



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材

本书主教材第1版2010年获评为北京市精品教材

光学工程

Study Guide for Principles of Lasers

激光原理 (第2版)

教案与学习指导

盛新志 娄淑琴 编著

Sheng Xinzhi Lou Shuqin



清华大学出版社



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会
高等学校电子信息类专业系列教材

Study Guide for Principles of Lasers

激光原理

(第2版)

教案与学习指导

盛新志 娄淑琴 编著

Sheng Xinzhi

Lou Shuqin



清华大学出版社

内 容 简 介

本书是《激光原理(第2版)》的配套教学与学习参考书,全书针对“激光原理”课程的基本理论和典型问题,进行了知识点梳理和问题解答。主要内容包括“激光原理”课程学习要求与重难点、知识点总结、典型问题的分析思路、思考题、练习题,以及部分习题答案。

本书可作为普通高校“激光原理”课程教学的辅助教材、考研辅导教材,也可供从事激光工作的研究人员、技术人员以及高校有关专业研究生自学“激光原理”课程的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

激光原理(第2版)教案与学习指导/盛新志,姜淑琴编著.--北京:清华大学出版社,2015

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-37060-4

I. ①激… II. ①盛… ②姜… III. ①激光理论—高等学校—教学参考资料 IV. ①TN241

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 143036 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:李建庄

责任印制:王静怡

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:8.75

字 数:218 千字

版 次:2015 年 2 月第 1 版

印 次:2015 年 2 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:25.00 元

产品编号:054642-01

高等学校电子信息类专业系列教材

顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科学技术大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

编审委员会

主 任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘 旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委 员	王志华	清华大学	宋 梅	北京邮电大学
	韩 焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪 伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾 云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢 泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴 瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李 晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡 毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江 毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	谢凯年	赛灵思公司
	刘铁根	天津大学	张伟刚	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	宋 峰	南开大学
	苑立波	哈尔滨工程大学	靳 伟	香港理工大学
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

PREFACE

“激光原理”课程是以电磁波谐振腔理论、发光的经典理论和速率方程理论为基础,系统地介绍激光振荡器和激光放大器的基本工作原理,是目前光电信息类专业本科生的专业基础课。这门课程具有很强的理论性, also 具有很强的工程实践性。作者所编教材《激光原理》(清华大学出版社)出版以来,被国内多所高校所采用,并于 2010 年获评为北京市精品教材。本书为《激光原理(第 2 版)》的教辅用书,是在参考了广大读者建议,凝练了作者十多年的教学积累,在广泛收集国内外相关资料的基础上编撰而成。

本书按章节分编教学知识点,包括学习要求与重难点、知识点总结、典型问题的分析思路、思考题、练习题和部分习题答案等几大部分。在知识点总结部分,强调知识点间的关联,以知识树的形式展示知识点间的骨干脉络和逻辑关联。同时,精心选取典型问题,帮助读者掌握基本理论及其灵活运用方法。本书不仅可用于课本内容的复习与巩固,也是课本内容的补充和扩展。丰富的思考题和练习题可有效地辅助读者复习与巩固课程知识。读者可以在解题中得到启发,开阔思路。

本书是由主教材作者亲自编写的,旨在帮助读者学习和复习“激光原理”课程内容,帮助读者训练解题思路 and 技巧,加速提高解决激光原理课程问题的实际能力。在此提醒读者,本书不是代替读者学习,更不希望读者只从本书中抄袭练习题答案。另外,读者也不要把会做若干习题当作学习的终点,而应该借助本书领会课程知识点的发展脉络,理解练习题描述现象背后的产生原因。

感谢参考文献的作者们,在编著本书的过程中,作者从中受到很多启发。另外,校内外的许多任课老师也给予了各种形式的支持,作者的博士生和硕士生也参与了大量的资料整理工作,在此一并对他们表示感谢。

由于作者的水平有限,书中一定有不妥之处,敬请读者在使用时及时批评指正。

编 者

2014 年 12 月

目录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 学习要求与重难点	1
1.1.1 学习要求	1
1.1.2 重点	1
1.1.3 难点	1
1.2 知识点总结	1
1.3 思考题	2
1.4 练习题	3
1.5 部分习题答案	3
第 2 章 光和物质的近共振相互作用	8
2.1 学习要求与重难点	8
2.1.1 学习要求	8
2.1.2 重点	8
2.1.3 难点	8
2.2 知识点总结	9
2.3 典型问题的分析思路	10
2.4 思考题	13
2.5 练习题	13
2.6 部分习题答案	15
第 3 章 速率方程理论	30
3.1 学习要求与重难点	30
3.1.1 学习要求	30
3.1.2 重点	30
3.1.3 难点	30
3.2 知识点总结	30
3.3 典型问题的分析思路	40
3.4 思考题	43
3.5 练习题	44
3.6 部分习题答案	46
第 4 章 光学谐振腔理论	58
4.1 学习要求与重难点	58
4.1.1 学习要求	58
4.1.2 重点	58

4.1.3 难点	59
4.2 知识点总结	59
4.3 典型问题的分析思路	64
4.4 思考题	70
4.5 练习题	71
4.6 部分习题答案	74
第5章 连续激光器的工作特性	104
5.1 学习要求与重难点	104
5.1.1 学习要求	104
5.1.2 重点	104
5.1.3 难点	104
5.2 知识点总结	104
5.3 典型问题的分析思路	108
5.4 思考题	112
5.5 练习题	113
5.6 部分习题答案	115
附录A 北京交通大学2011年硕士研究生复试试卷	126
附录B 北京交通大学2012年硕士研究生复试试卷	127
附录C 北京交通大学2013年硕士研究生复试试卷	128
附录D 北京交通大学2014年硕士研究生复试试卷	129
参考文献	130

第 1 章

CHAPTER 1

绪 论

1.1 学习要求与重难点

1.1.1 学习要求

- (1) 了解激光的发明简史、激光的应用范围；
- (2) 掌握自发辐射、受激吸收、受激辐射的概念；
- (3) 理解相干体积、光子态、光子简并度、激光与普通光的本质区别；
- (4) 了解热平衡态和非平衡态粒子数分布、光放大的基本条件；
- (5) 理解激光器基本结构、激光器三大构成部分的作用，了解激光器的分类标准。

1.1.2 重点

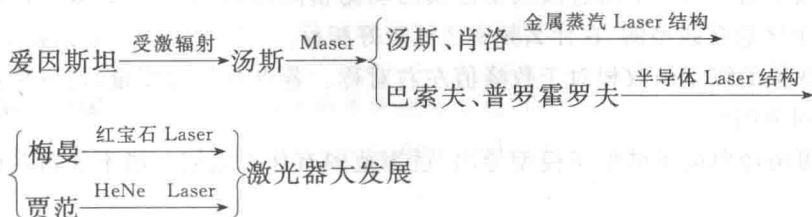
- (1) 发明激光器的主要人物和思想方法；
- (2) 光子简并度是激光与普通光的本质区别；
- (3) 光放大的基本条件；
- (4) 激光器三大构成部分及其作用。

1.1.3 难点

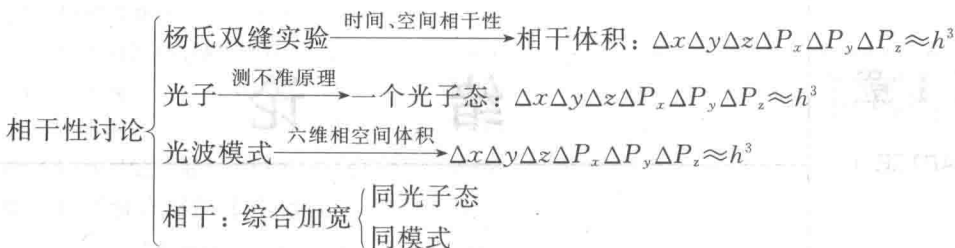
- (1) 模式、光子态与相干体积等价；
- (2) 光子简并度；
- (3) 热平衡态和非平衡态粒子数分布。

1.2 知识点总结

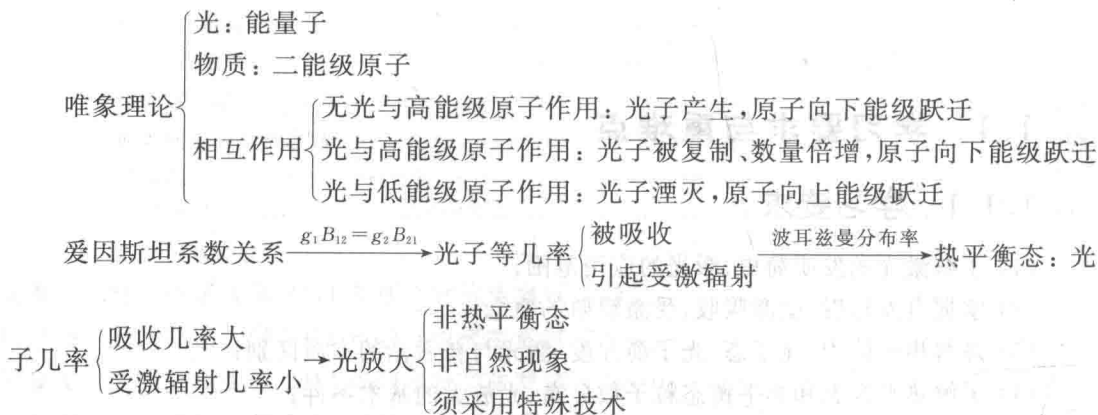
1. 激光器发展简史



2. 激光与普通光的本质区别



3. 唯象理论



1.3 思考题

1. 激光原理中只讨论光和物质的近共振相互作用, 是什么含义, 为什么?
2. 光学材料的正常色散、反常色散, 光速各有什么特点?
3. 光学材料的反常色散通常发生在什么频率位置?
4. 对光谱线的描述, 需要哪些参数, 各自的微观物理意义是什么?
5. 什么是谱线均匀加宽, 什么是谱线非均匀加宽, 还有没有别的加宽类型?
6. 在经典电子谐振子模型的讨论中, 都做了哪些近似假设, 各有什么道理?
7. 吸收和自发辐射线型一致吗? 请根据经典电偶极振子模型说明理由。
8. 经典电偶极振子的振荡阻尼的来源有哪些, 在光与物质相互作用中和哪些过程有关系, 为什么?
9. 从激光原理中得到的相对介电常量表达式来看, 相对介电常量主要随什么改变?
10. 介质折射率等于相对介电常量的开方, 激光原理中是如何对其实部、虚部加以讨论的, 各有什么物理意义?
11. 一个高斯线型谱线与一个洛伦兹线型谱线的线宽相同, 试说明在什么频率区域高斯线型谱线强度大于洛伦兹线型的, 在什么频率区域正好相反。
12. 以频率为变量的线型函数相对于谱峰值左右对称。若以波长为变量, 请举例说明线型函数还会左右对称吗?
13. 线型函数可由经典电子谐振子模型导出, 适用范围有什么限制? 能不能由其他理论导出?

14. 谱线均匀加宽、非均匀加宽的主要形成机制各有哪些?
15. 晶格振动加宽是什么类型的加宽,为什么?
16. “能级寿命只由其自发辐射决定”是否正确,为什么?
17. 氦氖激光器中什么加宽机制起主要作用?
18. YAG 激光器中什么加宽机制起主要作用?
19. 谱线加宽对跃迁几率有什么影响,在激光原理范围怎么做合理的近似处理?

1.4 练习题

1. 有 $10\mu\text{m}$ 远红外、500MHz 无线电波、500nm 绿光三种电磁波,试按光子能量大小进行排列。

2. 某电台发射功率为 10kW,频率为 1.6MHz,试问:每秒钟发射多少光子?若是向空间各向均匀发射,在相距 5km 处一直径 2m 圆天线每秒最多能接收到多少光子?

3. 为使氦氖激光器的相干长度达到 1km,它的单色性 $\Delta\lambda/\lambda$ 应该是多少?

4. 设一对激光上下能级分别为 E_2 和 E_1 ($g_1 = g_2$),能级上的粒子数密度分别为 n_2 和 n_1 ,两能级跃迁频率为 ν 。试求:

(1) 当 $\nu = 3000\text{MHz}$ 、 $T = 300\text{K}$ 时, $n_2/n_1 = ?$

(2) 当 $\lambda = 1\mu\text{m}$ 、 $T = 300\text{K}$ 时, $n_2/n_1 = ?$

(3) 当 $\lambda = 1\mu\text{m}$ 、 $n_2/n_1 = 0.1$ 时, $T = ?$

5. 有一只输出波长为 632.8nm,线宽为 10^3Hz ,光束发散角 1mrad,输出功率为 1mW 的氦氖激光器,试问:

(1) 每秒发出的光子数目是多少?

(2) 如果氦氖激光器输出光束的直径是 1mm。那么对于一个黑体来说,要求它在相等的时间内从相等的面积上向相同的频率间隔内发射出与相同数量的光子,所需温度应多高?

6. 按激光介质分类,有哪几类激光器,各有什么特征?

7. 设一光子的波长 $\lambda = 500\text{nm}$,单色性 $\Delta\lambda/\lambda_0 = 10^{-7}$,试求光子的位置不确定量 Δx 。若光子波长变为 0.5nm(X 射线)和 $5 \times 10^{-5}\text{nm}$ (γ 射线),则相应的 Δx 又是多少? 讨论所得的结果。

1.5 部分习题答案

1. 有 $10\mu\text{m}$ 远红外, 500MHz 无线电波, 500nm 绿光三种电磁波,试按光子能量大小进行排列。

关键概念: 光是电磁波,光子能量。

关键公式: $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$ 。

解题关键点: 光波长、频率换算为国际单位,即

$$1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$$

$$1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$$

$$1\text{MHz} = 10^6\text{Hz}$$

解: $10\mu\text{m}$ 远红外光子能量为

$$E_1 = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{10 \times 10^{-6}} = 1.99 \times 10^{-20} (\text{J})$$

500MHz 无线电波光子能量为

$$E_2 = h\nu = 6.626 \times 10^{-34} \times 5 \times 10^8 = 3.31 \times 10^{-25} (\text{J})$$

500nm 绿光光子能量为

$$E_3 = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{5 \times 10^{-7}} = 3.98 \times 10^{-19} (\text{J})$$

按光子能量大小进行排列: 500nm 绿光 $> 10\mu\text{m}$ 远红外 $> 500\text{MHz}$ 无线电波。

2. 某电台发射功率为 10kW, 频率为 1.6MHz, 试求: 每秒钟发射多少光子? 若是向空间各向均匀发射, 在相距 5km 处一直径 2m 圆天线每秒最多能接收到多少光子?

关键概念: 光是电磁波, 光子能量。

关键公式: $N = \frac{P}{h\nu}$ 。

解题关键点: 各向均匀发射的电台发射球面电磁波。

解: 每秒钟发射多少光子数为

$$N = \frac{P}{h\nu} = \frac{10 \times 10^3}{6.626 \times 10^{-34} \times 1.6 \times 10^6} = 9.4 \times 10^{30} (\text{个/s})$$

圆天线每秒最多能接收到光子数为

$$N' = \frac{N}{4\pi R^2} \cdot \pi r^2 = \frac{9.4 \times 10^{30}}{4 \times 5^2 \times 10^6} \times 1^2 = 9.4 \times 10^{22} (\text{个/s})$$

3. 为使氦氖激光器的相干长度达到 1km, 它的单色性 $\Delta\lambda/\lambda$ 应该是多少?

关键概念: 相干长度, 光波单色性。

关键公式: $L_c = \frac{c}{\Delta\nu}, \left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right| = \left| \frac{\Delta\nu}{\nu} \right|$ 。

解题关键点: ① 常见氦氖激光器的输出激光波长一般取 630nm; ② 谱线宽度的相对值以波长和频率的表示相同。

解: 因为 $L_c = \frac{c}{\Delta\nu}, \left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right| = \left| \frac{\Delta\nu}{\nu} \right|$

$$\text{所以单色性 } \left| \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right| = \left| \frac{\Delta\nu}{\nu} \right| = \frac{c}{L_c \nu} = \frac{\lambda}{L_c} = \frac{633 \times 10^{-9}}{1 \times 10^3} = 6.33 \times 10^{-10}$$

4. 设一对激光上下能级分别为 E_2 和 E_1 ($g_1 = g_2$), 能级上的粒子数密度分别为 n_2 和 n_1 , 两能级跃迁频率为 ν 。试求:

(1) 当 $\nu = 3000\text{MHz}$ 、 $T = 300\text{K}$ 时, n_2/n_1 的值是多少?

(2) 当 $\lambda = 1\mu\text{m}$ 、 $T = 300\text{K}$ 时, n_2/n_1 的值是多少?

(3) 当 $\lambda = 1\mu\text{m}$ 、 $n_2/n_1 = 0.1$ 时, T 的值是多少?

关键概念: 激光上下能级, 粒子数密度, 热平衡, 波尔兹曼分布。

关键公式: $\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$ 。

解: (1) 由公式

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

得

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left(-\frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3000 \times 10^6}{1.38 \times 10^{-23} \times 300}\right) = 0.9995$$

(2) 由公式

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

得

$$\frac{n_2}{n_1} = \exp\left(-\frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1 \times 10^{-6} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300}\right) = 0.0082$$

(3) 由公式

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{g_2}{g_1} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

得

$$T = -\frac{h\nu}{k \ln \frac{n_2}{n_1}} = -\frac{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8}{1 \times 10^{-6} \times 1.38 \times 10^{-23} \times \ln 0.1} = 6250(\text{K})$$

$$T = -\frac{h\nu}{k \ln \frac{n_2}{n_1}} = -\frac{6.63 \times 10^{-34} (\text{J}\cdot\text{s}) \times 3 \times 10^8 (\text{m/s})}{1 \times 10^{-6} (\text{m}) \times 1.38 \times 10^{-23} (\text{J/K}) \times \ln 0.1} = 6250(\text{K})$$

5. 有一支输出波长为 632.8nm, 线宽为 10^3 Hz, 光束发散角 1mrad, 输出功率为 1mW 的氦氖激光器, 试问:

(1) 每秒发出的光子数目是多少?

(2) 如果氦氖激光器输出光束的直径是 1mm。那么对于一个黑体来说, 要求它在相等的时间内从相等的面积上向相同的频率间隔内发射出与相同数量的光子, 所需温度应多高?

关键概念: 氦氖激光器、输出功率、光束直径、黑体。

关键公式: $N = \frac{W}{h\nu}$ 。

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

解: (1) 输出功率为 1mW 氦氖激光器每秒发出的光子数目为

$$N = \frac{W}{h\nu} = \frac{W\lambda}{hc} = \frac{10^{-3} \times 6.328 \times 10^{-7}}{6.63 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8} = 3.18 \times 10^{15} (\text{s}^{-1})$$

(2) 由黑体辐射能量密度公式, 可知在单位频率范围内的黑体辐射能量密度为

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

考虑黑体表面面积直径是 1mm 的黑体辐射, 能量是以光速向外以点源方式辐射, 因此每秒钟在线宽 10^3 Hz 的频率范围内, 辐射功率为

$$W' = \rho(\nu, T) dV d\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \times \frac{4\pi c^3}{3} \times 10^3$$

这些辐射功率分摊在 1mrad 所对应立体角内的有

$$W'' = W' \times \frac{1}{(2\pi)^2} \times (10^{-3})^2 = \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \times \frac{8}{3} \times 10^{-3}$$

若与输出功率为 1mW 的氦氖激光器发射出相同的光子数,即要求其每秒钟辐射能量 1mJ :

$$10^{-3} = I = \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \times \frac{8}{3} \times 10^{-3}$$

所以,对应黑体温度为

$$T = \frac{h\nu}{k \ln \frac{11}{3}} = \frac{6.6256 \times 10^{-34} \times 3 \times 10^8 / (630 \times 10^{-9})}{1.38 \times 10^{-23} \ln \frac{11}{3}} = 1.76 \times 10^4 (\text{K})$$

6. 按激光介质分类,有哪几类激光器,各有什么特征?

关键概念: 激光介质,激光器分类。

解题关键点: ①激光介质通常按物象分类;②激光器特征可从体积质量大小、坚固与否、激光输出强弱、光束质量好坏、能量利用效率如何等方面陈述。

解: 按激光介质分类,激光器可分为固体、气体、液体、半导体和光纤激光器等5类。固体激光器通常具有体积小、结构坚固、输出激光强、能量利用率较高的特征,光束质量也较好。

气体激光器通常具有光束质量好的特征,一般体积较大,能够输出激光强,但能量利用率较低。

液体激光器通常具有光束质量好的特征,一般体积较大较复杂,能量利用率较低。半导体激光器通常具有体积小、结构坚固、输出激光强、能量利用率高的特征,输出光束质量也差。

光纤激光器通常具有体积小、散热好、输出激光强、输出光束质量好、能量利用率高的特征,是目前高能激光器的一个发展方向。

7. 设一光子的波长 $\lambda = 500\text{nm}$, 单色性 $\Delta\lambda/\lambda_0 = 10^{-7}$, 试求光子的位置不确定量 Δx 。若光子波长变为 0.5nm (X射线)和 $5 \times 10^{-5}\text{nm}$ (γ 射线), 则相应的 Δx 又是多少? 讨论所得的结果。

关键概念: 光子动量,测不准原理。

关键公式: $p = \frac{h}{\lambda}$, $\Delta x \cdot \Delta p \geq h$ 。

解题关键点: 由线宽求动量不确定量。

解: 因为 $p = \frac{h}{\lambda}$, $|\Delta p| = \left| \frac{h\Delta\lambda}{\lambda^2} \right|$

又因为 $\Delta x \cdot \Delta p \geq h$

所以 $|\Delta x| \geq \left| \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \right|$

对于光波长 500nm :

$$\Delta x = \frac{500 \times 10^{-9}}{10^{-7}} = 5(\text{m})$$

对于光波长 0.5nm :

$$\Delta x = \frac{0.5 \times 10^{-9}}{10^{-7}} = 5(\text{mm})$$

对于光波长 $5 \times 10^{-5} \text{ nm}$:

$$\Delta x = \frac{5 \times 10^{-14}}{10^{-7}} = 5 \times 10^{-7}(\text{m})$$

讨论: 显然, 光波长越短, 其空间不确定度越小。γ射线在空间上已可以说有确切位置。

2.1 学习要求与重难点

2.1.1 学习要求

- (1) 掌握电偶极振子模型,理解模型的近似;
- (2) 掌握电偶极振子模型对介质自发辐射、吸收的解释,以及对介质谱线加宽机制和线型函数的解释;
- (3) 了解电偶极振子模型对介质色散的解释;
- (4) 了解介质谱线加宽机制,理解两种线型函数产生机制的差异;
- (5) 了解典型激光器中工作物质的加宽类型;
- (6) 掌握爱因斯坦唯象理论,理解谱线加宽对爱因斯坦跃迁系数的影响;
- (7) 了解光和物质相互作用的近代理论。

2.1.2 重点

- (1) 电偶极振子模型及其近似;
- (2) 介质自发辐射、吸收、谱线加宽机制和线型函数的经典理论;
- (3) 典型加宽机制和线型函数;
- (4) 爱因斯坦唯象理论,以及谱线加宽对爱因斯坦跃迁系数的影响。

2.1.3 难点

- (1) 电偶极振子模型的近似假设;
- (2) 电偶极振子模型对介质自发辐射、吸收的解释,以及线型函数的引入;
- (3) 综合加宽;
- (4) 谱线加宽对爱因斯坦跃迁系数的影响。