

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407577

闪烁体微纳结构及制备技术研究综述*

王玉洁^{1,2} 吴国新¹ 黄骥² 王坤² 张国龙^{1,2}

(1. 北京信息科技大学机电系统测控北京市重点实验室 北京 100192;

2. 中国计量科学研究院电离辐射计量科学研究所 北京 100029)

摘要: 闪烁体广泛应用于核医学成像、工业无损检测、高能物理放射性测量等众多领域,极大推动了基础科学、医疗科学和工业技术等领域的科技进步与创新。随着应用需求的不断提高,对闪烁体性能要求也越来越高,尤其是更高的光输出产额。将闪烁体与微纳光子学技术研究相结合,通过在闪烁体表面制备微纳结构,利用其对电磁波的调控作用改变光子出射的临界角,能够有效解决因全内反射效应导致闪烁体光输出产额低的技术难题,以实现在更小的剂量下实现相同的辐射效果。本文通过阐述近年来闪烁体微纳结构制备技术的研究进展,全面综述微纳结构调控闪烁体光输出增强的作用机理,归纳总结现有微纳结构制备技术方法,分析不同类型微纳结构对闪烁体光输出产额的影响,并根据闪烁体微纳结构的尺寸对制备技术进行归纳总结,论述了各类型闪烁体微纳结构制备技术的研究应用前景。

关键词: 闪烁体; 光输出产额; 微纳结构; 全内反射; 制备技术

中图分类号: TN305; TL812; TB34 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

Review of research on micro-nano structure and preparation technology of scintillator

Wang Yujie^{1,2} Wu Guoxin¹ Huang Ji² Wang Kun² Zhang Guolong^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory of Measurement and Control of Mechanical and Electrical System, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China; 2. Institute of Ionizing Radiation Metrology, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Scintillators are widely used in many fields such as nuclear medicine imaging, industrial non-destructive testing, and high-energy physical radioactivity measurement, which greatly promotes scientific and technological progress and innovation in the fields of basic science, medical science, and industrial technology. With the continuous improvement of application requirements, the performance requirements of scintillators are getting higher and higher, especially higher light output yield. Combining scintillators with micro-nano photonics technology research, by preparing micro-nano structures on the surface of scintillators and using their regulation of electromagnetic waves to change the critical angle of photon emission, the technical problem of low light output yield of scintillators due to total internal reflection effect can be effectively solved. In order to achieve the same radiation effect at a smaller dose. This paper describes the research progress of scintillator micro-nano structure preparation technology in recent years, comprehensively reviews the mechanism of micro-nano structure regulating scintillator light output enhancement, summarizes the existing micro-nano structure preparation technology methods, analyzes the influence of different types of micro-nano structures on scintillator light output yield, and summarizes the preparation technology according to the size of scintillator micro-nano structure, and discusses the research and application prospects of various types of scintillator micro-nano structure preparation technology.

Keywords: scintillator; optical output yield; micro-nano structure; total internal reflection; preparation technology

0 引言

闪烁体是一种通过吸收高能射线或粒子转换为闪烁发光的材料,自 1896 年世界上最早的闪烁体 CaWO_4 问世以来,闪烁体不断发展。上世纪初, Crookes 发现了 ZnS 闪烁体,为 Rutherford 的 α 粒子散射实验和原子核结构模型的建立奠定了基础。闪烁探测系统的应用范围不断扩大,开展生物医学、军事、工业技术等多领域闪烁体应用成为目前主流研究热点^[1]。闪烁体材料按照化学性质可分为有机和无机闪烁体^[2]。在辐射探测应用时,高光产额对应着更强的能量分辨率、信噪比及灵敏度^[3],如 NaI: TI 、 CsI: TI 、 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO)、 $\text{Lu}_{1.8}\text{Y}_2\text{SiO}_5: \text{Ce}^{3+}$ (LYSO) 等闪烁体备受关注。相较于有机闪烁体,有较高光产额的无机闪烁体得到持续研究与应用。

理想闪烁体应具备高光产额、能量线性、快衰减等特性。无机闪烁体具有原子序数高、密度大、高探测效率、高能量转换率等特性,但衰减时间较长;而有机闪烁体则具有较快衰减时间,但光产额较少。因全内反射效应,闪烁体产生的大部分光子不能被探测器接收。传统提高闪烁体发光效率的方法受到各种限制,如材料选择受物理或化学性质的限制,且可供的闪烁体种类有限,激活剂可能引入杂质或改变结构,控制温度和激发源需要复杂设备。

因此通过制备不同形状、尺寸和分布的微纳结构,减小闪烁光出射的限制,从而实现对闪烁光的光学性质和机理的调控,为其在各种领域的应用带来更多可能性。通过引入微纳结构,改变闪烁体的光学和物理性质,降低全内反射效应带来的影响,从而提高敏感度、响应速度和空间分辨率,其制备技术的重要性不容忽视。目前,闪烁体微纳结构制备技术的系统应用缺少梳理,对大批量的生产及实际应用造成不便,本文从不同尺寸的结构及制备方式出发,对晶体结构制备方式进行归纳分析,探究了各种制备技术的优点与缺点,为未来闪烁体微纳结构的制备应用提供研究依据。

1 闪烁体

闪烁体是闪烁探测器中的重要组成部分,多采用 X 射线、 γ 射线、中子射线等探究闪烁体的射线致发光特性。带电粒子穿过闪烁体时,原子或分子产生电离激发,这些原子或分子在复合和退激时瞬时光发。中性粒子或 X、 γ 射线依靠与闪烁体物质相互作用,产生次级带电粒子而使闪烁体激发发光。

一种由有机物组成的闪烁体称为有机闪烁体,有机闪烁电子能级和发光机制如图 1 所示。带电粒子穿过有

机闪烁体使分子电离、激发和离解,同时在闪烁体内部沉积一部分能量,这些激发能可能再传递给其他分子,或转化为热量而散失。分子受激退激过程会迅速由高能级跃回低能级 i_0 ($i=1,2,3$)。受激后先经历内退激(b 区),再由 c 区发生发光跃迁(e 区),或直接猝灭(d 区)。

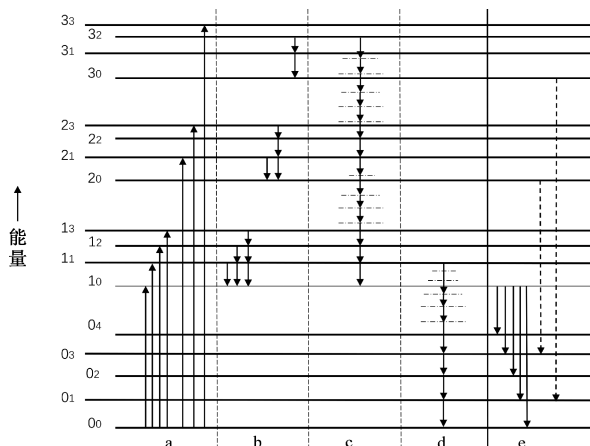


图 1 有机闪烁电子能级及发光机制

Fig. 1 Organic scintillating electron energy level and luminescence mechanism

蒽晶体是有机闪烁体中发光效率最高的闪烁体,广泛用作标准来比较其他闪烁体的发光效率。

常用的无机闪烁体主要是无机晶体闪烁体,这类闪烁体多数掺杂有少量激活剂,如 NaI(Tl) 、 LiI(Eu) 、 BaF_2 、BGO 等。无机晶体发光过程用固体能带理论解释,如图 2 所示。辐照闪烁体后沉积一部分能量在闪烁体内,晶体中原子获得能量发生电离,电子从满带跃迁到导带,在满带留下空穴。当原子获得的能量不足以电离时,在晶体中产生电子空穴对被束缚,称为激子。完全纯的晶体由于禁带较宽,电子从导带跳回满带时,退激发射的光子能量在紫外光范围,不是可见光,且退激的光子易被晶体自吸收,传输到晶体外得光子较少。

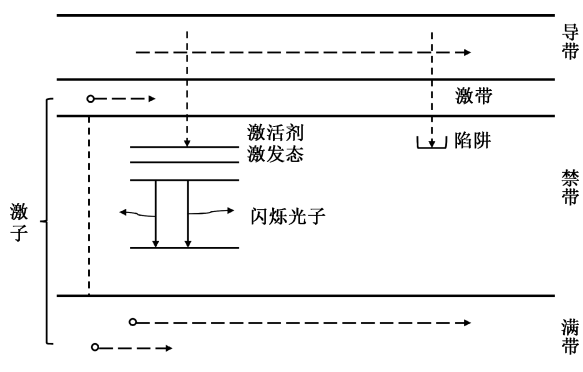


图 2 无机闪烁发光机制

Fig. 2 Inorganic scintillation luminescence mechanism

为了使晶体产生可见光且减少自吸收,会在晶体中掺杂少量激活剂,其激发能级比导带低,基态比满带高,称为俘获中心。当电子遇到俘获中心时,从激发态跃迁回基态并释放光子,称为荧光;电子也可能将激发能传递给周围晶格产生振动,以热能消耗能量而不释放光子,这一过程称为猝灭;晶体中掺杂激活剂可能导致晶格缺陷,形成陷阱,当电子遇到陷阱时既可能发生猝灭,也可能发出荧光,此时荧光衰减时间较长,是闪烁光的慢成分。

事实上,没有哪种材料可以满足理想闪烁体应具有的特性,需要根据不同应用场景,选择合适的材料。有机闪烁体衰减时间快于无机闪烁体,但光产额相比无机闪烁体较少,因此对于要求时间分辨率的应用下,多采用具有快衰减时间的材料,而核医学及辐射探测领域多选择高光产额的材料。通常,大多数无机闪烁体的折射率较大($n=1.8\sim 2.5$),导致产出的部分光子在闪烁体与空气交界面被反射。以 LYSO 闪烁体为例,尽管其光产额可达 25 000 ph/MeV,但由于折射高达 1.82,导致晶体内部直接出射的可被检测光子数目占产生光子总数不到 20%^[4]。

2 微纳结构调控闪烁发光原理

界面处的全内反射是导致闪烁光出射效率低下的主要原因。根据斯涅尔定律,光从一种介质入射到另一种介质时,角度发生变化:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

其中, n_1 表示介质 1 的折射率; θ_1 表示光从介质 1 传播到介质 2 的入射角; n_2 表示介质 2 的折射率; θ_2 表示光从介质 1 传播到介质 2 的折射角。即当入射角 $\theta_1 = \pi/2$ 时,折射角 θ_2 才能达到最大值 θ_c :

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{n_1}{n_2} \right) \quad (2)$$

只有折射角小于临界角的光子才可以出射,其余光子则在闪烁体表面被反射,直到被材料自身吸收或从其他表面逃逸。

为了解决闪烁体发光面临的共性问题,研究人员通过光子晶体对 LYSO 闪烁体光输出的影响进行特性的改善,其具体形式包括:光子晶体、光学微腔^[5]、表面等离激元^[6]等。通过微纳结构的制备,形成特殊的色散关系或光学密度,从而对闪烁光的产生和传输起到调控作用。Charles 等^[7]在 Science 期刊上发表了一篇关于纳米光子学结构与闪烁材料结合的研究,论述了纳米光子学结构对闪烁光谱、角度和偏振特性的调节作用,这将有助于开发出更亮、更快速、更高分辨率的闪烁材料。

2.1 纳米结构

纳米结构是在纳米尺度上具有特定形状和结构的材

料,其中包括光子晶体、纳米柱^[8]、纳米孔^[9]、量子点^[10]等形式。作为纳米结构中常见形式的光子晶体是一种具有周期性结构的光学介质,对特定波长或波段的光子具有禁阻作用,形成光子禁带,从而控制光的传播与吸收特性,广泛应用于光学器件和光电子学领域^[11]。

利用二维光子晶体实现光提取的基本原理有光子晶体带隙方法和光子晶体附着方法。光子晶体附着法优势在于不破坏发光层,因而不会降低内量子效率。利用导波模式提取光示意图如图 3 所示^[12]。当光以导波模式传播时,在空气一侧垂直于界面方向上会形成倏逝波,倏逝波不具有传播特性,但携带有电磁场能量,当倏逝波与光子晶体接触并满足一定条件时发生耦合,以泄漏模式发射光子。

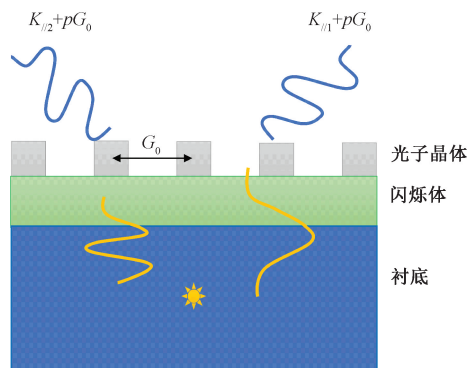


图 3 利用导波模式提取光示意图

Fig. 3 Using guided wave mode to extract light schematic diagram

二维光子晶体增强闪烁体的光提取效率是通过光子晶体与闪烁体耦合,改变光子的传播波矢,其原理描述如下:当入射角大于临界角时,全反射导致光在界面上形成导波模式,表面覆盖光子晶体的闪烁体传播波矢为:

$$K_{||} > K_0 \quad (3)$$

$$K_0 = n_0 \omega / c \quad (4)$$

其中, K_0 代表空气中的波矢。 n_0 为空气的折射率; ω 为角频率; c 为真空中的光速。只有降低传播波矢才能实现光波的提取,光与闪烁体表面相互作用时,将获得光子晶体倒格矢形成的附加动量,当满足关系式(3),即可实现光的提取。

$$|K_{||} + \rho G_0| < K_0 \quad (5)$$

$$G_0 = 2\pi/d \quad (6)$$

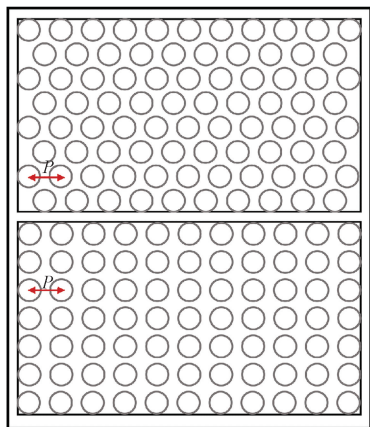
其中, ρ 为正负整数; G_0 为光子晶体的倒格矢基矢, d 为光子晶体的晶格常数。出射光的方向可以表达为:

$$\theta = \arcsin \left[\left(\lambda / 2\pi \right) |K_{||} + \rho G_0| \right] \quad (7)$$

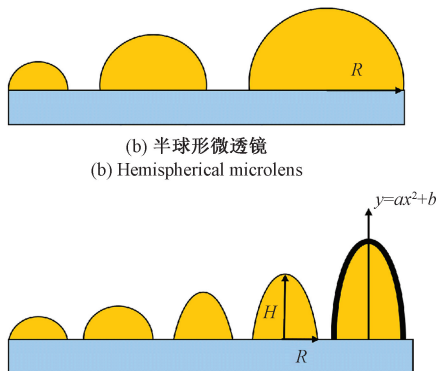
通过光子晶体对闪烁体光射光的调控作用,出射光角度的分布与朗伯型(lambertian profile)不同,此现象也为利用光子晶体结构调控闪烁体发光提供了可能。

2.2 微米结构

微透镜阵列 (microlens arrays, MLAs) 在辐射探测方面有着广泛的应用前景。微透镜的特性, 如占空比大小、折射率、形状等, 对于增强闪烁出光效果至关重要。近年



(a) 微透镜阵列
(a) Microlens arrays



(b) 半球形微透镜
(b) Hemispherical microlens
(c) 抛物线微透镜
(c) Parabolic microlens

图 4 闪烁体表面微透镜阵列示意图

Fig. 4 Schematic diagram of microlens array on scintillator surface

来, 微透镜阵列已经成为许多光学系统中不可或缺的组件, 包括集成成像系统^[13]、有机发光二极管^[14]、数字显示器^[15]等应用领域。微透镜可以是具有底部半径 R 和周期 P 的六边形堆积或方形堆积结构, 如图 4(a) 所示^[16]。

机会。

3.1 纳米结构

用于制备表面纳米结构方法主要有电子束光刻、纳米压印、自组装等关键技术。

1) 电子束光刻技术

电子束光刻技术 (electron beam lithography, EBL) 利用高能电子束在光刻胶或薄膜上进行局部曝光, 通过化学处理, 将曝光图案转移到底部材料上^[18]。其优势在于图案设计灵活, 可实现更小尺寸和更复杂的结构, 因此在材料研究、纳米器件、光学元件等领域具有重要地位^[19]。

欧洲核子中心 Lecoq 教授课题组^[20]成功利用 EBL 技术在 LSO 闪烁体表面引入氮化硅 (Si_3N_4) 纳米周期阵列, 经过实验验证, 这一结构使光的提取效率提高了 60%。欧阳晓平教授带领刘方园等通过 EBL 结合离子蚀刻法在闪烁体表面制备纳米结构, 制备过程如图 5 所示^[21]。

首先对 LYSO 材料进行丙酮超声波洗涤, 然后用去离子水清洗并进行氮气干燥处理。由于闪烁体是不良导体, 为了避免电子束写入过程中产生的充电效应, 需在 LYSO 上沉积氧化钢锡。在光刻胶之前, 将六甲基二硅氮烷 (HDMS) 旋涂至二氧化钛 (TiO_2) 表面, 再将光刻胶 APR6200 均匀涂覆在最上层。接下来, 采用 EBL 系统将设计图案暴露在光刻胶上, 一定电压下解析光刻胶的图案区域, 利用离子束蚀刻法将光刻胶上的图案转移到闪烁体表面。最后, 通过等离子氧气剥离法剥离光刻胶层, 并用去离子水清洗结合 N_2 吹干样品。

3 表面微纳结构制备方法

微纳制造是制造领域的前沿发展方向, 其核心内容是利用高端高精度加工技术, 通过制备特定形态的结构赋予材料特定功能并满足应用需求。基于闪烁体表面制备微纳结构已成为材料科学和光学领域的研究热点^[17]。表面微纳结构制备的方法为闪烁体的性能优化提供了新的可能性, 有望未来在医学影像、物理探测等领域发挥重要作用。通过不断探索微纳制造技术, 可以推动材料科学和光学领域的发展, 为各个领域带来更多创新和应用

$$D = \frac{2\pi R^2}{\sqrt{3}P^2} \quad (8)$$

正方形排列的微透镜阵列。 D 可以定义为:

$$D = \frac{\pi R^2}{P^2} \quad (9)$$

其中, R 表示微透镜底部的表面半径, H 表示微透镜高度, P 表示阵列周期。如图 4(b), 当 $R=H$ 时, 微透镜定义为半球形; 如图 4(c), 当 $R \neq H$ 时, 微透镜形状由抛物线定义:

$$y = ax^2 + b \quad (10)$$

其中, a, b 分别为抛物线参数。通过 H/R 即可以描述微透镜的形状。

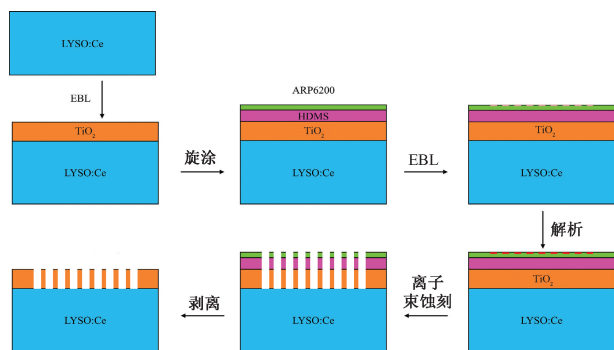


图 5 电子束光刻制备微纳结构

Fig. 5 Preparation of micro-nano structures by electron beam lithography

湘潭大学唐文等^[22]通过在 LYSO 上制备孔周期为 410 nm 的 TiO_2 周期阵列,结构化样品在超出临界角范围后展现出更多的透射谱峰,而非结构化样品则不具备这一特性,通过模拟证明结构型闪烁体光提取增强 80%。这些研究结果表明,结构化阵列的设计对于提高闪烁体的光提取效率是至关重要的。

2) 纳米压印技术

纳米压印技术(nanoimprint lithography, NIL)即利用带有微纳结构图案的模板,将图案转移到相应衬底上制作出纳米级图案的加工工艺^[23]。NIL 技术按照纳米压印胶固化方式和模板种类分为热纳米压印(thermal nIL, T-NIL)技术、紫外纳米压印(ultraviolet nIL, UV-NIL)技术、微接触印刷(micro contact printing, uCP)技术^[24-25]。

NIL 过程如图 6 所示^[26],包括图形模板制备、抗蚀剂涂覆、图形转移。

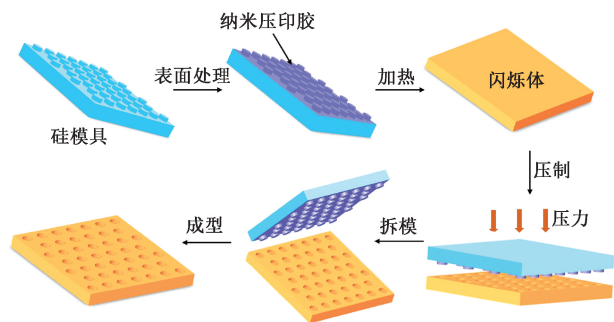


图 6 纳米压印技术示意图

Fig. 6 Nanoimprint technology schematic diagram

首先在衬底上旋涂聚合物作为基体;接着在模具上涂覆纳米压印胶;然后使用纳米图案模板与基体接触并进行压印定型,当温度、时间等条件一定后将模板与基体分离,此时模板表面的纳米结构图案转移到基体表面。

Chou 等^[27]实现了直径为 10 nm 的微孔阵列图案为

NIL 技术的发展奠定了基础。Guo 等^[28]提出一种快速制备具有良好周期性、表面光滑平坦且长径比一致的二氧化硅(SiO_2)纳米结构的纳米压印硅胶方法,仅用 5 min 时间就制备完成。Knapitsch 等^[29]在 LYSO 上制备出锥形纳米结构,实现与同类型的非结构化样品相比增益 5%。Zhang 等^[30]利用 NIL 技术获得大面积高精度的金属纳米光栅。南京邮电大学虞亮等^[31]结合自组装技术将聚苯乙烯(PS)胶体颗粒组装成有序的胶体晶体膜,然后采用 NIL 技术将其复制到聚二甲基硅氧烷(PDMS)上制作成模板,最后将带有晶体结构的 PDMS 模板转移至材料上进行二次压印。Singh 等^[32]在闪烁体表面制备六边形紧密堆积的锥形纳米晶体结构,实现闪烁光提取增强 50%,能量分辨率增强 20%。Gramuglia 等^[33]分析并比较了 LYSO 和 BGO 的不同光提取技术,在输出表面上使用 NIL 技术制备的锥形纳米结构显示出光提取和能量分辨率的显著改善。Pots 等^[34]研究了一种具有柱状阵列结构的 LYSO 结构型闪烁体,与非结构型相比,样品的光产率提高 50%,能量分辨率提高 10%。NIL 技术制备微纳结构克服了光学曝光技术中光衍射现象造成的分辨率极限问题,实现亚纳米级别的尺寸控制,且其低成本、制作高效等特性在制备高灵敏度辐射探测器、光敏剂、光疗设备等^[35]方面具有广泛应用前景。

3) 自组装技术

自组装技术(self-assembly)即分子及纳米颗粒通过非共价键作用,在范德华分子力作用及静电力作用下自发形成热力学稳定及结构稳定的规则聚集体^[36-37]。

介质球自组装技术示意图如图 7 所示^[38]。

空气-水界面通过自组装法制备过程中,纳米球间的相互作用力分散在表面形成单层膜,使用处理过的闪烁体将自组装单层球膜捞起,静置使球膜底层的水分自然蒸发;最后形成的介质球膜会紧密附着在闪烁体上。

Zhu、刘波等研究团队^[39-41]设计了周期性 PS 球体阵列,以耦合到 LYSO 闪烁体表面上,光提取效率相较于参考样品增强 38%;在 LYSO 上制备 PS 并涂覆 TiO_2 层,使得光输出增强 149%;采用气液界面自组装法制备了单层 SiO_2 纳米球阵列,结构型 LYSO 闪烁体的光输出增强 90%。自组装法制备简单,耗时短,且无论闪烁体光滑度如何均可以实现结构转移。然而,纳米球结构依赖范德华力排列并覆盖在闪烁体表面,和闪烁体之间的结合力不高。为解决这一问题,可以考虑在纳米球表面沉积高折射率材料如 TiO_2 、GaN 来改善此缺陷^[42]。

自组装法主要应用在光子晶体光纤及具有复杂结构的光子晶体等结构,然而,这种方法的缺点是难以精确控制晶体的粒径和孔隙度。因此,在未来的研究中,需要更加精细地调控自组装过程,以克服这些限制,进一步拓展其在各个领域的应用。

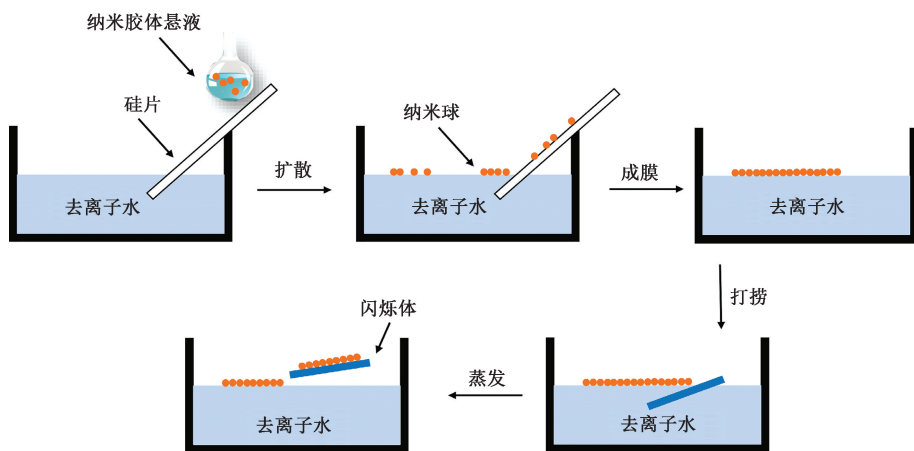


图 7 介质球自组装技术示意图

Fig. 7 Schematic diagram of dielectric sphere self-assembly technology

4) 干转移技术

干转移技术是一种可以避免液体接触的制备方法,已经被成功应用于转移石墨烯层^[43]、氧化石墨烯层^[44]以及聚合物层^[45]。通过干转移技术在吸湿性闪烁体如 CsI (Na) 晶体上制备结构可以有效解决晶体潮解这一难题,开发干转移技术为吸湿性闪烁体制备微纳结构提供新的方向。

Ouyang 等^[46]利用干转移技术在吸湿性 CsI (Na) 闪烁体上制备 PS 球体结构,制备过程如图 8 所示。首先将硅晶片浸泡在特定溶液中,一定时间后将 PS 胶体颗粒

悬浮液滴到处理过的硅晶片表面;随后经过干燥处理,晶片以一定的角度缓慢放入去离子水中获得 PS 球阵列;利用载玻片将球体阵列从水面上提取出来,水分蒸发形成自组装 PS 球阵列;接着,预制的热释胶紧密附接到 PS 球阵列上,经压制并剥离载玻片后使得 PS 球完全黏附在热释胶上;从载玻片上取下热释胶并按压到样品闪烁体上,加热到一定温度使热释胶脱落,此时 PS 球阵列均匀黏附在闪烁体表面;最后采用原子沉积技术涂覆氧化锡锡共形层,不仅增加折射率对比度,同时使纳米球阵列与闪烁体接触更加紧密牢固。

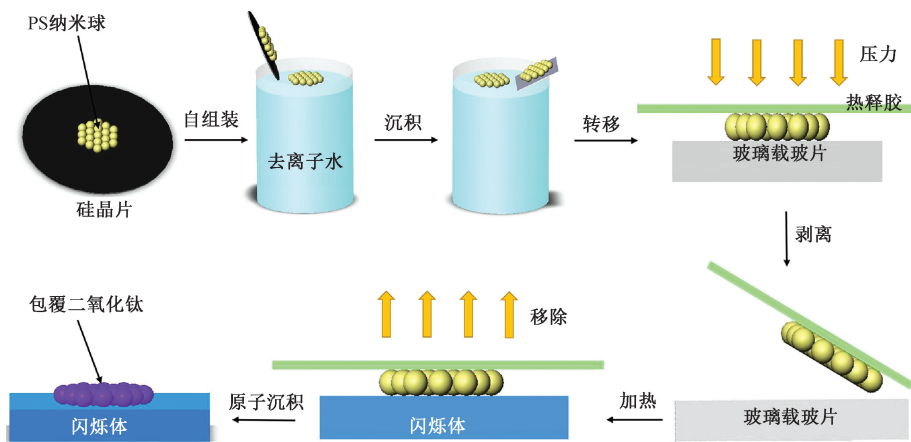


图 8 干转移技术示意图

Fig. 8 Dry transfer technology diagram

研究表明,有序排列的纳米结构可实现闪烁体出射光的定向发射,最大光提取效率提高 43.2%。Ouyang 等^[47]另一实验表明,通过干转移技术制备的纳米球阵列组成的结构在 X 射线的激发下获得 179% 的波长积分增强,增加的光输出可以显著提升基于闪烁体的探测器的性能。

干转移技术能够实现复杂结构的制备、高精度的定位和对多种材料的适用性^[48]。然而,使用干转移技术需要精准控制制备的温度、湿度等参数,因此其制备工艺相对复杂。在实际应用中,需要不断提高技术水平,完善相关设备和工艺流程,以确保干转移技术能够更好地发挥作用。

3.2 微米结构

微透镜是常用的微米结构,其灵感源于天然复眼,在图像系统应用中具有巨大潜力^[49],可用于极小化的成像系统和3D光场相机、彩色成像系统、三维图像采集系统和指纹识别系统。Chen等^[50]利用半球面微透镜结构获得特定角度增强159%;Yuan等^[51]在掺铈铈钨氧正硅酸盐闪烁体表面应用微透镜阵列,以提高光提取效率并控制光输出的方向性;此外,研究发现用实心半球改变单个微透镜的直径并不能显著影响闪烁体的光提取效率,2021年Yuan等^[52]为了提高微透镜阵列控制闪烁体光输

出的灵活性,提出由单个空心壳半球微透镜周期排列组成的空心微透镜阵列,实验证明微透镜阵列可以显著提高光提取效率,同时实现闪烁体的定向光提取。

1) 热回流焊法

热回流焊法(photoresist reflow method)作为一种制造工艺简单、价格低廉、表面粗糙度低的技术,广泛应用于微透镜阵列制造。通过热回流焊法,可以迅速制造出高质量的微透镜阵列,满足市场需求。热回流焊法的工艺如图9所示^[53]。

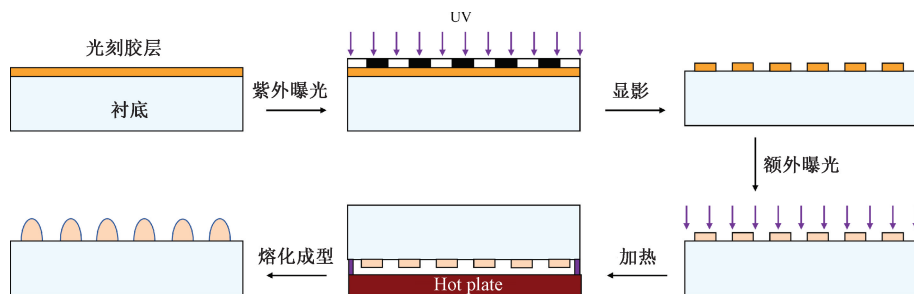


图9 热回流焊法制备微透镜阵列

Fig.9 Preparation of microlens array by thermal reflow soldering method

首先,在基板上旋涂光刻胶层,然后将样品置于加热板上软烘烤;接着用紫外光照射并用带有圆形阵列图案的掩模对准器曝光,经过显影,光刻胶层形成圆柱形孤岛阵列图案;然后使用相同的掩模对准器进行额外曝光;最后,将加热板倒置加热样品,利用表面张力效应将光刻胶岛加热至熔化形成微透镜阵列。实际制备过程中,会在基底和加热板之间放置一定厚度的玻璃板,使光刻胶层与加热板的顶面之间有一个开放的气隙,光刻胶通过空气对流加热,因此这种倒置加热有利于获得更均匀的加热和回流焊。

Zhu等^[54]采用改进的热回流焊方法制备了具有高占用率的微透镜阵列,研究表明,通过优化回流焊的温度、时间以及光刻胶厚度,可以有效提高光刻胶掩模的占用率。Lian等^[55]通过热回流焊法制备半椭球微透镜阵列,表明基于该技术可以制备任意形状的微透镜,且这种方法制备的微透镜可以实现高达85%的耦合效率。Chen等^[56]通过制备不同直径的微透镜阵列结构,并进行光学系统研究,发现微透镜焦距均匀,同时能显著增强从微通道发出的荧光信号。

2) 湿法腐蚀技术

湿法腐蚀技术是一种常用于制备微通道阵列结构的方法,通过化学溶液将固体材料转化为液体或气态化合物,得到所需图案。湿法腐蚀技术主要包括以下3个步骤^[57]:首先是欧姆层制备,目的是降低硅片和电极间的界面阻抗;其次是诱导坑的制备,使用碱性腐蚀液在硅衬

底表面腐蚀出倒金字塔结构的诱导坑,减小因硅不同晶面原子密度不同带来的与碱溶液反应速率的差别;最后是光电化学腐蚀工艺,利用诱导坑结构作为起点,严格控制参数以获得高深径比的微通道阵列结构。湿法腐蚀技术制备的结构内壁光滑,利于结构内壁荧光的发射。Nadia等^[58]研究了电化学腐蚀时不同掺杂浓度的硅基板对微通道形成的影响,发现当使用低掺杂浓度的硅样品时,会出现星形孔,而高掺杂浓度在表面产生正常的孔洞形状。Wang等^[59]研究并采用光电化学腐蚀制备出了高纵横比的硅微通道阵列结构。

3) 飞秒激光技术

飞秒激光技术(femtosecond laser technology)是微纳结构加工中的常用技术,由于对材料周围影响最小,飞秒激光技术可以安全切割、钻和雕刻样品^[60]。近年来研究者将目光投向飞秒激光制备微纳结构中的应用,通过飞秒激光加工可以实现微观结构的制造和调控,实现高精度、无损伤的加工效果,有效控制光子晶体中的光学性能^[61]。飞秒激光技术加工微纳结构如图10所示^[62]。

首先是结构设计及激光参数的选择,加工前需完成加工结构的晶格类型、孔径大小等参数计算,并设置适当的激光参数,如脉冲能量、脉冲宽度等;其次精准的结构加工是通过将飞秒激光聚焦到材料表面适当位置实现的,通常采用三维扫描逐层加工方式,控制激光位置、持续时间,形成孔洞周期性微纳结构;最后,结构表征与优化是确保加工质量的关键一环,使用光学显微镜等工具

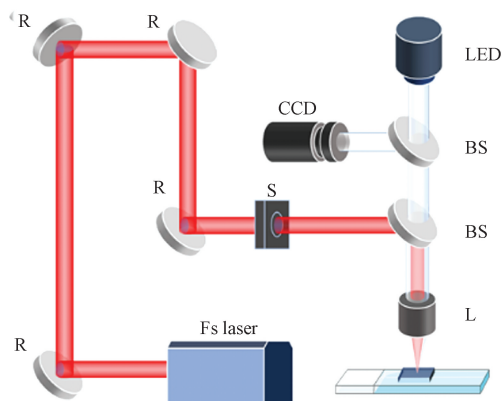


图 10 激光加工技术示意图

Fig. 10 Laser processing technology schematic diagram

评估结构形貌并对加工参数进行调整以优化结构性能。

Jiao 等^[63]基于飞秒激光技术在闪烁体表面制备高度 $1\text{ }\mu\text{m}$ 柱状孔和柱状结构,研究表明其周期性结构使光输出增加 40%。Yu 等^[64]通过飞秒激光技术在 LYSO 晶体制备宽度 $200\text{ }\mu\text{m}$,深度 $240\text{ }\mu\text{m}$ 的沟槽结构,发现一定尺寸结构的凹槽微观结构可以实现光输出增强 50%。

此外,飞秒激光技术也广泛用于纳米结构加工,娄前峰^[65]研究了基于纳米球近场效应的飞秒激光加工,获得纳米球直径对近场增强效果的影响,并通过不同波长和

不同偏振的飞秒激光对基底表面的纳米小球进行辐照,实现对纳米孔形状和尺寸的调控。Song 等^[66]采用飞秒激光近场加工制备掺铝氧化锌上高性能抗反射纳米结构,引入梯度折射率,充分利用其较高的加工精度和可控性。

飞秒激光以其无接触加工、功率高、可加工任何材料、高精度和高分辨率、准确控制能量传递等诸多优势备受关注。未来随着技术的进一步突破和应用研究的深入,飞秒激光技术将在各个领域展现更广泛的影响力和潜力。

3.3 微纳复合结构

混合尺度微纳结构的出现是为了解决单一微观结构在增强光提取和定向发射方面的限制。通过组合波长尺度的纳米结构和微米尺度的微透镜结构,能够实现更加灵活的光控制效果。这种混合尺度微观结构由两个或者多个不同尺度的单位组成的复杂微观结构。相比于单一微观结构,混合结构在光提取和发射方面具有更强的调控能力,为光学器件的设计与制造带来更大的灵活性和多样性。

1) 自组装结合热处理

刘波教授团队采用自组装结合热处理技术,在 BGO 闪烁体上制备混合尺度微纳结构。制备工艺如图 11 所示^[67]。

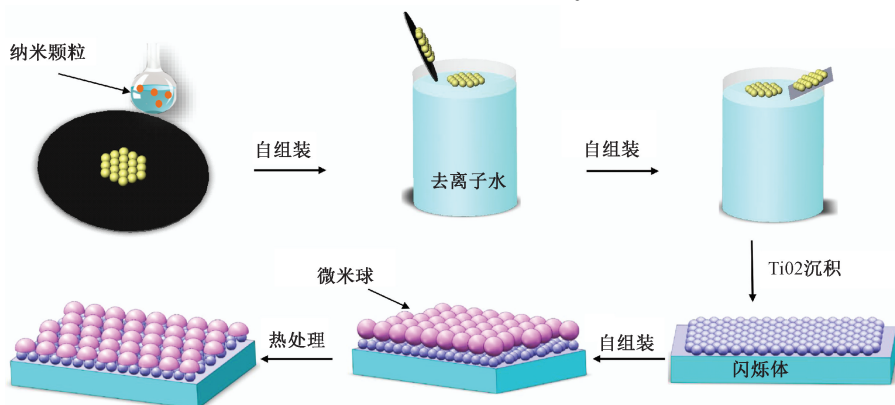


图 11 自组装结合热处理制备微纳复合结构

Fig. 11 Preparation of micro-nano composite structure by self-assembly combined with heat treatment

通过自组装技术,在 BGO 闪烁体上制备直径 500 nm 的 PS 小球并覆盖底面直径 $4.5\text{ }\mu\text{m}$ 的微透镜阵列,实现在不同方向上提升光输出效果。实验结果显示,具有混合尺度微纳结构的闪烁体在法向方向的光输出增强 96%,在 45° 方向时增强 180%。混合结构的突破,为相关领域带来了新的可能性,为材料研究和应用开辟了新途径。

自组装技术具有易于大面积制备的优势,原子沉积技术厚度水平可以控制在埃水平^[68];微透镜结构提高了

闪烁体在 X 射线成像的特性,因此,混合尺度微纳结构的应用不仅增强了光输出,还改善了成像的准确度和清晰度。通过不断的技术创新和实验验证,闪烁体作为关键部件在 X 射线成像领域有着广阔的应用前景。

2) 自组装结合软 X 射线干涉光刻

Yuan 等^[69]结合波长尺度的光子晶体和微米尺度的微透镜阵列,实现对闪烁体光输出的定向控制。制备过程如图所示。

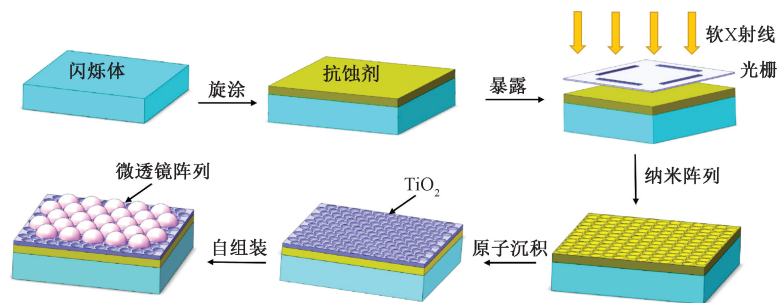


图 12 自组装结合软 X 射线干涉光刻技术

Fig. 12 Self-assembly combined with soft X-ray interference lithography technology

其团队利用软 X 射线干涉光刻技术直径 200 nm, 孔洞深度 180 nm 的纳米结构, 在此结构上利用自组装技术制备直径 4.5 μm、六角紧密排列的微透镜阵列。实验发现, 闪烁体非发射表面的周期性衍射和多次反射是获得定向发射的关键因素。通过结构仿真, 研究人员证明了该结构在 35° 方向上实现 3.07 倍强定向发射的可能性。这一发现为提高发射效率和光学性能提供了新思路, 对

光电子技术领域具有重要意义。

3.4 微纳结构制备技术对比

当前, 闪烁体微纳结构制备已经取得显著进展, 在材料科学和光电子学等领域具有广泛的应用潜力。在制备过程中, 通过调控结构的制造参数, 实现对闪烁体的形貌、尺寸和组合结构的控制。如表 1 所示, 为目前闪烁体微纳结构制备技术对比。

表 1 闪烁体微纳结构制备技术对比

Table 1 Comparison of scintillator micro-nano structure preparation technology

制备技术	优点	缺点	应用前景
电子束光刻技术	无光学干扰, 高精度(≤10 nm)	设备昂贵, 且制备周期长	微电子学 光子学
纳米压印技术	制备简单、成本低廉 制备精度(≤10 nm)	模具寿命有限, 需温度、压力等控制	生物传感器 表面制备
自组装技术	制备简单、结构有序 制备精度(<100 nm)	可能引入结构缺陷, 且不适用吸湿性材料	生物医学 光子学
干转移技术	制备精度(≤100 nm), 适用吸湿性材料	转移过程可能会引入杂质	微纳器件制备
热回流焊法	成本较低, 可规模化生产	限制加工材料的熔点, 存在热应力破坏结构	光电子学 制备或修复纳米器件
湿法腐蚀技术	工艺简单, 价格低廉, 高产出	加工精度难以控制(1~10 μm) 制备过程可能引入污染物	高能粒子探测成像
飞秒激光技术	脉冲时间短(10 ⁻¹³ ~10 ⁻¹⁵ s) 加工精度高(≤100 nm)	设备昂贵 操作复杂	硬脆材料 光子学

利用微纳结构提高闪烁体光提取效率已得到广泛应用, 但其制备方式仍存在需要存在各种不足之处。基于目前的各种制备方式, 飞秒激光的超快、超强特性, 使其具有很强的加工灵活性和材料适应性等, 已成为表面微纳制造极具潜力的方法之一。

4 结 论

闪烁体是一种射线致发光材料, 对于闪烁体核辐射的测量对应的即对闪烁体发光的测量。相同照射条件下不同闪烁体材料的光产额不同, 一方面, 通过选择不同闪烁材料达到提升光出射率的目的, 但提升效果较差; 另一

方面, 通过在闪烁体上制备微纳结构达到进一步提升闪烁体出光效率的目标, 解决闪烁体光出射效率低的难题。

随着纳米技术的不断发展, 未来制备工艺将更加精确可控。例如, 采用纳米压印、自组装和原子层沉积等技术, 可以实现对闪烁体微纳结构的精确定位和组装; 飞秒激光因其超快、超强、超高精度的独特优点使得其在微纳加工领域占领重要地位, 未来也将增强飞秒激光加工微纳结构的形成机理等方面的研究。这一趋势将推动微纳技术在各个领域的应用, 为科学研究和产业发展带来新的可能性和机遇。

闪烁体微纳结构制备技术具有巨大的潜力, 广泛应用于各领域。未来的研究将集中在制备工艺的进一步改

进和创新,相信随着相关研究的不断深入,闪烁体微纳结构将发挥更大的作用,并为科学研究和应用提供更多可能性。愿共同不断探索,挖掘出闪烁体微纳结构的更多潜能,推动科技进步。

参考文献

- [1] RONDA C, WIECZOREK H, KHANIN V, et al. Review-scintillators for medical imaging: a tutorial overview[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2016, 5(1): 3121-3125.
- [2] 任国浩. 无机闪烁晶体在我国的发展史[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(8): 1373-1385.
REN G H. The development history of inorganic scintillation crystals in China[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2019, 48(8): 1373-1385.
- [3] TONG F, LIU B, CHEN H, et al. Enhanced light extraction of $\text{Bi}_3\text{Ge}_4\text{O}_{12}$ scintillator by graded-refractive-index antireflection coatings [J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(7): 71907.
- [4] 黄乐程, 王光毅, 薛玉雄. 光子晶体对 LYSO 闪烁体光输出的影响[J]. 光学学报, 2019, 10(39): 357-362.
HUANG L CH, WANG G Y, XUE Y X. Influence of photonic crystal on light output of LYSO scintillator[J]. Acta Optic Sinica, 2019, 10(39): 357-362.
- [5] ANDREW P, BARNES W L. Forster energy transferrin an optical microcavity[J]. Science, 2000, 290(5492): 785-788.
- [6] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics [J]. Nature, 2003, 424(6950): 824-830.
- [7] CHARLES R C, RIVERA N, CHORASHHI A, et al. A framework for scintillation in nanophotonics [J]. Science, 2022, 375(6583): 9293.
- [8] ZHAO J, WU Y Q, XUE CH F, et al. Fabrication of high aspect ratio nanoscale periodic structures by the soft X-ray interference lithography [J]. Microelectronic Engineering, 2017, 170: 49-53.
- [9] 赵婷婷, 刘皓, 李津, 等. 纳米多孔阳极氧化铝模板的制备方法及应用的研究进展[J]. 天津工业大学学报, 2013, 32(4): 19-25.
ZHAO T T, LIU H, LI J, et al. Research progress on preparation methods and applications of nanoporous anodic alumina templates [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2013, 32(4): 19-25.
- [10] 梁书语. 荧光材料的飞秒激光图案化制备及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
LIANG SH Y. Femtosecond laser patterning preparation and application of fluorescent materials[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [11] 刘波. 利用微纳光子学提升闪烁体性能[C]. 中国核学会 2015 年学术年会, 2015: 7.
LIU B. Using micro-nano photonics to improve the performance of scintillator[C]. 2015 Annual Conference of China Nuclear Association, 2015: 7.
- [12] 刘波, 陈鸿, 顾牡, 等. 闪烁体与光子人工微结构[J]. 物理, 2014, (4): 254-262.
LIU B, CHEN H, GU M, et al. Scintillators boosted by nano-photonics[J]. Physics, 2014, (4): 254-262.
- [13] JUNG H, JEONG K H. Monolithic polymer microlens arrays with high numerical aperture and high packing density[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(4): 2160-2165.
- [14] QU Y, KIM J, COBURN C, et al. Efficient, nonintrusive outcoupling in organic light emitting devices using embedded microlens arrays[J]. ACS Photonics, 2018, 5(6): 2453-2458.
- [15] WANG Z, WANG AN T, WANG SH L, et al. Resolution enhanced integral imaging using two micro-lens arrays with different focal lengths for capturing and display[J]. Optics Express, 2015, 23(22): 28970-28977.
- [16] CHEN X, LIU B, ZHU J, et al. Light extraction enhancement and directional control of scintillator by using microlens arrays [J]. Optics Express, 2018, 26(18): 23132-23141.
- [17] LIU B, ZHU ZH CH, WU Q, et al. Plasmonic lattice resonance-enhanced light emission from plastic scintillators by periodical Ag nanoparticle arrays [J]. Applied Physics Letters, 2017, 110(18): 181905.
- [18] 胡超, 王兴平, 尤春, 等. 高精度电子束光刻技术在微纳加工中的应用[J]. 电子与封装, 2017, 17(5): 28-32, 36.
HU CH, WANG X P, YOU CH, et al. Application of high resolution electron beam lithography technology in micro-and nano-fabrication [J]. Electronics and Packaging, 2017, 17(5): 28-32, 36.
- [19] LIN Z Y, LYU SH CH, YANG ZH M, et al. Structured scintillators for efficient radiation detection [J]. Advanced Science, 2022, 9(2): 2102439.
- [20] LECOP P, KORZHIK M. Scintillator developments for high energy physics and medical imaging [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2000, 1: 1-5.
- [21] LIU F Y, YANG Y L, LIU Y D, et al. Large energy resolution improvement of LYSO scintillator by electron beam lithography method [J]. AIP Advances, 2020, 10(2): 25101.
- [22] 唐文, 刘应都. 基于光子晶体技术的无机闪烁体表面光增强提取研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2019.

- TANG W, LIU Y D. Study on surface light enhanced extraction of inorganic scintillator based on photonic crystal technology [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2019.
- [23] SINGH B, SUMMERS C J, MENKARA H, et al. Photonic crystal structures for improved scintillator performance[C]. 2013 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, 2013: 1-4.
- [24] 李俊. 纳米压印光刻工艺及其制造设备[J]. 电子工业专用设备, 2023, 52(4): 14-19.
- LI J. Nanoimprint lithography process and its manufacture equipment [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2023, 52(4): 14-19.
- [25] 李明, 丁进新. 大幅面超薄基板表面微结构光学器件的微纳米压印关键技术分析[J]. 电子技术, 2023, 52(8): 14-15.
- LI M, DING J X. Key technology analysis of micro-nano imprinting for microstructure optical devices on large-format ultra-thin substrate surface [J]. Electronic Technology, 2023, 52(8): 14-15.
- [26] CHEN X Y, LIU B, WU Q, et al. Enhanced light extraction of plastic scintillator using large-area photonic crystal structures fabricated by hot embossing [J]. Opt Express, 2018, 26(9): 11438-11446.
- [27] CHOU S Y, KRAUSS P R, ZHANG W, et al. Sub-10 nm imprint lithography and applications [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Phenomena, 1997, 15(6): 2897-2904.
- [28] GUO SH, NIU CH H, LIANG L. The polarization modulation and fabrication method of two dimensional silica photonic crystals based on UV nanoimprint lithography and hot imprint [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 34495.
- [29] KNAPITSCH A, AUFRAY E, BARBASTATHIS G, et al. Large scale production of photonic crystals on scintillators[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63(2): 639-643.
- [30] ZHANG R, FAN Y Y, WU CH Q, et al. Multidirectional monolayer metal nano-grating micro polarizer array based on nanoimprint lithography and plasma ashing process [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2019, 29(12): 125003.
- [31] 虞亮. 基于二维有序 PS 模板的纳米压印技术制备微透镜阵列的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- YU L. Fabrication of microlens arrays by nanoimprint lithography based on two-dimensional ordered PS template[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [32] SINGH B, MARSHALL M S J, WATERMAN S, et al. Enhanced scintillation light extraction using nanoimprinted photonic crystals[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2018, 65(4): 1059-1065.
- [33] GRAMUGLIA F, FRASCA S, RIPICINI E, et al. Light extraction enhancement techniques for inorganic scintillators[J]. Crystals, 2021, 11(4): 362.
- [34] POTS R H, SALOMONI M, GUNDACKER S, et al. Improving light output and coincidence time resolution of scintillating crystals using nanoimprinted photonic crystal slabs[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 940: 254-261.
- [35] 姚志军. 纳米压印技术在制造领域的应用[J]. 印制电路信息, 2020, 28(12): 51-56.
- YAO ZH J. Application of nanoimprint technology in manufacturing [J]. Printed Circuit Information, 2020, 28(12): 51-56.
- [36] 陈媚. 基于微纳加工的闪烁体表面修饰技术应用探索[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- CHEN M. Application exploration of scintillator surface modification technology based on micro-nano processing[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2015.
- [37] LIU J L, ZHU ZH C, CHEN L, et al. Enhanced light extraction efficiency of plastic scintillator by photonic crystal prepared with a self-assembly method [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2015, 795: 305-308.
- [38] VOGEL N, GOERRES S, LANDFESTER K, et al. A convenient method to produce close-packed and non-close-packed monolayers using direct assembly of colloids at the air-water interface[J]. Macromol. Chem. Phys., 2011, 212(16): 1022-1352.
- [39] ZHU ZH C, LIU B, CHENG CH W, et al. Improved light extraction efficiency of cerium-doped lutetium-yttrium oxyorthosilicate scintillator by monolayers of periodic arrays of polystyrene spheres [J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(7): 071909.
- [40] ZHU ZH C, LIU B, ZHANG H, et al. Improvement of light extraction of LYSO scintillator by using a combination of self-assembly of nanospheres and atomic layer deposition [J]. Optics Express, 2015, 23(6): 7085.
- [41] 刘波, 刘方圆. 掺铈硅酸钇镨闪烁体晶体表面微纳结构设计及性能研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2021.

- LIU B, LIU F Y. Study on surface micro-nano structure design and properties of cerium-doped yttrium lutetium silicate scintillator crystal[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2021.
- [42] CHEN CH X, ZHU ZH C, LIU B, et al. Effect of a conformal layer on the photonic crystal for light extraction of scintillator[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 950: 162953.
- [43] DRÖGELER M, BANSZERUS L, VOLMER F, et al. Dry-transferred CVD graphene for inverted spin valve devices[J]. Appl Phys Lett, 2017, 111(15): 152402.
- [44] JANG H W, KIM W S. Shear-induced dry transfer of reduced graphene oxide thin film via roll-to-roll printing[J]. Appl Phys Lett, 2016, 108(9): 91601.
- [45] PARK J, SHIM S O, LEE H H. Polymer thin-film transistors fabricated by dry transfer of polymer semiconductor[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(7): 73505.
- [46] OUYANG X P, LIU B, XIANG X CH, et al. Enhancement of the energy resolution of CsI (Na) scintillators by photonic crystals prepared with dry-transfer technique [J]. Optics Express, 2020, 28(22): 33077.
- [47] OUYANG X P, LIU B, XIANG X CH, et al. Enhanced light output of CsI (Na) scintillators by photonic crystals[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 969: 164007.
- [48] 春李, 胡晓影, 何天应. 二维原子晶体半导体转移技术研究进展[J]. 深圳大学学报, 2018, 35(3): 257-266.
- CHUN L, HU X Q, HE T Y. Research progress of two-dimensional atomic crystal semiconductor transfer technology[J]. Journal of Shenzhen University, 2018, 35(3): 257-266.
- [49] YUAN W, LI L H, LEE W B, et al. Fabrication of microlens array and its application: A review [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 1-9.
- [50] CHEN X Y, LIU B, ZHU J T, et al. Light extraction enhancement and directional control of scintillator by using microlens arrays [J]. Optics Express, 2018, 26(18): 23132.
- [51] YUAN D, LIU B, ZHU ZH CH, et al. Directional control and enhancement of light output of scintillators by using microlens arrays [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(26): 29473-29480.
- [52] YUAN D, GUO Y ZH, LIU B, et al. Directional light outcoupling enhancement of scintillators via hollow microlens arrays [J]. Journal of Luminescence, 2021, 232: 117862.
- [53] WANG M, YU W, WANG T, et al. A novel thermal reflow method for the fabrication of microlenses with an ultrahigh focal number [J]. RSC Advances, 2015, 5(44): 35311-35316.
- [54] ZHU T F, FU J, LIU Z CH, et al. Investigation of the occupancy ratio dependence for microlens arrays on diamond [J]. RSC Advances, 2018, 8(52): 29544-29547.
- [55] LIAN ZH J, HUANG S Y, SHEN M H, et al. Rapid fabrication of semiellipsoid microlens using thermal reflow with two different photoresists [J]. Microelectronic Engineering, 2014, 115: 46-50.
- [56] CHEN P CH, CHANG Y P, ZHANG R H, et al. Microfabricated microfluidic platforms for creating microlens array [J]. Optics Express, 2017, 25(14): 16101-16115.
- [57] 余杨杰. 微通道阵列式 CsI: Tl 闪烁体 X 射线探测器技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2023.
- YU Y J. Research on microchannel array CsI : Tl scintillator X-ray detector technology[D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2023.
- [58] NADIA S, ALI N K, AHMAD M R, et al. Effect of dopant concentration on the pore formation of porous silicon on n-type silicon [C]. 2014 IEEE 5th International Conference on Photonics, 2014: 53-55.
- [59] WANG G ZH, JIANG ZH, WANG Y, et al. Photo-electrochemical etching of macroporous silicon arrays used in silicon microchannel plates [C]. 2012 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics. IEEE, 2012: 486-489.
- [60] PALLARÉS-ALDEITURRIAGA D, RODRIGUEZ-COBO L, LOMER M, et al. Characterization of tilted end-fiber diffraction grating inscribed by femtosecond laser [J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105637.
- [61] GUNDACKER S, TURTOS R M, AUFRAY E, et al. Precise rise and decay time measurements of inorganic scintillators by means of X-ray and 511 keV excitation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2018, 891: 42-52.
- [62] SONG J J, SUN J Y, LIAN Y L, et al. High-performance antireflection nanostructure arrays on aluminum-doped zinc oxide film fabricated with femtosecond laser near-field processing [J]. Applied Surface Science, 2023, 615: 156353.

- [63] JIAO W,ZHANG X,XIE S W,et al. A novel method for processing photonic crystals: Femtosecond laser [J]. Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2020: 1-2, DOI: 10.1109/NSS/MIC42677. 2020. 9507800.
- [64] YU X,ZHANG X,XIE S W,et al. Experimental study on the light output of the photonic crystals fabricated using femtosecond laser [C]. 2021 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2021: 1-3.
- [65] 娄前峰. 基于纳米球近场效应的飞秒激光纳米加工研究[D]. 长春:长春理工大学, 2020.
LOU Q F. Research on femtosecond laser nanofabrication based on near-field effect of nanospheres [D]. Changchun: Changchun University of Technology, 2020.
- [66] SONG J CH, SUN J Y, LIAN Y Y, et al. High-performance antireflection nanostructure arrays on aluminum-doped zinc oxide film fabricated with femtosecond laser near-field processing [J]. Applied Surface Science, 2023, 615: 156353.
- [67] YUAN D, LIU B, GUO Y, et al. Light output enhancement of scintillators by using mixed-scale microstructures[J]. Optics Express, 2021, 29 (16): 24792-24803.
- [68] LESKELA M, RITALA M. Atomic layer deposition chemistry: recent developments and future challenges[J]. Angewandte Chemie (International ed in English), 2003, 42(45): 5548-5554.
- [69] YUAN D, LIU M J, HUANG S, et al. Directional light output enhancement of scintillators by mixed-scale

microstructures based on soft-X-ray interference lithography and self-assembly [J]. Journal of Luminescence, 2023, 263: 119982.

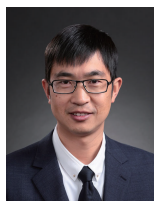
作者简介



王玉洁, 2022 年于郑州航空工业管理学院获得学士学位, 现为北京信息科技大学机电工程学院硕士研究生, 主要研究方向为机械和电离辐射。

E-mail: w18211632011@163.com

Wang Yujie received her B. Sc. degree from Zhengzhou University of Aeronautics in 2022. She is currently a M. Sc. student in Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include mechanical and ionizing radiation.



吴国新(通信作者), 2000 年于北京机械工业学院获得学士学位, 2003 年于北京机械工业学院获得硕士学位, 2011 年于北京理工大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学研究员, 主要研究方向为系统智能感知与控制技术。

E-mail: wgx1977@bistu.edu.cn

Wu Guoxin (Corresponding author) received his B. Se. degree from the Beijing Institute of Mechanical Engineering in 2000, M. Sc. degree from Beijing Institute of Mechanical Engineering in 2003, and Ph. D. degree from the Beijing Institute of Technology in 2011. Now he is a researcher at Beijing University of Information Science and Technology. His main research interests include system intelligent perception and control technology.