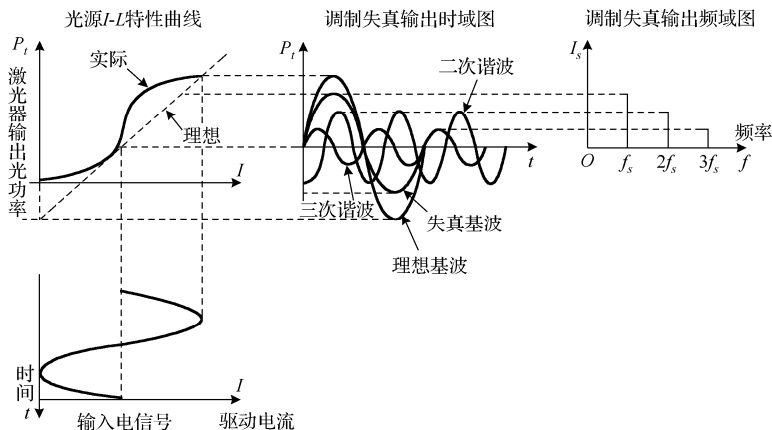


图 1.4 激光器非线性对副载波调制的影响

2. I - L 特性预失真补偿

假设激光器输出光功率 P 与驱动电流 I 的关系为

$$P = a_0 + a_1 I + a_2 I^2 + a_3 I^3 \quad (1.5)$$

假设预失真器产生的预失真信号为

$$I' = b_2 I^2 + b_3 I^3 \quad (1.6)$$

预失真器的基本原理: 在信号电压增加的过程中, 激光器前端的预失真模型使

经过激光器的电流更快增加，同时抵消激光器在电流增大时光功率增长的幅度比电流增长的幅度小的那部分非线性失真。通过预失真模型和激光器的共同作用后，输出光功率与输入电流之间保持线性变化关系^[4]。

如图 1.5 所示，输入信号是电流 I 。原输入信号 I 通过耦合器分成三路：一路为主通道 αI (处理基波成分)，另两路为副通道 (处理二、三阶失真成分)。假定两路副通道的增益相同，预失真器就可看作副通道产生的信号。主通道通过时延直接进入合路器，副通道通过衰减器、反相器和滤波器后由合路器输出，然后将输出的三路合成信号通过激光器，此时激光器的输出光功率变为

$$P' = \sum_{m=1}^3 a_m (\alpha I - \beta I')^m = \sum_{m=1}^3 a_m \left(\alpha I - \beta \sum_{n=2}^3 b_n I^n \right)^m \quad (1.7)$$

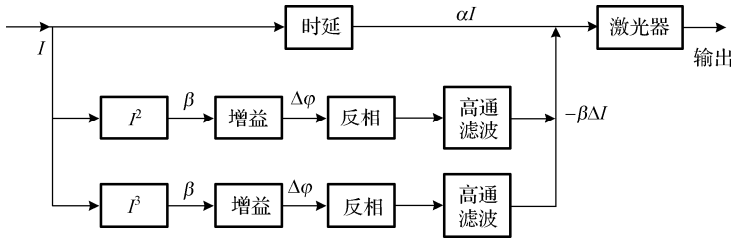


图 1.5 I - L 特性预失真原理图

将式 (1.7) 转化为幂级数展开式：

$$P' = \sum_{m=1}^3 D_m I^m \quad (1.8)$$

式中

$$D_1 = \alpha a_1 \quad (1.9)$$

$$D_2 = \alpha^2 a_2 - \beta a_1 b_2 \quad (1.10)$$

$$D_3 = \alpha^3 a_3 - \beta a_1 b_3 - 2\alpha \beta a_2 b_2 \quad (1.11)$$

由式 (1.9) ~ 式 (1.11) 可计算出消除二阶非线性失真的条件为

$$\beta = \frac{\alpha^2 a_2}{a_1 b_2} \quad (1.12)$$

消除三阶非线性失真的条件为

$$\beta = \frac{\alpha^3 a_3}{a_1 b_3 + 2\alpha a_2 b_2} \quad (1.13)$$

同时消除二阶与三阶非线性失真，则需满足

$$\alpha = \frac{a_1 a_2 b_3}{b_1 (a_1 a_3 - 2a_2^2)} \quad (1.14)$$

式中， α 为主通道增益； β 为副通道增益。

1.2.4 光电探测器

光电探测器作为光电子技术的核心，在信息转换和传输中扮演着不可或缺的角色，其在图像传感和光通信等领域得到广泛应用。

1. 半导体光电探测器

光电探测器将光信号转化为电信号，其工作原理是光电效应，光的能量被吸收后激发电子产生电流。光照射到探测器的光敏材料表面，当光子能量满足一定条件时，光子的能量被材料中的原子或分子吸收，该过程导致光敏材料中的电子从基态跃迁至激发态。激发态电子被释放到导电带，形成自由载流子。在光电探测器的结构中，通常存在电场或电势差，促使自由电子朝着电场方向移动，移动的自由电子形成了电流。为了定量地衡量光电探测器的探测能力，可以采用测量不同条件下光电探测器电流强度的方法。通过测量电流的强度，可以得知光信号的强度及其他特征。

2. 光电探测器的分类

光电探测器可以分为很多种类。按照器件结构可以分为光电导型、肖特基型、异质结型。这些结构的光电探测器都能够实现基本的光电探测功能。常见的光电探测器按工作机制分类可以分为光导型、光伏型、雪崩型等。不同类型的光电探测器具备不同的性能特点，适用于不同的应用场景。

如图 1.6 所示，光导型探测器由金属-半导体-金属 (metal-semiconductor-metal, MSM) 构成，且金属与半导体材料之间为良好的欧姆接触。黑暗条件下，在金属电极施加偏压，半导体材料内部少量的电子、空穴会分别向电极两端流动，从而产生暗电流。当器件受到特定频率光照时，半导体吸收了光子能量，因此内部出现大量电子空穴对，在两端施加一定偏压的条件下，电子、空穴会分别向两极移动，在整个电路中形成较大的电流。该结构中金属和半导体材料之间没有明显的势垒，通常其 I - V 特性曲线表现为良好的线性，可在正负电压作用下产生对称的光电流。

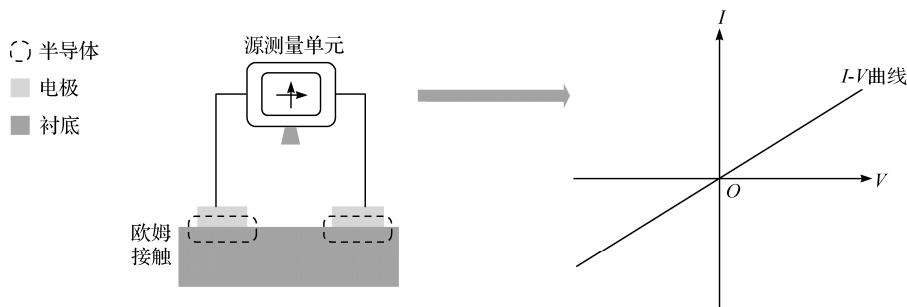


图 1.6 光导型器件工作示意图

光导型器件可通过栅极调控以及声表面波增强等方式提升器件的灵敏度。光栅调控(photogating)机制是指在光照作用下,吸收光子产生的电子或空穴处于陷阱态,这些电荷陷阱态可以作为局域光栅,对导电沟道进行调制,从而实现光控制下的电荷传输。光照射后,光生电子空穴对会影响晶体管通道中的载流子密度,从而改变通道电导率。

声光耦合效应常用于声光调制器件和声光表面波传感器等领域。其基本原理是通过将光波与声表面波相互耦合,在声表面波传播过程中对器件进行调制,从而实现器件探测能力的增强。这种声光调制效应可用于实现光信号的调制和放大。

在光生伏特效应中,半导体材料内部(通常在PN结等结构处)存在内建电场,能够有效分离光照产生的电子-空穴对;这些载流子在电场驱动下定向移动,从而形成光电流。此类器件所产生的电流信号可被精确测量,并广泛应用于光电探测。其中,光生伏特效应在太阳能电池领域得到了最为成熟的应用。

雪崩放大机制使得电信号得以放大,提高了光电探测器的灵敏度。雪崩二极管在弱光条件下具备卓越的探测性能,被广泛应用于弱光环境下的光信号检测,例如高速通信和光通信系统中的光接收端。

1.3 半导体激光器和光电探测器的响应特性

1.3.1 半导体激光器的响应特性

当开始对激光器进行泵浦时,其输出会出现振荡现象,且振幅随时间逐渐减小,直至输出稳定。这一过程中出现的特征频率即为弛豫振荡频率。它是激光器本身的固有频率,描述了激光器独特的物理属性。半导体激光器的响应特性与其弛豫振荡频率有关,弛豫振荡频率 f_0 可由速率方程求得。

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - A(N - N_{om})S - \frac{N}{\tau_n} \quad (1.15)$$

$$\frac{dS}{dt} = \Gamma\beta\frac{N}{\tau_n} - \frac{S}{\tau_p} + \Gamma A(N - N_{om})S \quad (1.16)$$

式中, N 为载流子浓度; S 为光子密度; I 为注入有源区的电流; N_{om} 为透明载流子浓度; q 为电子电荷;有源区体积 $V=WLD$, W 、 L 、 D 分别为有源区宽度、腔长和厚度; A 为增益因子; τ_p 、 τ_n 分别是光子寿命和载流子寿命; Γ 为光限制因子; β 为自发辐射系数。

在小信号调制下,可将式(1.15)和式(1.16)中的变量表达为以下形式:

$$\begin{cases} I(t) = I_0 + I_1 \exp(i\omega t) \\ N(t) = N_0 + N_1 \exp(i\omega t) \\ S(t) = S_0 + S_1 \exp(i\omega t) \end{cases} \quad (1.17)$$

式中, I_0 、 N_0 和 S_0 分别为稳态直流流量, $I_1 \exp(i\omega t)$ 、 $N_1 \exp(i\omega t)$ 和 $S_1 \exp(i\omega t)$ 分别为瞬态交流流量。

将式(1.17)代入式(1.15)和式(1.16)中, 忽略二阶小量, 可得

$$i\omega N_1 e^{i\omega t} = \frac{I_0}{qV} + \frac{I_1 e^{i\omega t}}{qV} - \frac{N_0}{\tau_n} - \frac{N_1 e^{i\omega t}}{\tau_n} - [AS_0(N_0 - N_{om}) + AS_1(N_0 - N_{om})e^{i\omega t} + AN_1 S_0 e^{i\omega t}] \quad (1.18)$$

$$i\omega S_1 e^{i\omega t} = \Gamma \beta \frac{N_0}{\tau_n} + \Gamma \beta \frac{N_1 e^{i\omega t}}{\tau_n} - \frac{S_0}{\tau_p} - \frac{S_1 e^{i\omega t}}{\tau_p} + \Gamma [A_0(N_0 - N_{om}) + AS_1(N_0 - N_{om})e^{i\omega t} + A_1 S_0 e^{i\omega t}] \quad (1.19)$$

当激光器稳态时, 存在 $dS/dt=0$ 、 $dN/dt=0$, 同时令 $N_{om} \approx 0$ 、 $\Gamma \approx 1$ 、 $\beta \approx 0$, 令 $A = a_g / (1 + \varepsilon S_0)$, 引入增益饱和项, 化简式(1.18)和式(1.19)可得激光器弛豫振荡频率 f_0 为

$$f_0 = \left(\frac{a_g S_0}{\tau_p (1 + \varepsilon)} \right)^{1/2} \quad (1.20)$$

可知, f_0 与微分增益系数 a_g 和稳态光子密度 S_0 成正比, 与光子寿命 τ_p 和增益饱和因子 ε 成反比。下面仿真分析上述因素对激光器响应特性的影响。

图 1.7(a) 和 (b) 分别为激光器在不同偏置电流 I_0 (S_0) 下的脉冲响应曲线和频率响应曲线。 I_0 分别取: 40mA、50mA、60mA 和 70mA。初始条件为: $\varepsilon = 1 \times 10^{-25}$ 、反射率 $R = 0.3$ 、 $a_g = 1.4 \times 10^{-12}$ 。

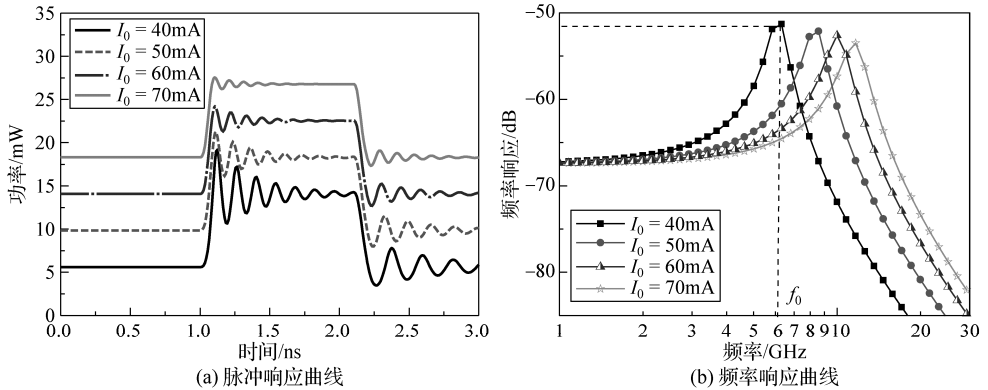


图 1.7 不同偏置电流 I_0 下的响应曲线

从图 1.7(a) 可以看出, 当偏置电流 I_0 增大时, 弛豫振荡频率增大, 弛豫振荡幅值减小, 脉冲波形失真现象显著好转。从图 1.7(b) 可以看出, 通过增加偏置电流 I_0 , 可以提高弛豫振荡频率 f_0 , 进而增大激光器的调制带宽。

图 1.8 和图 1.9 分别为激光器在不同微分增益系数 a_g 下的脉冲响应曲线和频率响应曲线。 a_g 分别取： 1.4×10^{-12} 、 2.4×10^{-12} 、 3.4×10^{-12} 和 4.4×10^{-12} 。初始条件为： $I_0=40\text{mA}$ 、 $\varepsilon=1 \times 10^{-25}$ 、 $R=0.3$ 。

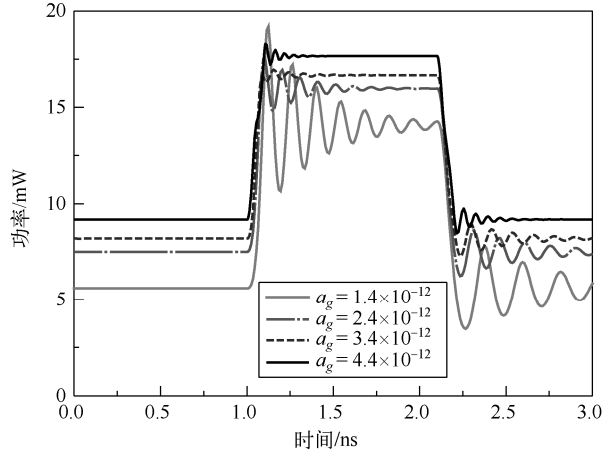


图 1.8 不同微分增益系数 a_g 下的脉冲响应曲线

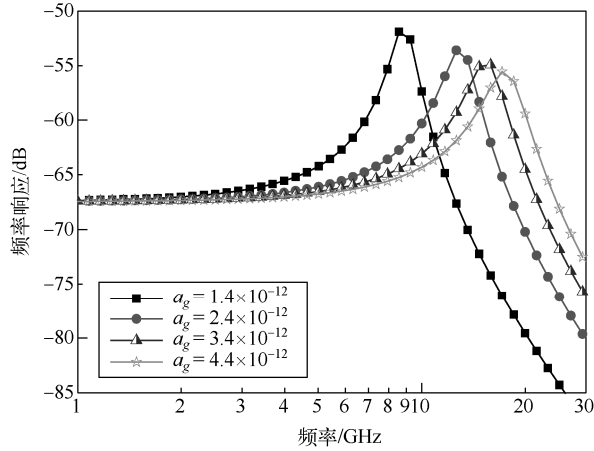


图 1.9 不同微分增益系数 a_g 下的频率响应曲线

从图 1.8 可以看出，增大微分增益系数 a_g ，弛豫振荡过程缩短，波形失真现象基本消失。从图 1.9 可以看出，通过增大 a_g ，可以提高弛豫振荡频率 f_0 ，进而增大激光器的调制带宽。

图 1.10 和图 1.11 分别为激光器在不同增益饱和因子 ε 下的脉冲响应曲线和频率响应曲线。 ε 分别取： 1×10^{-25} 、 2.5×10^{-24} 、 5×10^{-24} 和 1×10^{-23} 。初始条件为： $I_0=40\text{mA}$ 、 $a_g=1.4 \times 10^{-12}$ 、 $R=0.3$ 。