

〔民主德国〕 J. 赫尔曼 著  
B. 威廉

超短光脉冲激光器

原理及应用

科学出版社

# 超短光脉冲激光器

原理及应用

[民主德国] J. 赫尔曼 B. 威廉 著

陈秀娥 译

沃新能 校

科学出版社

1991

## 内 容 简 介

本书系统地论述超短光脉冲领域的理论和实验成果，还介绍了一些新颖、独特的实验和理论方法，以及有关的典型应用和发展趋势。

全书共九章。前三章叙述了弛豫过程下光脉冲与原子系统相互作用、皮秒激光器和瞬态过程的理论基础，以及有关的测量方法。第四至七章是本书的精华，描述了模同步的各种方法，既介绍了工作原理，又计算了超短光脉冲激光器运转的各种参数。最后两章则分别论述超短光脉冲频率转换的几种可能性和超短光谱学的典型测量方法及其应用。

本书对物理学家、化学家和生物学家以及相应专业的工程师、教师和学生都是一本很好的专业性读物。

Joachim Herrmann Bernd Wilhelmi  
**LASER FÜR ULTRAKURZE LICHTIMPULSE**  
Grundlagen und Anwendungen  
Akademie-Verlag, 1984

### 超短光脉冲激光器

#### 原理及应用

【民主德国】J. 赫尔曼 B. 威廉 著

陈秀娥 译

沃新能 校

责任编辑 杨家福

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码：100707

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

\*

1991年4月第一版 开本：787×1092 1/32

1991年4月第一次印刷 印张：12 3/4

印数：0 0 0 1-900 字数：284,000

ISBN 7-03-002087-1/TB·66

定价：13.10元

## 中译本前言

自本书德文版1984年出版以来，超短光脉冲激光器以及它在测量技术和光谱学方面的应用得到迅猛的发展。这迫使我们在该书被译成中文出版时对有关内容作一些必要的修改和补充，增加该领域中目前的一些实际发展资料，以臻完善。著者特别在相应的章节中增加了光脉冲产生时出现的线性调频现象，以及根据这种现象采用线性调频补偿法来进一步压缩光脉冲等内容。此外，还补充了超短光脉冲用于光电和电光线路、非线性光学和光谱学瞬态过程的研究，以及分布反馈激光器中较短脉冲的产生等章节。

最后我们衷心感谢沃新能教授和陈秀娥女士将该书翻译成中文。衷心感谢王大珩教授为促成该书中译本的问世所作的努力。

B. 威廉

1986年2月25日

## 前 言

近 15 年来，瞬时测量技术由于皮秒高功率脉冲激光光源以及量子电子学和非线性光学测量设备的出现而得以迅猛发展（见图 1）。由于这一技术的发展，我们可以成功地直接理解以往一直被视为“不可觉察地短的”、 $10^{-9}$ — $10^{-14}$ s 时间范围内的各种物理学、化学及生物学的变化过程。借此，人们可以直接地详细观察其基本过程，并检验和进一步发展我们提出的关于这些过程的步骤及化合过程的理论概念，并在此认识的基础上对光物理学和光化学过程的结果施加影响。此外，利用超短光脉冲激光器可成功地研制响应时间极快的元件，如开关、调制器和接收器。

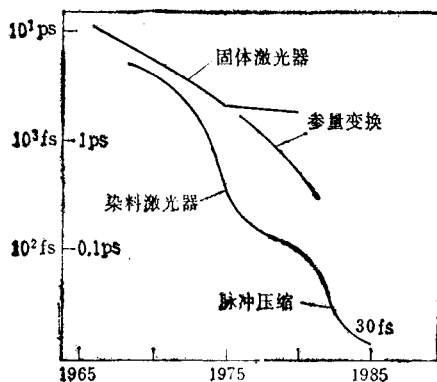


图 1 本世纪中直接测到的最短时程及其实验所产生的最短光脉冲示意图，其中近 15 年来超短光脉冲的发展尤为突出（参见 Shapiro<sup>(16)</sup> 和 Shank<sup>(17)</sup>）

随着皮秒激光器的飞速发展，以及它在许多新领域中的应用，该领域的论文也与日俱增，其数量很难估计。但由于专著少，而且几乎没有教科书式的著作（国际上的情况也是如此），所以对学者进行指导和教学是很困难的。

我们以耶拿的 Friedrich-Schiller 大学的教学与研究工作为基础编写了这本书，试图以此来弥补教材的缺乏和专著的不足。它不是一本完美无缺的专著，而是介绍该领域的基础、特有的实验和理论方法以及典型的应用及发展趋势的入门书。本书主要是面向科学家的，尤其是物理学家、化学家和生物学家、工程师及相应专业的大学生。我们的宗旨是使读者在读完本书后，即能毫无困难地熟悉各种原始文献，并从中得到启发，从而独立地进行思考和工作。为此，我们为读者列出了各章节的参考文献。

本书以普通的实验物理知识，尤其是光学和原子物理知识为前提。只有在 1.3.2 节和论述各种型号激光器产生超短光脉冲的章节里（如 4.2、5.2、6.2 和 7.2 节中）才需要较深的理论知识。对理论问题不太感兴趣的读者在初次通读时，可以放过这些章节。

本书以内容十分简练的前三章作为导论。第一章叙述了弛豫过程情况下的光脉冲与原子系统相互作用的原理。第二章论述了一些激光物理学方面的理论基础以及产生超短光脉冲的原理。第三章讨论了超短光脉冲参数的测量方法，以及不同应用中所采用的具有代表性的测量设备。其中尤为重要的是讨论物理和技术的分辨率极限。

这三章对于已经掌握光与原子系统相互作用、连续波激光物理学以及瞬时测量技术知识的读者来说，大略翻阅一遍即可。

第四至七章是本书的主要部分，描述了模同步或锁模的

各种方法。每章首先简明扼要地介绍工作原理，接着系统地计算超短光脉冲辐射时激光器运行的各种参数，特别注重最佳运行条件的确定和可测参数的计算。每章的结尾都列举了与理论值相比较的典型的实验结果。

第八章论述了用非线性光学方法和脉冲压缩法进行超短光脉冲频率转换的几种可能性。最后，第九章对瞬时光谱学的典型测量方法及其应用作了概述。

书中所列出的“符号”及其注释，为阅读本书，尤其对查阅参考文献提供了方便。

我们衷心感谢 J. Hertz 教授、G. Weber 教授、D. Schubert 博士、F. Weidner 博士和 U. Stamm 先生的有益讨论和提示。同时也感谢科学院出版社，尤其是本书的编辑(物理学学士)U. Heilmann 女士以及排版厂、印刷厂的默契合作。

J. 赫尔曼

B. 威廉

# 符 号

## 常见符号

$\underline{X}(\omega)$   $X(t)$  的傅里叶变换

$$\underline{X}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} dt X(t) e^{-i\omega t}$$

$$X(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \underline{X}(\omega) e^{i\omega t}$$

KK 一个给定量的共轭分量, 如  $X + KK = X + X^*$

$\langle X \rangle$  一个量的总平均值

$$\bar{X} = \frac{1}{u} \int_{-u/2}^{u/2} X(t) dt \quad \text{时间间隔 } u \text{ 内一个量的时间平均值}$$

$\approx$  近似于

$\simeq$  相当于

$\lesssim$  小于或近似于

$\gtrsim$  大于或近似于

$\ll$  小于小于

$\gg$  大于大于

## 电场强度和极化强度

$\vec{E}(\vec{r}, t)$  电场强度

$\vec{e}$  场强方向上的单位矢量

$\hat{E}(\vec{r}, t)$  电场强度的振幅

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \hat{E}(\vec{r}, t) \vec{e} e^{i\omega t} + KK$$



$A(\vec{r}, t)$  电场强度的波幅

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} A(\vec{r}, t) \vec{e} e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$$

+KK

$\vec{P}(\vec{r}, t)$  极化强度

$\vec{e}'$  极化方向上的单位矢量

$\bar{P}(\vec{r}, t)$  极化强度的波幅

$$\bar{P}(\vec{r}, t) = \frac{1}{2} \bar{P}(\vec{r}, t) \vec{e}' e^{i(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r})}$$

+KK

### 不常见符号

$A_{ij}$   $i \rightarrow j$  跃迁自发发射的爱因斯坦系数

$B_{ij}$  吸收 ( $i < j$ ) 或感应发射 ( $i > j$ ) 的爱因斯坦系数

$c$  真空中的光速

$\mathcal{E}$  能量

$\mathcal{E}_s$  单位面积的饱和光子数(单位面积的饱和能量/光子能量  $\hbar\omega$ )

$e$  电子的单位电荷 ( $e > 0$ )

$g$  线型函数

$G$  增益 ( $I_{\text{输出}} = I_{\text{输入}} G$ )

$g_v$  增益系数

$$g = g_v \cdot L$$

$$= \ln G \quad (L \text{——增益长度})$$

$h, \hbar$  普朗克常数,  $\hbar = h / 2\pi$

$i$  虚数单位

$I$  光子数通量密度

	( $\triangle$ 能流密度/光子能量 $\hbar\omega$ )
$I_s$	饱和光子通量密度 (饱和强度/光子能量 $\hbar\omega$ )
$\vec{k}$	波数矢量
$K = 2\pi/\lambda$	波数
$\kappa$	速率常数
$\kappa_A$	吸收系数
$\kappa_B$	玻耳兹曼常数
$N$	粒子数密度
$N_i$	$i$ 能级的粒子数密度
$\mathcal{N}$	粒子数
$n$	折射率
$\vec{r}$	位置坐标
$\vec{r} = (x, y, z)$	
$R$	反射率
$\mathcal{T}$	温度
$T_{ij}$	$i \rightarrow j$ 跃迁中能量的弛豫时间(纵向弛豫时间)
$t$	时间
$U$	单位体积的辐射能量
$U_\omega(\omega_{21})$	跃迁频率为 $\omega_{21}$ 时, 单位体积、单位频率的辐射能量
$u$	谐振腔的工作周期
$v$	群速度
$W_{ij}$	( $i \rightarrow j$ ) 跃迁几率
$dW_{ij}/dt$	单位时间内 ( $i \rightarrow j$ ) 跃迁几率 (跃迁速率)
$W_p = \sigma_{ij} I_p$	泵浦参数

$\epsilon$	介电常数
$\epsilon_0$	真空介电常数
$\eta$	牵引时间, $\eta = t - z/v$
$\lambda$	波长
$\mu_0$	感应常数
$\vec{\mu}_{ij}$	偶极子跃迁矩阵元
$\mu_{ij} = \vec{\mu}_{ij} \cdot \vec{e}$	
$\nu = \omega / (2\pi)$	频率
$\rho$	密度算符
$\rho_{ij}$	密度矩阵
$\sigma_{ij}$	( $i \rightarrow j$ 跃迁) 相互作用截面(吸收或发射截面)
$\tau_L$	脉冲宽度
$\tau_{ij}$	$i \rightarrow j$ 跃迁的相位弛豫时间, 相位破坏时间 (横向弛豫时间)
$\chi$	磁化系数
$\omega$	角频率

# 目 录

中译本前言	i
前言	ii
符号	xi
<b>第一章 原子系统与光脉冲相互作用的理论基础</b>	<b>1</b>
1.1 基本辐射过程	1
1.1.1 自发发射	2
1.1.2 感应发射	4
1.1.3 吸收	4
1.1.4 热平衡中跃迁几率间的关系	5
1.1.5 速率方程	6
1.1.6 辐射与整个原子系统的相互作用以及非均匀谱线加宽	11
1.2 原子系统中的快速过程	16
1.2.1 原子系统中的内部跃迁、弛豫过程	18
1.2.2 受激态中的反应	23
1.2.3 相位弛豫过程	25
1.3 光脉冲与原子系统相互作用基础理论的描述	27
1.3.1 波动方程	28
1.3.2 原子系统的量子理论的描述	32
1.3.3 二能级系统的处理	35
<b>第二章 皮秒激光器基础理论的描述</b>	<b>39</b>
2.1 激光器原理	39
2.2 光泵浦产生粒子数反转	41
2.3 光学谐振腔	46

2.3.1	开放式腔与封闭式腔的模拟 .....	10
2.3.2	平面法布里-珀罗谐振腔 .....	50
2.3.3	开放式腔的衍射理论 .....	53
2.3.4	高斯束谐振腔内场和外场分布概述 .....	58
2.3.5	三反射镜谐振腔 .....	65
2.4	典型激光器激活介质的特性 .....	68
2.4.1	Nd-YAG激光器 .....	68
2.4.2	氩离子和氮离子气体激光器 .....	70
2.4.3	染料激光器 .....	73
2.4.4	半导体激光器 .....	76
2.5	Q开关 .....	82
2.6	产生超短脉冲的原理: 锁模 .....	84
2.7	锁模的方法 .....	88
2.7.1	主动锁模 .....	88
2.7.2	同步泵浦激光器 .....	88
2.7.3	被动锁模 .....	89
2.8	分布反馈激光器 .....	90
<b>第三章</b>	<b>测量方法</b> .....	<b>94</b>
3.1	瞬时过程测量的基本原理 .....	94
3.1.1	纹影或条纹照相法 .....	94
3.1.2	频闪术、取样法 .....	95
3.1.3	时间间距还原成空间位移 .....	97
3.1.4	信号转换 .....	97
3.1.5	相关法 .....	98
3.2	时间分辨率极限 .....	101
3.2.1	旋转镜 .....	103
3.2.2	光电探测器 .....	103
3.2.3	电光条纹相机 .....	105
3.2.4	聚焦系统 .....	107
3.2.5	色散系统 .....	108

3.3	超短光脉冲的非线性光学测量方法 .....	109
3.3.1	用二次谐波的产生测量强度相关函数 .....	110
3.3.2	用双光子荧光法测量强度-相关函数 .....	112
3.3.3	强度-交叉相关函数的测量 .....	116
3.3.4	以光克尔效应为基础的激光控制光闸 .....	117
3.4	激光控制的光电开关 .....	120
<b>第四章</b>	<b>主动锁模 .....</b>	<b>128</b>
4.1	工作机理 .....	128
4.1.1	振幅调制 .....	128
4.1.2	相位调制 .....	129
4.1.3	激光跃迁的均匀与非均匀加宽 .....	130
4.2	理论 .....	131
4.3	实验装置及结果 .....	139
4.3.1	调制器 .....	139
4.3.2	惰性气体离子激光器的锁模 .....	141
4.3.3	Nd-YAG激光器主动锁模的实验研究 .....	142
<b>第五章</b>	<b>同步泵浦激光器 .....</b>	<b>145</b>
5.1	工作机理 .....	145
5.2	理论 .....	148
5.2.1	基本方程 .....	148
5.2.2	稳态解的讨论 .....	156
5.2.3	从噪声和伴脉冲产生中形成超短脉冲 .....	163
5.2.4	相位调制脉冲的形成 .....	167
5.3	实验装置及其结果 .....	169
5.3.1	同步泵浦激光器的工作原理 .....	169
5.3.2	同步泵浦激光器脉冲参量的实验研究 .....	177
5.3.3	腔倒空 .....	180
5.3.4	增益 .....	181
<b>第六章</b>	<b>染料激光器的被动锁模 .....</b>	<b>183</b>
6.1	工作机理 .....	183

6.2	理论	186
6.2.1	基本方程	186
6.2.2	稳态解的讨论	192
6.2.3	被动锁模时对撞脉冲的相干叠加效应	199
6.3	实验装置及结果	214
6.3.1	闪光灯泵浦染料激光器的工作原理	214
6.3.2	连续泵浦染料激光器的工作原理	215
6.3.3	实验研究结果	216
6.3.4	对撞脉冲	221
6.3.5	双重锁模	225
<b>第七章</b>	<b>固体激光器的被动锁模</b>	<b>227</b>
7.1	工作机理	227
7.2	理论	229
7.2.1	基本方程	229
7.2.2	产生脉冲的线性区(区域 I)	234
7.2.3	产生脉冲的非线性区(区域 II)	240
7.2.4	增益的衰减(区域 III)	255
7.3	实验装置及结果	258
7.3.1	被动锁模固体激光器的装置及其特性	258
7.3.2	被动锁模固体激光器的皮秒脉冲特性	260
7.3.3	单脉冲的选择及再放大	262
7.3.4	对超短脉冲演变过程的实验研究	264
7.3.5	吸收体和放大器有效工作截面的作用	267
7.3.6	吸收体的弛豫时间对超短脉冲形成的影响	268
7.4	半导体激光器	271
<b>第八章</b>	<b>非稳定的非线性光学过程</b>	<b>274</b>
8.1	二次谐波的产生	278
8.2	变频的其他非线性光学过程的应用	287
8.2.1	混频	287
8.2.2	光学参量产生	290

8.2.3	参量的四光子相互作用·····	292
8.2.4	光学检波和切伦科夫辐射的产生·····	294
8.2.5	受激喇曼散射·····	296
8.3	引起脉冲形状及脉宽变化的非线性光学 过程·····	303
8.3.1	非线性光学相互作用时脉冲的形成·····	304
8.3.2	线性光学介质中调相脉冲的压缩·····	306
8.3.3	无色散非线性光学介质中脉冲的传播·····	311
8.3.4	色散非线性光学介质·····	313
8.4	谐振非稳态过程·····	318
8.4.1	光学章动和无光学感应衰减·····	318
8.4.2	光子回波·····	322
8.4.3	自感应透射·····	326
<b>第九章</b>	<b>瞬时光谱学</b> ·····	<b>330</b>
9.1	荧光测量·····	331
9.1.1	纳秒法·····	331
9.1.2	皮秒法·····	334
9.1.3	应用·····	337
9.2	测试脉冲光谱学·····	342
9.2.1	测试脉冲分光计·····	342
9.2.2	应用·····	351
	参考文献·····	356
	汉德名词对照索引·····	376



# 第一章 原子系统与光脉冲 相互作用的理论基础

原子系统（如原子或分子）对光子的吸收和发射是超短光脉冲的形成及应用的理论基础。这个程序的时间过程不仅可以用直接作用的粒子特性，而且还可以通过粒子间或粒子与其他原子系统的相互作用来确定。这一相互作用往往概括成“热浴”来加以描述。

在介绍光与原子相互作用这个问题之前，我们先来论述一下原子系统的基本辐射过程，然后再叙述气体、液体、固体中的瞬时过程（特别是弛豫过程），随后给出描述弛豫过程作用下光脉冲和原子系统之间相互作用的基本方程。

## 1.1 基本辐射过程

早在 1917 年爱因斯坦就认识到，从较简单的统计学和量子物理学的概念中可以得到关于辐射和原子系统相互作用的基本过程的基本结论。根据量子理论，原子具有分立的能级。由于各个过程中能量守恒，原子系统只吸收或发射那些能量为  $\hbar\omega$ （接近于系统能级能量差）的光子，也就是说，这些光子的角频率接近谐振频率，

$$\omega_{21} = \frac{1}{\hbar}(\mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1) \quad (1.1)$$

首先我们只对具有能级 1 和 2 的二能级系统进行讨论。利用各种不同的基本过程，原子系统有可能通过吸收能量，从能级 1 跃迁到能级 2，或相反通过释放能量，从能级 2 跃迁到能级 1（见图 1.1）。