

光速测量的发展

史志强 周衍勋

(陕西师范大学物理系)

光速是经典物理学中的一个重要的基本恒量。它的数值的测定及其特性的研究与近代物理学和实验技术的许多重大问题关系密切,并在现代计量科学的发展中占有重要地位,因此它一直受到物理学家们的广泛注意。1983年召开的第十七次国际计量大会正式通过了和光速直接有关的“米”的新定义:“米是光在真空中在 $(1/299792458)$ s的时间间隔内所进行的路程的长度”。由此更可显示光速的重要意义。

一、历史的回顾

光的传播速度问题,在古代是有很大争论的。虽然早在公元前一百年就有人提出了光速的有限性^[1],但在1676年以前人们一直认为是瞬时传播的。1607年,伽利略做了世界上第一个测量光速的实验,这个实验虽然没有得到肯定的结果,但其测量原理一直被后人采用。伽利略之所以没有获得预期的结果,是因为对于光速这样大的数值来说,当时还没有精确测量极短时间的计时器。当测量极短的时距还不可能的时候,唯一的办法是延长基线,即采用地球外层空间的距离为基线,从而产生了测量光速的天文学方法。

1676年,鲁麦(O. Römer)总结多次观察木星蚀的周期性延迟和超前现象,认为这是光速有限性所致,并利用当时的天文数据测得光速 $c = 214300\text{km/s}$ ^[2]。1725年,英国天文学家布喇德雷(J. Bradley)利用光行差法测得 $c = 295000 \pm 5000\text{km/s}$ 。这些天文测量开始扭转了人们对光速无限性的习惯看法。到了1849年,菲佐(A. H. Fizeau)最早在地面上用旋转

齿轮连续遮断光信号,测得 $c = 315300 \pm 500\text{km/s}$ 。至此,光速有限性的论断才被公认。1850年,佛科(J. L. Foucault)用转动镜面法使光源的象产生位移,测得的光速值与非佐法相近。1879年,迈克耳孙(A. A. Michelson,改进了佛科的装置,用旋转多面镜代替转动镜面。1926年,迈克耳孙经过近半个世纪的努力,根据1600次的实验结果,最后得到 $c = 299796 \pm 4\text{km/s}$ ^[3],成为当时公认的最精确的数据。

二、光速测量方法的分类

测量光速的方法可分为两大类,即直接法与间接法。其中直接测量光信号或电磁波信号的实验,测量的都是群速度。

1. 直接法

直接法又叫时间-飞程法,它所依据的原理就是伽利略测量光速的原理。上述鲁麦的木星蚀法、菲佐齿轮法、佛科与迈克耳孙的旋转镜法皆属此类。这种方法后来由于科学技术的发展得到了很大改进。1929年,卡罗劳斯(A. Karolus)和米特尔斯塔德(Mittelstaed)利用克尔盒代替齿轮作遮光设备,以及1938年麦金莱(Mckinley)的振动石英法^[2]也属此类。1950年,瑞典物理学家贝格斯特兰(Bergstrand)改进了克尔盒法,用光电测距仪法测得光速为 $c = 299793.1 \pm 0.3\text{km/s}$ 。

2. 间接法

间接方法不是直接测量光信号,而是借助于含 C 的公式测量相应的物理量来测算 C 。它的种类繁多,大体可分为四类。

(1) 天文方法(即布喇德雷的光行差法)

(2) 单位比值法

在电磁学中,任意一电学量的两种单位制的换算比为

$$c = \frac{Q_s}{Q_m} = \frac{E_s}{E_m} = \sqrt{\frac{C_s}{C_m}},$$

式中 Q 表电量, E 表电场, C 表电容,脚标 s 与 m 分别表示静电单位制与电磁单位制。科尔劳施(R. Kohlrausch)和韦伯(W. E. Weber)在1856年测量电量比,麦克斯韦(J. C. Maxwell)在1868年测量电场强度比,罗萨(E. B. Rosa)和多尔塞(N. E. Dorsey)在1906年测量电容比,分别得到 $c = 310800\text{km/s}$, 284300km/s , $299784 \pm 30\text{km/s}$ 。

(3) 电磁波法

它是根据光的电磁理论,用测量电磁波的传播速度代替光速的测量。其中包括:

(A) 雷达法:用三角方法测量地面上两点间的距离 L ,用电子技术测电磁波通过该距离的时间 t ,从而求得 $c = \frac{L}{t}$ 。1949年,阿斯拉克逊(Aslakson)用此法测得 $c = 299792.3 \pm 2.4\text{km/s}$ 。

(B) 频率波长法:用各种方法求已知频率 ν 的电磁波波长 λ ,从而求得电磁波的传播速度为 $c = \lambda\nu$ 。这种方法有:

(a) 波导管法:电磁波在波导管(或导线)中形成驻波,测此驻波的波长 λ ,由已知频率 ν 求得 c 。1891年,特罗布里奇(Trowbridge)用频率为5 MHz的电磁波求得 $c = 303600\text{km/s}$ 。

(b) 空腔共振法:用探针将高频振荡馈入抽空的并准确知道尺寸的空腔,使其在空腔中形成驻波,测出此谐振频率 ν ,由空腔的大小求出波长 λ 。1950年埃森(Essen)用0.1m的空腔求得 $c = 299792.5 \pm 1\text{km/s}$ 。

(c) 微波干涉法:根据迈克尔逊干涉仪原理,使已知频率的微波沿相互垂直的路径在反射面上反射后产生干涉现象,从而求得其波长。

(4) 带光谱法

直接由微波光谱学测出双原子分子或线性

多原子分子的转动常数 $B_m = \frac{h}{8\pi^2 I}$,再由红外振转光谱测出分子常数 $B_i = h/8\pi^2 I c$ (I 为分子转动惯量),则 $c = \frac{B_m}{B_i}$ 。1957年,兰克(D. H. Rank)等人用此法测得 $c = 299793.2 \pm 1.8\text{km/s}^{[3]}$ 。

三、光速测量方法的改进

1. 历史上几种较重要的方法

在过去的三百多年中,测量光速的方法经历了一系列重大改进,多达好几十种,基线长由天文距离(地球黄道直径约 $3 \times 10^8\text{km}$)直到0.1m的空腔,测量范围从0.001MHz的低频振荡直到可见光,不确定度由百分之几提高到百万分之几,在这里无线电技术的发展起了很大作用。所有这些方法都获得数值相近的“ c ”值。其中比较重要的方法要算安德森(W. C. Anderson)的克尔盒法和夫罗梅(K. D. Froome)的微波干涉法。

(1) 安德森的克尔盒法

安德森的实验装置如图1所示,其中 $M_1, M_2, M_3, M_4, M_5, M_7$,和 M_6 均为全反射面镜。光源 L 发出的光用克尔盒 K 调制成强度按正弦曲线变化的光束,其频率为19.2MHz。半透明镜 M_4 使该光束分为两路,一路经 M_3 反

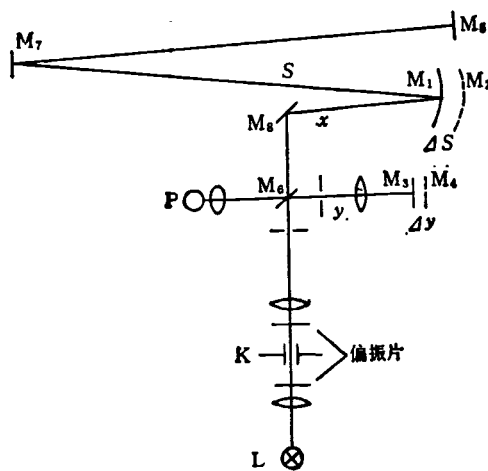


图1

射到光电池 P, 另一路经 M_1, M_7 和 M_3 也反射到光电池 P. 设 M_1, M_7 和 M_3 之间的光程为 S , M_1 和 M_6 之间的光程为 x , M_3 和 M_6 之间的光程为 y . 如果两路光程差恰为半波长的奇倍数, 则 P 接收到的光信号为极小, 并有关式

$$2s + 2x - 2y = (2n + 1)\lambda/2,$$

其中 n 为整数. 不用 M_1 而用 M_2 使光直接回到 M_6 , 调节 M_3 到 M_4 的位置, 则当 P 处光强为极小时有关系式

$$2x + 2\Delta S - 2y - 2\Delta y = \frac{\lambda}{2}.$$

将以上两式相减, 得

$$2S - 2\Delta S + 2\Delta y = n\lambda,$$

即只需测量距离 S 和短间隔 Δx 和 Δy 就可以求出光速, 从而大大简化了距离的测量. S 的平均值为 $171.8642 \pm 0.0017\text{m}$, ΔS 的平均值为 $2.4770 \pm 0.012\text{cm}$, 取 $n = 11$, 则光速为

$$c = 299894.8 + 34.91\Delta y\text{km/s},$$

其中 Δy 以 cm 为单位. 因 S 稍大于波长的偶倍数, 所以为了得到极小值, M_3 移动的方向和图上所示相反, Δy 应取负值. 安德森从 1939 年 5 月到 1940 年 7 月, 在 22 天内作了 2895 次实验, 最后求得光速值为 $c = 299776 \pm 14\text{km/s}^{[4]}$. 如果考虑每天的结果, 并取偶然误差, 则这个光速值应为 $c = 299776 \pm 4\text{km/s}^{[5]}$, 这是四十年代光速的最佳值.

五十年代, 综合空腔共振法、克尔盒法、雷达法、带光谱法和微波干涉法等上述各种方法

后, 求得的光速最佳值是 $c = 299793.0 \pm 0.3\text{km/s}^{[6]}$.

(2) 夫罗梅的微波干涉法

夫罗梅的微波干涉法如图 2 所示. 微波源是频率为 36.003GHz/s 的振荡器, 其输出进入两个频率调谐在 72.006GHz/s 的硅晶体谐波发生器. 一个谐波发生器是为测量仪器周围空气折射率的折射仪工作, 另一个谐波发生器的输出导向到分束器中. 微波由此分束器分成两束传输出去, 并被活动支架上的喇叭接收. 把两个接收喇叭接收到的信号混合起来便产生干涉, 活动支架每移动半个波长, 合成的结果便经过一个最小值. 活动支架的位移为 970 个半波长, 它是由光波长度标准确定的. 这样得到的微波波长乘以空气折射率和微波频率就给出了微波在真空中的相速度. 这种干涉仪的一个重要特点是用一个空腔谐振折射仪直接测量干涉仪附近的空气折射率. 频率测量的精确度至少可达 10^{-8} . 1958 年, 夫罗梅用该微波干涉仪测得 $c = 299792.5 \pm 0.1\text{km/s}^{[7]}$, 他的实验值后来得到其他一些实验的证实, 并相继被国际无线电科学协会 (URSI)、国际大地测量与地球物理学协会 (UGGI) 和国际天文联合会 (IAU) 等国际组织采用, 因而是六十年代光速的最佳值.

2. 方法的改进途径

光速的测量总是在以下三个方面进行改进:

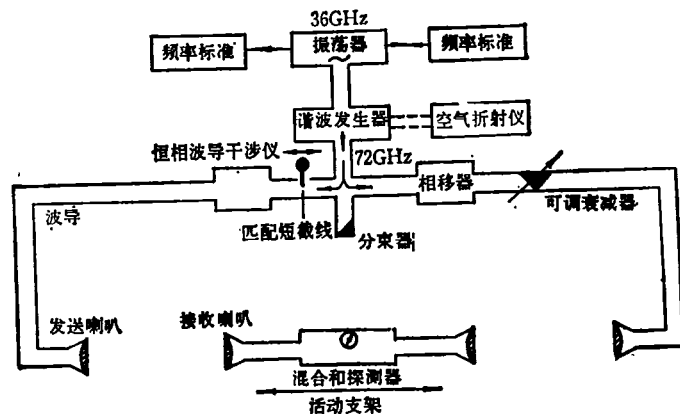


图 2

(1) 正确进行误差的估计和校正

在这方面,系统误差的计算尤为重要.1962年,麦克尼西(A. G. McNish)根据三十多年来所公布的光速值,曾对各种方法的误差作过较全面的分析^[6].他指出,驻波法、空腔共振法和微波干涉法虽然可以在室内进行,并且能人为地控制环境条件,但是由于电磁波的衍射,同时在反射时要深入镜面稍许,造成内空腔大小校正的困难;在单位比法中,电容器在电场的作用下也要发生形变;在带光谱法中,由于低压空气对红外线的吸收,相位移动和波长的相关性都会引入实验误差.这样,在权衡了所有间接方法测量光速的利弊之后,多数人倾向于用直接法测量光速.不过,在总结了从1950—1955年间所测得的数据后,发现所有直接法测得的精确值,都比间接法测得的精确值小14km/s,或者更多^[9].这是由于一些还没有发现的系统误差所致.这种误差很可能是由于光和镜面中电子的相互作用,使光的反射不能是瞬时的,每次反射都要延迟 2.58×10^{-10} s.所以,在光学方法中,因为光要经过多次反射,使测得的光速有所减小.这种由于反射而引起的误差,以往很少有人注意.

(2) 提高测量极短时间的精度

菲佐、佛科和迈克尔逊等人的方法的共同点是用机械方法遮断光信号,或用测量象的位移来测量光通过基线的时间,但凭目视方法确定遮断时间或象的位移,毕竟会使精确度受到限制.克尔盒法虽可测量到 10^{-9} s,但由于遮断不准,测距误差仍达50cm.近代无线电技术与光电元件的结合,大大提高了测量时间的精确度.在这方面提出过的方法主要有以下几种:

(A) 光电变换法^[10,11]: 光脉冲由相隔一定距离(等于基线长)的两面镜子反射到装有偏离板的光电变换器的阴极上,阴极发出电子并在荧光屏上得到放大的光象.因两镜到阴极的距离不同,光象的偏转也不在一处,由已知扫描频率即可测出与该位移所对应的时间,它的时间分辨率为 10^{-12} — 10^{-13} s.

(B) 相位移法^[11]: 原理与雷达测距法相

同,区别在于用光电倍增管将反射回来的光信号放大成电信号,再用电子位相计测出往返两光信号对应的电信号的位相迁移,根据电信号的频率即可求出二光信号相隔的时间.据估计,这种方法测出的时间误差只有克尔盒法的 $1/250$ ^[12].

(C) 高速照相法: 用高速照相机摄得从不同距离处的镜面反射来的光象,由软片上这些光象之间的距离也可以求得由各个镜面反射来的光所经过的时间.其时间分辨率亦可达 10^{-12} — 10^{-13} s.

(3) 缩短基线的长度

如果基线很长,当然对测量时间是方便的,但这会使整个实验不能在室内进行,同时基线全程上的空气压力、温度、湿度和色散等因素引起的误差估计也是困难的.所以在实验中力求缩短基线,以便人为地控制环境条件.要缩短基线,除了改进计时方法外,更有效的方法是提高遮断光源的频率.在这方面人们提出过的方法有以下几种:

(A) 利用热阴极充气管调制光^[11]: 给充满水银蒸汽的充气管加高频电压,光脉冲频率可达1.2MHz,与克尔盒的遮光频率 10^7 Hz相差不多,但装置简单.

(B) 超声调制: 这是利用光在超声波上的衍射原理制成的^[12].在装有两个石英片的超声池中,相向传播的两列超声波叠加后形成驻波,从而建立了一个相光栅,并使人射的平行光发生衍射,在超声池的另一侧装有一狭缝,它只使平行光的零级衍射象通过.这种衍射效应在超声波的一个周期内断续两次,从而使光强度受到调制,频率可达16MHz.卡罗劳施估计用这种方法测出的光速可准确到3km/s.这个方法的优点是装置简单,光强度大,并且可应用到紫外区,缺点是由于石英的固有频率,使调制频率不能连续变化.

(C) 光子关联法: 超声调制频率最大可以提高到300MHz^[13],桑德尔(J. H. Sanders)^[14]提出应用相干光中的光子关联可进一步提高调制频率,这种方法的优点是不必直接调制光源.

光子关联是使频率为 ν_1 和 ν_2 的两相干光投射到光敏面上,则这个光敏面就发出频率为 $(\nu_1 - \nu_2)$ 的光电流。根据这一原理,使频率为 ν_1 和 ν_2 的两束光在半镀银层上各分为两束,再分别投到 P_1 与 P_2 两光电管上,它们便发出频率均为 $(\nu_1 - \nu_2)$ 的两个光信号 S_1 和 S_2 。 S_1 和 S_2 的合成是频率为 $(\nu_1 - \nu_2)$ 的输出 S_3 , S_3 的振幅由 S_1 与 S_2 之间的相差而定。当 P_1 不动, P_2 沿辐射方向远离光源,相对移动距离 $c/2(\nu_1 - \nu_2)$ 时,信号 S_3 的振幅便由一个极小值变到相邻的一个极小值,这相当于菲佐齿轮法中两相邻的遮断。这个方法要求使用单色性很高的激光光源。如果进一步用由激光产生的塞曼分裂线作为光源,则单色性就更高,与之对应的调制频率可高达 $10^9 - 10^{10}$ MHz,比以上各种方法所能达到的调制频率都高。

四、最新的进展

1960年激光出现以后,由于它是一种单色性极好的光源,可望更精确地测量光速,因此人们把注意力转向激光。用激光测量光速的原理和微波干涉法相同,只是在现代技术中,用电子系统来计算干涉条纹和处理测量结果。用激光测量光速还必须解决以下三大难题。第一是稳频问题,即设法寻找适于稳频的窄谱线以及解决由于环境温度和机械振动等外界干扰所引起的激光频率随时间变化的问题。目前已进行了大量工作,探索稳频的方法,其中使用较多的有用甲烷(CH_4)的饱和吸收线稳定的 $3.39\mu\text{m}$ He-Ne 激光器,用碘分子的饱和吸收线稳定的 $0.63\mu\text{m}$ He-Ne 激光器以及用 CO_2 的饱和荧光稳定的 $9-11\mu\text{m}$ CO_2 激光器等。第二是频率测量问题。目前采用的频率基准是铯(^{133}Cs)原子钟的微波谱线,因此,为了测量激光频率并把它和标准频率相比较,必须建立从微波到光波波段的频率链。第三是波长测量,即测量激光波长并把它和长度基准——氪(^{86}Kr)灯的谱线作比较。有关这方面的资料很多^[15,16],并且近年来又有新的进展^[17]。英国国立物理实验室

(NPL)^[18] 和美国国家标准局(NBS)^[19] 在1970年最先用激光测量了光速,其结果分别是 $c = 299792459.0 \pm 0.8\text{m/s}$ 和 $c = 299792457.4 \pm 1.1\text{m/s}$,其不确定度已达 10^{-9} ,比以往的方法提高了大约100倍。1973年6月,国际计量局米定义咨询委员会(CCDM)根据这些新的实验结果,在 M_2 推荐书中推荐了新的光速值为^[20]

$$c = 299792458 \pm 1\text{m/s}.$$

这是当前公认的光速最佳值。

用激光测量光速使光速的实验测量进入了一个崭新的阶段,这一方面是由于它使测量准确度提高了很多,另一方面是由于它对讨论国际“米”的重新定义特别重要。近年来不断改进实验,1978年NPL测得新的光速值^[21]为 $c = 299792458.8 \pm 0.2\text{m/s}$,1979年加拿大国家研究委员会(NRC)测得的值^[22]为 $c = 299792458.1 \pm 1.9\text{m/s}$ 。这些结果和CCDM的推荐值基本一致,其不确定度都在 $\pm 4 \times 10^{-9}$ 之内。 ^{133}Cs 原子钟的不确定度可达 $\pm 1 \times 10^{-13}$,而 ^{86}Kr 基准的不确定度只有 $\pm 4 \times 10^{-9}$ 。可见,光速的不确定度完全由复现国际米定义的不确定度所决定。例如,1978年NPL测得的光速值,若把复现米定义的不确定度包括进去,则其值应为 $c = 299792458.8 \pm 1.2\text{m/s}$,这基本上说明了国际上目前所能达到的最高水平^[23]。因此,重新定义“米”基准已是势在必行。1979年6月,CCDM在 M_2 推荐书中提出新的“米”定义是^[22]: “一米等于真空中平面电磁波在 $(1/299792458)$ s 内传播的距离”。1982年,在CCDM的第七次会议上,对米的新定义的措辞进行了详尽讨论后,建议的“米”定义是^[24]: “米是在 $(1/299792458)$ s 内光在真空中所通过的路程的长度”。按照这个定义,光速值在今后一段相当长的时间内将保持不变,并通过光速值把长度基准和时间基准统一起来,二者共用一个基准而不是两个基准。这样,长度测量的精确度将依赖于频率测量精确度的提高;而频率测量的精确度本来就比较高,并且有可能进一步提高,从而使计量工作出现一次大的飞跃。

总之,用间接方法测量光速的工作已取得

很大进展,但是用直接方法测量光速的工作仍是一个重要课题。研究光速不变性的各种实验曾经为光速的精确测量作出了很大的贡献;今后,光速不变性实验和探索超光速现象的各种实验,仍将会促进并发展光速的实验测量工作。

参 考 文 献

- [1] D. R. E. Gel, *Opticien Belge*, 62(1959), 189.
 [2] Handbuch der Physik, Bd XXIV, Springer Verlag, (1956), s. 1—31.
 以下凡没有注明的光速值都出自此书。
 [3] H. W. Thompson, *Advances in Spectroscopy*, 1 (1959), 83—85.
 [4] Anderson, *J. Opt. Soc. Amer.*, 31(1941), 187.
 [5] 同[2], s. 14.
 [6] 同[2], s. 31.
 [7] K. D. Froome, *Proc. Roy. Soc. A*, 1248(1958), 109.
 [8] A. G. McNish, *IRE. Trans. Inst.*, 3-4(1962), 183.
 [9] R. A. Miller, A. Lopez, *J. Opt. Soc. Amer.*, 49 (1959), 930.
 [10] K. C. Вульфсон, *Докл. АН. СССР.*, 125(1959), 1223.
 [11] Я. А. Крафтиахер, *ИЗВ. ВУЗ. ФИЗ.*, 5(1962), 65.
 [12] A. Karolus, D. Fries, *Ann. Phys.*, 4(1959), 269.
 [13] B. R. Rao, J. S. Murty, *Nature*, 178(1956), 160.
 [14] J. H. Sanders, *Nature*, 183(1959), 312.
 [15] 赵克功,倪育才, *物理*, 8(1979), 369.
 [16] H. Walther, *Laser Spectroscopy of Atoms and Molecules*, (1976), 349—366.
 [17] 鲁绍曾,傅烈堂译, *国外计量*, No. 2 (1983)1.
 [18] T. G. Blaney et al., *Nature*, 251(1974), 45.
 [19] R. L. Brager, J. C. Hall, *Appl. Phys. Lett.*, 22 (1973), 196
 [20] J. Terrien, *Nouv. Rev. Opt.* 4(1973), 215.
 [21] P. T. Woods et al., *Appl. Optics*, 17(1978), 1048.
 [22] K. M. Baird et al., *Optics Comm.*, 31(1979), 367.
 [23] W. R. C. Rowley et al., *Optics Comm.*, 34 (1980), 429
 [24] W. R. C. Rowley, *国外计量*, No. 2 (1983), 6.

激光化学沉积

邱 明 新

(上海市激光技术研究所)

激光化学沉积可分为两大类:激光光致热分解沉积与激光光分解沉积。激光光致热分解沉积是用激光束加热固体局部表面,使其达到高温,金属有机化合物分子碰撞在被加热的固体表面上时,就会在高温中分解成金属原子沉积下来。1972年,纳尔逊(Nelson)和理查森(Richardson)^[1]做了一个开创性的实验。他们将二氧化碳激光束聚焦在一根碳棒上,碳棒被放在充有碳氢化合物的气室中,碳氢化合物被光致热分解,碳沉积在激光照射的区域。激光光分解沉积则是用紫外激光束照射固体表面,表面附近的金属有机化合物分子被光离解,离解后的金属原子沉积在固体表面。1979年,埃利希(Ehrlich)小组首次使用这一方法^[2]分解二甲基镉,得到的镉原子在石英片上的沉积速率为 $313 \text{ \AA}/\text{s}$ 。

八十年代初,激光化学沉积的研究发展得很快,从微区沉积金属膜层的研究发展到大面积膜层的激光沉积,从金属膜层的沉积发展到金属氧化物和金属化合物的沉积,从单一膜层发展到扫描光刻、激光沉积掺杂、沉积产生欧姆接触和集成电路修补等固体电子学技术,从而使它具有沉积光波导和制造太阳能电池的能力^[3]。已用于激光化学沉积的元素有 C, Cd, Zn, Sn, W, Fe, Al, Co, B, Si, Ga, Ge, Cr, Mo 和 Pt 等,沉积的化合物有 ZnO , SiO_2 和 Al_2O_3 等。

激光化学沉积的理论基础是激光与物质的相互作用,它是激光与光化学、表面物理学以及固体物理学的交叉学科。它涉及大分子的光吸收激发、分子内部能量的转移、单步光离解和多步光离解、表面的附着与再蒸发、表面扩散与分子团形成、激光引起的原子在晶格中的扩散和