

文章编号:1005-4642(2020)11-0041-07

## Ne 原子无多普勒光谱测量虚拟仿真实验的梯度型设计

黄婉慧<sup>1</sup>,张诗按<sup>1</sup>,邓 莉<sup>1</sup>,成 琳<sup>1</sup>,秦菱泽<sup>1</sup>,忻 静<sup>1</sup>,尹亚玲<sup>1</sup>,洪显峰<sup>2</sup>

(1. 华东师范大学 物理与电子科学学院,上海 200241;

2. 安徽省科大奥锐科技有限公司,安徽 合肥 230089)

**摘 要:**在“超快光场与物质相互作用”虚拟仿真实验平台,基于学生认知规律设计了实现 Ne 原子无多普勒展宽光谱测量的 6 个梯度型实验,包含 2 个多普勒展宽的荧光光谱与激发光谱,无多普勒腔外强度饱和吸收光谱与强度内调制光谱,无多普勒偏振光谱与偏振内调制光谱. 该系列实验已经应用于《光谱测量技术》理论课教学中,学生通过虚拟仿真实验的操作,对多普勒展宽的产生机制、兰姆凹陷、原子饱和吸收、原子偏振选择吸收等基本概念的理解更加深刻,对于消除多普勒展宽而进行的实验设计思想领悟得更加透彻,同时掌握了锁相放大灵敏探测技术使用方法与适用范围.

**关键词:**无多普勒展宽;虚拟仿真实验;混合式教学

**中图分类号:**O4-39;G642.423

**文献标识码:**A

**DOI:**10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.11.007

光谱测量是人类了解原子、分子、化合物等微观与宏观物质结构的重要研究手段,已经被广泛应用于医学、军事、工业、航天、科研等多个领域.随着人类对物质的认识的不断深入,应用的不断拓展,对光谱测量分辨率、信噪比的要求不断地提高,因此产生了许多高分辨、高灵敏度的光谱测量技术,比如:多光子荧光光谱、超声射流光谱、光电流光谱、光电质谱、无多普勒光谱等<sup>[1]</sup>.其中无多普勒光谱技术是在常温常压下,能够实现高分辨光谱测量的有效技术手段.

导致光谱分辨率降低的主要因素有能级寿命引起的自然展宽、碰撞引起的碰撞展宽、原子分子运动引起的多普勒展宽等,当不同能级的光谱峰位距离较近,由于上述的展宽机制会引起光谱谱峰的相互重叠,因此测量到的光谱是准连续的光谱谱带,原子、分子与物质结构更加精细的结构信息被掩盖起来.需要设计特殊的光谱测量技术来减小展宽机制对光谱测量的影响.

在自行设计研制的“超快光场与物质相互作用虚拟仿真实验平台”针对光谱学设计,专业性较强.平台将面向对象法用于虚拟实验建模,用程序仿真实验场景和实验状态,通过鼠标操作,可以

在平台上搭建光路,可以对激光脉冲进行频域、时域、空间分布的测量,利用泵浦-探测技术实现原子能级布居进行高灵敏动态特性测量,在高分辨光谱测量进行交互式实时虚拟实验操作.与同类型物理虚拟仿真实验平台相比能更具针对性地解决实验学习、实验器材、实验经费、实验时间、实验安全等问题<sup>[2-6]</sup>.

“超快光场与物质相互作用”的虚拟仿真实验平台<sup>[6-7]</sup>,根据学生认知从易到难的特点,基于建构主义<sup>[8]</sup>与学习分层次学习理论<sup>[9]</sup>,设计 6 个无多普勒展宽梯度型虚拟仿真实验:多普勒展宽的吸收光谱、激发光谱、无多普勒展宽的腔外强度饱和吸收光谱、强度内调制光谱、偏振光谱、偏振内调制光谱.6 个实验的原理设计,从多普勒展宽的产生机理,到消除多普勒展宽的理论,再到消除多普勒展宽的技术实现,最后到完全消除多普勒的超高分辨的光谱测量;在技术层面的梯度为:多普勒展宽光谱仅使用 1 束光激发,产生荧光即可实现荧光测量,但掩盖了真实的能级峰位,用 2 束光相对入射将入射激光波长调谐至原子分子本征吸收能级,仅仅激发速度为零的分子,并利用锁相放大技术实现高灵敏光谱测量;为了消除剩余的多

**收稿日期:**2020-06-22;**修改日期:**2020-07-25

**基金项目:**华东师范大学教学改革与研究项目(No. 2019001, No. 2020001);华东师范大学物理与电子科学学院学生科创项目(No. 2019001)

**作者简介:**黄婉慧(1997-),女,福建泉州人,华东师范大学物理与电子科学学院 2016 级本科生.

**通讯作者:**邓 莉(1975-),女,四川仪陇人,华东师范大学物理与电子科学学院副教授,博士,研究方向为超快激光与材料相互作用. E-mail:ldeng@phy.ecnu.edu.cn



普勒展宽效应,再利用偏振选择定则结合偏振调制技术可以完全消除多普勒展宽,实现原子分子超高分辨光谱测量.通过对6个实验理论与实验的难度的梯形设计,将知识与技术难度进行了合理分解与设置,为学生实现了循序渐进学习过程,顺利达到学习目标提供了有效的途径.

已经将无多普勒展宽系列虚拟仿真实验应用于“光谱测量技术”理论课教学中,学生通过虚拟仿真实验的操作,对多普勒展宽、兰姆凹陷、原子饱和和吸收、原子偏振选择吸收等基本光与物质相互作用的概念理解更加深刻,对于消除多普勒展宽的实验设计思想领悟得更加透彻,同时掌握了锁相放大灵敏探测技术使用方法与适用范围.

## 1 多普勒展宽机理与消除方法

由于发光原子相对于观察者或检测器运动而使观察到的光波频率发生变化现象,被称为光学多普勒效应.设运动速度为  $u_1$  的原子处于较高能级  $\epsilon_2$ ,发射频率为  $\nu$  沿  $z$  轴方向传播的光子后跃迁到较低能级  $\epsilon_1$ ,速度变为  $u_2$ .根据光量子理论、动量守恒定律和能量守恒定律,可以得到具有多普勒效应的发射光子的频率为<sup>[1]</sup>

$$\nu = \frac{\nu_0}{1 - \frac{u_z}{c}} \approx \nu_0 \left( 1 + \frac{u_z}{c} \right), \quad (1)$$

式中,  $\nu_0$  为原子发射光子的本征频率,  $c$  为光速,  $u_z$  为发光原子朝着探测器运动时速度在  $z$  方向的分量.当  $u_z$  为正时,观测到的频率高于原子发射本征频率;当发光原子远离探测器运动时  $u_z$  为负,观测到的频率低于原子发射本征频率.通常,气体中原子或分子处于无规则的热运动状态,运动的速度和方向各不相同,因此多普勒效应引起的频移各不相同.根据热平衡下气体分子的速度服从麦克斯韦分布,可以得到包含多普勒展宽的光谱线的强度分布为<sup>[1]</sup>

$$I_D(\nu') = I(\nu_0) g_D(\nu') = I(\nu_0) \exp \left[ -\frac{mc^2(\nu' - \nu_0)}{2\pi k_B T \nu_0^2} \right], \quad (2)$$

其中,  $g_D(\nu') = \exp \left[ -\frac{mc^2(\nu' - \nu_0)}{2\pi k_B T \nu_0^2} \right]$  是多普勒线型,呈高斯型分布,其线宽(半高全宽)为

$$\Delta\nu_D = 2\nu_0 \sqrt{\frac{2 \ln 2 \cdot k_B T}{mc^2}}. \quad (3)$$

从式(3)可以看出光谱的多普勒展宽与绝对温度

$T$  的平方根成正比,与原子相对质量  $m$  的平方根成反比.

## 2 利用兰姆凹陷消除多普勒展宽效应

自然展宽、碰撞展宽、多普勒展宽使光谱成准连续分布,原子、分子与物质更精细结构信息被掩盖.自然线宽反映了能级寿命,无法消除;碰撞展宽可以通过降低气体压强减少原子、分子之间的碰撞来消除;多普勒展宽可以通过降低温度减少分子运动速度来消除,但在常温常压下则需要特殊技术手段来消除.下面,将利用原子能级的饱和和吸收效应、偏振选择吸收来消除多普勒展宽.

当1束入射光作用于处于热运动的二能级原子.设频率为  $\omega$  的单色光沿  $z$  方向通过样品池.原子吸收该入射光后从基态跃迁到激发态,当激发与跃迁处于稳定平衡时,可以得到处于基态原子数  $N_1(u_z)$  和激发态原子数  $N_2(u_z)$  为<sup>[1]</sup>:

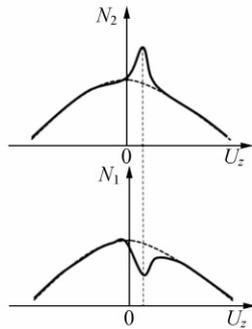
$$N_1(u_z) = \frac{N_1^0(u_z)}{1 + \frac{S\gamma}{(\omega_0 - \omega + ku_z)^2 + (\gamma/2)^2}} \exp \left( -\frac{mu_z^2}{2k_B T} \right), \quad (4)$$

$$N_2(u_z) = \frac{N_1^0(u_z)}{1 - \frac{S\gamma}{(\omega_0 - \omega + ku_z)^2 + (\gamma/2)^2}} \exp \left( -\frac{mu_z^2}{2k_B T} \right), \quad (5)$$

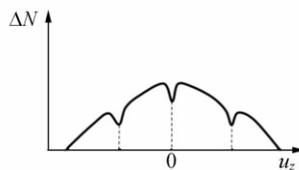
式中,  $N_1^0(u_z)$  为受激发前处于基态的原子数.  $S = B_{12} \frac{\rho}{R}$  为受激吸收速率与弛豫速率之比,称为饱和参量,  $B_{12}$  为爱因斯坦吸收系数.根据(4)和(5)式可以做出如图1(a)所示的基态、激发态布居分布曲线.能级布居  $N_1(u_z)$  分布曲线上,形成以  $(\omega_0 - \omega)/k$  为中心的贝纳特(Bennet)孔,  $N_2(u_z)$  在的多普勒分布曲线上形成以  $(\omega_0 - \omega)/k$  为中心的凸峰.

利用2束频率相同的激光相对入射激发原子,通过测量布居数速度分布曲线上的贝纳特孔,实现无多普勒饱和吸收光谱测量.设正向入射光为泵浦波  $E_0 \cos(\omega t - kz)$ ,经过反射镜反射部分泵浦波作为探测波  $E_0 \cos(\omega t + kz)$ .2束光波在多普勒分布曲线  $\Delta N(u_z)$  上烧出了2个速度分别位于  $u_z = +(\omega_0 - \omega)/k$ ,  $u_z = -(\omega_0 - \omega)/k$  处的贝纳特孔,如图1(b)所示.调谐入射光的频率  $\omega$  逐渐接近原子本征吸收频率,布居数速度分布曲线上2个贝纳特孔将在  $u_z = 0$  处合并,2束光波与

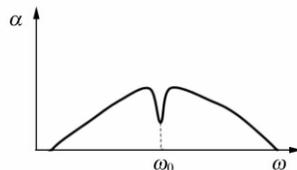
$u_z=0$  的同一群原子相互作用,饱和参量  $S$  增大 1 倍,光对  $\Delta N(u_z=0)$  的消耗最大,因此在吸收曲线  $\alpha(\omega)$  上出现了 1 个吸收系数减小兰姆凹陷,如图 1(c) 所示. 由于被激发的原子速度为 0,因此不存在多普勒展宽,兰姆凹陷是无多普勒凹陷,其线型为洛伦兹型<sup>[1]</sup>.



(a) 基态能级布居  $N_1$  的“烧孔”与激发态能级布居  $N_2$  的“凸峰”



(b) 相对入射的激发光束在布居分布曲线上形成贝纳特孔



(c) 相对入射的激发光束在吸收曲线上形成兰姆凹陷

图 1 基态、激发态布居分布曲线与吸收曲线

### 3 Ne 原子无多普勒光谱测量虚拟仿真实验的梯度型设计与实现

在自行设计的“超快光场与物质相互作用”虚拟仿真实验平台上<sup>[7-8]</sup>,基于建构主义<sup>[9]</sup>与学习分层次学习理论<sup>[10]</sup>,依据学生的认知能力,设计了包含知识梯度和技术梯度的 6 个测量 Ne 原子无多普勒展宽的实验:含多普勒展宽的荧光光谱和多普勒展宽激发光谱、无多普勒展宽的腔外强度饱和吸收光谱、强度内调制光谱、偏振光谱、偏振内调制光谱.

6 个系列实验的难度梯度设计包含知识梯度

与技术梯度,如图 2 所示:

#### 1) 知识梯度

a. 多普勒展宽产生机理. 利用兰姆凹陷实现无多普勒展宽测量;

b. 原子能级对线偏振光的饱和吸收效应. 原子能级对不同圆偏振光选择饱和吸收效应.



图 2 Ne 原子无多普勒展宽光谱测量虚拟仿真实验的梯度型设计思路

#### 2) 技术梯度

a. 1 束线偏振光激发原子产生荧光. 2 光束线偏振光相对入射激发原子消除多普勒展宽效应. 1 束圆偏振光与 1 束线偏振光相对入射完全消除多普勒展宽.

b. 光谱仪直接测量: 锁相放大灵敏探测技术. 偏振调制灵敏探测技术.

按照知识关联程度,将 6 个实验分成 3 组实验: 荧光光谱与激发光谱、无多普勒展宽腔外强度饱和吸收光谱与强度内调制光谱、无多普勒展宽偏振光谱与偏振内调制光谱. 通过对 6 个虚拟仿真实验的操作,学生将循序渐进地掌握无多普勒光谱测量的实验原理与实践操作.

“超快光场与物质相互作用虚拟仿真实验平台”<sup>[7]</sup>提供了上述 3 组实验所需的实验器材:连续 532 nm 激光器、染料激光器、光栅单色仪、斩波器、锁相放大器、偏振调制器、光电探测器等多种光学元件与相关设备. 学生在此虚拟仿真实验平台上自行搭建光路,实现 Ne 原子无多普勒光谱的测量.

#### 实验目的:

1) 熟悉染料激光器的工作原理及波长调谐的原理与操作;

2)掌握多普勒展宽的产生机制和利用兰姆凹陷消除多普勒展宽的原理;

3)掌握饱和吸收原理、偏振选择定则、锁相放大技术、偏振调制技术实现光谱灵敏探测的物理原理和技术手段;

4)通过比较多普勒展宽与无多普勒展宽的本质区别,了解 Ne 原子的能级结构。

实验步骤:

1)打开染料激光器,观察其内部机构,了解染料激光器的工作原理;

2)利用功率计和光栅光谱仪观察和测量染料激光器功率的变化和波长的调谐;

3)在虚拟实验仿真平台上搭建光路测量 Ne 原子的荧光光谱和激发光谱,比较 2 种光谱的镜像对称关系与波长移动;

4)在虚拟实验仿真平台上搭建强度调制饱和吸收与强度内调制光谱测量的实验装置,并利用斩波器、锁相放大器、光电倍增管实现光谱灵敏探测。调谐染料激光器输出波长,实现无多普勒光谱测量;

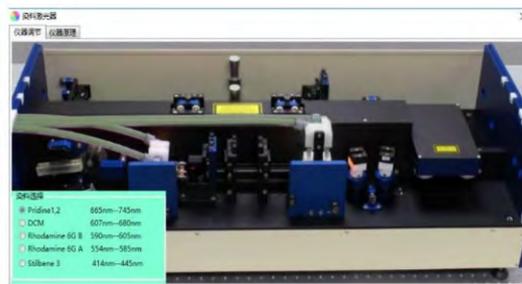
5)在虚拟实验仿真平台上搭建偏振调制饱和吸收与偏振内调制光谱测量的实验装置,并利用起偏器、1/4 波片、偏振调制器、光电倍增管实现光谱灵敏探测。调谐染料激光器输出波长,实现无多普勒光谱测量;

6)通过光谱获取 Ne 原子的能级结构,分析比较多普勒展宽光谱与无多普勒展宽光谱的区别。

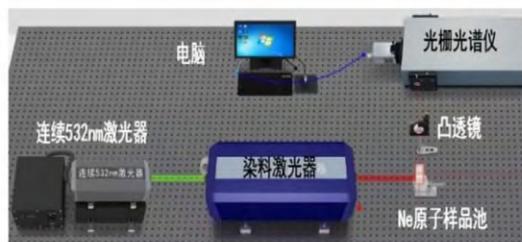
### 3.1 荧光光谱与激发光谱虚拟仿真实验

Ne 原子的荧光光谱与激发光谱测量光路如图 3 所示。利用掺钕钒酸钪晶体激光器输出的 532 nm 连续激光作为泵浦源激发染料激光器,选择染料激光器中的“Pyridine1,2”作为激发源,产生 665~745 nm 可调谐连续激光,如图 3(a)所示。2 光路均采用 1 束光激发 Ne 原子样品盒,在与入射光垂直的方向上利用透镜收集 Ne 原子荧光,入射到光栅光谱仪中,如图 3(b)和(d)所示。荧光光谱采用固定入射激光波长,扫描光栅光谱仪,在计算机软件界面上获得如图 3(c)所示的包含多普勒展宽的荧光光谱,可以看到在荧光峰的下面有强度较大的多普勒展宽信号,掩盖了精细结构。将光栅光谱仪扫描至 Ne 原子荧光最强峰位置,计算机与染料激光器连接,通过计算机软件

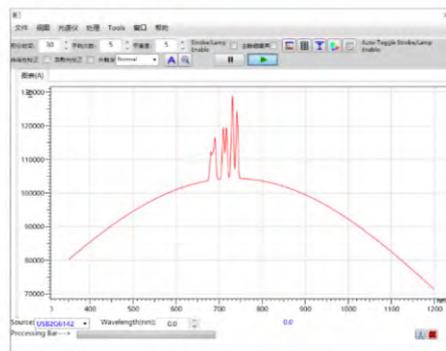
控制扫描染料激光器的波长,获得如图 3(e)所示的激发光谱,激发光谱有较高的多普勒展宽底座,与荧光光谱成“镜像”对称关系,且比荧光光谱波长短。为了更清楚地了解分子的精细结构,需要采用 2 光束相对入射通过测量兰姆凹陷来消除多普勒展宽。



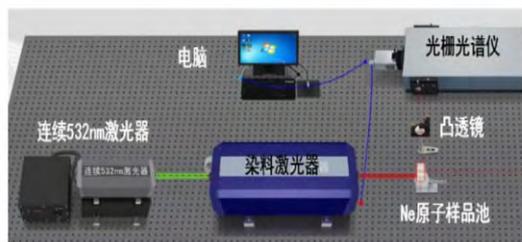
(a) 荧光光谱实验光路图



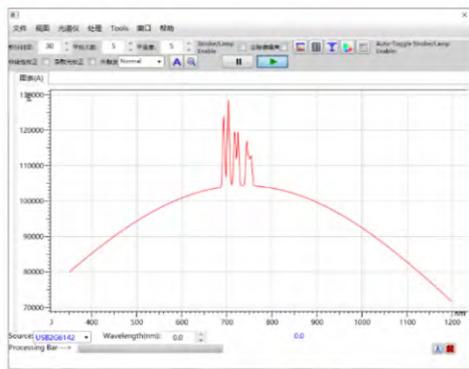
(b) 激发光谱实验光路图



(c) Ne 原子荧光光谱



(d) Ne 原子激发光谱光路



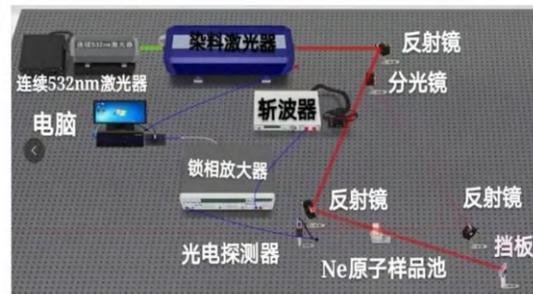
(e)Ne 原子激发光谱

图 3 Ne 原子荧光光谱与激发光谱虚拟仿真实验

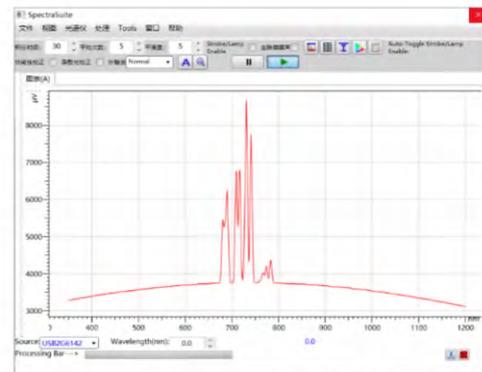
### 3.2 无多普勒展宽的腔外强度饱和和吸收光谱和强度内调制光谱测量

第 2 组实验为 Ne 原子的腔外强度饱和和吸收光谱和强度内调制光谱,其实验原理均是利用测量兰姆凹陷来消除多普勒展宽. 图 4(a)所示为无多普勒腔外强度饱和和吸收光谱光路. 利用分束镜将 2 束光以 5 : 1 分为泵浦光和探测光,尽量接近 180°相向入射到 Ne 原子样品上. 在泵浦光束上放置斩波器,其斩波频率信号输入锁相放大器,探测光被光电倍增管接收,信号输入到锁相放大器,利用锁相放大技术实现微小信号的灵敏测量<sup>[8]</sup>. 当 Ne 原子吸收了能量较强的泵浦光束中的光子处于饱和状态时,会产生饱和效应,对于探测光束的光子吸收减弱,因此探测光束经过样品后透射光束会增强. 利用计算机控制染料激光器,调谐激光波长至 Ne 原子的吸收峰频率处,速度为零的原子对泵浦光束中的光子进行吸收,探测光携带了 Ne 原子能级跃迁的信息,并且无多普勒展宽效应,获得光谱如图 4(b)所示. 从光谱图中可以看出,其光谱形状与激发光谱类似,其峰位反映了 Ne 原子的吸收能级,多普勒展宽的强度大大降低,右边出现了荧光光谱与激发光谱中被多普勒展宽掩盖的更精细的峰位. 由于 2 束光是以一定夹角入射,并没有真正完全相对入射,仍然存在剩余的多普勒展宽背景,因此在此光谱技术的基础上进行改进优化,形成强度内调制光谱测量,减少多普勒展宽效应对光谱的影响. 强度内调制光谱测量的实验装置如图 4(c)所示. 利用 1 : 1 的分束器将 1 束光分成 2 束能量相等的光,

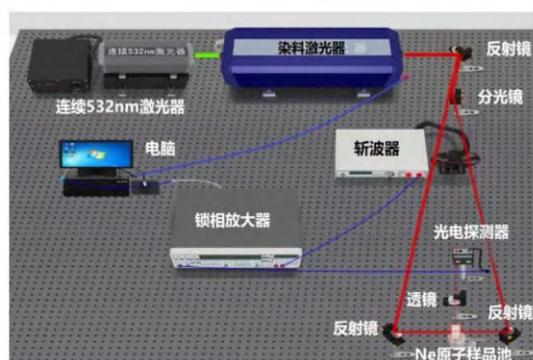
分别进入斩波器的内外孔径,同时接受斩波器调制,以实现差频锁相放大的灵敏测量. 利用反射镜将 2 束光完全相对地入射到样品上,在与光束垂直的方向上,用透镜接收荧光,由光电倍增管接收信号,输入到锁相放大器中. 由于 2 光束完全相对入射,且采用差频技术降低杂散信号的影响,其光谱图如图 4(d)所示,其残存本底是由于原子间碰撞引起速度变化导致多普勒加宽的本底.



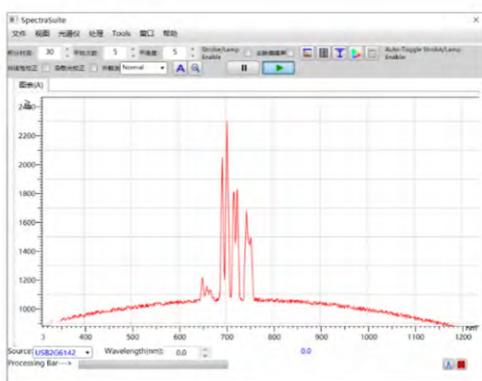
(a)强度饱和和吸收光谱实验光路图



(b)Ne 原子的强度饱和和吸收光谱



(c)强度内调制光谱实验光路图



(d) Ne 原子的强度内调制光谱

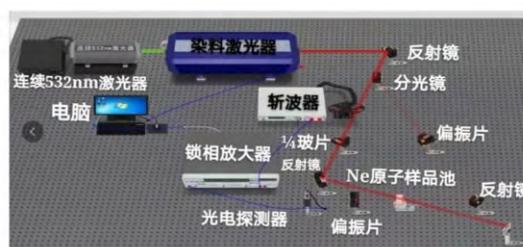
图 4 Ne 原子无多普勒展宽腔外强度饱和吸收光谱和强度内调制光谱测量的虚拟仿真实验

### 3.3 无多普勒展宽的偏振饱和吸收光谱和偏振内调制光谱测量

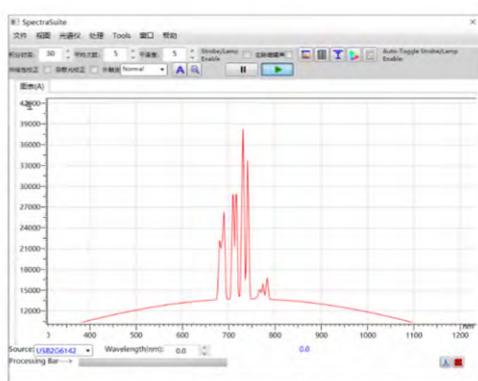
第 3 组实验为 Ne 原子的偏振饱和吸收光谱和偏振内调制光谱测量,利用原子的偏振选择饱和和吸收达到消除多普勒展宽的目的.偏振饱和吸收光谱的实验装置如图 5(a)所示,在腔外强度饱和和吸收光谱的基础上进行实验.利用分束比为 5:1 的分光镜将 1 束激光分成能量较大的泵浦光与 1 束能量较弱的探测光,2 束光以接近  $180^\circ$  夹角入射.在泵浦光路上放置  $1/4$  波片,在探测光路上放置起偏器.线偏振光中包含左旋圆偏振光与右旋圆偏振光.当 Ne 原子在泵浦光束中吸收左旋圆偏振光的光子,使得角动量在空间上的分布变得不均匀,显示各向异性.由于泵浦光中所含光子较多,产生偏振饱和吸收效应,对探测光中线偏振光子中的左旋圆偏振光的光子吸收减弱,对右旋圆偏振光的光子吸收较强,因此探测光经过 Ne 原子后不再是线偏振光,而是椭圆偏振光.在探测光路上,进入 Ne 原子样品池前放置检偏器,调制探测光强最大,在样品池后放置正交与探测器之间放置正交检偏器,然后由光电探测器接收探测光.使未入射泵浦光时,光电探测器接收到的光强为零.当泵浦光入射样品,由于偏振饱和和吸收效应,光电探测器接收到探测光强.在泵浦光路上加入斩波器,斩波信号输入锁相放大器作为参考频率.扫描染料激光器输出波长,激发速度为零的原子,形成分辨较高的无多普勒展宽光谱.该实验方法的不足之处在于探测光路上的

正交检偏器偏振方向稍有偏离,会形成不对称的谱线,而且由于原子间的碰撞会使角动量发生一定改变,形成背景信号.为了进一步优化测量,得到完全无多普勒展宽光谱,采用 2 个旋转的偏振调制器对 2 束能量相等、完全相对入射的圆偏振光进行调制,如图 5(c)所示.偏振内调制光谱的实验装置与强度内调制光谱技术相似,但在分光镜前利用  $1/4$  波片将从激光器输出光变为圆偏振光,利用分束比 1:1 的分光镜将圆偏振光分为泵浦光和探测光,再分别经过 2 个偏振方向正交的偏振片后完全反向共线地入射到样品池.利用 2 个旋转频率为  $f_1$  和  $f_2$  的偏振调制器分别以对 2 束光的线偏振态方向进行调制.由于转 1 周,偏振态改变了 2 次,于是锁定在  $2|f_1 \pm f_2|$  上的锁相放大器,就不会放大这些原子发射的荧光杂散信号,当激光频率调谐到吸收线中心时,可测得完全无多普勒展宽的偏振内调制信号,其分辨率高于前面所述的其他无多普勒展宽光谱,如图 5(d)所示.

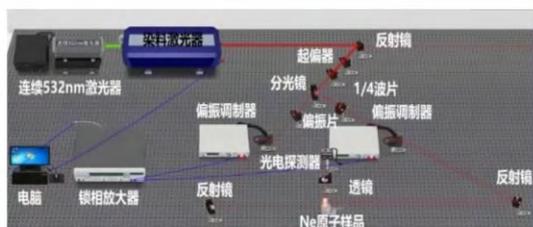
通过以上 3 组实验的操作,学生可以循序渐进按照原理难度梯度认识到荧光光谱和激发光谱是原子从基态到激发态跃迁或辐射的一般光谱,而强度饱和吸收光谱和强度内调制光谱则是由于原子的能级布居数变化引起饱和和吸收效应时测量的光谱,偏振饱和吸收光谱和偏振内调制光谱则是利用原子的偏振选择吸收获得的光谱,后 4 种光谱均采用 2 光束相对入射,扫描入射激光频率激发速度为零的原子实现测量无多普勒展宽的兰姆凹陷测量.在无多普勒展宽光谱的技术难度梯度方面,学生将从简单使用光栅单色仪,到采用 2 光束相对结合锁相放大技术,再到使用圆偏振光结合偏振调制器.通过上述 6 个实验的光谱数据,学生可以观察到 Ne 原子在 692.9, 702.4, 717.4, 724.5, 743.8 nm 等的吸收峰位.



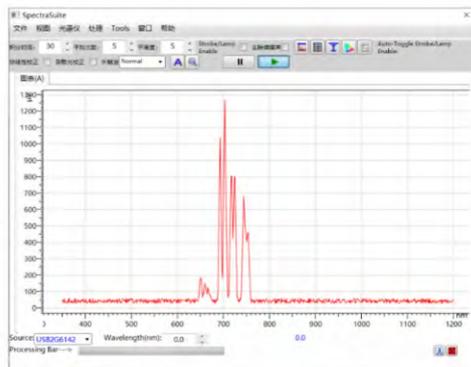
(a) 偏振饱和吸收光谱实验光路图



(b) 偏振饱和和吸收光谱



(c) 偏振内调制光谱实验光路图



(d) 偏振内调制光谱

图 5 Ne 原子无多普勒展宽偏振饱和和吸收光谱和偏振内调制光谱测量的虚拟仿真实验

### 4 结束语

在自行设计的“超快光场与物质相互作用”虚拟仿真实验平台,基于建构主义、学习分层次学习理论,按照学生认知规律,设计了实现 Ne 原子无

多普勒展宽光谱测量的 6 个梯度型实验,一系列实验将实验原理、技术方法进行梯度型分解,使学生循序渐进地了解无多普勒展宽光谱测量的设计原理与技术实现. 该系列实验已经应用于辅助“光谱测量技术”理论课教学中,通过前后测评卷并结合 SPSS 科学统计软件分析,发现梯度型虚拟仿真实验对“光谱测量技术”理论课教学确实具有辅助效果,加深了学生对理论的理解,增强实际操作的能力;教学实践中,可以进一步加强虚拟仿真实验平台与课堂教学的联系,教师演示虚拟仿真实验的操作过程,鼓励学生进行实验尝试,通过以上策略的实施帮助学生熟练掌握理论知识与操作技能. 虚拟仿真实验辅助理论教学研究为探索混合式模式提供有价值的参考.

### 参考文献:

- [1] 陆同兴,路铁群. 激光光谱技术原理及应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2006.
- [2] 谭佐军,程其变,陈建军,等. 虚实结合混合式大学物理实验预习模式的实践[J]. 物理实验,2018,38(5):40-43.
- [3] 李宁,杨坤,史芹. 大学物理虚拟仿真实验开放式教学初步探索与实践[J]. 教育现代化,2016,3(40):118-119.
- [4] 林海峰,熊飞兵,王逸平. 基于虚拟仿真的大学物理实验教学改革[J]. 中国教育信息化,2017(22):91-93.
- [5] 方亮,杨俊义,顾妍,等. 物理虚拟仿真实验平台及其课程教学体系的建设实践[J]. 物理通报,2018(9):80-83.
- [6] 王永强,吴爱军,李雪. 虚拟仿真实验在大型贵重设备教学中的应用[J]. 教育教学论坛,2018(5):275-276.
- [7] 邓莉,周科卫,吕钊钊. 超快光场与物质相互作用虚拟仿真实验平台[J]. 物理实验,2019,39(9)42-47.
- [8] 邓莉,吕钊钊,张汉中,等. 泵浦-探测虚拟仿真实验项目的操作训练及其效果评估[J]. 物理实验,2020,40(1):35-41.
- [9] 王春阳,杨彬,张婕. 教育心理学[M]. 成都:电子科技大学出版社,2017:87-93.
- [10] 雒晓春. 教育心理学(中学最新版)[M]. 北京:中国经济出版社,2013:30-31.

(下转 52 页)

- [15] Wang J J, Rodríguez Núñez J R, Maxwell E J, et al. Build your own photometer: A guided-inquiry experiment to introduce analytical instrumentation [J]. *Journal of Chemical Education*, 2016, 93(1): 166-171.
- [16] 高东锋,王森. 虚拟现实技术发展对高校实验教学改革的影响与应对策略[J]. *中国高教研究*, 2016(10):56-59.
- [17] 洪澜,蔡修奋,李俊洋,等. 基于虚拟仿真实验的创新能力的培养[J]. *物理实验*, 2018, 38(9):43-47.

## Virtual simulation experiment of Czerny-Turner grating spectrometer

MA Yan

(School of Physical Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Based on the computer simulation software COMSOL, a simulation program of the optical system of the Czerny-Turner grating spectrometer was designed. The simulations of the effect of entrance slit width and grating constant on the resolution of grating spectrometer were realized, and the simulation results were displayed in an intuitive way. Through the simulation experiments, students could deeply understand the optical structure and working principle of Czerny-Turner grating spectrometer, as well as the basic knowledge of optical spectroscopy.

**Key words:** Czerny-Turner grating spectrometer; virtual simulation; calibration; resolution of grating spectrometer

[责任编辑:郭 伟]

(上接 47 页)

## Virtual simulation experiment of Ne atom Doppler-free spectrum

HUANG Wan-hui<sup>1</sup>, ZHANG Shi-an<sup>1</sup>, DENG Li<sup>1</sup>, CHENG Lin<sup>1</sup>, QIN Ling-ze<sup>1</sup>,  
XIN Jing<sup>1</sup>, YIN Ya-ling<sup>1</sup>, HONG Xian-feng<sup>2</sup>

(1. School of Physics & Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200241, China;  
2. AH UST Original Technology Co. LTD. , Hefei 230089, China)

**Abstract:** Based on the virtual simulation experiment platform, the super fast light field and matter interaction was designed. Six gradients of experiments were designed to realize the measurement of Ne atom Doppler-free spectrum according to students' cognitive gradients, including two Doppler broadening absorption and excitation spectra, Doppler-free out cavity intensity saturation absorption spectrum and intensity internal modulation spectrum, Doppler-free polarization spectrum and polarization internal modulation spectrum. These series of experiments had been carried out in the teaching of spectrum measurement technology. Through the virtual simulation experiment, students got a deeper understanding of the mechanism of Doppler broadening, lamb depression, atomic saturation absorption, atomic polarization selective absorption and other basic concepts and the experimental design idea to eliminate Doppler broadening. The application method and application scope of lock-in amplification sensitive detection technology were also grasped.

**Key words:** Doppler-free broadening; virtual simulation experiment; blended learning

[责任编辑:郭 伟]