



“十二五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目
世界光电经典译丛
丛书主编 叶朝辉



CRC Press
Taylor & Francis Group

慢光科学与应用

SLOW LIGHT: SCIENCE AND APPLICATIONS

Jacob B. Khurgin Rodney S. Tucker

编著

贾东方 王肇颖 丁镭 桑梅

译



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



“十二五”国家重点图书出版规划项目
湖北省学术著作出版专项资金资助项目
世界光电经典译丛
丛书主编 叶朝辉



CRC Press
Taylor & Francis Group

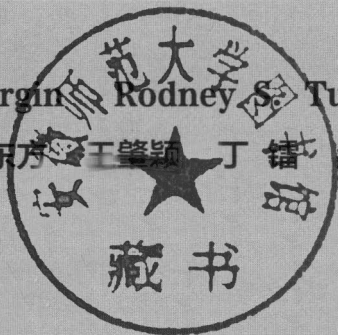
慢光科学与应用

Jacob B. Khurgin Rodney S. Tucker

编著

贾东方 王肇颢 丁镭 桑梅

译



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

中国·武汉

Slow Light: Science and Applications 1st Edition/by Jacob B. Khurgin, Rodney S. Tucker/ISBN: 9781420061512
Copyright © 2008 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All rights reserved. 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版, 并经其授权翻译出版。版权所有, 侵权必究。

Huazhong University of Science and Technology Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由华中科技大学出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Francis sticker on the cover are unauthorized and illegal. 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

湖北省版权局著作权合同登记 图字: 17-2017-061 号

图书在版编目(CIP)数据

慢光科学与应用/(美)雅各布·库京,(澳)罗德尼·塔克编著;贾东方等译. —武汉: 华中科技大学出版社, 2017. 6

(世界光电经典译丛)

ISBN 978-7-5680-2632-1

I. ①慢… II. ①雅… ②罗… ③贾… III. ①光学-研究 IV. ①O43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 052939 号

慢光科学与应用

Manguang Kexue Yu Yingyong

Jacob B. Khurgin Rodney S. Tucker 编著

贾东方 王肇颖 丁镭 桑梅 译

策划编辑: 徐晓琦

责任编辑: 余涛

封面设计: 原色设计

责任校对: 张琳

责任监印: 周治超

出版发行: 华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话: (027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编: 430223

录排: 武汉楚海文化传播有限公司

印刷: 湖北新华印务有限公司

开本: 710mm×1000mm 1/16

印张: 31.25 插页: 2

字数: 526 千字

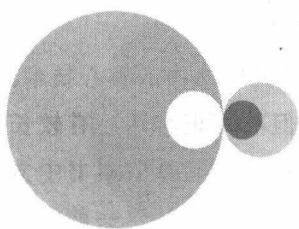
版次: 2017 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

定价: 168.00 元



华中科技大学出版社

本书若有印装质量问题, 请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线: 400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



译者序

慢光是指光脉冲在介质中传输的群速度小于真空中的光速。自 1999 年哈佛大学的 Hau 等在《Nature》上发表了将光速减为 17 m/s 的实验报道以来,慢光研究获得了迅猛发展。一方面,慢光有很多重要应用,如信号延迟、光缓存、数据同步、慢光传感、非线性光学器件等;另一方面,慢光对科学研究有着积极意义,如通过对慢光的研究可以加深人们对光与物质相互作用本质的理解,在慢光过程中所呈现出来的强非线性效应也为非线性光学开辟了新的研究领域。

美国约翰·霍普金斯大学 Jacob B. Khurgin 教授和澳大利亚墨尔本大学 Rodney S. Tucker 主编的《Slow Light: Science and Applications》一书,是一本全面介绍慢光的基本原理、潜在应用和发展前沿的著作。其参编人员也均为活跃在慢光领域的权威学者,他们对这一令人兴奋和迅速发展的领域做出了重要贡献。本书内容分为六部分:第一部分(第 1~4 章)介绍了不同介质(包括原子蒸气、半导体、光波导、光子晶体波导)中慢光的物理基础;第二部分(第 5~7 章)介绍了周期性光子结构中的慢光;第三部分(第 8~9 章)介绍了光纤中的慢光;第四部分(第 10~12 章)介绍了慢光和非线性现象;第五部分(第 13~14 章)介绍了用来存储光的动态结构;第六部分(第 15~18 章)介绍了慢光的应用。纵观全书,其内容系统全面,理论体系严谨,注重理论与实践的结合。本书可作为物理学、电子科学与技术、光电子技术、光学工程、光通信以及其他相关专业高年级本科生和研究生的参考书,同时对从事光通信、非线性

性光学、集成光学的科研人员来说也是一本非常有价值的读物。

我们特此将它翻译出来介绍给国内读者。翻译工作是由天津大学和南开大学的老师们共同完成的,具体分工如下:天津大学的王肇颖翻译了第1~4章和第16~18章,贾东方翻译了第7章、第10~15章和索引,桑梅翻译了第5章和第6章;南开大学的丁镭翻译了第8章和第9章。全书由贾东方审校统稿。

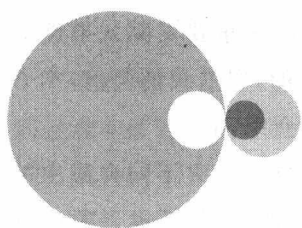
慢光作为一种高新技术和前沿技术,将成为未来全光网络中的核心技术。国外众多高校和研究院所在该领域进行了大量研究,但离真正实用还有较长的距离,因此对国内的研究人员来说是机遇与挑战共存。我们希望本书中文版的出版,能起到抛砖引玉的作用,吸引国内更多的研究人员关注这一前沿领域并对此做出自己的贡献。

感谢华中科技大学出版社对翻译工作的大力支持,特别要衷心感谢本书的策划编辑徐晓琦和责任编辑余涛,没有他们的辛勤付出,本书难以顺利出版。

由于译者学识所限,疏漏乃至错误在所难免,恳请广大读者及专家不吝赐教,提出修改意见,我们将不胜感激。

译者

2016年10月



引言

慢光——迷人的科学,非凡的应用

本书的主题——慢光科学与应用,具有悠久的历史 and 光明的未来。“慢光”这个术语是为了描述光以减小的群速度在介质和结构中传输这种物理现象而杜撰出来的,这种现象可以追溯到 19 世纪,那时,洛伦兹在他的著作中首次阐述了电磁波色散的经典理论^[1]。自从 20 世纪 40 年代以来,慢波传输还在微波范围观察到并得到广泛应用^[2]。建立在这一历史之上^{[3][4]},慢光有望为 21 世纪最前沿的技术提供帮助和应用,如大容量通信网络、量子计算、超快全光信息处理、微波系统,等等。

慢光已经从科学的好奇转变成具有很多潜在应用的迅速成长的研究领域,这得益于慢光的实际实现所必需的技术的迅速发展,这些技术包括:高功率和窄线宽光源、低损耗光波导、光子晶体器件、精密加工技术,等等。慢光之所以成为一个特别有趣的话题,是因为它具有真正的跨学科性质。实际上,已经在很多介质和结构中观察到慢光传输,从玻色-爱因斯坦凝聚和低压金属蒸气到光纤和光子带隙结构。尽管慢光方案表面上具有多样性,但它们具有一个公共的特性——尖锐的单谐振或多谐振的存在。谐振可以通过多种形式来定义,包括简单的原子跃迁、布拉格光栅或其他谐振光子结构,以及外部的激光器,因为在方案中涉及了不同的非线性过程——谐振散射、频谱烧孔或四波混频。慢光领域是独一无二的,因为它使非线性光学的专家与集成光学的专

业人才,激光冷却的专家与凝聚态物理学家、半导体激光器工程师,量子光学的研究人员,致力于光纤通信的工程师与光谱学家团结起来。这种多学科交叉有利于新思想的出现,将上述所有领域的专门知识结合起来,取得整体大于各部分之和的效果。正是在这种思想的激励下,本书应运而生。

为实现这一目标,我们组织了 18 个小组参与本书的编写工作,这些参编人员活跃在慢光领域,并在最近几年中对这一领域做出了重要贡献。虽然对慢光在过去几年中取得的所有进展做出说明是不可能的,但是我们坚信,本书对慢光领域的发展现状和主要方向提供了一个全面的介绍。

第一部分“不同介质中慢光的基础物理学”由四章组成,对不同介质中的慢光物理学进行了介绍。第 1 章介绍了原子蒸气中的慢光,包括电磁感应透明。原子蒸气是最早用来观察慢光的介质,最惊人的结果也是通过它取得的,因此,从这种介质开始介绍慢光是唯一适当的选择。第 2 章介绍了半导体中的慢光,虽然在半导体中获得的群速度减小一般小于在原子蒸气中获得的结果,但是半导体方案能够工作在通信波长,提供宽信号带宽,而且能与其他电子和光学组件集成,所有这些使这种方案特别有吸引力。在第 3 章中,我们探索了在光波导和光纤中不同慢光方案的科学,再次看到,在光纤中群速度减小的尺度远非像在原子蒸气中的那样大,但是这些器件损耗低,结构紧凑,而且能与现有技术相结合。第 4 章介绍了基于光子晶体和其他周期光子结构的慢光方案,这些方案对于宽带宽应用很有吸引力,而且可以实现慢光器件的小型化。

第二部分“周期光子结构中的慢光”包含三章内容,详细介绍了如何利用耦合光谐振器获得光群速度的显著减小。第 5 章介绍了描述各类耦合谐振器的数学工具和它们的比较分析。第 6 章介绍了先进耦合谐振器结构——垂直耦合谐振器和回音壁模式。第 7 章介绍了无序耦合谐振器中光的局域化这种引人注目的现象。

第三部分“光纤中的慢光”包含两章内容,对能在光纤中提供可调谐群延迟的两种机制进行了深入探讨。第 8 章介绍了拉曼辅助光参量放大。第 9 章介绍了受激布里渊散射放大。

很多慢光方案(电磁感应透明、拉曼、相干布居振荡,等等)依赖于非线性过程,但是,第四部分“慢光和非线性现象”专门介绍了与慢光相联系的非线性效应的增强。第 10 章全面介绍了周期光子结构中三阶非线性过程增强的处

理方法,确立了因为群速度色散导致的非线性增强的极限。第 11 章专门介绍了利用带隙孤子对周期结构中的群速度色散进行补偿。第 12 章介绍了对原子慢光方案中的非线性过程的控制。

第五部分“存储光的动态结构”包含两章内容,介绍了通过动态地改变带宽和减慢因子从而减轻有害的信号展宽效应的光子结构。第 13 章介绍了结合原子和光子谐振结构的概念。第 14 章介绍了可绝热调谐的谐振器。

最后,第六部分“应用”包含四章内容。第 15 章介绍了群速度色散强加给线性和非线性应用中的慢光的严重带宽限制,对它们进行了详细讨论,并对不同方案进行了比较。第 16 章分析了慢光在不同调制格式信号的全光处理中的应用。第 17 章介绍了慢光在分组交换中的应用,并对电子方案和光学方案进行了比较。第 18 章介绍了慢光在相控阵天线中的模拟处理应用和其他微波光子学应用。

本书提供了慢光这一令人兴奋和迅速发展领域的简单印象,但是,我们希望它能带给读者在慢光领域中正在发生的、最新的、最重要的进展,激发读者的兴趣,使他们为这一领域做出自己的贡献。

Jacob B. Khurgin

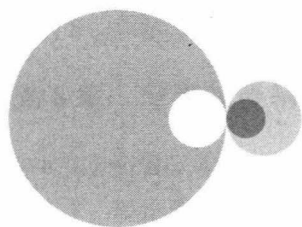
Rodney S. Tucker



参考文献^①

- [1] H. A. Lorentz, Wiedem. Ann. ,9,641 (1880).
- [2] J. R. Pierce, Bell. Syst. Tech. J. ,29,1 (1950).
- [3] L. V. Hau, S. E. Harris, Z. Dutton, and C. H. Behroozi, Nature, 397, 594-596 (1999).
- [4] D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair, R. L. Walsworth, and M. D. Lukin, Phys. Rev. Lett. ,86,783-786 (2001).

^① 本书参考文献直接引用其英文版的参考文献。



目录

第 1 章 原子蒸气中的慢光 /1

- 1.1 引言 /1
- 1.2 第一个慢光实验 /2
- 1.3 电磁感应透明 /3
- 1.4 二能级系统 /7
- 1.5 色散管理 /9
- 1.6 结束语 /11

第 2 章 半导体中的慢光和快光 /15

- 2.1 引言 /15
- 2.2 基于量子阱中相干布居振荡的慢光 /18
- 2.3 基于量子点中相干布居振荡的慢光 /23
- 2.4 基于量子点中相干布居振荡的室温工作慢光 /27
- 2.5 基于增益区中相干布居振荡和四波混频的快光和慢光 /32
- 2.6 基于自旋相干的慢光方案 /35
- 2.7 总结 /39

第 3 章 光波导中的慢光 /44

- 3.1 基于受激散射的慢光 /45

- 3.2 相干布居振荡 /55
- 3.3 空芯光纤中的电磁感应透明 /58
- 3.4 波长变换和色散 /62
- 3.5 结论 /66

第4章 光子晶体波导中的慢光 /73

- 4.1 引言 /73
- 4.2 光子晶体如何产生慢光 /75
- 4.3 线性相互作用的增强 /80
- 4.4 腔和慢光波导的比较 /81
- 4.5 损耗 /87
- 4.6 耦合 /89
- 4.7 结论 /91

第5章 周期耦合谐振器结构 /95

- 5.1 引言 /95
- 5.2 一般描述 /96
- 5.3 驻波谐振器 /101
- 5.4 一些实际考虑 /107
- 5.5 实验进展 /111
- 5.6 结论 /115

第6章 谐振器慢光:新结构、应用与权衡 /122

- 6.1 引言 /122
- 6.2 作为延迟线的垂直耦合谐振器光波导 /124
- 6.3 谐振器链中的干涉 /129
- 6.4 谐振器稳定的振荡器 /131
- 6.5 系统中具有离散频谱的慢光 /133

第7章 无序光慢波结构:什么是慢光的速度 /144

- 7.1 引言:紧束缚光波导 /144
- 7.2 形式体系 /149

7.3	解的谱:一般原则	/151
7.4	耦合矩阵的特殊形式	/152
7.5	无序模型和 $\rho(\omega)$ 的计算	/154
7.6	无序结构中慢光的速度	/158
7.7	场的局域化	/163
7.8	总结	/168
第8章 窄带拉曼辅助光纤参量放大器中的慢光和快光传输 /179		
8.1	引言	/179
8.2	理论模型	/181
8.3	实验结果	/197
第9章 用受激布里渊散射实现慢光和快光 ——一种高度灵活的方法 /209		
9.1	单色光泵浦	/211
9.2	调制泵浦	/219
9.3	多泵浦	/224
第10章 非线性慢波结构 /233		
10.1	慢波结构的基本原理	/234
10.2	非线性相位调制	/238
10.3	自相位调制和色散	/241
10.4	交叉相位调制	/246
10.5	非线性频谱响应	/249
10.6	四波混频	/251
10.7	调制不稳定性	/258
第11章 慢光带隙孤子 /267		
11.1	引言	/267
11.2	背景知识	/268
11.3	实验	/274
11.4	讨论和结论	/279

第 12 章 慢光介质中的相干控制与非线性波混频 /283

12.1 引言 /283

12.2 基于慢光的非线性波混频 /293

第 13 章 半导体量子阱和光学微谐振器中的光停止和光存储 /308

13.1 引言 /308

13.2 线性光学响应 /310

13.3 能带结构 /317

13.4 布拉格间隔多量子阱中的光停止和光存储 /323

13.5 结论 /327

第 14 章 通过耦合谐振器的动态调谐使光停止 /331

14.1 引言 /331

14.2 理论 /332

14.3 实验进展 /340

14.4 展望和结束语 /342

第 15 章 慢光方案中的带宽限制 /349

15.1 引言 /349

15.2 原子谐振 /351

15.3 光子谐振 /355

15.4 双谐振原子慢光结构 /355

15.5 双谐振光子慢光结构——级联光栅 /358

15.6 可调谐双谐振原子慢光结构——电磁感应透明 /363

15.7 耦合光子谐振器结构 /369

15.8 非线性光子慢光器件的色散限制 /374

15.9 结论 /378

第 16 章 基于慢光可调谐光延迟线的可重构信号处理 /383

16.1 引言 /383

16.2 基于慢光的可调谐延迟线 /385

16.3 相位保持的慢光 /395

16.4 信号处理应用 /401

16.5 总结 /408

第 17 章 用于分组交换的慢光缓存器 /418

17.1 引言 /418

17.2 分组交换机结构 /419

17.3 缓存器 /421

17.4 结论 /438

第 18 章 慢光在相控阵雷达波束控制中的应用 /442

18.1 引言 /442

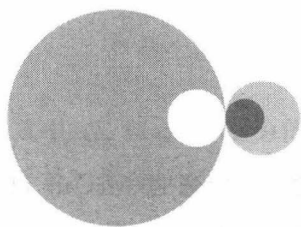
18.2 雷达系统背景 /445

18.3 移相器波束成形中的斜视 /447

18.4 实时延迟波束成形要求 /450

18.5 总结 /456

中英文术语对照 /458



第 1 章 原子蒸气中的慢光

1.1 引言

尽管慢光的基本理论早已众所周知,但是慢光的实验研究直到近年来才开始开展。起初,原子蒸气在这些实验研究中发挥了重要的作用。很多关于光群速度的初步研究都是利用原子蒸气完成的,至今,原子蒸气仍被应用于慢光的基本原理和应用研究中。

本章中,我们回顾一些重要的物理现象,这是理解原子系统中慢群速度和快群速度所必需的,并尝试追溯慢光实验观察的起源,重点侧重于原子蒸气中的慢光研究。这里,我们采用一种不太常见但却统一的处理方法,专注于利用双边费曼图来分析各种具体慢光介质的谐振相互作用^[1]。采用这种方法的理由有两点:首先,这种方法提供了一种教学和系统的手段,能对引起慢光的各种各样的原子谐振可视化;其次,这种方法鲜有人知,却能提供常见的非图形化密度矩阵形式无法提供的物理图像。2002年,Boyd、Gauthier 和 Milonni 对慢光研究的传统方法进行了总结,并做了精彩的评述^{[2][3]}。Milonni 还在 2005 年出版了一本书,包含有关慢光、快光和左旋光的内容^[4]。

原子蒸气中的慢光大体上可以按照产生必要色散所需的光学谐振类型来分类。在最简单的情况下,利用一个处于二能级原子系统的单一激光器,就可以获得慢群速度。近年来的研究热点是三能级系统中的慢光,最常见的结构就是电磁感应透明(EIT)。在四能级系统、烧孔方案和各种其他方案中也观察到了慢光,总之从原理上讲,几乎任何光学谐振都可以用来产生慢光。虽然获得慢光的方法很多,这里只选择几个有代表性的系统来说明,给定合适的哈密顿量,如何对其中的任何一种机制进行简单的预测。

1.2 第一个慢光实验

第一个研究慢光的实验是在非线性光学的背景下,即通过 McCall 和 Hahn 在 1967 年发现的自感应透明(SIT)效应进行的^[5]。McCall 和 Hahn 进行过一个实验,他们将红宝石激光器产生的光脉冲通过一段冷却的红宝石棒,实验中除了 SIT 效应外还观察到了相当可观的群延迟。同年,Patel 和 Slusher 利用气态 SF_6 做延迟介质,演示了相似的延迟效应^[6]。第一个基于原子蒸气中的 SIT 效应产生慢光的实验研究是由 Bradley 等在 1968 年进行的^[7],他们测量了钾蒸气中的延迟。有趣的是,这个实验还包括了远离 SIT 谐振的时间延迟测量,作为对照实验。这就是在线性区实现的对慢光的第一次测量。此后在 1972 年,Slusher 和 Gibbs 报道了更多对原子蒸气中 SIT 和慢光的细致研究,其中包括对铷(Rb)的 D_1 线上的二能级跃迁的研究^[8]。由于所有这些研究都是基于脉冲在介质中传输时产生的非线性,因此群延迟大小取决于脉冲的宽度、能量和面积。事实上,一些研究者将群延迟观测结果作为 SIT 的指示进行了报道,但很快被 Courtens 和 Szöke^[9]指出这并不严谨。

当 Harris 及其合作者发现了一种在输入脉冲中呈线性的电磁感应透明(EIT)效应之后^[10],很自然地研究了与这种新透明机制相对应的脉冲传输动力学。1992 年,Harris 开始其理论研究^[11]。然而,第一个线性慢光的实验研究其实是由 Grischkowsky 更早之前完成的^[12]。Grishkowsky 用绝热跟随效应描述了实验结果,表明尽管远离谐振,脉冲仍然可以经历显著的群速度减慢并与前面讨论的 SIT 发生联系。我们在讨论完基于 EIT 效应的慢光后,会回过头再来讨论这类慢光实验。

1.3 电磁感应透明

我们首先讨论图 1.1 所示的 Λ 型三能级系统,其中有两个场,分别是弱信号光 E_s 和强耦合光 E_c 。众所周知,描述无阻尼时原子-场相互作用的哈密顿量可以在旋转坐标系中写为^[13]

$$-\frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & \Omega_s & 0 \\ \Omega_s & -2\Delta_1 & \Omega_c \\ 0 & \Omega_c & -2(\Delta_1 - \Delta_3) \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

式中: Ω_s 和 Ω_c 分别为信号场和耦合场引起的拉比频率; Δ_1 和 Δ_3 分别表示信号场和耦合场相对光学谐振的失谐量。

当双光子失谐量为 0 ($\Delta_1 = \Delta_3$) 时,可得本征值 $\left\{0, \frac{\hbar}{2(\Delta_1 \pm \Omega_N)}\right\}$, 其中我们定义了归一化的拉比频率为 $\Omega_N = \sqrt{\Omega_c^2 + \Omega_s^2}$ 。消失的能量本征值对应于没有原子场耦合存在的情况,其本征矢量为

$$|-\rangle = \frac{\Omega_c}{\Omega_N} |1\rangle - \frac{\Omega_s}{\Omega_N} |3\rangle \quad (1.2)$$

当系统处于这个本征态时,不存在任何吸收,所以也就没有任何自发辐射发生。基于这个原因,储备于这个本征态上的原子处于暗态,对信号频率的辐射不可见。我们希望探索储备于这个暗本征态临近区域中的这种三能级系统的色散特性,因此必须考察双光子谐振附近的原子-场耦合,并将阻尼考虑在内。通过对从态 $|1\rangle$ 到态 $|3\rangle$ 的所有可能激发路径感应的极化求和,可以得出与信号频率接近谐振的稳态极化,这很方便地用双边费曼图表示^[1], 如图 1.1 所示。

$$\begin{aligned} P_s &= 2N\mu_{12} \frac{\Omega_s}{2} \frac{1}{\tilde{\Delta}_s} \sum_{n=0}^{+\infty} r^n \\ &= N\mu_{12} \Omega_s \frac{1}{\tilde{\Delta}_s - \frac{\Omega_c^2}{4\tilde{\Delta}_R}} \end{aligned} \quad (1.3)$$

其中,对 $r = \Omega_c^2 / (4\tilde{\Delta}_s\tilde{\Delta}_R)$ 求和是由于耦合光子的重复辐射和吸收。物理量 $\tilde{\Delta}_s = \Delta_s - i\Gamma/2$ 和 $\tilde{\Delta}_R = \Delta_s - \Delta_c - i\gamma$ 为单光子和双光子(拉曼)的复失谐量,其中 Γ 和 γ 分别代表横向激发态和纵向基态的衰减率, N 为原子数密度, $\Omega_j = E_j$

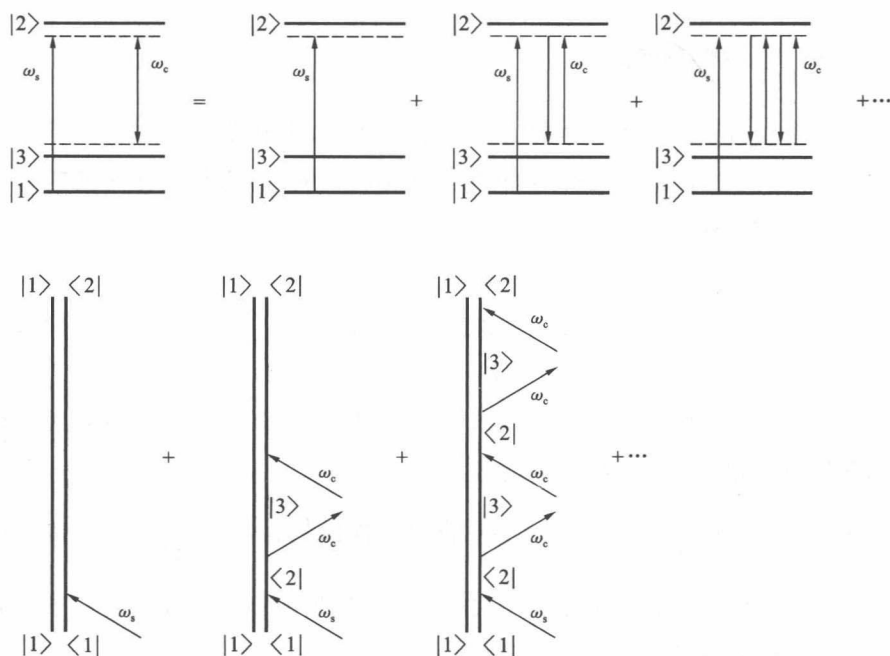


图 1.1 能级图与对应的费曼图,表明不同原子吸收路径间的干涉如何导致 EIT 效应

• $\mu_j/\hbar$ 还是代表电场振幅 E_j 经由偶极矩阵元 μ_j 引起的拉比频率。

对稳态极化谐振就信号频率(见式(1.3))在零双光子失谐($\Delta_R=0$)附近进行级数展开,我们可以得到群延迟和展宽的近似表达。假设耦合场是谐振的($\Delta_c=0$),则信号频率处折射率的实部和虚部($n_s = \sqrt{1+\chi_s} \approx 1 + P_s/(2E_s)$)可以写为

$$n'_s \approx 1 + \frac{2N\mu_{12}^2 \Delta_s}{\hbar\epsilon_0 \Omega_c^2} \quad (1.4)$$

$$n''_s \approx \frac{2N\mu_{12}^2}{\hbar\epsilon_0} \left(\frac{\gamma}{\Omega_c^2} + \frac{2\Gamma\Delta_s^2}{\Omega_c^4} \right) \quad (1.5)$$

虽然这些表达式足以表征光脉冲的基本延迟和展宽特性,但我们还是花了一些时间,用原子蒸气的光学深度来改写它们,因为这个物理量便于在实验中测量。在无耦合场的情况下,信号频率处的极化恰好是式(1.3)中的第一项:

$$P_{s0} = \frac{N\mu_{12}\Omega_s}{2\tilde{\Delta}_s} \approx 2N\mu_{12}\Omega_s \left(\frac{\Delta_s}{\Gamma^2} + i \frac{1}{2\Gamma} \right) \quad (1.6)$$

而且,我们很容易写出有、无耦合场时的线性光吸收系数,分别为 α 和 β :