



基于转换发光材料的光电子课程 实验教学设计

杨涛¹, 牛巧利¹, 周馨慧¹, 沈骁², 刘辉³

(1. 南京邮电大学材料科学与工程学院, 南京 210023; 2. 南京邮电大学电子与光学工程学院、柔性电子(未来技术)学院, 南京 210023;
3. 南京邮电大学理学院 南京 210023)

摘要: 该文以增强材料类专业学生在光电子学领域知识面为目标, 开展了“光电子器件与工艺”课程实验教学研究, 设计并开展了将新型发光材料应用于微型光谱仪制备与性能测试的实验。通过增加材料学科与光电子学科交叉的实验教学内容增强学生对新型材料的理解、掌握及灵活应用, 同时提升学生制造光电子器件的实践能力及创新能力。实验教学的结果表明, 采用新型转换发光材料可以有效地扩展微型光谱仪的光谱测量范围, 并具有体积小、分辨率高、成本低、应用范围广等特点。与此同时, 该课程实验教学设计有效地提升了教学效果, 使材料物理专业的学生可以更加深入地理解新型发光材料在光电子器件中的发展与应用, 对高校新工科建设及学生的创新实践能力培养提供了有益参考。

关键词: 教学改革; 光谱仪; 光谱重建; 转换发光材料

中图分类号: G642.0

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240311

Experimental Teaching Design for Optoelectronic Courses Based on Conversion Luminescent Materials

YANG Tao¹, NIU Qiaoli¹, ZHOU Xinhui¹, SHEN Xiao², LIU Hui³

(1. Institute of Advanced Materials, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;
2. College of Electronic and Optical Engineering & College of Flexible Electronics (Future Technology), Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China; 3. College of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: The paper was conducted to broaden the knowledge scope of students majoring in materials science in the field of optoelectronics. Experimental teaching research was carried out for the course “Optoelectronic Devices and Technology,” with the aim of designing and conducting experiments that applied novel luminescent materials to the fabrication and performance testing of miniature spectrometers. By integrating interdisciplinary content from materials physics and optoelectronics into the experimental curriculum, students’ understanding, mastery, and flexible application of new materials were enhanced, while their practical and innovative abilities in fabricating optoelectronic devices were improved. The experimental results demonstrate that the spectral measurement range of miniature spectrometers can be effectively expanded through the adoption of novel conversion luminescent materials, while offering advantages such as compact size, high resolution, low cost, and broad applicability. Furthermore, teaching effectiveness is significantly improved by this experimental teaching design, enabling students majoring in materials physics to develop a deeper understanding of the development and application of novel luminescent materials in optoelectronic devices. This design provides valuable references for the construction of new engineering disciplines in universities and the cultivation of students’ innovative practical abilities.

Key words: teaching reform; spectrometer; spectral reconstruction; conversion luminescent materials

当前我国正在实施创新驱动发展战略, 培养高质量的创新型复合式人才是当今科技形势发展的需要。高校本科教学要通过学科交叉融合, 加

强基础学科培养能力, 打破学科专业壁垒, 对现有课程教学进行调整升级, 瞄准科技前沿和关键领域, 完善复合型人才培养模式, 构建多学科交

收稿日期: 2024-06-11

基金项目: 南京邮电大学教学改革重点项目(JG03022JX04); 国家自然科学基金(62074082, 62075099)。

作者简介: 杨涛, 博士, 教授, 主要从事光谱成像、传感等方面的研究。E-mail: iamtyang@njupt.edu.cn

又培养复合型人才的路径^[1-2]。近年来,光电子产业对具有材料学科背景人才的需求越来越大,但很多材料专业的本科生对光电子知识了解匮乏,对如何运用材料的相关知识制备光电子器件缺乏相关训练,对如何将最新研发的新材料应用于光电子器件的制备从而提高光电子器件的性能缺乏有效的创新手段^[3-4]。为了有效提升学生的实践能力、工程应用能力以及创新能力,克服传统课程大部分以验证性和演示性的课程内容为主,设计性、研究性以及综合性实验偏少的缺点,对材料物理专业本科课程“光电子器件与工艺”进行教学改革。该教学改革不仅使学生学习到了光电子器件的相关理论知识,而且使学生完整参与光电子器件的实验研制,使其学术素养和实验动手能力都得到了切实的提高,从而有效地保证了教学质量。本文以基于新型发光材料的宽光谱微型光谱仪制备为例,介绍其在材料物理专业本科生“光电子器件与工艺”课程实验教学中的应用。

1 实验教学设计

1.1 实验背景

实验教学应依据课程教学目标和人才培养目标进行教学设计。南京邮电大学材料物理专业以培养高素质应用型人才为目标,努力为社会输送具有良好理论基础及创新实践能力的材料学科的工程技术及管理人才。因此,“光电子器件与工艺”课程的教学目标设定为通过课堂教学、实验教学及项目研究等途径,使学生掌握光电子学的基本理论体系与光电子器件的设计方法,培养学生创新意识及工程实践能力,为后续课程以及毕业后在光学工程领域继续学习、从事技术工作、科学研究等提供坚实的专业基础。依据该目标,实验设计应体现出对学生理论知识、实践能力及创新能力方面的培养作用,并与学生的日常生活中的实际应用紧密结合。而本次教学设计选取了设计制作一种用于分析假冒伪劣商品的小型光谱仪。

光谱仪是一种用于测量光谱的装置,它可以通过物质的光谱信息检测分析物质的化学成分,如假冒伪劣商品的真实成分就可以通过它来识别^[5-6]。日常生活中,人们都对假冒伪劣商品深恶痛绝,虽然近年来国家加强了管控,但各类劣质商品仍然屡禁不绝,农药残留超标、食品添加剂滥用等问题严重损害人们的健康。由于人们鉴别

商品主要还是通过眼看、手摸、鼻闻等外表检测,往往只能看到表象,无法了解到商品的品质。但如果小型光谱仪可以快速、实时检测和分析物质的化学成分,则能有效避免买到假冒伪劣商品。目前市场上已经有一些小型化的光谱仪产品^[7],如 SCIO、TELLSPEC、筷搜、复虹等,但这些产品基本只能测量波段范围为 400~1 000 nm 的光谱,如果要使其对物质成分检测更加准确,需要进一步扩展其波长测量范围,使它可以测量硅基探测器测量范围以外的紫外、红外波段范围内光的光谱。

宽光谱的光谱仪非常急需,这是因为紫外光谱和红外光谱分别对应着不同的应用领域^[8]。紫外光谱主要用于分析及测定某些化合物的类别,而红外光谱主要用于鉴别及测定化合物的分子结构。紫外光谱属于电子光谱,光谱简单,测定对象的物态以溶液为主,适用于芳香族或具有共轭结构的不饱和脂肪族化合物及某些无机物的分析,不适用于饱和有机化合物^[9]。而红外吸收光谱不受此限,它由分子的振动能级并伴随转动能级的跃迁引起。在中红外区,能测得所有有机化合物的特征光谱,用于定性分析及结构研究,而且其特征性高于紫外光谱。除此之外,红外光谱还可以用于某些无机物的研究,测定气、液、固体样品,并以测定固体样品最为方便^[10]。因此,采用宽测量频段的光谱测量装置可以对多种不同类型的化合物进行检测,而且通过对不同频段光谱的比对,可以大幅度提高检测的精确度。

因此,在“光电子器件与工艺”实验课程教学中,让学生设计一种基于新型发光材料^[11]的宽光谱无序色散光谱仪,通过将转换发光材料置于硅基探测器前方以扩展光谱探测范围,可使微型光谱仪采用普通硅基阵列式探测器即可实现从紫外到红外较宽波段范围内的光谱测量,从而使其光谱检测更加精准。该课程实验教学的设计流程如图 1 所示。该课程实验教学可分为两部分进行:一是理论研究,重点对光谱复原方法进行优化,并通过时域有限差分(finite-difference time-domain, FDTD)等仿真软件设计器件的各项参数;二是实验系统构建与性能测试研究,通过制作微型光谱仪的各个部件,进行光谱复原性能测试,将复原的光谱与商用光谱仪测的原始光谱进行比对,从而验证理论的可行性,并不断进行优

化。该设计融合了光学和材料学的相关理论，涉及模拟仿真、数学优化等内容，同时训练了学生

对各类大型软件和仪器的操作与使用，因此可以切实提高学生的创新能力和动手能力。

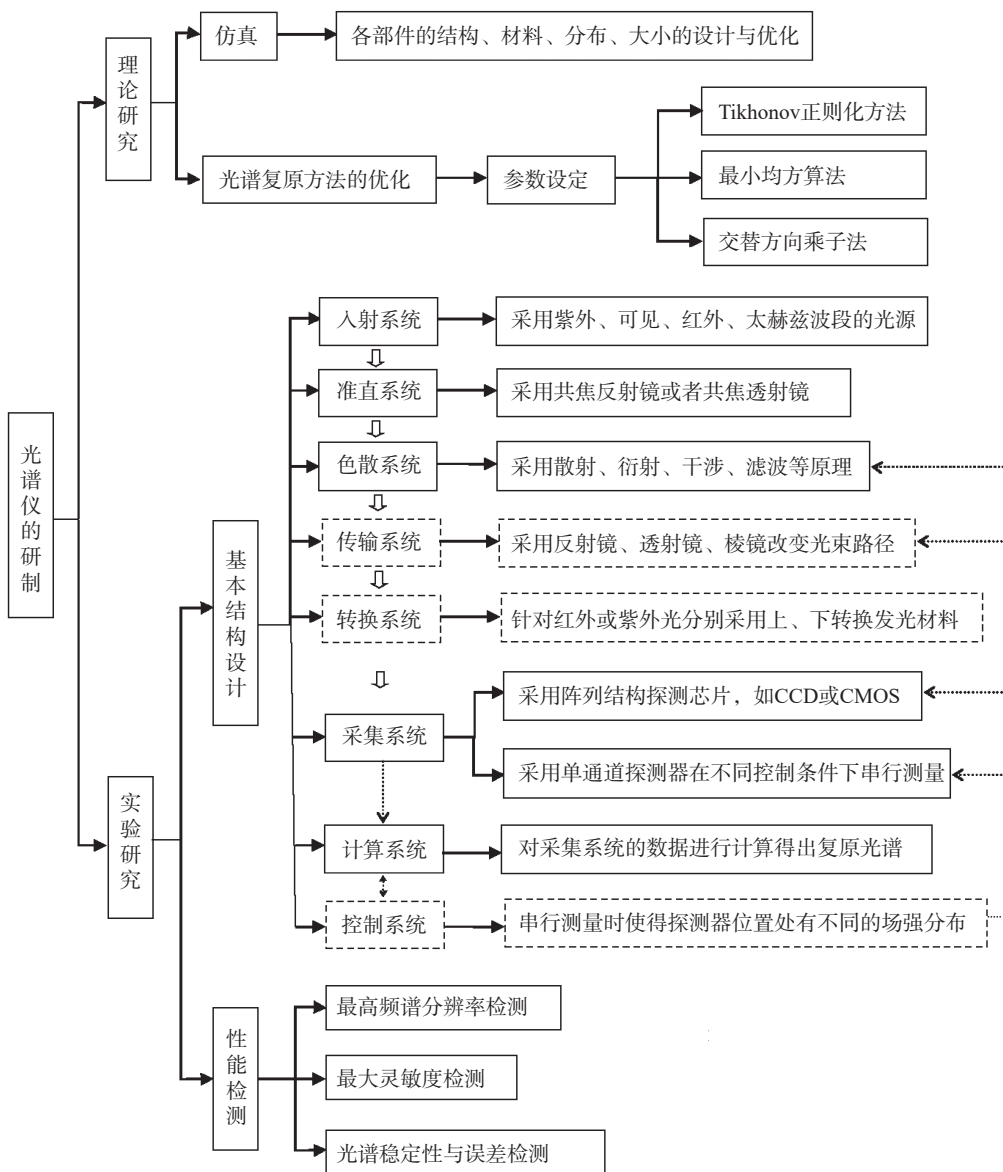


图 1 微型光谱仪的基本结构和设计流程图

1.2 实验原理设计

1.2.1 光谱复原原理设计

在进行实验设计之前，先让学生掌握小型化光谱仪进行光谱复原的基本原理。将信号采集系统中探测器所能测量的频率范围分成 n 等份。假设待测光波的频谱曲线如图 2 所示，频谱曲线被分成 n 段，每一段的中心频率为 $f_i (i=1, 2, \dots, n)$ ，频宽为 Δf ，待射光波中每段频率分量的强度 $I(f_i)$ 对应于图中每个小矩形的面积。待测光波频谱可以由图 2 中各个频率分量的大小进行曲线拟合得到，

所以光谱复原的目标转化为求图 2 中各个小矩形的面积。

由于划分份数 n 的数目较多，由微积分原理可知，待测光波的总入射强度可以近似为图 2 中曲线下面很多个小矩形面积的总和。当待测光经过色散系统后，被一个探测头或者阵列式探测芯片的其中一个像素元探测到。上述探测头或者像素元所接收到的信号强度，一方面可以通过自身探测直接得到，另一方面，也可以通过待测光波的频谱进行计算得到。因为被探测头或像素元探

测到的光波各频率分量的强度在经过色散器件后与原来没有经过色散器件时的各频率分量强度相比都有一定程度的改变,即图2中各个小矩形的面积发生了变化。由于不同频率的光波经过色散系统后具有不同的衍射光强、散射光强、干涉光强、滤波光强分布,因此各频率分量在经过色散系统前后被探测头或像素元探测到的强度改变的比例互不相同。而这些改变比例,即探测头或像素元对于待测光波中各频率分量的探测率,可以事先通过将各个频率的光波(由单色仪或滤波片或可调谐激光器得到)经过与不经过色散系统,探测器所测值分别减去探测器的固有噪声相比后,计算测得。当光谱仪各部件的位置和结构固定,即使色散系统中的衍射孔或者散射粒子或者滤波膜等结构是无序排布,该探测率也是固定值,可以事先测得。因此就可以得到一个方程:方程中等号的一边是像素元或者探测头所探测得到的测量值,等号的另一边是待测光波中各频率分量的强度大小与探测头或像素元对于待测光波中各频率分量的探测率分别相乘后再相加所得到的计算值。为了得到 n 个方程,可以采用探测阵列芯片上不同位置处的像素元数据,或者通过控制系统改变不同时刻下的探测率(可以事先测得这些探测率),然后分别测量不同时刻单个探测头所探测到的数据。通过上述方法,可以得到一个方程组(或者矩阵方程),解此方程组(用MATLAB软件耗时1s左右)就可以得到待测光波各频率分量的大小,对所得数值用连续曲线进行拟合就可以得到待测光波的归一化频谱。

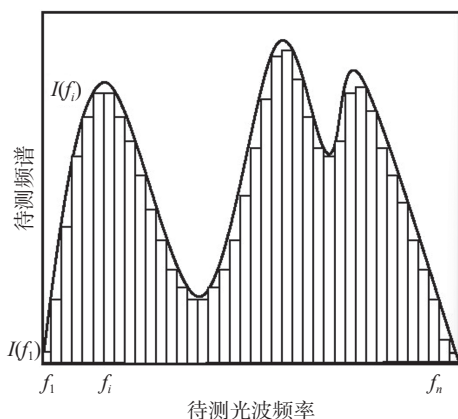


图2 频谱划分示意图

1.2.2 宽光谱复原原理设计

如果仅采用以上方法,光谱仪进行光谱复原

的频率范围将受制于信号采集系统中探测器所能测量的频谱范围。如由于普通感光耦合元件(charge coupled device, CCD)是以硅作为光敏材料,其波长探测范围一般在400~1000 nm波段,所以光谱仪只能在这个波长范围内复原光谱。如果想要进一步扩展光谱复原的范围,传统的方案是采用具有不同探测波长范围的探测器。如采用碲镉汞(HgCdTe)等光敏材料制成红外CCD^[12]可以在红外波段进行光谱复原。但这些材料制成的探测器制作成本较高,工作时需要进行制冷,并且在探测红外波段光的同时无法探测可见光等其他波段,因此限制了它在小型化光谱仪中的应用。而本文在教学中设计的方案是在探测器前方加上由至少一层波长转换发光材料制成的转换系统,它可以将超出探测器探测范围的待测光的波长转换至探测器的探测范围以内,而对探测器探测范围内的波长吸收较少或者有吸收,但发射光谱仍在探测器探测范围内。

斯托克斯定律认为某些材料受到高能量的光激发后,可以发出低能量的光。如紫外线激发材料后发出可见光,这样的材料就是下转换发光材料。相反,有些材料可以实现与上述定律正好相反的发光效果,于是我们称其为反斯托克斯发光,又称上转换发光,这样的材料称为上转换发光材料。我们所使用的波长转换材料就是上转换发光材料或下转换发光材料等一切具有吸收一种波长的光发射另一种波长的特性的材料,其转换效率可达80%以上。

因为普通的CCD等探测器都可以接收波长转换后或者直接透射出的可见光,而在光谱复原原理中对于待测光中各频率分量的色散是通过衍射、散射、干涉和滤波实现的,探测器仅需要对经过色散系统后的光进行强度的探测,即使加了波长转换系统后,探测器对波长转换前的各频率光的探测率也是固定值,所以依然可以采用上述解方程组的方法进行光谱复原。通过这种方法,不仅可以单独测量紫外、可见、红外这几个波段内的光谱,而且可以同时测量紫外至红外较宽频率范围内的光谱进行测量。

1.2.3 高分辨率光谱复原原理

在光谱复原范围一定的情况下,划分份数 n 越多通常意味着所复原光谱的频谱分辨率可以更高,同时也意味着方程组的数目越大。但如果方

程组的数目较多，用普通数学方法将无法求解该方程组。不仅如此，由于测量误差等原因，代入方程组的值都不是准确值，所以这类方程组在数学上称为病态方程组。病态方程组可以采用数学迭代等优化方法进行近似求解。在众多迭代求解大型方程组的方法中，凸优化方法、最小均方算法、交替方向乘子法、模拟退火算法等是数学上几种常用解大型病态方程组的方法^[13]。但如果直接采用这些方法复原光谱，仍然会出现光谱上下抖动等失真现象，所以需要学生对上述数学方法根据光谱仪的具体物理模型再加以改进。如根据方程组的特点采用由凸优化方法改进的吉洪诺夫正则化方法，但该方法需要根据探测器所测值选取合适的正则化参数，正则化参数的选取有 L-curve 方法以及广义交叉验证 (generalized-cross-validation, GCV) 方法等。为了得到更好的光谱复原效果，还可以在正则化方法的基础上加入光滑系数等优化项。但即使如此，对于频谱宽度较窄的光谱，光谱复原效果仍不够理想，还需要对光谱复原中所采用的数学方法作进一步优化。如针

对频谱宽度较窄的光谱，根据其波长划分份数不多但阵列式探测芯片所测得的数据较多的特点，学生可以尝试采用行与列不等的系数矩阵复原光谱。

1.3 实验系统设计

1.3.1 光谱仪基本结构与制作方法设计

光谱仪采用的探测器是阵列式探测芯片，如 CCD 或者 CMOS，它们可以通过不同位置处的像素元在同一时间测得多个数据。学生在设计光谱仪时，可以自行采用衍射、散射、滤波等不同的色散原理，分别设计衍射型光谱仪、散射型光谱仪、滤波型光谱仪的其中一种。它们的结构设计如图 3 所示。

图 3(a)和图 3(b)是衍射型光谱仪的结构设计，学生对色散系统的制作过程如下：在一个透明基底(如玻璃或者聚合物)表面镀一层金属膜，然后通过离子刻蚀或者光刻的方法在金属膜上制作大小不等、形状各异、分布不均的透光孔。由于不同波长入射光的衍射光强角分布不同，因此将阵列式探测芯片中各个像素元所测数据代入到方程组中计算就可以得到待测入射光的光谱信息。

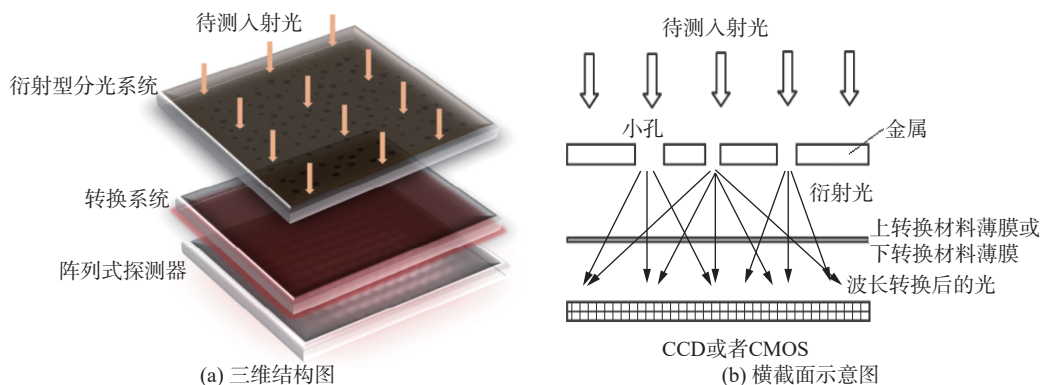


图 3 衍射型光谱仪结构设计图

图 4(a)和图 4(b)是散射型光谱仪的结构设计，学生对色散系统的制作过程如下：将正硅酸乙酯水解缩合方法所制作微纳米大小的二氧化硅颗粒或者银胶体所制作金属银的颗粒通过静电吸附、气相沉积或者旋转涂覆等方法杂乱组装在透明基底上，形成将上述大小不等的散射颗粒。

除以上材料之外，学生也可使用现有材料，如毛玻璃或者贴有散射膜的普通玻璃。由于不同波长入射光的散射光强角分布不同，而且同波长的相邻透射光之间也存在干涉效应，因此阵列式探测芯片中各个像素元所测数据各不相同，将这些数据代入到方程组中计算就可以得到待测入射

光的光谱信息。

图 5(a)和图 5(b)是滤波型光谱仪的结构设计，学生对色散系统的制作过程如下：采用微波染色法或者明胶染色法制备一系列光学彩色聚酯薄膜(选择对特定波段具有特殊吸收特性的染色剂进行着色即可)作为滤波膜，也可以采用超高精度喷墨打印机(DMP-3000)直接在透明基底的各位置处打印获得滤波膜。这些滤波膜在透明基底表面无序分布和重叠，经过各个滤波膜的透射光谱各不相同(透射光谱都是宽光谱，而非窄带渐变光谱)。最后对阵列式探测芯片中对应的像素元所测数据进行反演可复原出待测入射光的光谱。

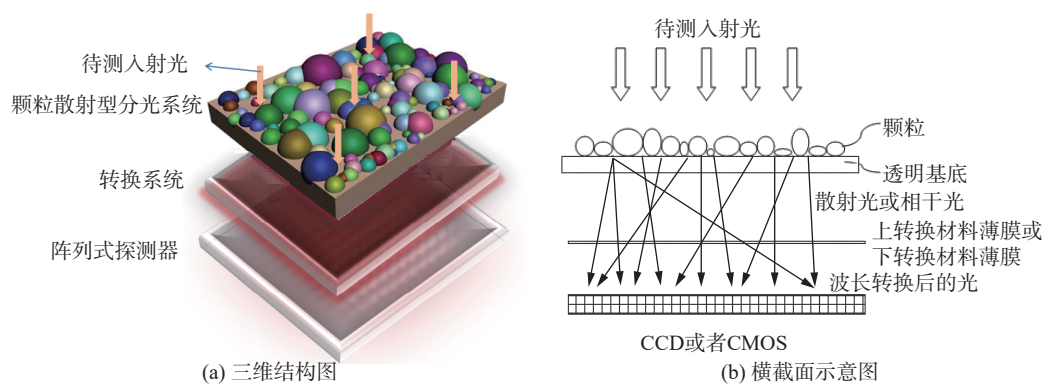


图4 散射型光谱仪结构设计图

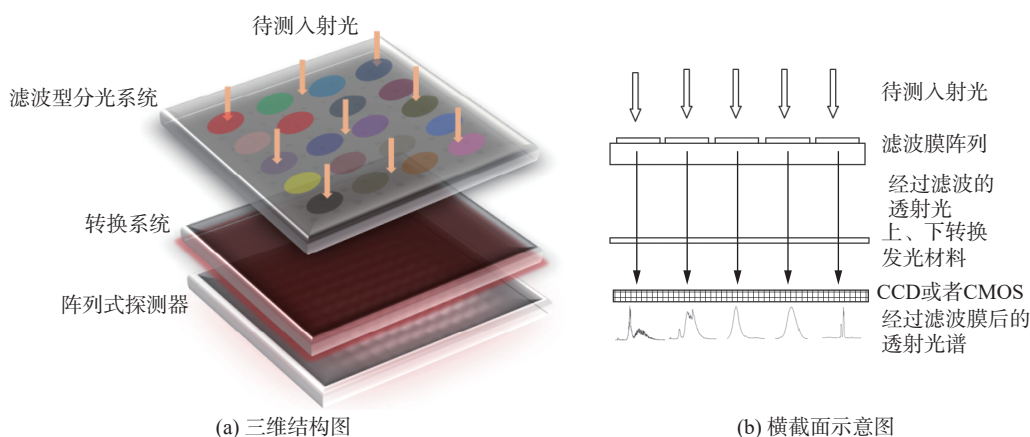


图5 滤波型光谱仪结构设计图

为了将光谱仪的探测范围扩展到紫外和红外波段,上述色散系统与阵列式探测芯片之间还应有至少一层转换发光材料制成的转换系统,或者直接用该材料制成色散器件或者色散器件的基底。如采用以下下转换发光材料: $(\text{MOF})\text{Eu}_3(\text{MFDA})_4(\text{NO}_3)(\text{DMF})_3$ ($\text{H}_2\text{MFDA} = 9,9\text{-dimethylfluorene-2,7-dicarboxylic acid}$)^[14-15]。除了下转换发光材料,为了使得光谱仪可以探测红外波段还需要采用上转换发光材料。学生在实验中除了自己研发最新的上转换发光材料外,还可以采用透射型红外光显示卡,如上海羽宸光电科技有限公司销售的 HCP-IR-1201 型红外光显示卡,该红外显示卡也是采用上转换发光材料制备而成。

2 实验教学效果

以某学生光谱测量实验过程及其在红外波段所获得的光谱测量实验结果为例,验证宽波段光谱复原的可行性。实验采用宽波段的放大自发辐射激光器(COSC, LSM-ASE-CF13M-M, 21.4 mW)作为光源,色散系统采用毛玻璃,转换系统采用

龙彩科技生产的中红外显示卡(Yu Chen, HCP-IR-1201),数据采集系统采用普通硅基的 CCD (SONY ICX285AL)。实验中利用可调谐激光器(YOKOGAWA, AQ2200-136, 8.9 mW)作为校准光源,用于测量像素元对于待测光波中各频率分量的探测率。该光源可调节的波长范围是 1440~1640 nm,可调节的最小波长步距为 1 pm,激光光源输出稳定性 24 h 内小于 0.1 dB。利用以上仪器进行红外波段成像光谱实验,构建图 4 所示的实验光路,学生的实验分为以下 3 个步骤。

1) 关闭激光器光源,探测器探测实验环境的光强度,获取实验的背景噪声。

2) 利用可调谐激光器采集各波长的红外光未通过色散元件情况下的光强度。将可调谐激光器、光纤分束器和光纤滤波器依次连接。设置可调谐激光器在 1470~1630 nm 范围内,以 1 nm 的波长步距间隔进行调节。每次改变波长后使用 CCD 拍摄一张图像,这样就得到了从 1470 nm 到 1630 nm 每隔 1 nm 的波长在 CCD 上的图像。然后在光路中加入毛玻璃与红外显示卡。调节激光

器, 拍摄各波长的光通过毛玻璃和上转换发光材料后的图像。让可调谐激光器的发射波长为 1470 nm, 波长间隔 1 nm 改变一次, 每次改变波长后使用 CCD 拍摄一张图像, 便得到了从 1470 nm 到 1630 nm 每隔 1 nm 的波长在 CCD 上的图像, 可以得到测量像素元对于待测光波中各频率分量的探测率。

3) 将宽波段激光器(ASE-CF13M)出射的光通过滤波器(THORLABS, FB1550-12)后得到的光作为待测光, 使其依次通过准直装置、毛玻璃、红外显示卡, 最后被 CCD 所探测。将所得结果输入到计算机后, 用前述吉洪诺夫正则化方法进行计算, 从而得到待测光的光谱, 并将该光谱与商用光谱仪(YOKOGAWA, AQ6370D)所测结果作对比。

由图 6 可知, 复原光谱的峰值与商用光谱仪测量的光谱峰值相比峰值偏移量为 2 nm。与此同时, 光谱波形基本相同, 证实了采用上转换发光材料设计小型光谱仪测量红外光谱的可行性。

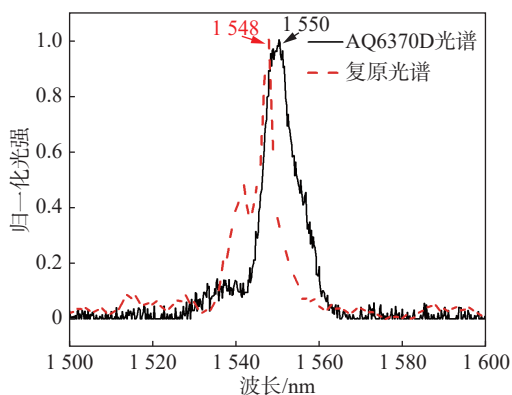


图 6 复原所得红外光谱(红色虚线)与商用光谱仪所测红外光谱(黑色实线)的对比图

除了通过现有上转换发光材料测量红外光谱外, 本文设计了另一个实验使学生通过制备下转换发光材料测量紫外光谱。某学生制备下转换发光材料及光波长转换部件的过程如下。将 2.03 g 2,7-二溴-9 芴酮溶解在 220.0 mL 的四氢呋喃中, 并将该溶液冷却至零下 78 °C。然后在 10 min 内向溶液中缓慢加入 7.5 mL 甲基锂(16 mmol)。1.0 h 后, 将 24.0 mL 叔丁基锂(31.2 mmol)用 30 min 缓慢加入溶液中。2.0 h 后, 向溶液中通 1.5 h 的二氧化碳气体, 然后将冷却槽移走, 得到悬浮液。这个悬浮液在室温下搅拌 1.0 h 后减压蒸馏得到固体。将得到的固体溶解在 90.0 mL 的水

中, 接着边搅拌边加入 20.0 mL 二氯甲烷和 4.0 mL 浓盐酸得到粉红色固体沉淀物, 经过滤后再热水洗涤, 并在 40 °C 干燥 12.0 h, 得到了 9-甲基-9-羟基-芴酮-2, 7-二羧酸(H2MHFDA)。将 28.4 mg H2MHFDA、44.7 mg 硝酸铊、5.0 mL 二甲基甲酰胺、2.0 mL 乙醇、1.0 mL 乙腈和 1.0 mL 水加入到 25.0 mL 聚四氟乙烯内衬的反应釜中, 将反应釜放置在烘箱中, 并在 80 °C 下恒温。在 3 天的实验课中, 将反应釜在室温下慢慢冷却, 就可得到淡黄色晶体。将得到的淡黄色晶体研磨超声后分散在四氢呋喃溶剂中, 旋涂于透明基底表面并烘干, 可得到光波长转换部件。采用以上测量红外光谱类似的步骤, 得到如图 7 所示紫外复原光谱(红色虚线)与商用光谱仪(塞曼 S3000-UV)所测紫外光谱(黑色实线)的对比图。

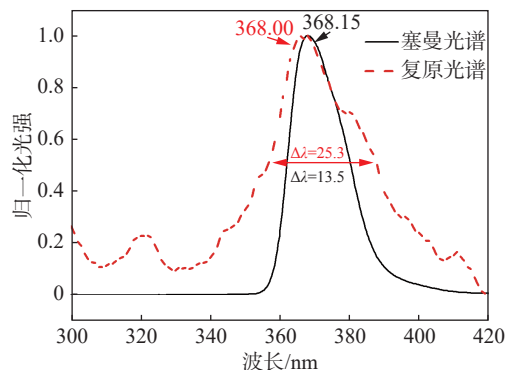


图 7 紫外复原光谱(红色虚线)与商用光谱仪所测紫外光谱(黑色实线)对比图

如图 7 所示, 采用商用光谱仪测得的光谱峰值为 368.15 nm, 而基于下转换发光材料的光谱仪测得的光谱峰值为 368.00 nm。复原光谱的光谱峰值和商用光谱仪测得的光谱峰值结果只相差 0.15 nm。虽然由于实验中外界环境光等干扰因素的影响, 复原光谱的半高宽与商用光谱仪所测半光谱宽相比宽了 11.8 nm, 但是通过该实验基本验证了采用学生自制的下转换发光材料可以有效地复原紫外光谱。

在教学过程中也有实验讨论的环节, 讨论的题目是“加入转换发光材料制成的转换系统是否会影响光谱正确复原”。学生在教师指导下进行分析后认为: 光谱能正确复原的前提是事先得到阵列式探测芯片中各个像素元对入射光中各波长光的探测率, 因此必须严格保证光谱仪中各部件的相对位置始终不发生变化。在此前提下, 即使

在光路中加入转换系统,但由于器件制作好了之后,探测率是一个恒定的值,可以事先测得,所以对器件性能不会产生影响。对器件性能可能产生影响的因素是:各像素元所采集的数据需要有一定的区分度。如果相邻两个像素元所采集的数据过于接近,那么将这些数据代入到方程组后所形成的矩阵方程中的矩阵将不能满秩,从而使得解方程组后复原出的光谱出现失真。因此,在实验中提取像素元数据时,可以隔一个或者几个像素元取一个数据,以保证各数据之间具有一定的区分度。

在教学过程中,学生也需要思考:如果加了转换系统后,除了测量紫外光的光谱外,采用同样的光路结构是否还可以测量可见光的光谱。为了验证该系统同样也可以测量可见光的光谱,学生做了相关实验。实验结果表明:当待测光的光谱不在下转换发光材料的吸收光谱范围内,但还在 CCD 可探测的范围内时,待测光源通过色散系统分光后,将直接透过下转换发光材料,被 CCD 探测到。因此即使采用转换系统,用上述同样的复原方法也可以复原可见光的光谱。加了转换系统后,采用本文的光谱仪测量的可见光光谱与采用商用光谱仪(海洋光学 HR4000)所测的可见光光谱的对比图如图 8 所示,可见两个光谱的波形和峰值相差不大。

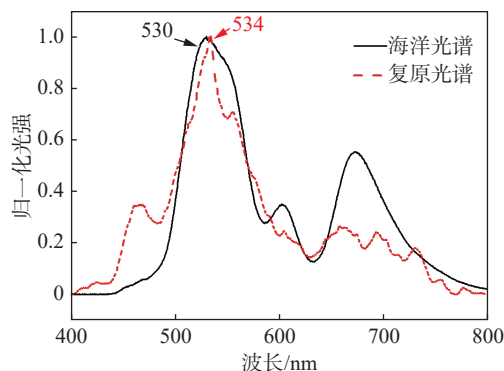


图 8 加入转换系统后复原所得可见光光谱(红色虚线)与商用光谱仪所测可见光光谱(黑色实线)对比图

通过以上实验内容,有效提升了学生对“光电子器件与工艺”课程相关专业知识的理解和应用能力,体现以“学生为中心”的教育理念。课堂反馈表明,该实验教学效果良好,学生对实验的兴趣足、参与感高,实验课堂氛围明显改善;学生普遍反映该综合性实验教学有效提升了其理论

实践及创新应用能力。2022 年开设该实验后,“光电子器件与工艺”课程的学生评教分数达到 94.16 分,相较于 2021 年的 92.56 分提高了 1.73%。

3 结束语

综合性实验教学使学生不仅掌握了“光电子器件与工艺”课程相关的专业理论知识,更加深了对上转换或下转换发光材料功能的认识和理解,充分体现出对学生理论知识、实践能力及创新能力方面的培养作用,为新工科背景下的专业课程教学改革,以及高素质综合性专业人才培养提供了有力支持。此外,在教学实践中,鼓励学生在理解相关理论的基础上进行创新,如采用不同的上转换或下转换发光材料和不同的色散原理设计并制备各种不同的光谱仪,研究如何将发光材料和光谱仪器件相结合制成可测红外或紫外波段的光谱仪。学生所做出的实验结果也显示新型光谱仪具备测量红外和紫外光谱的能力。本实验教学改革切实提升了学生的实践能力和创新能力,使学生将来不仅能够从事传统材料的相关工作,还能从事其他光电功能器件等高新技术产业领域的相关工作。

参考文献

- [1] 杨墨,肖良丽. 钢筋与混凝土粘结力学性能实验教学设计[J]. 实验科学与技术, 2024, 22(3): 74-79.
- [2] 沈晓,程勇. 基于大型科研项目的教学实验设计[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(8): 189-193.
- [3] 周一恒,严家明,吴新忠,等. 融合科研成果的综合创新实验教学探讨[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(11): 230-234.
- [4] 沈晓. 基于大型仪器的本科生创新实验课程体系建设[J]. 教育现代化, 2020, 7(50): 110-112.
- [5] YANG T, HUANG X L, HO H P, et al. Compact spectrometer based on a frosted glass[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2017, 29(2): 217-220.
- [6] YANG T, XU C, HO H P, et al. Miniature spectrometer based on diffraction in a dispersive hole array[J]. Optics Letters, 2015, 40(13): 3217-3220.
- [7] YANG T, ZHANG Y, GE J C, et al. Compact terahertz spectrometer based on sequential modulation of disordered rough surfaces[J]. Optics Letters, 2019, 44(24): 6061-6064.
- [8] WU J, LIU H, CHEN W W, et al. Device integration of electrochemical biosensors[J]. Nature Reviews Bioengi-

- neering, 2023, 1(5): 346–360.
- [9] ANTOSIEWICZ J, SHUGAR D. UV-vis spectroscopy of tyrosine side-groups in studies of protein structure. part 2: Selected applications[J]. Biophysical Reviews, 2016, 8(2): 163–177.
- [10] CALVIN A, EIERMAN S, PENG Z Y, et al. Single molecule infrared spectroscopy in the gas phase[J]. Nature, 2023, 621(7978): 295–299.
- [11] YANG T, PENG J X, LI X G, et al. Compact broadband spectrometer based on upconversion and downconversion luminescence[J]. Optics Letters, 2017, 42(21): 4375–4378.
- [12] 朱耆祥. CCD 成像探测器[J]. 现代物理知识, 2009(6): 8–11.
- [13] BOYDS, VANDENBERHEL. Convex optimization[M]. New York: Cambridge University Press, 2004.
- [14] ZHOU X H, LI L, LI H H, et al. A flexible Eu(III)-based metal-organic framework: Turn-off luminescent sensor for the detection of Fe(III) and picric acid[J]. Dalton Transactions, 2013, 42(34): 12403.
- [15] ZHOU X H, LI H H, XIAO H P, et al. A microporous luminescent europium metal-organic framework for nitro explosive sensing[J]. Dalton Transactions, 2013, 42(16): 5718–5723.

编辑 王燕

(上接第 48 页)

模量高于铝材, 因此钢-铝粘合梁的中性轴位于钢侧, 钢-钢层合梁的中性轴位于各子梁的中部。同时, 对于钢-铝粘合梁, 弹性模量更大的钢材承担的最大应力约为 51 MPa(压应力), 弹性模量较小的铝材承担的最大应力约为 29 MPa(拉应力), 由此可见, 弹性模量大的材料承担了更大的应力。此外, 值得注意的是, 钢-铝粘合梁的最大拉、压应力均小于钢-钢层合梁的最大拉、压应力(约为 75 MPa), 体现了两种材料粘合而成的复合材料梁, 以较轻的重量便可获得较高的强度。

4 结束语

本文针对工程中经常使用的层合梁结构和粘合梁结构, 开展材料力学弯曲正应力的虚拟仿真拓展研究。梳理了钢-钢层合梁和钢-铝粘合梁两类复杂梁结构的基本概念, 明确了应力分布、中性层、胡克定律等概念。理论分析、实验测量和虚拟仿真的结果一致性可为学生理解和掌握弯曲变形的相关概念和问题分析提供帮助。

参考文献

- [1] 范钦珊. 工程力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [2] 刘鸿文, 材料力学 I[M]. 6 版. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- [3] 曹建华, 郭东旭. Mathematica 在材料力学弯曲问题中的应用[J]. 现代信息科技, 2022, 6(11): 117–125.
- [4] 孔祥清, 曲艳东, 李韧, 等. 材料力学课程教学改革与实践探讨[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(2): 174–178.
- [5] 盛鹰, 贾彬, 陈国平, 等. 材料力学课程加强学生力学建模能力培养的教改初探[J]. 教育现代化, 2019, 6(70): 79–82.
- [6] 张晶晶, 李旭阳, 王淼, 等. 力学创新人才培养实验教学新范式建设与实践[J]. 实验室科学, 2024, 27(6): 2–4.
- [7] 韩铁林, 马凯, 胡义锋, 等. 新工科背景下材料力学课程教学改革与实践[J]. 力学与实践, 2024, 46(5): 1096–1107.
- [8] 黄涛, 胡佳恒, 付佩. 虚拟仿真实验在材料力学课程教学改革中的应用研究[J]. 实验科学与技术, 2022, 20(1): 34–38.
- [9] 张建勋, 徐志敏, 白金文. ABAQUS 软件在“工程力学”课程教学中的应用[J]. 装备制造技术, 2023(8): 101–103.
- [10] 黄学伟. ABAQUS 软件在材料力学连接件强度计算教学中的探索[J]. 当代教育实践与教学研究, 2018(6): 202–203.
- [11] 马驰骋, 荆栋, 王延遐. 材料力学教学中的有限元数值实验研究[J]. 当代教育实践与教学研究(电子刊), 2021(19): 52–54.
- [12] 周腾, 吴之豪, 史留勇. 有限元分析及混合教学法在材料力学课程中的教学研究[J]. 高教学刊, 2021, 7(35): 82–86.
- [13] 华珍, 王天锡, 张绪贞, 等. ADINA 在工程力学课程教学中的应用[J]. 教育教学论坛, 2020(15): 240–242.
- [14] 徐兵, 尹冠生, 余斌, 等. 有限元法在材料力学案例教学中的运用研究[J]. 实验科学与技术, 2018, 16(1): 82–85.
- [15] 刘海峰, 白俊英, 车佳玲, 等. “材料力学”课程思政改革与实践[J]. 教育教学论坛, 2024(27): 73–76.
- [16] 乐建波, 况小春, 计燕华. “材料力学”教学内容思想政治教育元素发掘与探索[J]. 教育教学论坛, 2022(14): 133–136.

编辑 葛晋