

先进  电子技术丛书 4

〔日〕伊贺健一 池上彻彦 荒川泰彦 主编

超高速光器件

〔日〕斋藤富士郎 著

科学出版社

共立出版

图字:01-2001-3721 号

Original Japanese language edition

Sentan Hikari Electronics Series ④ Cho Kosoku Hikari Device

by Fujio Saito

Copyright © 1998

Published by Kyoritsu Shuppan Co., Ltd.

This Chinese language edition is co-published by

Kyoritsu Shuppan Co., Ltd. and Science Press

Copyright © 2002

All rights reserved

本书中文版权为科学出版社和共立出版(株)所共有

先端光エレクトロニクスシリーズ 4

超高速光デバイス

齋藤富士郎 共立出版(株) 1998

图书在版编目(CIP)数据

超高速光器件/(日)齋藤富士郎著;崔承甲译. —北京:科学出版社,2002

(先进光电子技术丛书 4)

ISBN 7-03-010179-0

I. 超… II. ①齋… ②崔… III. 光电器件-基本知识 IV. TN15

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 009611 号

北京东方科龙图文有限公司 制作

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

科学出版社 共立出版 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

2002 年 7 月第 一 版 开本: A5(890×1240)

2002 年 7 月第一次印刷 印张: 6 1/8

印数: 1—5 000

字数: 169 000

定 价: 19.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

《先进光电子技术丛书》序

1970年,半导体激光器室温连续振荡的成功和低损耗光纤的实现拉开了光电子时代的序幕。现在主干信息通信网几乎全部都实现了光通信,今后光纤也将进入每个家庭。另外,在存储和显示领域对新的光技术的期望也越来越高,而且期望光技术对计算机技术的发展也有所贡献。在21世纪这个高度信息化的社会中,光技术将起十分重要的作用,对它的发展,人们寄予厚望。

为使希望变成现实,光技术必须要不断地创新和发展。因而,从事光技术的人必须具备两种素质:一是具有在任何时候都能从物理学的角度对光的本质有深入理解的能力;二是具有敢于开辟新领域的开拓精神。为此,就要不断地提高基础知识和基本能力水平,而这种水平要建立在从学术性的基础研究到开发研究,直至应用实践的较宽领域的知识积累之上。

策划编撰本丛书的目的是使那些立志承担21世纪光电子技术发展重任的大学生、企业中的研究人员以及技术工作者,充分掌握要实现光电子最新技术的基础知识及应用知识,并把所掌握的知识有效利用到实际工作中。光电子技术人员往往需要较扎实的基础理论知识与器件技术及系统技术有机结合的广泛知识。本丛书系统地归纳了这些知识,因此通过本丛书的学习可以掌握光电子最前沿的技术。本丛书的另一特点是力求叙述简明,以使非光电子专业的学生或科技工作者也能容易理解;编者在编写本丛书时尽量做到使本丛书系统、完整,自成体系,使之达到不依赖其他参考书也能理解的水平;本丛书中各册的执笔者都是其相应领域中的知名学者。

如果能对飞速发展的光电子的最前沿技术有深刻的了解,那

么就能担负起下一次技术创新的使命。本丛书若能对作为 21 世纪信息通信技术支柱的光电子技术的发展有所贡献,编者将不胜荣幸。

编 委

前 言

本书中的“超高速”一词没有特指的定义,只是表示比所处时代的“平均速度”超前一两步,或者“就要超前”的意思。光电子技术领域是一个高速发展的领域,其中超高速光器件的进展就更快,今天写出来的东西明天就会过时,这是司空见惯的。正因为如此,在本书中才会不时出现“编写本书的时候”这样“碍眼”的说法。对此请读者给予理解。

超高速光器件理所当然地属于最前沿的技术。因而要理解超高速光器件,就需要具有激光、材料、电磁学、量子力学和光学等多学科的基础知识。本书是为高等院校有关专业本科学生和研究生编写的,尽管书中第2章专述了有关半导体器件的基础内容。而且,每章也都简明扼要地介绍了与该章节相关的基础知识,但仅以这些作为学习超高速光器件时的基础知识储备显然是不够的。因此,希望读者再参阅本丛书中其他专论基础知识的著作。

超高速半导体激光器是超高速光器件的代表。这一点是无可非议的,因此,本书用了三章的篇幅(第3章至第5章)叙述这一题目。第6至8章则分别介绍超高速光调制器、超高速光开关和超高速探测器。第9章叙述量子线、量子点和光子晶体,不言而喻,这是一个最前沿的题目,也是一个日新月异的领域。需要说明的是,本书所叙述的内容只是“入门”知识。对于立志在该领域里做研究工作的人们,可将本书作为攀登的阶梯。

值此本书付梓之时,仅向给予编著本书机会的“先进光电子

前 言

技术丛书”的编委伊贺健一先生、池上彻彦先生和荒川泰彦先生表示深深的谢意。

斋藤富士郎

编辑委员

伊贺健一

东京工业大学精密工学研究所所长,教授,工学博士

池上彻彦

NTT Advance Technology(株)代表董事社长,工学博士

荒川泰彦

东京大学国际・产学共同研究中心、生产技术研究所教授,工学博士

著者简介

斋藤富士郎

1958年 京都大学物理学部物理学科毕业

现在 技术研究组合飞[母托]秒 Technology 研究机构常务理事,研究所所长,理学博士。

著作 《光技术与信息化社会》(NEC 文化中心)

《液晶电子学的基础与应用》(合著,欧姆社)

《液晶——应用篇》(合著,培风馆)

《电子电气材料工程学》(合著,培风馆)

《R&D Strategies in Japan》(合著,Elsevier)

本书著作权和专有出版权受到《中华人民共和国著作仅法》的保护。凡对本书的一部分或全部进行转载,或用复印机进行复制,或在其它场合引用,以及录入电子设备等行为,均属侵害著作仅,构成违法。

本书如需复制、引用、转载、改编时,必须得到版权所有者的许可。

如有任何疑问请与以下部门联系。联系时请尽量使用信函或传真形式。

科学出版社总编部 电话:010-64012994 传真:010-64019810

读者服务部:010-64017892 010-64000245

邮政编码:100717 地址:北京市东黄城根北街 16 号

<http://www.sciencep.com>

北京东方科龙图文有限公司 电话 010-82843276 010-82843277

传真:010-82842304

邮政编码:100029

地址:北京市朝阳区华严北里 11 号楼 3 层

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

内 容 简 介

本书是先进光电子技术丛书之4。书中简明扼要地介绍了各种超高速光器件。全书共九章,主要内容有:第1章概要介绍书中涉及到的各种超高速光器件;第2章介绍有关半导体光器件的基础内容,第3~5章介绍最具有代表性的半导体激光器;第6~8章则介绍超高速光调制器、超高速光开关和超高速光探测器;第9章叙述量子线、量子点和光子晶体等。

本书可作为高等院校相关专业的本科生及研究生教材,亦可供相关领域的研究人员、技术人员参考。

目 录

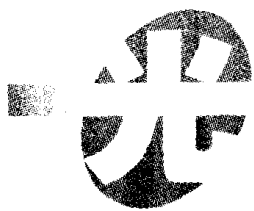
第 1 章 概 述	1
1.1 什么是“超高速”	1
1.2 “超高速”的历史变迁	2
1.3 超高速光脉冲的特性	3
1.4 本书涉及的超高速光器件	5
第 2 章 半导体光器件的基本结构	9
2.1 pn 结	9
2.2 异质结	12
2.3 超晶格	15
2.4 量子阱、量子线和量子点	15
2.5 光波导结构	17
2.6 分子束外延和金属有机气相生长	19
第 3 章 超高速半导体激光器	23
3.1 半导体激光器基础	23
3.1.1 放大器和振荡器	23
3.1.2 光和物质的相互作用	25
3.1.3 激光器的增益发生机理	27

3.1.4	光学谐振腔	29
3.1.5	激光振荡及其条件	30
3.1.6	半导体激光器的基本结构和基本特性	31
3.1.7	分布反馈(DFB)型和分布布拉格反射器(DBR) 型半导体激光器	36
3.2	半导体激光器的高速调制特性	38
3.2.1	半导体激光器的小信号调制特性	38
3.2.2	半导体激光器的寄生阻抗引起的频率响应	42
3.2.3	半导体激光器直接调制特性的数值分析	44
3.2.4	提高半导体激光器的直接调制特性的方法	47
3.2.5	半导体激光器的大振幅调制特性	48
3.3	半导体激光器的线性放大系数 α 和谐振频率 的啁啾作用	50
3.3.1	参数 α 的定义和由来	50
3.3.2	高速调制的半导体激光器谐振频率的啁啾作用	54
3.3.3	参数 α 的测定和数值	57
3.3.4	改善啁啾作用或降低参数 α 的措施	58
3.4	超高速量子阱半导体激光器	59
3.4.1	量子阱内的电子、空穴能级和能态密度函数	59
3.4.2	量子阱半导体激光器的调制带宽和参数 α	62
第 4 章	锁模半导体激光器	67
4.1	激光锁模	67
4.2	半导体激光器的锁模理论	73
4.2.1	锁模的基本方程	73

4.2.2	损耗调制的主动锁模	75
4.2.3	慢速可饱和吸收体的被动锁模	78
4.3	锁模半导体激光器的实验	80
4.3.1	外镜结构的锁模半导体激光器	80
4.3.2	单片结构锁模半导体激光器	81
4.3.3	分谐波注入锁模半导体激光器	84
第 5 章	增益开关半导体激光器	87
5.1	半导体激光器的增益开关工作	87
5.2	增益开关半导体激光器的实验和数值模拟	90
5.3	增益开关半导体激光器和脉冲压缩元件组合产生超短光脉冲	93
第 6 章	超高速光调制器	101
6.1	电光光调制器基础	102
6.1.1	电光效应	102
6.1.2	电光效应的光调制基本原理	104
6.1.3	波导型电光调制器	107
6.1.4	波导型电光调制器的调制波段	110
6.2	行波型电光相位调制器	113
6.3	波导干涉型光强调制器	115
6.4	电场吸收型电光调制器	121
6.4.1	量子束缚斯塔克效应(QCSE)	122
6.4.2	QCSE 的电场吸收型电光调制器	124

第 7 章 超高速光开关	131
7.1 光开关和光开关光路的展望	131
7.2 定向耦合器和定向耦合器型波导光开关	134
7.2.1 定向耦合器及其原理	134
7.2.2 定向耦合器型波导光开关的原理	137
7.2.3 定向耦合器型波导光开关及其应用	140
7.3 对称马赫-曾德尔型全光开关	143
7.4 TOAD	145
7.5 以光开关为应用目的的超高速非线性光学现象的研究现状	148
7.5.1 三次非线性光学材料的性能指数与转换速度	148
7.5.2 自旋极化激发的载流子的超高速张弛及其在光-光转换中的应用	150
7.5.3 利用量子阱次能级间跃迁的张弛过程高速化和增大非线性效应的可能性	151
第 8 章 超高速光探测器	155
8.1 超高速光电二极管	155
8.2 超高速雪崩光电二极管	158
8.3 飞秒级快扫描摄影机	162
第 9 章 量子线、量子点和光子晶体	165
9.1 量子线和量子点	165
9.2 光子晶体	169

附 录 克拉默斯-克勒尼希关系	175
索 引	177



第1章

概述

1.1 什么是“超高速”

本书中的“超高速”是指在某一时间内尽可能传输大量的信息，或者在尽可能短的时间内传输某一容量的信息。所谓“尽可能”就是指“遥遥领先于现在广泛实用的技术的最高水平”。这就是称为“超”高速的理由。

为了将信息从一地点传输到另一地点，需要进行一连串的操作。也就是说，在光或电波之类的信息传送体（称为载体或调制波）上，搭载信息（称为用信息调制载体）并送出去（发送）之后，通过光缆、电缆和自由空间等传输线路到达目的地，在那里取出信息（称为进行接收和解调）。所谓“超高速”，无非是指这一连串的操作成为“遥遥领先于现在广泛实用的技术的最高水平”。

众所周知，根据相对论理论，“信息的传输速率不可能超过真空中的光速”。真空中的光速为 $300\,000\text{km/s}$ 。电介质中的光速为其折射率的倒数。即使这样，仍然是一个“高速度”。但是，该速度是作为载体的光的传播速度。我们不能认为这是保持原样的信息传输速率。对数字光纤通信而言，一个光脉冲对应于一个信息比特（bit，二进制数位）。若在一秒内只能传送一个光脉冲，尽管光脉冲本身确实以光速传播，但是搭载的信息的传输速率变为仅有 1bit/s ，是非常低的速度。只有当信息的传输速率达到了几十吉比特每秒（ Gbit/s ，即 10^9bit/s ）至 1 太比特每秒（ Tbit/s ，即 10^{12}bit/s ），才可以称其为“超高速”。

“超高速”一词不仅在通信技术而且在计算机技术中也经常用到。但是对计算机技术领域（硬件）而言，遗憾的是单晶硅器件占主导地位。光器件发挥作用的地方目前仅限于打印机和光盘之类的外围仪器或光互连，而

且工作速度也没有在通信领域里所要求的那样快。随着技术的发展,这样的状况可能会有很大的变化。然而,本书为了叙述更加紧凑,主要介绍在通信系统中已经用的,或者可能用的光器件。

1.2 “超高速”的历史变迁

即使称为“超高速”,也只是在相对意义上说的。也就是说,是按现在的实用技术水平看,可以称之为“超”高速。随着技术的进步,“超高速”的数值水平年年提高。在1.1节里,将几十吉比特每秒至1太比特每秒称为“超高速”,说到底也是以编写本书时的技术水平为前提的说法。随着技术的进步,过几年后这种程度的数值会成为实用水平,而且谁也不敢断言,将几百太比特每秒称为“超高速”的时代不会到来。换句话说,“超高速”无非是各个时代技术开发的目标值。因此在文章中称之为“超高速”的数值,过几年后肯定也会被视为陈腐落后,几乎没有什么意义。

为清楚起见,将“超高速”的历史变迁用信息的传输速率和同时代光脉冲宽度的变化来表示。图1.1为通信系统的传输速率的提高和光脉冲宽

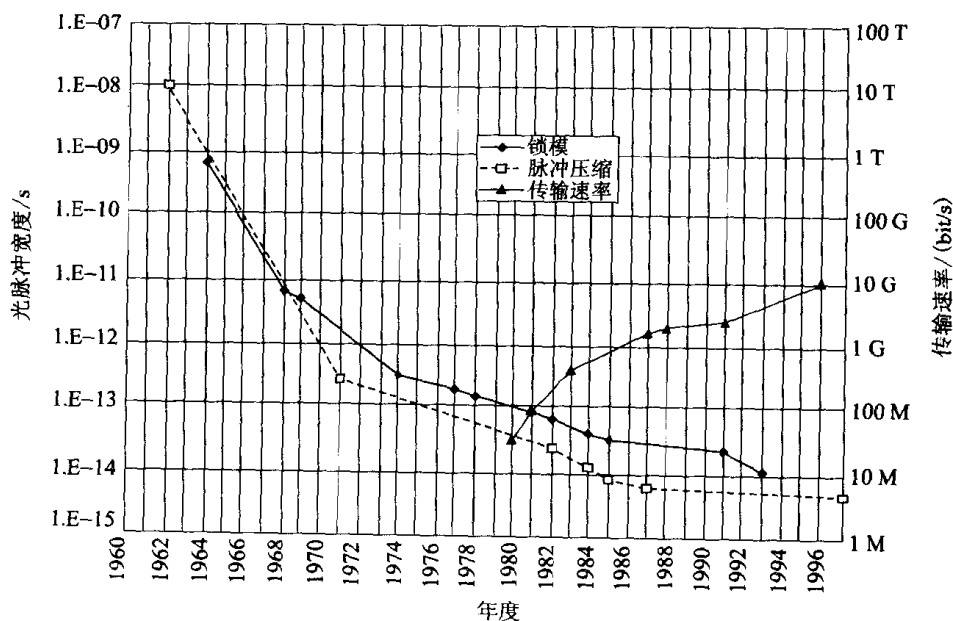


图 1.1 光通信系统传输速率的提高和光脉冲宽度缩小的历史

度的缩小的变迁按年代画出的曲线。另外,在图 1.2 中,以频率 $f(\text{Hz})$ 、周期 $T(=1/f)(\text{s})$ 和波长 $\lambda(\text{m})$ 分别为纵轴,表示了电磁波谱。

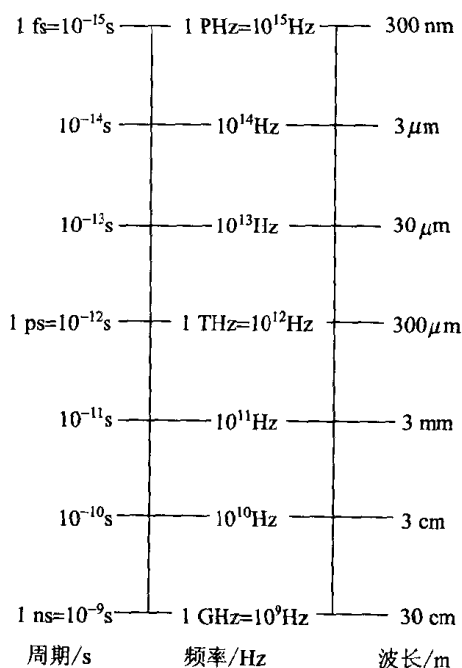


图 1.2 电磁波谱

1.3 超高速光脉冲的特性

超高速光脉冲一词包含两层意思,一是指光脉冲的脉冲宽度非常窄(持续时间非常短),另一层意思是指脉冲列重复速度非常快。若按严格的说法则应该区别开,前者为超短光脉冲,后者为超高速重复光脉冲列。

以 $-\infty < t < \infty$ 定义的函数 $f(x)$ 可由无限个正弦函数的叠加表示。若用数学表示,则成为

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (1.1)$$

$F(\omega)$ 表示一个个角频率 ω 的正弦函数 $\exp(j\omega t)$ 是以相应的多大振幅叠加

的。当已知 $f(t)$ 时, $F(\omega)$ 可由(1.1)式的逆操作求出

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (1.2)$$

在数学里, (1.1)式和(1.2)式为傅里叶逆变换和傅里叶变换的关系。

我们考虑以原点 $t=0$ 为中心的光脉冲 $h(t) = g(t) \exp(j\omega_0 t)$ 。由(1.2)式知, $h(t)$ 的傅里叶变换 $H(\omega)$ 为

$$\begin{aligned} H(\omega) &= \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp(-j\omega t) dt \\ &= \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp[-j(\omega - \omega_0)t] dt \end{aligned}$$

若将 $\omega - \omega_0$ 再改写为 ω , 则上式成为

$$H(\omega + \omega_0) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)}} \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp[-j\omega t] dt \equiv G(\omega)$$

从结果上看, 若去掉中心位置, 则 $h(t)$ 的傅里叶变换和它的振幅函数 $g(t)$ 的傅里叶变换相同。作为 $g(t)$ 与高斯型脉冲和双曲线函数型脉冲(常作为半导体激光锁模脉冲的近似形式使用)的两个例子, 以 $G(\omega)$ 的形式给出如下:

1. 高斯型脉冲

$$\begin{aligned} g(t) &= \exp(-t^2/\tau^2) \\ G(\omega) &= (\tau/\sqrt{2}) \exp[-\omega^2/(2/\tau^2)] \end{aligned}$$

2. 双曲线函数型脉冲

$$\begin{aligned} g(t) &= \text{sech}(t/\tau) \\ G(\omega) &= \tau \sqrt{(\pi/2)} \text{sech}[\pi\omega/(2/\tau)] \end{aligned}$$

式中, ω 为角频率。在实际测量中所用的频率 ν 和 ω 的关系为 $\omega = 2\pi\nu$ 。用 ν 表示 $G(\omega)$ 而改成的 $G(\nu)$ 称为 $g(t)$ 的光谱。我们通常使用的是光强, 而不是光的振幅。那时, $g(t)$ 为光脉冲强度。该光谱称为能量光谱。

一般, 脉冲宽度和光谱宽度成反比。在高斯型脉冲的情况下, 若设其强度的半宽度(FWHM: 强度峰值到一半时的脉冲宽度)为 Δt , 则 $\Delta t =$