



国防特色教材·电子科学与技术

# 光电子学原理与技术

GUANGDIANZIXUE YUANLI YU JISHU

张中华 林殿阳 编著  
于欣 王雨三

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社  
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社



TN201  
Z252

· 电子科学与技术

-13

# 光电子学原理与技术

张中华 林殿阳 编著  
于欣 王雨三

TN201

Z252

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 哈尔滨工业大学出版社  
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

## 内 容 简 介

讲述光的放大与振荡的基本原理(即激光的基本原理)以及某些应用技术。具体内容为:光的放大与振荡、光学谐振腔、典型激光器、激光的基本技术、激光的半经典理论与量子理论、非线性光学效应、光纤技术、光存储技术、光电子技术的其他应用以及光信号的探测等。

本书可作为高等理工科院校电子类专业“光电子学原理”或“激光原理”课程的教材,也可作为其他相关专业及科技人员的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

光电子学原理与技术/张中华等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2009.10

ISBN 978-7-81124-893-7

I. 光… II. 张… III. 光电子学 IV. TN201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 148454 号

## 光电子学原理与技术

张中华 林殿阳 编著  
于欣 王雨三  
责任编辑 王实

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100191) 发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail:bhpress@263.net

北京市媛明印刷厂印装 各地书店经销

\*

开本:787×960 1/16 印张:29 字数:650 千字

2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-81124-893-7 定价:49.00 元

# 前 言

光电子学是近代光学和电子学相互结合与渗透形成的一门新学科,它是电子学技术在光频波段的延续和扩展。光电子学研究的是光频电磁场与物质的相互作用规律。对光频实现振荡和放大,就形成了光的受激辐射——激光。1960年第一台激光器的问世,标志着人类进入了现代光学时期,现在激光技术研究已成为光电子领域的一个重要组成部分。

对于理工科电子类大学生来说,不仅要掌握电子学知识,还应该掌握光频波段电子学,即光电子学的知识。由于光电子技术具有频谱宽、信息容量大、传输速度快和抗干扰能力强等特点,目前已应用到国民经济的各个领域,有些应用是电子技术所不能替代的。

本书共11章。第1~5章,采用处理光和物质相互作用的经典理论与速率方程理论的方法,讲述激光产生的基本原理、激光束的特征、典型激光器件以及为改善激光器的特性所采取的一些基本技术。这一部分内容是本书最基本的内容。

第6章介绍激光的半经典理论和量子理论的基本内容。处理光和物质相互作用的理论还有半经典理论和量子理论,这两种理论是更高层次的理论,能够更多和更完满地解释激光器中的现象,只是数学处理复杂一些。

第7章介绍若干典型的非线性光学效应。普通光来自原子的自发辐射,是一种弱光,其光子简并度(同一状态中的平均光子数)远小于1,当普通光与物质相互作用时,我们只能观察到线性光学效应。激光束来自原子的受激辐射,是一种强光,其光子简并度远远大于1,它所产生的单色光频电磁场强可达到与原子内部场强相等或更高的水平。这样的强光与物质相互作用时,可观察到一系列非线性光学效应。非线性光学是讲述非线性光学效应的一门新兴的学科分支。非线性光学效应不仅提供了更多的科学信息,也提供了重要的实际应用技术。

第8~10章,讲述光电子技术的若干应用,包括光纤技术、光存储技术以及其他应用。

最后一章即第11章介绍光信号探测的相关知识。

本书注重基本物理概念的讲解,简化复杂的数学推导过程。每章末均附有习

题与思考题供学生选用,书末给出了部分习题的参考答案供学生参考。本书可作为高等理工院校电子类专业“光电子学原理”或“激光原理”课程的教材,也可作为其他相关专业及科技人员的参考书。

本书第1~3章由王雨三编写,第4、5章由于欣编写,第6、8和9章由张中华编写,第7、10和11章由林殿阳编写。全书由张中华统稿。黑龙江大学叶红安教授和哈尔滨工业大学高惠德教授担任主审。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏或不当之处,恳请指正。

编者

2008年12月

# 目 录

第 1 章 基础知识	1
1.1 光的波粒二象性	1
1.2 光波的模式	5
1.3 原子能级与发光	7
1.3.1 量子化的原子能级	7
1.3.2 原子数目按能级的分布	9
1.4 原子的自发辐射、受激吸收与受激辐射	10
1.4.1 原子的自发辐射	10
1.4.2 原子的受激吸收	11
1.4.3 原子的受激辐射	12
1.4.4 $A_{21}$ 、 $B_{21}$ 和 $B_{12}$ 三系数的关系	13
1.5 光谱线的增宽	14
1.5.1 原子跃迁谱线增宽的机理与线型	15
1.5.2 谱线增宽的类型	18
习题与思考题	21
第 2 章 光放大与振荡——激光器原理	23
2.1 粒子数反转与光放大	23
2.2 光学谐振腔	25
2.3 激光器基本结构与激光形成过程	30
2.3.1 激光器的基本结构	30
2.3.2 激光的形成过程	31
2.3.3 三能级系统与四能级系统	33
2.4 激光的特性	34
2.4.1 定向性	34
2.4.2 单色性	35
2.4.3 亮度特性	36
2.4.4 时间相干性	36

2.4.5	空间相干性	39
2.4.6	光子简并度	42
2.5	激光器速率方程	43
2.5.1	三能级系统的速率方程(单模)	44
2.5.2	四能级系统的速率方程(单模)	45
2.6	介质的增益系数	47
2.6.1	小信号增益系数	48
2.6.2	大信号增益系数	49
2.7	激光振荡阈值条件	51
2.8	连续运转激光器的输出功率	54
2.8.1	均匀增宽激光器的输出功率	55
2.8.2	非均匀增宽激光器的输出功率	56
2.8.3	兰姆凹陷	57
2.9	脉冲激光器的输出特性	58
2.9.1	短脉冲激励下的输出能量	58
2.9.2	长脉冲激励下的输出功率	59
2.10	自由振荡激光器的模式	60
2.10.1	均匀增宽激光器的模竞争和单模振荡	60
2.10.2	空间烧孔和多模振荡	61
2.10.3	非均匀增宽激光器的多模振荡	62
2.11	激光器的频率牵引	62
2.11.1	色散	63
2.11.2	频率牵引	64
2.12	激光的线宽极限	65
	习题与思考题	68
<b>第3章</b>	<b>光学谐振腔</b>	<b>69</b>
3.1	光学谐振腔的构成和分类	69
3.1.1	开腔	69
3.1.2	闭腔	71
3.1.3	气体波导腔	71
3.2	光学谐振腔的损耗	72
3.2.1	损耗的类型	72
3.2.2	损耗的描述	73

---

3.2.3	损耗计算举例	75
3.3	谐振腔中模式的分析方法	78
3.3.1	直接求解麦克斯韦方程	79
3.3.2	求解衍射场的自洽积分方程	80
3.3.3	开放式波导理论的方法	81
3.3.4	几何光学分析法	81
3.4	平行平面腔中的模	81
3.4.1	场的自洽积分方程的数值解	81
3.4.2	波导理论给出的结果	82
3.5	稳定共轴球面腔中的模	84
3.5.1	高斯光束	85
3.5.2	稳定球面腔中的高斯光束	90
3.6	平方媒质中的高斯光束	94
3.7	非稳腔的模	96
3.7.1	非稳腔的特点	96
3.7.2	非稳腔的波形特征	96
3.7.3	非稳腔的放大倍率及损耗	99
3.8	波导激光谐振腔的模	101
3.8.1	波导腔的构成和特点	101
3.8.2	空心波导管中的模	101
3.8.3	波导腔的损耗	103
3.9	高斯光束的传输与透镜变换	106
3.9.1	高斯光束在空间的传输规律	106
3.9.2	高斯光束通过薄透镜的变换	108
3.10	光线传播矩阵与 ABCD 定律	110
3.10.1	光线传播矩阵	110
3.10.2	ABCD 定律	115
3.10.3	高斯光束的 ABCD 定律	116
3.10.4	光线矩阵性质	118
3.11	高斯光束的自再现变换与稳定球面腔	118
3.12	高斯光束的聚焦与准直	119
3.12.1	高斯光束的聚焦	119
3.12.2	高斯光束的准直	121
3.13	高斯模的匹配	123



习题与思考题	125
<b>第4章 典型激光器</b>	<b>128</b>
4.1 固体激光器	128
4.1.1 红宝石激光器	129
4.1.2 钕激光器	129
4.1.3 其他固体激光器	131
4.2 气体激光器	133
4.2.1 He-Ne 激光器	134
4.2.2 氩离子激光器	134
4.2.3 CO <sub>2</sub> 激光器	136
4.2.4 准分子激光器	143
4.3 染料激光器	145
4.4 半导体激光器	147
4.4.1 有关半导体的基本概念	148
4.4.2 半导体激光器的工作原理	153
4.4.3 典型半导体激光器	156
4.4.4 半导体激光器的主要特性	160
4.5 光纤激光器	165
4.5.1 稀土掺杂光纤激光器	167
4.5.2 非线性效应光纤激光器	169
4.6 其他激光器	170
4.6.1 自由电子激光器	170
4.6.2 X 射线激光器	172
习题与思考题	172
<b>第5章 激光基本技术</b>	<b>175</b>
5.1 激光选模技术	175
5.1.1 横模选择技术	175
5.1.2 纵模选择技术	178
5.2 激光稳频技术	183
5.2.1 激光器频率的稳定度和再现度	184
5.2.2 影响频率稳定的因素	184
5.2.3 稳频方法	185

---

5.3 激光 Q 开关技术 .....	188
5.3.1 普通脉冲固体激光器的输出特性 .....	188
5.3.2 调 Q 技术的基本原理 .....	190
5.3.3 调 Q 方法 .....	191
5.3.4 调 Q 激光器的基本理论 .....	196
5.4 激光锁模技术 .....	199
5.4.1 自由运转多纵模激光器的输出特性 .....	199
5.4.2 锁模的基本原理 .....	200
5.4.3 锁模激光器的输出特性 .....	201
5.4.4 锁模方法 .....	204
5.5 激光放大技术 .....	209
5.5.1 激光放大器的基本原理 .....	209
5.5.2 激光放大器的基本理论 .....	210
5.6 激光调制技术 .....	217
5.6.1 光调制的基本概念 .....	217
5.6.2 调制方法 .....	221
5.7 激光偏转技术 .....	224
5.7.1 电光偏转 .....	224
5.7.2 声光偏转 .....	225
习题与思考题 .....	226
<b>第 6 章 激光半经典理论与量子理论 .....</b>	<b>229</b>
6.1 激光电磁场方程 .....	229
6.2 密度矩阵 .....	233
6.2.1 量子统计系综和力学量的平均值 .....	233
6.2.2 密度矩阵定义 .....	234
6.2.3 密度矩阵的性质及物理意义 .....	234
6.2.4 密度矩阵的运动方程 .....	236
6.3 二能级原子系综的密度矩阵 .....	237
6.3.1 静止原子情形 .....	238
6.3.2 运动原子情形 .....	239
6.4 宏观电极化强度与密度矩阵的关系 .....	240
6.5 静止原子激光器的单模运转 .....	240
6.6 二模振荡与模式竞争 .....	242

6.7	运动原子激光器的单模运转 .....	248
6.8	经典辐射场的量子化 .....	251
6.8.1	开式平面光腔中的场与谐振子 .....	251
6.8.2	电磁场的能量量子化 .....	253
6.8.3	量子化场的本征态 .....	255
6.9	相位算符 .....	256
6.10	相干态 .....	258
6.10.1	相干态的定义与表示 .....	258
6.10.2	相干态的性质 .....	260
6.11	辐射场与原子的相互作用 .....	263
6.12	原子辐射和吸收的跃迁几率 .....	266
6.12.1	受激吸收几率 .....	267
6.12.2	受激辐射几率 .....	268
6.12.3	共振情况下吸收与辐射几率 .....	268
6.13	光子统计 .....	269
6.13.1	约化密度算符 .....	269
6.13.2	场的运动方程 .....	270
6.13.3	激光光子统计 .....	272
	习题与思考题 .....	276
<b>第7章</b>	<b>非线性光学效应 .....</b>	<b>278</b>
7.1	概述 .....	278
7.2	光在非线性介质中传播的基本方程 .....	280
7.2.1	非线性波动方程 .....	280
7.2.2	耦合波方程 .....	280
7.2.3	曼利-罗(Manley-Rowe)关系 .....	282
7.3	二阶非线性光学效应 .....	282
7.3.1	和频的产生 .....	282
7.3.2	差频的产生 .....	286
7.3.3	倍频的产生 .....	288
7.3.4	相位匹配技术 .....	290
7.3.5	光学参量放大与参量振荡 .....	293
7.4	三阶非线性光学效应 .....	297
7.4.1	自聚焦现象 .....	298

---

7.4.2 四波混频 .....	301
7.4.3 受激拉曼散射(SRS) .....	304
7.4.4 受激布里渊散射(SBS) .....	310
习题与思考题 .....	313
<b>第8章 光纤技术</b> .....	<b>314</b>
8.1 光纤结构与分类 .....	314
8.2 光纤传光原理 .....	316
8.2.1 几何光学分析方法 .....	316
8.2.2 平面波方法 .....	318
8.3 光纤的损耗和色散 .....	325
8.3.1 光纤的传输损耗 .....	325
8.3.2 光纤的色散 .....	328
8.3.3 光纤孤子 .....	331
8.4 光纤的连接与光耦合 .....	333
8.4.1 光纤的连接及损耗 .....	333
8.4.2 光纤的光耦合 .....	335
8.4.3 光纤分路器与合路器 .....	337
8.4.4 波分复用器 .....	339
8.5 光纤的应用 .....	340
8.5.1 光纤通信 .....	341
8.5.2 光纤传感器 .....	343
8.5.3 光纤图像传输 .....	352
8.5.4 光纤用于能量传输 .....	356
8.5.5 光纤激光器和放大器 .....	358
习题与思考题 .....	359
<b>第9章 光存储技术</b> .....	<b>361</b>
9.1 关于信息的基本概念 .....	361
9.2 光存储的一般特点 .....	363
9.3 光盘存储 .....	364
9.4 可擦重写光盘 .....	369
9.5 光全息存储 .....	376
9.5.1 全息图的记录与再现 .....	376

9.5.2	全息图的分类 .....	379
9.5.3	夫琅禾费全息图与非涅耳全息图 .....	380
9.5.4	全息存储及特点 .....	384
9.6	其他光存储技术简介 .....	387
9.6.1	近场光学存储技术 .....	387
9.6.2	双光子光学存储 .....	388
9.6.3	光谱烧孔存储技术 .....	390
	习题与思考题 .....	392
<b>第 10 章</b>	<b>光电子技术的其他应用 .....</b>	<b>394</b>
10.1	激光干涉计量 .....	394
10.1.1	激光测长 .....	394
10.1.2	激光测速 .....	399
10.2	激光测距与激光雷达 .....	401
10.2.1	激光测距 .....	401
10.2.2	激光雷达 .....	403
10.3	激光工业加工 .....	406
10.3.1	激光热加工的一般原理 .....	407
10.3.2	几种激光热加工方法 .....	407
10.3.3	激光光化学反应加工——激光光刻 .....	409
10.4	激光制导 .....	410
10.4.1	激光驾束制导的原理 .....	410
10.4.2	激光驾束制导的主要组成和功能 .....	411
10.5	激光通信 .....	412
10.5.1	大气传输通信 .....	413
10.5.2	卫星激光通信 .....	413
10.5.3	光纤通信 .....	415
10.5.4	水下通信 .....	416
10.6	激光引发核聚变 .....	417
10.7	激光武器 .....	418
	习题与思考题 .....	419
<b>第 11 章</b>	<b>光信号的探测 .....</b>	<b>420</b>
11.1	光探测器的物理基础 .....	420

---

11.1.1	光信号探测器的物理效应	420
11.1.2	光电转换定律	423
11.2	光探测器的特性参数和噪声	423
11.2.1	特性参数	423
11.2.2	噪 声	426
11.3	常用光探测器	428
11.3.1	真空光电二极管	428
11.3.2	光电倍增管	428
11.3.3	光电导探测器	430
11.3.4	光电二极管	431
11.3.5	热释电探测器	433
11.4	直接探测	434
11.5	光外差探测	436
11.5.1	光外差探测的基本原理	436
11.5.2	光外差探测的信噪比	438
	习题与思考题	438
附录 A	常用物理常量表	439
附录 B	国际单位制词头	440
	习题参考答案	441
	参考文献	446

# 第 1 章 基础知识

本章主要介绍与学习本课程有关的一些基础知识,如对光本质的认识、光波的模式、原子发光的概念和光谱线的宽度等。这些基础知识对于理解本课程的内容是必需的。

## 1.1 光的波粒二象性

人们每天都要接触光,对光是非常熟悉的,但光究竟是什么?人类认识它花费了漫长的时间,直到近代才有了比较清楚的认识,当然这种认识还有待继续深化。

远古时代,人类对于光的现象,就积累了很多知识。到 17 世纪,有关光的本性问题,形成了两种不同的学说,这就是以牛顿(I. Newton)为代表的微粒说和以惠更斯(C. Huygens)为代表的波动说。

微粒说认为,光是由发光体发出的光粒子(微粒)流所组成的,最大的微粒在到达人眼时,引起红光的感觉,而最小的微粒到达人眼时,引起紫光的感觉。微粒说能解释光的直进、反射和折射等现象。关于折射现象,实验发现,当光线从光疏媒质进入光密媒质时,例如从空气到水,光线是折向法线的。微粒说在解释这一现象时,需要假设水中的光速大于空气中的光速。

波动说认为,光是一种波动,是由机械振动的传播而引起的一种波动。

两种学说都能解释光的反射和折射现象,但波动说在解释折射现象时,需要假设光在水中的速度比在空气中的速度小。由于当时不能从实验上测定光速,所以分不出微粒说和波动说的优劣。

19 世纪,人们发现光有干涉、衍射、偏振等现象,波动说可以解释,而微粒说则无能为力。1850 年,佛科(J. L. Foucault)用实验方法测出光在水中的速度,证明  $v_{\text{水}} < v_{\text{空气}}$ ,从而有力地支持了波动说。

对于波动说,有一个问题无法解决,即传播光波的媒质是什么?按照力学理论,机械波是由弹性媒质中的机械振动的传播形成的,而且理论证明,横波在固体媒质中的传播速度为

$$v = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1.1-1)$$

式中: $G$ 为媒质的切变弹性模量; $\rho$ 是媒质的密度。光波是横波,如果把光波也看成是连续媒质中某种机械的弹性振动的传播,由于光波充满整个空间,而且光速极大,这就要求人为臆造一种媒质,叫做“以太”,来传播光波。以太必须是充满宇宙的,而且它的密度极低,切变弹性模量又要很大,比钢还要大很多。显然,这种神秘的媒质是很难想象的,这给波动说带来了不可克服的困难。

19世纪60年代,英国人麦克斯韦(J. C. Maxwell)在总结前人和自己对电磁现象研究成果的基础上,提出了电磁场理论,并归纳出一组称为麦克斯韦方程组的电磁场运动方程。电磁场理论认为,光是一定频率范围内的电磁波。可见光的频率在  $3.9 \times 10^{14} \sim 7.5 \times 10^{14}$  Hz 范围内,对应的波长为  $0.76 \sim 0.40 \mu\text{m}$ 。

在有介质存在的普遍情况下,麦克斯韦方程组的微分形式为

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j} \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1.1-2)$$

式中: $\mathbf{E}$ 为电场强度矢量; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度矢量; $\mathbf{H}$ 为磁场强度矢量; $\mathbf{D}$ 为电位移矢量; $\rho$ 为自由电荷密度; $\mathbf{j}$ 为介质内自由电流密度矢量。

方程组(1.1-2)中的前两个方程分别表示了电场和磁场的性质,即静电场是有源场,磁场为涡旋场;后两个方程表明电场和磁场之间的变化关系。

在已知电荷和电流分布的情况下,要从麦克斯韦方程组得到确定解,还需由物质方程给予补充。物质方程是介质在电磁场作用下发生传导、极化和磁化现象的数学表达式

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \\ \mathbf{B} &= \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \\ \mathbf{j} &= \sigma \mathbf{E} \end{aligned} \right\} \quad (1.1-3)$$

式中: $\mathbf{P}$ 为介质的电极化强度; $\mathbf{M}$ 为介质的磁化强度; $\epsilon_0$ 为真空中的介电常数; $\mu_0$ 为真空中的磁导率; $\sigma$ 为电导率。

利用方程组(1.1-2)、(1.1-3),可以讨论在各种情况下的电磁场的性质。在某些情况下,上述方程可以简化。例如对于均匀各向同性介质,且  $\rho=0, \sigma=0$ ,则可得到

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2} = 0 \quad (1.1-4)$$

这是电磁波(光波)在非磁性的、各向同性的极化介质中传播的波动方程式。式中: $c$ 为真空中的光速,其表达式为

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1.1-5)$$

又如,在式(1.1-4)中令  $\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E}$ , 并设

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}(x, y, z) e^{-i\omega t} \quad (1.1-6)$$

则可得到

$$\nabla^2 \mathbf{E}(x, y, z) + \eta^2 k^2 \mathbf{E}(x, y, z) = 0 \quad (1.1-7)$$

式中:



$$\eta = \sqrt{1 + \chi} \quad (1.1-8)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (1.1-9)$$

$\eta$  为复数折射率;  $\chi$  为介质的线性极化系数;  $k$  为波矢量。在真空中,  $\eta=1$ , 式(1.1-7)变为

$$\nabla^2 \mathbf{E}(x, y, z) + k^2 \mathbf{E}(x, y, z) = 0 \quad (1.1-10)$$

式(1.1-7)和式(1.1-10)都称为赫姆霍茨(Helmholtz)方程。这个方程和波动方程是等价的。对于空间变数与时间变数可分离的波函数, 其空间部分应满足这个方程。

应用光的电磁场理论, 基本上能比较圆满地解释光的反射、折射、干涉、衍射、偏振和双折射等与光的传播特性有关的一系列重要现象。光的电磁波理论还预见了一些新的现象, 例如光压的存在, 并且这一预见得到了实验的证实。但到19世纪末和20世纪初, 当人们试图解释涉及光与物质相互作用现象(如黑体辐射、原子的线状光谱、光电效应等)的规律时, 光的电磁理论却遇到了新的本质上的困难, 因此光的电磁理论也不能全面反映光的本性。

1900年, 普朗克(Planck)提出电磁场辐射源体系能量量子化的创新假设, 并在此基础上导出在形式上与实验规律相符合的黑体辐射定律。1905年, 爱因斯坦(Einstein)发展了普朗克的量子化假设, 在一种全新的意义上, 提出了光子学说。这个学说的要点如下:

① 光是由一群以光速  $c$  运动的光量子(简称光子)所组成。

② 每个光子都具有一定的能量, 光子的能量与光波的频率有如下的关系:

$$\epsilon = h\nu \quad (1.1-11)$$

式中:  $\nu$  为光的频率, 单位为 Hz;  $h$  为普朗克常量,  $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , 因此波长为  $0.76 \mu\text{m}$  的红光光子能量为  $2.6 \times 10^{-19} \text{ J}$  (1.6 eV), 而波长为  $0.4 \mu\text{m}$  的紫光光子能量为  $5.0 \times 10^{-19} \text{ J}$  (3.1 eV), 所以可见光光子能量在 1.6~3.1 eV 之间。

③ 每个光子都具有一定的质量  $m$ , 且

$$m = \frac{\epsilon}{c^2} = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda} \quad (1.1-12)$$

式中:  $\lambda$  为光的波长。例如波长等于  $0.5 \mu\text{m}$  的绿光光子质量为  $4.4 \times 10^{-36} \text{ kg}$ 。

附带说明一下, 光子虽有质量, 却没有静止质量, 因为按照相对论, 物质的质量  $m$  和它的运动速度  $v$  (相对于观察者或参考坐标系而言)之间存在着下列关系:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (1.1-13)$$

式中:  $m_0$  是静止质量。对于光子,  $v=c$ , 而  $m$  是有确定数值的, 这必须要求光子的静止质量  $m_0$  为零。

④ 光子具有动量  $p$ , 它等于质量  $m$  和速度  $c$  的乘积, 即

$$p = mc = \frac{h\nu}{c^2} \cdot c = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$$