

# 激光生物光谱

雷仕湛

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

激光光谱技术有很高的光谱分辨率和分析灵敏度, 利用它可以深入地研究生物分子反应动力学及某些生物分子的光化学反应机理, 把激光生物学的研究提高到分子水平, 有助于阐明生物分子的结构和功能, 揭示生命现象的奥秘。本文介绍了激光皮秒光谱、荧光光谱、反射光谱、透射光谱等技术, 在研究生物分子、生物细胞、各种生物过程以及诊断癌症等方面的进展及应用前景; 同时也介绍了几种生物光谱仪器。

我们知道, 利用光谱技术能够了解物质结构, 物质成分和它们的含量, 而且分析灵敏度和精度都很高。所以, 这门技术在生产实践和科学研究中得到广泛应用。不过, 它在生物学这个领域用得还比较少, 因为(1)生物分子是大分子, 它们的光谱结构相当复杂; (2)生物组织的发光强度比较弱, 需要高灵敏度的探测技术; (3)与分析其他材料样品不同, 如果对生物样品也采用普通光谱分析技术使用的激发方式使它发光, 便比较容易造成生物组织损伤; (4)生物组织内发生的各种化学、物理过程很迅速, 通常的光谱技术达不到所要求的时间分辨率。激光为生物光谱提供恰当的激发, 而且利用激光技术发展起来的高分辨率和高灵敏度光谱技术, 能够精确地分辨生物体中发生的各种过程。现在, 激光光谱技术已开始深入到生物学、医学领域, 成为研究生物分子、细胞、各种生物过程以及医疗诊断和监测的重要手段。因篇幅限制, 这里将只介绍皮秒光谱、荧光光谱、反射光谱、透射光谱在这两个领域的应用, 而激光拉曼光谱就不介绍了。

## 一、生物分子状态变化研究

这项研究需要使用激光时间分辨率光谱技术, 它是可用来研究在皮秒 ( $10^{-12}$ s) 时间内, 原子、分子的能量状态或其他物理参数变化过

程的光谱技术。有两类, 一类是皮秒吸收光谱, 另一类是皮秒发射光谱。生物体内的各种生物物理过程和生物化学过程, 特别是其中的能量转移过程, 以及生物大分子中的原子、分子或者支链在外来作用下重新分布等, 从开始发生变化到过程结束, 整个时间间隔非常短促, 大约在纳秒量级 ( $10^{-9}$ s), 有的还短到皮秒甚至飞秒 ( $10^{-15}$ s) 量级。所以, 了解生物体中各种微观动力学过程, 需要使用时间分辨率光谱技术。

现在科学家们利用激光皮秒光谱技术, 研究了脱氧核糖核酸 (DNA) 和生物分子中的连贯态和非连贯态, 并且获得了成果。我们已经知道, DNA 有双螺旋结构, 两条互补的多核苷链氢键相连, 共同绕主轴盘旋。染料分子(比如吖啶)是以接近垂直于双螺旋的方向进入这些结构的。但是, 这些染料分子进入后会引起 DNA 分子发生些什么变化? 现在利用偏振皮秒脉宽激光激发 DNA 分子, 根据得到的光谱偏振变化, 初步地弄清了一些发生的一些变化过程。

血红蛋白和肌红蛋白都是生物体中的蛋白质, 前者的作用是运输  $O_2$ , 后者的作用是储存  $O_2$ 。它们对  $O_2$  的作用过程又是怎样? 现在利用激光皮秒光谱技术, 也让我们获得了不少有关这方面的知识。图 1 是用纳秒脉冲激光研究羧基血红蛋白光解过程得到的差光谱图<sup>[1]</sup> (即光致产物与稳态参照物之间的吸收差与人射光波长的

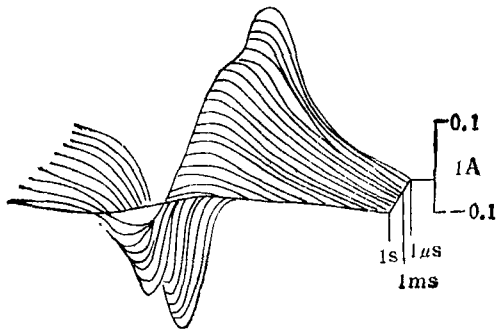


图 1

关系)。图中左边的谷表示羧基血红蛋白在 419 nm 处的饱和吸收作用,而右边的峰表示退束缚的血红蛋白在 430nm 处的吸收。将得到的光谱资料经电子计算机分析,便得到有关血红蛋白结构以及它在变化过程中所出现的中间产物等的信息。

我们的视觉器官是怎样工作的,这是古老而又是普遍感兴趣的课题。尽管科学家们对视觉过程已进行了大量的研究工作,但是依然还有许多问题没有弄得很清楚。比如说,视觉细胞吸收了光辐射之后发生的各种事件的时序,以往只知道它们发生的时标是小于毫秒。现在采用皮秒激光光谱技术,研究了深紫红质在室温条件下的形成和衰变动力学过程,表明它的形成时间是 6ps 左右,并以大约 30ns 的时间常数衰变为第二个中间产物——光视紫红质,即使是在很低的温度下,光视紫红质出现的时间也很快,约为 36ps。有鉴于此,人们对现有的生色用过程的说法便产生疑问,因为在这么短的时间内,很难设想生色团会发生完全的顺式→反式同分异构化。取而代之,人们现在提出质子易位作为原始光化过程的机制。

利用激光皮秒光谱技术也研究了光合作用过程。采用波长 514nm、脉冲宽度 140ps 的激光激发绿藻,为防止发生光合反应中心闭合效应,测量时一边使绿藻悬浮液流动,一边进行测量。实验发现,叶绿素发射的荧光信号中,属于波长 670nm 和 700nm 的荧光衰减特性不相同。属于短波长这边荧光信号是单一指数函数衰减,时间常数是 600ps;长波长这边的荧光信

号则还含有时间常数 100ps 左右的衰减成分<sup>[4]</sup>。经过分析,人们认为,衰减时间常数 600ps 的成分是对应于反应中心打开的状态,时间常数 100ps 的成分对应于反应中心闭合状态。

## 二、细胞、生物分子功能研究

采用激光荧光光谱技术可以进行这项研究。在停止激发之后立即中止的发光称为荧光,它是原子、分子或者离子从激发态向基态跃迁时产生的。用脉冲激光激发样品使之发荧光,并用光接收器进行时间分辨探测,放大后在示波器上显示,便可以获得样品的荧光时间分辨率光谱。它的时间分辨率取决于接收器和探测元件特性,采用 Boxcar 积分仪扫描信号时,得到的时间分辨率  $\leq 1ns$ 。

利用激光激发组织细胞发射荧光有两种做法。一种是在激光激发下由生物分子本身发生的,它称为原生荧光,用紫外波段激光激发,从游离的生物分子可以很容易得到这类荧光光谱;另一种是由结合在生物分子特定位置上的染料发出的,它称为二次荧光。如果细胞各种成分吸收紫外光以后发射的荧光光谱相互重叠,这时利用生物分子的原生荧光研究这些生物分子以及它们的相互作用,会遇到比较大的麻烦,这时就可以选择适当的染料,让它有选择性地与某些分子结合,利用二次荧光,在生物分子原位上研究它们就比较方便了。

用普通光谱技术研究活细胞,观察与活细胞生存本质有关的现象时会遇到一些障碍,比如为了满足研究对象是活细胞这一条件,必须采用弱光激发;为避免紫外辐射损伤细胞(核酸在紫外波段存在强吸收峰),激发波长被限定在近紫外(300nm 以上)到可见光这个区间,这样一来,激发是非共振的。在这种情况下,只能引起瑞利散射或拉曼散射过程,于是细胞内各种成分形成的光谱相互叠加,不容易进行分析辨认。激光有很高的单色性,能够有选择地激发细胞内某种成分,总激发光功率虽然不高,但被激发的成分却能够产生足够强度的光辐射。而且,

得到的光谱图也大大简化,方便辨认分析。现在,利用激光荧光光谱技术,成功地研究了细胞新陈代谢的变化。动物和人类的细胞是属于他营类细胞,它必须从周围环境中获得营养物(比如葡萄糖)才能生存。细胞中的辅酶 NADH 和 NAD 是连系细胞中营养物的分解和 ATP 形成过程。NAD 的还原态(即 NADH)在波长 340nm 附近有比较宽的吸收峰,并且在 480 nm 附近发射荧光。因此,480nm 这个荧光峰的强弱也就反映 NADH 的分子浓度;而氧化态 NAD 不吸收波长 340nm 的辐射,也不产生荧光。所以,根据组织细胞被激发后波长 430 nm 的荧光强度变化,便可以知道 NADH 的含量变化,从而也就可以推知细胞新陈代谢的变化情况<sup>[3]</sup>。

此外,利用激光荧光光谱也能够辨认染色体。当哺乳动物和植物细胞分裂中期染色体的 DNA 被吖啶类染料染色时,在激光激发下将产生特征荧光图象,根据它们就可以辨认染色体。

通过测定药物在细胞内的荧光衰变曲线,可以确定组织内及单个细胞内药物的分布状况,以及药物与组织的不同细胞成分相互作用状况。用荧光素钠给细胞核染色,用某种波长的激光激发它,通过分析得到的荧光脉冲形状,便可以确定细胞核和细胞浆的横截面尺寸,这两个参数对于病理学研究是很有用的。因为由细胞核产生的荧光比细胞浆产生的亮,所以根据实验得到的荧光脉冲形状,便可以算出细胞核和细胞浆的截面尺寸来。

Cereek 等人研究了淋巴细胞内荧光素荧光偏光度,发现细胞内的一些物理量与偏光度有关系<sup>[4]</sup>,也就是说,通过测定偏光度可以了解细胞的一些物理特性。一般来说,由于染料分子旋转的布朗运动,也会使偏光度降低。但是,由这种因素引起偏光度的降低是呈指数函数形式变化,时间常数与  $\eta/T$  成比例,式中  $\eta$  是溶液的粘度, $T$  是温度。向淋巴细胞注入染料后,用激光激发得到的荧光偏光度明显地偏离指数函数关系,在比较长的时间内依然保持偏振光;

而且激发波长不同,得到的荧光偏光度也不相同,激发波长长的,得到的荧光偏光大。

### 三、细胞组织的激光反射、透射光谱

光束在传播过程中遇到物质时,一部分光束在物质表面反射,另外一部分透射出物质,那束透射光束构成物质的吸收光谱,反射光束也能够获得物质的光谱,并称为反射光谱。透射光和反射光一般是同时发生的,所以,物质的反射光谱和透射光谱(吸收光谱)是同时出现的。

各种波长的激光在体表上的反射、透射率,组织细胞对各种激光波长的吸收和反射率,是研究激光生物效应,开展激光医疗的重要参数。生物工作者有这样一个概念,组织和细胞中含大量水分,对于 CO<sub>2</sub> 激光来说,水是最好的吸收介质,组织的汽化、切割和凝固主要是水吸收激光的能量转变成热而起作用的。事实上,人体浅表组织——皮肤、眼的角膜含有许多蛋白质和胶原,这些物质有与水明显不同的吸收和散射特性,要想选择达到最佳切割、光汽化、光凝作用的激光波长,只靠水的热传导以及水的散射衰减这样的简单模型是不够的,需要对各种组织的光学特性作深入的研究。现在,科学家用激光已经获得了各种生物组织的反射、透射光谱。需要说明一点的是,用激光得到的生物组织透过率,与用普通光得到的会有差别。比如,用 2mW He-Ne 激光(波长 632.8nm)测量玫瑰茄种子的透过率是 28%,而用普通红光测量,透过率只有 0.3%,相差二个数量级。

图 2 是人体表层、膀胱、胃组织的透射光谱,它们在紫外光波段的透射率很低,红光部分透射率最大。以厚度 2mm 的样品计,两者的透射率相差 2 到 3 个数量级<sup>[5]</sup>。从我们的视觉来说,这三种组织的颜色相差比较大,但从它们的透射光谱来说,却是大致上相同。这表明,凭感觉器官来判断组织的光学特性是会出现比较大的误差。谱图中膀胱组织的曲线在波长 542.7nm 和 576.4nm 处出现的凹峰,是组织内的血液产

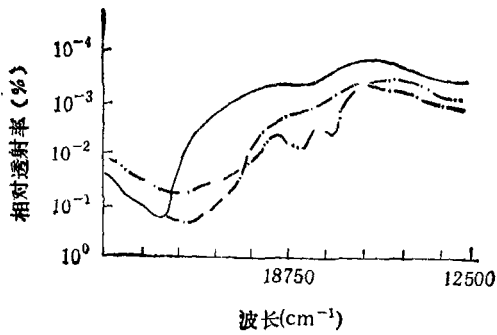


图 2

生的。这预示着，人体各部分组织透射光谱的差别，主要是里面血液含量不同造成的。

人体皮肤对光的反射不仅仅发生在皮肤表面，还发生在皮肤以下的各组织层。例如，用单层皮(表皮+真皮)得到的反射比曲线，就与激光照射在活人手指皮肤表面得到的反射比曲线全然不同。图 3(a) 是单层皮的反射比曲线，(b) 是手指的反射比曲线<sup>[6]</sup>。组织越厚，组织层数越多，反射次数越多，反射比也越高。

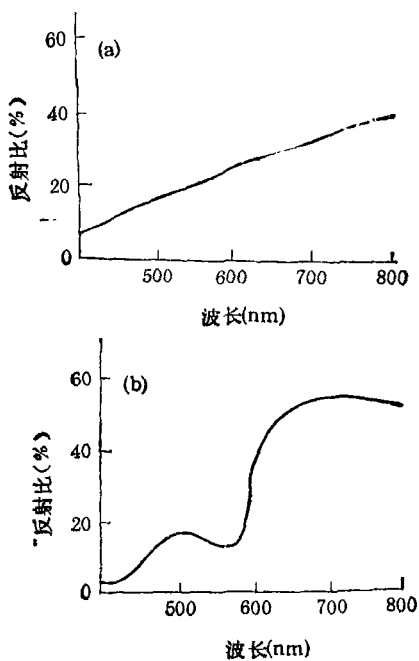


图 3

象下面将要谈到利用激光荧光光谱进行癌症诊断那样，人们也在设想利用组织的透射(反物理

射)光谱对人体器官进行诊断。现在，利用纤维内窥镜观察获得了胃粘膜的反射光谱；用腹腔镜获得了肝脏等器官的反射光谱，并且发现正常组织与癌变组织的光谱特性存在差异。利用肌肉的反射(透射)光谱，可以比较准确地确定机体组织坏死的界线，这种判断在军事上和临床上都有重要意义。图 4<sup>[7]</sup>是狗肌肉的反射和透射光谱图。它有如下三方面的光谱特征。在 190 至 860nm 光谱范围内，正常组织的反射率是随生物组织厚度的增加而增加，而在受伤的肌肉内，它的厚度虽然比正常肌肉厚，但反射率却比正常肌肉小。可以这么说，受伤肌肉的反射率小于同样厚度正常肌肉的反射率。此外，受伤肌肉的反射谱和透射谱在 760nm 处呈现明显的凹陷；而正常肌肉在这个地方不出现凹陷，它是在 415nm, 542nm 和 578nm 处出现凹陷，它们是狗血液的吸收峰。

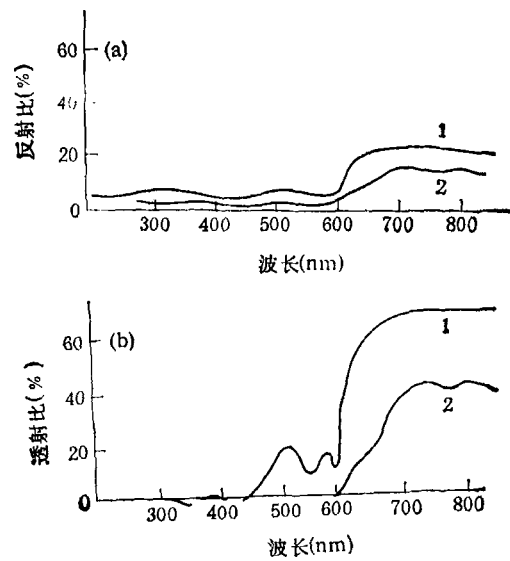


图 4

(1) 厚 1.25mm 正常肌肉；(2) 厚 1.31mm 受伤肌肉

#### 四、诊断癌肿瘤

诊断和治疗癌肿瘤是医学上重点攻克的课题。由于量子生物学的发展和激光在生物学应用的发展，利用激光光谱技术诊断治疗癌肿瘤的研究也开展起来。有两种做法：一种是根据

荧光物质与肿瘤细胞有比较强亲和力的原理,在病人服下或注入荧光物质后一段时间内,接受激光照射。残留在癌组织上的荧光物质在激光的激发下发出荧光。例如服用四环素,在癌组织上发出蓝色荧光,服荧光素钠盐时发黄色荧光,注入血卟啉时发红色荧光。根据目测的色度或者记录下来的荧光光谱曲线,便可以确定癌组织的部位。

当然,在激光的激发下,肿瘤组织和正常组织均会发出荧光,但两者的荧光强度和荧光衰减曲线形状不相同。在注入血卟啉 24 小时以后,肿瘤组织细胞内的血卟啉含量是相应部位正常组织细胞含量的五倍,因此二者的荧光强度有比较大的差别;其次,由血卟啉产生的荧光信号和组织产生的自体荧光信号曲线不相同,自体荧光曲线的初始衰减比较快,而血卟啉的则比较缓慢(时间常数约 8.7ns)。

第二种做法是利用所谓自体荧光。人体组织在激光的激发下也发出荧光,但癌组织和正常组织有不同的分子结构,它们有自己的固有荧光光谱特征。例如,在紫外激光激发下,正常组织产生的是蓝白色的荧光,而癌组织发的是暗红色的荧光。进一步利用光谱仪分光,会发现正常组织的荧光光谱峰值位置与癌组织的不同。例如正常宫颈组织或宫颈良性病变,它们的荧光光谱峰值位置在 470.0nm,而宫颈癌的荧光峰是在 420.0 nm<sup>[8]</sup>。用氩离子激光(波长 488.0nm)激发离体的肠、小肠腺、喉、乳腺等癌标本以及相应的正常组织,发现它们的自体荧光光谱有这样的特征:癌组织的荧光光谱是双峰结构,而相应的正常组织的是三峰结构,而且癌组织一主峰位置较正常组织的有 10.0nm 左右的位移<sup>[9]</sup>。用近紫外激光(氩离子激光 365nm 或 N<sub>2</sub> 激光 337nm)激发,属于癌组织的荧光光谱在 630 nm 或 690 nm 附近出现光谱峰,而正常组织在这里不出现谱峰。以上的荧光光谱特征,可以用作癌症诊断的手段。根据已有的临床试验资料,用这种方法对近百例口腔癌的诊断结果,与病理切片检查的符合率为 89%<sup>[10]</sup>。诊断 112 例宫颈癌,与用阴道镜检查的符合率

为 100%,与涂片法检查的符合率为 83%;宫颈非典型增生用自体荧光光谱法诊断的符合率达 90%,而用阴道镜检查的符合率则只有 69%<sup>[11]</sup>。不过,利用自体荧光诊断也有局限性,例如对舌面癌组织的诊断就不灵敏。

癌组织的特征荧光光谱峰 630nm 和 690 nm 与血卟啉的特征荧光峰相合。所以,人们认为癌组织的这两个自体荧光峰也是由血卟啉产生的。当然,这血卟啉不是从体外注入的,主要是人体内的血红蛋白分解形成的,它称为内源性血卟啉。

为了获得最佳诊断效果,人们也研究了注入药物之后进行激光照射的恰当时间。用氩激光对 20 只纯 BALB/C 小白鼠移植子宫颈癌与正常子宫颈作的激发荧光素钠荧光光谱得到的结果是,注入药物 12、24、26h 后,癌组织与正常组织的荧光强度分别为 26:1,5:1,3:1,48 小时后两种组织的荧光强度接近相等<sup>[12]</sup>。这预示着注射药物后 12 小时照射激光,诊断效果最佳。

也研究了活体的荧光光谱与纯血卟啉的荧光光谱,发现两者有明显的区别。图 5 是血卟啉的荧光光谱和在活体癌组织内的血卟啉荧光光谱。这意味着,血卟啉和癌组织相结合,产生

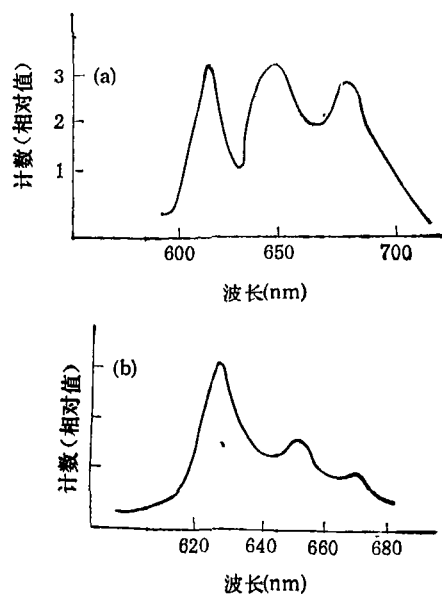


图 5 (a) 血卟啉荧光光谱; (b) 活体癌组织的血卟啉荧光光谱

卟啉类化合物<sup>[1]</sup>。

除了用荧光光谱外,现在也研究使用光声光谱技术诊断癌症。光声光谱是利用光声效应获得物质的光谱,它的光谱强度不是由光辐射强度,而是用声强度来表示的。这种光谱技术有很高的分析灵敏度,可以达到 $10^{-14}\text{g/cm}^3$ 。利用光声光谱研究细胞、血液对光辐射的吸收,实验手续比其他光谱技术简便,测量准确度也比较高。现在采用双光束光声光谱实验方法研究了人体胃内壁、子宫内壁、肺以及乳腺等癌组织和正常组织的光声光谱,样品是病人手术切除的离体组织。实验发现,以上四种癌组织都在波长 $630\text{nm}$ 附近出现吸收带,而正常组织在这个波长上不出现吸收带。因此,可以认为, $630\text{nm}$ 吸收带是反映癌组织的特征谱带<sup>[4]</sup>。

此外,人们还利用激光光谱技术研究微生物的运动状态、生物组织对药物吸收的特异性和生物病毒。Berge等人根据激光散射光频率与微生物(或精子)运动状态有关的原理,制成了激光多普勒谱仪,用于研究微生物的运动状态<sup>[4]</sup>。用激光技术研究了盐酸四环素的光谱,国产盐酸四环素在 $230\text{—}400\text{nm}$ 波段对紫外光有强吸收,吸收峰在 $272\text{nm}$ 和 $359\text{nm}$ 附近。用氮激光(波长 $337\text{nm}$ )激发,产生黄色的荧光。

通过比较用盐酸四环素和不同盐酸四环素处理的动脉粥样斑块吸收光谱,发现前者的吸收光谱轮廓与盐酸四环素的吸收光谱轮廓相似,谱峰位置基本相同<sup>[4]</sup>。这说明了动脉粥样斑块对盐酸四环素有特异吸收。

激光光谱技术也用到生物病毒的研究。林星等<sup>[4]</sup>利用激光研究了五种水稻病毒并获得了它们的吸收光谱、发射光谱和拉曼光谱。锯齿叶矮缩病毒的主吸收光谱峰在 $207\text{nm}$ 和 $294\text{nm}$ ,东格鲁病毒、矮缩病毒的主吸收峰分别在 $268\text{nm}$ 、 $280\text{nm}$ 。各种病毒的荧光光谱主谱带位置和谱带位置也各不相同,它反映出各种水稻病毒的结构是不相同的。林星等又进一步研究了水稻病毒的拉曼光谱,从中可以了解病毒的振动结构。几种水稻病毒的拉曼光谱位置是:簇矮病毒为 $2912\text{cm}^{-1}$ , $2960\text{cm}^{-1}$ , $3023$

$\text{cm}^{-1}$ , $3158\text{cm}^{-1}$ ;锯齿叶矮缩病毒为 $2876.6\text{cm}^{-1}$ , $3028.4\text{cm}^{-1}$ , $3149.8\text{cm}^{-1}$ , $3176\text{cm}^{-1}$ , $3191\text{cm}^{-1}$ ;矮缩病毒为 $2816\text{cm}^{-1}$ , $2955.8\text{cm}^{-1}$ , $3177.8\text{cm}^{-1}$ ;草矮病毒为 $2811.8\text{cm}^{-1}$ , $2978\text{cm}^{-1}$ , $3002\text{cm}^{-1}$ , $3030.8\text{cm}^{-1}$ , $3167\text{cm}^{-1}$ 。不同的病毒,它们的拉曼光谱强度也不相同,有的相差好几倍,例如东格鲁病毒的拉曼光谱强度就比簇矮病毒的强三倍。

## 五、激光生物光谱仪器

随着光谱技术在生物学研究的发展,相应地出现了用于生物研究的光谱仪器,这里介绍其中的两种。

### 1. 流动式细胞光度计

这是用来定量测定细胞成分、大小及表面结构的仪器。细胞在激光照射下产生荧光和散射光。荧光强度与细胞内的成分,例如核酸、蛋白质等有关。用仪器测出由激光激发产生的荧光强度,可以知道细胞内的成分及它们的含量。散射光强度,反映出细胞的大小、形状及表面结构。

### 2. 激光荧光漂白恢复仪

荧光漂白恢复是一种直接测定细胞膜分子扩散或流动的技术。用荧光染料或者与荧光染料结合的分子标记细胞,然后用一束强微束脉冲激光照射细胞膜上某个小区域(小于 $10\mu\text{m}^2$ ),使荧光分子漂白(分解)而消失荧光。此后,由于周围分子的运动,细胞这个漂白区又会逐渐恢复发射荧光的能力,这时候再用光强度比原先作漂白时弱 $10^3\text{—}10^4$ 倍的激光照射细胞,用灵敏光电探测器(比如光电倍增管)检测荧光。记录细胞漂白后的荧光恢复曲线,便可以算出细胞膜上生物分子的扩散系数,从中也可以了解生物分子的运动特性。

[1] 刘颂豪,激光生物学与激光医学学术讨论会论文集,国家自然科学基金委员会生物科学部、信息科学部合编,(1986年),2。

[2] 山崎健,レーザー研究,15(1987),595。

[3] G. Renant et al., *Laser in Surgery & Medicine*, 5(1985), 111。

- [4] C. Cercek et al., *J. Cancer*, 13 (1977), 903.  
 [5] 周美惠等,应用激光, 8(1988), 136.  
 [6] 唐建民、傅昌余,中国激光, 14(1987), 440.  
 [7] 唐建民等,中国激光, 16(1989), 238.  
 [8] 丁爱华等,医用激光研究与临床, No. 1 (1989), 17.  
 [9] 关静峰,激光杂志, 11(1990), 294.  
 [10] 马宝章等,应用激光, 4(1984), 235.  
 [11] 丁爱华等,中国激光, 14(1987), 199.  
 [12] 敖华飞,激光杂志, 11(1990), 294.  
 [13] 叶青等,应用激光联刊, 7(1988), 311.  
 [14] R. Nossal, *Biophys. J.*, 11 (1971), 341.  
 [15] 王振亚等,医用激光杂志, 4(2), (1990), 6.  
 [16] 林星等,激光生物学与激光医学学术讨论会论文集, 国家自然科学基金委员会生物科学部、信息科学部合编, (1988年), 70.

## 正电子湮没与高温超导体<sup>1)</sup>

王少阶

(武汉大学物理系, 武汉 430072)

正电子是探测固体中电子密度、动量分布、缺陷和相变的灵敏探针。正电子湮没是研究高温超导体的电子结构和缺陷特性的有用工具。本文简要介绍了近年来用正电子湮没研究高温超导体的费米面、测量其电荷密度分布、缺陷特性及结构转变等方面的最新进展。

### Abstract

Recent advances in positron annihilation studies on high temperature superconductors are presented, covering: (1) direct observation of Fermi surfaces; (2) the temperature dependence of positron annihilation parameters and local electron transfer; (3) defect properties and (4) structural transformation. It is shown that positron annihilation spectroscopy is a very useful tool for studying the electron properties of high temperature superconductors.

1987年春发现的液氮温区高温超导体无疑是近几十年来物理学发展史上的重大事件之一。人们对这一发现在科学和技术上的重要性都感到十分兴奋和震惊。继 $T_c$ 为90K的YBCO之后,1988年又相继发现 $T_c$ 为115K的BiSrCaCuO和 $T_c$ 为125K的TlBaCaCuO。这些新型高温超导体的发现为超导技术的应用开辟了更为广阔的前景,并将在许多高技术领域带来革命性的变化。这一切都激励着人们去研究这种新型氧化物高温超导体的超导机制,并寻求具有更高使用性能的高温超导材料<sup>[1,2]</sup>。有人曾用各种现代实验技术对其进行研究,正电子湮没谱学就是卓有成效的研究手段之一。

众所周知,正电子是电子的反粒子。它是由狄拉克预言并于1932年由安德森在宇宙线实验中发现的。近20年来,正电子湮没谱学已

发展成研究凝聚物质微观结构的实用技术。在固体研究中,正电子来自具有 $\beta^+$ 衰变的核素,如 $^{22}\text{Na}$ 。当能量为几百KeV的正电子射入样品后,通过与物质原子或分子的各种非弹性碰撞过程损失能量,并很快达到热能。处于热能的正电子在固体中扩散,在此过程中,正电子会和电子发生湮没,并发射两个特征湮没光子。图1示出了正电子在固体中的湮没图象。用近代实验核物理方法可以精确测定这些湮没光子的时间谱、能谱及角关联。研究表明,正电子对凝聚物质中的电荷密度及动量分布十分敏感,在测量固体材料中的费米面和研究固体缺陷和相变方面有其独到之处<sup>[3]</sup>。因此,近年来正电子湮没也被广泛用于探测高温超导体的电子结

1) 国家自然科学基金资助项目。