

分类号: TG376.4

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2210120139



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 基于力致发光光强比的冲击检

测方法研究

论 文 作 者 王康

校 内 导 师 郑衍畅

校 外 导 师 万桂波

专业学位类别 机械

研究方向(领域) 冲击检测方法

论文提交日期: 2024 年 5 月 31 日

分类号：TG376.4

单位代码：10363

密 级：公开

学号：2210120139

基于力致发光光强比的冲击检测方法研究

RESEARCH ON IMPACT DETECTION METHOD BASED ON MECHANOLUMINESCENCE INTENSITY RATIO

学 生 姓 名 : 王康

校 内 导 师 : 郑衍畅

校 外 导 师 : 万桂波

专业学位类别: 机械

研究方向（领域）: 冲击检测方法

论文答辩 2024 年 5 月 27 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：



日期 2024 年 5 月 31 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

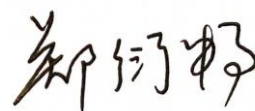
保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

不保密 ☒。

学位论文作者签名：



指导教师签名：



日期：2024年5月31日

日期：2024年5月31日

基于力致发光光强比的冲击检测方法研究

摘 要

冲击的检测对于理解和提高结构的性能和安全性至关重要，在航空航天、军事工程、运动科学和汽车安全测试等领域应用广泛。传统的冲击检测方法包括电阻应变片、压电传感器等。这些方法无法实现冲击应力的可视化，通常需要进行复杂的数据分析，并且在精确识别冲击发生的具体位置上也存在难度。近年来，力致发光材料因其独特的机械应力感应特性而成为冲击检测传感器开发的新方向。这类材料受到冲击时能发光，其光强的变化与施加的力量直接相关，从而提供了一种更加直观的观察和分析受力区域的方式。

本研究旨在深入探索力致发光材料在冲击检测领域的应用，并提出了一种基于力致发光光强比的冲击检测方法。这种方法不是基于单一的绝对光强度值，而是建立冲击力与两种不同波长发光强度比之间的关系，从而可以减少外部环境因素对结果的影响。具体研究内容如下：

1) 力致发光薄膜传感器的制备、机理分析及力学表征实验平台的搭建。通过混合不同比例的 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 力致发光粉末与聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 制备出了不同发光特性的薄膜传感器，并研究了这些粉末在 PDMS 中的分散状态。对薄膜传感器的光学传感机理进行了详细探讨，并通过搭建落球实验平台来定量评估薄膜传感器受到小球不同冲击力的光强变化。

2) 小球冲击引起薄膜传感器的力致发光响应及其光谱特性的定量分析。研究表明，冲击导致的光斑亮度、大小和衰减时间与冲击强

度紧密相关。通过光谱分析，建立了单一 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜传感器的光谱峰值强度与小球冲击速度的线性关系，并揭示了两种材料在不同混合比下的颜色变化规律。提出了一种基于力致发光峰值比的新型冲击力检测方法，该方法具有较强的环境适应性，能有效抵抗外界干扰，相比传统方法更具应用潜力。

3) 多通道光谱传感装置的构建，用以替代传统的光谱仪。通过 AS7341 光谱传感模块与 Arduino 控制器的集成构建了多通道光谱采集装置，实现了对 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜传感器在小球冲击下的多通道光谱响应的精确采集和分析。实验结果与传统光谱仪高度一致，证明了多通道光谱采集装置在力致发光冲击检测中的高效性和可行性。基于此装置，建立了峰值通道输出比与小球冲击力间的线性定量关系，为未来冲击力检测技术的发展提供了实用且经济的解决方案。

4) 探索了基于图像的冲击检测方法，与前面单点式的冲击检测方法相比，进一步扩展了应力二维分布、冲击点定位和冲击过程可视化方面的功能。通过采用双相机系统捕获力致发光的峰值波段图像，建立了峰值波段图像灰度值比与小球冲击力的定量关系。这种方法相比传统依赖绝对光强的图像采集方式，减少了环境光等外界因素的干扰，增强了实验结果的稳定性和适用性。此外，研究还涵盖了对光斑面积、薄膜压缩距离与小球冲击强度之间关系的定量分析。通过实验，我们成功评估了人手各掌指关节敲击薄膜传感器时的冲击力度，展示了这项技术在冲击检测领域的应用前景。

关键词：冲击检测，力致发光，薄膜传感器， $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ ， $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$

RESEARCH ON IMPACT DETECTION METHOD BASED ON MECHANOLUMINESCENCE INTENSITY RATIO

ABSTRACT

Impact detection is crucial for understanding and improving the performance and safety of structures and finds wide applications in areas such as aerospace, military engineering, sports science, and automotive safety testing. Traditional methods of impact detection include resistive strain gauges and piezoelectric sensors. However, these methods fall short in visualizing impact stresses, often requiring complex data analysis, and face difficulties in accurately identifying the precise location of impacts. In recent years, mechanoluminescent materials have emerged as a novel direction for developing impact detection sensors. These materials emit light under mechanical stress (such as impact or compression), where changes in light intensity or color correlate directly with the applied force, offering an intuitive means to observe and analyze stressed regions.

This research aims to delve into the application of mechanoluminescent materials in the field of impact detection and proposes an impact detection method based on the ratio of light intensities emitted at different wavelengths. This approach, unlike relying on single light intensity values, establishes a relationship between impact velocity and the ratio of light intensities at two distinct wavelengths, reducing the influence of external environmental factors. The specific content of the study includes:

- 1) Fabrication and Mechanistic Analysis of Mechanoluminescent Film Sensors. The study involved creating film sensors with varied luminescent characteristics by mixing $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ and $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ mechano-

luminescent powders in varying ratios with Polydimethylsiloxane (PDMS). The distribution of these powders within the PDMS matrix was thoroughly examined. The optical sensing mechanisms of these film sensors were explored in detail, and a drop ball experiment setup was constructed to quantitatively evaluate the changes in light intensity under varying impact forces.

2) Quantitative Analysis of Impact-Induced Mechanoluminescent Response. The study revealed a close correlation between the brightness, size, and decay time of the light spots produced by impacts and the intensity of the impacts. Spectral analysis was used to establish a linear relationship between the peak intensity of the luminescence from ZnS:Cu^{2+} and ZnS:Mn^{2+} film sensors and the velocity of the impacting ball. Additionally, the study uncovered how varying the ratio of these materials alters the color of the luminescence. A novel impact detection method based on the ratio of luminance peaks was proposed, offering better environmental adaptability and resistance to external interference compared to traditional methods.

3) The construction of a multi-channel spectral sensing device to replace traditional spectrometers. A multi-channel spectral acquisition device was constructed through the integration of the AS7341 spectral sensing module and an Arduino controller. This device enabled the precise collection and analysis of multi-channel spectral responses from ZnS:Cu^{2+} and ZnS:Mn^{2+} thin film sensors under the impact of small spheres. Experimental results highly matched those of traditional spectrometers, demonstrating the efficiency and feasibility of the multi-channel spectral acquisition device in impact detection through mechanoluminescence. Based on this device, a linear quantitative relationship between peak channel output ratio and the impact force of the small sphere was established, providing a practical and economical solution for the

development of future impact detection technology.

4) An image-based impact detection method was explored, which, compared to previous single-point impact detection methods, further expands capabilities in terms of two-dimensional stress distribution, impact point localization, and visualization of the impact process. By using a dual-camera system to capture peak wavelength images of mechanoluminescence, a quantitative relationship between the grayscale values of peak wavelength images and the impact force of a small sphere was established. This method reduces interference from external factors such as ambient light, compared to traditional image acquisition methods that rely on absolute light intensity, thereby enhancing the stability and applicability of experimental results. Additionally, the study also includes a quantitative analysis of the relationship between the area of the light spot, the compression distance of the film, and the impact strength of the small sphere. Through experiments, we successfully assessed the impact force of various palm and finger joints hitting the film sensor, demonstrating the potential applications of this technology in the field of impact detection.

KEY WORDS: Impact Detection, Mechanoluminescence, Film Sensor, ZnS:Cu²⁺, ZnS:Mn²⁺

目录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 传统冲击检测方法.....	1
1.2.1 电阻应变片.....	1
1.2.2 压电式传感器.....	2
1.2.3 加速度计.....	2
1.2.4 光纤传感器.....	3
1.3 力致发光概述.....	4
1.3.1 力致发光的发展.....	4
1.3.2 力致发光的分类.....	5
1.4 基于力致发光的冲击检测研究现状.....	6
1.5 研究意义及研究内容.....	9
1.5.1 研究意义.....	9
1.5.2 研究内容.....	9
第 2 章 力致发光薄膜传感器的制备及发光机理分析.....	11
2.1 引言.....	11
2.2 力致发光薄膜传感器的制备方法.....	11
2.3 力致发光机理的分析.....	13
2.3.1 力致发光机理.....	13
2.3.2 理论分析.....	14
2.4 力学表征实验平台搭建.....	18
2.5 本章小结.....	19
第 3 章 力致发光薄膜传感器的冲击响应与光谱特性分析.....	20
3.1 引言.....	20
3.2 薄膜传感器的冲击发光响应.....	20

3.3 薄膜传感器的光谱响应.....	22
3.3.1 ZnS:Cu ²⁺ 薄膜传感器的光谱响应	22
3.3.2 ZnS:Mn ²⁺ 薄膜传感器的光谱响应	23
3.3.3 光谱峰值与冲击速度的关系.....	23
3.3.4 不同配比下 ZnS:Cu ²⁺ 和 ZnS:Mn ²⁺ 的光谱响应	24
3.3.5 不同配比 ZnS:Cu ²⁺ 和 ZnS:Mn ²⁺ 的色彩响应	25
3.4 基于光谱峰值比的冲击力检测方法.....	26
3.5 光纤探头测距对光谱影响.....	28
3.6 本章小结.....	29
第 4 章 力致发光薄膜传感器的多通道光谱响应.....	30
4.1 引言.....	30
4.2 多通道光谱采集装置的构建.....	30
4.2.1 AS7341 光谱传感器.....	30
4.2.2 AS7341 传感器的电路设计	32
4.2.3 多通道光谱采集装置的构建.....	34
4.2.4 多通道光谱采集实验.....	34
4.3 力致发光薄膜传感器的多通道光谱响应分析.....	36
4.3.1 ZnS:Cu ²⁺ 薄膜传感器的多通道光谱分析	36
4.3.2 ZnS:Mn ²⁺ 薄膜传感器的多通道光谱分析	37
4.3.3 ZnS:Cu ²⁺ 和 ZnS:Mn ²⁺ 混合配比薄膜传感器多通道光谱分析	38
4.4 基于峰值通道输出比的冲击力检测方法.....	40
4.5 本章小结.....	41
第 5 章 基于图像灰度值比的冲击检测方法研究.....	42
5.1 引言.....	42
5.2 实验装置与设备.....	42
5.2.1 相机.....	42
5.2.2 半透半反分光镜.....	44
5.2.3 滤光片.....	45
5.3 图像采集方案设计.....	46
5.4 图像的采集与处理.....	47

5.4.1 图像采集软件.....	47
5.4.2 图像去噪处理.....	48
5.4.3 灰度值获取.....	49
5.5 实验结果与分析.....	50
5.6 应用展示.....	54
5.7 本章小结.....	56
第 6 章 总结与展望.....	58
6.1 论文总结.....	58
6.2 研究展望.....	58
参考文献.....	60
攻读硕士专业学位期间学术成果.....	64
致谢.....	65

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

冲击的检测在多个领域发挥着至关重要的作用，特别是在航空航天、军事工程、运动科学、汽车安全测试和工业设备安全领域中^[1]。在航空航天领域，冲击检测对于确保飞行器结构的安全性和可靠性至关重要。例如，在航天器发射和入轨过程中，准确监测结构上的应力和冲击，可以帮助预防潜在的故障，保障任务成功^[2]。在军事工程中，冲击检测用于炮弹冲击力分析和弹道碎片分布评估，确保武器系统的性能和可靠性，帮助专家更准确地了解和优化武器在各种条件下的表现^[3]。在运动科学领域，冲击检测技术主要用于监测运动期间可能发生的过度冲击，预防运动伤害。通过分析运动员在训练和比赛中的冲击数据，协助他们识别和避免潜在的危险动作，引导更加安全高效的训练^[4]。在汽车工业中，冲击检测则用于提升车辆的碰撞安全性，确保乘客在事故中的保护，有效降低重大伤害的风险^[5,6]。在工业设备安全领域，通过对机械设备受冲击的检测，可以分析其受力状况及工作状态，验证结构设计方案的合理性，可以对结构成本进行有效的控制，并减少对结构的损坏^[7,8]。目前传统的冲击检测方法虽然在多个领域有重要应用，但它们普遍面临几个主要的限制。这些方法通常不能实现冲击应力的可视化，这限制了对冲击影响的直观理解和分析。此外，传统方法通常需要进行复杂的数据分析，在精确识别冲击发生的具体位置上也存在困难^[9,10]。

当前技术中存在的限制强调了开发新型冲击检测技术的紧迫性，旨在增强冲击应力的可视化，简化数据分析流程，并提升冲击发生位置的检测精度。这对于提升相关应用领域的安全性和效率不仅至关重要，而且对于推动技术的持续发展和创新具有深远影响。

1.2 传统冲击检测方法

1.2.1 电阻应变片

电阻应变片，一种在冲击检测中广泛使用的设备，工作原理基于应变效应。

当物体因受力而发生形变时，附着于其表面的应变片同样变形，导致其电阻值发生变化。这一变化被测量装置捕获并转换为应力或应变数据，实现对冲击力的监测。在冲击检测领域，电阻应变片传感器能够精确提供冲击点材料应力信息，对评估结构在受冲击时的反应和完整性极为重要。在工程结构、车辆安全测试和运动设备研发等领域，其高度精准的微小形变监测功能，助力工程师和研究人员进行分析和设计优化。这些传感器的主要优点在于其高灵敏度和精确性，使其在需要精细测量应力分布的场合极为有用。同时，它们体积小、安装便捷，适用于多种尺寸和形状的物体。然而，电阻应变片也有其局限性。它们可能对环境变量如温度和湿度敏感，需要在使用前进行适当校准。此外，由于通常设计用于单点应变测量，因此在需要评估大面积或多点应力分布时，可能需使用大量传感器和进行复杂的数据分析^[11]。

1.2.2 压电式传感器

压电传感器的工作原理基于压电效应。这一效应是指特定的压电材料（如石英、某些特殊陶瓷和晶体）在受到外力压缩或拉伸时，其内部结构发生改变，从而在材料的两端产生电压。当材料受到冲击或应力时，内部结构的变化导致电荷重新分布，进而产生一个可以测量的电信号。这个信号的强度和特征与施加在材料上的冲击力或应力的的大小和性质直接相关。压电传感器的主要优点在于其高灵敏度和快速响应能力。它们能够检测非常细微和短暂的力变化，因此非常适合于动态过程和瞬时冲击事件的监测。此外，这些传感器的体积通常较小，便于集成到各种不同的系统和设备中，不会对被测系统的性能产生太大的影响^[12-14]。

然而，压电传感器在冲击检测应用中也存在一定的局限性。首先，它们通常只能提供单点的冲击信息，无法直观地展示冲击在整个结构中的分布。因此，当需要了解冲击在较大面积或多个点上的分布时，可能需要多个传感器协同工作，增加了系统的复杂度和成本。其次，由于它们是基于电信号的，所以无法直接实现冲击过程的可视化。

1.2.3 加速度计

加速度计是一种测量物体加速度的仪器，它们能够检测物体速度随时间变化

的程度。这些装置的核心原理基于牛顿运动定律，特别是对于惯性的描述。在加速度计的內部，通常有一个小的质量（称为“质量块”），通过一种机械（如弹簧）或电子方式（如微电子机械系统，MEMS）与传感器相连。当加速度计随物体移动或遭受冲击时，质量块由于惯性会相对于其固定位置发生位移。这种位移被传感器检测，并转换为电信号。加速度计内部的电子装置或软件随后解读这些电信号，以确定物体的加速度。这种测量可以是单轴的，也可以是多轴的，以提供不同方向上的加速度信息^[15]。

加速度计在冲击检测领域有着广泛的应用。这些设备通过检测内部质量块相对于其固定位置的位移来工作。这种位移，由于物体的移动或受到冲击而产生，被转换成电信号，从而得到加速度数据。在汽车行业中，加速度计被用于碰撞测试，帮助评估车辆的安全性能。在运动科学中，它们用于监测运动员的运动状态，预防伤害。在工业设备监测中，加速度计帮助监控设备的健康状况，防止故障。此外，它们也被用于建筑和航空航天领域，监测因外力如地震造成的冲击，保障结构和设备的安全。这种仪器的应用显示了其在检测和评估冲击事件方面的关键作用，对于提高安全性、预防损害和优化设计至关重要^[16]。

1.2.4 光纤传感器

光纤传感器在冲击检测中的关键作用基于其对于光信号传播特性的敏感反应。这些传感器能够通过检测光纤本身由于冲击而产生的微小物理变化，如应变、位移或形状改变，来精确地监测冲击事件。当光纤经历拉伸、压缩或弯曲时，光纤中的光波传播方式会发生变化，包括折射率、光纤长度或形状的微调。这些变化会影响光波的相位和强度，从而允许传感器检测到冲击事件的发生。特别是，光纤传感器中的布拉格光栅（FBG）技术在冲击检测中扮演着重要角色。FBG 是一种在光纤内部制造的周期性光栅结构，能够反射特定波长的光。当冲击作用于装有 FBG 的光纤时，光栅的周期和折射率会发生变化，导致反射光波长的移动。通过监测这种波长的改变，FBG 传感器能够精确地量化冲击强度，为诸如航空航天、土木工程和机械健康监测等应用领域提供了一种非侵入式、高灵敏度的冲击检测方案^[17,18]。

1.3 力致发光概述

1.3.1 力致发光的发展

力致发光现象最早可以追溯到 17 世纪初,在弗朗西斯·培根的《Advancement of Learning》一书中曾记录块状的糖块在受到刮擦或者破碎时能观察到光。这可以说是最早期的关于力致发光的文字记录^[19]。弗朗西斯·培根是通过摩擦的方式激发出糖块的发光,所以力致发光早期又被称为摩擦发光。一般而言,力致发光指在机械力作用下的发光现象。机械力的形式包括但不限于研磨、刮擦、摇动、吹气和按压等,在超声波、红外激光脉冲的条件下也可以产生力致发光现象^[20]。尽管力致发光现象发现的较早,但是由于普通材料的力致发光现象十分微弱,并且持续时间很短,又受限于当时落后的探测器,所以人们在很长一段时间内对力致发光的认识停留在浅显的表层,只能通过肉眼观察和定性分析,不能得到具体的发光数据,致使力致发光的研究进展缓慢。

自 20 世纪以来,随着微光探测技术的蓬勃发展以及新型发光材料的涌现,力致发光技术的应用迈入了崭新的阶段。研究者开始能够对力致发光现象进行更精确的定量分析。特别是在 20 世纪中叶,光电倍增管的使用使得力致发光强度的定量测量成为可能^[21]。此时,虽然大约 50%的无机化合物和 30%的有机分子固体被报告能产生力致发光,但多数情况下,这种发光被认为是与物质的破坏性变形相关的,限制了其实际应用^[22]。直到 20 世纪末期,徐超男等人^[23]对非破坏性的力致发光新材料和其潜在应用进行了研究。他们成功地将 ZnS:Mn^{2+} 、 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7\text{:Ce}^{3+}$ 等发光材料与弹性基体结合,使得外部施加的力主要作用于弹性基体。这种设计使得弹性基体能在不受损的情况下将机械能转移给力致发光粉体,实现了非破坏性的力致发光效果。这项研究为力致发光材料的实用化和广泛应用奠定了基础。进入 21 世纪,对力致发光材料的研究和报道数量显著增加,尤其是在 2010 年之后。力致发光材料的应用不仅在科学领域取得进展,也在工业、医学和环境监测等多个实际应用领域显示出巨大的潜力^[24,25,26]。今天,力致发光材料正在被广泛研究和开发,以解决各种现实世界的问题,并且预期在未来将会有更多新型力致发光材料的涌现,为科学技术带来新的突破和革新。

1.3.2 力致发光的分类

力致发光现象展示了广泛的尺度范围。从使用原子力显微镜探测单个微小颗粒时，到大型岩石在地震中发生裂缝时，都可能产生这一现象。在施加机械力的过程中，晶体通常会经历弹性变形、塑性变形，最终可能导致晶体破裂。根据晶体的变形与破裂方式，可以将力致发光分为弹性力致发光（Elasticoluminescence）、塑性力致发光（Plasticoluminescence）和破裂力致发光（Fractoluminescence）三类，如图 1-1 所示。

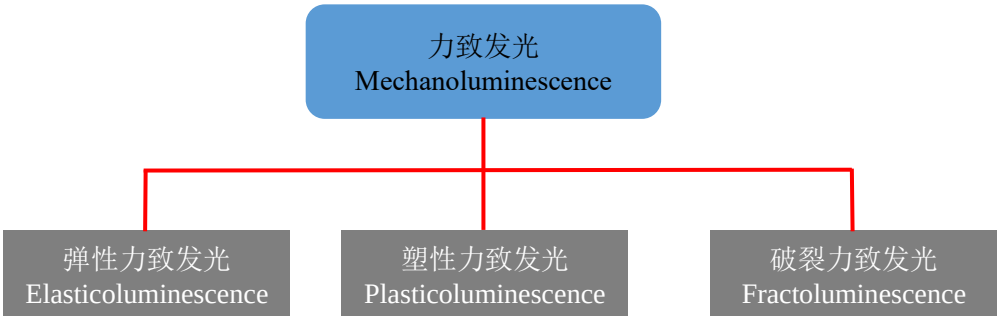


图 1-1 力致发光的分类

a.弹性力致发光

弹性形变引发的力致发光现象具有独特特征。在受到外力的刺激下，材料没有发生断裂或明显的损伤，因此这些材料能够在多次施加机械刺激的循环中产生可重复的发光现象，这一特性极为有利于在实际应用中实现长期稳定的发光效果。目前，基于弹性形变的材料是力致发光领域中应用最为广泛的一类。其中，诸如 ZnS:Mn^{2+} 、 ZnS:Cu^{2+} 和 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ 等材料在这方面取得了显著的成就。它们具有出色的弹性性质，能够在受力后恢复原状，从而使得发光过程可以在多个循环中稳定重复，而不会因为长时间的使用出现明显的衰减或失效^[27]。

b.塑性力致发光

塑性形变是一种不可逆的变形过程，它会导致晶体内部的微观结构发生显著改变，但并不会引起晶体的断裂。塑性力致发光是在受到一定范围内的外力后，晶体会发生持久的塑性变形，这种变形不会随着力的解除而完全恢复。塑性力致发光在需要对晶体进行持续应力监测的场合下具有重要意义，例如在地震活动监测中。此时，晶体能够记录并保持曾经承受的应力信息，使得塑性力致发光成为一种理想的材料选择。研究人员也在探索利用塑性力致发光材料进行材料损伤评

估和结构健康监测方面的应用^[28]。

c. 破裂力致发光

破裂是晶体在承受过大外力时发生的不可逆破坏过程，会导致晶体内部结构的完全瓦解。破裂力致发光是在晶体受到极大的外力时，会发生明显的破裂现象，同时伴随着强烈的发光。这种形式的力致发光在研究材料在极端条件下的断裂行为方面具有重要意义。破裂力致发光在地质科学和材料力学研究中得到了广泛应用。通过监测破裂时的发光信号，研究人员可以获取关于材料断裂过程的重要信息，从而对地质灾害的预测和防范提供了有力支持^[29]。

综上所述，弹性、塑性和破裂力致发光形式为晶体材料在受力作用下的不同响应机制提供了丰富的信息，为科学研究和工程应用提供了多样化的选择。在实际应用中，根据具体需求选择合适的力致发光形式将对实验和应用研究产生积极的影响，为材料科学和工程技术领域的发展做出重要贡献。

1.4 基于力致发光的冲击检测研究现状

近年来，力致发光材料在冲击检测领域的创新性发展受到了极大的关注。这类材料最大的优势在于它们能够将冲击直接转化为可视化的光信号，从而为冲击事件的分析与检测提供了即时和直观的信息。这种转换能力在很多应用场景中非常有价值，例如在车辆安全性测试和航空航天结构监测等领域，它们能够准确地显示出冲击的强度和具体位置。此外，力致发光材料的应用有助于实时监测和评估冲击事件，对于保护关键结构和系统至关重要^[30-32]。鉴于这些显著的优点，学术界对于这类材料在冲击检测领域的应用展开了深入的研究。

TOIVOLA 等人^[33]在 4,4'-二氨基二苯甲烷四缩水甘油胺（TGDDM）内混入二乙烯三胺（DETA）分子烧结制成树脂块体。发现该树脂在受到 0.93GPa 到 4.23GPa 的压应力时发光颜色会从蓝色向红色发生转变。因此，提出了利用 TGDDM-DETA 力致变色树脂层可视化检测碳纤维增强复合材料冲击损伤的方法。将 TGDDM-DETA 层通过环氧树脂和聚氨酯固定于碳纤维增强环氧树脂复合材料表面。当复合材料受到冲击时，利用 TGDDM-DETA 层的发光颜色和发光面积将冲击位置和载荷大小可视化的显示出来。

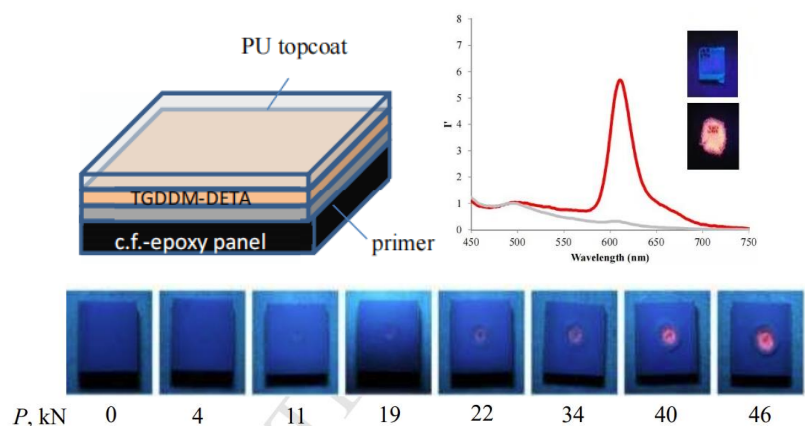


图 1-2 基于力致变色的冲击可视化检测^[33]

CARANI 等人^[34]设计了一种三明治结构的冲击传感器，见图 1-3 (a)。这种传感器将 ZnS:Cu 与钙钛矿结合，不仅可以将冲击力转化为瞬间的发光信号，也可以自供电。这些传感器被嵌入到复合层压板中，并在不同的冲击条件下进行了信号响应的测试。实验结果显示，当传感器受到不同冲击载荷的情况下能够产生明显的信号。此外，研究还证实，力致发光材料对于传感器的性能至关重要。在没有力致发光材料的情况下，传感器受到机械冲击时，并没有明显的光发射，因此没有明显的信号被观察到。而当添加了力致发光材料后，传感器在对撞击锤测试的响应中，能够在 100 kPa 到 200 kPa 的不同冲击力条件下发出清晰而一致的光信号，如图 1-3 (b) 所示。这些发现证实了该传感器在冲击检测应用中的有效性和可行性。

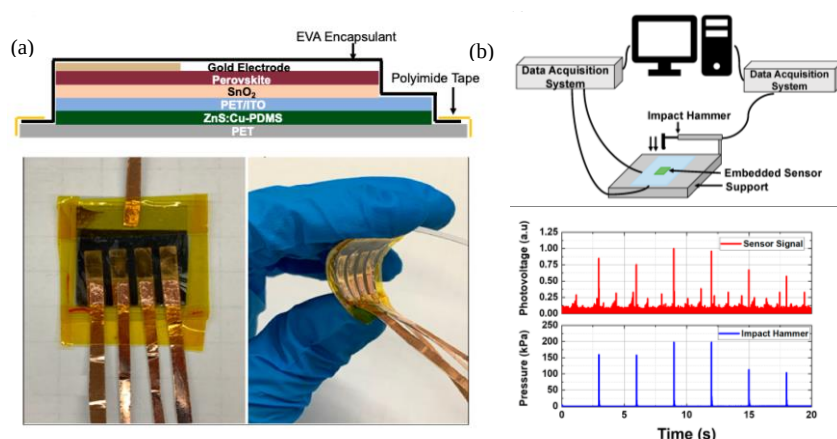


图 1-3 基于力致发光的冲击预警^[34]

JHA 等人^[35]研究了通过夹在透明固体基底和非透明薄膜保护层或钢板之间的力致发光膜制成的传感器。这些传感器能在受到冲击时产生力致发光，其强度和发光区域随着冲击速度的增加而增大，表明冲击动能被有效转换。特别地，使用 ZnS:Mn 力致发光粉的传感器展现出了优异的耐用性和稳定性。此研究表明这

1.5 研究意义及研究内容

1.5.1 研究意义

力致发光材料的发现为冲击检测传感器的发展开辟了新的途径。这类材料在受到机械应力，如冲击或压缩时会发光，其发光亮度的变化与施加的机械力直接相关^[37,38]。这种特性为观察和分析受力区域提供了一个更直观的方法。与传统的检测技术相比，力致发光技术可以实时显示冲击应力的分布，简化了数据的解析过程，并且可以精确定位冲击发生的位置。

在当前研究中，力致发光薄膜传感器的应用已被证明在冲击检测领域具有潜力。这些研究通常基于单一材料发出的绝对光强进行检测，但在复杂和不可预测的环境中，此方法显示出局限性^[39-41]。针对这一挑战，本文引入了一种新的检测方法：将两种不同的力致发光材料进行物理混合，并通过比较这两种材料发光强度的比值来测定冲击力。该方法的关键在于建立起冲击力与不同波长发光强度比值之间的联系，而非单纯依赖于绝对光强，这一策略有效降低了外部环境因素的影响，从而显著提高了力致发光技术在冲击检测应用中的可靠性和实用性。

1.5.2 研究内容

本文深入探讨了力致发光薄膜传感器在冲击检测领域的应用，提出了一种基于力致发光光强比的冲击检测方法。具体内容如下：

(1) 力致发光薄膜传感器的制备、机理分析及力学表征实验平台的搭建。通过将不同比例的 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 力致发光粉末与一种柔性基体混合，制备出具有多种发光特性的薄膜传感器，并深入研究了粉末在柔性基体中的分散状态。详细分析了薄膜传感器在受到小球冲击时的力致发光机理，并通过理论推导研究了薄膜传感器的力致发光强度与冲击力的关系。搭建了落球实验平台，以评估薄膜传感器在不同冲击强度下的光强变化情况。

(2) 系统分析了小球在不同高度下冲击薄膜传感器时的发光响应。通过观察力致发光光谱，探究了 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜传感器发光峰值强度与小球冲击速度间的关系。通过调整 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 的比例，研究了不同配比下薄膜传感器的光谱峰值和发光颜色的变化。在选定适当配比的薄膜传感器后，进

一步探究了薄膜传感器的光谱峰值比与小球冲击速度之间的关系，由此建立了一种基于力致发光光强比的冲击力检测方法。通过研究光纤探头与薄膜传感器之间的距离变化对光谱响应的影响，验证了这种方法具有更强的环境适应性和抗干扰性。

(3) 将 AS7341 光谱传感模块与 Arduino 控制器集成构建了多通道光谱采集装置，以替代昂贵和体积较大的光谱仪。研究了 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜传感器在小球冲击下的多通道光谱响应，并与光谱仪采集的光谱进行对比分析，验证该光谱采集装置在力致发光光谱采集中的可靠性。基于此装置，建立了峰值通道输出比与小球冲击力间的线性定量关系，为未来冲击力检测技术的发展提供了实用且经济的解决方案。

(4) 进一步研究了基于图像采集的冲击检测方法，以克服单纯依赖光谱响应分析无法实现冲击点定位、应力分布识别和冲击过程可视化的局限。利用两台安装了特定波长滤光片的相机和一个半透半反分光镜，搭建了一个用于采集力致发光峰值波段图像的装置。通过两台相机分别捕捉薄膜传感器内两个主要发光峰值波段的图像，并进一步建立了这两个峰值波段的灰度值比与冲击力之间的定量关系。此外，通过分析小球冲击薄膜传感器产生的光斑面积，计算出薄膜的压缩距离，并探究了光斑面积、薄膜压缩距离与小球冲击速度之间的关系。最后，通过实验评估了人手各掌指关节敲击薄膜传感器时的冲击力度，展示了基于图像灰度值比的冲击检测方法的应用前景。

第 2 章 力致发光薄膜传感器的制备及发光机理分析

2.1 引言

本章详细阐述了含有两种不同力致发光粉末 ($\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$) 的薄膜传感器的制备过程。通过将 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 以不同比例与聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 混合, 成功制备出五种不同发光特性的力致发光薄膜传感器。此外, 本章还深入分析了这些薄膜传感器在受到机械激励时的力致发光机理, 并通过理论推导研究了薄膜传感器的力致发光强度与冲击力的关系。为实现发光强度的定量评估, 搭建了一个力学表征平台, 采用落球实验来模拟不同强度的冲击力。

2.2 力致发光薄膜传感器的制备方法

表 2-1 实验试剂和设备

实验试剂及设备名称	型号	生产厂家
$\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 粉末	/	中国计量大学
$\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 粉末	/	中国计量大学
聚二甲基硅氧烷 (PDMS)	SYLGARD 184	康道宁公司
电子天平	ME104E	梅特勒-托利多仪器有限公司
混合机	SpeedMixer DAC 150	上海钧直进出口有限公司
匀胶机	EZ4-S-PP	江苏雷博科学仪器有限公司
真空干燥箱	DZF-6012	上海一恒
热板	SPHP-8	苏州美图半导体技术有限公司

在本研究中, 我们选择了 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 粉末作为力致发光的基质。 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 粉末具备诸多优良的力致发光性能, 例如发光强度高, 初始发光过程无需外部能量激励, 以及发光性能稳定且具有良好的重复性^[42,43]。这两种粉末目前是实验室和工业界使用最广泛的力致发光粉末。对于包裹粉末的高分子材料, 我们选择了目前实验中使用最多的聚二甲基硅氧烷 (PDMS)。PDMS 已被证明是一种具有优异机械和光学性能的聚合物, 广泛应用于柔性电子器件中。其高可见光波段透明度、适中的弹性模量以及高生物兼容性使其非常适合于制备力致发光薄膜。

本实验按照 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 这两种力致发光粉末在 PDMS 胶体中的不同质量比，制备出了五种薄膜传感器。具体制备过程如下：

(1) 使用电子天平按照 3: 0、2: 1、1.5: 1.5、1: 2、0: 3 这 5 种不同质量比分别称取 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 力致发光粉末，具体为方案 1 (3g $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$)、方案 2 (2g $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 1g $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$)、方案 3 (1.5g $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 1.5g $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$)、方案 4 (1g $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 2g $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$) 以及方案 5 (3g $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$)。

(2) 将力致发光粉末和 PDMS 按照质量比为 1: 1 混合。通过 SpeedMixer DAC 150 型号混合机将力致发光粉末与 PDMS 在 3600r/min、20s 条件下充分混合，确保力致发光粉末均匀的分散在 PDMS 胶体中。

(3) 通过 EZ4-S-PP 型号匀胶机将混合好的悬浊液涂覆于硅片表面（硅片表面喷有脱模剂，便于薄膜成型后的脱离），旋涂参数为 300r/min、15s。

(4) 将涂覆好的样品放置于真空箱内，确保薄膜内部没有气泡残留后取出。

(5) 将取出的样品置于 SPHP-8 型号的热板上，在 120°C 下热烘 1h。

(6) 对烘干成型的样品边缘进行修整，去除边缘效应导致的不均匀区域。

制备好的薄膜传感器样品如图 2-1 所示，直径 7cm。我们将薄膜传感器切片制成横截面，然后使用带刻度尺的光学显微镜测量了横截面的厚度，如图 2-2 所示薄膜厚度为 1mm。

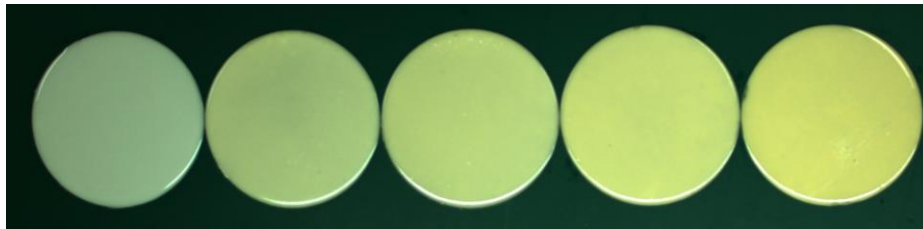


图 2-1 力致发光薄膜传感器

($\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 粉末的质量比从左到右依次是

3: 0、2: 1、1.5: 1.5、1: 2、0: 3)

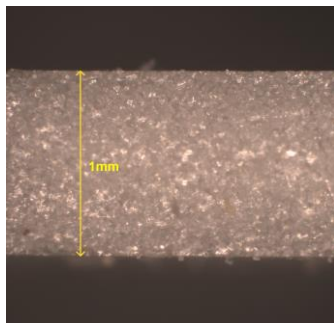


图 2-2 光学显微镜下薄膜传感器的截面图

图 2-3 展示了五种不同配比方案下的薄膜传感器截面扫描电子显微镜 (SEM) 图像。图像显示 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 这两种力致发光粉末在 PDMS 胶体中分散均匀, 未出现明显的分层现象。这种均匀分散可以实现力的有效传导, 保证薄膜传感器的发光效率^[44]。当外部机械刺激作用于 PDMS 时, 应力通过这些微观层面的相互作用被传导至力致发光粉末, 触发发光现象。

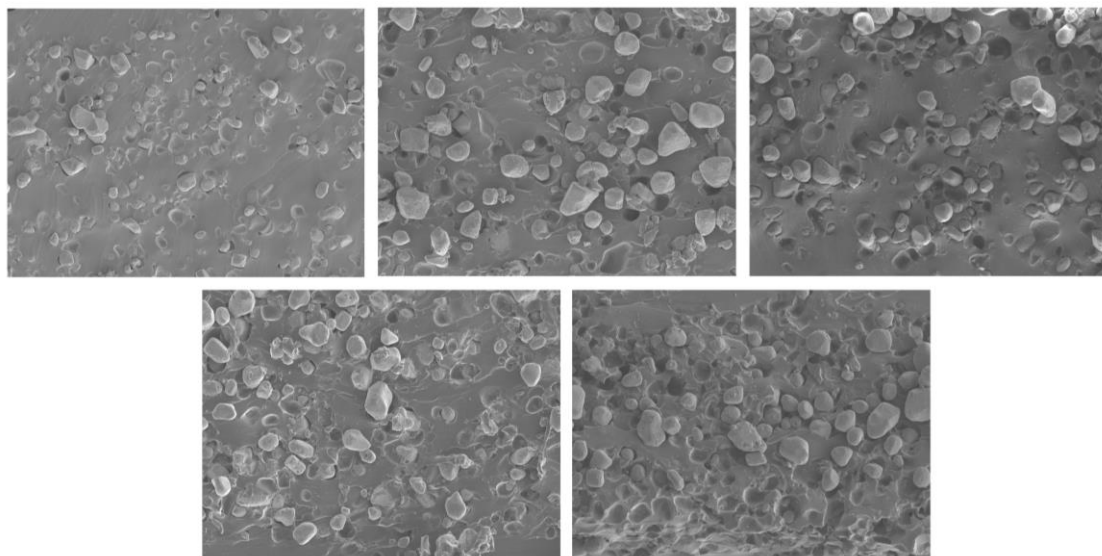


图 2-3 力致发光薄膜的截面 SEM 图

2.3 力致发光机理的分析

2.3.1 力致发光机理

对于 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 力致发光粉末, 普遍认为其发光机理涉及压电诱导的电子脱陷和供体-受体重组^[45,46]。图 2-4 展现了 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜传感器的力致发光机理。图中显示, 当力致发光薄膜受到外部作用力时, $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 粉末与 PDMS 基体之间的压缩产生应变应力。由于 ZnS 晶体具有铅锌矿结构, 在外部机械力的刺激下压电晶体的电荷中心沿一定方向轻微分离, 形成电偶极矩^[47], 并产生压电势。在压电电场的作用下, 导致电荷载流子的分离 (过程①), 分离的电子和空穴分别被低于电导带 (CB) 和高于价带 (VB) 的陷阱捕获 (过程②、③)。同时, 由于能带在内部压电势下或应变下倾斜 (过程④), 捕获的电子和空穴可以从陷阱中逸出。电子和空穴之间的复合发射共振地转移到 Mn^{2+} (过程⑤), Mn^{2+} 将电子从基态跃迁到激发态 (过程⑥)。最后, 处于激发态的 Mn^{2+} 离子经历 $^4\text{T}_1$

至 6A_1 的非辐射弛豫跃迁后回归基态，诱发出主峰位于 580nm 附近的力致发光现象。

$ZnS:Cu^{2+}$ 与 $ZnS:Mn^{2+}$ 的力致发光机理类似，当 $ZnS:Cu^{2+}$ 粉末受到外部机械力刺激时，其晶体内部的正负电荷中心将发生分离，形成电偶极矩，并产生压电势，随后，产生的压电场导致 $ZnS:Cu^{2+}$ 的导带（CB）和价带（VB）发生倾斜，位于导带的电子被激发到一个更高的能级。最后，受激电子与被 Cu 杂质状态困住的空穴重新结合，并诱发出主峰位于 520nm 附近的力致发光现象。

在 $ZnS:Cu^{2+}$ 与 $ZnS:Mn^{2+}$ 力致发光粉末混合制备的薄膜传感器中，这两种粉末发光是相互独立，互不影响的。这是因为它们仅仅是物理混合，并未发生材料性质的改变，这些能量传递过程仅发生在粉末颗粒的内部，颗粒之间互不影响^[48]。

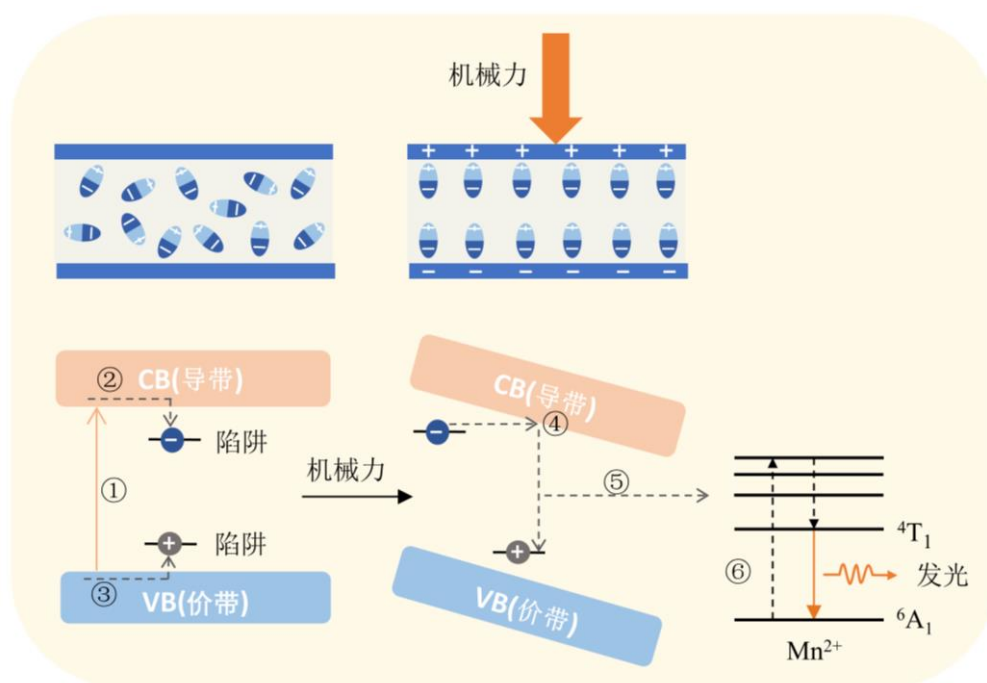


图 2-4 $ZnS:Mn^{2+}$ 薄膜传感器的力致发光机理

2.3.2 理论分析

a. 冲击应力引起的压电化

如果一个质量为 m 的小球从高度 h 落下撞击到薄膜传感器上，那么它的初始速度 $v_0 = \sqrt{2gh}$ ，其中 g 是重力加速度。撞击后，小球速度随时间减小。如果 τ_r 是薄膜压缩量 x 的作用时间，即从接触开始到最大压缩量所需的时间，那么可以写出下面的表达式：

$$x = x_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right] = x_0 [1 - \exp(-\zeta t)] \quad (2-1)$$

其中 x_0 是薄膜的最大压缩量, $\zeta = 1/\tau_r$ 。取 $d_x/d_t = v_0$, 当时间 $t=0$ 时, 得到 $x_0 = v_0 \tau_r = v_0 / \zeta$, 因此公式(2-1)可以写成:

$$x = \frac{v_0}{\zeta} [1 - \exp(-\zeta t)] \quad (2-2)$$

当一个速度为 v_0 、质量为 m 、半径为 r 的球体撞击薄膜传感器时, 可以使用赫兹接触模型来估算薄膜传感器在压缩距离为 x 时所需的力 $f(x)$ 。根据赫兹接触理论^[49,50], 薄膜压缩距离 x 时的力 $f(x)$ 可表达为:

$$f(x) = -\frac{4Y\sqrt{r}}{3(1-\nu^2)} x^{3/2} \quad (2-3)$$

其中 ν 为薄膜传感器的泊松比, Y 为薄膜传感器的杨氏模量。球体与薄膜之间的接触面积 A_c 是一个非常有用的冲击参数, 可以很容易地测量。 A_c 与压缩距离 x 直接相关, 可表示为:

$$A_c = \pi r x \quad (2-4)$$

根据公式(2-3)和(2-4), 压缩距离 x 处的应力或压强可推导为:

$$P = \frac{f(x)}{A_c} = \frac{4Y}{3(1-\nu^2)\pi\sqrt{r}} x^{1/2} \quad (2-5)$$

根据公式(2-2)和(2-5), 任意时刻 t 的压强 P 可推导为:

$$P = \frac{4Y\sqrt{v_0}}{3\pi(1-\nu^2)\sqrt{r}\sqrt{\zeta}} [1 - \exp(-\zeta t)]^{1/2} \quad (2-6)$$

$$P = P_0 [1 - \exp(-\zeta t)]^{1/2} \quad (2-7)$$

其中 $P_0 = \frac{4Y\sqrt{v_0}}{3\pi(1-\nu^2)\sqrt{r}\sqrt{\zeta}}$, 如果 d_0 为激发离子附近局部区域的压电常数, 则

利用公式(2-7), 压电常数 Q 可表示为:

$$Q = d_0 P_0 [1 - \exp(-\zeta t)]^{1/2} = Q_0 [1 - \exp(-\zeta t)]^{1/2} \quad (2-8)$$

若 B 为压电场 ε 与压电电荷 Q 之间的相关因子, 则 $\varepsilon = BQ$, 根据公式(2-8)可推导出压电场 ε 为:

$$\varepsilon = BQ_0 [1 - \exp(-\zeta t)]^{1/2} \quad (2-9)$$

根据公式(2-9)，压电场的变化率可以表示为：

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\varepsilon_0 \xi}{2} [1 - \exp(-\xi t)]^{-1/2} \exp(-\xi t) \quad (2-10)$$

b. 压电诱导电荷载流子脱陷

考虑到在晶体中激活离子附近的活化体积内陷阱的指数分布，能量为 E_i 的陷阱数量 $N(E_i)$ ，可以用以下玻尔兹曼统计公式来表示^[51,52]：

$$N(E_i) = ZN_0 \exp(-ZE_i) \quad (2-11)$$

其中, N_0 为晶体活化体积中的陷阱总数， $Z = 1/kT$ 是分布系数，其中 k 玻尔兹曼常数， T 是晶体的绝对温度。

在阈值能量 E_{th} 以下，陷阱的深度与 kT 接近，这意味着位于能量区间零至 E_{th} 之间的浅陷阱会因热效应而被释放。因此，只有在能量范围从 E_{th} 至 E 内的陷阱是可以被释放的。利用公式(2-11)，可以计算出在这一能量范围内，可被释放的陷阱总数 N_t 为：

$$N_t = \int_{E_{th}}^E ZN_0 \exp(-ZE) dE = N_0 [\exp(-ZE_{th}) - \exp(-ZE)] \quad (2-12)$$

当薄膜传感器受到冲击应力时，产生压电场 ε 。如果 α 代表每单位电场下陷阱深度的减小量，那么在 ε 电场下陷阱深度的减少将是 $\alpha\varepsilon$ 。陷阱深度的减少导致电子的解陷作用，因此填充的陷阱总数会减少。假设 n_d 是陷阱深度变化 $\alpha\varepsilon$ 后解除的陷阱总数，那么根据公式(2-12)，可以得到：

$$n_d = N_0 [\exp(-Z\alpha\varepsilon_{th}) - \exp(-Z\alpha\varepsilon)] \quad (2-13)$$

其中 ε_{th} 是薄膜传感器引起力致发光的阈值压电场。薄膜传感器在弹性区间内 $Z\alpha\varepsilon_{th}$ 和 $Z\alpha\varepsilon$ 很小，因此公式(2-13)可以写成：

$$n_d = N_0 [Z\alpha\varepsilon - Z\alpha\varepsilon_{th}] \quad (2-14)$$

将公式(2-14)微分后得：

$$dn_d = N_0 Z\alpha d\varepsilon \quad (2-15)$$

对于接触面积 $A_c = \pi r x$ 和薄膜的厚度 H ，产生力致发光的有效体积 V_e 可表示为 $V_e = r x H$ 。假设 N_l 是激活离子的浓度， Ω 是激活体积（即那些压电常数高的区

域体积)附近的激活离子,而 N_t 是填充陷阱浓度,则在有效体积 V_e 中能解陷的陷阱总数可表示为:

$$N_0 = \pi r H \Omega N_l N_t x_0 [1 - \exp(-\zeta t)] \quad (2-16)$$

因此,将公式(2-10)和(2-16),带入公式(2-15)中,可得到导带中电子的生成速率 g 为:

$$g = \frac{dn_d}{dt} = \frac{\pi r H \Omega N_l N_t x_0 Z \alpha \varepsilon_0 \xi}{2} [1 - \exp(-\xi t)]^{1/2} \exp(-\xi t) \quad (2-17)$$

c.冲击应力引起的力致发光

如果 τ 是导带中电子的寿命,那么导带中电子数量的变化,即载流子密度的变化 Δn 可表示为:

$$\Delta n = g\tau = \frac{\pi r H \Omega N_l N_t x_0 Z \alpha \varepsilon_0 \xi \tau [1 - \exp(-\xi t)]^{1/2} \exp(-\xi t)}{2} \quad (2-18)$$

利用公式(2-18),可以得到流过晶体的电流 j 为:

$$j = g\tau q v_d \quad (2-19)$$

其中, q 为电子电荷,而 v_d 是漂移速度。如果 μ 是晶体中电子的迁移率,则漂移速度 v_d 等于 μF ,则公式(2-19)可以写成:

$$j = g\tau q u F \quad (2-20)$$

如果 σ 是激发态 Mn^{2+} 或 Cu^{2+} 离子能态的捕获截面,而 n_e 是激发态 Mn^{2+} 或 Cu^{2+} 离子的密度,这些激发态能够捕获在导带中移动的电子,那么在导带中移动的电子被激发态 Mn^{2+} 或 Cu^{2+} 离子能态捕获的速率,即激发态 Mn^{2+} 或 Cu^{2+} 生成的速率,可以表示为:

$$R = \sigma n_e g \tau u \varepsilon \quad (2-21)$$

如果 η 为激发态 Mn^{2+} 或 Cu^{2+} 离子的发光衰减效率,那么力致发光的强度可以表示为:

$$I = \eta R = \eta \sigma n_e g \tau u \varepsilon \quad (2-22)$$

晶体变形产生的压电场强度 ε 可表示为:

$$\varepsilon = BQ = Bd p_c A = BdF \quad (2-23)$$

式中, B 为比例系数, Q 为压电电荷量, d 为压电系数, p_c 为晶体所受压强, A 为晶体受压面积, F 为晶体受力。并将公式(2-22)代入公式(2-23)中得到:

$$I = \eta \sigma n_e g \tau \mu B d F \quad (2-24)$$

因此，根据公式(2-24)中，在薄膜传感器参数一定的情况下，由公式(2-24)可知，发光强度 I 与薄膜所受冲击力之间呈线性关系。通过测量薄膜传感器的发光强度，即可反推出薄膜所受冲击力大小。

2.4 力学表征实验平台搭建

力致发光材料的力学表征手段，根据测试要求，包括压缩测试^[53]、摩擦测试^[54]、拉伸和弯曲测试^[55]、超声振动测试^[56]和冲击测试^[57]等。压缩测试通过应用变化的压缩载荷来观察材料的力致发光反应。这种测试可以用通用测试机或带有力量计的压力机来进行，而材料的力致发光响应在载荷应用期间被记录下来。摩擦测试通过在不同材料的摩擦杆上施加不同的载荷来测量薄膜或圆盘样品对摩擦的力致发光响应。拉伸和弯曲测试通过在通用测试机上更换样品支架，可以对圆盘和薄膜样品进行拉伸和弯曲力的力致发光反应测试。超声振动测试使用超声振动测试来观察个别力致发光粒子的性质。冲击测试通过记录自由落体球与表面碰撞时产生的力致发光信号，来测量材料对冲击的反应。因此，我们采用落球实验来定量评估薄膜传感器在不同冲击力下的光强变化情况。实验装置如 2-5 所示。

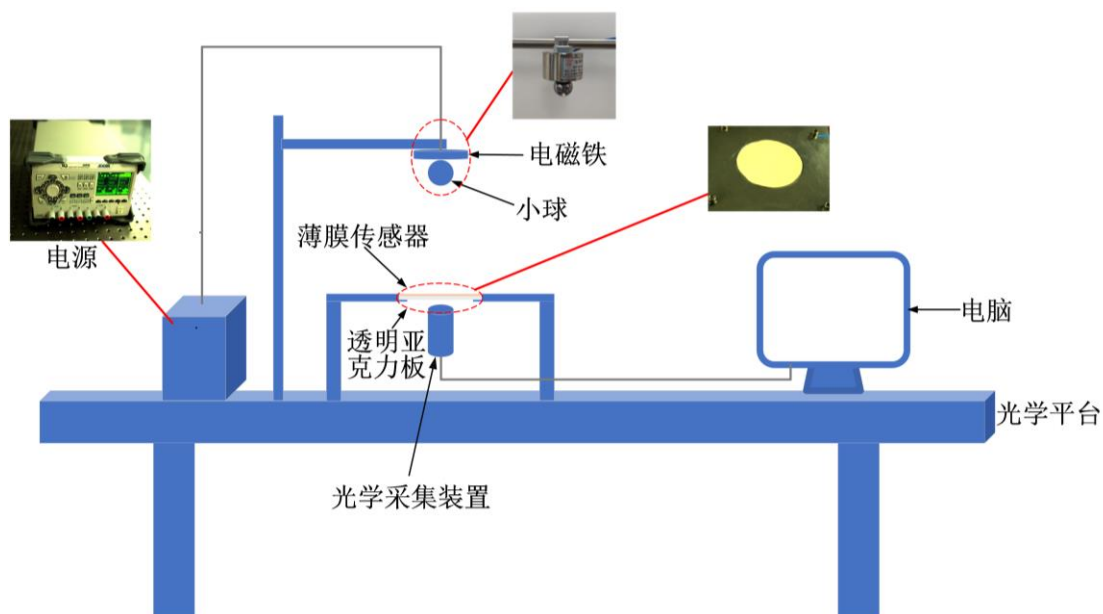


图 2-5 落球实验平台

落球实验平台包括电磁铁、小钢球（质量 32g，直径 20mm）、柔性薄膜传感器、透明亚克力冲击板、光学采集装置（根据需要可以为光谱仪或相机）、可调

式电源发生器、电脑等。薄膜传感器使用商用胶水粘贴在透明亚克力冲击板上，小钢球通过电磁铁通断电释放（高度通过固定电磁铁的支架进行调节）。为了避免外界噪声光的影响，实验过程中平台处于黑暗环境。

在小球下落冲击薄膜传感器的动态过程中，小球以初始速度 v 开始接触薄膜传感器，并在时间 T 内将薄膜压缩至最大程度，此时小球的速度降为零。这个过程中小球对薄膜传感器的冲击力 F 可以通过动量守恒公式计算：

$$FT = mv \quad (2-25)$$

其中 m 表示小球的质量， v 代表小球的初始冲击速度。根据之前的研究，薄膜的压缩时间 T 会随着小球的冲击速度 v 的增加而延长，可由下列公式表示^[33]：

$$T = 6.46\rho^{2/5} \frac{r}{v^{1/5}Y^{2/5}} \quad (2-26)$$

在这个公式中， ρ 是小球的密度（7.64 g/cm³）， r 是小球的半径，而 Y 是薄膜传感器的杨氏模量（根据实验测定为 2.8Mpa）。根据公式(2-25)和(2-26)，可以评估小球从不同高度下落冲击薄膜传感器时的冲击力大小。

2.5 本章小结

本章详细描述了五种不同配比方案的力致发光薄膜传感器的制备过程，方案 1 至方案 5 薄膜传感器按照不同的 ZnS:Cu²⁺ 与 ZnS:Mn²⁺ 质量比制备。通过扫描电子显微镜的截面形貌图，证实了两种粉末在 PDMS 基体中的均匀分布。这一均匀分布对于实现机械力的有效传导和提高薄膜发光效率至关重要。此外，还深入讨论了薄膜传感器的力致发光机理，以更好地理解薄膜传感器在受到机械力作用时的光学响应行为。根据发光机理的理论推导，得到薄膜传感器的发光强度与冲击力之间呈线性关系。最后，为了定量评估薄膜传感器在不同冲击力作用下的发光强度变化，设计了一个落球实验平台。该平台能够模拟不同强度的冲击力，从而评估薄膜传感器对于冲击力的灵敏度和发光强度的变化。

第3章 力致发光薄膜传感器的冲击响应与光谱特性分析

3.1 引言

本章研究了薄膜传感器在小球冲击下的力致发光特性。通过实验验证，小球冲击引起薄膜传感器产生光斑，光斑的亮度、大小和衰减时间与小球的冲击强度直接相关。对不同高度下小球冲击薄膜传感器的光谱响应进行了分析，揭示了方案1（3g ZnS:Cu²⁺）和方案5（3g ZnS:Mn²⁺）薄膜传感器力致发光峰值强度与小球冲击速度之间的线性关系。同时，本章记录并通过 CIE 色彩坐标系展示了不同配比方案下薄膜传感器的力致发光颜色变化。此外，通过采用方案3的薄膜传感器，我们开发了一种基于光谱峰值强度比的冲击检测方法，实验证明光谱采集距离对本方法的测量结果影响较小，相比于传统基于绝对光强的检测方法，该方法对环境的抗干扰能力更强，适用性更好。

3.2 薄膜传感器的冲击发光响应

为了详细观察并分析小球接触薄膜传感器时的力致发光响应过程，我们使用 Pco.panda 型号相机来记录小球冲击薄膜时的力致发光图像，如图 3-1 所示。该相机的参数设置为：曝光时间 21 微秒（us）、帧率 40 帧每秒（fps）、分辨率为 2048×2048 像素。

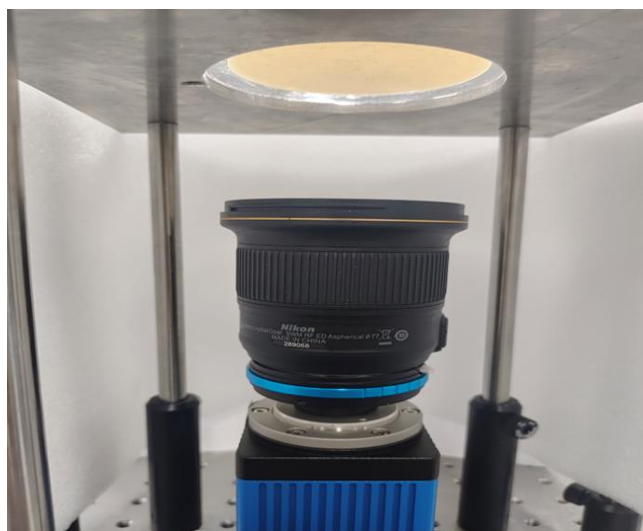


图 3-1 Pco.panda 型号相机捕捉力致发光图像

小球从不同高度下落冲击薄膜传感器后，产生的力致发光随时间衰减的图像如图 3-2 所示（方案五比例下的薄膜传感器）。冲击过程中，小球与薄膜传感器的接触点产生了力致发光光斑，小球撞击并压缩薄膜，当薄膜达到最大压缩量时，光斑亮度最大。随着小球反弹，光斑亮度逐渐减弱。力致发光光斑的特性与小球的冲击强度直接相关，当小球从更高位置下落时，撞击薄膜传感器的冲击强度更大，从而在薄膜上产生初始亮度更高、面积更大、衰减持续时间更长的力致发光光斑。通过分析这些力致发光光斑的亮度和面积，我们能够量化冲击力的大小，并准确判定冲击发生的具体位置位置。本实验研究为我们提供了冲击力与薄膜传感器发光强度之间的关联性证据，进一步证明了其在实际应用中作为冲击力检测传感器的潜力和可靠性。

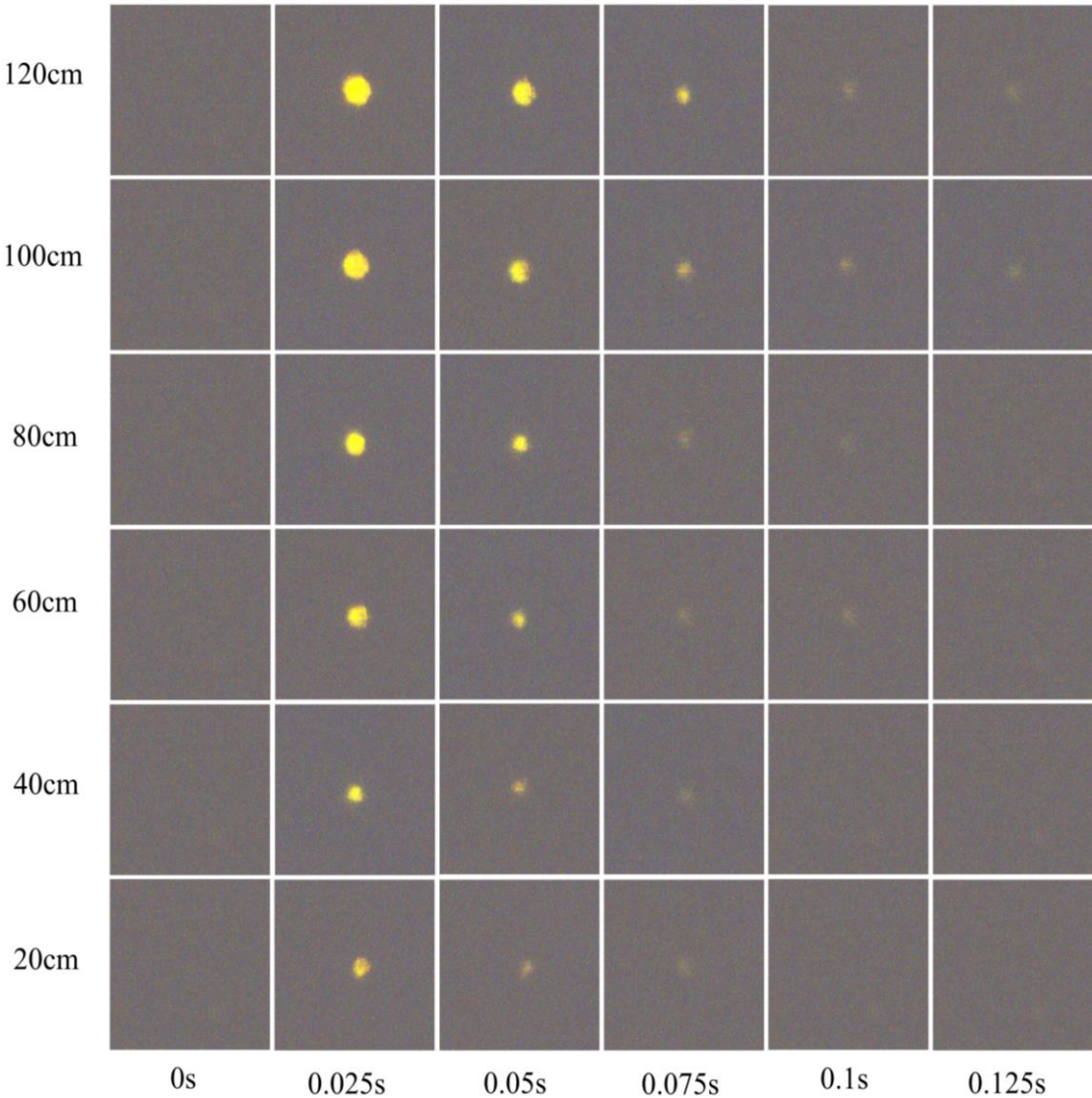


图 3-2 在不同高度下小球冲击薄膜传感器的力致发光图像

3.3 薄膜传感器的光谱响应

3.3.1 ZnS:Cu²⁺薄膜传感器的光谱响应

为了进一步确定小球冲击与力致发光强度之间的定量关系，我们使用光谱仪采集小球在不同高度下冲击薄膜传感器的力致发光光谱，如图 3-3 所示。小球接触薄膜时的冲击速度由 $v = \sqrt{2gh}$ 确定。其中 v 是小球接触薄膜传感器时的速度， $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 是重力加速度， h 是小球下落的高度。光谱的光纤探头距离薄膜传感器 0.5cm，并保持黑暗条件。

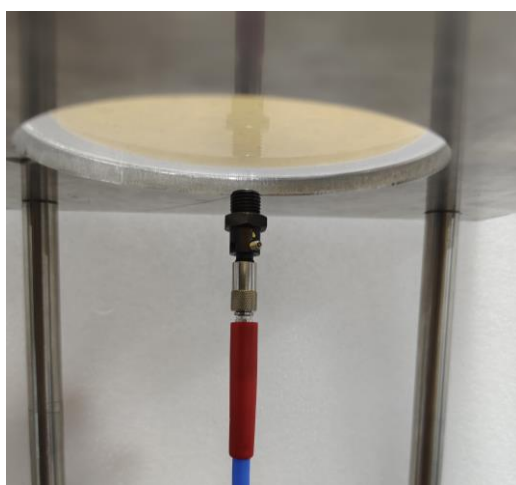


图 3-3 光谱仪采集力致发光光谱

通过光谱仪对不同配比的力致发光薄膜传感器进行光谱采集后，其中方案 1（3g ZnS:Cu²⁺）薄膜传感器的光谱如图 3-4 所示。

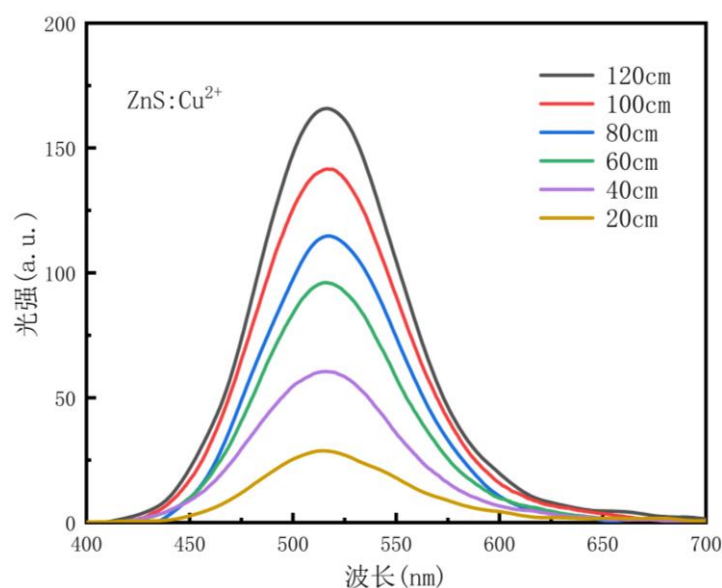


图 3-4 ZnS:Cu²⁺薄膜传感器在小球冲击下的光谱

观察到薄膜传感器在受到不同高度的落球撞击后,发射光谱的强度随着撞击高度的增加而增强。 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 的特征发射峰在 520nm 的绿光区域,这与该材料的典型发光特性一致^[58]。当小球从不同高度落下并撞击薄膜传感器时,薄膜所受的机械能量转化为电子能级的激发能量,随后这些激发状态的电子返回基态,发射出特定波长的光子,形成可观察到的光谱。随着撞击高度的增加,即撞击能量的增加, $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 粒子激发的电子数量增多,导致发射光强度的增强。

3.3.2 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜传感器的光谱响应

通过对方案 5 (3g $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$) 薄膜传感器进行光谱分析,结果如图 3-5 所示。随着小球从不同高度 (20cm 至 120cm) 撞击薄膜传感器,发射光谱的强度呈现出随高度增加而增强的趋势。这种强度的变化与 Mn^{2+} 离子在受到机械冲击后的能级跃迁有关,更高的冲击能量导致了更多的 Mn^{2+} 离子达到激发状态,并且在回落到基态时放出了更多的光。 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 的发射波长范围在 530nm-650nm 之间,峰值主要集中在 580nm 左右的橙黄光区域,这与 Mn^{2+} 作为发光中心时, $^4\text{T}_1(^4\text{G})$ 激发态向 $^6\text{A}_1(^6\text{S})$ 基态跃迁时发出的特征光谱相一致^[59]。

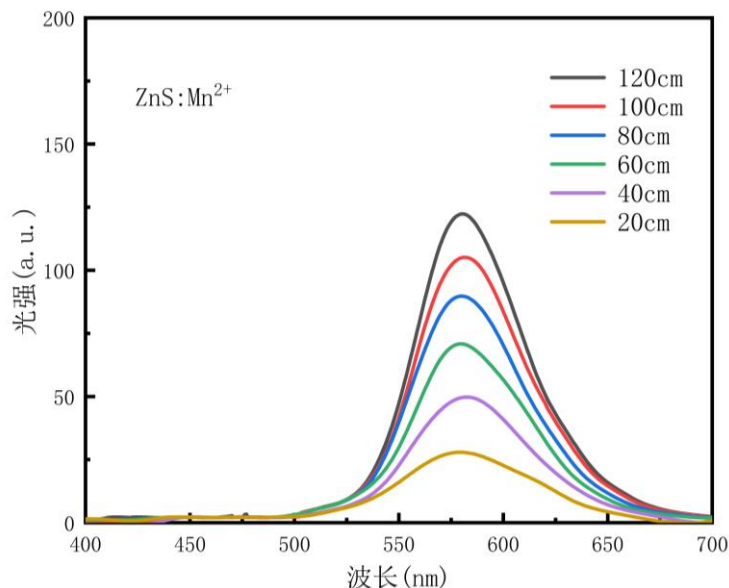


图 3-5 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜传感器在小球冲击下的光谱

3.3.3 光谱峰值与冲击速度的关系

如图 3-6 所示, $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 制成的薄膜传感器的峰值强度与小球冲击速度之间显示出了明显的线性关系。在这两种力致发光材料中, $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 薄膜

传感器对冲击的响应更加敏感，其拟合直线的斜率更大。具体来说，当受到相同冲击力的作用时， $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 薄膜传感器的光谱峰值强度表现出更加显著的变化，而 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 的变化则相对较为平缓。这一结论说明了 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 材料对于撞击的能量转化效率更高。

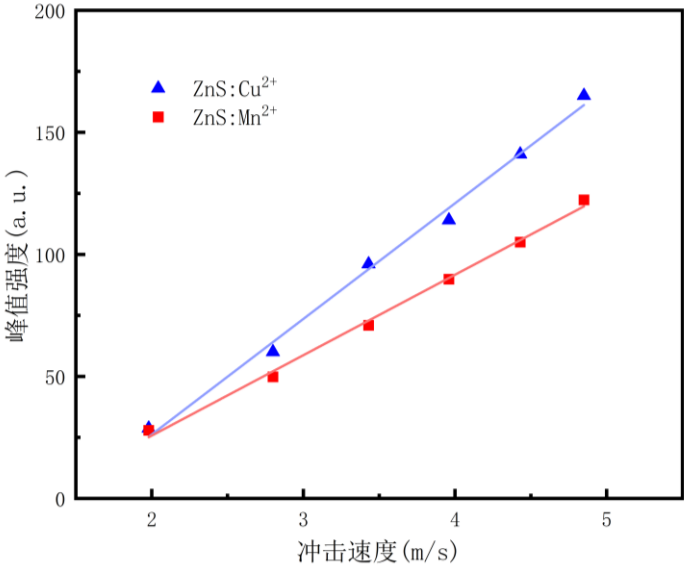


图 3-6 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 与 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 的峰值强度与冲击速度的线性关系

3.3.4 不同配比下 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 的光谱响应

重点研究了在方案 2 (2g $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 1g $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$)、方案 3 (1.5g $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 1.5g $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$)、方案 4 (1g $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 2g $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$) 配比下，力致发光薄膜传感器在小球冲击下的发光光谱，如图 3-7 所示。这些光谱呈现出两个明显的峰值，分别位于 520nm 和 580nm 附近。这两个峰值的位置与 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 典型发光中心一致，证明了复合薄膜中这两种材料均产生了力致发光效应。进一步观察发现，当 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 与 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 的质量比为 2:1 时，绿光(520nm)的峰明显突出，而橙红光(580nm)的峰相对微弱。这是由于 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 在复合材料中具有较高的掺杂浓度，高浓度的 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 意味着在薄膜中存在更多的 Cu^{2+} 发光中心，当这些发光中心在小球的冲击下被激发时，它们的发射光量积累，导致绿光发射峰(520nm)的整体增强。因此， $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 的相对高浓度是导致绿光峰(520nm)相比橙红光峰(580nm)更为显著的直接原因。当 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 的含量逐渐上升时，橙红光(580nm)的峰逐渐增强(这种现象会随着到达浓度淬灭的阈值而消失)^[60]。这表明，随着这两种材料质量比的变化，复合薄膜的发光颜色

也会随之变化，其在光谱上的体现就是两个峰的强度会发生相应变化。

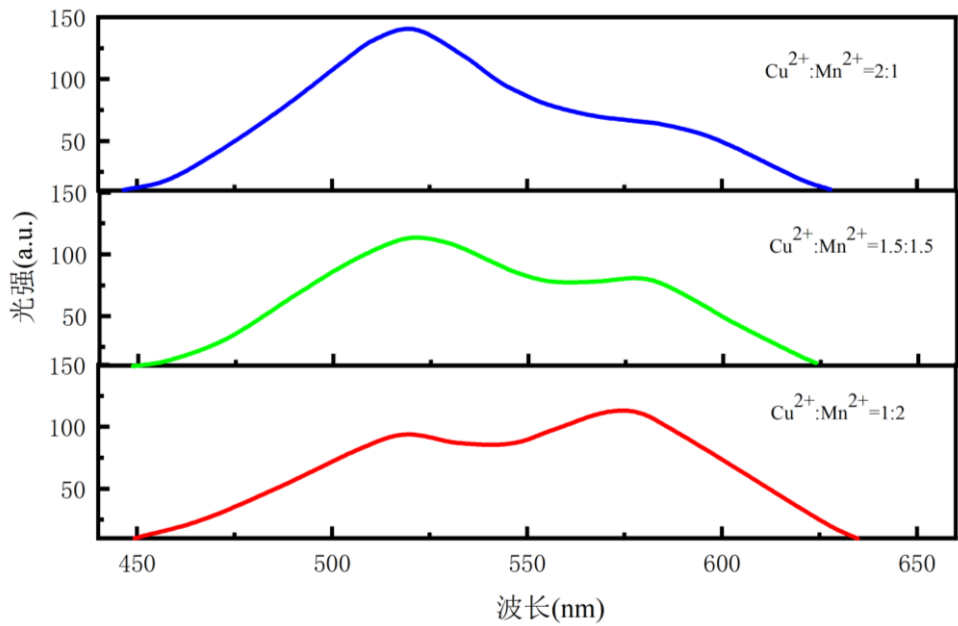


图 3-7 不同配比方案下的力致发光光谱

3.3.5 不同配比 ZnS:Cu²⁺和 ZnS:Mn²⁺的色彩响应

图 3-8 记录了不同配比方案下的薄膜传感器在受到小球冲击时的力致发光瞬间。图像清晰地揭示了薄膜传感器的发光颜色变化情况，从蓝绿色渐变为绿色，最终变为橙黄色。这一发光颜色变化过程直观展现了两种独立的 ZnS 基力致发光材料通过颜色混合原理实现的色彩转换，同时也显示了其出色的颜色可操作性。

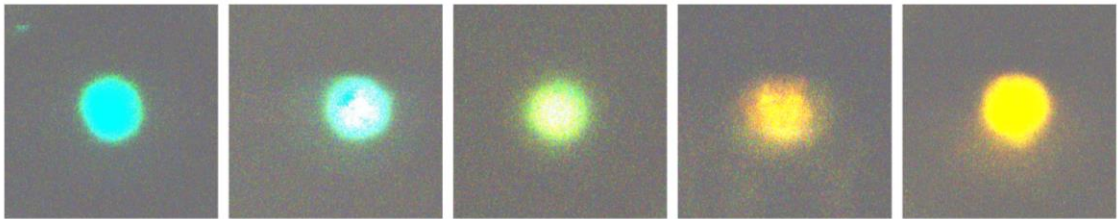


图 3-8 不同配比方案下的力致发光图像

然而，仅凭肉眼观察存在一定的主观性，并不能精确描述颜色变化。为了更客观地呈现这一过程，我们利用光纤光谱仪记录了不同配比下的薄膜传感器在 CIE 色彩空间的坐标值。如图 3-9 所示，CIE 图谱清楚地标示了薄膜传感器发光颜色的变化趋势，随着 ZnS:Mn²⁺比例的增加，CIE 坐标值从蓝绿色区域（0.19，0.45）过渡到橙黄色区域（0.51，0.4）。

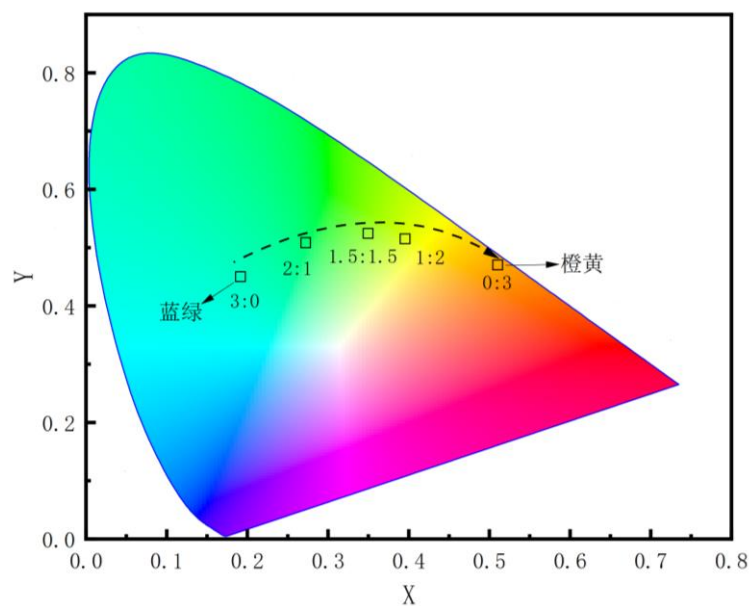


图 3-9 不同质量比例的 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 与 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 的 CIE 坐标值

3.4 基于光谱峰值比的冲击力检测方法

根据上述研究，我们选择方案 3 ($\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}:\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}=1.5:1.5$) 的薄膜传感器进行了详细的光谱分析。如图 3-10 所示，我们记录了钢球从 20cm 到 120cm 不同高度自由落体冲击该传感器时的瞬时最大光谱。观察到，随着落体高度的增加，冲击力相应增强，导致发光强度的显著提升。

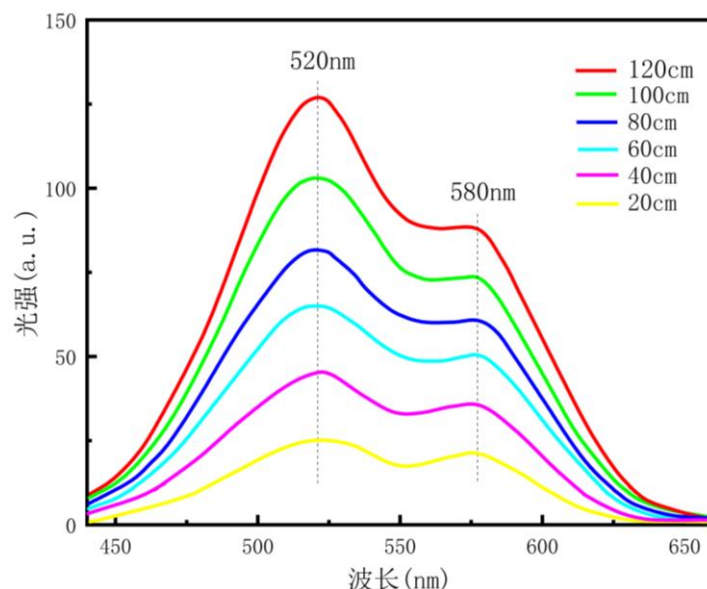


图 3-10 方案 3 薄膜传感器在不同冲击力下的光谱响应

具体地，通过精确测定 520nm 和 580nm 处的光谱峰值强度，我们建立了光强比 $I(i_{520\text{nm}}/i_{580\text{nm}})$ 与冲击速度的定量关系。对光强比与冲击速度的关系

进行线性回归分析，结果表明两者之间存在显著的线性相关性，如图 3-11 所示。

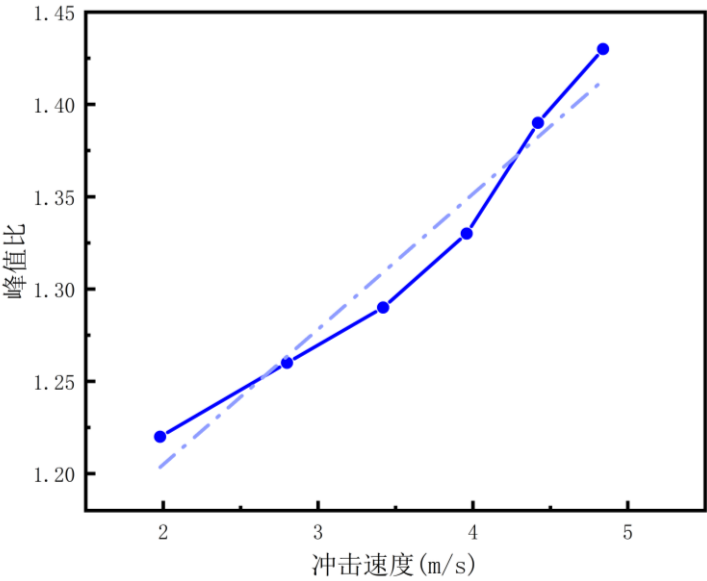


图 3-11 光强比与冲击速度的关系

根据公式(2-25)和(2-26)可以计算出小球在不同高度下对薄膜传感器的冲击力，进一步研究了薄膜传感器在不同冲击力作用的下峰值比变化情况，其结果如图 3-12 所示。线性拟合得到的结果为： $Y=1.09649 + 0.00886X$ ，线性拟合度 $R^2=0.966092$ 。

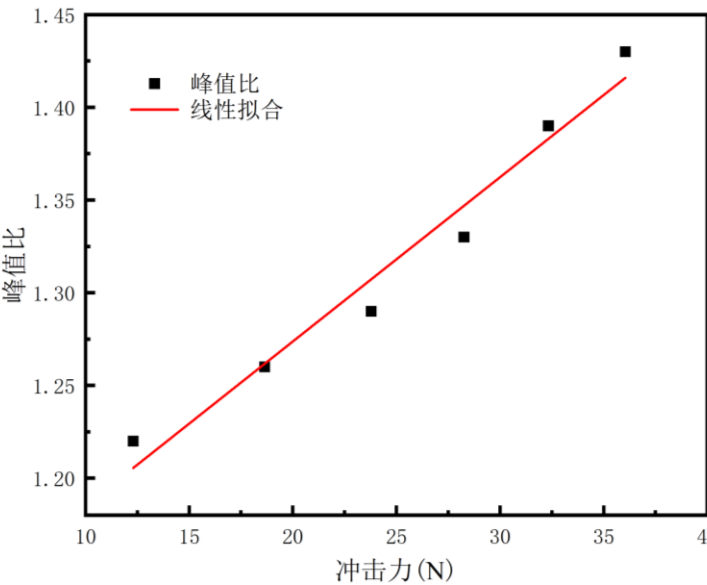


图 3-12 光强比与冲击力的线性拟合

这一关系为我们提供了一种通过测量两种波长峰值比来准确评估冲击力大小的新方法。复合薄膜传感器通过 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 两种不同发光峰的协同作用，实现了对冲击力的灵敏检测。

3.5 光纤探头测距对光谱影响

在力致发光技术应用于冲击力检测时，光纤探头与薄膜传感器的测量距离会对光谱数据产生影响，特别在弱光信号的检测中，这种距离效应会导致数据偏差。

因此，针对光纤探头与薄膜传感器之间不同距离对光谱数据的影响，我们进行了系统性的研究。在先前的部分中，已记录了光纤探头与薄膜传感器距离为 0.5 厘米时的光谱。在接下来的分析中，我们将探头距离分别增大至 1 厘米和 1.5 厘米，并记录了小球从不同高度下落冲击所产生的发光光谱。图表 3-13 展示了光纤探头距离薄膜传感器 1 厘米和 1.5 厘米时的光谱情况。随着光纤探头与薄膜传感器距离的增加，观察到探头采集到的光信号逐渐减弱。这一现象主要归因于光在传播过程中发生的几何扩散，即光束离开光源后逐渐扩散成一个更大的区域。因此，当光纤探头远离薄膜传感器时，其接收的光束截面积相对较小，导致单位面积上的光子密度减少，进而导致采集到的光强减弱。

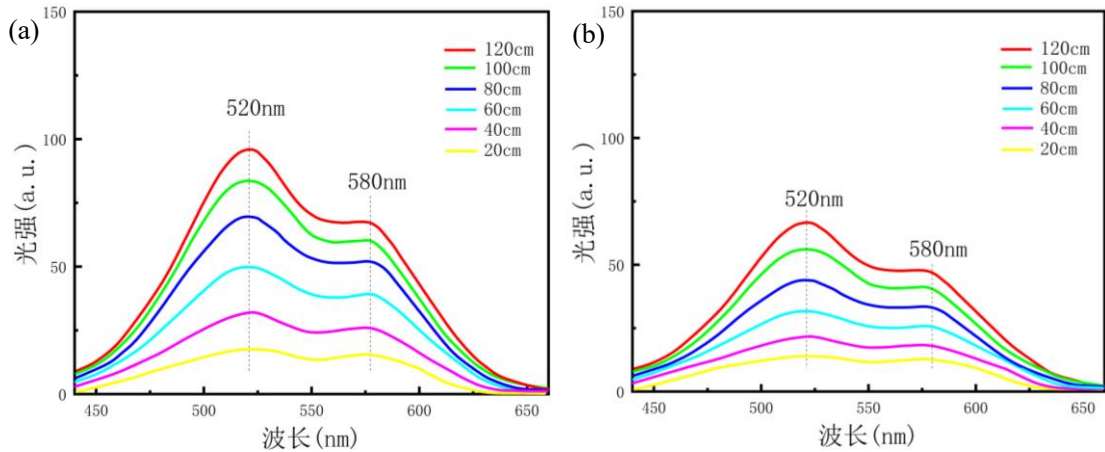


图 3-13 不同探头距离下小球撞击产生的光谱变化 (a) 1cm (b) 1.5cm

根据光纤探头与薄膜传感器距离为 0.5cm、1cm、1.5cm 时采集的光谱，分别得到图 3-14 (a) 绝对光强与小球冲击速度的线性关系，以及图 3-14 (b) 峰值光强比与小球冲击速度的关系。可以观察到，光纤探头与薄膜传感器的测量距离对基于绝对光强的检测方法影响显著，不同的测量距离会得到不同的绝对光强值，这会影响小球的冲击速度与光强之间的标定关系，引起较大的测量误差。基于光强比的检测方法，相较于绝对光强检测方法，每组测量数据峰值比的相对标准偏差小于 1.138%，表现出更好的环境适应性。

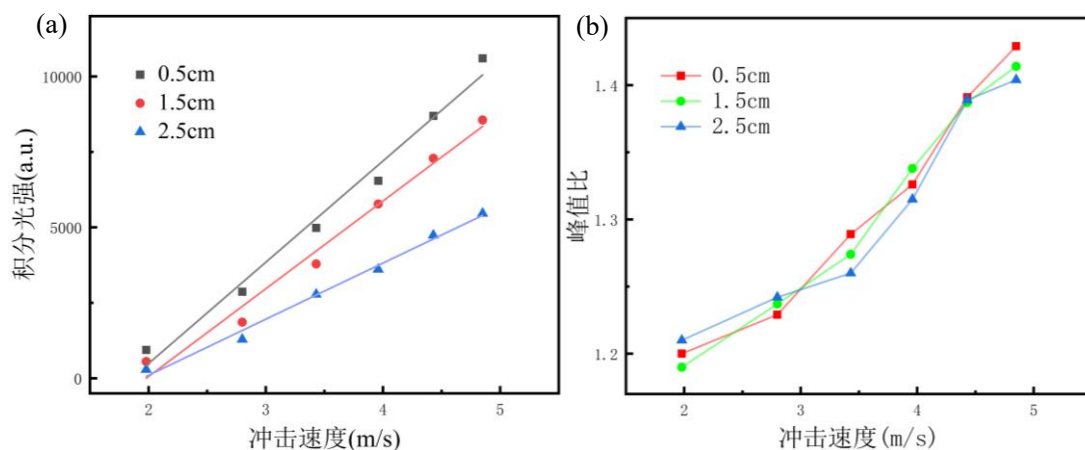


图 3-14 (a) 和 (b) 分别揭示了光谱积分强度、光强比与小球冲击速度的线性关系

3.6 本章小结

本章通过落球实验，研究了小球冲击薄膜传感器的力致发光过程。结果表明：

(1) 小球冲击引起薄膜传感器产生光斑，光斑的亮度、大小和衰减时间随着小球冲击强度的增大而增大。(2) 通过薄膜传感器的力致发光光谱研究，建立了方案 1 (3g ZnS:Cu^{2+}) 和方案 5 (3g ZnS:Mn^{2+}) 薄膜传感器力致发光峰值强度与小球冲击速度间的线性关系，并得出 ZnS:Cu^{2+} 薄膜传感器对冲击力的响应更加敏感的结论。(3) 方案 2 (2g ZnS:Cu^{2+} 和 1g ZnS:Mn^{2+})、方案 3 (1.5g ZnS:Cu^{2+} 和 1.5g ZnS:Mn^{2+})、方案 4 (1g ZnS:Cu^{2+} 和 2g ZnS:Mn^{2+}) 配比下薄膜传感器的力致发光光谱峰值位置与 ZnS:Cu^{2+} 和 ZnS:Mn^{2+} 典型发光中心一致，证明了复合薄膜中这两种材料均产生了力致发光效应。(4) 两种独立的 ZnS 基力致发光材料通过颜色混合原理实现了色彩转换，从蓝绿色渐变为绿色，最终变成为橙黄色。(5) 基于两种发光峰的比值，建立了基于光谱峰值强度比的冲击力检测方法。实验证明光谱采集距离对本方法的测量结果影响较小，相比于传统基于绝对光强的检测方法，该方法对环境的抗干扰能力更强，适用性更好。

第 4 章 力致发光薄膜传感器的多通道光谱响应

4.1 引言

本章采用 Arduino 控制器与 AS7341 光谱传感器构建了多通道光谱采集装置,以替代海洋光学光谱仪,实现力致发光冲击检测装置的小型化和低成本。为验证光谱采集装置在力致发光冲击检测应用中的可行性,研究了 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜传感器在小球冲击下的多通道光谱响应,并与光谱仪采集的光谱进行对比分析,证明峰值通道输出比与小球冲击力之间同样存在线性的定量关系。

4.2 多通道光谱采集装置的构建

4.2.1 AS7341 光谱传感器

随着电子和半导体技术的不断进步,光谱传感器在实现小型化、高精度、高性能和低成本方面取得了重大发展。这些传感器通常由光学部件和控制部件组成。光学部件主要涉及成像光学元件,根据成像光学元件划分不同的谱段。各谱段由包括可见光探测器、近红外探测器、中波红外探测器和长波红外探测器在内的多个探测器来捕捉。控制部件则包括控制器、图像信号处理器、温度控制器和显示器,负责将采集到的信号进行数字化处理,生成离散数据。现代的电子集成技术使得光谱传感器可以被封装成极小的尺寸,如艾迈斯公司的芯片级光谱传感器,这些新型器件的出现极大地便利了力致发光光谱检测的应用^[61]。

AS7341 是艾迈斯公司生产的一款 11 通道光谱传感器,适用于光谱分布检测和颜色匹配应用,具备广泛的光谱响应范围。其光谱响应定义在 350nm 至 1000nm 的波长范围内,八个光学通道覆盖可见光谱,一个通道用于测量近红外光,一个通道是没有滤光器的光电二极管,一个通道是检测闪烁频率的专用光电二极管。该传感器光敏区包括一个 4x4 可见光光电二极管阵列、一个位于顶部用于检测闪烁频率的专用光电二极管、一个位于阵列下部用于近红外检测的光电二极管和分布在两个角上的无滤光器光电二极管,其封装图和光敏区见图 4-1 (a)、(b) 所示。

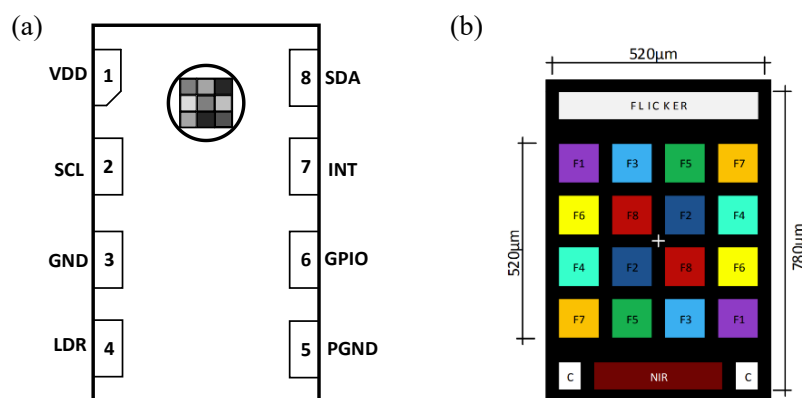


图 4-1 (a) AS7341 封装图 (b) 光敏区示意图

这个设备通过标准的 400KHz 的 I²C 串行接口进行控制和访问光谱数据。它使用 7 位芯片地址，并且既支持标准速度模式也支持全速时钟模式。该设备的读写传输过程遵循飞利浦制定的标准。内部设有一个 8 位的缓存寄存器，用于存储读写操作的目标地址。通过通信接口来控制 and 设置传感器，使其工作在我们期望的模式，如检测的通道配置和检测输出数据的范围等。AS7341 器件的 I²C 地址是 0x39，通过 I²C 的读写传输对传感器进行操作。通过 I²C 总线写寄存器来配置传感器，然后通过读操作读取传感器的状态和采集到的数据信息，其引脚功能如表 4-1 所示。

表 4-1 引脚功能图

引脚号	引脚符号	引脚类型	具体功能
1	VDD	P	供电电源
2	SCL	DI	I ² C 时钟信号线
3	GDN	P	接地引脚
4	LDR	A_I/O	电流吸收器输入
5	PGND	P	接地引脚
6	GPIO	DI	通用输入输出
7	INT	DO_OD	中断
8	SDA	D_I/O	I ² C 数据信号线

该光谱传感器尺寸小、功耗低，提供了 16 位的模数转换采样，具有较高的分辨率和检测能力。其片上每一组过滤器都被映射到一个 ADC 通道上，这使得 AS7341 能够将可见光分成 8 个不同的光谱波长级别，每个光电二极管通道对应一个特定波长，如表 4-2 所示。通过这些光电二极管来检测其对应波长的光强度。

这种精确的波长分辨能力使得 AS7341 成为研究力致发光等现象的理想工具，因为它能够准确捕捉和分析由力学应力引起的光谱变化。

表 4-2 可见光谱通道与对应波长

通道	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
波长 (nm)	410	440	470	510	550	580	620	670

4.2.2 AS7341 传感器的电路设计

AS7341 芯片的光谱采集电路比较简单,电路设计分为两个部分,电源部分、时钟线和数据线通信部分。

首先是电源部分。为了使 AS7341 光谱传感芯片工作在稳定状态,需要一款稳压芯片, PAM3101 以其优异的性能成为该设计的首选。它具有低噪声、微弱的静态电流、低压差和精确的输出电压。该芯片还具有快速的瞬态响应,并内置热关断与过流保护,确保供电稳定。其高电源抑制比也有助于维持 AS7341 的性能稳定,从而保证了整个光谱采集系统的可靠性和精确度。如图 4-2 所示是 AS7341 中 PAM3101 的稳压电源部分。

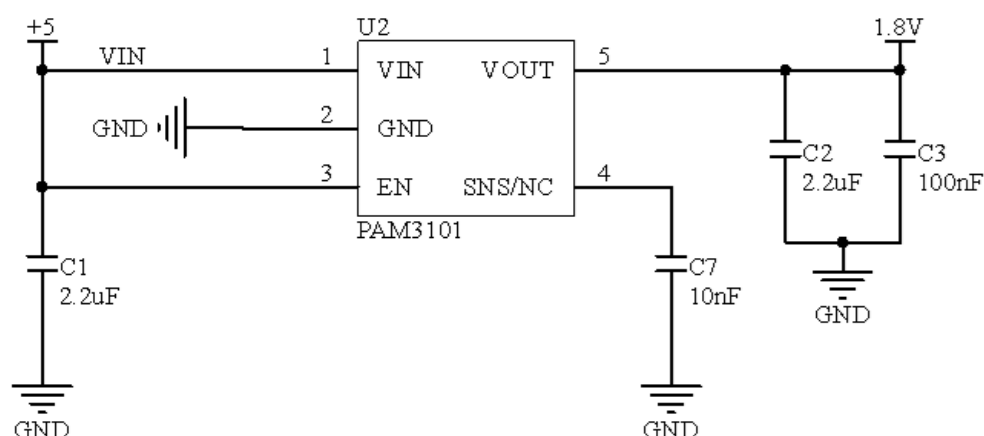


图 4-2 PAM3101 稳压电路图

接下来是时钟线、数据线的通信部分,图 4-3 展示的电路是一个典型的 I²C 总线电平转换器,使用了 N 沟道场效应晶体管 (MOSFET) 与其寄生二极管实现时钟信号和数据信号的快速切换,方便了两个不同电压设备之间的通信。

在这个设计中,两个 MOSFET (Q1 和 Q2) 分别连接到 I²C 总线的时钟线 (SCL) 和数据线 (SDA)。电阻 R1 和 R2 连接到时钟线,电阻 R3 和 R4 连接到数据线,它们的功能是为 MOSFET 的源极提供上拉电阻,确保线路在 MOSFET 关断时能被拉至高电压水平。当 MOSFET 的门极与源极的电压差高于阈值电压时,MOSFET 将导通,这将使得 SCL 或 SDA 线被拉低到接近地电位。当 MOSFET

关断时，由于上拉电阻的作用，SCL 或 SDA 线电压将被拉高。这种设计允许一个高电压设备与一个低电压设备进行通信。MOSFET 的寄生二极管可以确保当线路被高电压设备拉高时，低电压侧不会受到高电压的影响。这是因为寄生二极管在这种情况下是反向偏置的，不会导通，确保了信号的完整性和设备间的兼容。

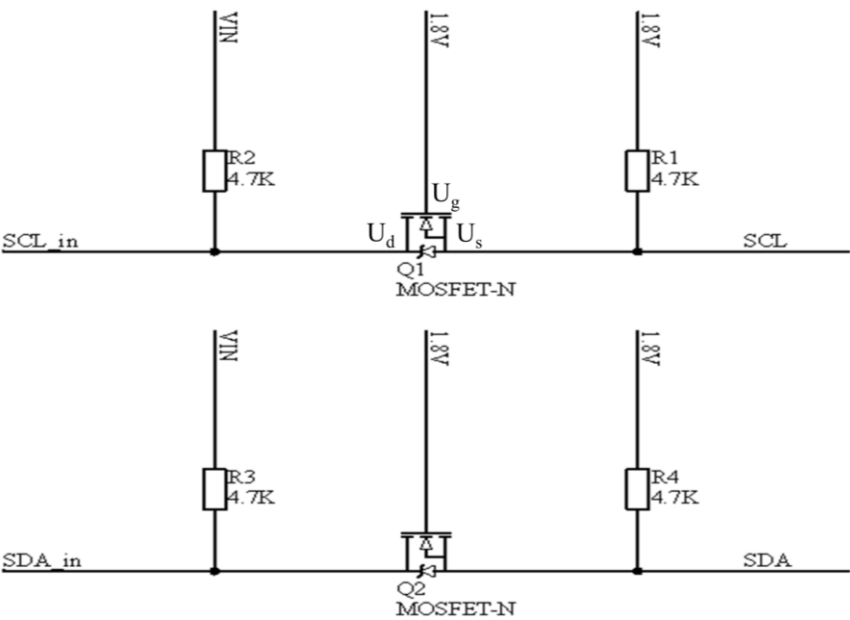


图 4-3 I²C 电平转换电路

完成电路设计后，通过连接 AS7341 芯片的相应引脚到电源管理部分和通信接口部分，就能完成 AS7341 光谱传感模块的设计。模块电路如图 4-4 所示，电源部分包含一个稳压器，确保传感器获得必要的稳定电压。通信接口部分包括 I²C 信号的电平转换和拉升电阻，以实现与主控制器的有效通信。AS7341 芯片的其他引脚，如 INT 和 GPIO，也可以根据具体应用需要进行配置。

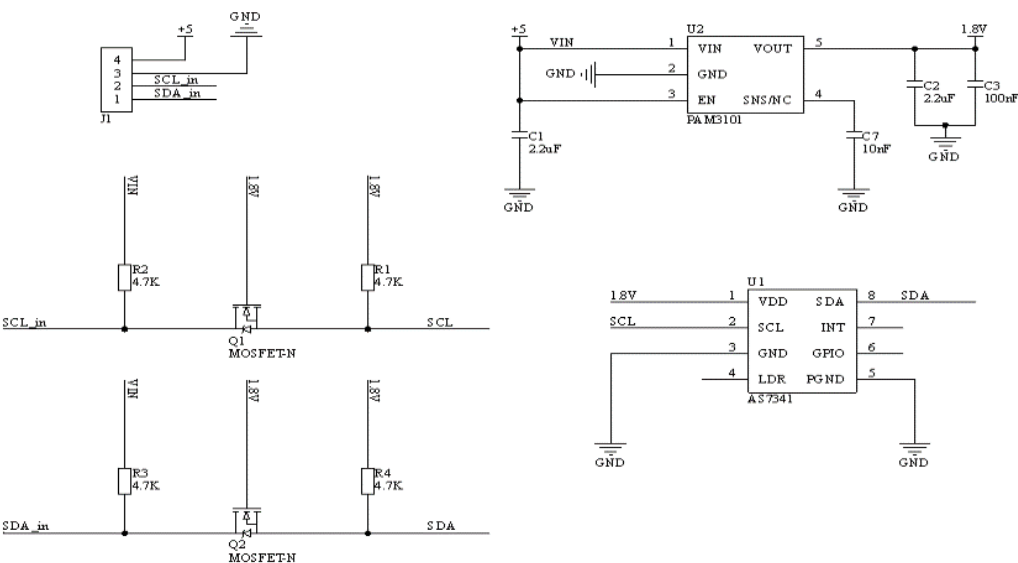


图 4-4 AS7341 传感模块电路图

4.2.3 多通道光谱采集装置的构建

Arduino 是一个开源电子原型平台，它包含了一个可以编程的电路板和一個在计算机上运行的集成开发环境（IDE），允许用户编写代码并将其上传到电路板上。我们使用 Arduino 控制器来控制光谱传感器并收集光谱数据。

与 AS7341 光谱传感器连接配置完成后，通过计算机编写并上传程序，从而实现对该传感器的控制和光谱数据的获取。如图 4-5 所示，程序通过计算机的 USB 接口被编译和上传到 Arduino 控制器上。Arduino 控制器进而执行光谱采集任务。AS7341 光谱传感器的电源接口 VCC 连接到 5V 的正极来供电，GND 接口则连接到负极。模拟输入端口 A5 用于向光谱传感器提供 SCL 时钟信号，而端口 A4 则用来传递 SDA 数据信号。在采集光谱数据时，AS7341 光谱传感器将通过串行通讯接口实时地将数据发送回计算机。

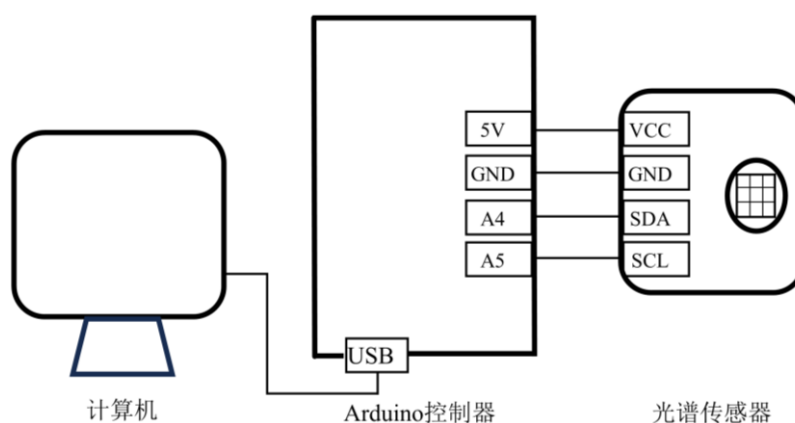


图 4-5 光谱采集装置结构示意图

4.2.4 多通道光谱采集实验

为验证多通道光谱采集装置在力致发光检测中的可靠性，将光谱传感器固定在薄膜传感器的下方，如图 4-6 所示。

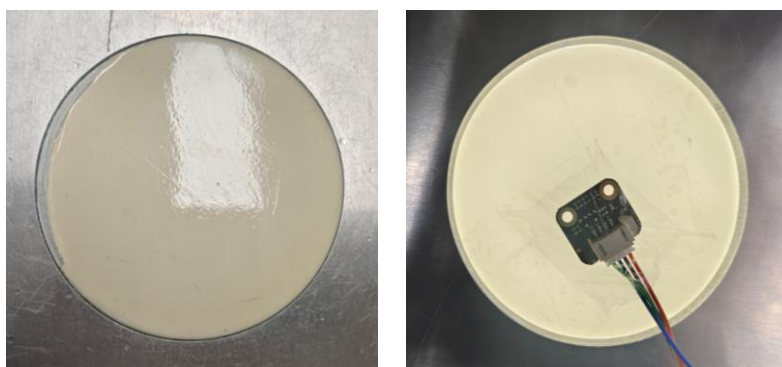


图 4-6 光谱采集装置采集光信号

光谱采集装置和光谱仪在相同条件下，分别对 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜的力致发光光谱进行采集。 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 薄膜传感器在小球冲击下的光谱分别被这两种设备采集，光谱数据进行归一化处理后的结果如图 4-7 所示。可以发现，光谱采集装置的多通道输出与光谱仪采集的光谱基本吻合，说明该光谱传感装置能够准确地得到 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 薄膜的力致发光光谱分布。

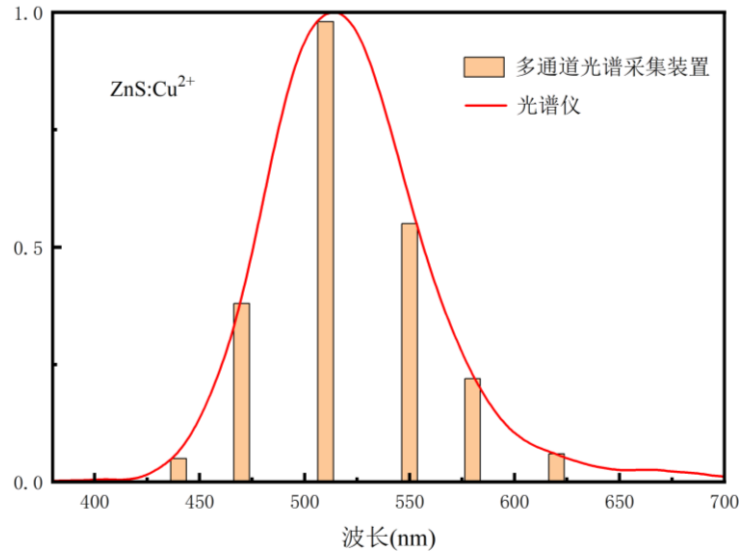


图 4-7 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 的多通道光谱输出与光谱仪的光谱输出

进一步的，在相同条件下，这两种设备对 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜传感器的力致发光光谱进行采集，归一化处理后的结果如图 4-8 所示。从图中可以看到，光谱采集的各个通道的输出与光谱仪记录的光谱之间具有很好的一致性，说明该光谱传感装置同样能够准确地得到 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜力致发光的光谱分布。

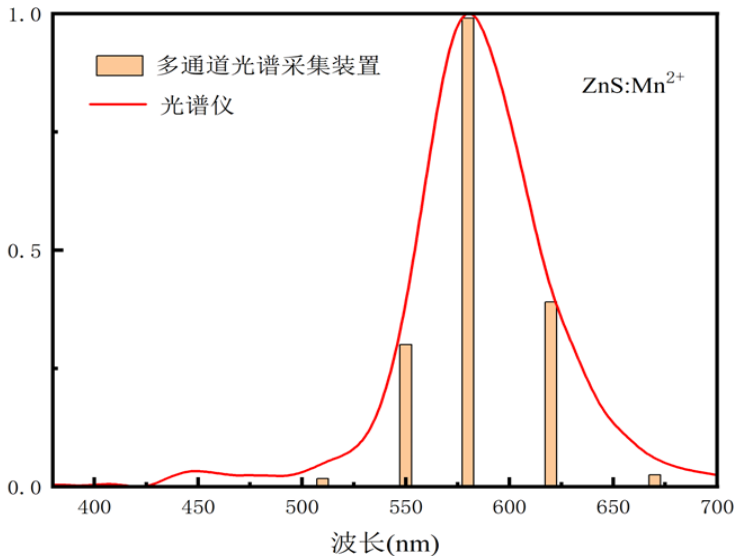


图 4-8 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 的多通道光谱输出与光谱仪的光谱输出

$\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 的发射波长主要分布在 400 至 600 纳米之间，其最强发射峰出现在

520 纳米处，与光谱传感器的 F4 通道接近。另一方面， ZnS:Mn^{2+} 的发射波长则覆盖 530 至 650 纳米范围，其峰值位于 580 纳米，这与光谱传感器的 F6 通道的波长相匹配。根据之前探讨的利用这两种材料的发射峰值比来测量小球冲击力的方法。由于光谱传感器的 F4 和 F6 通道与这两种材料的发射峰相配较好，可以通过计算 F4 与 F6 通道输出值的比率来准确地建立冲击力与峰值比的关系。这种方法的应用，简化了测量过程和数据处理，提高了检测的效率并降低了成本。

4.3 力致发光薄膜传感器的多通道光谱响应分析

4.3.1 ZnS:Cu^{2+} 薄膜传感器的多通道光谱分析

利用多通道光谱传感装置采集了 ZnS:Cu^{2+} 薄膜传感器在受到不同冲击力作用时的光谱信息。 ZnS:Cu^{2+} 薄膜传感器在小球不同冲击高度下的光谱响应如图 4-9 所示。结果显示，随着小球下落高度的增加，光谱采集装置 F3、F4、F5 通道的输出响应信号相应增强。F3、F4、F5 通道的输出信号对应 470nm、510nm、550nm 波长处的光谱强度，其中 F4 通道的输出响应信号位于 ZnS:Cu^{2+} 薄膜传感器的峰值信号附近。

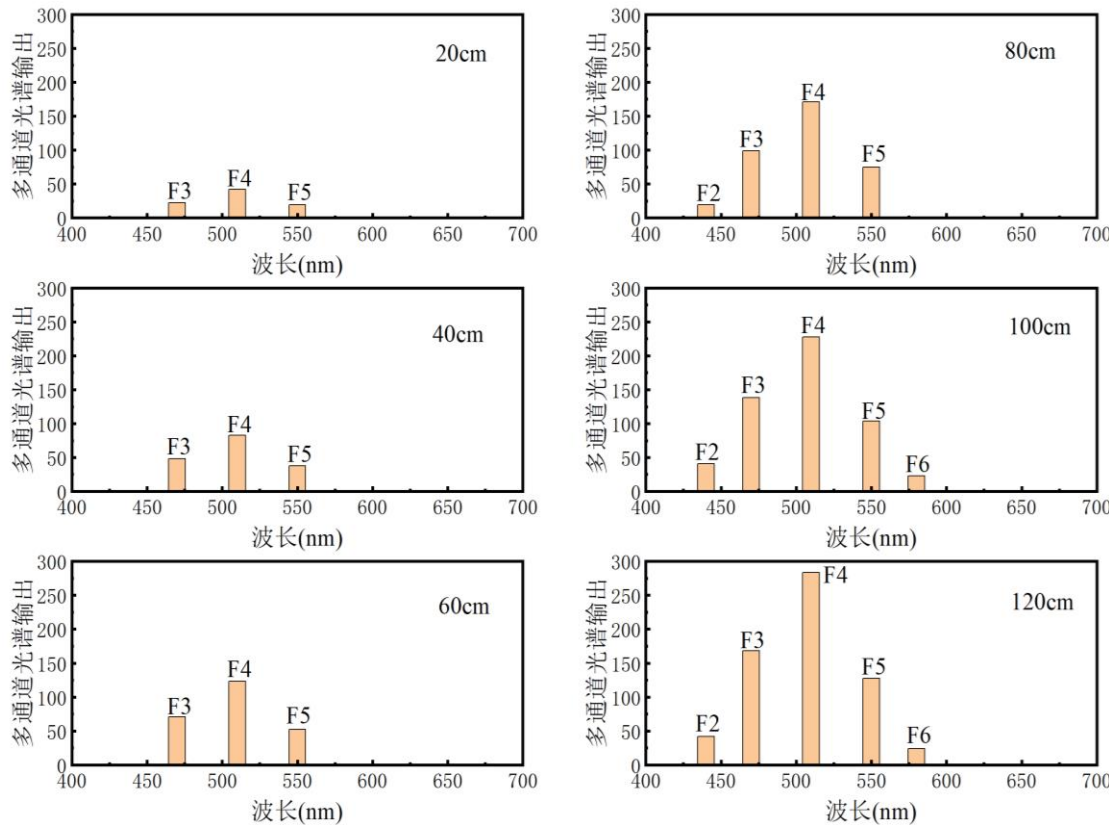


图 4-9 ZnS:Cu^{2+} 薄膜传感器在小球冲击下多通道输出响应

根据图 4-9 光谱采集装置获取的数据，对小球在不同高度下冲击 ZnS:Cu²⁺薄膜传感器时产生的多通道输出信号进行了分析。重点关注了 F3、F4、F5 三个通道的输出信号。分析发现，这些通道的输出信号与小球冲击速度之间存在明显的线性关系，结果如图 4-10 所示。

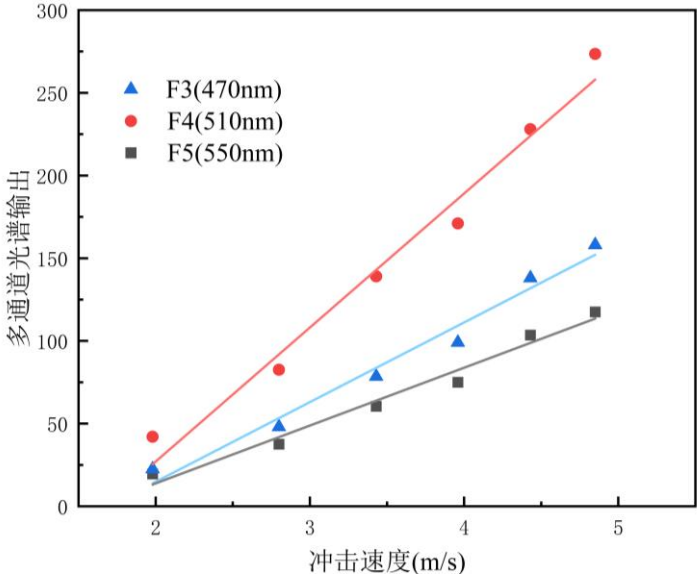
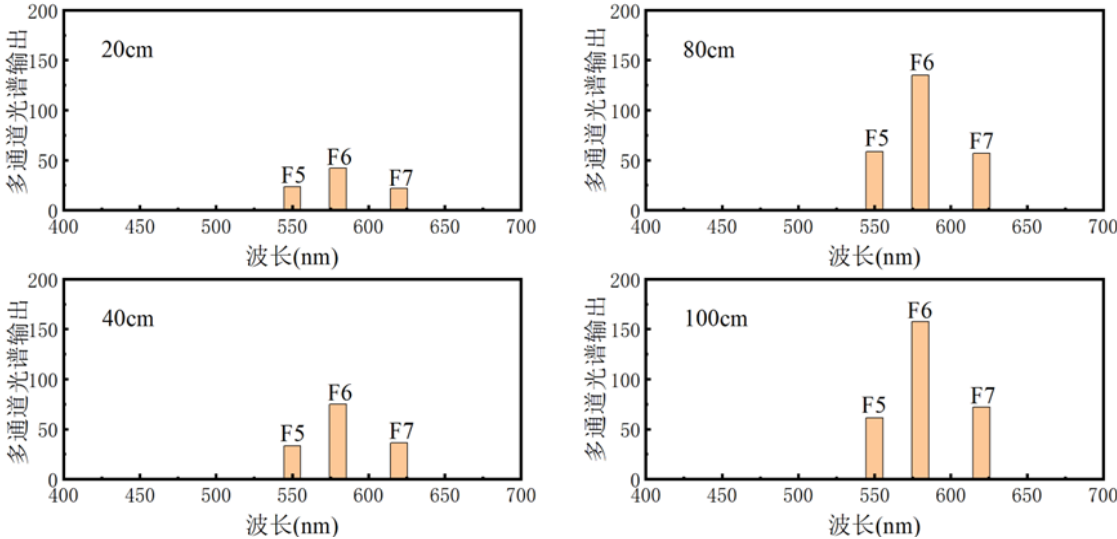


图 4-10 ZnS:Cu²⁺薄膜传感器各通道输出与小球冲击速度的关系

4.3.2 ZnS:Mn²⁺薄膜传感器的多通道光谱分析

ZnS:Mn²⁺与 ZnS:Cu²⁺薄膜传感器采用了相同的测试方法，其光谱采集装置的多通道输出信号如图 4-11 所示。结果显示，随着小球下落高度的增加，光谱采集装置 F5、F6、F7 通道的输出响应信号相应增强，F5、F6、F7 通道的输出信号对应 550nm、580nm、620nm 波长处的光谱强度，其中 F6 通道的输出响应信号与 ZnS:Mn²⁺薄膜传感器光谱峰值强度一致。



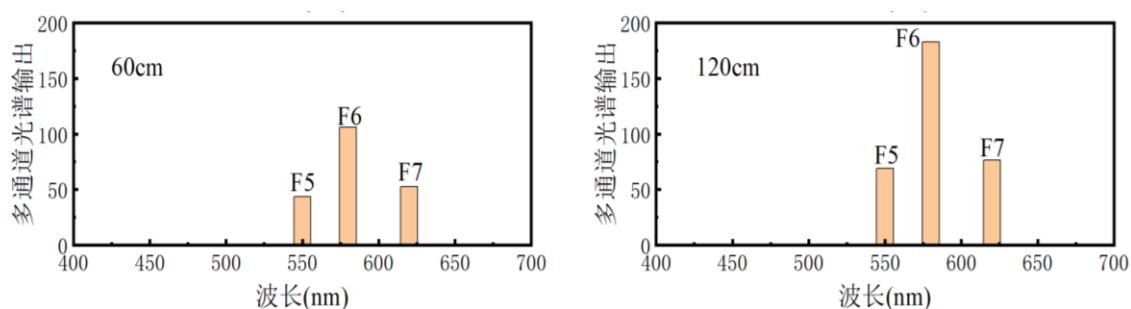


图 4-11 ZnS:Mn²⁺薄膜传感器在小球冲击下各通道的输出响应

根据图 4-11 光谱采集装置获取的数据，对小球在不同高度下冲击 ZnS:Mn²⁺ 薄膜传感器时产生的多通道输出信号进行了分析。重点关注了 F5、F6、F7 通道输出信号与小球冲击速度的关系，如图 4-12 所示，发现存在明显的线性关系。

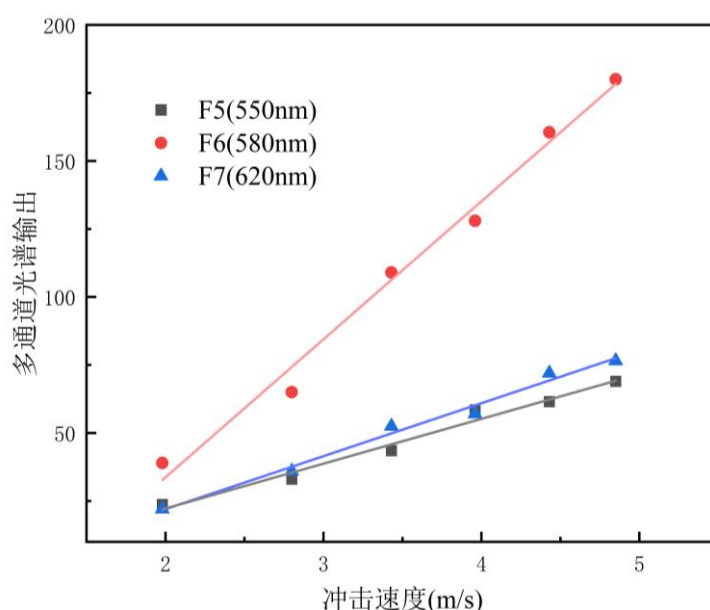


图 4-12 ZnS:Mn²⁺薄膜传感器各通道输出与小球冲击速度的关系

4.3.3 ZnS:Cu²⁺和 ZnS:Mn²⁺混合配比薄膜传感器多通道光谱分析

研究了方案三配比（1.5g ZnS:Cu²⁺和 1.5g ZnS:Mn²⁺）的薄膜传感器，在受到小球冲撞时的多通道光谱响应输出，如图 4-13 所示。随着小球下落高度的增加，光谱采集装置各通道输出信号也相应增强。特别是，F5 通道的输出信号捕获了两种发光材料光谱重叠的区域。基于我们先前的研究，F4 和 F6 通道的输出信号分别代表了 ZnS:Cu²⁺和 ZnS:Mn²⁺薄膜传感器的特征发光峰。因此，F5 通道的光谱输出虽为重叠区域，却不会对实验结果产生不利影响。

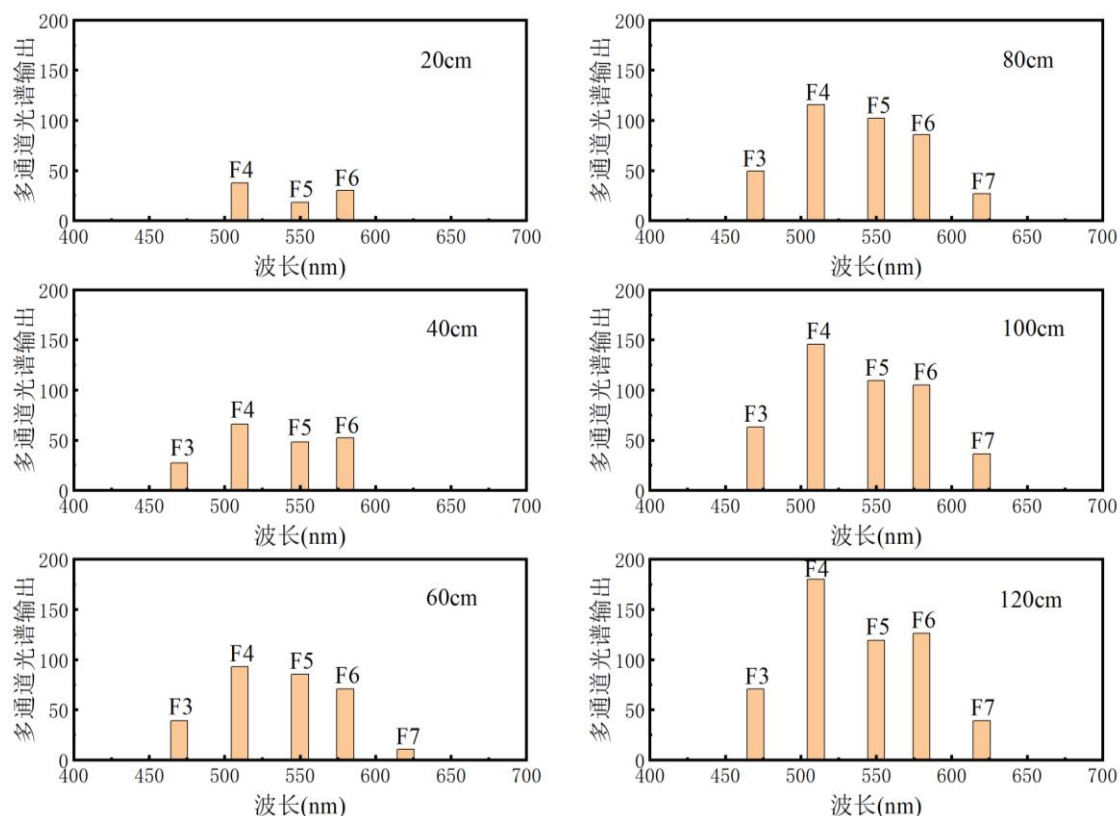


图 4-13 方案三薄膜传感器在小球冲击下各通道的输出响应

特别是，F5 通道的输出信号捕获了两种发光材料光谱重叠的区域。基于先前的研究，F4 和 F6 通道的输出信号分别代表了 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜传感器的特征发光峰。因此，F5 通道的光谱输出虽为重叠区域，却不会对实验结果产生不利影响。对 F4 与 F6 通道的输出与小球冲击速度的关系进行了线性回归分析，结果如图 4-14 所示，两者之间存在明确的线性关系。

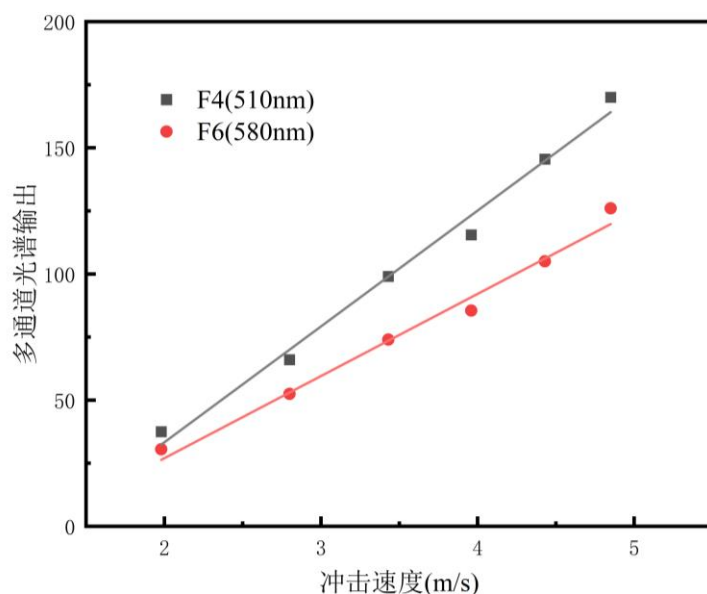


图 4-14 方案三薄膜传感器峰值通道输出与小球冲击速度的关系

这表明，即便在混合状态下， $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 各自的发光峰值没有相互影响。通过分析多通道光谱采集装置的输出响应，我们发现 F4 通道的光谱输出与小球冲击速度拟合直线的斜率更高，这表明 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 薄膜传感器对撞击的灵敏度高于 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜传感器。这一发现与光谱仪的测量结果相符，进一步证明了我们构建的多通道光谱采集装置在检测力致发光冲击检测应用中的可行性。

4.4 基于峰值通道输出比的冲击力检测方法

在上一节的研究中，我们探讨了方案三配比（1.5g $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 1.5g $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ ）混合制成的薄膜传感器，在受到小球撞击时的多通道光谱响应特性，并建立了 F4（510nm）和 F6（580nm）通道的输出与小球冲击速度间的线性关系。这两个通道的输出信号分别对应着 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜传感器的特征发光峰。通过测量 F4 和 F6 通道的输出，建立了一个关系模型，如图 4-15 所示，该模型基于 F4 与 F6 通道输出的比值（F4/F6）来准确地确定球体撞击薄膜时的速度。对 F4 与 F6 输出比值与球体撞击速度的关系进行线性拟合后，发现二者之间存在显著的线性关系。这一发现为我们提供了一种新颖的方法，即通过多通道光谱采集装置的峰值输出比来准确评估球体冲击薄膜传感器时的速度的大小。

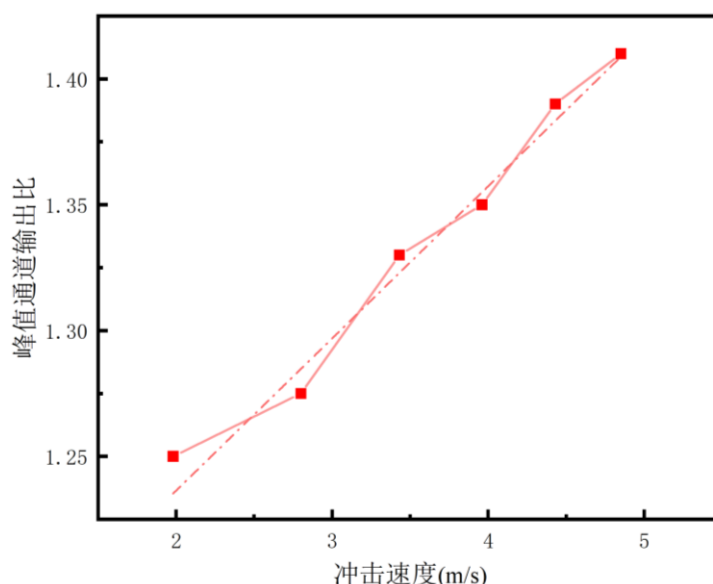


图 4-15 峰值通道输出比与小球冲击速度的关系

依据公式（2-25）和（2-26）对小球从不同高度落下时对薄膜传感器产生的冲击力进行了计算。随后，研究聚焦于薄膜传感器在这些不同冲击力作用下的峰值通道输出比的变化。通过线性回归分析，得出了输出比与冲击力之间的线性关

系，其表达式为 $Y = 1.15602 + 0.00706X$ ，该线性关系的拟合度很高，其 R^2 值达到0.98423，如图 4-16 所示。这一关系为我们提供了一种通过光谱采集装置的峰值通道输出比来准确评估冲击力大小的新方法。

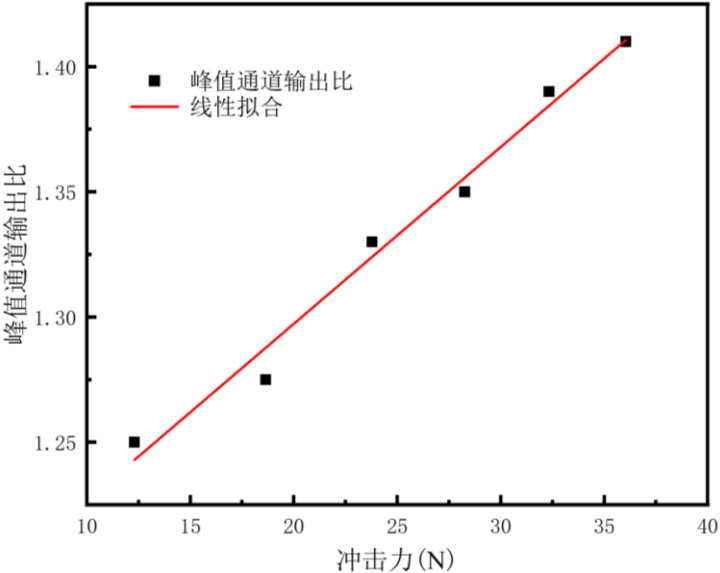


图 4-16 峰值通道输出比与冲击力的线性关系

4.5 本章小结

本章的研究成果展示了多通道光谱采集装置在力致发光冲击检测中的有效应用。通过替代昂贵的光谱仪，实现了力致发光冲击检测装置的小型化和低成本。本研究采用 AS7341 光谱传感器和 Arduino 控制器构建了光谱采集装置，成功地实现了对力致发光光谱的采集和分析，准确记录了 ZnS:Cu^{2+} 和 ZnS:Mn^{2+} 薄膜传感器在球体撞击下的多通道光谱响应。这些响应数据与光谱仪采集的结果具有高度一致性。最重要的是，本研究不仅证实了基于多通道光谱采集装置的冲击检测方法的有效性，还确立了 ZnS:Cu^{2+} 和 ZnS:Mn^{2+} 薄膜传感器在小球冲击时峰值通道输出比与小球冲击力之间的线性定量关系，为未来发展新型冲击检测传感器技术提供了一种既实用又经济的新方案。

第 5 章 基于图像灰度值比的冲击检测方法研究

5.1 引言

本章聚焦于基于图像采集的冲击检测方法研究，以克服单纯依赖光谱响应分析无法实现冲击点定位、应力分布识别和冲击过程可视化的局限。图像采集方法的优势在于能够精确地识别冲击发生的位置、清晰地揭示应力分布情况，并且有效地将冲击过程可视化。在传统的基于绝对光强的图像采集技术上，通过使用两台相机分别捕捉薄膜传感器内两个发光峰值波段的图像，进一步分析了这两个峰值波段的灰度值比与冲击力之间的关系。研究还包括了对光斑面积、薄膜压缩距离与小球冲击强度之间的定量关系的探讨，从而为理解和量化冲击力对薄膜传感器影响提供了重要数据。通过实验，成功地评估了人手各掌指关节敲击薄膜传感器时的冲击力度，验证了该技术在冲击检测领域的应用潜力。

5.2 实验装置与设备

基于图像采集的冲击检测方法研究使用的实验设备的具体参数信息如表 5-1 所示：

表 5-1 实验设备参数信息表

编号	设备名称	参数信息
1	PCO.edge 4.2	高速、高灵敏度、高分辨率 sCMOS 相机
2	滤光片	中心波长 515nm；范围 500-530nm；透过率 95%
3	滤光片	中心波长 585nm；范围 570-600nm；透过率 95%
4	分光镜	透过率 T:反射率 R=50%: 50%

5.2.1 相机

在本章节中，我们使用的是 PCO.edge 4.2 型号的高速、高灵敏度、高分辨率 sCMOS 相机，图 5-1 是相机的实物图。该相机配备了 CMOS 黑白感光芯片，并以每秒 60 帧的高帧率捕捉图像，使其能够精确记录快速变化的力致发光现象。相机的光谱响应范围宽广，其范围涵盖了从 370nm 到 1100nm 的波长，完全覆盖

了实验所需的所有采集波段。其制冷背照式设计在低光照环境下特别有效，能够显著提升图像质量并降低背景噪声，确保了图像的清晰度和准确性。



图 5-1 PCO.edge 4.2 型号相机

PCO.edge 4.2 型号相机的相关技术指标参数如表 5-2 所示。

表 5-2 PCO.edge 4.2 型号相机技术参数

技术指标	参数
分辨率	2048*2048
像素大小	6.5μm *6.5μm
读出噪声	0.8e-@慢速扫描，0.9e-@快速扫描
动态范围	91.5dB
操作温度	+10℃ ~ +40℃
功耗	22W
镜头接口	C/F
供电	24V DC

PCO.edge 4.2 型号相机的光谱响应曲线如图 5-2 所示，其展示了该相机感光元件在不同波长下的量子效率，反映出在各个光谱波段的光子响应能力。曲线中的量子效率越高，意味着该相机在此波长下的光感知效果越佳。根据光谱响应曲线可见，相机在 ZnS:Cu²⁺的发射峰波长（520nm）处的光感知效率接近最大值，显示出相机传感器对此波长的高度响应能力，确保了精确记录。而在 ZnS:Mn²⁺的发射峰波长（580nm）处，虽然量子效率有所降低，但相机仍维持高效的光感知性能。在 500nm 至 600nm 的波长区间内，PCO.edge 4.2 型号相机的量子效率超过了 90%，且波动范围在 3%以内。这保证了相机在该波长区间内提供高度一致的光学响应性能，能够在薄膜传感器图像采集实验中将误差维持在极低的水平。

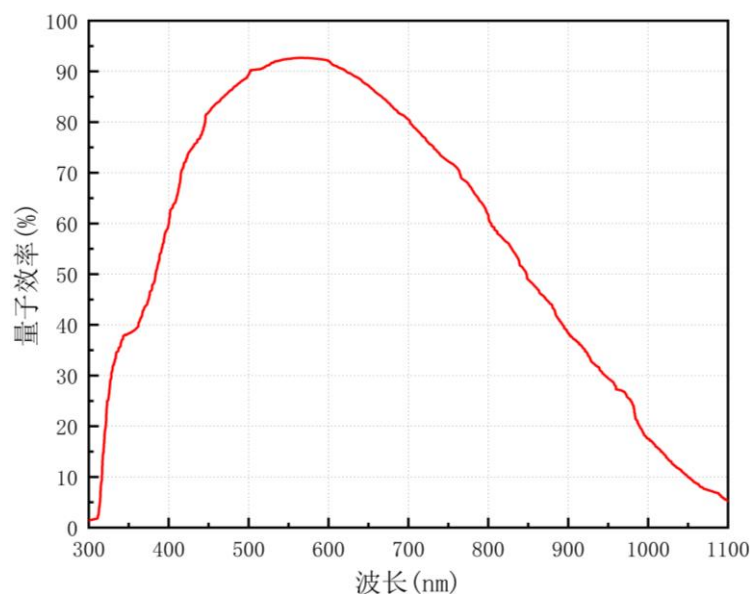


图 5-2 PCO.edge 4.2 型号相机光谱响应曲线

5.2.2 半透半反分光镜

分光镜是由光学玻璃或其他透明材料制成的重要光学元件，其主要功能是将入射的单一光束分成多个光束。通过分光镜分出的各光束在性质上与原始光束一致。如果忽略分光过程中可能发生的微小光强损耗，则分离后的各光束总光强等于入射光的光强。分光镜可分为偏振型和非偏振型两大类。偏振型分光镜可以将入射光分离成具有不同偏振状态的光束，并根据入射光的偏振特性，按比例分配光强。非偏振型分光镜可以将入射光分成一部分的反射光束以及一部分的透射光束，这两部分光的光源强度按照透射率和反射率的比例分离，其余的性质则与入射光束完全相同^[62]。非偏振型分光镜的光学原理如图 5-3 所示。

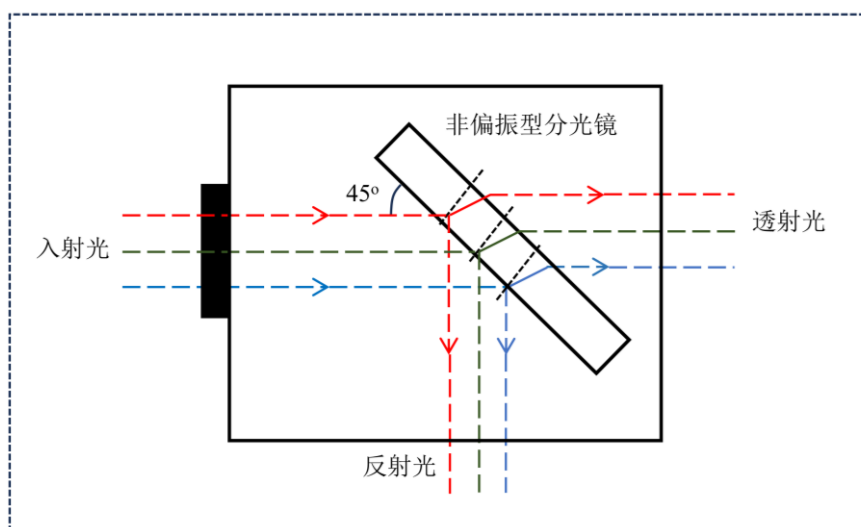


图 5-3 非偏振型分光镜的光学原理

本实验中采用了分光比为 1:1 的分光镜，它能够将透射光和反射光的强度均匀分配。通过这种方式，当小球撞击薄膜传感器产生力致发光时，分光镜将光线精确地一分为二，每部分光线均保持其初始的光学属性不变。这两部分光线随后被两个 PCO.edge 相机同步捕捉，允许我们从两个独立的视角对发光事件进行记录。

5.2.3 滤光片

在实验研究中，为了提取特定波段的光信息，常用相应波段的滤光片进行选择滤除。大部分的滤光片是在塑料或玻璃等物质上均匀涂覆某种特殊染料制成的^[63]。当光线通过这些滤光片时，只有特定波段内的光线得以通过，而该波段外的光线则被滤光片吸收。当滤光片吸收波段范围外的光线时，也会吸收少量波段范围内的光，具体吸收量取决于滤光片的透过率。透过率越高，吸收目标波段内光线的量越少。

在采集薄膜传感器两个峰值波段光学响应的实验中，滤光片的作用是至关重要的。我们需要精确捕获薄膜传感器产生的特定发光峰值波段，这些峰值根据先前的研究，分别位于 520nm 和 580nm 波长附近。因此，定制了两种窄带滤光片，他们分别允许 500-530nm 和 570-600nm 波段的光透过，而目标波段外的光被完全隔离。这两个滤光片如图 5-4 所示。



图 5-4 两种窄带滤光片

为了验证定制的滤光片是否满足实验要求，我们对其进行了光谱透过率测试。测试结果如图 5-5 所示。从图中可以看出，滤光片成功隔离了目标波段之外的光，并且在目标波段内实现了高于 95% 的光透过率，这极大地减少了光能损失，并确保了实验的准确性，避免了非目标波段的光对实验结果产生干扰。

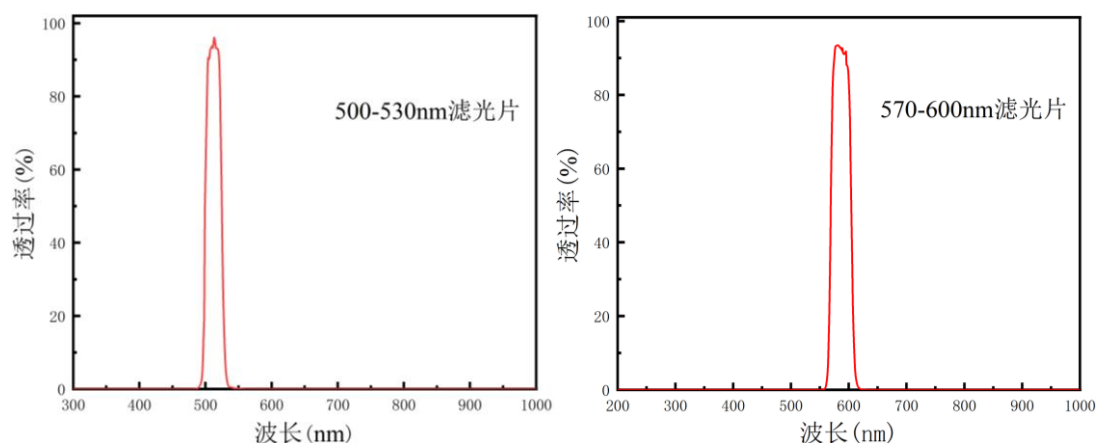


图 5-5 两种滤光片的光谱透射图

5.3 图像采集方案设计

为了精确捕获薄膜传感器的两个发光峰值波段图像，我们设计了图 5-6 所示的图像采集方案。薄膜传感器由小球冲击产生的力致发光被分光镜分成两部分，随后被两台安装了特定滤光片的相机同步捕捉，相机 1 捕获由 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 发射的位于 500-530nm 峰值波段图像，而相机 2 捕获由 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 发射的位于 570-600nm 峰值波段图像。这两台相机通过控制软件进行同步触发，以确保在相同时间点上记录下这两种发光峰值的图像响应，从而为后续的分析提供准确且同步的数据。

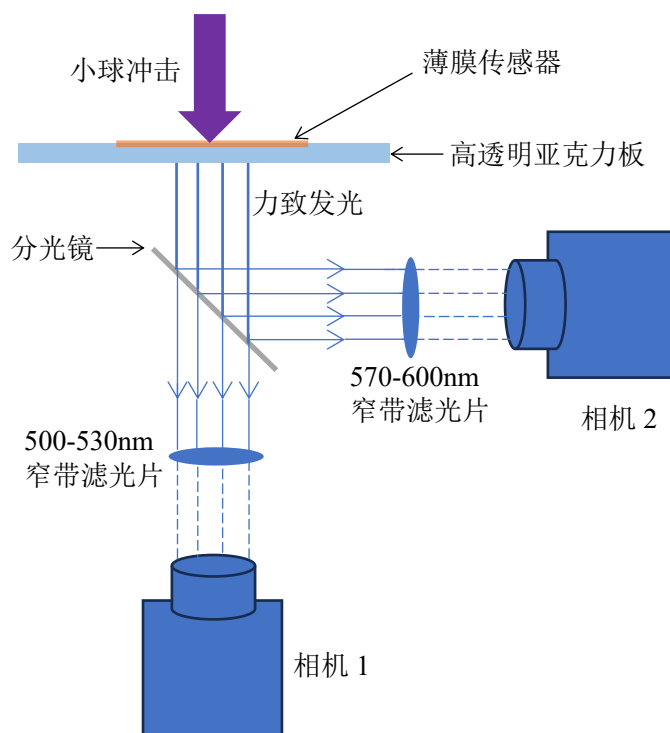


图 5-6 峰值波段图像采集方案示意图

图 5-7 展现了用于捕捉峰值波段图像装置的实物图。在该实验装置中，分光镜固定在薄膜传感器正下方，并与光学平台呈 45° 角。实验中需手动微调分光镜角度，以确保分光后的透射光和反射光光强相等。此外，为了确保两台相机（相机 1 和相机 2）捕捉到一致的光斑图像，它们的镜头需与分光镜保持相同距离。若两个相机的图像采集界面均清晰显示了完全相同的薄膜传感器，则说明分光镜和相机的角度已调整至最佳位置。

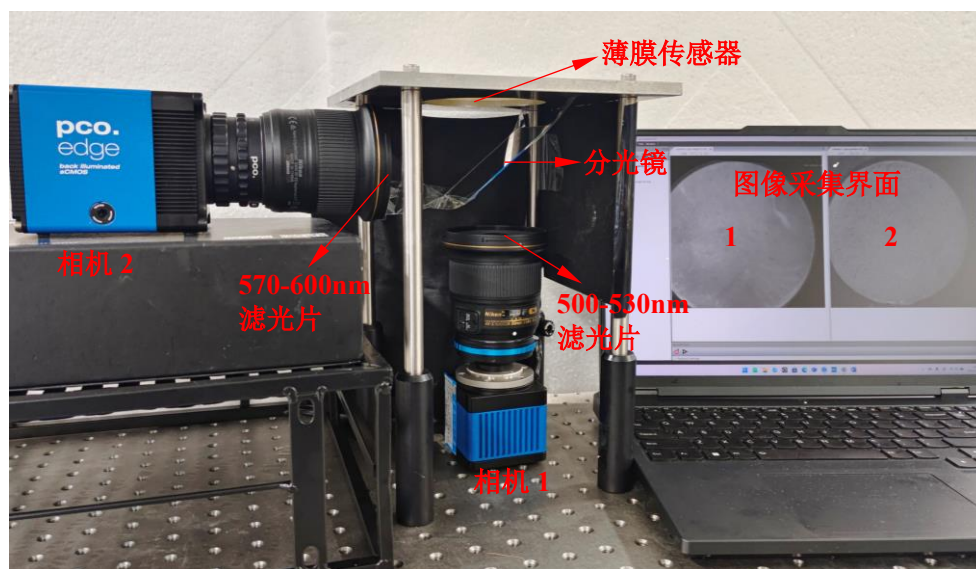


图 5-7 峰值波段图像采集装置实物图

5.4 图像的采集与处理

5.4.1 图像采集软件

在力致发光的峰值波段图像采集实验中，利用 PCO 系列相机配套的采集软件来控制图像的捕获过程。该软件能控制两台 PCO 相机实现精准的同步触发，从而在同一时刻捕捉到薄膜传感器在受到冲击时发出的光信号。实验过程中的图像数据通过 USB 传输到电脑端，PCO 相机软件的操作界面如图 5-8 所示，上层窗口为相机 1 的采集界面，下层窗口为相机 2 的采集界面。

在相机软件界面的右侧，用户可对相机参数进行设置。在“Exposure”一栏中，界面上的前一空格显示了曝光时间的预设范围，便于用户快速选定一个大致的时间段作为初始点。紧接其后的空格用于输入具体的曝光时间数值，单位为微秒 (μs)。在本实验中，我们将曝光时间设置为 $21\mu\text{s}$ 。在“Delay”一栏中，我们设置

了 0，意味着相机将无延迟地立即拍摄。在“Trigger Mode”（触发模式）选项下，可以选择单次或多次触发记录。我们选择了“Auto Sequence”模式，以实现多次触发记录。设置完成后，点击图中的红色圆圈按钮即可启动两台相机。为保障数据准确性，相机捕捉到的力致发光图像以无损压缩的 TIF 格式保存在电脑端，避免由于图像像素压缩造成的数据误差。

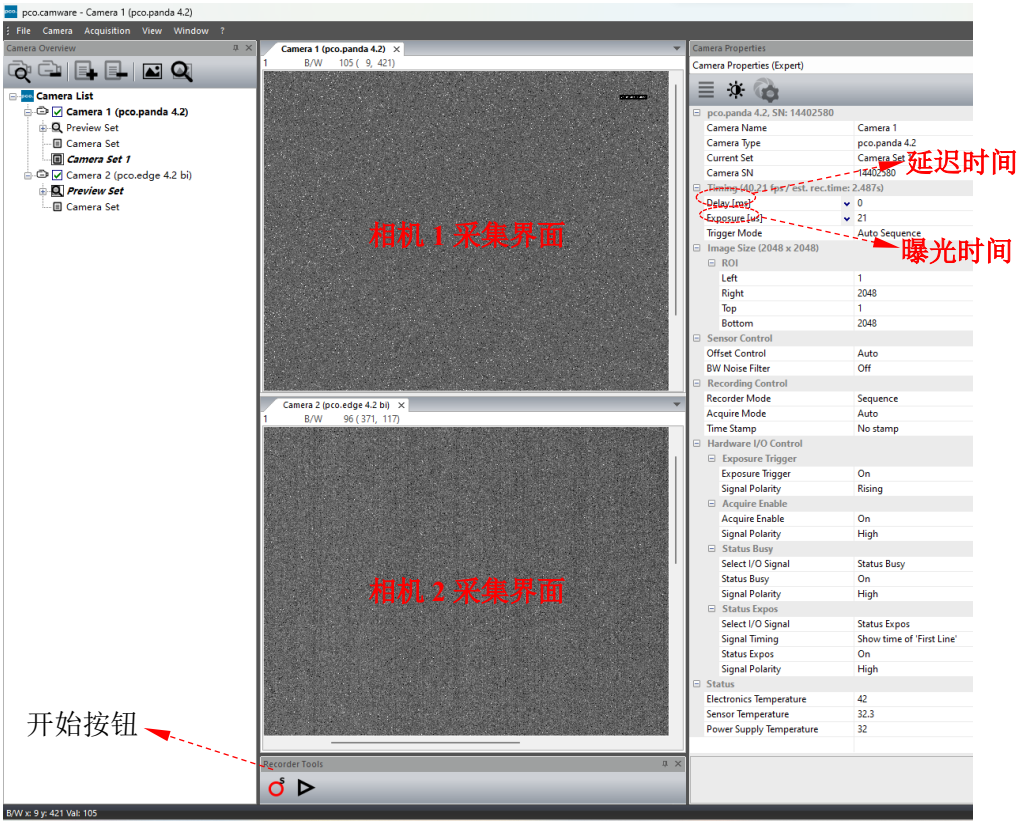


图 5-8 PCO 系列相机软件操作界面

5.4.2 图像去噪处理

采集的力致发光图像需经过 ImageJ 软件处理，消除相机固有的背景噪声所带来的误差，确保数据的真实性和准确性。具体处理步骤如下，首先，在 ImageJ 软件中打开两幅图像，如图 5-9 所示，左侧图像是小球冲击薄膜传感器产生的力致发光光斑，右侧图像是相机自身的背景噪声（即发光图像前一帧的记录）。利用 ImageJ 中的“Image Calculator”功能进行图像减法处理，即从力致发光图像中减去背景噪声图像。这一步骤的目的是消除相机自身产生的背景噪声，从而降低对光斑区域灰度值测量的误差。

消除图像背景噪声在光斑灰度值提取中起着关键作用，它不仅增强了光斑与

背景之间的对比度，还有助于更清晰地标识和分析光斑区域，减少自动光斑识别过程中可能出现的误判和干扰，从而使得最终的灰度值提取结果更加精准。

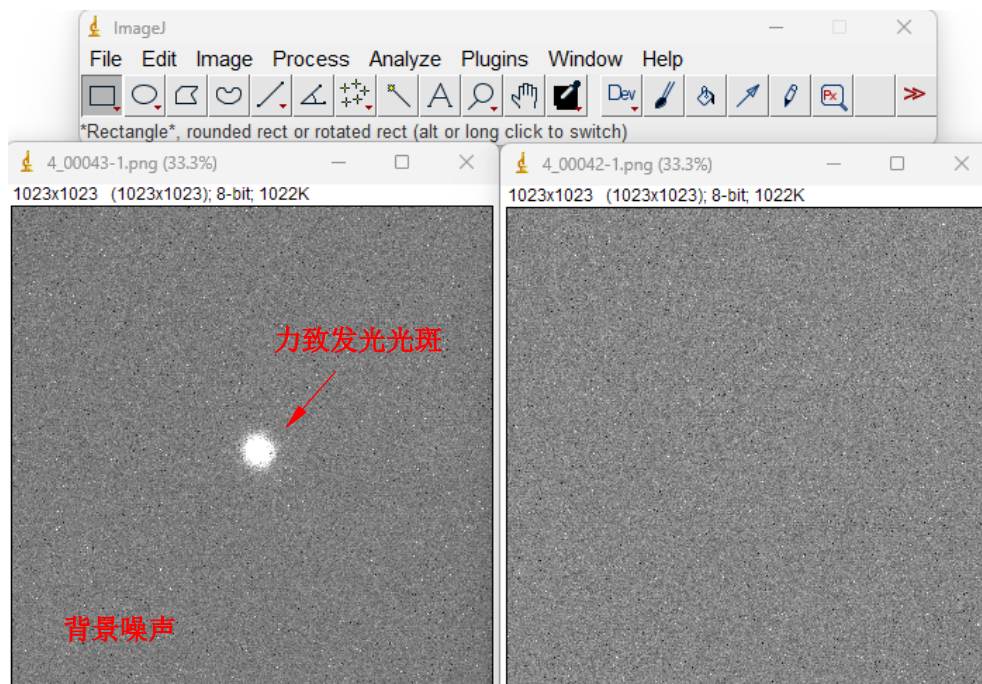


图 5-9 ImageJ 软件去噪处理

经过背景噪声处理后的图像如图 5-10 所示，其中光斑的特征被准确突显，与背景的分区分更加明显。

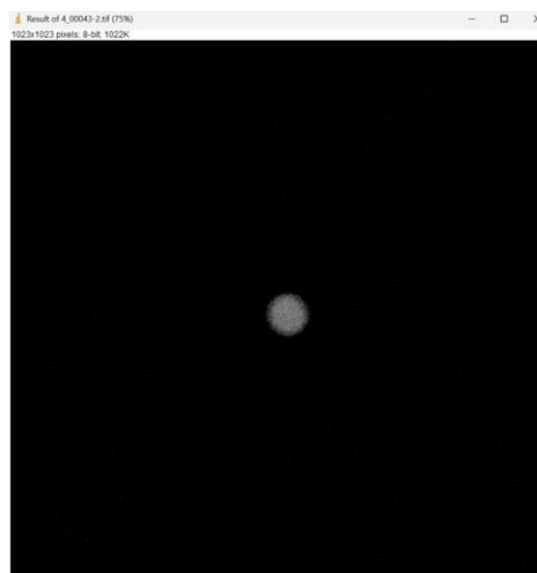


图 5-10 消除背景噪声后的图像

5.4.3 灰度值获取

光斑区域灰度值的提取仍然通过 ImageJ 软件完成，灰度值即将图像中每个像

素点的亮度水平表示为 0（黑色）到 255（白色）之间的整数。首先，在软件中设定阈值范围（20-255），以准确提取光斑区域像素点。此阈值设定意味着图像中仅灰度值大于 20 的像素点会被选中，即光斑区域内的像素点被选中，如图 5-10 所示，这些选中的像素点在图像上标记为红色。随后，软件计算这些区域的像素点数量及其平均灰度值。ImageJ 软件通过累加所选区域内所有像素的灰度值并将其除以像素总数，从而得出平均灰度值。右侧的界面显示了此次计算的结果，在所选区域中共有 5068 个像素点，平均灰度值约为 94.7。

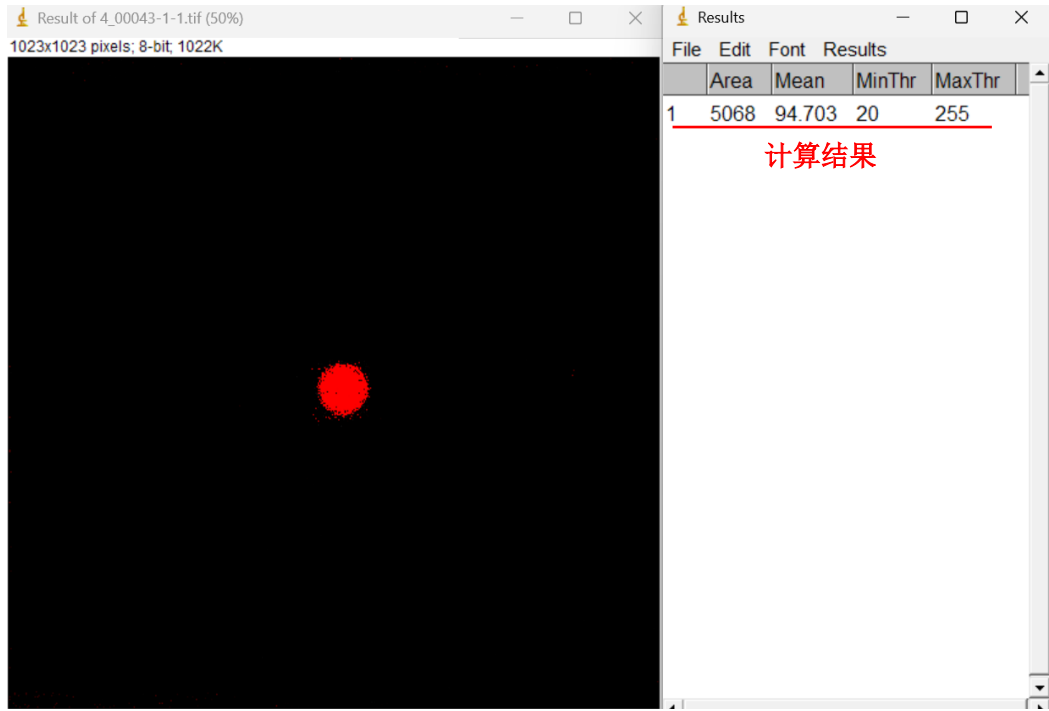


图 5-10 光斑区域灰度值的提取

5.5 实验结果与分析

当小球从不同高度下落撞击方案 3（1.5g ZnS:Cu²⁺ 和 1.5g ZnS:Mn²⁺）配比的薄膜传感器时，产生的力致发光，通过分光镜和滤光片被相机 1 和相机 2 捕获。经背景噪声处理后的灰度图和颜色映射图直观地揭示了小球冲击的应力分布，如图 5-11 所示。随着小球下落高度的增加，光斑亮度和面积均有所增加，反映了冲击强度与发光效应之间的关联。颜色映射图中光斑中心的亮度与边缘相比明显更强，指示中心区域遭受更大的冲击而周围区域的冲击相对较弱。

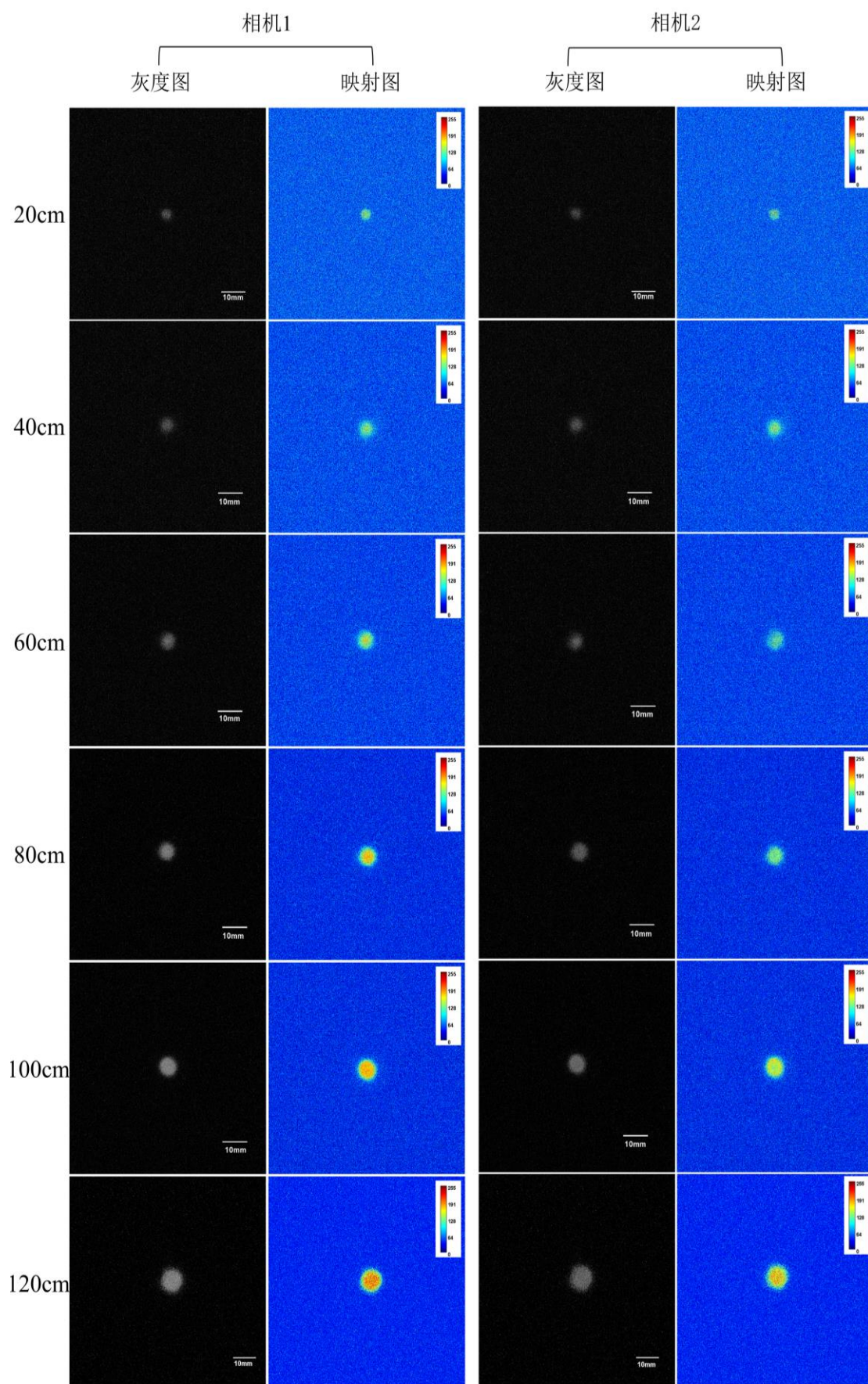


图 5-11 力致发光的灰度图和颜色映射图

为定量分析光斑面积与冲击速度之间的关系，本实验首先采用 ImageJ 软件对光斑区域内的像素进行计数，以确定其像素面积。随后，通过空间校准将图像中的像素长度转换成实际的物理尺寸，从而得出光斑的实际面积。从力致发光灰度图中可以观察到，随着小球冲击速度的增加，光斑面积也相应增大，这表明小球在一定程度上压缩了薄膜传感器。薄膜的压缩距离可以通过公式 $h = A/\pi r$ 计算（其中 h 是薄膜压缩距离， A 是光斑面积， r 是小球的半径）^[64]。

相机 1 和相机 2 所记录的光斑面积差异较小，据此得出平均光斑面积，根据平均光斑面积，进一步计算出了在不同冲击速度下薄膜的压缩距离。利用这些计算结果，我们能够在表 5-3 中呈现相机 1 和相机 2 所捕获的光斑面积、薄膜的压缩距离与小球冲击速度之间的关系。

表 5-3 光斑面积和薄膜压缩距离

高度 (cm)	冲击速度 (m/s)	光斑面积 1 (cm ²)	光斑面积 2 (cm ²)	面积平均值 (cm ²)	压缩距离 (mm)
20	1.98	0.073	0.071	0.072	0.229mm
40	2.8	0.107	0.113	0.110	0.350mm
60	3.43	0.152	0.154	0.153	0.487mm
80	3.96	0.199	0.201	0.200	0.637mm
100	4.43	0.257	0.249	0.253	0.805mm
120	4.85	0.301	0.293	0.297	0.946mm

根据表 5-3 的数据，绘制的图 5-12 (a) 和 (b) 直观地揭示了光斑面积、薄膜传感器压缩距离与小球冲击速度之间的相关性。该图直观地展示了随着冲击速度的增加，光斑面积和薄膜的压缩距离均呈现出明显的增长趋势。

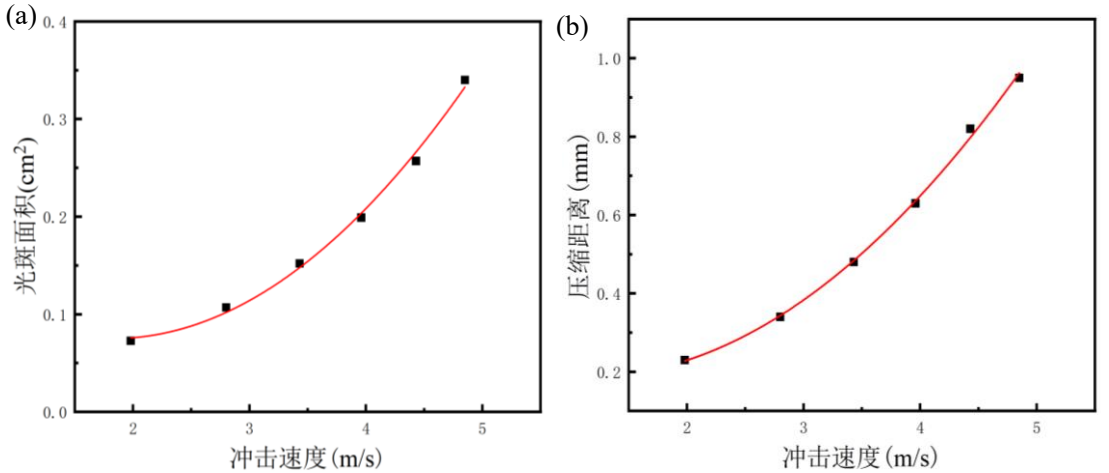


图 5-12 (a) 光斑面积随冲击速度的增长曲线 (b) 薄膜压缩距离随冲击速度的增长曲线

通过 ImageJ 软件对相机 1 和相机 2 捕捉到的图像中光斑区域的平均灰度值进行了分析，以此来定量研究小球的冲击速度与光斑平均灰度值之间的关系，其详细结果如表 5-4 所示。

表 5-4 光斑平均灰度值

冲击速度 (m/s)	相机 1 (灰度值)	相机 2 (灰度值)	灰度值比
1.98	65	53	1.226
2.8	84	67	1.254
3.43	101	78	1.295
3.96	116	88	1.318
4.43	130	96	1.354
4.85	141	102	1.382

图 5-13 (a) 展示了小球冲击速度和光斑平均灰度值的定量关系。相机 1 和相机 2 采集的平均灰度值和小球冲击速度之间都表现出很好的线性关系。相机 1 记录的由 ZnS:Cu^{2+} 产生的 500-530nm 波段的光斑，在亮度上高于相机 2 捕捉的由 ZnS:Mn^{2+} 产生的 570-600nm 波段的光斑。这一结果与先前的研究一致，表明 ZnS:Cu^{2+} 对小球冲击的响应比 ZnS:Mn^{2+} 更为敏感。图 5-13 (b) 展示了灰度值比与小球冲击速度间的定量关系，经拟合后，也表现出较好的线性关系。

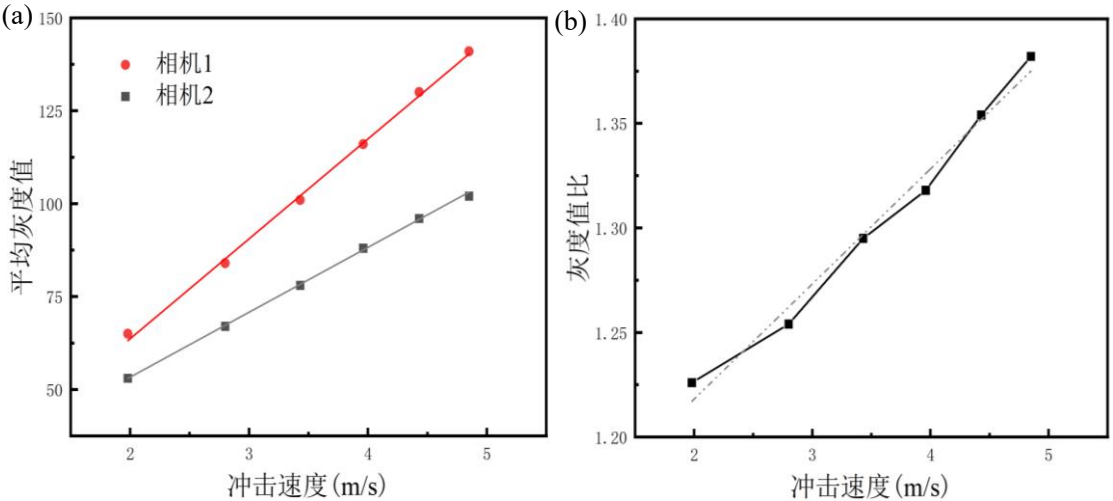


图 5-13 (a) 光斑平均灰度值与小球冲击速度的关系 (b) 灰度值比与小球冲击速度的关系

根据公式 (2-25) 和 (2-26) 可以分别计算出小球在不同冲击速度下，对薄膜传感器产生的冲击力。表 5-5 展示了小球在不同速度下对薄膜传感器产生的冲击力的计算结果，以及这些结果与对应的图像灰度值比之间的关系。

表 5-5 不同冲击速度下冲击力的计算结果

冲击速度 (m/s)	冲击力 (N)	灰度值比
1.98	12.3	1.226
2.80	18.64	1.254
3.43	23.78	1.295
3.96	28.26	1.318
4.43	32.33	1.354
4.85	36.04	1.382

通过对表 5-5 的冲击力与灰度值比的数据进行线性拟合, 得到了图 5-14 所展示的结果。该线性拟合方程为 $Y=1.13684+0.00666X$, 线性拟合度 $R^2=0.98705$ 。这一显著的线性关系为基于灰度值比的冲击检测方法提供了可靠的标定关系。这意味着, 通过测量灰度值比, 可以直接得到相应的冲击力。

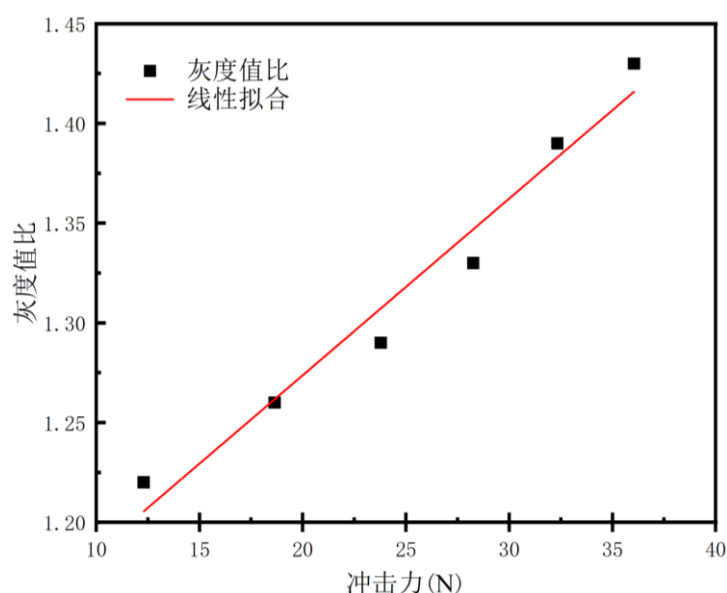


图 5-14 小球冲击力与灰度值比的关系

这种方法通过相对比较而不是单一的绝对光强测量, 不仅展现出良好的线性关系, 而且该方法对环境的抗干扰能力更强, 适用性更好。这种方法特别适用于那些需要高灵敏度和精确度的应用。此外, 相对比值法还为复杂的数据分析提供了更简化的途径, 使得研究者能够更直观地解读和比较不同实验条件下的结果。

5.6 应用展示

为了检验基于图像灰度值比的冲击检测方法在实际应用中的效果, 通过拳头

以一定的力度敲击薄膜传感器，从而评估该传感器在实际环境下的响应特性和灵敏度。如图 5-15 所示，两台高灵敏度相机成功捕捉到了拳头和薄膜传感器接触的瞬间，并准确记录了因冲击而产生的发光现象，展示了拳头的四个掌指关节(标记为 a、b、c、d)的冲击位置。

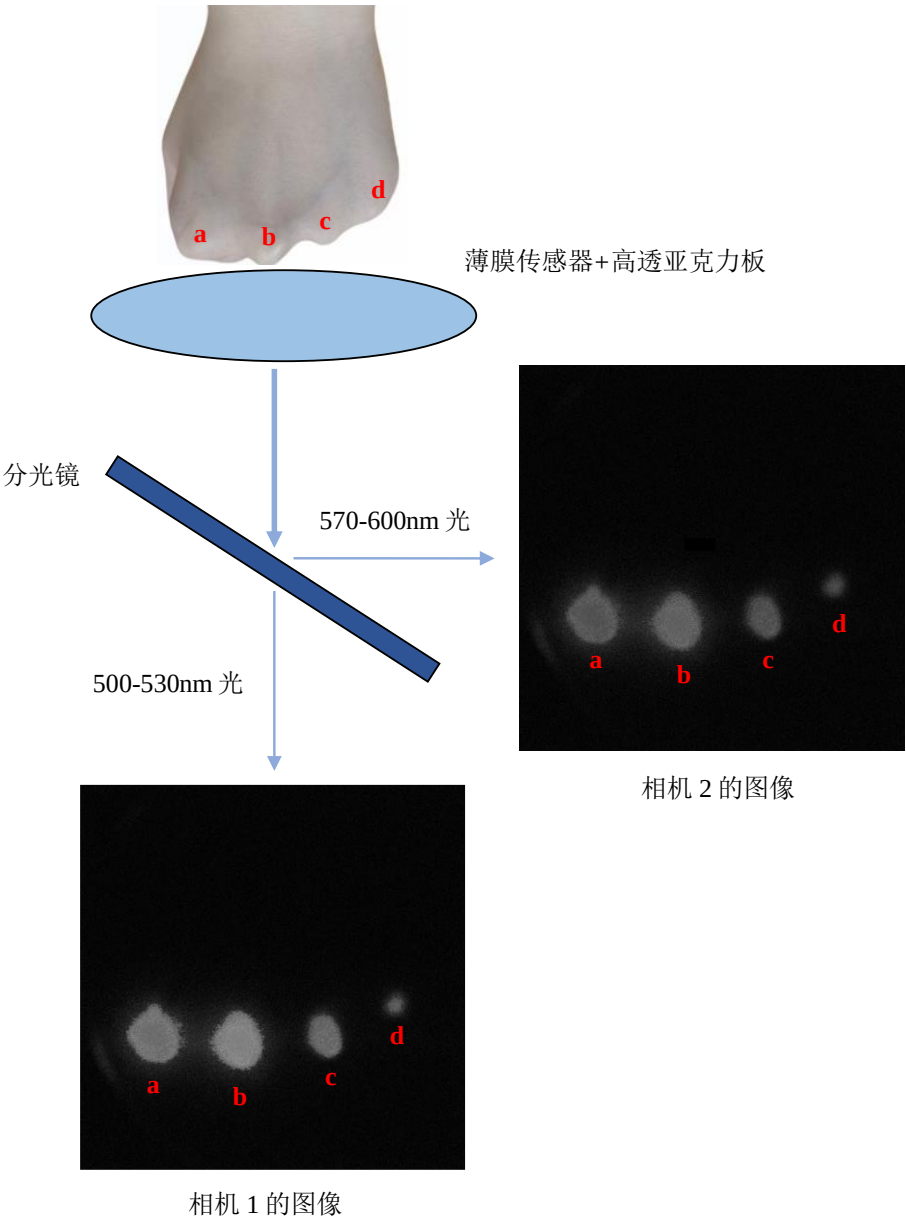


图 5-15 掌指关节冲击力检测

图 5-16 中的颜色映射为我们提供了一个直观的视觉表现，通过比较不同区域的发光强度，我们可以估计出各个掌指关节对薄膜传感器施加的相对力度。不同掌指关节产生的发光强度差异突出了传感器在捕捉细微冲击力度变化方面的优越性能。

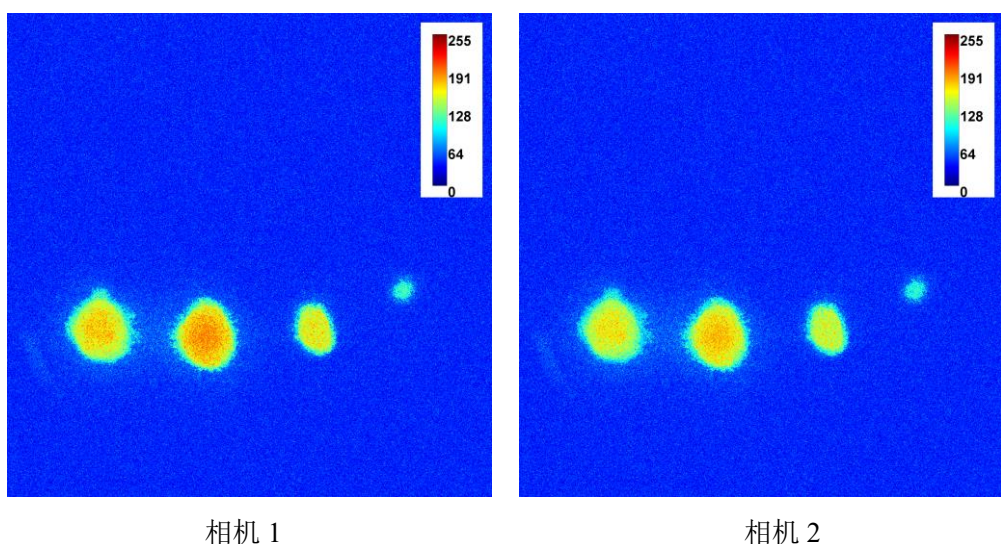


图 5-16 掌指关节冲击的颜色映射

为准确评估拳头各掌指关节对薄膜传感器的冲击力，计算了由两台相机捕捉的图像的灰度值比。依据先前建立的冲击力与灰度值比之间的线性拟合关系，得到了各个关节处的冲击力的具体数值，如表 5-6 所示。结果显示中指掌指关节（标记为 b）的冲击力是最大的，这与常理相符，因为中指掌指关节通常在拳头冲击时承受主要力量。小指掌指关节（标记为 d）的冲击力最小。这些结果与实际冲击规律非常吻合，证实了使用灰度值比作为量化冲击力的可行性。这种方法对于冲击力检测的研究颇具意义，尤其适用于需要无接触和迅速响应的场景，例如在体育科学和康复医疗等领域。

表 5-6 各掌指关节对薄膜的冲击力

关节编号	灰度值（相机 1）	灰度值（相机 2）	灰度值比	冲击力
a	112.56	85.43	1.318	27.2
b	127.83	94.35	1.355	32.8
c	100.16	76.08	1.304	25.1
d	82.35	65.65	1.254	17.6

5.7 本章小结

本章成功地证明了在力致发光冲击检测中，利用峰值波段图像灰度值比进行测量的可行性。实验中，通过配置特定波长滤光片的两台相机，并结合半透半反分光镜，同步捕捉了薄膜传感器中 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 峰值波段的图像灰度响应。建立了小球冲击速度与光斑面积、薄膜压缩量之间的定量关系。随着

冲击速度的提高，光斑面积和薄膜压缩量也随之增长。成功提取了光斑的灰度值，并建立了小球冲击力与薄膜传感器峰值波段灰度值比之间的线性关系。这种灰度值比的应用，作为一种更为稳定的相对测量方法，能有效降低环境光噪声或设备变化引起的测量误差。拳头冲击实验清楚地展示了拳头的四个掌指关节冲击薄膜传感器的位置和冲击力的强弱，展示了基于图像灰度值比的冲击检测方法的应用前景。

第 6 章 总结与展望

6.1 论文总结

本文深入探讨了力致发光材料在冲击检测领域的应用,并针对传统基于绝对光强的方法,提出了一种基于力致发光光强比的检测方法。通过光纤探头测距变化实验,验证了这种方法对环境的抗干扰能力更强,适用性更好。此外,利用 AS7341 光谱传感器和 Arduino 控制器构建的多通道光谱采集装置,实现了在实际应用中的小型化和降低成本。同时,通过搭建的峰值波段图像采集装置,证实了这种方法在图像采集方面的可行性。以下是本文主要完成的几个工作:

1) 将不同比例的 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 与 PDMS 混合,制备出了五种具有不同发光特性的薄膜传感器。通过薄膜传感器截面的 SEM 图像,观察到粉末在 PDMS 中均匀分散的状态。详细分析了薄膜传感器在小球冲击下的力致发光机理,并通过理论推导,证明了薄膜传感器的发光强度与小球冲击力之间存在线性关系。还搭建了落球实验平台,用以评估薄膜传感器在不同冲击力下的光强变化。

2) 研究了这些薄膜传感器在小球冲击下的光谱响应,建立了 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 各自的光谱峰值与小球冲击速度之间的线性关系,并探索了不同配比下发光颜色的变化规律。基于 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 在冲击下的不同发光响应特性,建立了峰值光强比与小球冲击力之间的线性定量关系。实验证明,光谱采集距离对基于光强比的测量结果影响较小,其最大相对标准偏差仅 1.138%,这与绝对光强方法相比,显示出更好的环境适应性和抗干扰能力。

3) 基于 AS7341 光谱传感器与 Arduino 控制器,构建了一个多通道光谱采集装置,实现了力致发光冲击检测装置的小型化和低成本。利用该装置对 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 薄膜传感器在小球冲击下的多通道光谱进行了采集,其结果与传统光谱仪相一致。建立了峰值通道输出比与小球冲击力之间的线性定量关系,为未来冲击力检测技术的发展提供了实用且经济的解决方案。

4) 使用两台配备特定波长滤光片的相机和半透半反分光镜,搭建了一个力致发光峰值波段图像采集装置。建立了峰值波段图像灰度值比与小球冲击力之间的线性关系。通过研究薄膜传感器与小球撞击点的光斑颜色映射图像,实现了冲

击应力在二维空间的可视化分布。还建立了小球冲击速度与光斑面积以及薄膜传感器的压缩量之间的定量关系，展示了随着冲击速度的增加，光斑面积和薄膜压缩量也相应增长的趋势。最后，通过实验评估了人手四个掌指关节敲击薄膜传感器时的冲击力度，展现了基于图像灰度值比的冲击检测方法的应用前景。

6.2 研究展望

本文通过 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 力致发光材料与 PDMS 混合成功制备了一种薄膜传感器，将该薄膜传感器应用于冲击检测中。采用光谱仪、多通道光谱采集装置和相机研究了薄膜传感器在小球冲击下的力致发光响应，建立了一种基于力致发光光强比的冲击检测方法。由于实验条件的限制和相关认识的欠缺，本研究还存在着一些不足之处和有待继续深入探讨的地方。具体有以下几点：

1) 本研究主要关注了 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 与 PDMS 混合的比例，未深入研究不同浓度的力致发光材料在 PDMS 中的响应特性。后续研究可以尝试改变力致发光材料在 PDMS 中的含量，以评估其对小球撞击下的力致发光响应变化，进一步优化薄膜传感器的设计和制作。

2) 本研究主要验证了小球冲击薄膜传感器的力致发光响应情况，对于其他形状或质地的物体对薄膜传感器的影响还需进一步研究。不同形状和质地的物体可能会对薄膜传感器产生不同的冲击效应，这对于提高传感器在多样化应用环境中的实用性极为重要。

3) 薄膜传感器在不同温度条件下的响应特性是一个值得探究的领域，尤其是在极端温度条件下，薄膜传感器的稳定性和可靠性可能会受到影响。未来的研究应考虑在不同温度环境下对薄膜传感器进行测试，以评估其在各种环境条件下的性能表现。

参考文献

- [1] Sun R, Chen G, He H, et al. The impact force identification of composite stiffened panels under material uncertainty[J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2014, 81: 38-47.
- [2] 轩福贞, 朱明亮, 王国彪. 结构疲劳百年研究的回顾与展望[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(6): 26-51.
- [3] 常人九, 薛晓春, 余永刚. 计及动态冲击挤进过程的埋头式弹药内弹道特性[J]. *兵工学报*, 2022, 43(9): 2388-2398.
- [4] 呼浩东, 马张静. 基于知识图谱的中外运动损伤生物力学研究热点可视化分析[J]. *体育科学进展*, 2023, 11(3): 500-512.
- [5] 李石馨, 孙博思. 汽车碰撞测试专利技术综述[J]. *科技资讯*, 2015(20): 247-249.
- [6] 王步康, 张金换, 马春生, 等. 汽车碰撞数据采集系统特性分析[J]. *仪器仪表学报*, 2005 (z1): 146-147.
- [7] 房芳, 郑辉, 汪玉, 等. 机械结构健康监测综述[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(16): 269-292.
- [8] Güemes A, Fernandez-Lopez A, Pozo A R, et al. Structural health monitoring for advanced composite structures: a review[J]. *Journal of Composites Science*, 2020, 4(1): 13.
- [9] Capineri L, Bulletti A. Ultrasonic guided-waves sensors and integrated structural health monitoring systems for impact detection and localization: A review[J]. *Sensors*, 2021, 21(9): 2929.
- [10] Rocha H, Semprinoschnig C, Nunes J P. Sensors for process and structural health monitoring of aerospace composites: A review[J]. *Engineering Structures*, 2021, 237: 112231.
- [11] 孙辉, 韩玉龙, 姚星星. 电阻应变式传感器原理及其应用举例[J]. *物理通报*, 2017, 5: 82-84.
- [12] 赵程, 蒋春燕, 张学伍, 等. 压电传感器测量原理及其敏感元件材料的研究进展[J]. *机械工程材料*, 2020, 44(6): 93-98.
- [13] Tuloup C, Harizi W, Aboura Z, et al. On the use of in-situ piezoelectric sensors for the manufacturing and structural health monitoring of polymer-matrix composites: A literature review[J]. *Composite Structures*, 2019, 215: 127-149.
- [14] 王兴君, 黄莺. 使用压电传感器对复合薄板冲击力位置的确定[J]. *电子测量技术*, 2013 (10): 78-81.
- [15] 白韶红. 加速度计的发展[J]. *自动化仪表*, 1999, 20(9): 1-5.
- [16] 甄真, 朱红. MEMS 加速度计的发展和应用的研 究[J]. *仪器与设备*, 2022, 10(1): 1-10.
- [17] Bednarska K, Sobotka P, Woliński T R, et al. Hybrid fiber optic sensor systems in structural health monitoring in aircraft structures[J]. *Materials*, 2020, 13(10): 2249.
- [18] Goossens S, Berghmans F, Khodaei Z S, et al. Practicalities of BVID detection on aerospace-grade CFRP materials with optical fibre sensors[J]. *Composite Structures*, 2021, 259: 113243.

- [19] Jha P, Chandra B P. Survey of the literature on mechanoluminescence from 1605 to 2013[J]. Luminescence, 2015, 8(29): 977-993.
- [20] Xie Y, Li Z. Triboluminescence: recalling interest and new aspects[J]. CHEM, 2018, 4(5): 943-971.
- [21] Yoshida A, Liu L, Tu D, et al. Mechanoluminescent testing as an efficient inspection technique for the management of infrastructures[J]. Journal of Disaster Research, 2017, 12: 506-514.
- [22] Peng D, Chen B, Wang F. Recent Advances in Doped Mechanoluminescent Phosphors [J]. Chempluschem, 2015, 80(8): 1209-1215.
- [23] Xu C N, Watanabe T, Akiyama M, et al. Artificial skin to sense mechanical stress by visible light emission [J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(9): 1236-1238.
- [24] YIN Shaofeng, ZHAO Ziming, LUAN Weiling, et al. Optical response of a quantum dot-epoxy resin composite: Effect of tensile strain[J]. RSC Advances, 2016, 6(22): 18126-18133.
- [25] SHIN H, TIMILSINA S, SOHN K, et al. Digital image correlation compatible mechanoluminescent skin for structural health monitoring[J]. Advanced Science, 2022, 9(11): 2105889.
- [26] FUJIO Y, XU Chaonan, SAKATA Y, et al. Invisible crack visualization and depth analysis by mechanoluminescence film[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 832: 154900.
- [27] Aich N, Appalla A, Saleh N B, et al. Triboluminescence for distributed damage assessment in cement-based materials [J]. Journal of Intelligent Material Systems & Structures, 2013, 24(14): 1714-1721.
- [28] Tu D, Xu C N, Yoshida A, et al. LiNbO₃:Pr³⁺: A Multipiezo Material with Simultaneous Piezoelectricity and Sensitive Piezoluminescence [J]. Advanced Materials, 2017, 29(22): 1606904.1-1606914.4.
- [29] Chandra B P, Bagri A K, Chandra V K. Mechanoluminescence response to the plastic flow of coloured alkali halide crystals [J]. Journal of Luminescence, 2010, 130(2): 309-314.
- [29] Chakravarty A, Phillipson T E. Triboluminescence and the potential of fracture surfaces [J]. Journal of Physics D, 2004, 37(15): 2175-2180.
- [30] 张喆, 陈刚, 陈旭. 基于力响应发光材料的结构损伤可视化检测技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2023, 59(16): 54-71.
- [31] Zhang Z, Lin H, Wei X, et al. Real-time and visible monitoring of structural damage using mechanoresponsive luminogen: recent progress and perspectives[J]. Welding in the World, 2022, 66(9): 1825-1845.
- [32] Chandra B P. Development of mechanoluminescence technique for impact studies[J]. Journal of Luminescence, 2011, 131(6): 1203-1210.
- [33] Toivola R, Lai P N, Yang J, et al. Mechanochromic fluorescence in epoxy as a detection method for barely visible impact damage in CFRP composites[J]. Composites Science and Technology,

2017, 139: 74-82.

- [34] Carani L B, Eze V O, Iwuagwu C, et al. Performance analysis of embedded mechanoluminescence-perovskite self-powered pressure sensor for structural health monitoring[J]. Journal of Composites Science, 2020, 4(4): 190.
- [35] Jha P, Khare A, Singh P, et al. Study of dynamical behaviour of prepared mechanoluminescence impact sensor based on ZnS: Mn and SrAl₂O₄: Eu, Yb phosphors[J]. Journal of Luminescence, 2023, 258: 119805.
- [36] 张国栋, 赵玉龙, 孙警, 等. ZnS: Cu 力致荧光薄膜在冲击压力作用下的光学响应规律及应用[J]. 高压物理学报, 2022, 36(20).
- [37] 常凯, 李倩倩, 李振. 力致发光现象及其应用研究进展[J]. 有机化学, 2020, 40(11): 3656-3671.
- [38] Yuan Y, Yuan W, Chen Y. Recent advances in mechanoluminescent polymers[J]. Science China Materials, 2016, 59(6): 507-520.
- [39] Zhou S, Cheng Y, Xu J, et al. Ratiometric Mechanoluminescence of Double-Activator Doped Phosphatic Phosphors: Color-Resolved Visualization of Stress-Sensing and Quantified Evaluation for Sensing Performance[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(52): 2208919.
- [40] Wu S, Xiong P, Jiang D, et al. Single Tb³⁺ ion doped ratiometric mechanoluminescence for tunable stress visualization[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 469: 143961.
- [41] Wu S, Xiong P, Qin K, et al. Ratiometric mechanoluminescence in single Pr³⁺-activated LiGa₅O₈[J]. Luminescence, 2023, 38(8): 1465-1476.
- [42] Wang F, Wang F, Wang X, et al. Mechanoluminescence enhancement of ZnS: Cu, Mn with piezotronic effect induced trap-depth reduction originated from PVDF ferroelectric film[J]. Nano Energy, 2019, 63: 103861.
- [43] Mukhina M V, Tresback J, Ondry J C, et al. Single-particle studies reveal a nanoscale mechanism for elastic, bright, and repeatable ZnS: Mn mechanoluminescence in a low-pressure regime[J]. ACS nano, 2021, 15(3): 4115-4133.
- [44] Chandra B P, Xu C N, Yamada H, et al. Luminescence induced by elastic deformation of ZnS: Mn nanoparticles[J]. Journal of Luminescence, 2010, 130(3): 442-450.
- [45] Jun-Cheng Zhanga, Xusheng Wangd, Gerard Marriott, et al. Trap-controlled mechanoluminescent materials[J]. Progress in Materials Science, 2019, 103: 678-742.
- [46] Yu J, Niu Q, Liu Y, et al. Principles, properties, and sensing applications of mechanoluminescence materials[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2023, 11(43): 14968-15000.
- [47] Wang X, Peng D, Huang B, et al. Piezophotonic effect based on mechanoluminescent materials for advanced flexible optoelectronic applications[J]. Nano Energy, 2019, 55: 389-400.
- [48] Jeong S M, Song S, Lee S K, et al. Color manipulation of mechanoluminescence from stress-activated composite films[J]. Adv. Mater, 2013, 25(43): 6194-6200.
- [49] S. Heimbs, S. Heller, P. Middendorf, F. Hahnel, J. Weibe, Low velocity impact on CFRP plates

- with compressive preload: test and modeling, *Int. J. Impact Eng.* 36(2009) 1182-1193.
- [50] C. Daraio, V.F. Nesterenko, S. Jin, Highly nonlinear contact interaction and dynamic energy dissipation by forest of carbon nanotubes, *Appl. Phys. Lett.* 85 (2004) 5724-5726.
- [51] J.M. Gomez-Ros, V. Correcher, J. Garcia-Guine, A. Delgado, Evolution of the trapped charge distribution due to trap emptying processes in a natural aluminosilicate, *Radiat. Prot. Dosim.* 119 (2006) 93-97.
- [52] V. Correcher, J.M. Gomez-Ros, J. Garcia-Guinea, M. Lis, L. Sanchez-Munoz, Calculation of the activation energy in a continuous trap distribution system of a charoite silicate using initial rise and TL glow curve fitting methods, *Radiat. Meas.* 43 (2008) 269-272.
- [53] Zhang J C, Long Y Z, Yan X, et al. Creating recoverable mechanoluminescence in piezoelectric calcium niobates through Pr^{3+} doping[J]. *Chemistry of Materials*, 2016, 28(11): 4052-4057.
- [54] Zhang J C, Long Y Z, Yan X, et al. Creating recoverable mechanoluminescence in piezoelectric calcium niobates through Pr^{3+} doping[J]. *Chemistry of Materials*, 2016, 28(11): 4052-4057.
- [55] Listyawan M A, Song H, Hwang G T, et al. Effect of ZnS: Cu powder content on the mechanoluminescence intensity of stretchable elastomer composite for wearable device applications[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 923: 166250.
- [56] Zhang Y, Gao G, Chan H L W, et al. Piezo-phototronic effect-induced dual-mode light and ultrasound emissions from ZnS: Mn/PMN-PT thin-film structures[J]. *Advanced Materials*, 2012, 24(13): 1729.
- [57] Fontenot R S, Hollerman W A, Aggarwal M D, et al. A versatile low-cost laboratory apparatus for testing triboluminescent materials[J]. *Measurement*, 2012, 45(3): 431-436.
- [58] 王 玥 , 杨伟峰 , 陈浩廷,等. 高性能 ZnS: Cu 基力致发光弹性体及其在视觉交互织物中的应用[J]. *发光学报*, 2022, 43(10): 7032-1609.
- [59] Singh A, Limaye M, Singh S, et al. A facile and fast approach for the synthesis of doped nanoparticles using a microfluidic device [J]. *Nanotechnology*, 2008, 19(24): 245613.
- [60] Tu D, Xu C N, Fujio Y, et al. Mechanism of mechanical quenching and mechanoluminescence in phosphorescent CaZnOS: Cu [J]. *Light: Science & Applications*, 2015, 4(11): e356-e356.
- [61] Halicka K, Meloni F, Czok M, et al. New Trends in Fluorescent Nanomaterials-Based Bio/Chemical Sensors for Neurohormones Detection—A Review[J]. *ACS omega*, 2022, 7(38): 33749-33768.
- [62] 王利强, 左爱斌, 彭月祥. 光波长测量仪器的分类, 原理及研究进展[J]. *科技导报*, 2005, 23(0506): 31-33.
- [63] Peng D, Wang Y, Zhu X, et al. Transmissive structural color filters using vertically coupled aluminum nanohole/nanodisk array with a triangular lattice. *Nanotechnology*. 2018, 29(39): 395202.
- [64] Chandra B P. Development of mechanoluminescence technique for impact studies[J]. *Journal of Luminescence*, 2011, 131(6): 1203-1210.

攻读硕士专业学位期间学术成果

- [1] Yanchang Zheng, **Kang Wang**, Jintao He, et al. Impact detection method based on the ratio of mechanoluminescence intensity[J]. Sensors and Actuators: A. Physical, 2024, 369: 115217. (已发表, 导师一作, 本人二作)
- [2] Yanchang Zheng, **Kang Wang**, Zhen Zhang, et al. Classes for Detecting Myopia Degree[P]. UNIV ANHUI POLYTECHNIC: ZA202205415, 2022-8-31. (已授权, 导师一作, 本人二作)

致谢

在我攻读硕士学位的这三年里，我经历了诸多挑战与成长，感慨万千。特别地，我想向那些在这段旅程中给予我无限支持和帮助的人们表示最深切的感谢。

首先，我必须表达对我的导师郑衍畅老师的深深敬意与感激。自从研究生第一年加入实验团队以来，郑老师不仅在学术上给予我无比精细的指导，还在生活中给予我许多关怀。郑老师在我的科研能力和工程实践技能提升过程中，发挥了至关重要的作用，使我能在学业方面全面而迅速地成长。我还要感谢课题组的每一位成员，特别是吴过、杨龙和何锦涛。在整个研究过程中，我们共同努力，相互学习，一起探索科研的奥秘。你们的细心指导、无私分享和亲切友好，使得团队的学术探讨充满活力，成为我宝贵的学习资源。

此外，我也要向课题组的老师鲁月林表达感激之情。鲁老师在课题研究中给予了我宝贵的建议和支持，为我提供了一个充满挑战和机遇的学习环境。我还要特别感谢我的女朋友王蓓蓓，感谢她在这个重要阶段给予我的耐心理解和情感支持。在遇到困难和挑战时，她总是我坚强的后盾，她的鼓励和关爱是我不懈努力的重要动力。

最后，我要感谢所有关心和支持我的人。无论是学术上的进步还是个人成长，都离不开你们的支持和鼓励。我将这份感激之情深藏心底，将其转化为不断前行的动力。

再次感谢所有帮助和支持过我的人。是你们让这段学习之旅变得如此精彩和难忘。

尚德敏学 唯实惟新

