

OHM 光通信/光电子系列

光纤通信

〔日〕末松安晴 伊贺健一 著
金轸裕 译



科学出版社

www.sciencep.com

图字：01-2003-4427

Original Japanese language edition

Hikari Fiber Tsushin Nyumon (Kaitei 3-han)

By Yasuharu Suematsu and Kenichi Iga

Copyright © 1989 by Yasuharu Suematsu and Kenichi Iga

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version published by Science Press, Beijing

Under license from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2003

All rights reserved

光ファイバ通信入門 (改訂3版)

末松安晴 伊賀健一 オーム社 2002

图书在版编目(CIP)数据

光纤通信/(日)末松安晴,伊贺健一著;金軫裕译. —北京:
科学出版社,2004

(OHM 光通信/光电子系列)

ISBN 7-03-012231-3

I. 光… II. ①末… ②伊… ③金… III. 光纤通信 IV. TN929.11

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 088476 号

责任编辑 王炜 崔炳哲 责任制作 魏 谨

责任印制 白 羽 封面设计 李 祥

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>

源海印刷有限责任公司印刷

北京东方科虎图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 3 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2004 年 3 月第一次印刷 印张: 9 5/8

印数: 1—4 000

字数: 218 000

定 价: 24.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

第一版前言

本书是为有志于承担光纤通信事业发展的学生和技术工作者编写的入门书。书中就光波导原理、半导体激光器、发光二极管等光源的工作原理、特性及调制方法,光探测器与光路,光纤传输介质的特性以及光信息传输系统的现状进行了阐述。

从广义上说,利用光进行通信的历史可以追溯到古人类的诞生。应当说,人类就是在有效利用光的过程中生活至今。光作为适应近代文明高性能要求的信息传输手段而引起科学家的关注是1960年发明激光器以后的事。而发现其工业化的可能性则是1970年以后,尤其是在最近降低光纤的传输损耗的同时把半导体激光器成功地改造成小型而高效之后的事。

另外,经过五六年的研究,光纤逐渐被人们视为低损耗、大容量的最好传输介质之一。光纤通信在成为新技术的过程中受到世界的关注,人们积极地对它进行了研究开发。

我们两位著者有幸一开始就参与了这个领域的研究工作,并且经常在各种杂志上发表文章,介绍此项工作。此次受到 OHM 社的委托编写本书,以期获得年轻朋友们对光通信开发事业的关心和帮助。

在编写本书的过程中,很多研究工作者将自己的研究成果,以及照片和插图提供给我们参考使用,在此向他们表示衷心的感谢。另外,也对为本书的出版给予极大帮助的 OHM 社的森、桑山两位先生深表谢意。

著 者

第二版序

《光纤通信》于 1976 年秋问世以来已过数年。在此期间,进行了 8 次小的修改。1982 年由南安普顿大学 Gambring 教授和日立制作社中央研究所的松村宏善博士翻译,出版发行了英译本。为适应光纤通信技术的飞速发展,第四次印刷时,虽在书中补充了一些内容,但从现在的发展看,深感本书需要进行大的修改性,尤其是技术部分。

本次修订中改动比较大的有如下几章。首先是光通信用光源一章,重点介绍了 $1\mu\text{m}$ 波段半导体激光器的显著发展和进步;其次是光纤传输介质一章,在改换章节的同时增加了关于这几年开发的轴向气相沉积(VAD)光纤的技术;第三是新设置了为光通信的实用化所必需的光路一章,同时充实并独立阐述了光的调制、光的探测、集成光路等章节。另外,整理修改了光通信系统一节。

本次修订的目的和初版一样,也是让更多的年轻读者理解“光的情感”。在修订第一版中我们把这一点放在了心上,这种苦心若能为读者所理解,我们将不胜荣幸。作者进行修订之时,拜托研究室年富力强、朝气蓬勃的研究人员岸野克己和国分太雄分别审查 5 章、9 章和 3 章、10 章的内容。对他们的努力深表谢意。

另外,向在修订过程中提供珍贵照片和资料的各位先生致以衷心的感谢。修订版的准备工作之所以能够比较快地完成,与 OHM 社诸位先生的努力是分不开的。

著 者

第三版序

自 1982 年本书第二版出版以来,七年多的时间又过去了,在此期间光纤通信越来越多地融入到各类通信系统之中。例如 1985 年 NTT 实现了纵贯日本的光缆,1989 年敷设了跨越太平洋、大西洋的海底光缆。这将使人们有理由相信它将作为以用户为中心的网络,扩展其用途。在光通信的飞速发展中,本书有幸成为教科书,并成为本领域初学者的入门书,致使第二版印刷了 8 次。然而,随着技术的快速进步,新的器件不断涌现,很多高性能的最新数据记录被刷新。本书虽然侧重于基础知识,但也深感重新修订的必要。本书修订有如下两个宗旨:一是介绍七年之间所涌现的新的方案和器件;二是补充 1983 年以后发表的文献。

从内容上看,首先补充了关于波导波动论的说明。这是因为这样做便于理解模的形式,而且也是因为本书将作为教科书来使用。其次,重点补充了半导体激光器,尤其是单模激光器以及集成光路技术的飞跃进展。

另外,在东京工业大学的古屋一仁副教授、金泽大学的山田实教授、上智大学的岸野克己副教授、横滨国立大学的国分泰雄教授、长冈技术科学大学的上林利生副教授、东京工业大学的荒井滋久副教授、武藏工业大学的森木一纪讲师、东京工艺大学的藤桥忠悟副教授、东京工业大学的浅田雅祥副教授、东京工业大学的小山二三夫副教授等诸位先生的大力支持下增补了参考文献,在此向他们深表谢意。

并且,也向在本次修订中提供珍贵数据和照片的各位先生,致以衷心的感谢。

最后,向在修订工作中给予帮助的 OHM 社出版部的诸位先生表示感谢。

著 者

目 录

第 1 章 光通信概述

1.1 何谓光通信	1
1.2 获得新的发光源和光纤传输介质的历程	3
1.3 光传输的方法	7
1.4 利用光纤的通信有何特征	11
思考题	13

第 2 章 导光现象的基础

2.1 折射与反射是光导波的基础	15
2.2 导光是怎样进行的	17
2.3 导波光是在分散的模	19
2.4 模 数	24
2.5 群速度	27
2.6 TE 模与 TM 模	30
2.7 单模波导	34
思考题	35

第 3 章 渐变折射率光波导和光束

3.1 渐变折射率波导	37
3.2 渐变折射率波导模	42
3.3 各种折射率分布的波导	44
3.4 波导的弯曲	48
3.5 界面的不均匀	49
3.6 聚光的方法	49

3.7 光束的性质	53
思考题	57

第 4 章 发光和激光器工作的基础

4.1 发光现象的机理与激光器	59
4.2 半导体的发光与发光二极管	62
4.3 激光器的工作原理	67
4.4 半导体激光器	71
4.5 发射光的性质	79
思考题	82

第 5 章 光通信用光源

5.1 通信用光源的条件	84
5.2 光纤的传输特性与发光元件	87
5.3 短波段光源	89
5.4 长波段的半导体光源	95
5.5 半导体激光器的模控制	103
5.6 动态单模激光器	110
5.7 固体激光器	112
5.8 光放大器	114
思考题	115

第 6 章 光调制

6.1 何谓光调制	116
6.2 半导体激光器的直接调制	118
6.3 发光二极管的直接调制	126
6.4 外调制	127
6.5 光调制与波长的啁啾	130
思考题	131

第 7 章 光探测器

7.1 光探测器的原理	132
7.2 实际的光探测器	136
7.3 比特速率	137
思考题	141

第 8 章 光路和光部件

8.1 与光纤的耦合	142
8.2 各种光路与部件	144
8.3 光隔离器	146
8.4 利用光波分复用方式的光路	149
思考题	150

第 9 章 集成光路

9.1 概 述	151
9.2 集成光路用波导	152
9.3 集成激光器	153
9.4 波导性无源回路	158
9.5 波导性有源回路	158
9.6 集成光路的功能与种类	162
9.7 光电集成电路(OEIC)	162
思考题	164

第 10 章 光纤传输介质

10.1 光纤的种类与特点	165
10.2 光纤的基本常数	167
10.3 光纤的材料和制造方法	183
10.4 光纤的损耗	189

10.5 光纤的传输频带	192
10.6 光缆与连接	201
10.7 光纤的测试方法	205
思考题	211

第 11 章 光通信系统及其应用

11.1 光纤通信的特点与应用领域	213
11.2 光纤通信的频带传输距离	215
11.3 光传输方式	219
11.4 光复用方式	225
11.5 各种光通信系统	226
11.6 光通信系统的未来展望	233
思考题	235

附 录

附录 1 渐变折射率波导内的光线轨迹 式(3.4)的推导	236
附录 2 渐变折射率波导中一周期的相位变化 (式(3.8)的推导)	237
附录 3 式(3.11)、式(3.14)的推导	238
附录 4 渐变折射率光纤的模与模对照表	238
附录 5	239
参考文献	241

第 1 章 光通信概述

1.1 何谓光通信

虽然 1960 年就研制出了激光器,然而将激光器发出来的光用于通信,将各种信息更加快捷地传输到遥远的地方却是最近才发生的事情。那么什么是光通信呢?我们为对光通信感兴趣的读者,编写了这本不需要预备知识的入门书。

最近通信技术的发展十分惊人。用电视画面实时观看在地球的另一侧进行的奥运竞赛场面等是极为平常的事。将来,医疗、教育电视或书信、报纸的传输和电视电话等连接家庭的通信将变得很普遍,人们将能轻而易举地利用数据传输和电视电话。因此,将来的通信容量必将超过现在的数万倍,而为了传输如此大容量的信息,必须有宽带高频电磁波。开发过去所作不到的高频电磁波处理技术,成为通信技术工作者、研究人员的大课题。1960 年发明的激光器(光的振荡器)就有可能发射比微波(频率 $\approx 10^{10}$ Hz)还高 $10^4 \sim 10^5$ 倍的高频相干光^[6]。而且激光问世以来,发现其具有作为通信载波所应具备的如下长处:

- ① 频率纯,可以实现宽带;
- ② 聚光性能好;
- ③ 方向性好。

于是人们进行了不断的实验,要把它应用到通信中。起初认为,激光可以增加信道数,可以改变过去只能容纳频率倍率($\approx 10^5$ 倍)信道数的状况,因而出现了过高地评价激光的倾向。然而当考虑把激光用于实际的通信系统时,却遇到了一系列问题。其中有,使激光振荡器更便于使用的问题;调制与解调问题;提高传输介质的可靠性,以减少在介质中损耗的问题等。

到了 1970 年人们成功地将玻璃光纤的损耗大幅降低^[22],使一直被认为是很好的一种光传输介质,却因损耗大而陷入困境的玻璃光纤

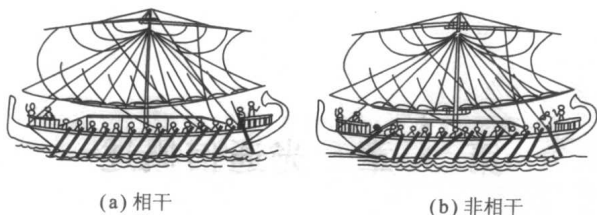


图 1.1 关于相干现象的说明(这是指周期一致的周期现象,如船桨一致的运动(a)等可以叫做相干)

得以新生。同年,虽被认为是光通信用光源,但又不太完美的半导体激光器实现了室温下的连续工作^[23],而且,随着此后针对半导体激光器长寿命问题、光纤低损耗问题的研究有了重大的突破,于是出现了光通信实用化的萌芽。虽然此时尚处于起步阶段,但很多人确信这个嫩芽具备将来长成参天大树的素质。

另一方面,考虑用比激光频率更高的紫外线、X射线,则存在光子的能量太大,量子噪声效应的影响过强,传输介质、反射器很难选等问题,将它们用于通信在原理上是勉强的。因此,激光也许是我们能够用于通信的最佳电磁波。

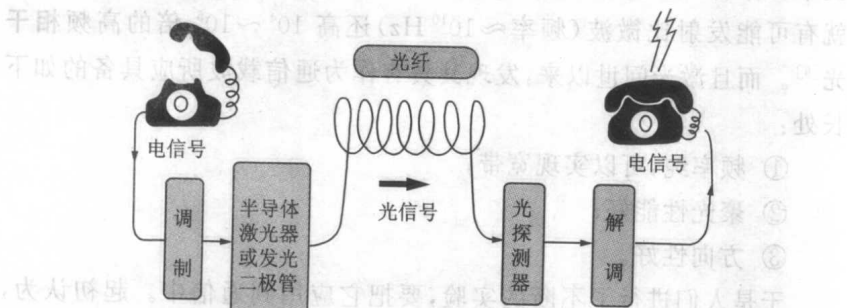


图 1.2 光纤通信的构成

在各种光通信中,本书主要介绍如图 1.2 所示的使用光纤和半导体光源的通信。在这种光纤通信中,发信方的用户先把要传输的信号(声音)变成电信号,然后使从半导体激光器或发光二极管等通信用光源发出的光强随电信号大小而变化(称为调制),并将此光信号利用光

纤传输线路传到远方。而接受信号一方的用户则用光探测器接受,将接收到的光信号转换为电信号(称为解调),并使之变为用户可以理解的信号(声音),从而完成通信。

1.2 获得新的发光源和光纤传输介质的历程

自人类诞生以来就有利用光的通信方法。例如用灯火和烽火或用镜子反射太阳光来进行通信的方法。船舶上的莫尔斯电码通信今天还在使用。

对用电发光的**发光源**的研究,在欧美等地主要基于放电管和白炽灯的开发或者固体发光现象的研究;并且在半导体结面通电流,使之发光的现象成为了基础。用于晶体管的硅和锗等半导体单晶中的发光强度很小,但在**镓砷(GaAs)这样的化合物半导体**中的发光强度却明显大得多。从而以发光元件的制造为目的,开发了此类半导体晶体的生长技术。

关于**传输介质**,在很早以前玻璃加工盛行的希腊观察了在玻璃细加工过程中光在玻璃棒中的传播;而在19世纪科学之花盛开的英国则观察到了在细水流中光的传播。基于这种原理首次进行光在光纤中传播实验的是1930年德国的Lamb^[1]。1958年英国的Kapany等人研究了以玻璃光纤为芯,在其周围涂敷另一种玻璃的光纤,这就是现在光纤的雏形^[2]。

20世纪60年代初,日本利用这种光纤束进行了图像传输,然而其传输损耗大(在1m的距离光强减少至几分之一),因此被认为不能用于信号传输。

美国陆军研究所的Goubau和Schwering等人在1960年利用另一种**光传输介质**,进行了与这种方式不同的实验,这就是透镜阵列的实验。他们将焦距为50m的10个光学透镜以100m的距离排列成一行,在途中的地上设置了由管线包住的1km的线路,用氙(Xe)灯作光源进行了通信实验^[3]。此后,还开展了有关光束稳定性的研究^[4]。

1952年Neumann预言了半导体的光放大作用^[5];1955年Downs, Shawrow, Basov等人提出了光学脉泽(Optical Maser)的设想。1960年休斯公司Maiman利用红宝石固体激光器^[6],1961年贝尔实验室Javan等人利用He-Ne气体激光器^[7],将预言和设想变成了

现实。而1957年提出的半导体脉泽的设想^[8]则因1962年美国GE公司的Hall, MIT公司的Quist, IBM公司的Nathan等人成功地进行了镓砷半导体激光器的振荡试验,使之变成现实^[9~11]。这样,人们就认识到,光通信将因新获得的激光而成为高性能的通信方式。

此后利用激光器并用对置的两块反射镜以限制光,持续开展了关于法布里-珀罗谐振器特征模(是表示光分布的形式,也叫做特征姿态)的研究,奠定了关于激光器发射光束在空间传播形式的理论基础^[12]。

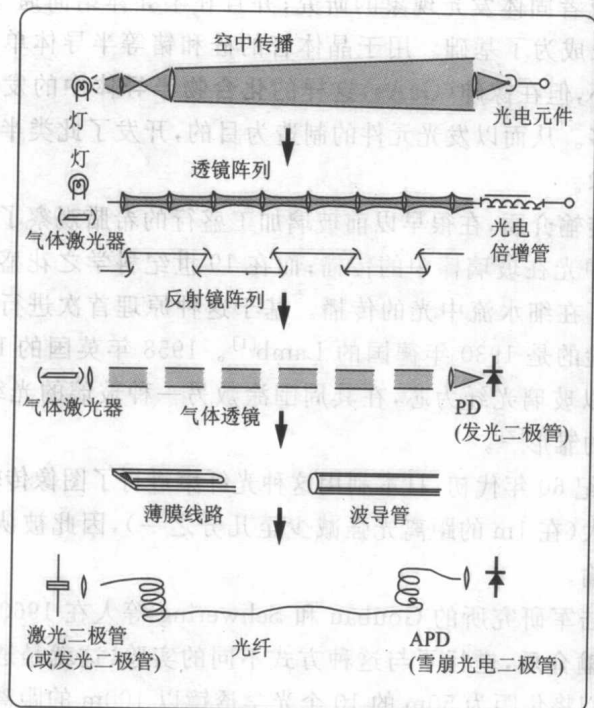


图 1.3 光通信的发展

此时,我们也开展了将激光用于光通信的研究。在1963年5月召开的“全学祭”(日本大学节)研究室公开活动中,进行了光纤通信的实验。该实验的装置如图1.4所示,包括了激光器、光纤、光探测器,

其目的是要实际地传送声音信号¹⁾。这或许是世界首次利用光纤的光通信实验。

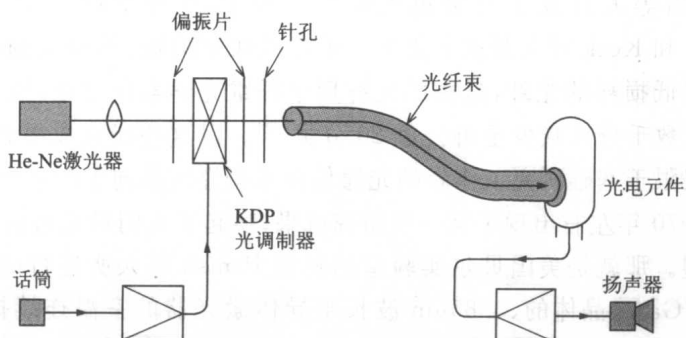


图 1.4 1963 年 5 月由笔者们进行的光纤传输实验系统

1964~1965 年提出并开展了**气体透镜**^[13]的研究^[14~16]。这是一种使气体的折射率分布由中心轴开始以距离二次方递减，将光限制于中心轴附近的方式，是以低损耗传输光的气体透镜。与此同时，还建立了关于传输这种具有折射率分布的、所谓类透镜介质导模的数学基础。然而，要形成折射率分布，则需要一定的功率，体积也增大，因而不可能把它作为传输元件。但其持续地限制光以进行传输的思想却得到了发展，1965~1966 年研究了折射率分布近似为距离的二次方时，求解传播常数的方法^[17]。此后 1968 年利用 WKB 法，计算了渐变折射率波导的群速度，将模间群速度的等值性定量化^[18]。这种数学处理的基础在现今的光纤中结出了诸多硕果。

1966 年半导体激光器在光通信中的应用得到日本和美国的关注，可以将其直接调制到极高频率^[19]。另外，贝尔实验室进行了 Ge 和 Si 的高速光探测器的开发^[7A-1]关于参考文献序号的解释请参见 241 页。——编者注。将玻璃光纤用于传输介质的思想重新被日本、英国和美国所认可，开始探讨实现低损耗的可能性和使之具有宽带特性的可能性^[20]。

1965 年日本东北大学的西泽、川上等人进行了有关光纤损耗测试

1) 为了此项实验，学习院大学的小川智哉教授提供了光调制器 KDP 晶体^[6B-1]，由佳能(株)公司提供了光纤。

的研究^[10-2]。1966年英国 STL 的 Kao 具体提出,若能去除玻璃中的杂质,就可降低损耗的思想^[20]。1968年日本板硝子及日本电气的北野、内田等人开发了自聚焦光纤^[21]。而1970年美国康宁公司的 Moller 和 Keck 等人开发了化学气相沉积(CVD)法,并预见到有可能实现更低损耗的光纤,过去的光纤用于纤维光学器件之中,损耗也从每公里数千分贝减少至每公里20分贝^[22]。以这些研究成果为契机,当时仅限于基础研究工作者的光通信技术研究被推向了产业界。

1970年左右出现了又一项研究成果,唤起了人们对光通信实用化的希望。那就是美国贝尔实验室的林和 Panish 等人所进行的用 Al-GaAs/GaAs 晶体的、 $0.85\mu\text{m}$ 波长半导体激光器的室温连续振荡^[23]和接踵而至的日本电气^[5A-51]、美国贝尔实验室^[5A-52]、英国 STL^[5A-51]等实现的长寿命半导体激光器。另外,以电电公社^[5A-52](当时之名)为中心实现了 GaAs 半导体激光器的高可靠性。而日本的三菱^[5A-57]、日立^[5A-60]公司也开发了稳定的横模激光器。于是光部件和光传输介质的开发无论在学术上还是在产业界都被视为非常有前途的事业。充分利用半导体技术的成果而显示出明显进步的光纤传输介质以其低损耗、宽频带的特性,最近被视为最优异的光传输介质之一。

在本书初版发行的1976年之后几年,光纤通信的发展十分惊人。有关的研究人员、技术工作者及有关系统应用方面的人员数也急剧增加。所谓 $0.85\mu\text{m}$ 波段光通信系统从1980年左右开始正式使用,实际应用于世界各国的公用通信、光缆信息传输系统之中^[24-26]。1982年距离在1km以上、具有 Mbit/s 以上频带的光纤传输线路实际使用例子已超过数百。

在本书出版发行的1976年,贝尔实验室开发了改进的化学气相沉积(MCVD)法,使二氧化硅光纤传输损耗在 $1\mu\text{m}$ 以上的长波段变得非常小^[27-29]。就其此后的发展按时间介绍如下。1976年电电公社和藤仓电线公布具有划时代意义的结果—— 0.47dB/km ($\lambda = 1.3\mu\text{m}$)^[30]的传输损耗,从而加快了低损耗研究的步伐。到了1979年,对于 $1.55\mu\text{m}$ 波长, 0.2dB/km ^[31]的传输损耗被称为理论限度。与此同时1977年由电电公社(当时名称)和住友电工为中心开发了新光纤制造法——气相轴向沉积(VAD)法^[32],1980年可以实现几乎不含杂质——水的低损耗光纤^[33],即使是单模光纤也能实现 0.2dB/km 的

传输损耗^[34]。

另一方面,各国着力开发了使用于材料色散变小的 $1.3\mu\text{m}$ 波段^[35],损耗变得极低的 $1.6\mu\text{m}$ 波段等所谓长波段($1.2\sim 1.7\mu\text{m}$)光源。1976 年 MIT 的 Shie 开发了 $1.1\mu\text{m}$ 的 GaInP/InP 长波激光器^[36];1977 年电电公社^[37]、国际电电^[38]、东京工业大学^[39]开发了 $1.3\mu\text{m}$ 长波激光器;1979 年左右开发了 $1.55\mu\text{m}$ 激光器^[40~42];1980 年东京工业大学开发了 $1.5\sim 1.6\mu\text{m}$ 动态单模激光器,打开了研究工作的头绪^[43];此后各种动态单模激光器不断得到开发^[5C-100~112]。LED^[44,45]和光探测器^[46,47]的开发也活跃起来。1981~1982 年这种半导体器件也达到实用水平,长波段可以用于实际的光通信系统。光纤的性能也得到改善, $1.55\mu\text{m}$ 波长的传输损耗可以达到最低值 0.154 dB/km ^[10-155]。这里所叙述的光通信的发展历程,在卷首插图后面的表格中做了简要归纳。

1.3 光传输的方法

从历史上看,光通信的传输介质有好几种,而其中的一部分今后还要被利用,因此,在和光纤比较的同时对此稍加介绍。

1. 基于空间传播的光传输

光波在空间辐射时,其方向性极为明确,可以把光束传输到很远的地方^[2-22]。这里讨论用光束的横向强度分布 $I(r)$ 表示的高斯光束波:

$$I(r) = I(0) \exp[-r^2/w_0^2]$$

式中, r 为离中轴的距离, w_0 为光斑尺寸的常数,表示光束强度为 $1/e$ ($e \approx 2.718\cdots$) 的束径¹⁾。这种光束的定向角 $\Delta\theta$ 用图 1.5 所示的束状光的发散角度表示:

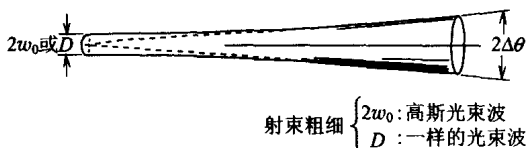


图 1.5 光束和发散角

1) 有时将其定义为电场强度为 $1/e$ 的束径 ω' 。此时 $\omega' = \sqrt{2}w_0$ 。

$$\Delta\theta \approx \frac{\lambda}{2\pi w_0} = 0.33 \left(\frac{\lambda}{2w_0} \right) (\text{rad}) \quad (1.1)$$

如图所示,角度 $\Delta\theta$ 是发散的。在辐射点光斑尺寸 w_0 越大而且波长越短, $\Delta\theta$ 则越小。

例如 $w_0 = 1\text{mm}$ 时,对于波长 $\lambda = 0.63\mu\text{m}$ 和 $10.6\mu\text{m}$, $\Delta\theta$ 分别为 10^{-4}rad 和 $1.7 \times 10^{-3}\text{rad}$, 变得很小。这样的角度意味着即使传播 1km , 光斑尺寸也仅为 10cm 和 1.7m 。在宇宙无大气情况下可以有效利用这种方向性好的特点。望远镜就相当于电波辐射天线,如图 1.6 所示,从相反方向入射光,使射束光斑尺寸变大,使辐射光束的定向角尽量小。减少透镜重量的简单方法是使用图 1.6(c) 所示结构的菲涅耳透镜。

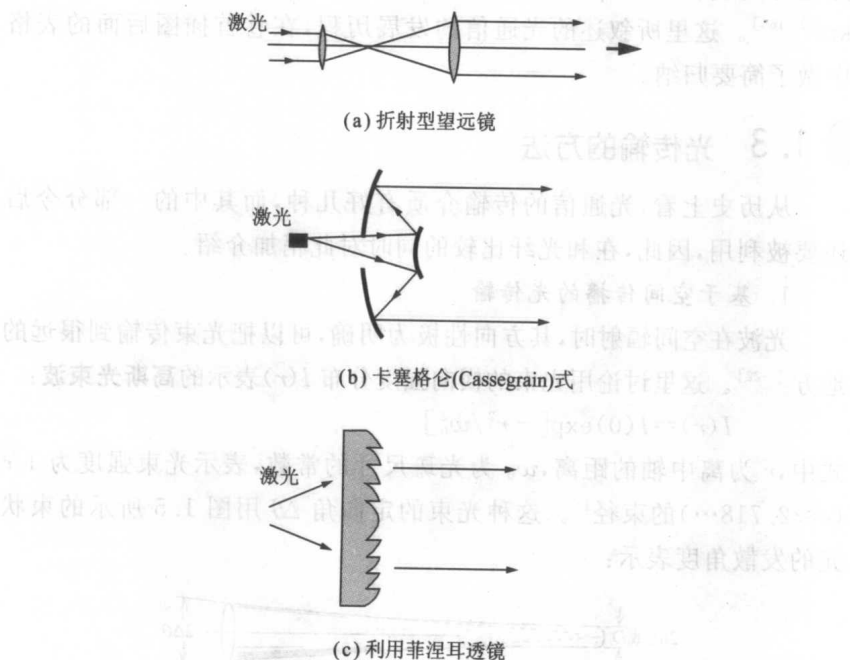


图 1.6 辐射用反向望远镜的例子

如图 1.7 所示,在大气中吸收损耗的大小因波长而异,因此需要选择相当于所谓“大气之窗”的、吸收小的波长。另外,在雨和雾那样的天气状态之下,由于受强吸收、散射的影响,往往会出现 $20 \sim 30 \text{ dB/km}$ 以上的衰减。