

相干长度两种定义的区别和联系

梁 霄¹, 田 源², 刘 强¹

(1. 重庆理工大学 数理学院, 重庆 杨家坪 400054; 2. 重庆理工大学 设备处, 重庆 杨家坪 400054)

[摘 要] 对波列长度等于相干长度这一经典理论提出了不同的看法, 从原子光谱学的角度分析并通过实验验证了波列长度与相干长度之间的区别, 给出了相干长度两种定义的适用范围.

[关键词] 相干长度; 波列长度; 多普勒增宽; 迈克尔逊干涉仪

[中图分类号] O436. 1 [文献标志码] A [文章编号] 1673-8012(2010) 02-0079-03

相干长度是波动光学中的一个重要概念, 其基本定义为: 相干光能产生干涉效应的最大光程差 δ_m . 在一般的教材、专著中都对相干长度的本质用两种形式进行表述: 1) 根据原子发光的机理, 原子一次发光的波列长度限定了要观察到干涉条纹对应的光程差的最大值, 所以相干长度等于波列长度 L ($L = c\tau$, c 为光速, τ 为波列持续时间, 即波列通过某一参考点所用时间, 也叫相干时间); 2) 由于通常所说的单色光只是准单色光, 包含一定的波长范围 $\Delta\lambda$, 将影响干涉条纹的可见度, 所以相干长度等于 $\lambda^2/\Delta\lambda$. 在给出这两种定义后, 又根据傅立叶积分推导出 $L = \lambda^2/\Delta\lambda$, 因此认为这两种定义是对同一物理量的不同表述. 我们在这里对此结论提出了不同的看法.

1 理论分析

在一般的教材、专著中推出 $L = \lambda^2/\Delta\lambda$ 的关键之处在于用傅立叶积分证明了^[1]

$$\Delta\nu = \frac{1}{\tau}.$$

其中, $\Delta\nu$ 为光的频率宽度, τ 为平均波列持续时间.

$$\text{由 } L = c\tau = c \frac{1}{\Delta\nu} \Delta\nu = \frac{c}{\lambda^2} \Delta\lambda \text{ 可得}$$

$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}. \quad (1)$$

而实际上该论证过程考虑不够严密, 从谱线宽度

形成的角度看 $\Delta\nu$ 与 $1/\tau$ 并不相等, 这里针对原子光谱谱线宽度形成的 3 种因素逐项进行分析:

①自然线宽: 原子在自发辐射时, 从激发态返回基态, 发出能量放出光子, 但由于激发态和基态的能量不是确定的, 因此激发态和基态之间的能量差也具有不确定性, 从而导致所发出的波列中光的频率有一定范围^[2].

在只考虑自然线宽时, 波列持续时间 τ 应为原子平均发光时间, 此时显然用傅立叶积分可以推导出 $\Delta\nu = 1/\tau$, $L = \lambda^2/\Delta\lambda$ 是成立的.

②碰撞增宽: 原子在做无规则热运动时会产生碰撞, 而碰撞会中断原子的发射过程, 由于原子两次碰撞之间的时间间隔通常远小于原子平均寿命, 从而相当于缩短了原子的发光时间^[2].

在综合考虑自然线宽和碰撞增宽时, 波列持续时间 τ 应为原子两次碰撞之间的时间间隔. 因此也可以推出 $\Delta\nu = 1/\tau$, 相当于缩短波列长度 L 的同时增加了谱线宽度 $\Delta\lambda$, $L = \lambda^2/\Delta\lambda$ 也成立.

③多普勒增宽: 原子做无规则热运动时, 有的原子跑向参考点, 有的则远离参考点, 根据多普勒效应, 必然导致大量原子发射的光叠加起来的谱线增宽^[2].

但正是由于多普勒效应, 当原子跑向参考点时, 波列通过参考点的时间 (即波列持续时间) 会减少, 反之则会增加. 对大量原子而言, 其平均波列持续时间 τ 应该是保持不变的. 也就是说,

[收稿日期] 2010-01-05

[作者简介] 梁霄 (1975-), 男, 四川宜宾人, 实验师, 主要从事理论及实验物理方面的研究.

在多普勒效应的作用下将导致谱线增宽, $\lambda^2 \backslash \Delta \lambda$ 值减小而波列长度 $L = c\tau$ 保持不变, 因此可以得到 $L = \lambda^2 \backslash \Delta \lambda$.

以上 3 种因素对谱线宽度的贡献程度为: 自然线宽最小(通常为 0.005 nm), 后面两种因素中, 压力小时碰撞增宽贡献大(10 个大气压可使汞谱线增宽 1.2 nm), 压力小时多普勒增宽贡献大(室温下镉红光的谱线宽度为 0.038 nm)^[3]. 所以, 由于多普勒效应造成的 $L = \lambda^2 \backslash \Delta \lambda$ 显然是不能忽略的.

既然 $L = \lambda^2 \backslash \Delta \lambda$, 那么相干长度应该是哪个定义比较恰当呢? 由于这两种定义从不同的角度设定了形成干涉的最大光程差, 也即要形成干涉则光程差必须同时满足这两个条件, 因此由相干长度的基本定义可得:

$$\delta_m = m \ln(L \lambda^2 \backslash \Delta \lambda) = \lambda^2 \backslash \Delta \lambda \quad (2)$$

即对通常的光源而言, 其相干长度应为 $\lambda^2 \backslash \Delta \lambda$.

2 实验验证

2.1 实验方案

采用迈克尔逊干涉仪测量白炽灯光源及其通过 3 种滤色片(577 nm、436 nm、365 nm, $\Delta \lambda \approx 10$ nm)后形成的单色光的相干长度.

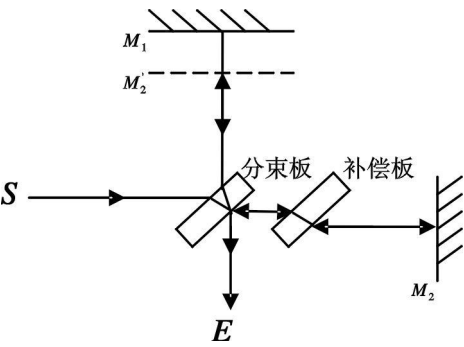


图 1 迈克尔逊干涉仪原理图

如图 1 所示为迈克尔逊干涉仪原理图. 从光源 S 发出的一束光, 经分束板分成两束光强近似相等的光束. 其中反射光向上到达可移动反射镜 M_1 , 再由 M_1 反射回来穿过分束板到达光屏 E. 透射光经过补偿板到达固定反射镜 M_2 , 再由 M_2 反射回来穿过补偿板并在分束板下表面反射后到达光屏 E. 此时在光屏上可观察到等倾干涉条纹, 图 1 中 M_2' 为 M_2 通过分束板反射所成的像.

测量时首先用激光作为光源调节迈克尔逊干涉仪出现明显的干涉条纹, 然后换上待测光源, 调

节可移动反射镜 M_1 , 使其向 M_2' 移动, 直致干涉条纹最清晰时记录下 M_1 的位置 d_1 (此时 M_1 与 M_2' 重合). 继续沿原方向移动 M_1 , 可观察到干涉条纹的清晰度越来越差, 当干涉条纹消失时记录下 M_1 的位置 d_2 , 则此过程中 M_1 移动的距离为该光源相干长度的一半, 即 $\delta_m = 2|d_1 - d_2|$ ^[4].

2.2 实验数据及分析

表 1 为 4 种光源相干长度的测量值及其 $\lambda^2 \backslash \Delta \lambda$ 的计算值(注: 白炽灯光源的中心波长和谱线宽度均约为 10^{-7} 数量级, 相干长度为 10^{-6} 数量级):

表 1 4 种光源相干长度的测量结果及其 $\lambda^2 \backslash \Delta \lambda$ 值

种类	$d_1 \backslash m$	$d_2 \backslash m$	$\delta_m \backslash m$	$\lambda^2 \backslash \Delta \lambda \backslash m$
白光	$3.271\,306 \times 10^{-2}$	$3.271\,529 \times 10^{-2}$	4.46×10^{-6}	10^{-6} 数量级
577 nm	$3.269\,680 \times 10^{-2}$	$3.269\,121 \times 10^{-2}$	1.118×10^{-5}	3.33×10^{-5}
436 nm	$3.270\,785 \times 10^{-2}$	$3.270\,269 \times 10^{-2}$	1.032×10^{-5}	1.90×10^{-5}
365 nm	$3.296\,829 \times 10^{-2}$	$3.297\,407 \times 10^{-2}$	1.156×10^{-5}	1.33×10^{-5}

通过对数据的分析, 我们可以发现 3 种单色光的相干长度存在以下规律:

- ①它们都大于白光相干长度;
- ②彼此之间非常接近;
- ③都明显小于用 $\lambda^2 \backslash \Delta \lambda$ 计算出来的结果.

为什么会出现这样的现象? 利用前面理论分析的结论可以做出很好的解释:

由于白炽灯所发出的光为连续光谱, 可视为 $\Delta \lambda$ 很大的单色光, 故对白光而言存在 $\lambda^2 \backslash \Delta \lambda$, 其相干长度为 $\lambda^2 \backslash \Delta \lambda$. 将白光通过 3 种滤色片相当于用滤色片从白光中截取了 λ 分别为 577 nm、436 nm、365 nm, $\Delta \lambda \approx 10$ nm 的 3 种单色光. 这 3 种单色光相对白光而言 $\Delta \lambda$ 大大减小, 而 λ 虽说也有变化但相对于 $\Delta \lambda$ 的变化来说很小, 以致于各单色光的 $\lambda^2 \backslash \Delta \lambda$ 将大大增加; 同时由于白光穿过滤色片后不会改变其波列长度, 故 3 种单色光的波列长度仍为白光波列长度 L. 因此各单色光的 $\lambda^2 \backslash \Delta \lambda$ 将超过自身的波列长度 L, 此时根据相干长度的基本定义有:

$$\delta_m = m \ln(L \lambda^2 \backslash \Delta \lambda) = L \quad (3)$$

即各单色光相干长度应为白光的波列长度 L. 从上述分析可知: 它们都应大于白光相干长度, 小于用其各自中心波长计算出的 $\lambda^2 \backslash \Delta \lambda$, 且彼此之间非常接近. 这正好解释了表 1 数据中所出现的规律, 因此也从实验的角度证明了前述理论分

3 结语

综上所述,我们可以得到这样的结论:对通常的光源而言波列长度 $L > \lambda^2 \Delta\lambda$, 因此相干长度应为 $\delta_m = \lambda^2 \Delta\lambda$; 而在某些特殊情况下(如白光通过滤色片), 则有可能造成波列长度 $L < \lambda^2 \Delta\lambda$, 此时相干长度应为 $\delta_m = L$.

在通常的教学和实验中, 由于波列长度 L 不好量化, 所以一般都使用 $\lambda^2 \Delta\lambda$ 来衡量相干长度的大小, 这刚好与普通光源的实际情况吻合, 因此也掩盖了 $L > \lambda^2 \Delta\lambda$ 的实质, 但从严谨的科学态度出发, 我们应该明确二者之间的关系及相

[参考文献]

- [1] 玻恩 M, 沃耳夫 E. 光学原理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 293—295.
- [2] 刘建科, 刘彩云. 原子光谱增宽的原因[J]. 光谱学与光谱分析, 2003(23): 605—606.
- [3] 狄区本 R W. 光学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986: 81—83.
- [4] 陈玉林, 李传起. 大学物理实验[M]. 北京: 科技出版社, 2007: 256.
- [5] 张静芳. 对影响光波干涉条纹可见度因素的探究[J]. 渝西学院学报: 自然科学版, 2004, 3(4): 24—27.

Difference and relation about two kinds of definition of coherent length

Liang Xiao¹, Tian Yuan², Liu Qiang¹

(¹ School of Mathematics & Physics, Chongqing University of Technology, Yangjiaoping Chongqing 400054, China;

² Equipment Department Chongqing University of Technology, Yangjiaoping Chongqing 400054, China)

Abstract: The different views were proposed about the classical theory that wave row length is equal to the coherent length. Base on the dates of experiment, the difference between a wave row length and the coherent length was analyzed from the atomic spectroscopy angle, and the applicable scope of two kinds of definitions coherent length of coherent length was given.

Key words: coherent length; wave row length; Doppler broadening; Michelson interferometer

(责任编辑 吴强)

(上接第 78 页)

- [15] 孙彩芹, 杨晓红, 闫勇彦. 纳米 WO_3 材料的制备及掺杂改性进展[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2009, 26(3): 86—90.

- [16] 吴强, 刘沙. Ni 铁磁粒子熵和热容量的影响分析[J]. 重庆文理学院学报: 自然科学版, 2009, 28(6): 19—24.

A new class of biological fluorescence marker

— Mn— and Cu—doped ZnSe (ZnS) d—dots

OU Hong—ye

(Editorial Office, Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition), Shapingba Chongqing 400047, China)

Abstract: The quantum dots of CdSe have been widely studied nowadays, but hidden dangers exist in the use of CdSe quantum dots in the field of biology, medical science, pharmacy and so on because of the poisonous Cd ion. So the first priority is to develop new quantum dots of non—cadmium which was used as biological fluorescence marker. This paper introduces the research progress, focusing on explaining the superiorities of Mn— and Cu—doped ZnSe (ZnS) d—dots compared with the poisonous Cd ion CdSe quantum dots, as well as the significance of studying and progress of the new class of biological fluorescence marker. It is believed that it will play an important role in the biological and medical field in the future.

Key words: biological fluorescence marker; doped; ZnS; ZnSe; quantum dots

(责任编辑 吴强)