

分类号: TH703

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220120118



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力
传感器的设计与实验研究

论 文 作 者 何锦涛

指 导 教 师 郑衍畅 副教授

学 科 (专 业) 机械工程

研 究 方 向 机械电子工程

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 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：何锦涛

日期：2025年5月20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或部分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。

保密 ☐，在 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：何锦涛 指导教师签名：郑竹明

日期：2025年5月20日

日期：2025年5月20日

分类号：TH703

学校代码：10363

密 级：公开

学 号：2220120118

基于力致发光光强比的冲击力传感器的设计与实验研究

DESIGN AND EXPERIMENTAL STUDY OF IMPACT FORCE SENSOR BASED ON MECHANOLUMINESCENT LIGHT INTENSITY RATIO

学生姓名：____何锦涛____

指导教师：____郑衍畅 副教授____

专 业：____机械工程____

研究方向：____机械电子工程____

论文答辩日期：2025 年 5 月 13 日

基于力致发光光强比的冲击力传感器的设计与实验研究

摘 要

冲击力传感器广泛应用于建筑结构监测、航空航天、工业设备监控以及人体运动学等领域,对结构性能优化与安全风险防控具有重要意义。传统冲击力传感器在实际应用中常因接触式测量方式导致适用范围受限,同时易受环境干扰影响其测量稳定性,从而降低了传感器使用的便捷性与测量的准确性。近年来,力致发光材料的出现为冲击力传感器的发展提供了一种崭新的思路。本文提出了一种基于力致发光光强比的冲击力传感器,该传感器可在冲击力作用下瞬时产生可视化的光学信号,由于光的传播不需要介质,因而可以实现非接触测量,同时通过建立两种波长光强比与冲击力的关系来增强抗环境干扰能力,提高测量稳定性。

本研究以基于力致发光光强比的冲击力传感器为研究对象,进行了设计和实验研究。具体研究内容如下:

(1)力致发光柔性薄膜的制备与冲击光谱响应。本研究以聚二甲基硅氧烷(PDMS)为基底,通过加入不同配比的 ZnS:Mn^{2+} 和 ZnS:Cu^{2+} 发光粉末,制得不同发光性能的柔性薄膜,并对发光粉末在 PDMS 基底中的分散状态进行了研究。为了精确测量柔性薄膜在不同冲击条件下的发光强度变化,搭建了落球实验装置,并系统地进行实验测试。光谱分析结果显示, ZnS:Mn^{2+} 和 ZnS:Cu^{2+} 柔性薄膜的光谱峰值强度与落球冲击力最大值之间存在明显的线性关系。基于上述结果,本研究

提出一种基于力致发光光强比的冲击力检测方法。相较传统方法，该方法具备更佳的环境适应性和抗干扰能力。

(2)基于力致发光光强比的冲击力传感器的设计。本部分介绍冲击力传感器的基本原理，并对其力学信号的采集、信号转换及数据处理过程进行详细阐述，分析传感器实现精确冲击力检测的关键技术环节。在此理论基础上，分别从光路系统设计、信号处理与显示模块设计以及机械结构设计三个角度深入探讨传感器的具体设计方案与实现过程。本研究通过理论与实践的结合，提出传感器设计方法，为后续的实验验证与性能优化提供理论支撑。

(3)基于力致发光光强比的冲击力传感器的实验与分析。通过制作传感器样机并搭建小球自由落体测试平台，对传感器进行标定与性能评估。根据传感器标定的实验数据，建立电压峰值比与冲击力之间的线性关系，为传感器的进一步校准与应用提供准确的数据支撑。在性能评估阶段，系统研究了传感器的响应范围、灵敏度与重复性等性能。实验结果显示，该传感器在 24.8 N~216.6 N 之间表现出良好的线性响应，灵敏度为 0.00178 N^{-1} 。在重复性试验中传感器表现出较低的测量波动，说明其具备良好的稳定性。此外，本研究还探讨不同测试距离与环境光照条件对传感器性能的影响，结果表明其抗干扰能力较强。最后通过在乒乓球训练场景中的击球测试实验，验证了该传感器在乒乓球选手的运动监测以及个性化训练评估方面具有推广潜力。

关键词：力致发光，光强比，冲击力传感器， ZnS:Mn^{2+} ， ZnS:Cu^{2+}

DESIGN AND EXPERIMENTAL STUDY OF IMPACT FORCE SENSOR BASED ON MECHANOLUMINESCENT LIGHT INTENSITY RATIO

ABSTRACT

Impact force sensors are widely used in structural health monitoring, aerospace engineering, industrial equipment supervision, and human kinematics. They play a significant role in optimizing structural performance and preventing safety risks. However, traditional impact force sensors often rely on contact-based measurement methods, which limit their applicability and make them vulnerable to environmental interference. These limitations reduce both the convenience and accuracy of such sensors in practical applications. In recent years, the emergence of mechanoluminescent (ML) materials has provided a novel approach for the development of impact force sensors.

This paper presents an impact force sensor based on the intensity ratio of mechanoluminescent emission. The sensor generates instantaneous visual optical signals under impact. Since light propagation requires no medium, the system enables non-contact measurement. Furthermore, by establishing a relationship between the intensity ratio of two emission wavelengths and the impact force, the sensor exhibits enhanced resistance

to environmental interference and improved measurement stability.

This study focuses on the design and experimental investigation of an impact force sensor based on mechanoluminescent intensity ratio. The research includes the following aspects:

(1) Preparation and spectral response analysis of flexible mechanoluminescent films. Using polydimethylsiloxane (PDMS) as the flexible substrate, various ratios of ZnS:Mn^{2+} and ZnS:Cu^{2+} phosphors were incorporated to prepare films with different luminescent properties. The dispersion state of the phosphors in the PDMS matrix was analyzed. To accurately measure the luminescence intensity under different impact conditions, a drop-ball experimental platform was constructed and a series of tests were conducted. Spectral analysis showed that the peak emission intensities of ZnS:Mn^{2+} and ZnS:Cu^{2+} exhibited a clear linear correlation with the maximum impact force. Based on these findings, a mechanoluminescent intensity-ratio-based impact detection method was proposed, offering improved environmental adaptability and interference resistance compared to conventional techniques.

(2) Design of the mechanoluminescence intensity-ratio-based impact force sensor. This section introduces the basic working principle of the sensor, and explains in detail the processes of mechanical signal acquisition, signal conversion, and data processing. Key technical points for accurate impact force detection are discussed. The design process is elaborated from

three perspectives: optical system design, signal processing and display module design, and mechanical structural design. By integrating theoretical analysis with practical implementation, a systematic design method for ML-based impact force sensors was proposed, providing theoretical support for subsequent experimental validation and performance optimization.

(3) Experiments and analyses of the mechanoluminescence intensity-ratio-based impact force sensor. A prototype sensor was fabricated, and a drop-ball impact testing system was established to perform controlled calibration and evaluation. Based on the experimental data, a linear relationship was established between the voltage peak ratio and the corresponding impact force, providing reliable data support for calibration and practical application. During performance testing, the response range, sensitivity, and repeatability of the sensor were systematically analyzed. Results indicated a good linear response within the range of 24.8 N to 216.6 N, with a sensitivity of 0.00178 N^{-1} . Repeated tests showed low measurement fluctuation, indicating strong stability. Furthermore, the effects of varying measurement distances and ambient lighting conditions were investigated, demonstrating the sensor's strong resistance to environmental interference. Finally, impact testing was conducted in a table tennis training scenario to evaluate the sensor's practical applicability. The results verified the feasibility of using the ML-based sensor to assess strike

forces in table tennis, demonstrating its potential for athlete motion monitoring and personalized training evaluation.

KEY WORDS: Mechanoluminescence, Light intensity ratio, Impact force sensor, ZnS:Mn^{2+} , ZnS:Cu^{2+}

目录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 传统冲击力传感器.....	3
1.2.1 压电式传感器.....	3
1.2.2 应变片式传感器.....	4
1.2.3 光纤式传感器.....	4
1.2.4 微机电式传感器.....	4
1.3 力致发光概述.....	5
1.3.1 力致发光的发展.....	5
1.3.2 力致发光的分类.....	6
1.3.3 力致发光机理分析.....	7
1.3.4 力致发光理论分析.....	8
1.4 基于力致发光的冲击力传感器研究现状.....	11
1.5 研究意义与研究内容.....	14
1.5.1 研究意义.....	14
1.5.2 研究内容.....	15
第 2 章 力致发光薄膜的制备与冲击光谱响应.....	17
2.1 力致发光柔性薄膜的制备.....	17
2.2 冲击光谱响应测量实验平台搭建.....	19
2.3 柔性薄膜冲击光谱响应.....	20
2.4 基于力致发光光强比的冲击力检测方法.....	23
2.5 光纤探头测距对冲击力检测的影响.....	24
2.6 本章小结.....	25
第 3 章 基于力致发光光强比的冲击力传感器的设计.....	27
3.1 传感器工作原理.....	27

3.2 光路系统设计.....	29
3.2.1 分光镜.....	29
3.2.2 滤光片.....	30
3.2.3 光电探测器.....	31
3.3 信号处理与显示系统设计.....	33
3.3.1 信号处理电路设计.....	33
3.3.2 显示系统设计.....	36
3.4 机械结构设计.....	39
3.5 本章小结.....	42
第 4 章 基于力致发光光强比的冲击力传感器的实验与分析.....	44
4.1 传感器测试系统搭建.....	44
4.2 传感器标定实验.....	45
4.3 传感器性能测试.....	48
4.3.1 响应范围测试.....	48
4.3.2 灵敏度测试.....	49
4.3.3 重复性测试.....	50
4.3.4 测量误差测试.....	51
4.3.5 抗环境干扰测试.....	52
4.4 应用展示.....	53
4.5 本章小结.....	55
第 5 章 总结与展望.....	56
5.1 论文总结.....	56
5.2 研究展望.....	57
参考文献.....	59
攻读硕士学位期间学术成果.....	68

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

冲击力传感器在诸多领域中均发挥着关键作用，尤其是在建筑结构监测、航天航空、工业设备运行监测以及运动医学等方面^[1]。这种传感器通过精准测量物体或结构在瞬时外力作用下的响应，不仅有助于提升安全性，还能优化设计，提高设备与系统的整体性能。

在建筑工程领域，冲击力传感器被广泛应用于桥梁、大坝及高层建筑等基础设施的安全性评估^[2,3]。图 1-1 展示了工程师通过实时监测结构所受冲击力，能够及时判断建筑物是否存在损伤风险，从而采取必要的加固或修复措施，确保其长期稳定运行。冲击力传感器在结构健康监测系统中的应用，为重大基础设施的安全维护提供了科学依据。



图 1-1 冲击力传感器在工程结构诊断和损伤监测中的应用 (a) 桥梁结构诊断^[2] (b) 公路连接段结构诊断^[3]

在航天航空领域，飞机和航天器在飞行过程中可能会受到各种严重的机械冲击，其结构健康诊断和表面应力监测对飞行安全具有重要意义^[4,5]。图 1-2(a)展示

了一种在飞机表面涂上传感器涂层的测应力场的方案。该传感器涂料对风洞中施加的压力产生敏感的光谱响应,从而为大面积和实时传感提供了一种简单而有效的方法。航天器在发射、入轨及返回地球过程中,会经历强烈的振动和冲击。为了确保设备及人员的安全,工程师通常在航天器关键部位安装冲击传感器,如图 1-2(b)所示,以监测瞬时冲击载荷,并基于测量数据改进航天器的结构设计。

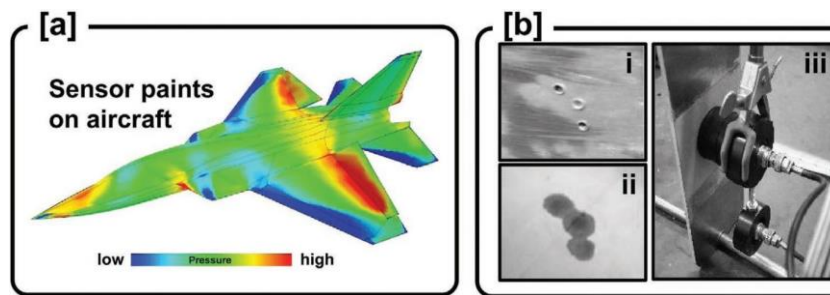


图 1-2 冲击力传感器在飞机和航天器中的应用 (a) 风洞内模型飞机的压力分布^[6] (b) 航天器的健康监测传感器套件^[7]

在工业设备监测方面,冲击力传感器被用于识别工业设备在运行过程中所遭受的突发冲击,以便提前发现可能的故障征兆^[8,9]。从图 1-3(a)中可以看出液氢存储缸外表面附有三个冲击力检测传感器,附着在外表面的传感器可以可视化高压容器的内部裂纹,这提供了一种有效的无损评价技术,如图 1-3(b)所示。这种方法通过对异常振动和冲击的实时监控,企业可以在设备发生严重损坏之前进行维护,从而减少非计划停机时间,降低维修成本,并提高生产效率。

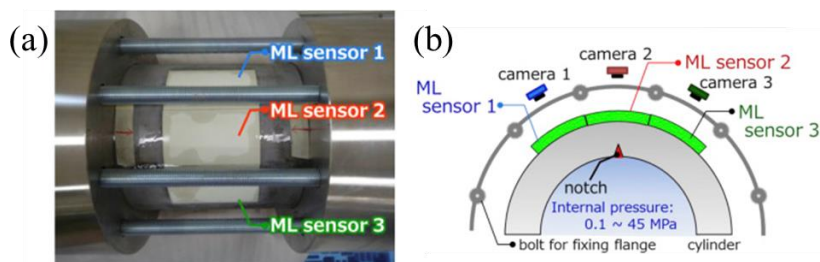


图 1-3 液氢存储缸的结构诊断^[10] (a) 存储缸外表面的三个力致发光传感器 (b) 力致发光图像监测系统示意图

在运动医学与人体工程学领域,冲击力传感器对运动损伤预防和康复训练具有重要作用^[11,12]。图 1-4(a)展示了一种可穿戴设备,可以很容易地安装在重要的关节上(如肘部、肩膀、脊柱和膝盖)。对于患者或老年人,当关节受到较大冲击力时,该设备能发出警告,这种警告可以让佩戴者有效地避免外力对关节可能造成的损伤。图 1-4(b)展示了冲击力传感器还可用于康复治疗,对于需要实时监

测心脏健康状况的群体，可以通过该传感器测量心跳的频率，使得患者根据心跳调整自身情况。



图 1-4 冲击力传感器在柔性可穿戴设备中的应用^[13] (a) 冲击强度预警 (b) 心跳检测

冲击力传感器在多个行业的应用不仅提高了安全性，还推动了相关领域的技术进步。随着传感技术和数据分析能力的不断发展，冲击力传感器的应用范围将进一步拓展，为各行各业带来更高效、更智能的安全监测解决方案。

1.2 传统冲击力传感器

1.2.1 压电式传感器

压电式传感器是一种广泛应用于冲击检测的设备，工作原理基于压电效应实现力、电信号相互转换。当材料受到外力作用时，压电材料会产生电荷，其量与施加的力成正比。通过检测电荷变化，压电传感器可以实时监测冲击力和振动。在冲击力检测领域，压电传感器可以精确捕捉瞬时冲击事件，非常适合用于高速碰撞测试、机械振动监测等场合，它们的高频响应特性和良好的动态性能，使其在需要监测快速变化的冲击力时表现出色^[14-16]。

压电式传感器的主要优点在于其高灵敏度和宽频带范围，能够精确测量从微小至极大的冲击力。它们结构简单、坚固耐用，适用于恶劣的环境。然而这类传感器在长时间的静态力检测中表现较差，同时容易受到温度变化的影响，因此需要进行温度补偿或校准。

1.2.2 应变片式传感器

应变片式传感器是一种基于电阻应变效应工作的传感器。当材料在外力作用下产生形变时，粘贴在材料表面的应变片会随材料一起变形，从而引起自身电阻的变化。这种电阻变化通过测量设备转换为对应的应力数据，最终实现对力的测量^[17,18]。

在冲击力检测领域，应变片传感器能够精确捕捉材料在受力时的应变分布，非常适用于结构强度评估和局部应力监测。其主要优势在于高灵敏度和对微小形变的精确检测，使其在汽车碰撞测试、工程结构分析以及运动器材设计等领域发挥着重要作用。然而应变片式传感器也存在一定局限性，如对温度变化敏感，使用时需额外配备温度补偿措施。此外，由于应变片输出信号为微弱电信号，易受电磁干扰、静电干扰以及现场振动干扰，需采取专门的屏蔽措施以降低干扰对测量精度的影响，增加了系统的复杂性。

1.2.3 光纤式传感器

光纤式传感器通过检测光的反射或折射变化来监测材料所受的冲击力和应力分布。其工作原理基于光波在光纤中的传播特性，当光纤受力变形时，其内部光信号会发生变化，传感器可以通过监测这些变化来实现对冲击力的精确检测^[19,20]。

光纤传感器在抗干扰能力、环境适应性、安全性、响应速度及集成能力等方面具有突出优势，因此特别适合在高温、高压、高腐蚀、强辐射等极端环境下的冲击检测，如桥梁、大坝及航空航天等领域。光纤式传感器能够实现长距离传感，可以在多个测量点上进行同步监测，适合大范围应力分布的检测。然而，光纤式传感器的安装和维护较为复杂，且成本相对较高，对测量系统的光学组件有较高要求。

1.2.4 微机电式传感器

微机电式(MEMS)传感器是一种基于微机电技术的小型传感设备，能够监测物体的加速度变化，并推算出冲击力^[21]。其工作原理是利用微型悬臂梁等机械结构对冲击力的响应进行检测。当冲击力或加速度作用于 MEMS 传感器时，传感

器内的悬臂梁发生形变，从而导致电容、电阻等物理特性发生变化，这一变化可用来推算出冲击力的大小^[22]。

在冲击力检测领域，MEMS 传感器以其小型化、轻便性和低功耗等特点，广泛应用于便携式设备、汽车碰撞测试和消费电子产品中。它们检测范围广，同时具有较高的响应速度。其优势还在于易于集成到复杂系统中，实现多点和多轴的加速度监测。然而 MEMS 传感器的缺点包括灵敏度较低，尤其在检测微弱冲击力时表现不如压电式传感器。它们对温度和噪声的敏感度较高，因此需要进行补偿或过滤。

1.3 力致发光概述

1.3.1 力致发光的发展

力致发光(Mechanoluminescence, ML)是指当材料在受到外力作用（冲击、摩擦、拉伸、压缩等）时，会产生发光现象^[23]。这一现象最早可以追溯到 1605 年，Francis Bacon^[24]注意到硬糖被刀划过的表面会发出一束闪亮的光。在 1684 年，Waller^[25]将白砂糖、盐和面包等物质放入研钵中进行研磨，会在研钵两侧看到明显的强光产生。1792 年，Wedgwood^[26]报道了包括石英、红钻石和金刚石在内的多种物质的力致发光现象。可以看出当时的力致发光研究多集中于材料种类的拓展和现象的定性描述。1922 年，Longchambon^[27]成功记录了糖块和硫酸铜的力致发光光谱，提出了介电击穿机制的假设，但限于当时技术，研究进展缓慢。直到 1950 年，随着光电倍增管技术的逐渐成熟，才使力致发光的定量研究成为可能，极大推动了相关研究的发展。这时已发现很多具有力致发光表现的材料，然而这种发光大多与材料的不可逆断裂相关^[28]，限制了实际应用价值。

1999 年，Xu 等人的研究具有里程碑式意义。他们将 $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}$ ^[29]、 $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7:\text{Ce}^{3+}$ ^[30]以及 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ ^[31]粉末与弹性基体复合，获得了非破坏性、可重复发光的弹性力致发光材料。从实验中发现力致发光强度与外力线性相关，且不伴随颗粒破裂或表面损伤。

进入 21 世纪，力致发光材料研究迅速扩展，涌现出大量性能优越的新材料，包括金属硫化物^[33-35]、硅酸盐^[36-41]、铝酸盐^[42-44]及钛酸盐^[45,46]等。其中，ZnS 基

力致发光材料由于高亮度、可重复性和掺杂元素丰富，成为目前研究最多的一类力致发光材料。例如 ZnS:Mn^{2+} （橙色发光）^[31,47]和 ZnS:Cu^{2+} （绿色发光）^[48,49]等均表现出优异的性能。这些新型材料极大地丰富了力致发光材料的应用前景，在生物医学^[50-52]、能源照明^[53,54]、可穿戴设备^[55,56]、压力传感^[57-59]和加密防伪^[60-62]等方面都展现了独特的优势。

1.3.2 力致发光的分类

根据力致发光材料在发光时的形变类型，可以分为破坏性发光、塑性变形发光和弹性变形发光这三类，如图 1-5 所示。

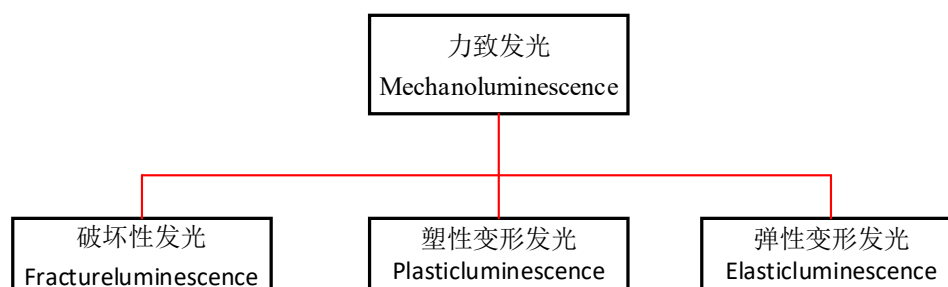


图 1-5 力致发光的分类

(1)破坏性发光

破坏性发光是在材料发生断裂或破裂时产生的发光现象^[63]。当施加的应力超过材料的断裂强度时，材料的晶体结构受到破坏，导致断裂面上电荷的瞬时分离。断裂过程中，材料内部化学键的断裂会释放出大量的电荷，这些电荷通过复合释放能量，最终以光子的形式出现。破坏性发光常用于研究脆性材料的失效机制和断裂行为。例如，在工程结构健康监测中，破坏性发光可以作为早期预警信号，帮助识别和分析材料的断裂特性。它在飞机、桥梁等高应力结构中的故障检测和风险评估方面具有重要应用。

(2)塑性变形发光

塑性变形发光是在材料进入塑性变形阶段时产生的发光现象^[64]。当施加的应力超过材料的屈服点但未达到断裂点时，材料内部会出现位错或裂纹的形成与扩展。这些缺陷区域的电荷分离和复合会引起局部能量释放，从而形成光子。塑性变形发光主要出现在材料内部永久性结构变化的过程中。塑性变形发光可以用于检测材料进入塑性阶段后的应力状态，帮助评估材料的结构完整性和耐久性。例如，在高温或高应力环境下，塑性变形发光可以作为识别材料失效前兆的有效

手段。

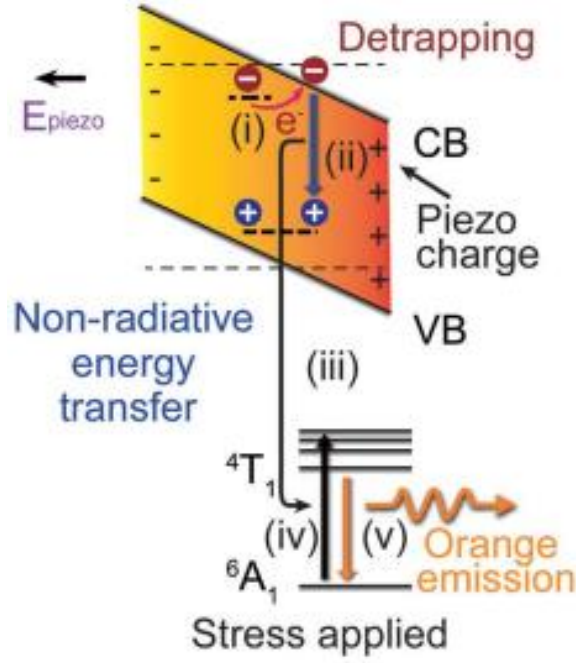
(3)弹性变形发光

弹性变形发光是在材料处于弹性变形范围内时产生的发光现象^[65]。在此阶段,材料的变形是可逆的,晶体结构中发生的变化会在应力释放后恢复。材料在轻微变形下产生的电荷分离和复合会释放光子,但由于变形量小,通常发光强度较低。弹性变形发光由于具有可逆性,适合用于应力监测和实时状态检测。它可用于设计循环加载下的力学传感器,广泛应用于应变计、振动检测等领域,特别适用于高灵敏度的应力监测。

1.3.3 力致发光机理分析

力致发光材料的发光机理主要依赖于机械应力下的压电效应诱发的电子运动和与掺杂离子的能级跃迁^[66,67]。如图 1-6 所示,这是以掺杂锰的硫化锌(ZnS:Mn^{2+})为例的详细发光机理过程。 ZnS 材料属于典型的铅锌矿晶体结构,在外力作用下,其晶体内部电荷中心会发生位移与形变,产生压电极化现象并诱导压电场的形成^[68]。 Mn^{2+} 可以导致 ZnS 晶格内形成电子缺陷态(上态)和空穴缺陷态(下态),分别用于捕获电子与空穴。当施加机械应力后, ZnS 材料中的导带与价带因压电电荷所形成的内部压电势而发生能带倾斜,使电子缺陷态中原本被捕获的电子更容易被激发释放至导带中。随后,这些释放的电子与空穴缺陷态发生非辐射复合,并将释放的能量(约 2.8eV)转移给掺杂的 Mn^{2+} 离子,并激发其外壳电子从 ${}^6\text{A}_1({}^6\text{S})$ 跃迁到 ${}^4\text{T}_1({}^4\text{G})$ 。当激发态的 Mn^{2+} 离子电子返回到 ${}^6\text{A}_1({}^6\text{S})$ 时,光子被释放出来,呈现黄色可见光,这种材料的力致发光主峰通常位于约 580 nm 的波长范围内。

ZnS:Cu^{2+} 与 ZnS:Mn^{2+} 的力致发光机制具有相似的基本过程。当 ZnS:Cu^{2+} 材料受到机械刺激时,晶格内部的电荷中心产生相对位移,从而诱导压电极化效应并形成压电场。在此压电场作用下, ZnS 材料导带与价带的能级会发生倾斜,使缺陷态中捕获的电子更容易被激发释放到导带中。这些释放的电子与空穴通过非辐射复合方式,将能量传递给 Cu^{2+} 离子。最后, Cu^{2+} 离子从激发态回到基态时,会以可见光(约 2.8eV)形式辐射能量,表现为可见的力致发光现象,其发射峰值位于 520 nm 波长范围内。

图 1-6 ZnS:Mn²⁺的力致发光机理^[69]

1.3.4 力致发光理论分析

(1)冲击力引起的压电化

当质量为 m 的小球从高度 h 自由落体并撞击柔性薄膜时，其撞击柔性薄膜的初始速度可由表达式 $V_0 = \sqrt{2gh}$ 计算，其中 g 是重力加速度。撞击发生后，小球的速度会随着时间逐渐减小。假设薄膜的压缩量 x 在作用时间 τ_r 内达到最大压缩量，即从小球接触薄膜开始，到薄膜达到最大压缩量的时间，则该过程可以通过力学和压电效应进行分析，压缩量 x 的表达式为：

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

其中 x_0 是薄膜最大压缩量， $\zeta = 1/\tau_r$ 。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(1-1)可以写成：

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

当质量为 m 、半径为 r 、初始速度为 v_0 的球体撞击柔性薄膜时，可利用赫兹接触模型来估算在柔性薄膜压缩距离为 x 时所需的力 $f(x)$ 。依据赫兹接触理论^[70,71]，当压缩距离达到 x 时，其对应的作用力 $f(x)$ 表达式为：

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

其中 v 为柔性薄膜的泊松比， Y 为柔性薄膜的杨氏模量。球体与柔性薄膜之间的接触面积 A_c 可表示为：

$$A_c = \pi r x \quad (1-4)$$

依据公式(1-3)和(1-4)，在压缩距离 x 处的应力或压强 P 可表示为：

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

依据公式(1-2)和(1-5)，任意时刻 t 的压强 P 可推导为：

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

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

其中 $P_0 = \frac{4Y\sqrt{v_0}}{3\pi(1-v^2)\sqrt{r}\sqrt{\zeta}}$ ，若 d_0 为激发离子周围局部区域的压电常数，则依据公式(1-7)，压电常数 Q 可表示为：

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

若 B 为压电场 ε 与压电电荷 Q 之间的相关因子，则压电场 ε 可表示为：

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

根据公式(1-9)，压电场的变化率可以表示为：

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

(2) 压电场对电荷载流子脱陷的影响

在晶体结构中，激活离子周围的陷阱分布呈现指数形式，能量为 E_i 的陷阱数量 $N(E_i)$ 可依据玻尔兹曼统计公式^[72,73]来表示：

$$N(E_i) = ZN_0 \exp(-ZE_i) \quad (1-11)$$

其中 N_0 为晶体活化体积内的陷阱总数，分布系数为 $Z = \frac{1}{kT}$ ，其中 k 为玻尔兹曼常数， T 是晶体的绝对温度。若陷阱深度低于阈值能量 E_{th} ，而其电子可因热激发而被释放，因此，仅能量介于 E_{th} 至 E 之间的陷阱可被激活。依据公式(1-11)，可计推导出该能量区间内可被释放的陷阱总数 N_t 为：

$$N_t = \int_{E_{th}}^E Z N_0 \exp(-ZE) dE = N_0 [\exp(-ZE_{th}) - \exp(-ZE)] \quad (1-12)$$

当柔性薄膜受到冲击应力时，会形成压电场 ε 。若设 α 为每单位电场作用下陷阱深度的衰减系数，则在 ε 压电场下，陷阱深度降低 $\alpha\varepsilon$ 。陷阱深度的降低会促进电子解陷，从而减少填充陷阱的总数。假设 n_d 为陷阱深度变化 $\alpha\varepsilon$ 后设释放的陷阱数量，则依据公式(1-12)，可得：

$$n_d = N_0 [\exp(-Z\alpha\varepsilon_{th}) - \exp(-Z\alpha\varepsilon)] \quad (1-13)$$

其中 ε_{th} 为柔性薄膜发生力致发光所需的最小压电场强度。在弹性变形范围内， $Z\alpha\varepsilon_{th}$ 及 $Z\alpha\varepsilon$ 均较小，因此公式(1-13)可以简化为：

$$n_d = N_0 [Z\alpha\varepsilon - Z\alpha\varepsilon_{th}] \quad (1-14)$$

将公式(1-14)微分后得：

$$dn_d = N_0 Z \alpha d\varepsilon \quad (1-15)$$

依据公式(1-4)和柔性薄膜的厚度 H ，可得力致发光的有效体积 V_e 表达式为：

$$V_e = rxH \quad (1-16)$$

设 N_l 为激活离子的浓度， Ω 表示激活体积（即压电常数较高的区域体积）内的激活离子数，而 N_t 为填充陷阱浓度，则可得可解陷的陷阱总数 N_0 为：

$$N_0 = \pi r H \Omega N_l N_t x_0 [1 - \exp(-\xi t)] \quad (1-17)$$

将公式(1-10)和(1-17)带入公式(1-15)中，可推导出导带中电子的生成速率 g 为：

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

(3)冲击力引起的力致发光

若 τ 表示导带中电子的寿命，则导带内载流子密度的变化 Δn 可表示为：

$$\Delta n = g\tau = \frac{\pi r H \Omega N_l N_t x_0 Z \alpha \varepsilon_0 \xi \tau [1 - \exp(-\xi t)]^{1/2} \exp(-\xi t)}{2} \quad (1-19)$$

依据公式(1-19)，可得晶体内部流动电流 j 为：

$$j = g\tau q v_d \quad (1-20)$$

其中， q 为电子电荷， v_d 为漂移速度。若晶体中电子的迁移率为 μ ，则漂移速度满足 $v_d = \mu F$ ，因此公式(1-20)可改写为：

$$j = g\tau q \mu F \quad (1-21)$$

设 σ 为激发态 Mn^{2+} 或 Cu^{2+} 离子能态的捕获截面，而 n_e 为激发态 Mn^{2+} 或 Cu^{2+}

离子的密度，这些激发态可捕获导带中自由电子，则电子被激发态 Mn^{2+} 或 Cu^{2+} 离子能态捕获的速率 R 可表示为：

$$R = \sigma n_e g \tau \mu \varepsilon \quad (1-22)$$

若 η 为激发态 Mn^{2+} 或 Cu^{2+} 离子的发光衰减效率，则力致发光的强度 I 表达式为：

$$I = \eta R = \eta \sigma n_e g \tau \mu \varepsilon \quad (1-23)$$

晶体变形产生的压电场强度 ε 可由以下公式表示：

$$\varepsilon = BQ = Bd p_c A = BdF \quad (1-24)$$

其中， B 为比例因子， 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 为作用在晶体上的力。将公式(1-23)代入公式(1-24)中得到：

$$I = \eta \sigma n_e g \tau \mu BdF \quad (1-25)$$

由公式(1-25)可知，在柔性薄膜参数不变的情况下，发光强度 I 与薄膜所受冲击力 F 呈线性关系。通过测量柔性薄膜的发光强度，可进一步推算柔性薄膜所受冲击力大小。

1.4 基于力致发光的冲击力传感器研究现状

近年来，力致发光材料在冲击力传感器中的创新应用受到了广泛关注。作为一种新型的力学传感技术，基于力致发光的冲击力传感器凭借其实时响应和良好的环境适应性，显示出极大的优势。力致发光材料通过机械刺激直接产生光信号，当受到冲击或压力时会立即发光，从而实现了对力的即时检测^[74,75]。这种实时响应特性使得基于力致发光的冲击力传感器可以迅速、直接地反馈冲击事件的发生，无需额外的信号延迟或数据处理时间。

CARANI 等^[76]设计了一种三明治结构的冲击力传感器，如图 1-7(a)所示。该传感器结合 $\text{ZnS}:\text{Cu}$ 与钙钛矿材料，实现了冲击力向瞬时光信号的转化，并具备自供电特性。在实验过程中，该传感器被嵌入复合材料叠层结构中，并在各种冲击力条件下的信号响应进行了测试，如图 1-7(b)所示。实验结果表明，该传感器对冲击锤测试的响应显示了其在冲击检测领域的有效性与可行性。当施加的冲击压力范围为 100 kPa 至 200 kPa，传感器能够在各个冲击条件下产生稳定且明确的信号，如图 1-7(c)所示，从而验证了其在复合结构健康监测中的应用潜力。此

外, 在冲击压力范围内, 传感器信号与冲击压力之间表现出高度相关性, 如图 1-7(d)所示。

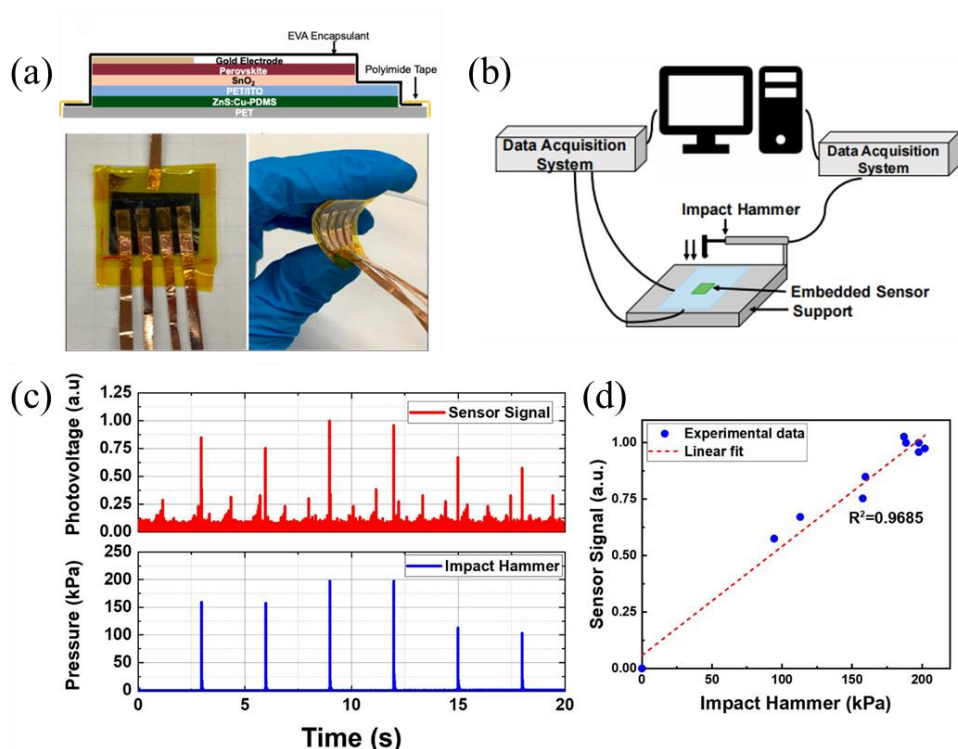


图 1-7 基于力致发光的冲击力检测^[76]

SHOHAG 等^[77]报道了一种高效、低成本的制造技术, 通过将力致发光材料与钙钛矿的集成, 构建了一种紧凑、灵敏且柔性的压力传感器, 如图 1-8 所示。该力致发光钙钛矿柔性传感器在检测位置不需要任何电源, 如图 1-9(a)所示。传感器经过反复施加压力, 生成了与每个压力周期对应的明显电流信号, 电流强度随着施加压力的增大而线性增加。该传感器能够检测到低至 11 kPa 的压力, 具有较大的感应范围和 0.095 kPa^{-1} 的灵敏度, 如图 1-9(b)所示。

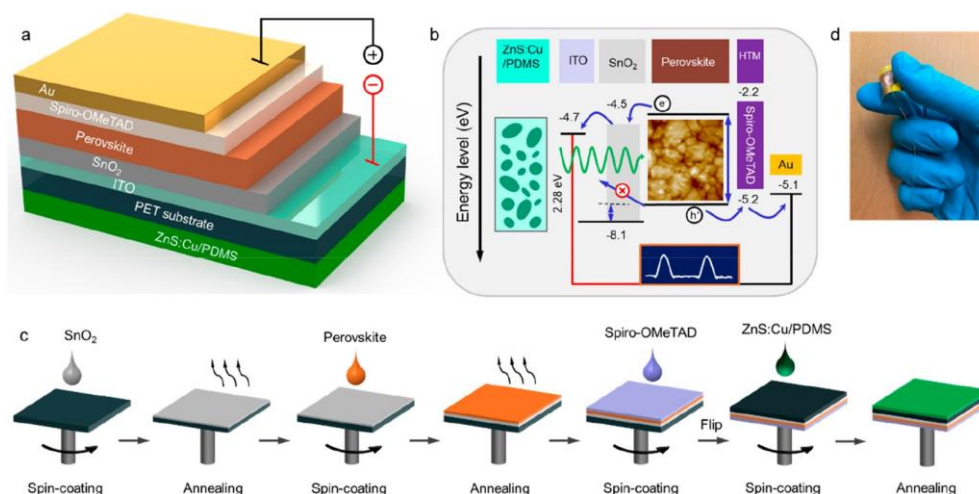


图 1-8 基于力致发光的柔性压力传感器的制作流程^[77]

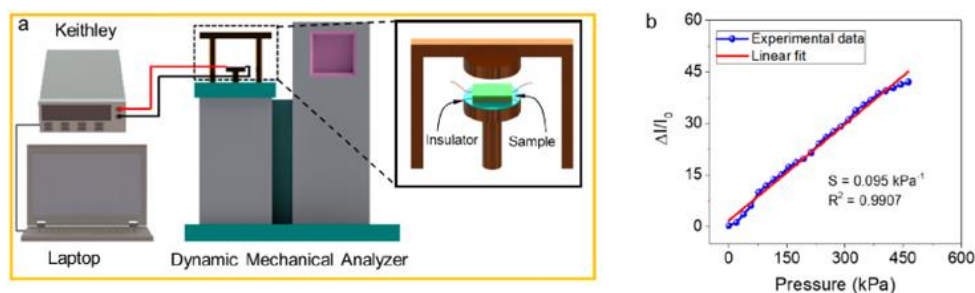


图 1-9 基于力致发光的柔性压力传感器的测试装置及实验结果^[77]

张国栋等^[78]通过将 ZnS:Cu 与水玻璃黏结剂混合，并将其混合后的材料涂在实验目标上，制备了一种薄膜传感器，如图 1-10(a)所示。此外，研究团队搭建了轻气炮冲击实验平台，其装置示意图如图 1-10(c)所示。实验过程中，使用光电探测器记录冲击时产生的光信号，并对冲击压力与输出电压的关系进行了分析，如图 1-10(b)所示。利用轻气炮冲击法对 ZnS:Cu 力致发光薄膜的光学响应性能进行了研究，并获得了其动态标定曲线，为该类薄膜在爆炸与冲击环境中的应用提供了重要的实验支撑。

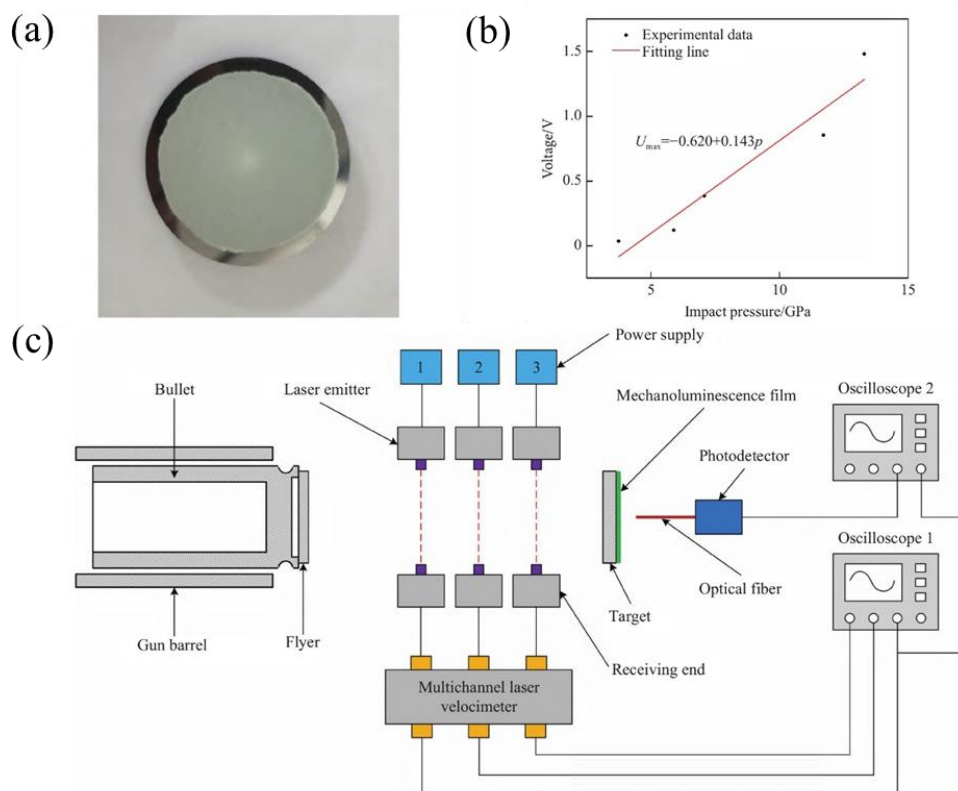


图 1-10 基于力致发光的撞击实验^[78]

SHARMA 等^[79]通过将 ZnS:Mn:Eu 和压电聚偏二氟乙烯(PVDF)混合制备了一种复合材料，在处理 ZnS:Mn:Eu 与 PVDF 的混合物时，调整 PVDF 的质量比

范围为 5%至 50%。然后将聚合物复合材料浇铸成薄膜，并覆盖上防水透明聚二甲基硅氧烷(PDMS)以进行保护聚合物薄膜，如图 1-11(a)所示。对于力致发光测量装置，采用了一种定制的杯状阳极氧化铝组件，如图 1-11(b)所示。该组件包含制造的 ML 薄膜，作为 ML 传感器使用。研究结果表明，当 PVDF 质量比为 15% 时，力致发光发射强度比其他质量比更高，其发光强度与冲击力的关系如图 1-11(c)所示。该研究为开发节能型 ML 传感器奠定了基础，未来可应用于智能光学传感器、实时压力映射系统及信息加密技术等应用领域。

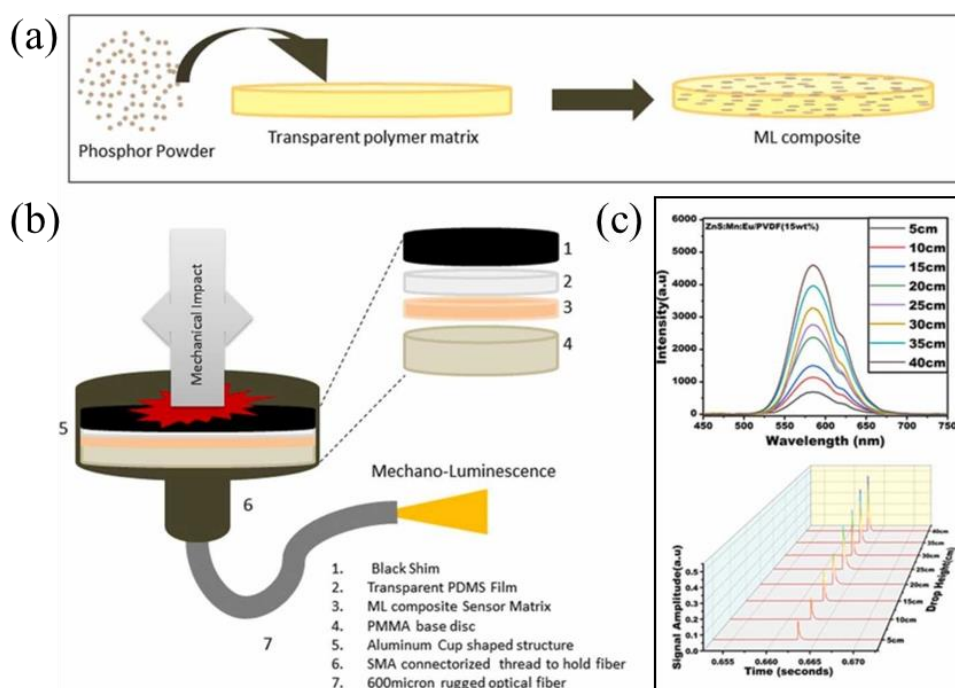


图 1-11 基于力致发光的冲击力检测装置^[79]

1.5 研究意义与研究内容

1.5.1 研究意义

力致发光材料的发现为冲击力传感器技术的发展提供了一种崭新的思路。传统冲击力传感器在实际应用中常因接触式测量方式导致适用范围受限，同时易受环境干扰影响其测量稳定性，从而降低了传感器使用的便捷性与测量的准确性。相比之下，基于力致发光的冲击力传感器在受到冲击力时能够即时产生可视化光学信号，由于光的传播不需要介质，因而可以实现非接触测量。

尽管力致发光材料在冲击检测领域的潜力得到广泛认可，但传统研究中通常

采用单一波长材料进行测量,依赖于绝对发光强度,极易受到外界干扰因素(如环境光、材料老化及传感器测量位置变化)的影响,导致测量稳定性降低^[80-82]。为克服这一不足,本文提出一种基于两种力致发光波长光强比的冲击力传感器,结合现代电子技术,通过光电探测器将力致发光光信号转换为电信号,利用单片机实时采集和处理两种不同波长发光强度的数值并计算二者的强度比值,进一步将测量结果以直观的数值形式呈现在显示装置上,使用户能够快速、准确地获得冲击力信息。这种基于相对光强比值的方法显著降低了环境因素带来的影响,提高了传感器的稳定性与测量结果的准确性。这展示了力致发光材料结合现代电子技术进行冲击力测量的可行性和优势,为力致发光材料在冲击力传感器中的实际应用提供了宝贵的参考。

1.5.2 研究内容

本研究设计并制作了基于力致发光光强比的冲击力传感器,展示了力致发光材料结合现代电子技术进行冲击力测量的可行性与优势,推动了基于力致发光原理的传感器在冲击力检测中的应用。具体研究内容如下:

(1)力致发光柔性薄膜的制备与冲击光谱响应。本研究通过将不同配比的 ZnS:Mn^{2+} 和 ZnS:Cu^{2+} 发光粉末与聚二甲基硅氧烷(PDMS)混合,制得不同发光特性的柔性薄膜,并对发光粉末在 PDMS 基底中的分散状态进行深入分析。为了精确测量柔性薄膜在不同冲击条件下的发光强度变化,搭建了一套落球实验装置,并系统地进行实验测试。基于实验结果提出一种基于力致发光光强比的冲击力检测方法。

(2)基于力致发光光强比的冲击力传感器的设计。本部分介绍冲击力传感器的基本原理,并对其力学信号的采集、信号转换及数据处理过程进行详细阐述,分析传感器实现精确冲击力检测的关键技术环节。在此理论基础上,分别从光路系统设计、信号处理与显示模块设计以及机械结构设计三个角度深入探讨传感器的具体设计方案与实现过程。

(3)基于力致发光光强比的冲击力传感器的实验与分析。在传感器设计的基础上,本研究制作出基于力致发光光强比的冲击力传感器样机,并开展一系列实验并验证其性能。通过搭建小球自由落体实验装置,实现对传感器的可控冲击测

试，并详细研究电压峰值比与冲击力的相关性。根据获取的实验数据，建立电压峰值比与冲击力之间的线性拟合模型，为传感器的进一步校准与应用提供准确的数据支撑。在性能评估阶段，系统研究传感器的响应范围、灵敏度、重复性和环境抗干扰能力。

第 2 章 力致发光薄膜的制备与冲击光谱响应

本章先阐述了用 PDMS 和两种不同的力致发光粉末制备力致发光柔性薄膜的工艺过程，并搭建了用于测量冲击光谱响应的实验平台。通过测量柔性薄膜的冲击光谱响应，提出了一种基于力致发光光强比的冲击力检测方法，并研究了光纤探头不同测量距离对冲击力检测的影响。

2.1 力致发光柔性薄膜的制备

制备力致发光柔性薄膜的实验试剂及设备名称如表 2-1 所示。

表 2-1 实验试剂和设备

实验试剂及设备名称	型号	生产单位
聚二甲基硅氧烷(PDMS)	Sylgard 184	美国道康宁
ZnS:Mn ²⁺ 粉末	/	中国计量大学
ZnS:Cu ²⁺ 粉末	/	中国计量大学
电子天平	ME104E	瑞士梅特勒-托利多
混合机	SpeedMixer DAC 150	上海钧直进出口有限公司
电热恒温真空干燥箱	DZF-6012	上海一恒科学仪器有限公司
扫描电子显微镜(SEM)	S-4800	日本日立

在本研究中，选用两种不同发光颜色的力致发光粉末 ZnS:Mn²⁺和 ZnS:Cu²⁺作为力致发光柔性薄膜的基质，这两种材料因其发光强度高、发光稳定且重复性好的特点^[83,84]，被广泛应用于实验室和工业领域。为了包裹发光粉末，选用了 PDMS 作为基体材料。PDMS 具备出色的光学透明性、适宜的弹性模量以及优良的生物相容性，被广泛用于力致发光薄膜的制备。

力致发光柔性薄膜的制备流程如下，首先用电子天平将 ZnS:Mn²⁺粉末和 ZnS:Cu²⁺粉末分别按照方案 1（6 g ZnS:Mn²⁺）、方案 2（4 g ZnS:Mn²⁺和 2 g ZnS:Cu²⁺）、方案 3（3 g ZnS:Mn²⁺和 3 g ZnS:Cu²⁺）、方案 4（2 g ZnS:Mn²⁺和 4 g ZnS:Cu²⁺）以及方案 5（6 g ZnS:Cu²⁺）的比例混合。将这些混合后粉末与 PDMS 分别按照质量比 1: 1 混合，并加入固化剂（PDMS 与固化剂比例为 10: 1）。通

过混合机将粉末和 PDMS 混合均匀，速率为 3800 r/min，时间为 30 s，确保这些粉末均匀的分散在 PDMS 中。将混合后的复合材料倒入涂覆脱模剂的圆形模具中，内圈直径为 6 cm，深度为 1.5 mm，刮去表面多余的材料。将带有复合材料的模具置于真空干燥箱中，进行抽真空去除气泡，并在 100 °C 下加热薄膜 2 小时。加热结束后，进行脱模、样品边缘修剪。最终得到的柔性薄膜样品如图 2-1 所示。



图 2-1 力致发光柔性薄膜（ZnS:Mn²⁺和 ZnS:Cu²⁺粉末的质量比
从左到右依次是 6:0、4:2、3:3、2:4、0:6）

图 2-2 显示了五种配比方案下柔性薄膜的 SEM 图像。可以看出，ZnS:Mn²⁺和 ZnS:Cu²⁺力致发光颗粒在 PDMS 中具有较好的分散性。这种均匀分布提高了冲击力的传导效率，进而增强了柔性薄膜的发光特性^[85]。当 PDMS 受到外部机械刺激时，冲击力在微观尺度上传递至力致发光粉末，从而激发其发光效应。

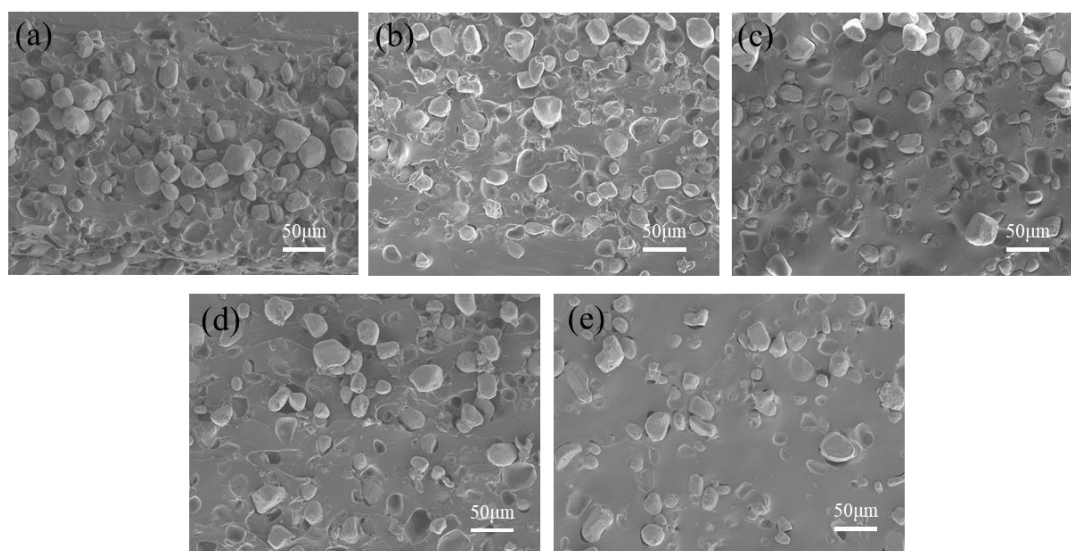


图 2-2 力致发光薄膜的截面 SEM 图 (a) 方案 1（6 g ZnS:Mn²⁺） (b) 方案 2（4 g ZnS:Mn²⁺和 2 g ZnS:Cu²⁺） (c) 方案 3（3 g ZnS:Mn²⁺和 3 g ZnS:Cu²⁺） (d) 方案 4（2 g ZnS:Mn²⁺和 4 g ZnS:Cu²⁺） (e) 方案 5（6 g ZnS:Cu²⁺）

2.2 冲击光谱响应测量实验平台搭建

力致发光材料的力学表征方法可依据不同测试需求分为摩擦测试^[86]、压缩测试^[87]、拉伸与弯曲测试^[88]、超声振动测试^[89]以及冲击测试^[90]等。摩擦测试通常使用摩擦试验机进行，测试过程中可以监测力致发光薄膜发光光信号的变化，反映材料在受力过程中的动态行为，以此评估材料的耐摩擦性能、摩擦系数及其在摩擦过程中的光学表现。压缩测试利用通用测试机施加不同压缩载荷，监测材料在受力过程中的力致发光变化，并记录其发光强度与光谱变化。拉伸与弯曲测试则借助通用测试机使样品经历拉伸或弯曲形变，以分析其在不同应力状态下的力致发光现象。其中，拉伸测试用于研究材料在拉应力作用下的发光特性，而弯曲测试则用于探究弯曲应力对发光性能的影响。超声振动测试利用超声振动激发单个力致发光粒子，以研究材料在高频振动条件下的力致发光响应，该方法适用于微观尺度的发光行为分析。冲击测试则通过监测自由落体球撞击样品表面所激发的力致发光信号，评估材料对冲击力的响应特性。因此，本研究采用落球实验对材料的发光性能进行定量测量，以评估柔性薄膜在不同冲击力条件下的光强变化，其实验装置如图 2-3 所示。

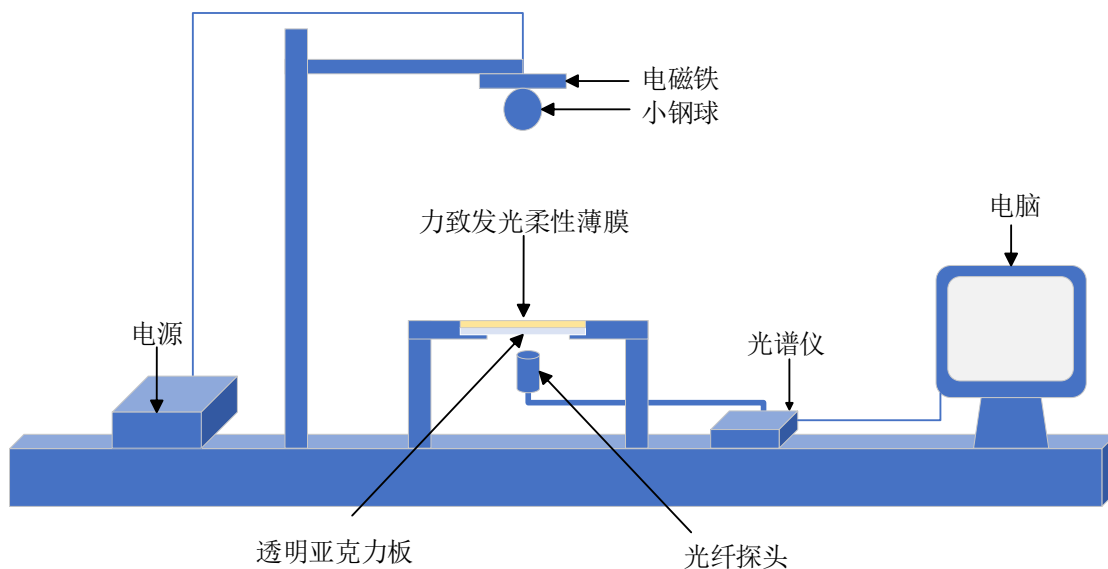


图 2-3 冲击光谱响应测量实验平台

冲击实验平台包括小球冲击系统、透明亚克力板、力致发光柔性薄膜、光学采集装置和电脑等。小球冲击系统使用电磁铁作为小球（质量 32 g，直径 20 mm）

的释放装置，通过电源控制电磁铁通断电，实现小球的自由释放。电磁铁的释放高度可以通过固定支架调节，以实现不同冲击力的实验条件。光学采集装置为光纤光谱仪，用于捕获力致发光柔性薄膜在冲击过程中的发光信号。为减少环境光对发光信号的干扰，冲击实验在黑暗环境中进行。

2.3 柔性薄膜冲击光谱响应

本研究采用光谱仪作为测量工具，采集质量为 32 g、直径 20 mm 的小球从不同高度冲击柔性薄膜的力致发光光谱，建立小球冲击力与力致发光强度的关系。在小球下落并与柔性薄膜发生动态接触的过程中，质量为 m ，半径为 r 的小球以初始速度 v 开始接触薄膜，并逐渐压缩薄膜，在时间 T 内，薄膜被压缩到最大程度，此时钢球的速度降至零。在此过程中，小球对柔性薄膜的最大冲击力 F_{max} 可依据以下公式计算^[91]：

$$F_{max} = \frac{2mv}{T} \quad (2-1)$$

小球的初始冲击速度可由自由落体运动方程计算得到：

$$v = \sqrt{2gh} \quad (2-2)$$

其中 g 为重力加速度(9.8m/s^2)， h 为小球自由落体的高度。

当小球的冲击速度 v 与薄膜压缩的时间 T 之间的变化规律可由公式描述^[92]：

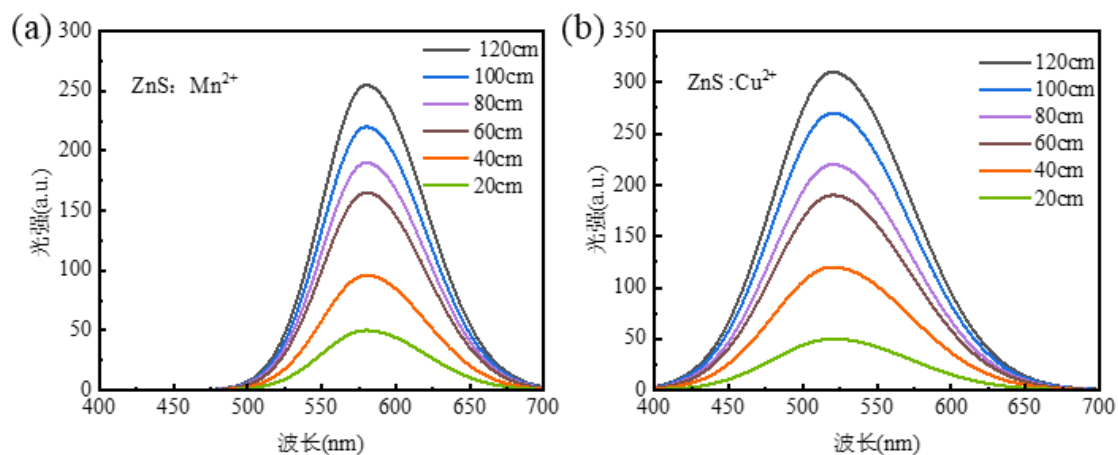
$$T = 3.23\rho^{2/5} \frac{r}{v^{1/5}Y^{2/5}} \quad (2-3)$$

在该公式中， ρ 为小球的密度(7.64 g/cm^3)，而 Y 为柔性薄膜的杨氏模量（实验测定值为 4.5 Mpa ）。依据公式(2-1)、(2-2)和(2-3)，可以分别计算小球在不同高度下的冲击速度及其对薄膜施加的最大冲击力。表 2-2 总结了不同高度下小球的冲击速度与最大冲击力的计算结果。光谱采集时，光纤探头距离柔性薄膜 0.5 cm，并且实验环境保持在黑暗条件下，以避免外部光源干扰测试结果的准确性。

表 2-2 冲击速度与最大冲击力的关系

小球下降高度(cm)	冲击速度(m/s)	最大冲击力(N)
20	1.98	57.68
40	2.80	87.42
60	3.43	111.52
80	3.96	132.52
100	4.43	151.60
120	4.85	169.02

在冲击光谱响应测量实验平台上,对不同配比的力致发光柔性薄膜进行光谱采集后,得到方案 1 (6g ZnS:Mn²⁺) 和方案 5 (6g ZnS:Cu²⁺) 柔性薄膜的光谱,如图 2-4 所示。

图 2-4 柔性薄膜的光谱 (a) ZnS:Mn²⁺ (b) ZnS:Cu²⁺

从图 2-4(a)可以看出,当小球从不同高度自由落体撞击时,随着高度增大,柔性薄膜的光谱强度也增强。ZnS:Mn²⁺的发射峰位于 580 nm 附近,这与其典型发光特性一致。当小球从不同高度自由下落并撞击柔性薄膜时,机械能被转化为电子激发能,使电子跃迁至更高能级。随后,被激发的电子被还原到基态,并发出一定的光,从而得到可见的发光谱。随着撞击高度的增加,即冲击能量的提升,ZnS:Mn²⁺中 Mn²⁺离子所激发的电子数量增多,从而增强了发光强度。从图 2-4(b)可见,随着冲击高度的增大,柔性薄膜的光谱强度逐渐增大。ZnS:Cu²⁺的发射峰位于 520 nm 附近,与其发光性质相吻合。这一强度变化与 Cu²⁺离子在外力作用下所产生的能级跃迁有关。随着冲击高度的增加,更多 Cu²⁺离子被引入到激发态,并在回落至基态的过程中释放出更多光子。

如图 2-5 所示, ZnS:Mn^{2+} 和 ZnS:Cu^{2+} 柔性薄膜的峰值发光强度与小球最大冲击力之间表现出明显的线性关系。从拟合曲线可见, ZnS:Cu^{2+} 柔性薄膜对冲击的响应更加灵敏, 其拟合直线斜率较大。此外, 在相同冲击力作用下, ZnS:Cu^{2+} 柔性薄膜的光谱峰值强度大于 ZnS:Mn^{2+} 柔性薄膜的光谱峰值强度, 这表明 ZnS:Cu^{2+} 材料在力致发光过程中对冲击能量的转化效率更高。

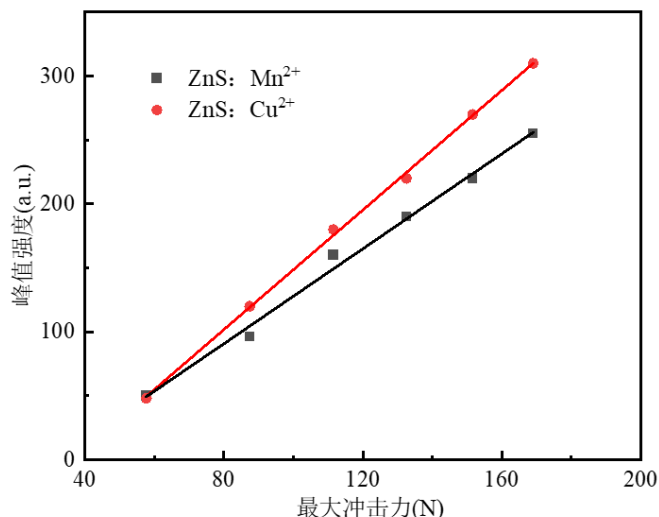


图 2-5 ZnS:Mn^{2+} 和 ZnS:Cu^{2+} 的峰值强度与最大冲击力的线性关系

本研究重点分析了方案 2(4 g ZnS:Mn^{2+} 和 2 g ZnS:Cu^{2+})、方案 3(3 g ZnS:Mn^{2+} 和 3 g ZnS:Cu^{2+})、方案 4(2 g ZnS:Mn^{2+} 和 4 g ZnS:Cu^{2+}) 的力致发光柔性薄膜在小球 100cm 高度下的冲击发光光谱。如图 2-6 所示, 这些光谱均显示出两个明显的发射峰, 分别位于 520 nm (绿光) 和 580 nm (橙红光) 附近, 表明 ZnS:Cu^{2+} 和 ZnS:Mn^{2+} 在复合薄膜中的发光中心与其典型发光特性相一致。进一步分析发现, 当 ZnS:Mn^{2+} 和 ZnS:Cu^{2+} 的质量比为 2:1 时, 橙红光发射峰(580 nm)显著增强, 而绿光发射峰(520 nm)相对较弱。这种现象是由于 ZnS:Mn^{2+} 在高浓度下为复合材料提供了更多 Mn^{2+} 发光中心, 使橙红光峰在小球冲击下产生的发光量更强。随着 ZnS:Cu^{2+} 含量增加, 绿光峰的强度逐渐增强。另外从图中可以看出, 这种复合材料的发光光谱是两种材料发光光谱的简单叠加。这主要是由于两种粉末只进行了物理混合, 材料属性并没有变化, 力致发光只在各自的粉末颗粒内部进行, 而颗粒间没有相互影响^[93]。

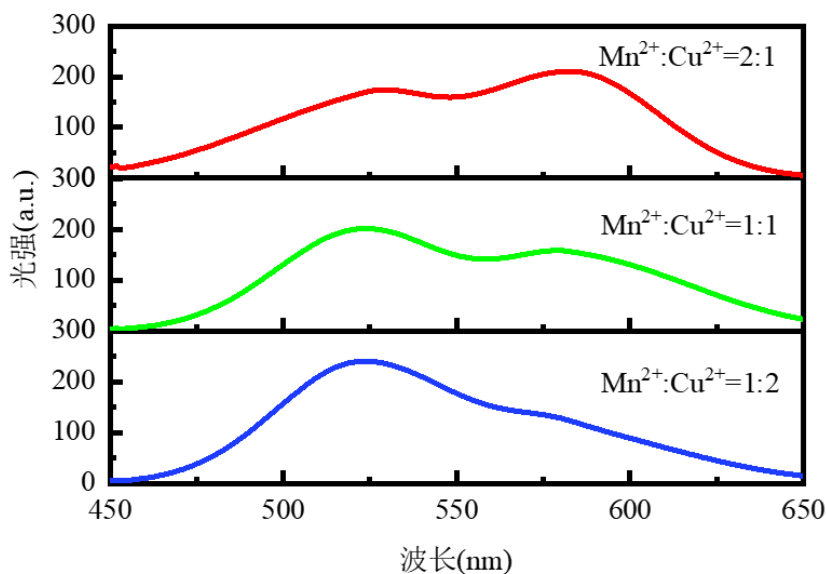


图 2-6 不同配比下的力致发光柔性薄膜的发光光谱

2.4 基于力致发光光强比的冲击力检测方法

本实验需要较为均衡的绿色与橙红色发光强度，因此选择了方案 3（3g ZnS:Mn²⁺和 3 g ZnS:Cu²⁺）的柔性薄膜进行深入光谱分析。如图 2-7(a)所示，在从 20 cm 至 120 cm 不同高度上，实验记录了小球自由下落撞击柔性薄膜时的瞬时最大光谱。实验结果表明，冲击力随着高度的增加而增大，力致发光强度也随之增强。在此基础上，通过对 520 nm 和 580 nm 处的光谱峰值强度进行精确测量，可建立光强峰值比与冲击力之间的关系。对光强峰值比和冲击力进行了线性回归分析，拟合得到的表达式为： $Y=1.09882+0.00188X$ ，线性拟合度为 $R^2=0.98849$ ，如图 2-7(b)所示。该关系为基于两种波长的峰值比来测量冲击力大小提供了一种新的方法。复合薄膜依托 ZnS:Mn²⁺和 ZnS:Cu²⁺的双峰发光效应，实现了对冲击力的高灵敏检测。

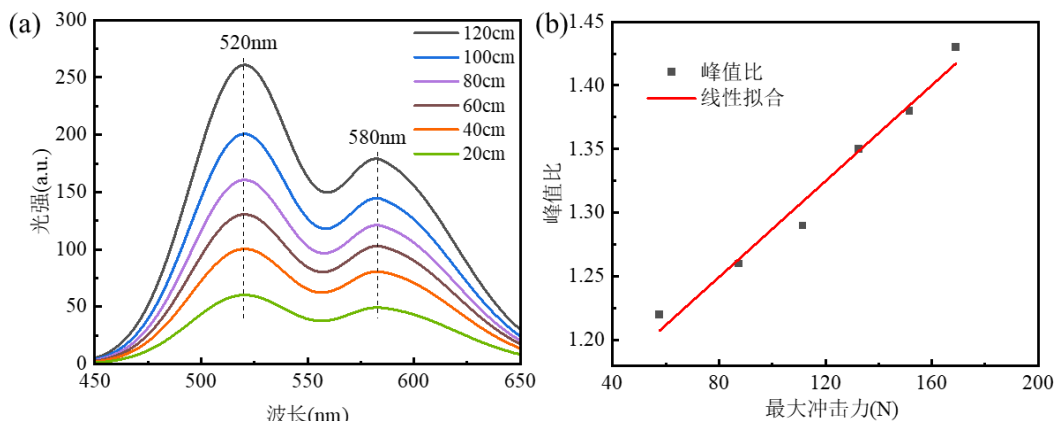


图 2-7 方案 3 (3 g ZnS:Mn²⁺和 3 g ZnS:Cu²⁺) 的柔性薄膜 (a) 不同冲击力下的光谱响应
(b) 光强峰值比与最大冲击力的线性关系

2.5 光纤探头测距对冲击力检测的影响

力致发光技术应用在冲击力检测中时, 光纤探头与柔性薄膜的测量距离对光谱数据具有重要影响, 特别是在检测弱光信号时, 距离效应可能引入数据偏差。因此, 本研究系统分析了光纤探头与柔性薄膜间不同测量距离对光谱数据的影响。在前期实验中, 记录了光纤探头距柔性薄膜 0.5 cm 处的光谱数据。随后将探头距离调整至 1.5 cm 和 2.5 cm, 并测量小球从不同高度落下冲击所引发的发光光谱。图 2-8 展示了光纤探头距柔性薄膜 1.5 cm 和 2.5 cm 处的光谱特征。实验结果表明, 随着探头与柔性薄膜距离的增加, 探头接收到的光信号强度逐步衰减。这一现象的产生是由于光在传播过程中呈现几何扩散的特征, 即光束离开光源后向更大区域扩展。因此, 当光纤探头距离柔性薄膜较远时, 光纤探头接收到的光束有效截面积减小, 导致单位面积内的光子密度降低, 最终使采集到的光强减弱。

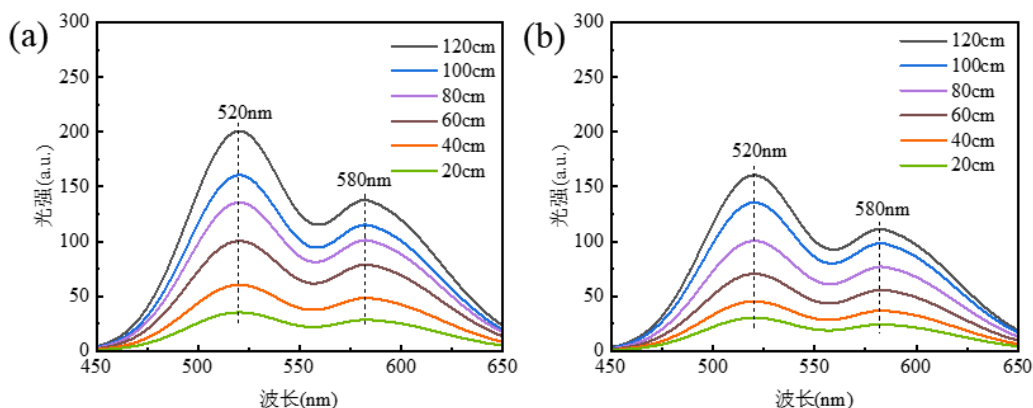


图 2-8 不同光纤探头距离下的光谱 (a) 1.5 cm (b) 2.5 cm

对光纤探头与柔性薄膜在三个不同距离采集的光谱数据进行处理,得到了图 2-9(a)中单一材料 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 的峰值绝对光强与小球最大冲击力的线性关系,以及图 2-9(b)中光强峰值比与小球最大冲击力的关系。从图中可以看出探头测量距离对峰值绝对光强有很大的影响。探头越近(0.5 cm),光强越高;探头越远(2.5 cm),光强越低。这是由于探头距离增加,探头接收到的光减少导致。这种现象说明,基于绝对光强的测量方法容易受到探头距离的影响,需要在测量中严格控制探头与薄膜的距离,或者对不同距离的结果进行校正。相比于 2-9(a), 2-9(b)中不同探头距离下的曲线更加接近,表明峰值比的检测方法对探头距离的依赖较小。即使探头距离有所变化,峰值比仍然能够稳定地反映冲击力的变化。这种稳定性表明,基于光强峰值比方法在不同测量条件下更加可靠,能展示出更好的环境适应性。

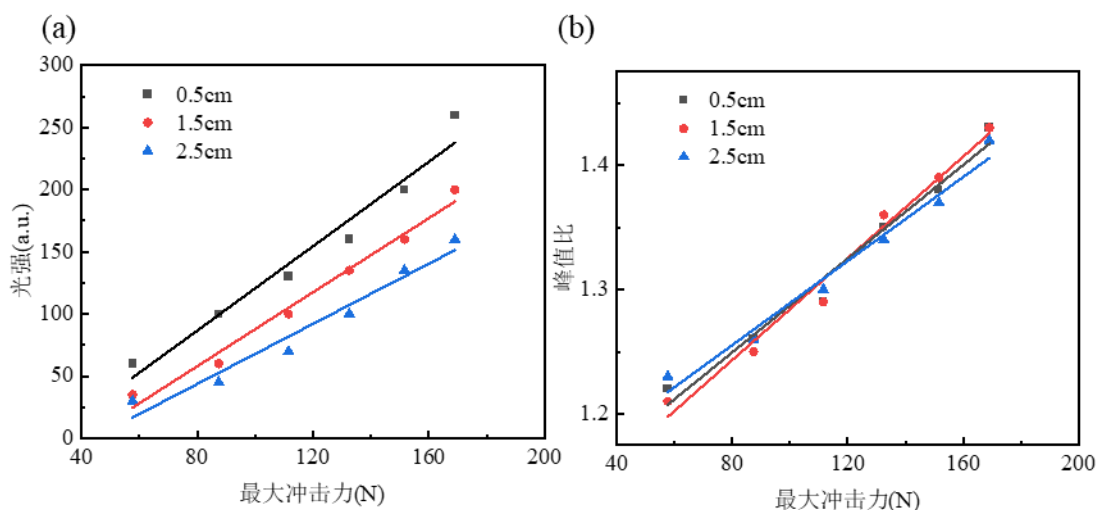


图 2-9 (a) $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 光谱峰值强度与小球最大冲击力的线性关系 (b) 光强峰值比与小球最大冲击力的线性关系

2.6 本章小结

本章系统介绍了采用不同 $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$ 和 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 质量比的柔性薄膜的制备工艺过程,并利用扫描电子显微镜(SEM)截面形貌图验证了两种发光粉末在 PDMS 基体中的均匀分布。在实验部分,通过搭建落球实验平台,成功模拟不同冲击力条件并定量评估了柔性薄膜的发光强度变化。实验结果表明,在方案 1 (6 g $\text{ZnS}:\text{Mn}^{2+}$) 和方案 5 (6 g $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$) 的柔性薄膜中,力致发光峰值强度与小球最大冲击力呈现良好的线性关系,且在力致发光过程中 $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ 材料对冲击力的

响应更为敏感。此外,方案 2 (4 g ZnS:Mn²⁺和 2 g ZnS:Cu²⁺)、方案 3 (3 g ZnS:Mn²⁺和 3 g ZnS:Cu²⁺)、方案 4 (2 g ZnS:Mn²⁺和 4 g ZnS:Cu²⁺) 的柔性薄膜光谱峰值位置与 ZnS:Mn²⁺和 ZnS:Cu²⁺的典型发光中心相吻合,这种复合材料的发光光谱是两种材料发光光谱的简单叠加。此外,本研究提出了一种基于力致发光光强比的冲击力检测方法,该方法对探测距离的敏感性较低,相较于传统依赖绝对光强的检测方法,具备更强的抗干扰能力和更高的适用性。本章全面分析了基于 ZnS:Mn²⁺和 ZnS:Cu²⁺的力致发光柔性薄膜在冲击力检测中的光谱响应特性及其优越性能,为后续传感器的优化设计与性能评估提供了重要的理论支持与实验依据。

第 3 章 基于力致发光光强比的冲击力传感器的设计

本章先阐述了冲击力传感器的基本工作原理，对力学信号的获取、转换和处理机制进行了详细分析。在此基础上，从光路系统设计、信号处理与显示系统设计、机械结构设计三个方面对传感器的设计与实现进行了详细阐述。本章从理论到实践全面展示了冲击力传感器的设计与实现过程，为后续的实验验证和性能测试提供了坚实基础。

3.1 传感器工作原理

基于力致发光光强比的冲击力传感器是一种利用力致发光材料进行冲击力检测的装置，其核心功能是测量材料在外界冲击力作用下的发光强度变化，并据此推断出冲击力的大小。该传感器包括冲击系统、光路系统和信号处理与显示系统等关键部分，工作示意如图 3-1 所示。在测试过程中，小球从不同高度自由下落，当小球撞击传感器表面的发光材料时，材料内的力致发光颗粒受到冲击力作用，发生局部的压电效应，产生压电场，导致发光中心的电子脱陷并与空穴复合，从而产生发光现象。这个发光现象通过分光镜分光后，又分别经过特定的窄带滤光片，由两个光电探测器捕捉，随后光信号被光电探测器转换为电流脉冲信号。在信号处理系统中，这些电流脉冲信号被电路板的 IV 转换电路转化为电压脉冲信号。之后，信号进入滤波和放大电路进一步处理，以增强信号强度，便于后续计算。将处理好的信号输入 STM32 单片机中，通过对这些信号的处理，可以准确地推断出冲击力的大小，计算得到的冲击力数值在 OLED 显示屏上实时显示。

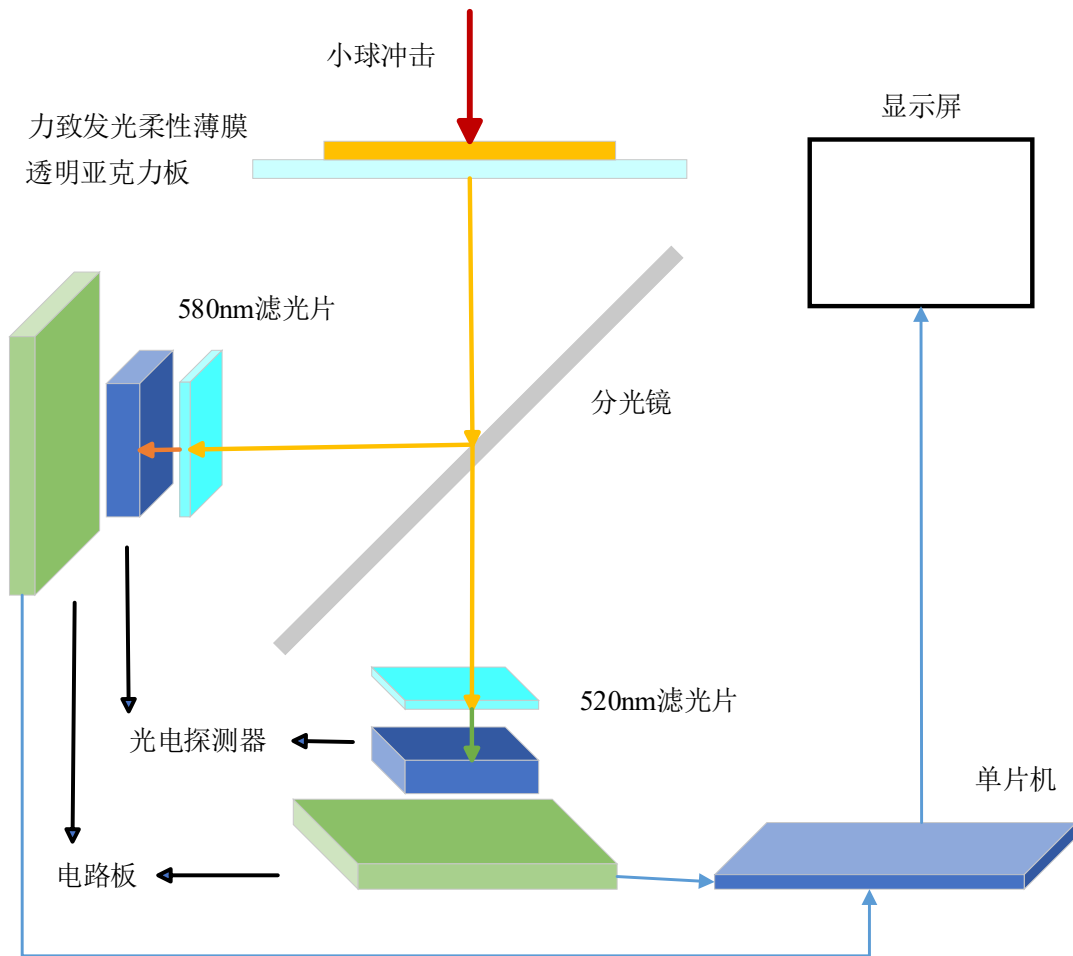


图 3-1 传感器工作示意图

冲击系统的主要功能是通过施加外力以引发力致发光现象，从而测量冲击力的大小。该系统的核心组成部分包括冲击源（小球）、释放装置（电磁铁）和高度调节机构。在实验过程中，用电磁铁吸附小球，并通过高度调节机构设定所需的高度。然后，控制系统触发电磁铁断电，小球在重力作用下自由落下，撞击力致发光薄膜表面产生发光现象。小球的冲击力大小通过控制高度来调整，确保在不同冲击力条件下获得发光强度数据。冲击系统的设计确保了力致发光传感器测试能够在可控、稳定的冲击力条件下进行，使得测量结果的重复性和可靠性更高。该机构为准确测量冲击力与发光强度之间的关系奠定了坚实的基础。

光路系统构成该传感器的核心部分，其性能对传感器的整体检测精度和稳定性具有至关重要的作用。该系统主要由力致发光薄膜和光信号收集系统两部分组成。光信号收集系统则由分光镜、窄带滤光片和光电探测器组成，用于捕捉力致发光材料在受冲击后产生的光信号，并将其转换为电信号。当小球撞击力致发光

材料时，材料内部的压电效应会产生光信号。这些光信号通过分光镜分光，分别经过两个特定的窄带滤光片，最终由两个光电探测器捕捉。

信号处理与显示系统负责对光电探测器产生的电信号进行放大、滤波处理，并显示冲击力的数值。光电探测器产生的电流脉冲信号经过 IV 转换电路转换为电压脉冲信号。电压脉冲信号经过两级线性放大电路增大幅值，并经过滤波电路后输入到单片机中。电压脉冲信号的幅值与光强呈线性正比例关系，由第二章内容可知光强比与冲击力大小呈线性正比例关系，因此电压脉冲信号的幅值比与冲击力大小呈线性正比例关系。测得电压脉冲信号的幅值比后，可通过单片机程序转换得到对应的冲击力大小，并进一步显示在 OLED 显示屏上。

3.2 光路系统设计

3.2.1 分光镜

分光镜是一种关键的光学器件，通常由光学玻璃或其他透明材料制造，其主要作用是将入射光束分解为多个光束，在光学实验、激光技术及光谱分析等领域具有广泛应用。在光束分离过程中，分出的光束在颜色、波长等性质上与原始光束保持一致，并且在忽略少量光强损耗的情况下，分光后的总光强与入射光的光强相等。分光镜的设计和应用对光信号的分离和控制起着至关重要的作用，是现代光学系统中不可或缺的组件。

分光镜主要分为两类：偏振型分光镜与非偏振型分光镜。偏振型分光镜是一种利用光的偏振特性进行分光的光学器件，可根据光的偏振状态将入射光分离为不同的光束。这种分光方式的强度分配比例与入射光的偏振特性直接相关，因而适用于需要区分光的偏振方向的场景，如液晶显示技术、激光偏振测量以及光通信等领域。在这些应用中，偏振型分光镜能够对光的偏振信息进行有效分离和利用，为复杂光学系统的构建提供了重要支持。对应的，非偏振型分光镜则不区分光的偏振特性，而是通过光的反射和透射将入射光分为两个光束。这种分光方式按照一定的比例分配反射光和透射光的强度，而光束的其他特性，例如波长和相位，仍然保持与入射光一致。非偏振型分光镜被广泛应用于要求光强均匀分配的实验和技术场景，例如光干涉、光谱测量等。在这些应用中，非偏振型分光镜能

够将一束光精确分离成两束，并确保光束特性一致。

在本实验中，我们采用了南阳晶亮光电科技有限公司的非偏振型分光镜，尺寸为 $75*55*1\text{ mm}$ ，分光比为 1:1，即将入射光的光强均匀分配给透射光和反射光。非偏振型分光镜原理图如图 3-2 所示。这种均匀分配方式可以确保两个方向上的光束光强一致，从而提高实验结果的可靠性。当柔性薄膜在冲击力作用下产生力致发光信号时，非偏振型分光镜将该光信号分成两束，并保持其原始特性。随后，这两束光分别被两个光电探测器接收，转换为电信号，并经过信号处理系统进行进一步处理。为确保实验精度，本实验还对分光点到两个光电探测器的距离进行了严格控制，保持两者距离相等，以避免由于路径差异导致的信号强度变化。这一设计可以有效降低系统误差，确保分光镜分离出的两束光在实验中具有一致的表现。

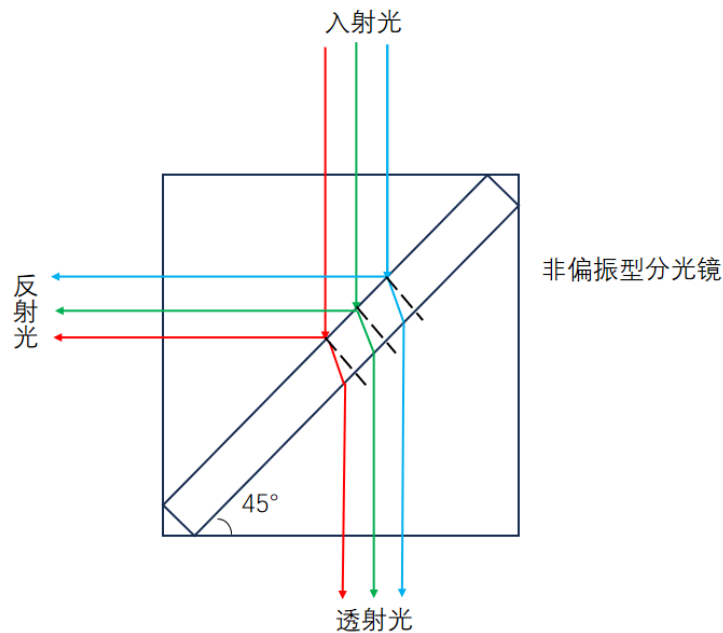


图 3-2 非偏振型分光镜的光学工作原理

3.2.2 滤光片

滤光片是一种光学元件，广泛应用于光学实验、激光技术和光谱分析等领域。它通常由透明塑料、玻璃或其他光学基材制成，并涂覆特殊染料或涂层，以选择性地吸收非目标波段的光。滤光片的主要功能是根据光波长或波段透过光信号，滤除其他波段的光。其工作原理基于光学涂层或染料，在特定波长范围内具有高透过率，对其他波段的光线则吸收或反射，具体吸收量由透过率决定。透过率越

高，目标波段内光的损失越小，从而提高检测精度和效率。

在采集柔性薄膜发出的两个特定发光峰值波段（520 nm 和 580 nm）的光信号时，滤光片的作用尤为关键。为了确保能够准确捕捉到这些峰值波段的光信号，并排除其他波段光线对实验结果的干扰，专门定制了两种窄带滤光片，确保采集到的光信号精准反映柔性薄膜的真实响应。这两种窄带滤光片的实物图如图 3-3 所示。

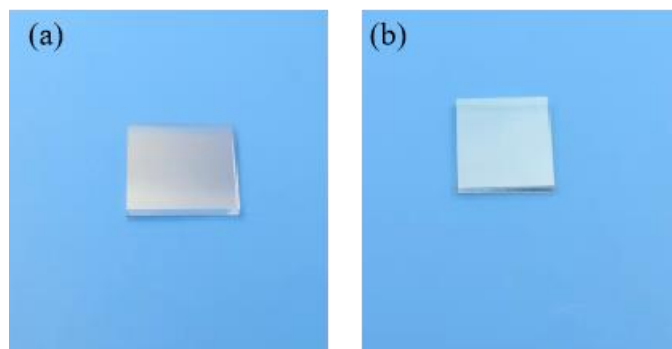


图 3-3 两种窄带滤光片 (a) 520 nm 波长 (b) 580 nm 波长

为验证定制滤光片是否满足实验需求，进行了光谱透过率测试，以评估其在目标波段内外的透射性能。测试结果如图 3-4 所示，从图中可以看到，滤光片在隔离非目标波段的光方面表现出色，能够有效阻挡与实验无关的光波，保证了只允许特定波段的光线透过。此外，滤光片在目标波段内的光透过率达到 95%以上，表明其在传输所需光信号的同时将光能损失降到很低。

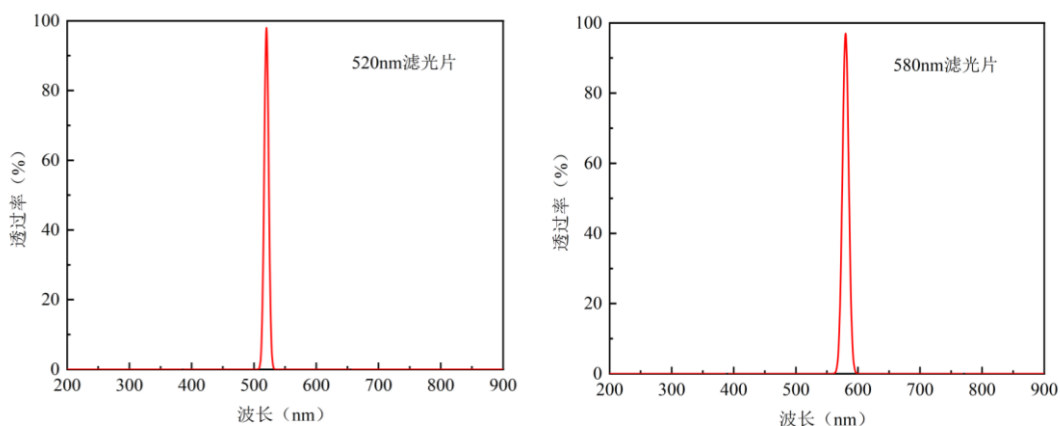


图 3-4 两种滤光片的光谱透射图

3.2.3 光电探测器

在基于力致发光光强比的冲击力传感器中，光电探测器是光路收集系统的核

心组件，其性能在提升传感器输出信噪比方面起着关键作用，并直接影响仪器的检测灵敏度。光电探测器的基本原理是将光信号转换为电信号，从而实现光信息的精准检测与测量。它通过光电效应或光导效应来探测光子，并生成对应的电流或电压信号。光电探测器的核心组件是半导体材料（如硅、砷化镓等）。当光照射到光电探测器的光敏材料上时，光子的能量使得材料中的电子获得足够的能量跳出原子轨道，形成自由电子和空穴。通过电场的作用，电子和空穴被分离并生成电流信号。

常用的光电探测器包括光电倍增管(PMT)、雪崩光电二极管(APD)以及硅光电二极管等。PMT 具备极高的灵敏度，能够探测极低强度的光信号，通常用于精确测量弱光的实验。然而，PMT 体积较大，占用空间较多，并且需要高电压驱动，因此需配备额外的电源和防护措施，另外在强光环境下易受光污染干扰。APD 具有较高的灵敏度，适用于微弱光信号的检测，但其需要高电压供电。此外，APD 的性能易受温度变化影响，且在雪崩过程中可能产生不稳定的脉冲信号。

基于以上考虑，本研究选用硅光电二极管作为光电探测器。硅光电二极管响应速度快，适用于高频率下检测光信号，其输出电流与入射光的强度呈线性关系，适合精确的光强测量。此外，相较于另外两个光电探测器，硅光电二极管不需要高电压，且其价格低廉，成本较低。因此，它成为本实验中最合适的选择。

在选择硅光电二极管时，需要重点关注多个关键性能参数，以确保其符合实验要求。硅光电二极管灵敏度是衡量其对光信号响应能力的重要参数，它反映了光电二极管在特定光照条件下转换光信号为电信号的能力，通常是指单位光功率引起的输出电流或电压。暗电流是指在无入射光条件下光电二极管自身产生的电流。暗电流越小，设备的灵敏度越高。结电容的大小与光电二极管响应速度有着重要的关系，较低的结电容不仅有助于提升响应速度，还直接影响其高频特性，对于高速检测应用至关重要。硅光电二极管的响应波长通常在 400 nm 至 1100 nm 之间，而力致发光薄膜所产生的光波长为 520 nm 和 580 nm，位于响应波长内。这使得硅光电二极管非常适合用于探测力致发光薄膜所产生的发光现象。

除了上述关键参数，硅光电二极管的噪声特性也是影响检测精度的重要因素。较低的噪声水平能够进一步提高微弱光信号的检测能力，尤其适用于低光强环境下的精确测量。在实际应用中，为了优化性能，通常需要在灵敏度、暗电流、响

应时间和噪声等参数之间寻求最佳平衡，以确保探测器满足实验需求。

综合以上参数分析，最终选用了北京敏光科技有限公司的 LSSPD-U10 型号硅光电二极管。该型号光电二极管在可见光和近红外波段具有较高的灵敏度，适用于捕捉柔性薄膜产生的光信号，同时具备快速响应时间和低噪声特性。此外，该二极管采用紧凑设计，便于系统集成与安装。图 3-5 展示了 LSSPD-U10 的实物外观，其主要性能参数列于表 3-1。



图 3-5 硅光电二极管实物外观

表 3-1 硅光电二极管 LSSPD-U10 性能参数表

性能参数	性能指标
感光面积	10×10 mm
光谱范围	200-1100 nm
响应率($\lambda=520$ nm)	0.38 A/W
响应率($\lambda=580$ nm)	0.41 A/W
响应时间	6 ns
暗电流	2 nA
结电容	500 pF
反向击穿电压	60 V
饱和光功率	25 mW

3.3 信号处理与显示系统设计

3.3.1 信号处理电路设计

在信号处理电路中，IV 转换电路是处理电信号的初始环节，主要作用是将

光电探测器产生的电流信号转换为电压信号，对后续的信号放大和滤波起着关键作用。光电探测器的两种工作模式：光伏模式和光导模式，如图 3-6 所示。在光伏模式下，光电二极管无需外加电压即可工作。当光照射到光电探测器的光敏材料上时，光子的能量使得材料中的电子获得足够的能量跳出原子轨道，形成自由电子和空穴。通过电场的作用，电子和空穴被分离并生成电流信号。这种模式由于没有外加电压的影响，通常表现出较低的噪声水平，因此常用于需要精确测量低强度光信号的应用中。然而光伏模式的灵敏度和响应速度相对较低。相比之下，光导模式需要在光电二极管上施加反向电压。当光照射到二极管时，光子将材料中的电子从价带激发到导带，形成自由载流子（电子和空穴），在外加电场的作用下，电子和空穴开始流动，产生电流。在光导模式下，由于外加电压的增强作用，光电二极管对光信号的感应更加灵敏，并能够快速响应光强的变化。因此，光导模式特别适用于检测微弱且快速变化的光信号。基于这一特性，本研究采用了光导模式，以提高探测系统的响应速度和检测灵敏度。

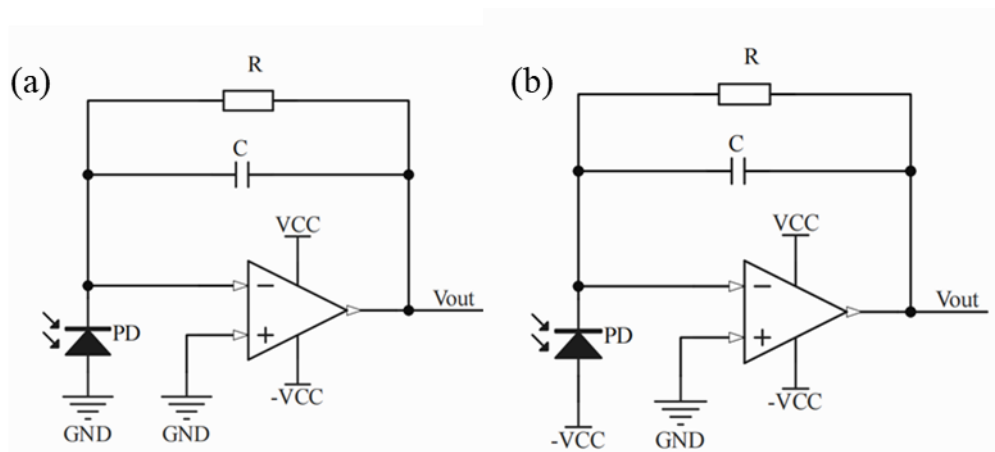


图 3-6 光电二极管的两种工作模式 (a) 光伏模式 (b) 光导模式

力致发光材料在冲击力作用下产生的光信号通常较弱，传感器系统在使用光电二极管接收此光信号的同时，也不可避免地接收到了环境光。环境光作为一种持续存在的背景信号，会与力致发光信号叠加，从而显著降低信号的信噪比，甚至完全掩盖有效的发光信号，影响冲击力测量的准确性。为解决这一问题，本研究在信号处理电路中引入了隔直电路。隔直电路以电容器为核心元件，电容器对直流信号呈现较高的阻抗（理论上趋于无穷大），而对交流信号的阻抗则随频率的升高而降低。环境光由于其稳定性表现为直流或低频信号，可被隔直电路有效抑制，而瞬态的力致发光信号具有较高频率特征，可以顺利地被电容器传输至后

续电路进行处理。通过这种设计，环境光干扰被显著降低，从而增强了力致发光信号的清晰度和信号质量，有效提升了系统实时测量冲击力的准确性和可靠性。

信号经过 IV 转换后，所得的电压脉冲信号仍较小，因此需要进一步放大，以满足后续的处理需求。在本研究中，选用高性能的 OPA1652 运算放大器作为放大电路的核心器件。OPA1652 具备低噪声、低失真特性，并具有优异的信号放大能力。它的低噪声特性在保证信号质量的同时提高了信号，使得放大后的信号保持较高的清晰度。OPA1652 的低失真特性进一步确保了信号的完整性，使其非常适合需要高保真度的信号处理应用。OPA1652 还具备宽带宽特性，这对于处理快速变化的信号尤其关键。宽带宽能够确保放大器在高频信号处理中具备足够的响应能力，使得系统能够捕捉高速变化的信号细节。

OPA1652 的具体性能参数如下表 3-2 所示，包括其低噪声、宽带宽和高增益等关键指标。这些性能确保了信号在放大过程中不会因噪声或失真而损失质量，为后续的信号处理奠定了基础。

表 3-2 OPA1652 性能参数

性能参数	性能指标
噪声	4.0 μV_{pp} (20 Hz-20 kHz)
温漂	2 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
增益带宽	18 MHz
开环增益	114 dB
输入失调电流	10 pA
输入失调电压	0.5 mV

信号首先经过 OPA1652 运算放大器进行第一级线性放大，第一级的主要作用是初步提升信号强度，使得后续电路能够更加稳定地接收和处理信号。随后进入第二级线性放大，第二级放大电路是整个信号放大系统的核心放大环节，负责对信号进行精确且灵活的增益调节，以适应不同的检测条件。为实现这一点，第二级放大电路中设计了一个可调的滑动变阻器作为反馈电阻。滑动变阻器可以灵活调节电路增益，当外部光信号强度发生变化时，通过调节滑动变阻器的阻值，可以改变放大器的增益系数，从而适应不同的光强条件。这种灵活的设计极大地增强了系统的适应性，使其能够在各种光强条件下获得稳定的输出信号。这种多

级放大设计的优势在于，一级放大提供了基础的增益，使得输入信号强度足以通过后续电路。而第二级放大通过可调的反馈电阻实现精确的增益控制，使得放大器能够根据不同光信号条件对增益进行调节，以此确保信号的放大强度适中，既避免过度放大，又保证足够的信号增益，从而实现最佳检测效果。图 3-7 所示的电路原理图详细展示了多级放大电路的具体设计。图 3-8 所示的为电路板实物图。

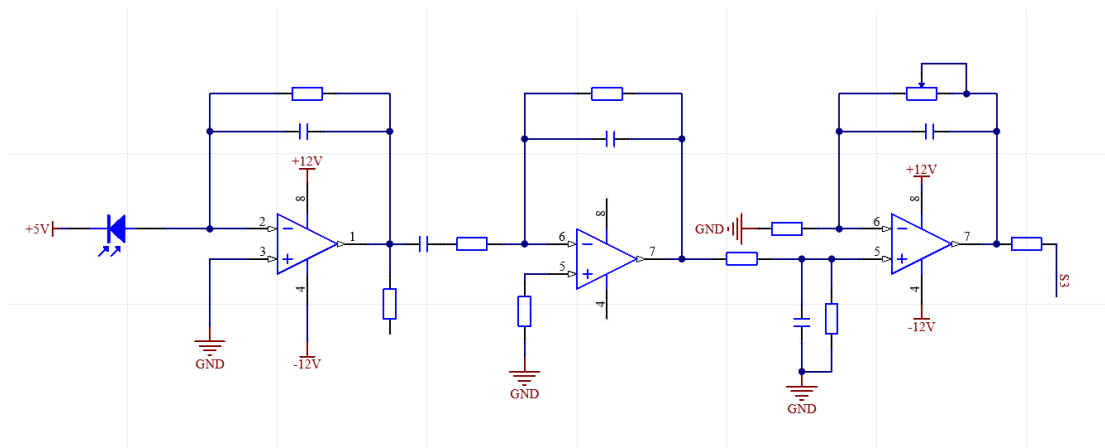


图 3-7 多级放大电路的电路原理图

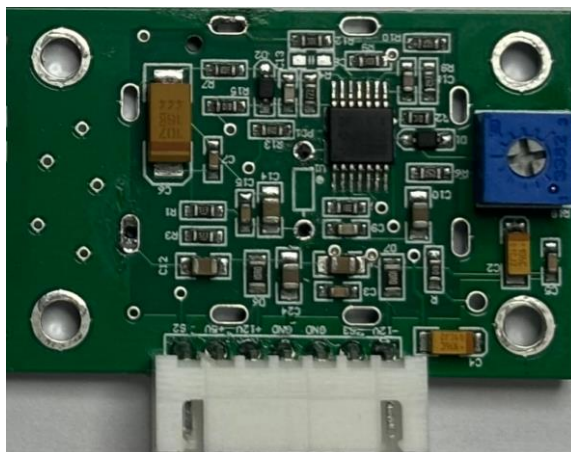


图 3-8 电路板实物图

3.3.2 显示系统设计

经过多级放大处理后，增强后的电压信号被传输至单片机，以便进行进一步的处理。单片机负责对接收到的电信号进行采集、数字转换，并执行相应的计算和数据处理任务。这一步骤对于提高检测结果的准确性至关重要，因为单片机能够根据预设的算法和校准参数，对输入信号进行必要的校正和滤波，从而得到稳定、可靠的测量数据。

单片机处理后的数据被传输至 OLED 显示屏，实现实时数据可视化。OLED 显示屏具备高对比度、快速响应和低功耗的优点，能够清晰地展示检测结果。此外，OLED 显示屏的高分辨率和快速刷新率，使得系统能够实时更新检测数据，满足实验过程中对数据的动态监控需求。显示屏单片机与 OLED 显示屏之间的通信通常采用 I²C 协议，这些通信方式能够快速传输数据，同时减少硬件接口的占用，为系统的稳定性提供保障。根据这些分析，结合本研究的需求，最终选择了金华龙科芯科技有限公司的 0.96 寸 OLED 显示屏，实物外观如图 3-9 所示，其主要参数见表 3-3。

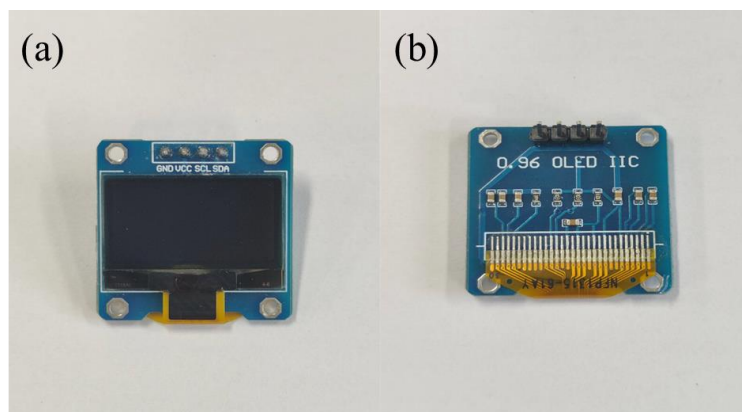


图 3-9 显示屏实物图 (a) 正面 (b) 反面

表 3-3 0.96 寸显示屏主要参数

参数	规格
驱动芯片	SSD1306
通信方式	IIC
功耗	0.04 W
分辨率	128*64
工作电压	3.3 V-5 V
可视角度	大于 160°

单片机是一种集成了处理器、存储器和输入/输出(I/O)外设的微型计算机，广泛应用于嵌入式系统。其具备高集成度、小型化、低功耗以及较高的性价比等优点，适用于多种控制和数据处理任务。通常，单片机通过处理输入信号并执行特定的指令来控制系统的运行，从而实现自动化的任务控制和数据处理。

在单片机的选型过程中，需要综合评估处理能力、存储容量、输入/输出(I/O)接口的类型与数量、功耗以及成本等关键因素，以确保其满足项目需求并优化系

统性能。基于本实验的要求，我们选用了 STM32F103C8T6 作为核心单片机，其实物图外观如图 3-10 所示，主要性能参数列于表 3-4 中。

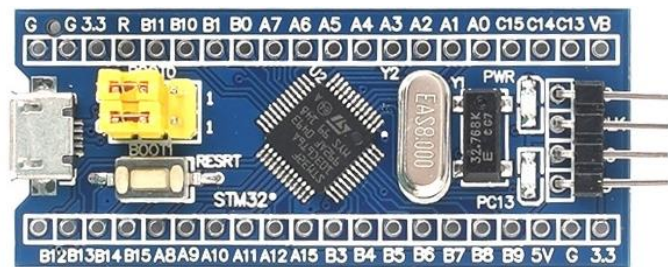


图 3-10 单片机实物图外观

表 3-4 STM32F103C8T6 的主要性能参数

参数	规格
内核	ARM Cortex-M3
主频	72 MHz
Flash 存储器	64 KB
SRAM	20 KB
I/O 端口数量	37 个 GPIO
工作电压	2.0 V-3.6 V
ADC	2 个 12 位 ADC，最多 16 个通道
I ² C 接口	2 个 I ² C 接口

在本设计中，输入信号通过前置电路处理后接入 STM32F103C8T6 单片机的 PA0 和 PA1 引脚。这两个引脚配置为模数转换器(ADC)通道（即 ADC1_IN0 和 ADC1_IN1），用于接收来自外部的模拟电压信号，并进行数字化采集。通过在 STM32 开发环境中初始化并配置 ADC 模块，将 PA0 和 PA1 引脚设定为模拟输入端口，并根据应用需求设定 ADC 的分辨率，选择适当的采样时间和触发模式，以确保信号的高精度采集。单片机的 ADC 模块能够以连续转换或周期性采样模式运行，从而实现对输入信号的实时监测与采集。

在信号采集过程中，ADC 将输入的模拟电压信号转换为数字信号，并将转换后的数据传输至单片机的处理单元，以实现实时计算。在此基础上，采用 I²C 通信协议将处理后的数据传输至 0.96 寸 OLED 显示屏，以实现输入信号的实时监测与显示，其与 STM32 引脚接线如表 3-5 所示。

表 3-5 OLED 显示屏与 STM32 的引脚接线

OLED 引脚	功能说明	STM32 引脚
VCC	电源正极	3.3 V
GND	接地	GND
SCL	I ² C 时钟引脚	PB8(I ² C1_SCL)
SDA	I ² C 数据引脚	PB9(I ² C1_SDA)

3.4 机械结构设计

机械结构设计是基于力致发光光强比的冲击力传感器的重要组成部分，负责为光学元件（分光镜、窄带滤光片、光电探测器）及电子组件（电路板、STM32 单片机、OLED 显示屏）的安装与运行提供稳定的支撑与有效的保护。合理的机械结构设计不仅能够确保光路系统的稳定性和精准性，还能优化电子组件的抗干扰能力，从而为传感器的高效检测提供可靠保障。本研究的机械结构设计主要围绕光学元件和电子组件的安装与保护展开。

分光镜作为光信号分离的关键组件，其安装需要确保光路的稳定性。分光镜按照与水平面成 45° 角的方式固定在铝合金框架中，这种设计能够使入射光垂直进入分光镜，并按预定角度分离反射光和透射光。进光口覆盖一个透明亚克力防护罩，既能防止灰尘进入，又便于观察分光镜的工作状态。分光镜侧面的外壳采用可拆卸式设计，外壳通过螺钉固定在传感器上，方便用户在进行拆卸，对分光镜表面进行清洁。

窄带滤光片用于过滤掉非目标波长的光信号，其安装需要保证滤光片与光路系统的精准配合，同时具备稳定性和易维护性。滤光片嵌入专用的方形安装槽中，安装槽材质为黑色阳极氧化铝，具有良好的吸光性能。用胶水将滤光片的边缘粘在安装槽内，避免由于振动或冲击导致的松动或位移。

光电探测器负责将光信号转化为电信号，其安装结构设计直接影响信号的采集。光电探测器的边缘用胶水粘在铝合金支撑框架上，光电探测器的引脚焊接在电路板上，保证探测器位置的稳定性。

电路板是传感器信号处理系统的核心部件，需考虑其布局的稳定性和电磁抗

干扰性。电路板安装在光电探测器后的位置，位于电路板槽内，外用铝制盖板将其封闭，形成屏蔽效果，有效减少外部电磁干扰。电路板通过四个金属螺柱固定在电路板槽内，螺柱上垫有尼龙绝缘垫圈，防止电路板的背面焊点接触金属底板，避免短路风险。电路板的固定点均匀分布，防止因振动导致的电路板弯曲或移位。

各个光学元件和电子组件的安装位置如图 3-11 所示。在实际组装过程中，需特别注意各元件之间的空间布局与光路精确对准，以确保力致发光薄膜产生的光信号能够高效地进入既定光路，并被分光镜有效分离。为了实现信号的精确测量，应确保分光镜分离点到两个滤光片之间的距离相等，经过滤光片的光到光电探测器的距离也相等，以最大限度减少光路差异引起的测量误差。

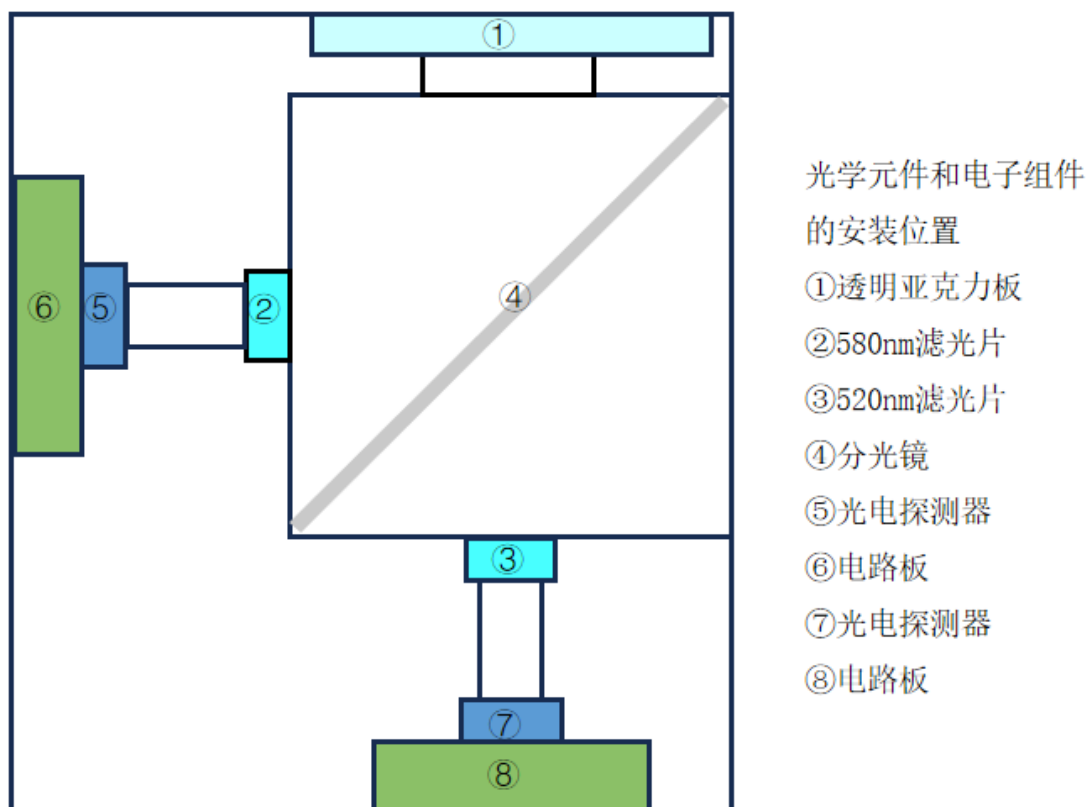


图 3-11 光学元件和电子组件的安装位置示意图

显示屏是用户获取数据的窗口，其位置设计需兼顾数据可读性和传感器整体布局的美观性。显示屏安装在传感器外壳的正面顶部，便于用户在不同观察角度下清晰读取信息，如图 3-12 所示。显示屏通过螺钉固定在显示屏槽内，既确保安装牢固，又便于显示屏的更换和维护。显示屏与槽底之间预留 0.5 mm 缓冲间

隙，减少外界振动对屏幕的直接影响。屏幕表面覆盖一层抗反射保护膜，减少环境光对屏幕可读性的影响，同时防止划痕和灰尘积累。

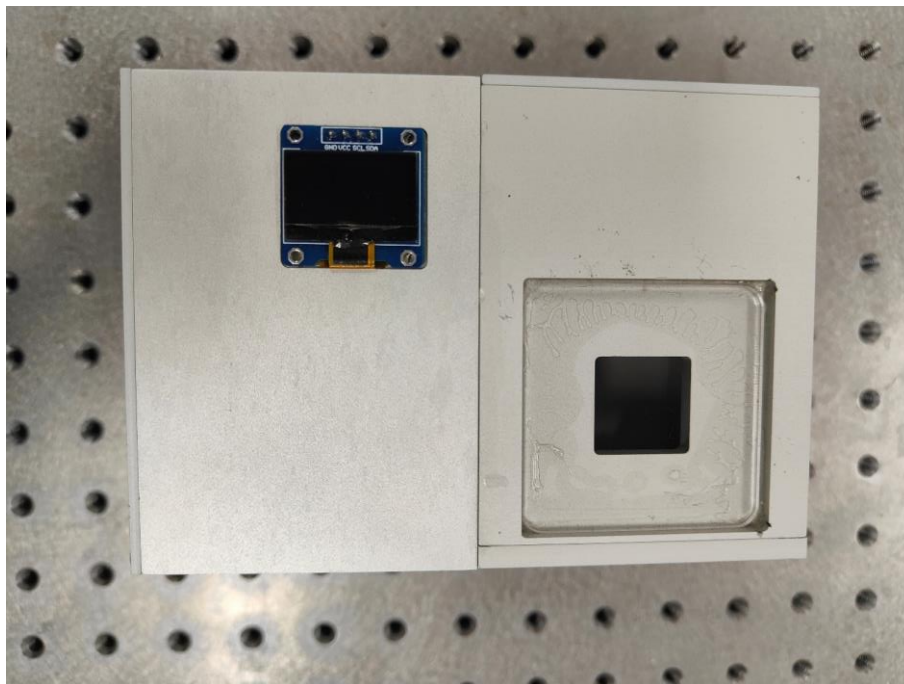


图 3-12 显示屏安装位置实物图

STM32 单片机是信号处理和数据运算的核心部件。STM32 单片机及其相关外围电路位于显示屏的下方，ADC 模块和通信接口靠近电路板，以缩短关键信号的传输路径，减少信号延迟和噪声。在壳体内部，单片机与显示屏通过软排线连接，排线经过整理固定，防止因振动或弯折导致的信号不稳定。

锂电池作为设备的供电源，提供稳定的电压输出，位于显示屏下方的壳体内。

传感器的壳体作为保护光学元件和电子组件的外部结构，其材料选择需满足以下关键要求：具备足够的机械强度，以承受冲击、振动及外力作用，确保内部元件的安全；同时，在满足刚性的前提下尽可能减轻重量，以提升传感器的便携性。基于以上要求，本研究选择 6061 铝合金作为壳体的主要材料，并辅以表面阳极氧化处理。6061 铝合金具有优异的强度重量比，既能提供充足的机械强度，又能有效减轻设备重量，提升便携性。此外，经过阳极氧化处理的铝合金可形成致密的氧化膜，提高耐腐蚀性。铝合金良好的可加工性也使其能够满足传感器壳体复杂的结构设计需求。

根据上述研究内容，按照设计方案完成了传感器的组装，最终得到的实物样机如图 3-13 所示。图 3-14 为传感器样机内部结构图。该传感器成功集成了光路

系统、信号处理与显示系统，能够有效感知外界施加的力并进行可视化显示，为后续的实验研究和应用提供了可靠的基础。

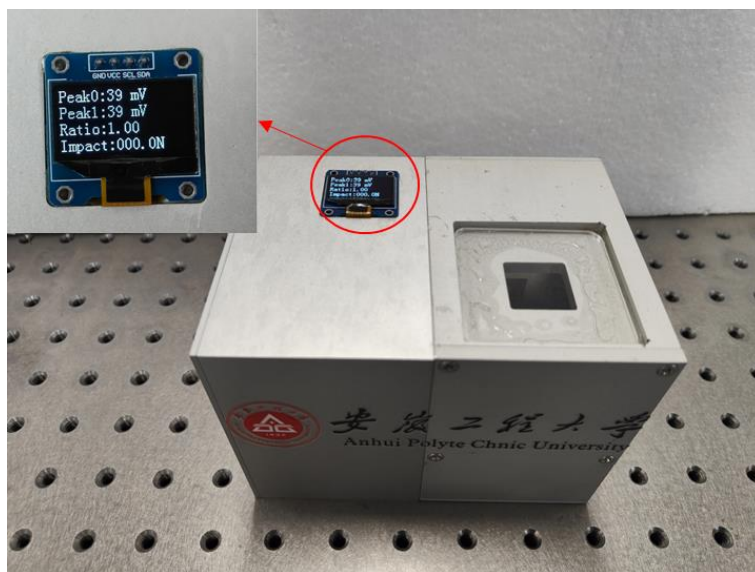


图 3-13 基于力致发光光强比的冲击力传感器实物样机

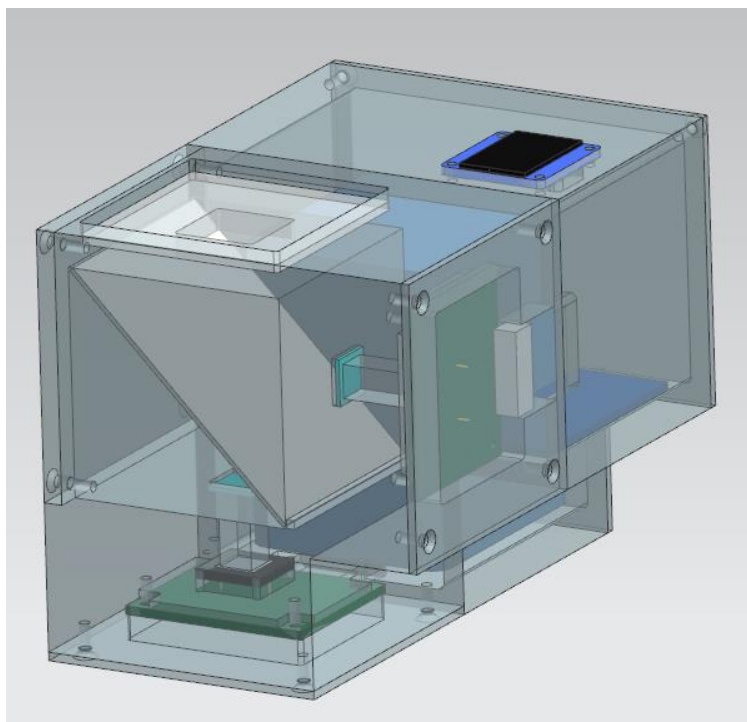


图 3-14 传感器样机内部结构图

3.5 本章小结

本章详细描述了基于力致发光光强比的冲击力传感器的设计与实现过程。通

过阐述传感器的基本工作原理，明确了力学信号的获取、转换和处理，为传感器的整体设计奠定了技术基础。在光路系统设计部分，分析了关键光学元件的选型与布局优化，重点解决了光信号的分离、传输问题。信号处理与显示系统的设计中，详细介绍了从力致发光信号采集到数据处理及可视化呈现的全过程，确保检测结果的准确性和直观性。机械结构设计则从光学元件与电子组件的安装、固定，结合壳体材料、抗振性等多方面优化，提供了稳定运行的机械保障。在上述研究和设计的基础上，完成了传感器样机的制作。本章的内容系统地展示了冲击力传感器在光学、信号处理及机械结构设计方面的整体实现思路，为后续的实验验证和性能评估奠定了坚实的基础。

第4章 基于力致发光光强比的冲击力传感器的实验与分析

基于前三章的内容，完成了基于力致发光光强比的冲击力传感器的设计，并成功制作了传感器样机。本章还需搭建实验测试系统，对传感器进行标定与性能测试，以评估其在不同冲击力条件下的响应特性和性能参数。

4.1 传感器测试系统搭建

传感器测试系统主要由小球冲击系统、力致发光柔性薄膜、传感器样机、电源及示波器构成，其工作示意图如图 4-1 所示。

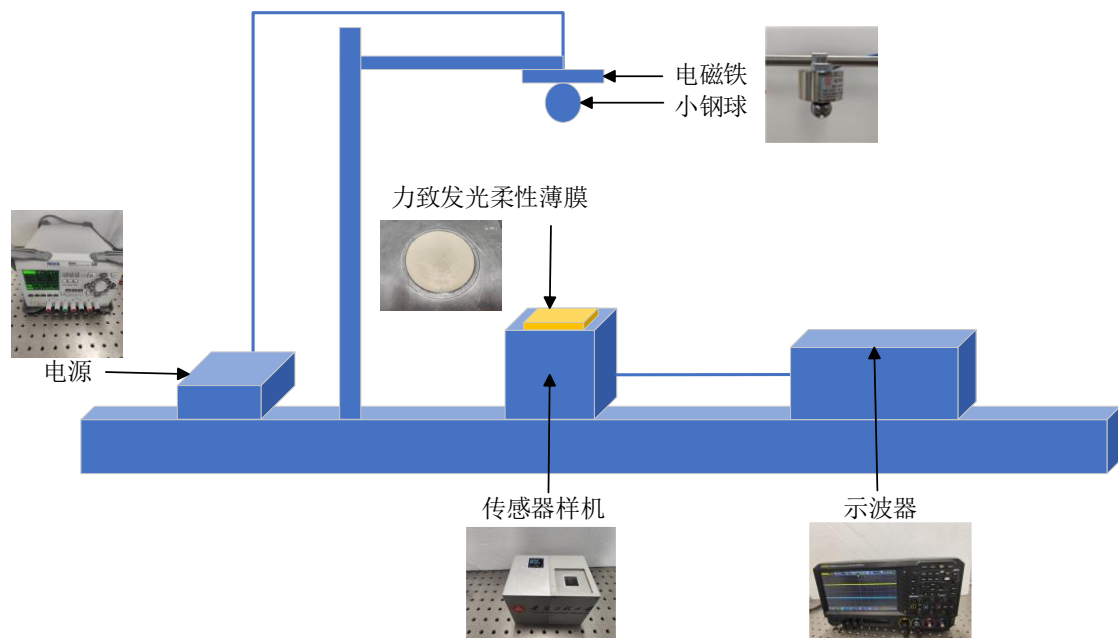


图 4-1 传感器测试系统示意图

(1) 小球冲击系统

小球冲击系统是基于力致发光光强比的冲击力传感器性能测试中不可或缺的实验装置，其主要功能是为传感器提供可控的冲击力来源，用以模拟真实的力学环境。通过这一系统，可以研究传感器在不同冲击力条件下的响应特性，并进行相关数据的采集与分析。小球冲击系统使用电磁铁作为小球（质量 32 g，直径 20 mm）的释放装置，通过电源控制电磁铁通断电，实现小球的自由释放。电磁铁的释放高度可以通过固定支架调节，以实现不同冲击力的实验条件。冲击平台由透明亚克力板制成，其表面粘贴力致发光柔性薄膜。亚克力板的透明特性便于

光信号的采集，同时提供了稳定的冲击平台。

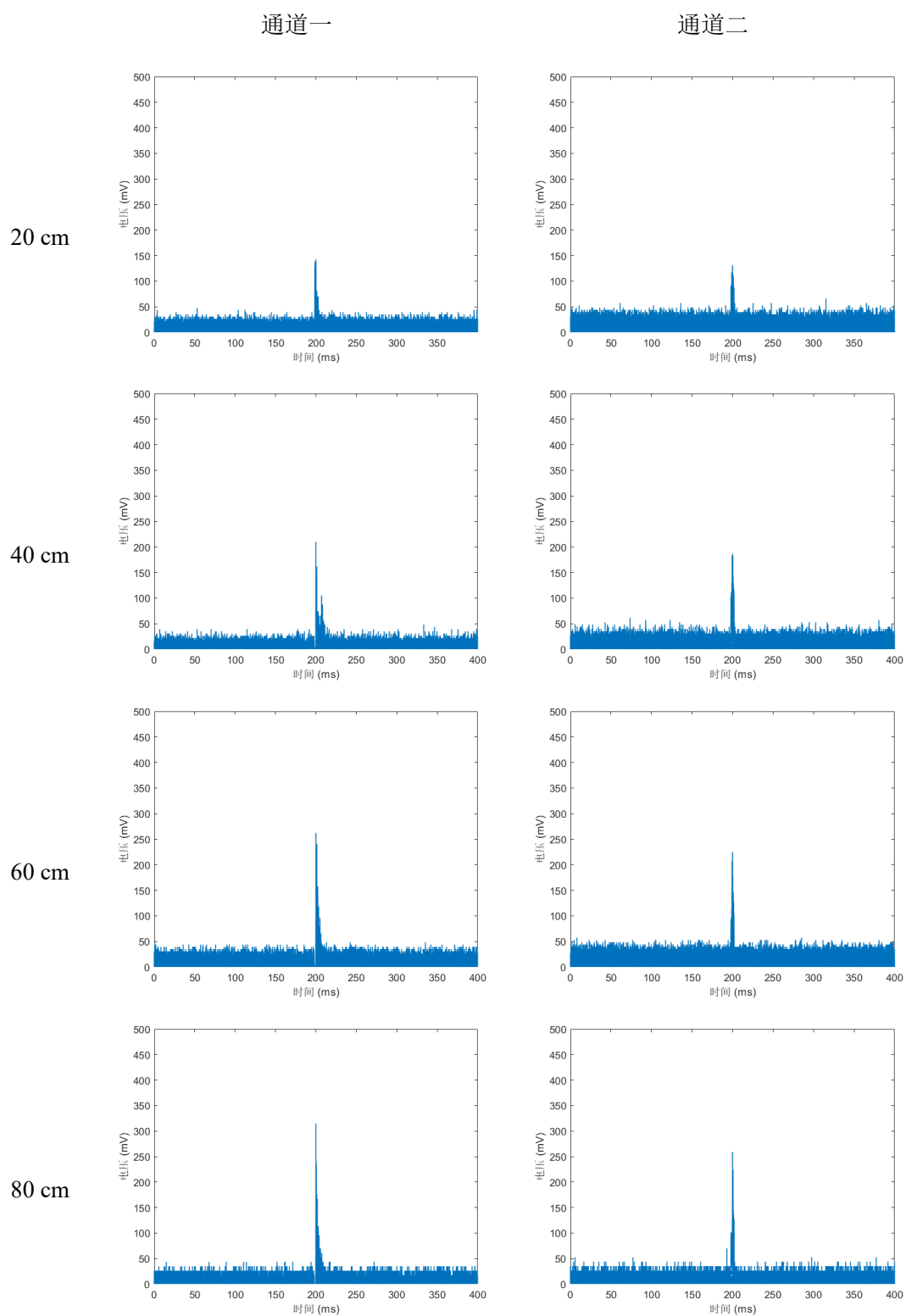
(2)力致发光柔性薄膜

本实验采用第二章中方案 3（3 g ZnS:Mn²⁺和 3 g ZnS:Cu²⁺）的柔性薄膜进行传感器的标定实验。

4.2 传感器标定实验

作为测量仪器，在基于力致发光光强比的冲击力传感器投入使用前，建立光强比（电压峰值比）与冲击力之间的关系是关键步骤。这一过程涉及标定实验和数据拟合，以确保传感器能够在实际应用中的准确性和可靠性。

在标定实验中，小球冲击力致发光柔性薄膜所产生的信号可以通过示波器直观展示，为分析传感器性能提供了重要依据。在示波器上，电压脉冲信号的幅值与冲击力的大小呈正比例线性关系，而信号的脉冲宽度则反映了小球作用于柔性薄膜的接触时间。本实验中，采用小钢球（质量为 32 g，直径为 20 mm）作为冲击源，以确保在相同高度下重复实验的冲击力一致。通过调整小球的自由落体高度，可以精确控制冲击力的大小，为传感器标定提供了可重复的测试条件。通过施加已知大小的冲击力，同时实时采集传感器在示波器显示的电压信号，可以得到力致发光材料的响应曲线。这一过程中，确保加载过程的精确性和数据采集的一致性至关重要。为了进一步提升数据的可靠性，还需确保加载过程的几何精度和力的作用点准确落在传感器的感测区域内。因此，在实验装置上设置钢管引导小球砸在同一个区域。本实验中，将小球距离力致发光柔性薄膜的高度分别设置为 20 cm、40 cm、60 cm、80 cm、100 cm、120 cm，从较低的高度逐步增加，同时用示波器记录各级别冲击下对应的电压信号，将得到的数据用 Matlab 处理，得到的结果如图 4-2 所示。从图中可以看出随着小球落下高度增加，通道一（520 nm 窄带滤光片）与通道二（580 nm 窄带滤光片）的电压峰值均增加。



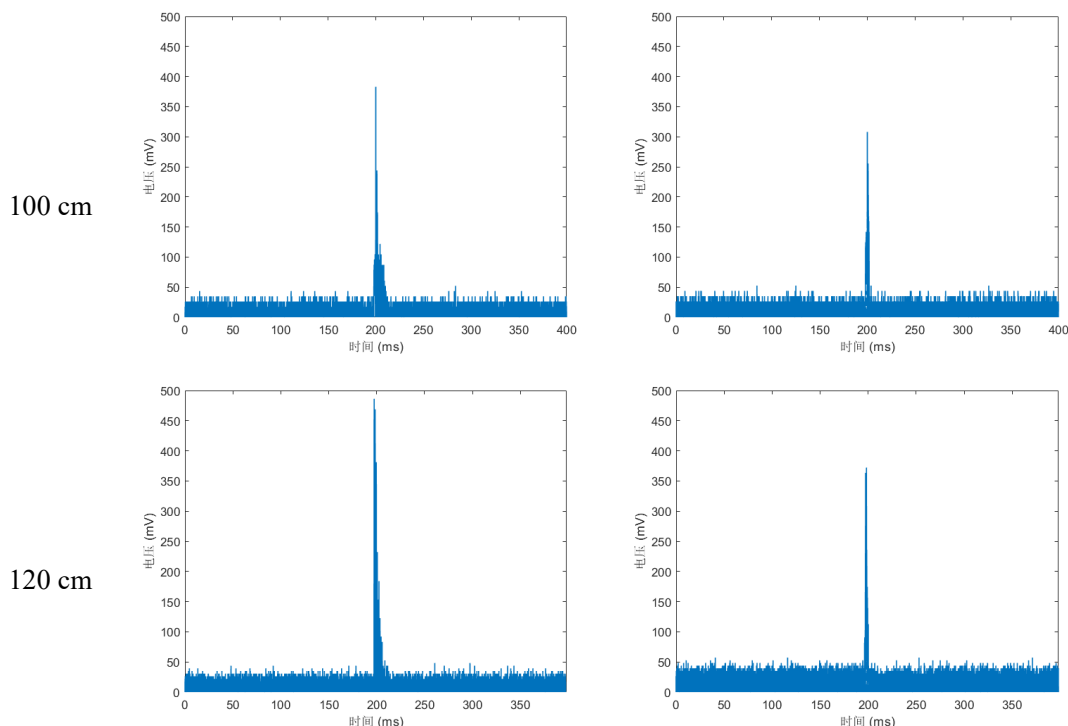


图 4-2 不同高度冲击下对应的电压信号

为了消除系统噪声对测量结果的影响，分别计算每个通道的峰值电压与噪声之间的差值，并将这两个差值的比值作为电压峰值比。根据公式(2-1)、(2-2)和(2-3)，可计算小球在不同高度下对柔性薄膜产生的最大冲击力。表 4-1 汇总了小球在不同高度下的冲击力计算结果，并分析了这些冲击力与电压峰值比之间的关系。

表 4-1 小球不同下降高度对应的最大冲击力与电压峰值比的关系

下降高度(cm)	最大冲击力(N)	电压峰值比
20	57.68	1.13
40	87.42	1.17
60	111.52	1.20
80	132.52	1.25
100	151.60	1.28
120	169.02	1.33

通过对表中最大冲击力与电压峰值比的数据进行线性拟合，得出了图 4-3 所示的结果。拟合得到的线性方程为 $Y=1.01532+0.00178X$ ，其拟合优度为 $R^2=0.98627$ 。这一高度线性的关系为基于力致发光光强比的冲击力检测方法提供了稳定且可靠的标定依据，表明可通过测量电压峰值比直接推算出相应的最大冲

击力。

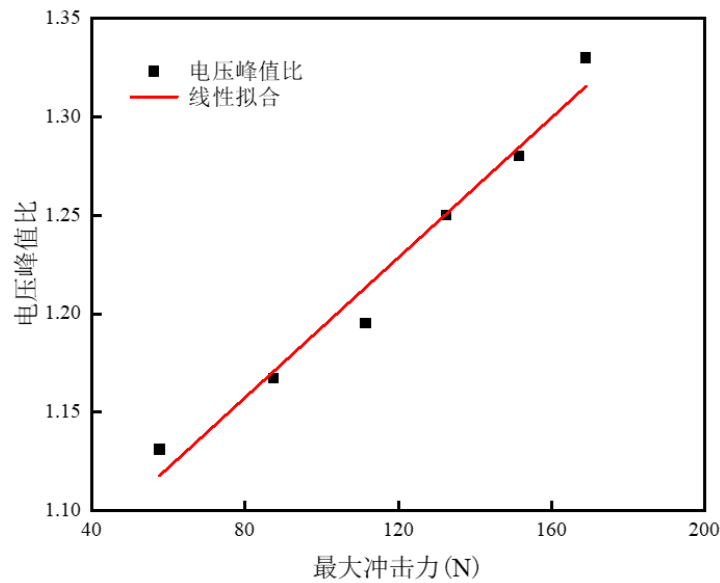


图 4-3 小球最大冲击力与电压峰值比的关系

基于上述线性拟合结果，将所得线性关系 $Y=1.01532+0.00178X$ 应用于冲击力测量系统中。为了实现实时数据转换与显示，该线性方程被嵌入到单片机运行的代码中，使其能够根据测得的电压峰值比直接计算对应的最大冲击力。在具体实现过程中，单片机通过信号采集模块获取传感器的电压峰值比，并利用拟合方程进行数值计算，将其转换为冲击力值。随后，计算结果通过数据处理模块传输至显示系统，使冲击力的数值能够实时显示在 OLED 屏幕。这一嵌入式实现不仅提升了系统的自动化程度，还提高了冲击力测量的效率和便捷性，为力致发光光强比在冲击力检测领域的实际应用提供了可靠的技术支持。

4.3 传感器性能测试

4.3.1 响应范围测试

响应范围是衡量传感器适用性的重要指标，它表示传感器能够准确测量冲击力的范围。采用小球冲击法对传感器的响应范围进行测试，能够有效评估传感器在不同冲击力条件下的工作状态及其测量准确性。为了评估冲击力传感器的有效测量范围，本实验采用小球冲击法进行测试，并以公式(2-1)、(2-2)和(2-3)计算出的最大冲击力作为最大冲击力理论值。实验逐步增加小球的下落高度，使小球自由

下落冲击传感器，并记录传感器的实际测量值。图 4-4 展示了最大冲击力理论值和最大冲击力测试值之间的关系，实验结果表明：当下落高度小于 5 cm 时，传感器未能检测到有效信号，直到 5 cm 处才开始显示冲击力数值 24.8 N。这表明，传感器的最低检测阈值对应的冲击力为 5 cm 处的冲击力，即传感器在此冲击力以下无法有效响应。在 5 cm(对应 24.8 N)至 185 cm(对应 216.6 N)之间，传感器测量值随着冲击力增加呈现较好的线性关系，表明该范围是传感器的有效工作区间，测量精度较高。当下落高度超过 185 cm 后，尽管下落高度继续增加，但传感器的测量冲击力数值不再线性增长，趋于稳定。这表明传感器的薄膜发光强度在 216.6 N 时可能已达到信号饱和状态，导致其无法继续准确测量更大的冲击力。

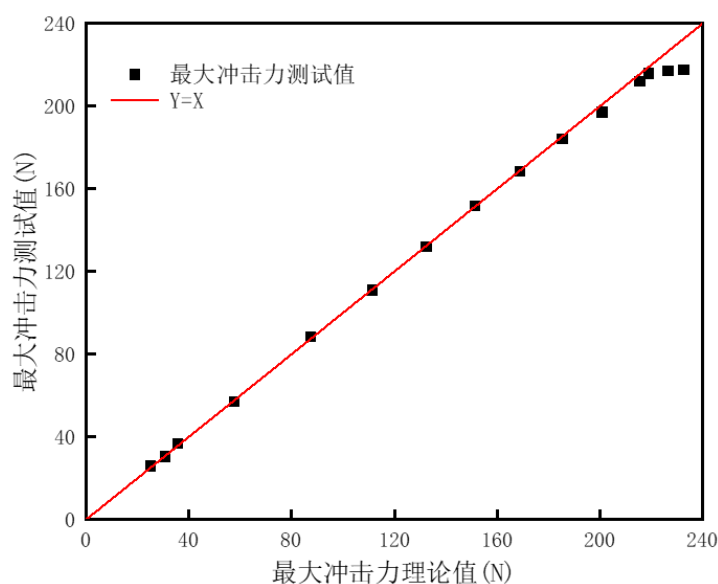


图 4-4 传感器冲击力响应曲线

4.3.2 灵敏度测试

灵敏度是评价冲击力传感器性能的关键参数，是指传感器电压峰值比变化与冲击力变化之间的比值。对于线性传感器，其灵敏度可通过曲线的斜率来衡量。斜率越大，表明传感器对冲击力变化的响应越灵敏，即更小的冲击力变化即可引起较明显的信号输出变化。为了研究冲击力传感器的灵敏度，本节通过让小球从不同高度自由下落冲击传感器，并同步测量和记录传感器的输出电压峰值比。为了使得实验测试更加准确，在 5 cm 到 185 cm 的下落高度内设置了更多的测量点。实验过程中，采用传感器显示屏显示的数据记录每次冲击对应的电压峰值比。通过对不同冲击力对应的电压峰值比进行线性拟合，得到如图 4-5 所示的冲击力

传感器灵敏度曲线。由图知，曲线的斜率即为传感器的灵敏度大小，计算结果表明传感器的灵敏度为 0.00178 N^{-1} 。

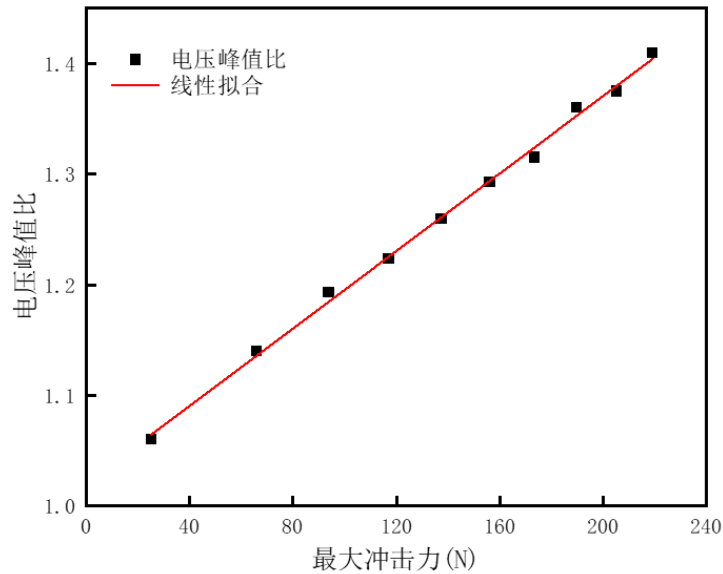


图 4-5 冲击力传感器的灵敏度拟合曲线

4.3.3 重复性测试

传感器的重复性是指在相同的工作条件下，传感器在多次测量相同输入信号时，其输出信号的一致性 or 稳定性。较高的测量重复性意味着传感器具有良好的稳定性和可靠性，从而确保测试数据的可重复性与可信度。本研究的传感器重复性主要取决于力致发光薄膜的发光稳定性，因此，我们利用线性伺服电机，在持续施加 90 N 冲击力的条件下，对力致发光薄膜的发光性能进行了稳定性与重复性测试。实验过程中，线性伺服电机以固定的冲击参数重复作用于力致发光薄膜，并连续记录其发光强度随时间的变化趋势，确保数据能够反映传感器的长期稳定性。实验结果如图 4-6 所示，经过超过 1000 次的反复冲击后，力致发光薄膜的发光性能依然保持在一个稳定的范围内，未出现明显的衰减或漂移现象。这一现象充分验证了力致发光薄膜在冲击力传感器中的稳定性和可重复性，为该传感器在可持续应用领域的推广与实际应用提供了有力支持。

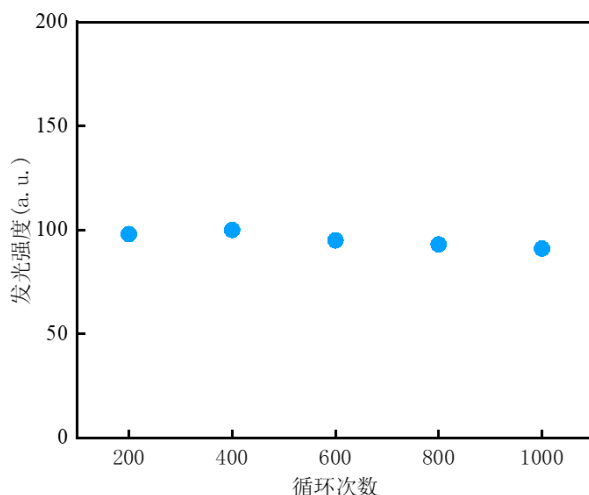


图 4-6 循环次数与发光强度的关系

4.3.4 测量误差测试

测量误差是指测量结果与真实值之间的偏差，误差的大小直接影响测量系统的准确性和可靠性。在冲击力传感器的应用中，误差的控制尤为重要。通过分析误差分布，可以评估传感器的精度、稳定性和重复性，为传感器的标定和误差补偿提供依据。在实际应用中，误差的控制可以提高测量数据的可信度，确保测量系统能够在特定精度要求下稳定工作。为了评估传感器的测量误差，本研究选取小球自由落体冲击实验，记录传感器测得的最大冲击力值，并与理论值比较计算测量误差，绘制误差曲线，如图 4-7 所示。实验结果表明，在 24.8 N~216.6 N 冲击力范围内，误差非常稳定，保持在较低水平（2%左右），表明传感器在这一冲击力范围内测量精度较高。

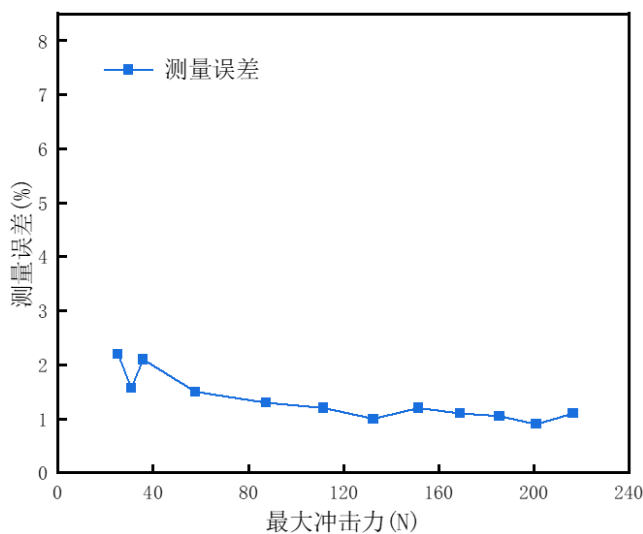


图 4-7 冲击力传感器的误差曲线

4.3.5 抗环境干扰测试

抗环境干扰能力是冲击力传感器在实际应用中的重要特性,它决定了传感器在不同外部环境条件下的测量稳定性和可靠性。环境干扰主要包括外界光照变化、测量距离变化等因素,这些可能会对力致发光薄膜的光信号检测产生影响,进而影响冲击力的测量精度。因此,为了评估传感器的抗环境干扰能力,本文设计了不同测量距离测试实验以及白天与黑夜的环境光影响测试实验,以全面验证其稳定性。

在距离影响测试实验中,分别在三种不同距离条件下测量传感器的响应特性:(1)将力致发光薄膜直接放置在传感器进光口表面,使其与传感器光学检测系统完全贴合;(2)将薄膜放置在距离传感器进光口 10 cm 处,形成一定的空间间隔;(3)将薄膜放置在距离传感器进光口 20 cm 处,进一步增加传感器与薄膜之间的距离。实验采用相同的冲击方式,并记录传感器的输出信号,分析不同距离下的测量稳定性。图 4-8 展示了薄膜距离传感器进光口不同距离的电压峰值比情况。实验结果表明,在 0 cm、10 cm 和 20 cm 三种距离下,传感器测量的冲击力基本保持一致,测量误差变化不显著。这表明,该传感器对测量距离的变化不敏感,具有良好的抗距离干扰能力。这一现象主要归因于传感器采用光强比值方法,通过检测相对光强变化而非绝对光强值,从而有效消除了因光传播距离变化引起的信号衰减,使测量结果具有较强的稳定性和一致性。

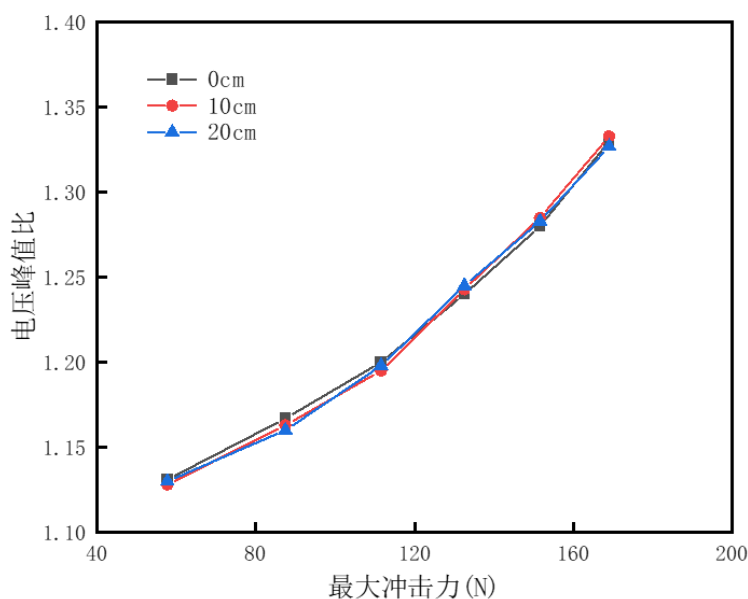


图 4-8 薄膜距离传感器进光口不同距离的电压峰值比与最大冲击力的关系

在环境光干扰测试实验中，分别在白天强环境光和黑暗环境两种条件下进行测量，以评估环境光对力致发光信号检测的影响。实验采用相同的实验条件，并在自然光较强的白天环境和完全黑暗的实验室环境中分别进行测量。图 4-9 展示了不同环境光下传感器测量的峰值比情况。实验结果表明，无论在白天还是黑夜，传感器测量的冲击力均保持稳定，误差变化较小，说明其对环境光干扰的抑制能力较强。这种稳定性主要得益于传感器内部电路设计中的隔直电路，该电路可自动过滤掉不随冲击力变化的光信号，仅保留因冲击力作用而产生的光强变化。因此，尽管环境光照度可能发生变化，但由于背景光恒定被隔直电路有效滤除，传感器仍能准确提取力致发光信号，从而保证测量的稳定性。

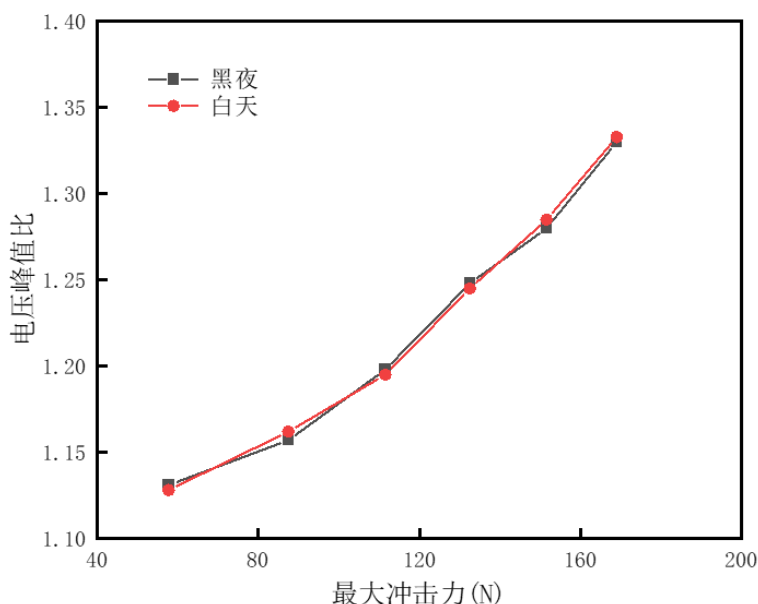


图 4-9 不同环境光下电压峰值比与最大冲击力的关系

4.4 应用展示

本节展示了基于力致发光光强比的冲击力传感器在乒乓球击打力度测试场景中的应用。将柔性发光薄膜粘贴于一块透明亚克力板的表面，并将冲击力传感器固定于亚克力板后方区域。挥拍击打乒乓球并使球体撞击薄膜，薄膜产生瞬时发光，传感器采集光信号并计算冲击力，实现对每次球体撞击薄膜力度的实时测量。图 4-10 为乒乓球冲击力测试实验平台。图 4-11 为乒乓球冲击力测试实验平台实物图。

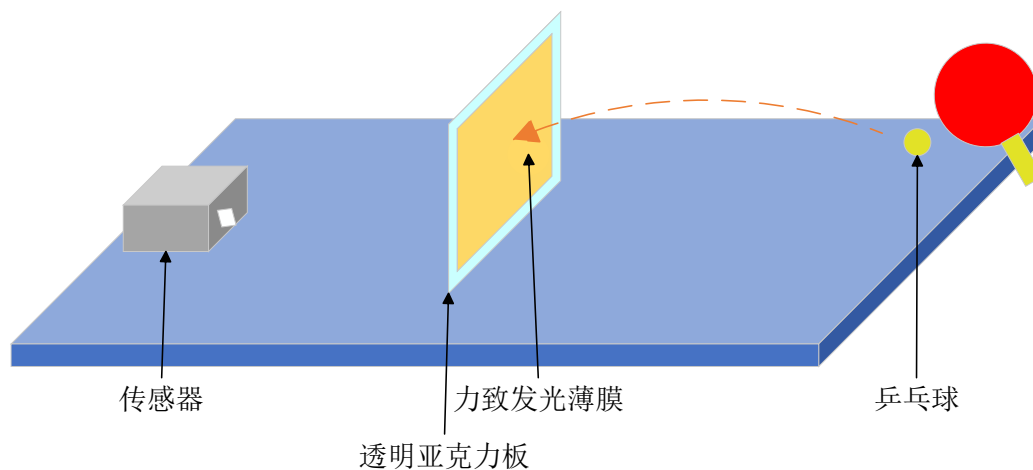


图 4-10 乒乓球冲击力测试实验平台

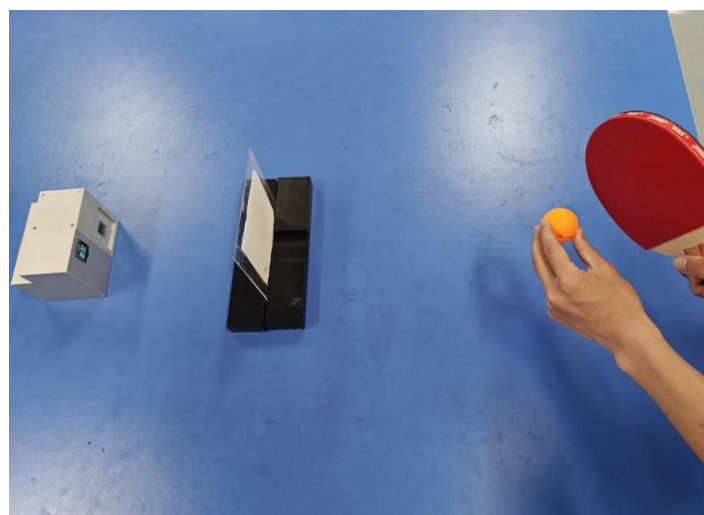


图 4-11 乒乓球冲击力测试实验平台实物图

选取两名具备基本水平的乒乓球选手（编号为 A、B），要求选手使用最大力度进行 10 次扣杀击球测试，记录每次冲击力大小，并统计这些测试结果的平均值与最大值，测试结果如表 4-2 所示。由表中数据可见，选手 B 的平均冲击力值和最大冲击力值均高于选手 A，反映出其击球发力更强。

表 4-2 乒乓球选手测试结果

选手	测试次数	平均冲击力(N)	最大冲击力(N)
A	10	30.9	32.8
B	10	32.6	34.3

本应用展示了基于力致发光光强比的冲击力传感器在乒乓球击打力度测试中的可行性，可用于乒乓球选手的运动监测以及个性化训练评估。

4.5 本章小结

在传感器设计的基础上,本研究成功开发了一种基于力致发光光强比的冲击力传感器样机,并搭建了完整的实验测试系统。通过小球自由下落的冲击实验,分析了电压峰值比与冲击力之间的关系,并基于实验数据建立了线性拟合曲线,从而为传感器的标定提供了可靠的依据。在性能测试方面,针对传感器的响应范围、灵敏度、重复性和抗环境干扰等关键指标进行了评估。实验结果表明,该传感器在 24.8 N~216.6 N 之间表现出良好的线性响应范围,并且线性拟合结果表明灵敏度为 0.00178 N^{-1} 。在多次冲击实验中,传感器测量值的波动较小,显示出较高的重复性和长期稳定性。此外,通过测试不同测量距离和外界光照条件对传感器测量结果的影响,进一步验证了其对环境干扰的适应能力和稳定性。最后,通过在乒乓球训练场景中的击球测试实验,验证了该基于力致发光光强比的冲击力传感器在乒乓球击打力度测试中的可行性,在乒乓球选手的运动监测以及个性化训练评估方面具有推广潜力。

第 5 章 总结与展望

5.1 论文总结

本研究设计并制作了基于力致发光光强比的冲击力传感器,展示了力致发光材料结合现代电子技术进行冲击力测量的可行性与优势,推动了基于力致发光原理的传感器在冲击力检测中的应用。具体研究内容如下:

(1)力致发光柔性薄膜的制备与冲击光谱响应。本研究系统介绍了采用不同 ZnS:Mn^{2+} 和 ZnS:Cu^{2+} 质量比的柔性薄膜的制备工艺过程,并利用扫描电子显微镜 (SEM) 截面形貌图验证了两种发光粉末在 PDMS 基体中的均匀分布。在实验部分,通过搭建落球实验平台,成功模拟不同冲击力条件并定量评估了柔性薄膜的发光强度变化。实验结果表明,在方案 1 (6 g ZnS:Mn^{2+}) 和方案 5 (6 g ZnS:Cu^{2+}) 的柔性薄膜中,力致发光峰值强度与小球最大冲击力呈现良好的线性关系,且 ZnS:Cu^{2+} 材料在力致发光过程中对冲击力的响应更为敏感。此外,方案 2 (4 g ZnS:Mn^{2+} 和 2 g ZnS:Cu^{2+})、方案 3 (3 g ZnS:Mn^{2+} 和 3 g ZnS:Cu^{2+})、方案 4 (2 g ZnS:Mn^{2+} 和 4 g ZnS:Cu^{2+}) 的柔性薄膜光谱峰值位置与 ZnS:Mn^{2+} 和 ZnS:Cu^{2+} 的典型发光中心相吻合,这种复合材料的发光光谱是两种材料发光光谱的简单叠加。此外,本研究提出了一种基于力致发光光强比的冲击力检测方法,该方法对探测距离的敏感性较低,相较于传统依赖绝对光强的检测方法,具备更强的抗干扰能力和更高的适用性。本研究全面分析了基于 ZnS:Mn^{2+} 和 ZnS:Cu^{2+} 的力致发光柔性薄膜在冲击力检测中的光谱响应特性及其优越性能,为后续传感器的优化设计与性能评估提供了重要的理论支持与实验依据。

(2)基于力致发光光强比的冲击力传感器的设计。通过阐述传感器的基本工作原理,明确了力学信号的获取、转换和处理,为传感器的整体设计奠定了技术基础。在光路系统设计部分,分析了关键光学元件的选型与布局优化,重点解决了光信号的分离、传输问题。信号处理与显示系统的设计中,详细介绍了从力致发光信号采集到数据处理及可视化呈现的全过程,确保检测结果的准确性和直观性。机械结构设计则从光学元件与电子组件的安装、固定,结合壳体材料、抗振性等多方面优化,提供了稳定运行的机械保障。在上述研究和设计的基础上,完

成了传感器样机的制作。此部分内容系统地展示了冲击力传感器在光学、信号处理及机械结构设计方面的整体实现思路,为后续的实验验证和性能评估奠定了坚实的基础。

(3)基于力致发光光强比的冲击力传感器的实验与分析。在传感器设计的基础上,本研究成功开发了一种基于力致发光光强比的冲击力传感器样机,并搭建了完整的实验测试系统。通过小球自由下落的冲击实验,分析了电压峰值比与冲击力之间的关系,并基于实验数据建立了线性拟合曲线,从而为传感器的标定提供了可靠的依据。在性能测试方面,针对传感器的响应范围、灵敏度、重复性和抗环境干扰等关键指标进行了评估。实验结果表明,该传感器在 24.8 N~216.6 N 之间表现出良好的线性响应范围,并且线性拟合结果表明灵敏度为 0.00178 N^{-1} 。在多次冲击实验中,传感器测量值的波动较小,显示出较高的重复性和长期稳定性。此外,通过测试不同测量距离和外界光照条件对传感器测量结果的影响,进一步验证了其对环境干扰的适应能力和稳定性。最后,通过在乒乓球训练场景中的击球测试实验,验证了该基于力致发光光强比的冲击力传感器在乒乓球击打力度测试中的可行性,在乒乓球选手的运动监测以及个性化训练评估方面具有推广潜力。

5.2 研究展望

本文研究了 ZnS:Mn^{2+} 和 ZnS:Cu^{2+} 力致发光材料与 PDMS 复合形成的薄膜,并将其应用于冲击力检测。通过结合光学元器件和信号处理系统,成功构建了冲击力传感器,并进行了标定实验和性能测试。尽管在实验中取得了一定的进展,但由于实验条件的限制以及理论研究的不足,本研究仍存在一些不足之处,且部分问题仍需进一步探讨。具体不足之处如下:

(1)本研究主要针对 ZnS:Cu^{2+} 和 ZnS:Mn^{2+} 力致发光材料与 PDMS 的混合比例为 1:1 的情况进行了研究,但尚未深入探讨其他比例的力致发光材料在 PDMS 基体中的光响应特性。未来的研究应进一步研究材料浓度对薄膜光学响应的影响,探索其对冲击力检测精度的作用,并优化薄膜传感器的设计与制备工艺。

(2)由于实验仅验证了对小球冲击的响应,尚未考察传感器在更高频率冲击下的响应能力。某些应用可能涉及高频冲击或快速振动,在这种情况下,传感器

的响应速度、频率响应和数据采集能力将成为关键。未来的研究可以尝试在不同频率下测试传感器的响应，优化其在高频冲击下的性能。

(3)力致发光材料，尤其是 ZnS:Mn^{2+} 和 ZnS:Cu^{2+} ，可能存在老化或光衰减问题。在长期使用过程中，材料的发光强度可能会降低，影响测量精度。未来的研究可以探索材料的稳定性，尤其是在长时间暴露于外部环境中的情况下。可以考虑评估材料的耐光性、耐热性和耐湿性等，确保传感器在长期使用中不会出现显著的性能下降。

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] Terasaki N, Xu C N. Historical-log recording system for crack opening and growth based on mechanoluminescent flexible sensor[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 13(10): 3999-4004.
- [3] Liu L S, Xu C N, Yoshida A, et al. Scalable elasticoluminescent strain sensor for precise dynamic stress imaging and onsite infrastructure diagnosis[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, 4(1): 1800336.
- [4] 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.
- [5] V K T, D D P. To a question on the possibility of using mechanoluminescent sensor elements with area-distributed sensitivity in aerospace engineering[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 734012007-012007.
- [6] Klein C, Engler H R, Henne U, et al. Application of pressure-sensitive paint for determination of the pressure field and calculation of the forces and moments of models in a wind tunnel[J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 39(2): 475-483.
- [7] M. S G, A. W H, P. N B, et al. Developing a phosphor-based health monitoring sensor suite for future spacecraft[J]. *Sensors for Propulsion Measurement Applications*, 2006, 622262220B-62220B-12.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Fujio Y, Xu C N, Terasawa Y, et al. Sheet sensor using SrAl₂O₄: Eu mechanoluminescent material for visualizing inner crack of high-pressure

- hydrogen vessel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(2): 1333-1340.
- [11] 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.
- [12] 王莎莎, 胡特特. 可同时识别拉伸与压力的柔性传感器设计与应用[J]. 仪表技术与传感器, 2021, (11): 1-6+15.
- [13] Wang C, Yu Y, Yuan Y, et al. Heartbeat-Sensing Mechanoluminescent Device Based on a Quantitative Relationship between Pressure and Emissive Intensity[J]. Matter, 2020, 2(1): 181-193.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Yinming Z, Yang L, Yongqian L, et al. Development and Application of Resistance Strain Force Sensors.[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2020, 20(20): 5826-5826.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 国外研发超高灵敏度 MEMS 加速度传感器[J]. 机床与液压, 2019, 47(15): 175.
- [22] DaeYi J, Bonyong K. Comparative Study of Piezoelectric and MEMS Accelerometers for Vibrational Measurements[J]. JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, 2019, 39(3): 168-175.
- [23] Xie Y, Li Z. Triboluminescence: recalling interest and new aspects[J]. CHEM,

- 2018, 4(5): 943-971.
- [24] Jha P, Chandra B P. Survey of the literature on mechanoluminescence from 1605 to 2013[J]. Luminescence, 2015, 8(29): 977-993.
- [25] Chakravarty A, Phillipson T E. Triboluminescence and the potential of fracture surfaces [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(15): 2175.
- [26] Walton A J. Triboluminescence [J]. Advances in Physics, 1977, 26(6): 887-948.
- [27] Longchambon H. Study of the spectrum of the light emitted in the triboluminescence of sugar[J]. Journal of the Franklin Institute, 1922, 195: 269-270.
- [28] Hurt C R, Mcavoy N, Bjorklund S, et al. High Intensity Triboluminescence in Europium Tetrakis (Dibenzoylmethide)-triethylammonium [J]. Nature, 1966, 212 (5058): 179–180.
- [29] Xu C N, Watanabe T, Akiyama M, et al. Direct view of stress distribution in solid by mechanoluminescence [J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(17): 2414-2414.
- [30] Akiyama M, Xu C N, Matsui h, et al. Recovery phenomenon of mechanoluminescence from $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7\text{:Ce}$ by irradiation with ultraviolet light [J]. Applied Physics Letters, 1999, 75(17): 2548.
- [31] Xu C N, Watannabe T, Akiyama M, et al. Artificial skin to sense mechanical stress by visible light emission[J]. Applied Physics Letters, 1999, 74(9): 1236-1238.
- [32] Chandra B P. Mechanoluminescence induced by elastic deformation of coloured alkali halide crystals using pressure steps [J]. Journal of Luminescence, 2008, 128(7): 1217-1224.
- [33] Rao R P, Gasiot J, Fillard J P. Optically stimulated luminescence and cathodoluminescence of MgS:Eu phosphors [J]. Journal of Luminescence, 1984, 31-32(part-P1): 213-215.
- [34] Shu Z, Chen Q, Wang Y, et al. Synthesis and photoactivity of CdS photocatalysts modified by polypyrrole [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(17): 13030---13036.
- [35] Ummartyotin S, Bunnak N, Juntaro J, et al. Synthesis and luminescence properties of ZnS and metal (Mn, Cu)-doped- ZnS ceramic powder [J]. Solid State Sciences,

- 2012, 14(3): 299-304.
- [36] Zhang H, Hiroshi Y, Nao T, et al. Stress-induced mechanoluminescence in SrCaMgSi₂O₇: Eu [J]. Electrochemical and solid-state letters, 2007, 10(10): J129-J131.
- [37] Hong W, Zhang, Nao, et al. Mechanoluminescence of Europium-Doped SrAMgSi₂O₇ (A=Ca, Sr, Ba) [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2009, 48(4):04C109-04C109-4.
- [38] Shrivastava R, Kaur J, Chandra B P. Mechanoluminescence of Ba₂MgSi₂O₇ doped with Eu²⁺ and Dy³⁺ phosphor by impulsive deformation [J]. Luminescence, 2015, 30(8): 1207-1211.
- [39] Zhang L, Xu C-N, Yamada H, et al. Upgrade Mechanoluminescence by Sr²⁺ Substitution in CaAl₂Si₂O₈:Eu²⁺ [J]. Key Engineering Materials, 2010, 421-422(315-318).
- [40] Botterman J, Eeckhout K V D, Baere I D, et al. Mechanoluminescence in BaSi₂O₂N₂:Eu [J]. Acta Materialia, 2012, 60(15): 5494-5500.
- [41] Akiyama M, Xu C N, Nonaka K. Improvement in Mechanoluminescence Intensity of Ca₂Al₂SiO₇: Ce by the Statistical Approach [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2003, 150(5): H115-H118.
- [42] Li C. Xu C N, Zhang L., et al. Dynamic visualization of stress distribution on metal by mechanoluminescence images [J]. Key Engineering Materials, 2009, 388:265-268,
- [43] Zhang H, Yamada H, Terasaki N, et al. Ultraviolet mechanoluminescence from SrAl₂O₄: Ce and SrAl₂O₄: Ce, Ho [J]. Applied Physics Letters, 2007, 91(8): 190.
- [44] Terasawa Y, Xu C N, Yamada H, et al. Near Infra-Red Mechanoluminescence from Strontium Aluminate Doped with Rare-Earth Ions [J]. Iop Conference, 2011, 18(21): 212013.
- [45] Zhang J C, Tang M, Wang X, et al. Elastico-mechanoluminescence properties of Pr³⁺ -doped BaTiO₃-CaTiO₃ diphasic ceramics with water resistance behavior [J]. Ceramics International, 2012, 38(1): S581-S584.
- [46] Zhao H, Wang X, Feng X, et al. Elastico-mechanoluminescence in non-

- piezoelectric $\text{CaTiO}_3:\text{Pr}^{3+}$ [J]. 2016 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, European Conference on Application of Polar Dielectrics, and Piezoelectric Force Microscopy Workshop (ISAF/ECAPD/PFM), F, 2016 [C].
- [47] Sharma Ravi, Bisen D. P., Chandra B. P. Experimental and Theoretical Study of the Mechanoluminescence of $\text{ZnS}:\text{Mn}$ Nanoparticles [J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44(10): 3312-3321.
- [48] Jiqing C, Jihong Y, Chunxiao L, et al. A dual-response flexible capacitive pressure sensor based on $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ [J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2022, 33(32): 24794-24802.
- [49] Gu G Q, Xu G Z, Shen F, et al. Flexible-elastic deformation measurement of $\text{ZnS}:\text{Cu}^{2+}$ mechanoluminescent film using visual inspection and digital image correlation [J]. Metrology and Measurement Systems, 2023, 30(2).
- [50] Xiong P X, Peng M Y, Cao J K, et al. Near infrared mechanoluminescence from $\text{Sr}_3\text{Sn}_2\text{O}_7:\text{Nd}^{3+}$ for in situ biomechanical sensor and dynamic pressure mapping [J]. Journal of the American Ceramic Society, 2019, 102(10): 5899-5909.
- [51] Wu X, Zhu X, Chong P, et al. Sono-optogenetics facilitated by a circulation-delivered rechargeable light source for minimally invasive optogenetics [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(52): 26332-26342.
- [52] Zhang Y Y, Zhang X, Wang H J, et al. Remote regulation of optogenetic proteins by a magneto luminescence microdevice [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 31(4): 2006357.
- [53] Wong M C, Chen L, Tsang M K, et al. Magnetic-induced luminescence from flexible composite laminates by coupling magnetic field to piezophotonic effect [J]. Advanced Materials, 2015, 27(30): 4488-4495.
- [54] Jeong S M, Song S, Lee S K, et al. Color manipulation of mechanoluminescence from stress activated composite films [J]. Advanced Materials, 2013, 25(43): 6194-6200.
- [55] Song S, Song B, Cho C H, et al. Textile-fiber-embedded multiluminescent devices: A new approach to soft display systems [J]. Materials Today, 2020, 32: 46-58.

- [56] Jeong S M, Song S, Seo H J, et al. Battery-Free, Human-motion-powered light-emitting fabric: mechanoluminescent textile[J]. *Advanced Sustainable Systems*, 2017, 1(12): 1700126.
- [57] Park H J, Kim S, Lee J H, et al. Self-powered motion-driven triboelectric electroluminescence textile system[J]. *ACS Applied Materials&Interfaces*, 2019, 11(5): 5200- 5207.
- [58] Zhuang Y X, Xie R J. Mechanoluminescence rebrightening the prospects of stress sensing: a review[J]. *Advanced Materials*, 2021, 33(50): 2005925.
- [59] Zhang Y, Fang Y, Li J, et al. Dual-mode electronic skin with integrated tactile sensing and visualized injury warning[J]. *ACS Applied Materials&Interfaces*, 2017, 9(42): 37493-37500.
- [60] Sang J K, Zhou J Y, Zhang J C, et al. Multilevel static-dynamic anticounterfeiting based on stimuli-responsive luminescence in a niobate structure[J]. *ACS Applied Materials&Interfaces*, 2019, 11(22): 20150-20156.
- [61] Yuan J, Yang Y, Yang X, et al. Regulating the trap distribution to achieve high-contrast mechanoluminescence with an extended saturation threshold through co-doping Nd^{3+} into $\text{CaZnOS:Bi}^{3+}, \text{Li}^{+}$ [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(24): 7689-7696.
- [62] Zhang J C, Pan C F, Zhu Y F, et al. Achieving thermo-mechano-opto-responsive bitemporal colorful luminescence via multiplexing of dual lanthanides in piezoelectric particles and its multidimensional anticounterfeiting[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(49): 1804644.
- [63] Chandra B P, Rathor A S. Classification of Mechanoluminescence [J]. *Crystal Research & Technology*, 1995, 30(7): 885-896.
- [64] 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.
- [65] Tu D, Xu C N, Yoshida A, et al. $\text{LiNbO}_3:\text{Pr}^{3+}$: A Multipiezo Material with Simultaneous Piezoelectricity and Sensitive Piezoluminescence [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(22): 1606904.1-1606914.4.

- [66] Jun-Cheng Zhanga, Xusheng Wangd, Gerard Marriott, et al. Trap-controlled mechano-luminescent materials[J]. Progress in Materials Science, 2019,103:678-742.
- [67] Yu J, Niu Q, Liu Y, et al. Principles, properties, and sensing applications of mechano-luminescence materials[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2023, 11(43): 14968-15000.
- [68] 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.
- [69] WANG X, ZHANG H, YU R, et al. Dynamic pressure mapping of personalized handwriting by a flexible sensor matrix based on the mechanoluminescence process [J]. Advanced Materials, 2015, 27(14): 2324-2331.
- [70] Heimbs S, Heller S, Middendorf P, et al. Low velocity impact on CFRP plates with compressive preload: test and modelling[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(10-11): 1182-1193.
- [71] DaraioC, NesterenkoF V, JinS. Highly nonlinear contact interaction and dynamic energy dissipation by forest of carbon nanotubes[J]. Applied Physics Letters,2004,85(23):5724.
- [72] M J G, V C, J G, et al.Evolution of the trapped charge distribution due to trap emptying processes in a natural aluminosilicate.[J]. Radiation protection dosimetry,2006,119(1-4):93-7.
- [73] Correcher V, Gomez-Ros J, Garcia-Guinea J, et al.Calculation of the activation energy in a continuous trap distribution system of a charoite silicate using initial rise and TL glow curve fitting methods[J]. Radiation Measurements,2007,43(2):269-272.
- [74] 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.
- [75] Yuan Y, Yuan W, Chen Y. Recent advances in mechanoluminescent polymers[J]. Science China Materials, 2016, 59(6): 507-520.
- [76] 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.
- [77] Shohag M A S, Eze V O, Braga Carani L, et al. Fully integrated mechanoluminescent devices with nanometer-thick perovskite film as self-powered flexible sensor for dynamic pressure sensing[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(7): 6749-6756.
- [78] 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).
- [79] Sharma P, Bhagatji A, Tyagi S, et al. Harvesting light from ZnS: Mn: Eu/PVDF mechano-luminescent composite under mechanical impact for energy conversion application[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 353: 114197.
- [80] 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.
- [81] Wu S, Xiong P, Jiang D, et al. Single Tb^{3+} ion doped ratiometric mechanoluminescence for tunable stress visualization[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 469: 143961.
- [82] Wu S, Xiong P, Qin K, et al. Ratiometric mechanoluminescence in single Pr^{3+} -activated $LiGa_5O_8$ [J]. *Luminescence*, 2023, 38(8): 1465-1476.
- [83] 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.
- [84] 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.
- [85] 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.
- [86] 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.
- [87] Zheng L Y, Liu W, Koeckerling M, et al. The elastic properties and strain effects on crystal structures and bandgap of MZnOS ($\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}$): A first-principles study[J]. Solid State Communications, 2025, 399: 115881-115881.
- [88] 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.
- [89] 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.
- [90] 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.
- [91] Stronge W J. Impact Mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
- [92] Chandra B. Development of mechanoluminescence technique for impact studies[J]. Journal of Luminescence, 2011, 131(6): 1203-1210.
- [93] Jeong S M, Song S, Lee S K, et al. Color manipulation of mechanoluminescence from stress-activated composite films[J]. Advanced Materials, 2013, 25(43): 6194-6200.

攻读硕士学位期间学术成果

- [1] Zheng Yanchang, **He Jintao**, Wang Kang, et al. Mechanoluminescence intensity ratio-based two-dimensional plane impact force detection method[J]. Measurement, 2025, 249, 117003. (中科院二区, 已见刊, 导师一作, 本人二作)
- [2] Zheng Yanchang, **He Jintao**, Qian Liyong, et al. HEDGE TRIMMER WITH ADJUSTABLE TRIMMING SHAPE [P]. The Republic of South Africa:ZA202302348A, 2023-6-28. (已授权, 导师一作, 本人二作)

尚德敏学 唯实惟新

