

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

D04-极端条件材料与器件
D04-Materials and Devices in
Extreme Conditions

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

D04. 极端条件材料与器件

分会主席：蒙大桥、吴卫东、靳常青、孙学峰、余学峰、唐涛、巨新

D04-01**极端条件下轻元素化合物结构与物性演化研究**

卢成^{*1}, 段青卓¹, 黄澍¹, 詹厉辉¹

1. 中国地质大学, 武汉

Superhard material and high temperature superconductor exhibit significant applications in fundamental research and industrial production. The exploration superhard and superconducting materials, which are easy to manufacture, low-cost, and high-performance, are challenge problems. The CALYPSO crystal structure prediction is an effective structural search method[1,2]. Recently, we use CALYPSO structure prediction method and design several superhard materials and high temperature superconductors[3-8]. The main advancements are as following: we have discovered the first known intrinsic superhard metal, the hP4 phase of tungsten nitride, and explained its complex chemical bonding and stress response mechanisms. We have identified the the Pm-3 phase of boron-carbon compound (RbYbB6C6), which exhibits a superconducting transition temperature as high as 70 K under ambient pressure, and is close to the operating temperature range of liquid nitrogen. These results offer significant insights for the synthesis and design of new superhard and superconducting materials.

D04-02**中子衍射高压极端环境加载技术及应用**

房雷鸣^{*1}, 孙光爱¹

1. 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳

中子具有不带电荷, 穿透能力强, 对轻元素敏感, 具有磁矩等特性, 所以中子作为探针的中子散射技术被广泛应用于化学, 软物质, 基础物理, 地球科学, 工程等领域, 并发挥了越来越重要的作用。位于四川绵阳的中国绵阳研究堆 (China Mianyang Research Reactor, CMRR) 是国内的三大国家中子源之一, 于 2012 年通过国家验收并对用户开放。中国绵阳研究堆中子散射设施目前有 14 条束线 (谱仪) 运行, 包括中子衍射, 反射, 小角, 应力, 自旋回波, 超小角, 三轴等。其中, 在中子衍射谱仪上配备了高压, 高温, 低温等极端样品环境加载, 可进行常规, 高/低温, 高压环境下的中子衍射实验。目前中子衍射实验的原位高压加载环境室温高压可达 30 GPa 以上, 高温高压可达 2000 K/10 GPa。CMRR 的高压中子衍射技术已广泛应用于过渡金属氮化物, 锂离子材料, 磁性材料, 含能材料, 铁电陶瓷等方面的应用研究, 通过常规中子衍射, 高/低温中子衍射以及高压中子衍射技术, 给出了这些材料的原子精确占位, 磁结构, 晶体结构及相变等信息。

D04-03**极端条件下新型低功耗量子材料的量子序调控和新物态探索**

陈绪亮¹

1. 中国科学院合肥物质科学研究院强磁场科学中心, 合肥, 安徽 230031

磁性拓扑和超导材料等新型低功耗量子材料在量子计算和低功耗电能输送等方面具有巨大的应用前景, 因而一直是材料物理和凝聚态物理领域的研究前沿。运用高压, 强磁场等极端条件针对新型低功耗量子材料开展量子序调控研究, 一方面有助于认识这些材料中不同量子序的形成和演化规律, 各种量子序之间竞争/共存关系, 同时也是相关理论发展的前提和基础, 另一方面有可能发现新现象, 新效应和新材料, 从而有益于拓展这些材料的功能属性和应用范围。这里, 我们介绍近年来针对几个 Eu 基本征磁性拓扑材料以及低维电荷密度波材料 CuTe 开展的高压, 强磁场等极端条件物性调控研究结果, 具体包括描绘了其完备的

多参量物理相图，揭示了 Eu 基磁性拓扑物态的系统演化行为，CuTe 中电荷密度波和超导之间的反常相互作用等。

D04-04

超高压下氢基材料的相图结构以及物性探测

刘晓迪¹

1. 中国科学院合肥物质科学研究院，合肥

氢分子在足够高的压强下分子键断裂变成原子态金属氢。金属氢是超高含能材料，并且理论预言金属氢是高温超导材料，具有超导，超流，超固等特性，目前氢基材料已经在超高压条件下实现了 250 K 以上的近室温超导。探索氢基材料在超高压下的结构和物性，尤其是氢的金属化是物理学家近一个世纪以来不懈探究的重要科学问题。氢是周期表中第一位元素，但在高压下展示出极为复杂的相图。本工作通过高压低温拉曼光谱，在氘中发现了新相相 II'，在氢氘混合物中发现了交换相互作用主导的量子效应，获得了氢和氘的相 I, II, III, IV, V 的精确相边界，更新了氢，氘以及氢氘混合物的超高压低温相图，阐释了超高压氢的相变路径和金属化机理。另外，高压下氢化物的超导性质主要通过电学手段测量，原位高分辨磁测量一直是高压科学研究的难题并制约着高压超导迈斯纳效应和磁性相变行为研究的进展。传统的高压磁测量手段，如超导量子干涉仪，难以实现压砧中较高压力下的微米级样品的弱磁信号的高分辨率原位探测。为了解决这一关键核心难题，我们首次将碳化硅色心固态自旋用于高压磁探测研究，成功实现了高压下钇钡铜氧 ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.6}$) 超导迈斯纳效应探测和高压下钕铁硼 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) 磁体的压致磁相变探测。

D04-05

高压下的水合物

董校¹

1. 南开大学，天津

高压可以作为一种重要的极端条件研究手段，在合成新物质，发现新规律，发展新方法等方面具有重要意义。在此报告中，我们将简要介绍我们最新发现的两种新的高压下化合物体系：1) 一种是高压下的 HF-H₂O 体系，我们发现其中具有高压下特有的 H₄O₂⁺ 离子，说明高压下水合物的电离模式出现显著变化；2) 另一种是高压下的 H₂O-SO₃ 体系，我们在其中发现了一种新的化合物原硫酸，H₆SO₆，这种新的发现将改变人们对冰行星和气态巨行星中硫循环的认识。

D04-06

过渡金属钽的高压熔化研究

刘浩¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心北，绵阳

常温常压状态下，过渡金属钽物理化学性质稳定，在科学研究与工程应用中常被用作标准物质，是一种高价值材料。作为典型的过渡金属，钽原子外壳层 (d 电子) 处于部分填充状态。极端温压条件下晶格振动行为具有明显的非谐效应，电子结构与动力学行为复杂，目前尚无能够精确描述这一效应的外壳层电子关联泛函模型，导致理论研究难以独立判断其对钽在极端温压条件下结构与物性参数预测的准确性，典型的如晶体结构，熔化线等。因此，近年来钽的高压相稳定性，状态方程参数和熔融行为一直是人们研究的热点。尽管前人开展了许多静态和动态压缩实验，以及相应的理论工作，钽在高压下的熔化线仍然没有得到很好的认识，同时，熔化前 ($P > 135$ GPa) 的晶体结构仍未严格确定。在本工作中，我们利用动态 X 射线衍射技术对激光驱动冲击加载钽的高压晶体结构和熔化压强参数区间进行了原位诊断。在亚纳秒时间尺度上确定了钽冲击熔化前均保持体心立方 (BCC) 结构。通过原位衍射信号强度分布特性判断钽的冲击熔化起始于 240.3~269.9 GPa 之间，在 318.1~355.5 GPa 之间完全熔化。由于无法精确测量钽的熔化温度，

我们以实验确定的 BCC 结构为初始条件, 用第一性原理分子动力学方法计算了钽的高压熔化曲线。通过与前人的实验数据比较, 我们的熔化曲线与已报道的动态压缩实验一致, 相对偏差在 5% 以内, 但是与静态熔化数据的相对偏差在 15% 左右。可以看到静态压缩与动态压缩熔化数据之间仍然存在系统差异。原理上, 我们的实验, 已有的动态压缩实验与理论研究手段分别代表了不同时空尺度, 平衡和非平衡熔化过程, 由此已排除了时空尺度效应的影响。因此, 这种动静态实验系统差异的现象可能源于某些未被揭示的技术或物理问题, 我们将在本报告中探查可能的原因, 并对后续的研究提出展望, 研究获得的熔化曲线将被用于构建钽的多相物态方程。

D04-07

新型量子功能材料的高压合成与调控

李翔¹

1. 北京理工大学, 北京

D04-08

极端条件超高压超导材料研究

孔盼盼^{1*}

1. 中国科学院物理研究所, 北京

超导是 20 世纪物质科学最重要的发现之一。其零电阻效应和完全抗磁性具有巨大的潜在应用价值, 为材料, 信息和能源技术的颠覆性跨越提供了可能。金属氢和室温超导被诺贝尔物理奖得主, 著名凝聚态物理学家 Ginzburg 教授列为物质科学领域亟待解决的两大重要科学问题。超高压技术是解决以上两大重要科学问题的有效途径。报告人长期致力于超高压极端条件下金属氢和新型富氢高温超导体研究, 首次在超高压条件下利用电阻测量直接观测到氢的半金属化行为, 实现了近百年金属氢研究进程中的重大突破; 首次实验发现具有笼型结构且 T_c 为 250 K 的 LaH_{10} 富氢超导体, 刷新了超导转变温度的世界最高记录; 首次实验发现 T_c 为 243 K 的 YH_9 富氢超导体, 拓展了近室温超导的新体系。这些成果引领了近期金属氢和富氢高温超导的研究热潮。

D04-09

强激光加载技术及其在极端高压下材料特性研究中的应用

段晓溪^{*1}, 王哲斌^{1,2}, 刘浩^{1,2}, 杨为明^{1,2}, 孙亮^{1,2}, 章欢^{1,2}, 张琛^{1,2}, 理玉龙^{1,2}, 关赞洋^{1,2}, 刘永刚^{1,2}, 车兴森^{1,2}, 王峰^{1,2}, 李志超^{1,2}, 董云松^{1,2}, 杨冬^{1,2}, 杨家敏^{1,2}, 赵宗清^{1,2}

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

2. 中国工程物理研究院, 等离子体物理全国重点实验室, 绵阳

摘要: 极端高压下的材料特性参数(相结构, 状态方程, 输运系数等)研究在天体物理, 高压材料科学, 惯性约束聚变, 国防科学等领域都有重要的应用价值。高能激光能够在纳秒极短的时间尺度内, 将数十到数万焦耳能量沉积到数百微米到数毫米的极小空间尺度内, 产生数万到数亿大气压的极端高压下从数千开尔文到数十万开尔文温度范围的宽区热力学状态, 为极端条件下的材料特性研究提供了重要的实验平台。近年来, 激光聚变研究中心材料压缩特性研究团队依托中心建立的“神光”万焦耳, 十万焦耳级世界先进水平的高能强激光装置, 开展了体系化的极端高压物性实验能力建设: 建立了激光直接/间接驱动驱动的冲击, 准等熵以及“冲击+准等熵”的多热力学路径的高压加载技术, 实现了覆盖从百 GPa 低温固相到近 10TPa 高温等离子体状态的宽区高压加载能力。进一步将高压加载技术与基于动态 X 射线衍射测量的微观结构测量, 高精度速度测量, 反射率测量等先进的诊断技术结合, 应用于极端高压金属材料冲击雨贡纽状态方程参数研究, 冲击声速研究, 金属冲击熔化相变研究, 金属低温高压固相结构研究等一系列材料极端压强条件下的物质特性研究工作。本报告主要介绍我们在激光高压加载技术的体系化建设, 展示了其在极端高压物性

参数研究方面的进展及相关的研究成果。

D04-10

次晶态金刚石的高压晶化行为研究

唐虎¹

1. 吉林大学, 长春

结晶是无序固体和液体向有序固体发生的结构转变。在高压下非晶材料表现出奇特的结晶行为。理解高压下非晶的结晶特性能够为设计高性能的非晶/纳米复合材料和纳米多晶材料提供思路。金刚石作为典型的高压材料, 在过去的半个多世纪大量的研究聚焦于碳的高压结构相变和多形态金刚石材料的合成, 然而, 由于前驱物 sp^3 非晶碳的缺失, 长久以来人们无法研究物 sp^3 非晶碳的晶化行为。近期, 我们利用大腔体压机合成了毫米级块状物 sp^3 无定形碳。有趣的是我们合成的物 sp^3 无定形碳含有高体积分数的类立方和类六方次晶体, 因此我们将其命名为次晶态金刚石。次晶体的存在将为丰富物 sp^3 无定形碳晶化行为的研究。我们以次晶态金刚石作为前驱物研究了其在高温高压下的稳定性和晶化行为。我们的研究表明次晶态金刚石的晶化温度随着压力增加而降低, 斜率是 -10 K/GPa 。次晶态金刚石中含有的立方和六方次晶作为析晶过程中的晶核, 从而促进次晶态金刚石向立方和六方金刚石发生晶化。我们的研究为理解密堆积材料在高压下的晶化行为提供了新的思路。

D04-11

高压下铋基富氢化合物高温超导体的实验研

马良^{1,2}, 单鹏飞², 程金光^{*2}

1. 郑州大学, 物理学院, 郑州

2. 中国科学院物理研究所, 北京

近期, 一系列高压富氢化合物高温超导体的发现刷新了超导转变温度的最高纪录, 开创了高温超导研究的新时代。然而氢化物高温超导体仍然存在着合成压强过高, 超导结构类型单一等问题。在 2015 年, Ashcroft 曾提到具有更大相对原子质量的元素在高压下的氢化物金属化临界压强可能更低。作为元素周期表中相对原子质量最大的非放射性元素, Bi 元素则有望在更低的压强下与氢形成高温超导体。此外, 在早期 Bi-H 体系的结构预测研究中, 也发现了一系列在高压下 Tc 接近 100 K 的铋氢化合物。受此启发, 我们近期在实验上针对高压下 Bi-H 体系展开系统研究, 以单质 Bi 与 BH_3NH_3 为初始反应物, 在高温高压条件下成功合成两种分子型氢化物超导体 BiH_2 和 BiH_4 。原位高压电学测量结果表明 BiH_2 和 BiH_4 在 170 GPa 左右分别具有约 50 K 和 90 K 的超导转变温度。后续的理论计算发现, 不同于 H_3S 和 LaH_{10} 这些类型的氢化物中费米面附近高比例的氢元素电子态密度贡献, Bi-H 体系中氢元素电子在费米面附近态密度贡献较低, Bi 元素对于高温超导占据主导贡献。我们当前的结果能够扩大高压氢化物超导材料的研究范围, 为将来在更多样化的结构类别中寻找高温超导体提供参考。

D04-12

极端压力下二维材料的结构相变与性质研究

陈亚彬¹

1. 北京理工大学, 北京

探究微纳米材料在极端压力下的化学结构和物理性质有望突破其在国防军工和超常条件下的杀手铜级应用限制。在极端压力下, 常规材料可以转变为多种新奇的相结构, 进而表现出超常规的物理性能。极端压力可分为各向同性的超高静水压力和各向异性的单轴应力等。金刚石对顶砧是能够在一般实验室内产生百万大气压力的简单实验装置, 亦能够与高温, 低温和强磁场等物理条件耦合实现复合极端环境; 通过基于柔性高分子基底的两点弯装置可对微纳米材料施加可控的单轴拉应变或压应变。在本研究中, 将汇报

近年来课题组在极端压力下二维材料的结构相变与性质研究进展，主要包括：1) 具有超强各向异性性能的二维材料-黑砷，其面内的各向异性结构决定了沿不同晶向的导电和导热性能；利用金刚石对顶砧装置，探究了亚稳相黑砷的物理本源，仅在 1 GPa 即转变为热力学稳定相灰砷；此外，基于开发的原位拉伸装置，发现其沿锯齿型方向和扶手椅型方向的杨氏模量和断裂强度具有显著差异，各向异性比值约为 2.5；2) 具有不同相结构的二维材料-碲化亚铁，其可展现为具有层状结构的反铁磁性 $t\text{-FeTe}$ 和具有非层状结构的铁磁性 $h\text{-FeTe}$ 。在极端压力下，发现 $t\text{-FeTe}$ 在 ~ 3 GPa 时可转变为铁磁性，且居里温度高达 ~ 120 °C；相比， $h\text{-FeTe}$ 在 15 GPa 压力范围内具有良好的磁稳定性和结构稳定性。以上研究对新型二维微纳米材料的结构设计和可控制备研究具有一定参考价值。

D04-13

非简单空间群拓扑绝缘体 KHgAs 中压力诱导的超导

代光阳¹

1. 河南省科学院量子材料与物理研究所，郑州

摘要：拥有沙漏型能带色散关系的拓扑绝缘体 KHgX ($X = \text{As}, \text{Sb}, \text{Bi}$) 引起了极大的兴趣。不同于在先前实验中测试的受时间反演对称性或镜面对称性保护的拓扑绝缘体，这些材料被提议为第一类能带拓扑性依赖于非点空间群对称性的材料。因此， KHgX 展示出许多奇异的物性，如沙漏型电子通道和三维双量子自旋霍尔效应。迄今为止，对这些非简单空间群拓扑绝缘体的高压实验研究仍然很少。本报道中，我们生长了 KHgAs 的单晶样品，并进行了高达 55 GPa 的高压电学测量以及高压 X 射线衍射测量和高压结构预测。我们发现，在约 16 至 20 GPa 之间存在一个由压力引起的半导体-金属转变，随后在约 21 GPa 时出现了临界温度约为 3.5 K 的超导电性。超导转变温度在 31.8 GPa 时增大到最大约 6.6 K，然后缓慢下降。此外，我们观察到了 55 GPa 压力内存在的三个高压相，并确定了它们的晶体结构。我们的结果给出了 KHgAs 的高压相图，并确定了非简单空间群拓扑绝缘体中存在压力诱导的超导电性，为研究受非简单空间群对称性保护的拓扑非平庸特性与超导电性的关系提供了可能。

D04-14

重费米子材料高压制备及高压物性调控

望贤成^{*1}，傅立承²，朱金龙²，靳常青¹

1. 中科院物理所，北京
2. 南方科技大学，深圳

报告将介绍新的 Ce 基重费米子材料 Ce_3TiAs_5 的高压制备，结构及其物性研究，同时介绍其姊妹材料 Ce_3TiBi_5 的高压物性调控研究。 Ce_3TiAs_5 具有六方相晶体结构，其结构含有沿 c 轴方向的共面 TiAs_6 八面体链和 zig-zag 形的 Ce 链，呈现显著的准一维结构特征。该材料基态为倾斜反铁磁，转变温度约 13 K。其电子比热系数为 $645 \text{ mJ}/(\text{mol}\cdot\text{K}^2)$ ，为典型重费米子材料。 Ce_3TiAs_5 和 Ce_3TiBi_5 均表现出显著的近藤效应。通过高压原位测量 Ce_3TiBi_5 的电输运性质，发现该材料呈现出近藤效应的各向异性现象。

D04-15

低于兆帕压力下超导转变温度超过 105 K 的非笼型三元镧硼氢化合物

宋晓旭¹，郝晓宽¹，魏旭东¹，何新玲³，刘寒雨²，马良⁴，刘广韬²，王洪波²，牛景雨¹，王绍杰¹，齐彦鹏⁵，柳忠元¹，胡文涛¹，徐波¹，王霖¹，高国英^{*1}，田永君¹

1. 燕山大学，秦皇岛
2. 吉林大学，长春
3. 河南省科学院，郑州
4. 郑州大学，郑州
5. 上海科技大学，上海

自室温超导被首次发现以来，人们对室温超导的追求已持续了一个多世纪，它有可能给各行各业带来革命性的变化。氢化物是实现室温超导的理想候选物质，目前，人们已经对其在理论和实验上进行了广泛的探索，其中，具有代表性的笼型氢化物 LaH_{10} 在 180 GPa 的超导转变温度 (T_c) 高达 260 K。然而，这些高 T_c 的氢化物只有在极端压力下才会保持稳定，对于超过 110 K 的超导体来说，稳定压力通常超过 120 GPa，这极大的限制了此类超导材料的应用。这促使人们对设计和合成稳定压力较为适中的高 T_c 氢化物产生了兴趣。本工作中，我们利用金刚石对顶砧高压技术和原位激光加热技术，成功的在 150 GPa 和 2000 K 的条件下合成了非笼型的三元镧硼氢化合物 (LaB_2H_8)。此外，我们分别使用物性测量系统和同步辐射 X 射线衍射装置对其超导电性和晶体结构进行了表征。电输运测量表明，在 90 GPa 的条件下，样品的 T_c 高达 106 K；随着外加磁场的增加， T_c 向低温移动，这进一步证实了超导电性的存在；通过 GL 和 WHH 模型拟合，样品在 92 GPa 时有高达 26 T 和 34 T 的上临界磁场。通过高压原位的 XRD 测量，我们得到了最基本的金属子晶格结构，并且在减压过程中，合成产物的结构可稳定至 59 GPa。结合电输运测量，XRD 测量结果和对多个候选相的晶体结构，稳定性，电子性质以及超导电性的预测， $I4/mmm$ LaB_2H_8 是与实验结果最一致的候选相。值得注意的是， LaB_2H_8 呈现出一种以强共价键为主的非笼型结构，其中 B 与近邻的 B 和 H 原子以共价键结合形成了 B_2H_8 单元。这些发现表明，将非金属元素掺入已有的二元金属氢化物体系可以在保留较高的 T_c 情况下降低其稳定压力，这为在多元氢化物领域探索能稳定至低压甚至常压的高 T_c 氢化物提供了一条前景广阔的途径。

D04-16

载能粒子束在核材料研究中的应用

王铁山¹

1. 兰州大学，兰州

D04-17

硅基封装结构电离辐射效应机理与加固研究

孟德超^{1,2*}，张光辉^{1,2}，杨增辉^{1,2}

1. 中国工程物理研究院电子工程研究所

2. 中国工程物理研究院微系统与太赫兹研究中心

作为新一代先进封装互连技术，硅通孔 (Through Silicon Via, TSV) 是推动低功耗、高性能、高密度集成电子系统的基础封装形式之一。TSV 主要通过改变互连方式、减小互连长度，进而实现信号延迟抑制、寄生电容/电感降低、电路能耗比提升等优点。目前该类先进封装结构辐射效应，尤其是宇航中广泛存在的高能射线引起的电离辐射效应仅有寥寥数篇报道，已成为当前研判先进集成是否可用于极端环境服役的重要短板之一，亟待深化。

本报告将从 TSV 信号传输基本功能——直流信号漏电和交流信号传输损耗两个方面入手，汇报我单位在该类“辐射钝感”无源对象电离辐射总剂量、低剂量率辐射效应方面的进展，包括首次发现的绝缘氧化层界面处电介质弛豫相关的、频率依赖的交流损耗异常增大现象，电离辐射效应机理诊断从直流到交流、从唯相到具象、从缺陷到电路的有益尝试，以及基于电路设计去耦和氧化层制备工艺优化等方式实现的抗辐射正向设计等探索工作。

关键字：电离辐射、低剂量率、TSV、交流损耗、电路设计、工艺优化

D04-18**原位辐照分析技术在核能材料微结构研究中的应用**冉广¹

1. 中国科学院物理研究, 北京

D04-19**真实尺寸多丝超导线圈磁通跳跃和失超过程的整体数值模拟**薛存^{*1}, 任晗熹¹

1. 西北工业大学, 西安

超导体在用于粒子加速器, 磁共振成像, 聚变反应堆和许多其他高端技术应用的高场磁体的发展中起着至关重要的作用。不幸的是, 它们的性能可能受到热磁不稳定性的影响, 其中快速磁扩散和热扩散的相互作用可能导致灾难性的通量跳跃, 最终导致不可逆转的损伤。这个问题长期以来一直困扰着高磁场磁体核心的高临界电流 Nb3Sn 超导线。此外, 随机性的磁通跳跃会诱发过早失超, 对失超保护等提出了严重的挑战。我们引入了一种开创性的大规模 GPU 并行优化算法, 旨在解决超导线圈磁通跳跃和失超过程中电磁, 加热和应变共同作用的复杂交织效应。通过与 Nb3Sn 超导线的磁化测量结果进行比较, 并在电磁线圈上进行了进一步的实验测试, 验证了我们的模型正确性。此外, 利用我们开发的数值算法, 我们揭示了超导线圈磁热不稳定性(包括磁通跳跃和失超)动态传播机制。我们的研究表明, 线圈内磁通跳跃和失超的速度场与每根导线在特定时间间隔内经历的焦耳加热量相关, 而不仅仅依赖于瞬时焦耳加热或最高温度, 研究结果有助于为优化下一代超导磁体的设计铺平道路。

D04-20**高压下氢基高温超导体的实验研究**刘广韬¹

1. 吉林大学, 长春

高温超导作为 21 世纪 30 个重要物理问题之一, 是备受关注的科学挑战。目前, 以 LaH10 为代表的氢基材料在高压强下保持着 250K 的超导温度纪录, 是实现室温超导电性的理想候选材料。针对新型氢基材料的制备和超导性质优化等关键问题, 我们开展了广泛的实验探索。我们在氢基超导体中发现了氢空位缺陷的确切证据, 并揭示了这些缺陷对提高氢基材料稳定性的关键机制。此外, 通过元素替代策略, 我们成功合成了 (La,Ce)H9 高温超导体, 将二元富氢超导体 CeH9 的超导温度从 100K 提高到 178K, 为实现“多元素协同调控提高氢化物超导温度”提供了直接实验证据。我们还成功合成了高温超导体 LaBeH8, 首次在实验上建立了具有三元结构原型的 XYH8 型氢基超导体, 推动了在高压下寻找新型高温超导体的探索。

D04-21**基于 YSZ 薄膜的极限电流型氧气传感器研究**符亚军¹

1. 西南科技大学, 绵阳

氧气传感器在医疗, 冶金, 航空航天, 汽车等各个领域有着广泛应用, 但目前基于 YSZ 陶瓷固态电解质的氧气传感器存在体积较大, 功耗较高的问题。我们通过将 YSZ 固态电解质层薄膜化的方法实现了基于 YSZ 薄膜的极限电流型氧气传感器。器件中 YSZ 固态电解质层厚度小于 1 μm , 器件能够在 6%-21% 的氧气浓度范围实现响应, 极限电流与氧气浓度呈线性关系。器件工作温度可降至 500 $^{\circ}\text{C}$ 左右, 且在 500 $^{\circ}\text{C}$ - 650 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内器件的 $\log I_L$ 与 $1000/T$ 之间保持线性关系。进一步通过控制 YSZ 薄膜裂纹和引入五氧化二钽作为气体扩散层提升了器件的稳定性。基于 YSZ 薄膜的极限电流型氧传感器可与 MEMS 技术兼

容，为后续器件的优化和实际应用奠定了基础。

D04-22

中子探测器 h-BN 单晶材料制备及其性能研究

邱杰¹

1. 上海交通大学，上海

D04-23

H₂-CO₂/CO 体系辐射化学反应研究

沈崇雨¹

1. 中国工程物理研究院材料研究所，绵阳

D04-24

高压下 RDX 晶体结构探索及其高压热分解机理的理论模拟研究

薛向贵^{*1}，王超宇¹，张朝阳¹

1. 中国工程物理研究院化工材料研究所，绵阳

含能材料广泛用于军事，航天以及民用领域，它们在国家安全，科技进步和经济发展中发挥着关键作用。含能晶体是含能材料的主要使用形态，在其服役过程中往往会受到高温，高压等极端条件的影响。在此过程中含能材料经历了许多复杂的物理化学变化，如分子构型变形，晶体相变，应力和温度升高等，从而显著影响其安全性能[1-4]。因此，探索含能晶体在高压条件下的晶体结构，并研究其温压条件下热分解机理对理解其安全性能具有非常重要意义。在本工作中，为了探索典型含能材料 RDX 在高压下的晶体结构，我们采用定制力场结合密度泛函理论方法探索了 RDX 在常压以及高压下的可能晶体结构。考虑到 RDX 的分子柔性，首先对其分子构象进行搜索，探究其不同条件下可能的分子构象。基于 DFT 计算拟合了 RDX 的高精度力场，采用此力场并结合 DFT-D 方法首次实现了 RDX 四种晶体结构 α -， β -， ϵ -和 γ - RDX 准确预测。通过 RDX 的常压与高压(1~5 GPa)下的晶体能量-密度图，我们发现 α -RDX 为常压下最稳定结构， β -RDX 为常压下亚稳态结构， ϵ -和 γ - RDX 为高压下稳定结构。此外，我们还发现了 RDX 的一个可能的潜在高压新相 η -RDX，其在 2.3~3.5 GPa 范围内晶格能最低，有待实验进一步验证。此外，我们采用 ReaxFF 反应动力学方法结合 CI-NEB 方法研究 α -和 ϵ -RDX 在高压下的热分解机理。研究发现， α -和 ϵ -RDX 的热分解速率分别对压力成正相关和负相关。这一差异源于压力对 RDX 两种晶型的分子间 H 转移反应的不同影响。我们揭示了对于 α -和 ϵ -RDX 晶体，其热分解引发机理均为双分子 H 转移而不是-NO₂解离。对 α -RDX，其分子间 H 转移势垒随着压力的增加而降低；而对于 ϵ -RDX，其分子间 H 转移势垒随着压力的增加而增加。这一发现有助于理解压力和晶型对 RDX 热分解的影响规律，有助于建立固体 RDX 燃烧的动力学模型。

D04-25

水合盐基柔性相变材料构筑及其应用研究

李永升¹

1. 西南科技大学材料与化学学院，绵阳

三水合乙酸钠是一种高潜热，相变温度适宜和成本低廉的无机相变材料，可广泛应用在多种热能储存

系统中。但由于其存在过冷度大，易相分离，热导率低，热稳定性差以及刚性强等问题，严重限制了其在热能储存系统中的应用。本研究通过引入的成核剂，增稠剂，导热填料开发出了无相分离，低过冷度，高导热的复合材料体系，进而与水凝胶体系复合，构筑出具有良好自修复能力的柔性相变复合体系，并在锂电池热管理系统中表现出优异性能。进一步向复合体系中引入石墨烯纳米片，增强其导电性能，开发出了可用于人体关节热疗的太阳能驱动水凝胶复合材料体系，同时体系表现出优异的应变传感能力和良好的抗疲劳性，可精准监测人体关节的弯曲运动。三水合乙酸钠柔性复合材料在电池热管理，可穿戴，个性化医疗，智慧医疗等领域都具有巨大的应用潜力。

D04-26

过渡金属增强石墨-金刚石复合薄膜场发射性能研究

张文*^{1,2}，熊鹰¹，王兵¹，汪建¹，刘辉强¹，杨万林¹

1. 西南科技大学，绵阳
2. 环境友好能源材料国家重点实验室，绵阳

近年来，以石墨-金刚石复合薄膜为代表的半导体材料成为场发射冷阴极材料研究的热点。本报告基于液态有机碳，过渡金属源，采用微波等离子体化学气相沉积法制备石墨-金刚石复合薄膜，研究结果表明该制备方法可在石墨-金刚石复合薄膜中引入了过渡金属铁或镍，且不会有新相的产生，过渡金属引入到石墨-金刚石复合薄膜中可有效调控复合薄膜的电子结构，降低复合薄膜表面功函数，并且显著增强其场发射性能：开启场强从 $4.0\text{V}/\mu\text{m}$ 降低至 $1.1\text{V}/\mu\text{m}$ ，发射电流密度从 $13\text{mA}/\text{cm}^2@8.8\text{V}/\mu\text{m}$ 提升至 $15.8\text{mA}/\text{cm}^2@2.8\text{V}/\mu\text{m}$ 。该研究为获得开启场强低和电流密度大的新型场发射冷阴极材料提供了一种新策略。

D04-27

质子诱发 CIS 瞬态亮斑产生机理及其与星点成像差异研究

冯婕*¹，崔益豪¹，李豫东¹，文林¹，郭旗¹

1. 中国科学院新疆理化技术研究所，乌鲁木齐

星敏传感器是一种以恒星为参照系，以星空为工作对象的高精度空间姿态测量装置，其因精度高，可靠性强及自主性好等优势在各类航天飞行器中得到广泛应用。星敏传感器在轨运行过程中其成像器件 CIS 由于受到高能质子入射影响，所拍星图除包含星点外还存在大量质子诱发瞬态亮斑，对星敏传感器星点识别与定位产生较大影响。本文针对 CIS 开展了不同条件高能质子辐照试验，通过分析瞬态亮斑产生机理，并对瞬态亮斑进行特征提取，研究发现质子入射诱发瞬态亮斑的灰度值与质子入射能量，角度有关，亮斑长度随着入射角度增加而变长。然后分析了瞬态亮斑与星点的总灰度值，不同位置灰度值与最大灰度值比例关系，所占像元面积等灰度，形状特征差异，最后将二者差异性特征参数作为机器学习输入变量，形成了瞬态亮斑与星点的分类算法，从而提高了星敏传感器在轨运行的可靠性。

D04-28

利用强磁场和极低温等研究阻挫磁体的量子磁性

李岳生¹

1. 华中科技大学，武汉

阻挫磁体能够实现非平庸量子自旋态，在模拟未来量子计算，理解高温超导电性等方面具有重要应用前景，因此一直是凝聚态物理研究的前沿热点问题。本报告主要讨论强磁场和极低温测量技术在研究阻挫磁性材料中的运用：1. 利用脉冲强磁场磁化测量确定 $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{NO}_3$ 的最简单有效自旋模型，并研究其量子相变行为 [Phys. Rev. B. 106. 085119 (2022)]; 2. 利用极低温直流磁化和热导测量，研究 $\alpha\text{-CoV}_2\text{O}_6$ 横向磁场的量子调控和量子退火效应 [Nat. Commun. 15, 3495 (2024)]。

D04-29**新超导材料结构设计和生长**应天平¹

1. 中国科学院物理研究所, 北京

D04-30**SiC 功率器件在极端地理及气候环境下面临的问题与挑战**余学峰¹

1. 中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐

第三代先进碳化硅(Silicon Carbide, SiC)功率器件是推动智能电网, 新能源利用等发展的重要电力电子核心元器件, 其可靠性与电力系统的安全稳定运行直接相关。新型 SiC 器件由于其本征的材料, 工艺特点, 使得其在温度等极端环境下更易发生性能及可靠性退化, 从而引发电力电子系统装置长期多应力连续运行的稳定性及可靠性问题。本报告以 SiC 器件在智能电网, 新能源应用中的可靠性保障需求为背景, 讨论了在极端地理, 气候环境中, SiC 器件在环境温度, 工作电场, 中子辐射等多损伤因素协和作用下的一些性能及可靠性方面面临的问题与挑战。

D04-31**动态加载下炸药孔洞缺陷诱发“热点”形成机制研究**马骁¹

1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳

炸药中普遍存在复杂的界面, 孔洞, 杂质等细观缺陷。在动态加载下, 能量会在缺陷处沉积形成“热点”。学术界普遍认为孔洞塌缩是热点形成的重要原因, 但尚未给出深入认识。本研究通过先进的实验技术及数值模拟方法, 获取了含百微米孔洞缺陷的炸药晶体(或替代材料)在 10MPa~40GPa 动载下“绕, 裂, 塌, 喷”的四种演化规律, 探索了非冲击点火与冲击起爆在“热点”尺度的内在联系。

D04-32**非极端条件下新超导探索**齐彦鹏¹

1. 北京理工大学, 北京

最近在 LaH_{10} 等富氢化物中发现近室温的超导电性引燃了科研工作者利用高压技术在富含轻元素的体系探索高温超导甚至室温超导的热情。最近我们课题组利用高压技术对另外一种富含轻元素的体系—富硼体系进行了详细研究。本报告将着重介绍金属二硼化物 MoB_2 在高压下具有 32K 的超导电性, 并且研究了超导机理, 尤其是与经典的 MgB_2 进行了对比研究。报告最后还简要介绍 MoB_2 相关的其他二硼化物: WB_2 和 CrB_2 中压力诱导超导的研究。

D04-33**ITER 装置面向等离子体材料中的氟渗透与滞留研究**倪木一¹

1. 中山大学, 广州

D04-34

钨基中熵合金体系及其凝胶注模成形 CPS 结构工艺的研究胡逸飞¹, 索进平^{1*}

1. 华中科技大学, 武汉

基于液态锂的具有毛细多孔系统 (CPS) 的液-固复合偏滤器/第一壁部件能够解决聚变反应堆核心材料的使用寿命问题, 其优点包括: ①由于液态锂膜的保护, 材料不直接面向等离子体, 表面无热应力或中子辐照损伤, 部件热负载显著降低, 大幅延长了使用寿命; ②通过毛细管力补偿作用, 在具有密集分布的孔隙和微纳结构的表面上能够提供稳定的锂供应。由于结构的优越性, 用于 CPS 液-固复合偏滤器/第一壁部件的材料各方面的性能阈值有所降低, 因此选用范围更加宽泛。钨因其高强度, 高熔点和良好的导热性而广泛应用于偏滤器/第一壁部件中, 但在面向等离子体时表面热应力, 中子辐照和固有脆性会大幅降低使用寿命, 其低韧性又使复杂精细结构难以成型。本研究基于锂的兼容性以及与传统热沉材料 CuCrZr 的相容性, 设计 WVCuCr 中熵合金材料体系, 其既能够保证良好强度和韧性, 又能保证良好的热导率 (高温下达纯 W 的 88%), 解决了传统钨合金使用寿命低的问题; 基于 WVCuCr 的材料特性, 采用凝胶注模的制备方法, 成功制备了致密度高 ($93.1 \pm 0.2\%$), 力学性能优异 (压缩强度与弯曲韧性分别达 SPS 制备 WVCuCr 的 87% 和 83%) 的高熵合金样品, 解决了传统无压烧结钨的致密度低, 力学性能差等问题; 利用 3D 打印技术与凝胶注模相结合, 独创 3D 打印阴模-凝胶注模-脱脂烧结工艺, 成功制备了具有微纳结构的毛细多孔系统 (CPS) 成品, 解决了传统 3D 打印空间分辨控制精度不够的问题。本研究为用于偏滤器/第一壁部件钨基材料的设计和制备提供新知识, 为新一代具有毛细多孔系统 (CPS) 的液-固复合材料的研发奠定了理论基础。

D04-35**非线性光学晶体设计**李志¹

1. 南京理工大学, 南京

较高的二阶非线性光学系数, 是优良的非线性光学晶体满足的基本条件之一。只有高的二阶非线性光学系数才能将单光子高效转换为纠缠的双光子或双光子转换为单光子。针对如何获得较高的二阶非线性光学系数问题, 利用量子几何张量场的概念及密度矩阵方法, 报告人系统研究了宽带隙半导体及拓扑量子材料中非线性光学效应的机理。该理论通过在动量空间中布洛赫波函数上建立联络矢量 (贝里联络) 及二阶的量子几何张量 (包含对称的度规张量及反对称的曲率张量), 通过度规张量与线偏振光的耦合或曲率张量与圆偏振光的耦合解释电子-空穴对的产生。由于非线性光学晶体具有破缺的空间反演对称性, 电子及空穴的位置中心 (瓦尼尔中心) 之间存在位移矢量。由于非零的位移矢量, 晶体中必然存在二阶的电荷极化。在拓扑量子材料中, 由于能带交叉点具有无限大的贝里曲率强度, 在圆偏振下具有非常强的非线性光学效应。对于宽带隙的非线性光学晶体材料, 由于载流子产生浓度与量子几何张量场的强度密切相关, 该理论进一步揭示了决定二阶非线性光学系数的关键材料参数, 即带隙以及共价键强度。通过高压合成的方法有望实现共价键的增强以及二阶非线性光学系数的提升, 同时不减小带隙。

D04-36**钙钛矿类功能材料的设计, 制备和物性调控**赵建发^{*1}, 于润泽¹, 靳常青¹

1. 中国科学院物理研究, 北京

钙钛矿及其衍生材料中由于存在电荷, 自旋, 轨道和晶格多重自由度, 从而呈现出丰富的物理现象, 例如铁电, 压电, 介电, 多铁, 光伏和催化等, 是凝聚态物理和材料科学研究的重要对象。近年来, 阳离子有序钙钛矿受到人们的普遍关注和研究。以 A 位有序钙钛矿为例, 这类材料的化学通式为 $AA'_3B_4O_{12}$ 。与 ABO_3 型简单钙钛矿相比, 在 A 位有序钙钛矿中, $3/4$ 的 A 位离子被过渡金属阳离子所替代, 形成 A'

位。因此在 A 位有序钙钛矿中，除了传统的 B-B 相互作用，还存在 A'-A'，A'-B 等多种新型的相互作用，使得 A 位有序钙钛矿呈现复杂和奇异的物理现象。我们利用高温高压合成技术，研制了新型 A 位有序钙钛矿材料 $\text{PbHg}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$ ，首次发现 Hg^{2+} 占据 A' 位，将 A 位有序钙钛矿的 A' 位离子种类从 3d (Cu^{2+} , Mn^{3+} 等)，4d (Pd^{2+}) 等过渡族元素扩展到 5d (Hg^{2+}) 主族元素，由此确立了一类新型 A 位有序钙钛矿材料体系 $\text{AHg}^3\text{B}^4\text{O}^{12}$ 。此外，该材料存在温度诱导的中心对称到非中心对称结构相变，同时伴随铁电相变，并且铁电温度高达 250 K。这是首次在 A 位有序钙钛矿中发现非中心对称的结构相变以及位移型铁电，也是多阶有序钙钛矿发现的温度最高的铁电极化，为在多阶有序钙钛矿材料中寻找具有高居里温度的铁电材料提供了一个新方向。

D04-37

压力调控双钙钛矿 Cs_2TeCl_6 中的自陷激子发射

刘才龙¹

1. 聊城大学

压力调控的自陷激子 (STE) 发射机制，在全无机无铅金属卤化物双钙钛矿中具有大的斯托克斯偏移宽带发射特性，已引起光学，光电子学和生物学等各个领域的广泛关注。以 Cs_2TeCl_6 为例，作者们阐明了其压力调控的 STE 发射性能，归因于压力诱导的电子态演变。两个电子态转变分别发生在 1.6 和 5.8 GPa。 Cs_2TeCl_6 的电子行为由压力和压致电子态转变共同调节。当压力达到 1.6 GPa 时，表征电子-声子耦合强度的黄-瑞斯因子 S 达到约 12.0 的最优值，与压力诱导的 Cs_2TeCl_6 的光致发光强度相比，在环境压力下，其光致发光强度增加了 4.8 倍。通过分析压力依赖的 STE 动态行为变化，作者们揭示了 Cs_2TeCl_6 中 STE 发射增强和淬灭的压力调控微观物理机制。

D04-38

钙钛矿太阳能电池的空间质子辐照效应

张利民^{*1}，薛斌韬¹，刘宁¹，汪定平¹，梁永齐¹

1. 兰州大学，兰州

钙钛矿太阳能电池 (PSCs) 由于光电性能优异，质量轻，柔性好等特点，具有重要的空间应用前景。PSCs 在空间中会受到高能粒子辐照的影响，其中质子辐照是造成空间器件性能退化的重要原因。本工作利用旋涂法，制备了 $\text{Cs}_x\text{MA}_y\text{FA}_{1-x-y}\text{PbI}_3$ 钙钛矿薄膜和由不同载流子传输层构成的 PSCs 器件，对制备样品开展了 50~250 keV, 2 MeV, 10 MeV, 20 MeV 和 100 MeV 的质子辐照实验。结合实验和分子动力学 (MD) 模拟的方法，研究了钙钛矿薄膜和 PSCs 器件的质子辐照效应。结果发现，质子辐照导致了钙钛矿薄膜晶格缺陷的“自恢复”，造成薄膜发光特性的增强，但“自恢复”效率随着质子注量的增加而减弱，最终导致薄膜荧光产额，寿命和量子产率的降低。除了核碰撞，有机成分的辐射分解是造成钙钛矿质子辐照损伤的重要原因。相比当前商用的 Si 和 GaAs 基太阳能电池，PSCs 具有超强的抗辐照能力。对于 100 keV (或 2 MeV) 质子辐照，当质子注量超过 $1 \times 10^{13} \text{ p/cm}^2$ (或 $1 \times 10^{14} \text{ p/cm}^2$) 时，才会造成 PSCs 的性能退化。PSCs 的 J_{SC} ，FF 和 PCE 随质子注量的增加呈 S 曲线降低规律。质子辐照导致了电池 Spiro-OMeTAD 空穴传输层的去掺杂，是造成电池性能降低的主要原因。相比低能质子，动能超过 10 MeV 的质子在 PSCs 中具有更大的离子射程，它们导致电池玻璃基底透光率的显著降低。质子辐照在玻璃中产生的非桥氧色心缺陷在室温下便可通过捕获自由电子而恢复，100 °C 热退火可以增强色心缺陷的恢复，从而降低玻璃的透射损失。

D04-39

基于 ProME 平台的可压缩性合金组分优化

高兴誉¹

1. 北京应用物理与计算数学研究所，北京

从合金组分和晶格结构出发,在 ProME 平台中实现了基于第一性原理的热力学相图,热弹性性质与冲击压缩特性的集成计算功能。在此基础上,首次构建了钨铼铋三元合金的热力学相图,模拟了质量密度约束下的相组成,相分数及相应弹性性质的变化规律,发现了常压下增韧调控的组分优化方向。结合质量密度约束下的冲击压缩特性模拟,实现了百万大气压下易压缩与常压下高韧性的设计目标。

D04-40

面向高功率固体激光装置的熔石英元件先进表面后处理技术研究进展

黄进¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

为了满足高功率固体激光装置对紫外脉冲激光输出的高通量要求,必须对大口径熔石英光学元件进行先进表面后处理,以消除或抑制因表面精密机械抛光引入的可能导致激光损伤的表面缺陷(损伤前驱体),该技术的应用和发展已成为目前高功率固体激光装置实现高通量,长寿命运行的关键。报告介绍了熔石英光学元件先进表面后处理技术的基本原理和主要手段,重点阐述了在该领域的发展和应用,包括利用 AMP 技术最大限度抑制熔石英光学表面初始损伤缺陷和利用 CO₂ 激光修复显著提高熔石英元件损伤增长性能两个方面的研究进展。这两方面的工作使得高功率固体激光装置在高达 8J/cm² 的三倍频输出通量下实现长寿命的稳定工作成为可能。最后,报告展望了未来先进表面后处理技术领域面临的挑战和机遇。

D04-41

耐铅铋腐蚀 Al 基高熵合金涂层的设计制备及性能研究

王昱¹, 张伟¹, 尹星¹, 梁景怡¹, 赵可¹

1. 中国核动力研究设计院, 成都

铅铋堆以其在燃料增殖和嬗变方面的独特优势及良好的非动能安全性,具有广阔的发展前景,已成为世界多国重点研发并投入工程建设的第四代反应堆。液态金属铅铋对堆内关键结构材料的腐蚀一直是限制铅铋堆性能提升及工程建设进度的关键因素。为了克服这一挑战,将耐腐蚀涂层与包壳复合,不仅可以保留原有包壳的优异性能,还可以提高包壳的耐铅铋腐蚀性能。论文以铁素体/马氏体(F/M)钢反应堆包壳和 Al 基高熵合金涂层作为研究对象,采用金属/金属氮化物多层结构涂层结构设计方法,构筑具有异质材料界面的多层结构高熵合金涂层,采用磁控溅射技术制备了不同单层厚度的多层结构高熵合金涂层,开展了在 450°C 至 650°C 温度不同氧含量条件下,超过 1000 h 的液态铅铋腐蚀研究,获得了液态铅铋环境中的氧扩散深度,元素分布变化,涂层微结构演变等数据,探究了多层结构中单层化学有序结构的生长状态,及其多层异质材料界面接触后的界面结构,获得了区域氧元素和合金元素在界面处的扩散行为,异质材料界面局域内的微结构演变规律,阐明了多层结构高熵合金涂层的腐蚀行为及不同单层厚度高熵合金涂层与腐蚀性能间的响应规律。

D04-42

聚变堆极端条件下液态金属流动特性及传热机理

张秀杰¹

1. 核工业西南物理研究院, 成都

D04-43

高比重钨合金的激光增材制造制备及其在聚变领域的应用探讨

乐国敏^{*1}, 李纯², 程钊朝², 杨晓珊¹, 周昱昭¹, 金伟¹, 刘徐徐¹, 王建豹³, 封范³

1. 中国工程物理研究院材料研究所, 绵阳

2. 北方工业大学, 机械与材料工程学院, 材料科学与工程专业, 北京

3. 核工业西南物理研究院, 成都

W-Ni-Fe 高比重合金由于具有高熔点和高密度的特点而在核工业，国防等领域有着广泛的应用。传统制备钨合金的方法主要是液相烧结，该方法材料利用率低，且当钨含量较低时难以避免烧结过程中的构件变形。激光增材制造技术由于具有小熔池熔化，热影响区小，近净成型的特点，可为异形，大尺寸 **W-Ni-Fe** 高比重合金构件的制备提供一条新的技术途径。本工作采用同步送粉式激光增材制造的方法，采用不同的原料粉体以及激光成形工艺参数，制备了一系列 **W-Ni-Fe** 高比重合金样品。采用 OM, SEM, XRD, EBSD 等表征手段对合金的组织，物相及其分布，织构进行了系统的分析，并在室温下测试了合金的拉伸力学性能。研究表明：激光增材制造技术制备的 **W-Ni-Fe** 高比重合金与传统粉末冶金具有类似的组织：由 BCC 结构的 W 相和 FCC 结构的 Ni-Fe 粘结相两相组成，未形成金属间化合物。通过调控成形工艺及优化原材料粉体，实现了高强塑性 **W-Ni-Fe** 高比重合金的制备，其抗拉强度可大于 1000MPa，延伸率可大于 10%，该力学性能可媲美锻件水平。通过与传统粉末冶金样品进行系统的成分，微观组织与力学性能对比，对激光增材制造 **W-Ni-Fe** 高比重合金的强化机制进行了分析，发现其强度主要来源于细晶强化，固溶强化以及两相协同强化。针对聚变堆第一壁材料的应用场景，探索研究了高比重钨合金与钢的激光增材制造连接，并对钨/钢连接界面及涂层的服役性能进行了测试分析。

D04-44

强磁场综合极端条件下二维材料物性研究

牛群¹

1. 中国科学院合肥研究院强磁场科学中心，合肥

强磁场，超高压，极低温等极端条件是调控材料物性的重要手段，在磁性材料，拓扑材料以及强关联材料等物性调控及研究中发挥了重要的作用。随着二维材料的深入研究，人们对通过强磁场，超高压，极低温等综合极端实验条件诱导，调控以及测量二维材料及器件的新奇物性有了更为迫切的需求。然而，在这种综合极端条件下，对二维材料进行精密的物性测量具有相当大的挑战性：一方面，强磁场下电磁干扰强，机械噪音大，极大地影响了实验测量精度；另一方面，极端条件下，样品空间及其有限，难以兼容复杂的测量系统。在本报告中，我们将介绍可以器件集成的金刚石对顶砧压力调控技术，以及我们将该技术用于强磁场综合极端条件下二维材料及器件物性研究的一些实验探索及进展。

D04-45

高功率太赫兹量子级联激光器研究

蒋涛¹，王雪敏¹，湛治强¹，罗佳文¹，刘莹¹，吴卫东*¹

1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心

作为一种半导体太赫兹光源，高性能量子级联激光器（QCL）具有结构紧凑，窄线宽以及较大的激射功率等优势。我们利用固源分子束外延（MBE）技术生长基于 GaAs/AlGaAs 超晶格结构的太赫兹 QCL 外延材料，并开展器件工艺和光电性能测试研究。通过超精密 MBE 生长技术和器件工艺参数优化，获得了高功率连续波输出太赫兹 QCL。单管 QCL 在 15K 下的连续波输出功率达到 289mW，脉冲输出功率达到 352mW，器件的腔长为 2.8mm，脊宽为 175 μ m，激射频率为 3.1THz，阈值电流密度低至 286 A/cm²。在此基础上制备了双管芯器件，最高连续波激射功率达到 512mW，脉冲峰值功率达到 712mW，器件最高工作温度为 125K。经过透镜整形，激光器的光束可以聚焦形成准高斯分布的双光斑。此外，我们还成功制备了 4.4THz 量子级联激光器。通过将其作为光源应用于自主研发的太赫兹全息成像仪中，横向的成像分辨率被提高到 80 μ m。我们相信大功率连续波太赫兹量子级联激光器及其在全息成像仪中的应用将有力的支持太赫兹科学的发展。

D04-46

X 射线单元件集成光源单色化技术研究

俞健¹，夏润翔¹，陈前¹，曹磊峰*¹

1. 深圳技术大学, 深圳

黑腔辐射软 X 射线能谱的动态演化过程将直接影响靶丸的压缩情况, 决定聚变反应效果, 是 ICF 实验研究精密化诊断的重中之重。由滤片-反射镜对构成的 X 射线复合 X 射线滤片是开展黑腔软 X 射线能谱诊断的重要基础技术单元。但是其存在使用成本高, 能量分辨率低, 测量结果需通过合适的算法解谱获得以及受到解谱算法稳定性和元器件标定结果误差制约等缺憾。为了解决这些问题, 本工作提出了一种 X 射线单元件集成光源单色化技术, 通过在掠入射平面基底上按特定波函数排布全反射量子点, 实现对复色 X 射线光源目标波长组分的挑选, 聚焦和成像, 配合使用狭缝或针孔进而实现复色 X 射线源的单色化。与传统的 X 射线光源单色化技术相比, 本技术仅通过单一的衍射元件同时实现聚焦, 色散以及抑制高级衍射的效果, 为 ICF 研究提供了新的技术方法, 可望推动 ICF 精密化发展, 对解决“能量丢失”问题提供帮助。

D04-47

通过密度梯度飞片实现应力-应变率可控的准等熵压缩

张建^{*1}, 黄金¹, 朱可¹, 张睿智^{1,2}, 罗国强¹, 沈强¹

1. 武汉理工大学, 武汉

2. 中国工程物理研究院, 流体物理研究所, 绵阳

在动高压领域, 使用梯度飞片 (Graded Density Impactor, GDI) 可以实现对材料的准等熵压缩。然而, 制备过程中的副产物以及粘胶的引入会等导致实验的加载曲线与设计不一致, 这在很长一段时期内限制了梯度飞片的应用。在本工作中, 设计并制备了一种具有宽密度范围 (4.5~19.3 g/cm³) 和高结构可设计性的 W/Ti 梯度飞片。W/Ti 梯度飞片的各个中间层均由 W 和 Ti 组成, 没有形成金属间化合物, 并且层与层间具有良好的平面性和平行性。这为设计的加载曲线和实验加载曲线之间的良好一致性提供了先决条件。由于梯度飞片的高度可设计性, 通过控制梯度飞片的结构, 实现了不同应力路径下的准等熵加载。通过控制飞片速度和 W/Ti 梯度飞片的类型, 成功地实现了对峰值加载应力和应变率的独立调控。W/Ti 梯度飞片在研究应力应变速率可控准等熵载荷下材料的动力响应行为方面具有巨大的应用潜力。

D04-48

激光聚变靶精密制造的挑战

何智兵¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

04-49

惯性约束聚变靶球高品质制造的多相流动传质及调控

陈永平¹

1. 东南大学, 南京

D04-50

GDP 涂层氧含量控制研究

艾星¹, 何小珊^{*1}

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

辉光放电聚合物 (GDP) 是惯性约束聚变物理实验中常用的一类靶丸壳层材料。然而, 模拟计算及实验结果均表明, GDP 靶丸壳层氧含量分布不均而引起的瑞利-泰勒不稳定性对内爆过程具有非常不利的影响。

响。针对 GDP 靶丸壳层氧含量问题,对 GDP 薄膜中的特征吸收峰和氧含量进行表征,研究 GDP 薄膜在不同环境中的氧化演变规律,对其氧化过程中的产物和氧化机制进行分析。研究表明,GDP 薄膜的氧化是由快速的光致氧化和缓慢的自发氧化和共同作用产生的。光致氧化源于 GDP 薄膜吸收光子能量产生自由基,随后与 O_2 反应,最终产生醇,醛,酮,酯和羧酸等产物。自发氧化是 GDP 薄膜中的自由基会与空气中的氧分子和水分子缓慢反应形成羰基和羟基的过程。不管是光致氧化还是自发氧化,GDP 薄膜均表现出氧化的非饱和性。氧化过程首先发生在表面,随着氧化时间的增加逐渐向 GDP 薄膜内部扩展。

D04-51

激光辐照半导体引起的单粒子翻转效应过程模拟研究

彭海波^{*1}, 潘玉贺¹, 李昊¹, 安恒², 张硕¹, 张晨光², 王铁山¹

1. 兰州大学核科学与技术学院, 兰州
2. 兰州空间技术物理研究所, 兰州

单粒子效应是影响在轨航天器正常工作的重要因素之一。为了评估器件的抗辐照性能,地面实验通常采用重离子和激光来模拟单粒子翻转效应。本工作基于热峰模型,针对激光在半导体材料中热平衡和自由电子激发的物理过程开展模拟,得到了激光入射半导体材料时电子的激发,能量沉积,电子与晶格间的热量交换以及电荷的产生和分布等微观过程。通过分析不同材料中产生的总自由电荷,探讨了单粒子翻转过程中激光在硅和碳化硅材料中激光能量与线性能量转移(LET)的等效性,并初步研究了激光脉宽对这一过程的影响。研究发现当激光脉冲宽度低于 100 fs 时,很难诱发器件的单粒子效应,而电子的热平衡时间与这个过程密切相关。

D04-52

红外透明导电薄膜的设计,生长及其光电协同机理

高岗¹, 朱嘉琦^{1*}

1. 哈尔滨工业大学, 哈尔滨

红外罩是红外探测系统结构功能一体化的重要组成部件,位于红外系统的前端。随着战场环境的复杂化,飞行器面临复杂电磁辐照环境,红外罩成为了电磁波透过及散射“媒介”,急剧降低了飞行器的隐身或者探测性能。因此,为了保证飞行器在复杂电磁环境下的使役性能,急需研制一款强屏蔽红外罩。常用的技术手段是在红外罩表面制备贵金属网栅,以满足红外透过兼容电磁屏蔽的需求。但网栅会产生衍射级序,降低成像对比度,减弱探测准确性。红外透明导电薄膜可有效解决网栅的光学性能差,制备困难等难题。然而由于红外透明与导电原理上存在矛盾制约,至今红外透明导电薄膜技术没有较大突破。针对以上技术需求,团队开启了一系列红外透明导电薄膜预测,生长,改性与应用的研究,提出了能级调控辅助晶体精细结构修饰的红外透明导电协同机理。揭示了光学介电常数对材料红外透明导电性能影响规律,获得了高光学介电常数材料缺电子多中心键分子结构设计方法;建立了基于弱电子局域化及浅能级 H 掺杂能级修饰方法的红外光电性能协同调控技术;提出了“纳米晶/非晶”复合结构实现红外光电性能协同新策略。优化设计了透明导电膜从可控生长到性质增强的系列工艺方法,开发了满足工业生产的红外透明导电膜原子层沉积技术,攻克了大尺寸原子层沉积装备温度场及动态流场稳定调控技术,创制了以压差式舱体为核心的半球红外罩膜层均匀沉积系统,研制了透明电磁屏蔽红外罩,解决了长期制约装备红外精确制导的成像和精度难题。

D04-53

纳米多孔气凝胶相互作用研究进展

杜艾¹

1. 同济大学, 上海

凝胶兼具独特的物理性质和成分的多样性，被认为是一种新的物质状态。气凝胶具有纤细的纳米结构和极低的固体含量，但是在多个方面展现出独特的性能，其与其他物质的相互作用值得探讨。本摘要综述了课题组近年来在气凝胶与其他物质相互作用方面的研究成果。1) 在电磁波作用方面，发现了碳气凝胶的超黑现象和关键机制，在射频频段观察到电磁双负行为，并拓展了超黑材料在光热水蒸发等领域的应用；2) 在声波作用方面，构建气凝胶中不均匀结构的通用模型，半定量揭示了悬空链比例对密度-声速标度关系的关联影响，构筑声速最低达 62 m/s 的新型气凝胶声学材料；3) 在强激光-X 光转变方面，利用低密度，纳米尺度均匀性，多种特定成分或结构（3D 打印等）的气凝胶设计，实现激光的体加热和高效转化。4) 在超高速粒子作用方面，采用 km/s 级不规则高速粒子进行地面捕获实验，实现对复杂运动过程的反演，并发现新型径迹，还通过构建超薄梯度密度气凝胶作为高速飞片实现了等熵稀疏压缩。此外，本报告还将介绍课题组在气凝胶快速放大生产及其在航天等领域的应用进展。由于存在特殊的微结构和丰富的界面，气凝胶材料与物质的相互作用通常明显强于普通多孔泡沫或纳米材料，其作用机制的探索将加深学者们的理解，也将为设计高性能气凝胶打下基础。

D04-54

基于超原子特性实现从极端条件到常规条件的含能氮环体系稳定

王志刚^{*1}，宫震¹，于法民¹，万晨曦¹，杨欣瑞¹

1. 吉林大学，吉林

作为第四代新型含能系统，氮环于常规条件下稳定是实现其应用的重要前提。但目前的已有理解难以实现原子层次上的认识统一，也阻碍了进一步性能调控的规律性进展。我们从基本的分子系统量子力学求解出发，并结合电子结构分析，发现氮环阴离子稳定的机制可被归结为形成了平面型超原子状态。具体地，通过引入额外的电子，占据在了超原子的离域分子轨道上，导致了稳定阴离子氮环的形成。基于此超原子状态视角，我们成功解释了 N5 环一价阴离子和 N6 环四价阴离子的稳定机制，并预见了 N4 环可以二价阴离子状态实现稳定。不仅如此，我们进一步预见了 ThN6，LiN5 和 MgN4 可分别以中性状态保持稳定，源于金属原子向相应氮环转移了足够的电子。这些发现有效促进了氮环从以往高压条件到如今常规条件的稳定化研究进展，也为我们提出的超原子物理学(Superatomic Physics)研究方向进一步拓展了发展道路。

D04-55

面向高功率激光装置大口径 DKDP 晶体研究进展腔

徐明霞¹

1. 山东大学，济南

D04-56

半导体器件及金属材料缺陷检测技术

王新明¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心，绵阳

针对新型电子学系统中电子器件的可靠性精确评估，电流分辨率达到 fA (10^{-15} A) 才能满足应用需求，而常规电磁屏蔽只能将噪声降至 pA (10^{-12} A) 量级，因此需采取多种特殊方法才有可能实现。本文综合应用技术手段抑制噪声的产生，最大限度消除因振动而在传输线和样品中产生的压电干扰，有效抑制因温差产生的噪声，消除电荷累积产生的噪声，最终实现了安装电子器件后，系统的噪声水平 $I \leq 5$ fA。设备小型紧凑，可移动，可在普通实验室环境下使用。利用该精密测量技术研究电子器件的电输运特性，结合理论模拟，获得器件电输运参数，为电子器件寿命的精确评估提供必要的研究数据。涡流检测是建立在电磁感应原理基础之上的一种无损检测方法，它适用于导电材料。当把一块导体置于交变磁场之中，在导体中就有感应电流存在，即产生涡流。由于导体自身各种因素（如电导率，磁导率，形状，尺寸和缺陷等）的

变化,会导致涡流的变化。依据电磁理论,交变电磁场在金属中产生感生电流(涡流),感生电流的分布于频率及金属内部结构相关。当金属表面或内部存在缺陷时,将对原有的电流分布产生扰动,从而引起缺陷周围电流大小及相位的变换。本文设计了一种小型电磁探头($\Phi \leq 1\text{mm}$),计算探头在金属表面扫描时内部及表面电流密度分布。计算有无缺陷时电流密度分布的结果表明,在两个固定测量点,有缺陷和无缺陷的电流相位差发生变化,处于仪器可测范围。故可利用该方法分析金属构件受力前后有无新的亚微米以上的缺陷的产生。本文还介绍了一种超声网络探伤方法,用于探测非平面亚毫米缺陷。分析表明该方法可准确确定缺陷位置。实现该方法的仪器小巧,为便携式装置,探头大小 $24\text{mm} \times 12\text{mm} \times 15\text{mm}$ 较常规探头尺寸缩小 60%,可识别 $\Phi 0.1\text{mm}$ 的半通孔。

D04-57

样品表面扰动状态对微喷射过程影响的实验研究

辛建婷¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

当冲击波从金属自由面反射时,金属表面会发生微喷射现象,这是一种重要的表面破坏形态。金属表面形成微喷射的机制较为复杂,其中冲击加载下金属表面的划痕,沟槽,凹坑等会形成微射流,是微喷射物质的重要来源之一。而金属表面扰动沟槽的深度,角度等都会对微射流性质造成影响。研究团队在神光 II 升级激光装置上,设计开展了两种不同表面扰动锡样品在强激光驱动冲击加载下 V 型沟槽形成微射流的动态演化过程实验研究,采用高能 X 光背光照相对微射流过程进行了多时刻动态照相诊断,采用 PDV 干涉测速,诊断获得了微射流头部运动速度,通过面密度反演以及喷射速度等的数据解读,对不同表面扰动形成的微喷射过程的差异进行了对比分析。

D04-58

Er:CaF₂ 晶体 976 nm 连续激光损伤特性研究

王梦霞^{*1}, 汪海洋¹, 赵元安¹

1. 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海

Er:CaF₂ 晶体具有高红外透过率,低声子能量和高转换效率等特点,是目前实现集成化,高功率 3 μm 激光的重要增益介质,在空间通讯,激光制导,光电对抗等领域有重要应用。但晶体在高功率激光泵浦下的热效应和激光诱导损伤限制了中红外激光功率的进一步提升。本文研究了 Er:CaF₂ 晶体在 976 nm 连续激光辐照下的损伤特性及内在机理。测试了具有不同 Er³⁺掺杂浓度的晶体的激光诱导损伤阈值,其损伤形貌由一系列与晶体滑移系角度相关的规则裂纹(70°)组成。基于有限元模型建立了晶体的三维热传导和热应力模型,从热应力的角度分析了晶体在连续激光辐照下的损伤机理,确定 Er:CaF₂ 晶体损伤主要是由温度梯度引起的表面拉应力导致,且掺杂浓度较高的晶体对光的吸收较强,温度梯度更大,更易发生损伤。这些发现为基于 Er:CaF₂ 晶体的激光增益器件的制备工艺优化提供了参考,后续可通过增大散热面积,梯度掺杂等手段减小热应力,进一步提高中红外激光的输出功率。

D04-59

面向超级电容器应用的氧化钨的微纳结构调控

刘旭东^{*1}

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

氧化钨作为一种典型的超级电容器电极材料,因其超快的充放电速率,高体积/面积比容量及高稳定性等特点,被认为具有在超快及空间受限的极端条件下应用的潜力。然而,如何通过“聪明”地构筑氧化钨微纳结构以进一步发挥其高倍率,高面积比容量的优势及拓展其在酸性电解液中的电化学电压窗口已成为亟待解决的问题。本研究设计了一套以钨酸钠和硝酸作为前驱体,采用无需添加剂的简单水热法一步合成了

富含氧空位的纳米管簇/纳米片复合的 $\text{h-WO}_3/\text{ort-WO}_3 \cdot 0.33\text{H}_2\text{O}$ 异相结构; 该材料在高面载量 (10.8 mg cm^{-2}) 下表现出高的面积比容量 (2552 mF cm^{-2} @ 1 mA cm^{-2}) 和优异的倍率性能 (在 20 mA cm^{-2} 时容量保持率仍可达 78%)。在此基础上, 通过高电压循环伏安法嵌入/脱出锂离子, 可在纳米管簇管壁上二次造孔, 并可将锂元素预钉扎入氧化钨晶格内部; 该材料在后续的 Li/H 混合电解液中表现出 Li⁺/H⁺ 离子的共嵌入电荷存储机制, 并表现出提升的比容量和显著降低的负电位窗口 (-0.8V vs. -0.5V)。本策略丰富了氧化钨微纳造孔工程及负极材料电位窗口调控的基础研究, 并有望拓展到质子电池应用领域。

D04-60

Benchmarking Extreme Mechanics of Diamond via Global Stress Mapping

Chang Liu^{*1}, Quan Li¹, Yanming Ma¹, Changfeng Chen²

1. Key Laboratory of Material Simulation Methods and Software of Ministry of Education

2. Department of Physics and Astronomy, University of Nevada

Diamond is renowned for its exceptional hardness, but knowledge is surprisingly incomplete on its broad mechanical benchmarks at diverse elastic limits under widely varying loading conditions. Here, using first-principles calculations, we assess stress-strain relations of diamond under a variety of tension, compression and shear loads to create global extremal stress mapping (GESM), revealing highly direction sensitive tensile and compressive stress variations and record-setting shear stresses on previously unexplored strain paths. Phonon calculations impose constraints on dynamic stability of deformed diamond crystal. The resulting GESM profiles establish new mechanical benchmarks and offer fresh insights into the underlying atomistic mechanisms. The GESM approach showcases a robust and versatile protocol for exploring extreme mechanics, which may find wide adoption in the emerging field of deep elastic strain engineering of materials.

D04-61

基于高功率脉冲磁控溅射的金属涂层制备技术研究

刘艳松^{*1}, 谢春平¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

聚变能源是一种干净, 廉价, 有效和充足的能源, 而惯性约束聚变是实现聚变能源的有效途径之一。在惯性约束聚变研究中, 由于高 Z-低 Z (Z 为原子序数) 材料构成的多壳层靶, 不仅具备出色的瑞利-泰勒压缩不稳定性抑制能力, 还有提高内爆效率和聚变放能的作用, 因而备受国内外研究者关注。其中, 金属钨由于具有高原子序数, 高密度和高熔点等材料特性, 常被用作多壳层靶丸的内壳层; 金属铝因具有低原子序数, 低密度和加工性能好等材料特性, 常被作为多壳层靶的外壳层。此外, 高 Z-低 Z 渐变壳层因具有密度梯度, 可进一步抑制压缩不稳定性增长, 也常被作为理想的内壳层材料。然而, 受溅射沉积阴影效应和柱状晶生长等影响, 厚壁金属壳层往往存在应力大和表面粗糙度差的问题。如何控制厚壁金属壳层的应力与表面粗糙度, 是制约多壳层靶应用的关键瓶颈问题之一。高功率脉冲磁控溅射 (HiPIMS) 技术通过降低占空比 (1%~30%), 短时间 (10 μs ~500 μs) 内为靶材供应约 kW/cm^2 级的瞬时功率密度, 使靶材附近电子密度达约 10^{19}m^{-3} , 增加了靶材溅射原子与电子碰撞的几率, 并有效提高了靶材原子的离化率 (达 20%~90%)。高度离化的靶材原子形成的金属离子在基片鞘层电压的作用下, 具有一定能量和沉积输运能力, 结合负偏压调控, 可有效降低金属薄膜固有应力 and 柱状晶生长趋势。为此, 本文开展了基于 HiPIMS 技术的金属涂层制备技术研究, 通过探究负偏压, 峰值功率等关键参数对沉积输运特性的影响, 解决了溅射阴影效应导致的金属涂层表面粗糙度差和微缺陷多的问题, 实现了金属涂层的晶粒细化和致密化沉积。此外, 采用多孔微压力行星盘抛光方式, 通过控制抛光压力与抛光介质尺寸等, 实现了金属壳层表面凸起缺陷的有效去除, 进一步降低了金属壳层的表面粗糙度, 为相关物理实验的开展提供了技术基础。

快闪报告

D04-62

压力开启石墨烯/氮化硼摩尔超晶格中第三狄拉克点带隙的实验观测及理论解释

王宇鹏¹, 叶春晖¹, 安家骥¹, 代如成¹, 乔振华¹, 张增明^{*1}

1. 中国科学技术大学, 合肥

当两层晶格常数接近的二维材料叠加时, 会形成摩尔超晶格。这种周期性的摩尔势能显著地调控能带结构, 并引发诸如石墨烯/氮化硼系统中高阶狄拉克点的出现, 转角双层石墨烯及转角双层 MoTe_2 中的摩尔平带等新的物理现象, 为探索新奇物态和模拟强关联物理提供了重要平台。层间距离决定了层间耦合强度, 进而影响摩尔势的强度。通过施加压力来调节层间距离, 可以动态连续地调控超晶格体系的能带结构。我们开发出了一种基于金刚石对顶砧压机的新技术, 可在高压下对二维微纳器件进行电输运测试。本文对石墨烯氮化硼摩尔超晶格体系在高压下的输运性质进行了深入研究。实验结果发现, 压力能显著调控主狄拉克点和第二狄拉克点的带隙, 并首次在 6 GPa 压力下观测到第三狄拉克点附近带隙的开启。基于完全弛豫模型的理论计算与实验观察结果相吻合。我们的研究展示出压力对于摩尔超晶格体系的能带的有效调控, 为调控摩尔超晶格体系的强关联物理和新奇拓扑物态提供了转角, 垂直电场之外的另一有效手段。

D04-63

压力诱导二维手性材料 FeTa_3S_6 磁性相变赵宏泽¹, Azizur Rahman¹, 麦棣¹, 代如成¹, 王中平¹, 张增明^{*1}

1. 中国科学技术大学

近年来, 二维手性磁性材料作为二维磁性材料家族的新成员, 由于其在光电器件, 数据存储及自旋电子学等方面具有重要的应用价值, 受到越来越多的关注。手性磁体沿手性轴的反对称 Dzyaloshinskii-Moriya (DM) 相互作用和对称 Heisenberg 交换作用的竞争会产生非平庸的自旋织构, 如手性孤子晶格(CSL)或者磁性斯格明子等。竞争作用可以通过外部刺激如温度, 压力, 磁场等进行调控, 有助于我们研究自旋-轨道相互作用和磁电性质的关系。本文研究了高压下二维手性磁性材料 FeTa_3S_6 在不同磁场和温度下的电输运特性。在 0.2-3.2 GPa 压力区间, 发现压力有助于 FeTa_3S_6 在低温区形成类 CSL 态, 压力和温度的耦合可调制 DM 相互作用。随着压力增加, 类 CSL 态逐渐消失, 铁磁基态也由局域态转换成巡游态。结合拉曼光谱, XRD 和 DFT 计算, 我们推断这种转变是由结构相变引起的, 手性在高压下被完全破坏, 导致 DM 相互作用的消失。本工作为研究手性磁性材料在压力下的演化提供了很好的平台, 有利于我们更深入地研究磁相互作用的机制。

D04-64

影响 SiC MOSFET 电离总剂量效应的关键因素研究

梁晓雯¹, 魏莹¹, 冯婕¹, 余学峰^{*1}, 郭旗¹

1. 中国科学院新疆理化技术研究所

SiC MOSFET 具有优异的高频, 高压, 高温特性, 在电力, 高温和空间电子领域有着巨大的应用前景。SiC MOSFET 与 Si 基功率 MOSFET 类似, 易受电离总剂量效应影响。但考虑其界面特性与 Si MOSFET 差异较大, 因此对电离总剂量效应的敏感性同样存在差异。本文综合考虑总剂量辐照缺陷的测试方法, 辐照偏置, 辐照温度, 辐照剂量率的影响发现, SiC MOSFET 的电离总剂量效应与栅氧化层中积累的辐射陷阱电荷密切相关, 点测法与曲线扫描法提取的辐射陷阱电荷密度存在显著差异, 主要由时间常数较小的边界陷阱引起。辐照偏置通过影响栅氧化层中的电场而改变陷阱电荷的积累。高电场下, 产生的陷阱电荷量增加而复合较少, 导致积累量增加。辐照温度同样可影响栅氧化层中陷阱电荷的积累。高温环境下, 器件内部的载流子运动加快, 使得电子与产生的氧化物陷阱电荷发生复合, 最终导致积累的氧化物陷阱电荷量减小。剂量率可通过影响单位时间的电荷产额而影响栅氧化层中的陷阱电荷积累, 对比了高低剂量率下 SiC

MOSFET 的关键电参数退化量发现, 器件几乎不存在低剂量率退化增强效应, 分析认为主要与界面处较为稳定的 N 钝化键相关。

D04-65

$\text{Fe}^+ - \text{He}^+ - \text{H}^{2+}$ 三束同时原位辐照纯铁时的缺陷演化行为及机理: 氢氦与位移损伤比例的影响

曹子奇^{1,2}, 丁一帆^{1,2}, 崔德旺^{1,2}, 钟庆鸿^{1,2}, 冉广*^{1,2}

1. 厦门大学能源学院, 厦门
2. 福建省核能工程技术研究中心, 厦门

在聚变堆中, 中子辐照和氢氦原子协同作用显著影响材料微观结构, 进而快速降低材料的服役性能。因此, 研究中子辐照损伤和氢氦协同效应不仅对研发高抗辐照损伤核能材料而且对于评估辐照服役性能均具有重要意义。但氢氦与位移损伤比例 (H/dpa, He/dpa) 影响辐照缺陷演化行为及机理依然不清楚。本研究在 723 K 使用 400 keV Fe^+ , 50 keV He^+ 和 50 keV H^{2+} 对纯铁进行三束协同辐照, 原位研究了辐照缺陷演化行为及特征。试验条件包括四种气体原子与辐照损伤比: 10 appm He/dpa & 45 appm H/dpa, 10 appm He/dpa & 100 appm H/dpa, 100 appm He/dpa & 100 appm H/dpa 以及 45 appm He/dpa & 10 appm H/dpa。结果表明, H/dpa 和 He/dpa 比例显著影响辐照位错环与气泡的演化行为与特征, 包括<100>位错环比例, 位错环的尺寸和密度, 气泡的大小, 密度与分布等。当 He/dpa 保持不变时, 增加 H/dpa 会减少<100>位错环的比例和位错环的尺寸, 增加位错环和气泡的密度, 并增加气泡的尺寸。当保持 H/dpa 不变, 增加 He/dpa 有利于增加<100>位错环的比例, 位错环密度, 气泡尺寸和气泡密度, 并减小位错环的尺寸。H/dpa 和 He/dpa 的增加均会增加由气泡引起的肿胀。通过比较氢与氦对辐照缺陷影响可知, 氢对位错环形核的影响小于氦, 而氦对位错环迁移的抑制效果强于氢。本研究结果为深入理解核能材料辐照损伤行为及机制等提供了重要的试验数据和理论参考。

D04-66

ReO₃ 高压相——氧元素主导的轻元素超导体

单鹏飞^{1,2}, 孙建平¹, 程金光*¹

1. 中国科学院物理研究所, 北京
2. 北京高压科学研究中心, 北京

常压下 ReO_3 为 A 位缺位钙钛矿结构 ($\text{Pm}3\text{m}$), 在 12 ~ 38 GPa 的压强范围内 ReO_3 为菱方结构 $R\text{-}3\text{c}$ 相, 该结构可以看作 ReO_6 八面体结构单元沿着常压立方相<111>轴发生耦合旋转演化而来。详细的结构测试发现, 上述旋转在 30 GPa 压强下达到 30°, 此时结构中的氧原子呈密堆积排布, 进一步加压至 39 GPa。该旋转达到 32°, 此时发生相变, 超导逐渐消失。高压电阻测试发现 $R\text{-}3\text{c}$ 相低温下呈现超导电性, 且在 30 GPa 附近达到最佳 $T_c \approx 17 \text{ K}$, 进一步升高压强, 超导逐渐被抑制并在 39 GPa 下消失。理论计算分析发现, ReO_3 中较高的超导 T_c 源于氧原子中频声子振动模式与氧八面体分子轨道电子之间的强耦合。 ReO_3 高压超导相的发现提供了一种通过轨道杂化提高轻元素轨道电子对 $N(E_F)$ 贡献, 增强轻元素电子与其声子振动模式耦合, 进而实现氧元素主导的轻元素超导体的可行方案。

D04-67

开发用于极端环境紫外线防护的掺铈 Y₂O₃ 透明陶瓷

张聪¹, 齐建起*¹, 周小兰¹, 卢中华¹, 卢铁城¹

1. 四川大学

阳光中包含约 5% 的紫外线 (UV), 波长范围在 200–400 nm。长时间暴露在紫外线下会对人体和物体产生显著危害。虽然现有的紫外线屏蔽材料 (如高分子, 薄膜, 涂层, 玻璃) 虽然能满足日常使用, 但它们在高温, 高压, 腐蚀性和放射性等极端环境中的有效性会降低。透明陶瓷是一种通过压制和烧结形成的

具有光学透明性的多晶材料，与高分子和玻璃等传统紫外线屏蔽材料相比，透明陶瓷通常表现出更优异的化学稳定性和优异的热、力学性能，包括抗热震性，硬度和热导率。在这项工作中，我们选择 CeO_2 作为紫外线吸收剂， Y_2O_3 透明陶瓷为透明基质，开发新型紫外线屏蔽材料。系统地研究了 CeO_2 浓度对 Y_2O_3 陶瓷光学、力学和热学性能的影响。结果表明， CeO_2 不仅可以作为紫外线吸收剂，而且还是 Y_2O_3 透明陶瓷有效的烧结助剂。5 at% Ce 掺杂的 Y_2O_3 透明陶瓷表现出最佳的光学质量，在 800nm 处具有约 77% 的透过率。Ce 的引入使 Y_2O_3 透明陶瓷的紫外截止边缘从 250 nm 移动到 375 nm，这归因于 Ce^{4+} 的可见波段吸收。这种转变赋予 Y_2O_3 透明陶瓷紫外线屏蔽能力，使其对 UVC (100–280 nm) 和 UVB (280–320 nm) 具有 100% 的屏蔽能力，对 UVA (320–400 nm) 具有约 95% 的屏蔽能力。研究了在各种腐蚀条件（酸，碱，紫外线照射和高温）后的光学透过率，证实了 $\text{Ce}:\text{Y}_2\text{O}_3$ 透明陶瓷优异的稳定性。对比了透明陶瓷与传统的紫外线屏蔽材料（如玻璃，薄膜和涂层）的性能参数。这项作为极端条件下的紫外线屏蔽材料提供了新的设计理念和有效的解决方案。

D04-68

激光极端条件碳材料加工及一体化传感器件制造方法

臧浠凝¹

1. 清华大学，北京

激光加工高分子制备碳纳米材料（石墨烯，量子点等）及激光直写碳基电子器件是激光微纳制造领域的新兴研究方向。但不同波长及脉宽的激光引起含碳材料脱氢，相变的热力学及动力学机理尚未得到充分阐释。采用反应力场分子动力学模拟（ReaxFF-MD）结合实验研究，可以研究不同碳源材料在高温高压过程中反应路径。本报告将讨论若干案例：两种不同前驱体模型沥青基碳纤维的反应过程，并模拟碳纤维产品的拉伸强度和拉伸模量；激光冲击高压诱导煤制金刚石的熱力学及动力学机理；激光加工聚醚醚酮制备导电应变传感器件的工艺筛选及力学性能匹配；焦油介导激光在空气中快速制造难熔金属 3D 电路。通过这几个案例，我们将回答激碳化高分子材料制备不同高附加值碳材料的普适性及特殊性问题，并为低阶碳材料的升级和转化提供理论依据。并在此基础上，讨论面向医疗，健康监测，极端工况传感等应用场景的激光一体化传感功能器件制造方法。

D04-69

快中子辐照下彩色 CMOS 图像传感器的位移辐射损伤

李坤芳¹，冯婕¹，李豫东^{*1}，文林¹，郭旗¹

1. 中国科学院新疆理化技术研究所，乌鲁木齐

彩色 CMOS 图像传感器广泛应用于空间探测及核环境监控等领域，为研究其在极端环境下的成像可靠性，对一种商用彩色 4T-CMOS 图像传感器进行了 14Mev 中子辐照试验。通过离线测试的方式测量了不同剂量下器件各颜色通道的暗信号，暗信号非均匀性，光谱响应以及饱和输出等参数的退化情况，结合器件工艺和结构并根据半导体器件辐射效应理论，深入分析了器件参数的退化机理。试验结果表明暗信号和暗信号非均匀性在较高剂量时发生显著退化，光谱响应的退化受到暗信号和不同波长光吸收深度差异性的影响，虽然整体上饱和输出信号基本不变，但蓝色通道的饱和输出发生相对退化。本文为空间及核辐射环境下色彩信息的退化评估以及抗辐射彩色相机的研制提供了理论依据和基础。

D04-70

三元氢化物 LaBeH_8 在高压条件下的材料合成及超导电性研究

宋迎港¹，毕敬凯¹，Yuki Nakamoto²，Katsuya Shimizu²，刘寒雨^{1,3}，

邹博^{1,3}，刘广韬¹，王洪波^{1,3}，马琰铭^{*1,3,4}

1. Key Laboratory of Material Simulation Methods and Software of Ministry of Education, College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China

2. Center for Quantum Science and Technology under Extreme Conditions, Osaka University, Toyonaka, Osaka

560-8531, Japan

3. State Key Laboratory of Superhard Materials, College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China

4. International Center of Future Science, Jilin University, Changchun 130012, China

自 20 世纪初昂纳斯发现超导电性以来, 寻找高温超导体始终是人类追求目标。近年来, 高压强极端条件下的超导富氢化合物取得了一系列突破性进展, 理论预言的笼型富氢高温超导体 (CaH_6 和 LaH_{10} 等) 相继被实验证实, 开辟了超导研究的新纪元。相比于二元氢化物, 三元体系的相空间自由度更高, 不同金属元素的组合可以实现协同调控氢化物的晶体构型及电声子相互作用, 从而为提高氢化物的超导温度提供了有效的途径。尽管理论工作已经提出了诸多具有三元结构原型的富氢高温超导体, 但迄今为止, 这些三元富氢高温超导体还没有被合成。本工作以 La-Be 合金和氢硼烷或石蜡为前驱物, 利用金刚石对顶砧在 110~130 GPa 和 800~2300 K 的压强和温度条件下成功合成了一种全新的三元富氢高温超导体 LaBeH_8 。高压原位电输运实验测得该化合物在 80 GPa 下具有 110 K 的高温超导电性。实验工作通过两种不同的金属元素组合, 首次在实验上获得了具有三元结构原型的富氢高温超导体 LaBeH_8 , 拓展了富氢化合物的结构类型, 建立了在三元氢化物体系中寻找高温超导体的重要范式。

D04-71

原位研究 5052 铝合金中析出相与基体界面处的 He 泡演化行为及影响因素

王左江^{1,2}, 曹子奇^{1,2}, 刘正煜^{1,2}, 李玲³, 杨义忠³, 王熙嘉³, 冉广*¹

1. 厦门大学, 厦门

2. 福建省核能工程技术研究中心, 厦门

3. 上海核工程研究设计院股份有限公司, 上海

铝合金具有耐辐照, 抗腐蚀, 中子截面小和机械性能优良等特点, 被广泛作为研究型反应堆的堆芯结构材料和屏蔽材料。但是, 在服役期间, 载能粒子辐照诱导的缺陷在铝合金中形核与生长, 影响微结构组织, 进而导致其力学性能快速衰退。然而至今, 铝合金中析出相在辐照过程中的演化行为及机制仍未解决, 尤其是在 He 影响下。本研究采用 30 keV He^+ 束进行辐照, 通过透射电镜原位研究了 5052 铝合金中不同析出相在不同温度下辐照及后续退火过程中的演化行为。结果显示: 析出相微结构演化行为展现出明显的温度依赖性, 不同析出相以及不同析出相与基体界面处的 He 泡演化行为具有明显差异。在不同温度下辐照至 1.0 dpa 过程中, 部分析出相内部的 He 气泡生长率远大于铝基体中, 并在 373 K 至 473 K 间表现出显著的生长阈值。对两种典型的富 Al 析出相及界面处的缺陷阱强度进行了估算, Al-Mg 相大于 Al-Fe 相, 这应该是导致气泡演化行为差异的本质原因。本研究结果为铝合金辐照行为及机理研究提供了试验数据和理论参考。

D04-72

氧化物二维电子气输运性能调控研究

闫虹¹

1. 西北工业大学, 西安

近年来过渡金属氧化物界面二维电子气 (2DEG) 由于其晶格, 电荷自旋, 轨道等自由度之间存在错综复杂的耦合作用, 展现出丰富而奇特的物理性质, 在电子器件应用方面展现了巨大的潜力。然而, 界面有限的迁移率以及磁性 2DEG 的缺乏限制了其在新型电子器件与自旋器件方面的应用。因此, 我们首先在室温下利用离子液体门控技术, 通过影响界面氧空位, 有效减少了界面上的无序现象, 将迁移率提高了约 200%, 2K 时可达到 $22650 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 并通过强磁场下的舒勃尼科夫-德哈斯震荡证实了高迁移率电子的子带分布; 其次, 采用了界面工程技术, 通过在 $\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$ 中间插入不同厚度的 LaCoO_3 层, 利用 Co 离子在界面获得了高迁移率的 2DEG, 并在 10 K 以下观察到了反常霍尔效应, 证实获得了自旋极化的 2DEG, 并且磁输运结果也表明了增强的自旋轨道耦合。研究成果为氧化物 2DEG 电子器件应用方面提供了技术支持。

D04-73

新型范德瓦尔斯半导体中构效关系的压力调控

周永惠¹

1. 中国科学院合肥物质科学研究院, 合肥

范德瓦尔斯 (vdW) 半导体因其独特的物理特性和广阔的应用前景备受关注。针对 vdW 半导体材料的构效关系, 我们研究了 vdW IV-V 半导体 SiP 和五边形半导体 PdPSe 中的压力效应。研究发现在加压到 52 GPa 过程中, 块体单晶 SiP 经历了从原始晶体到非晶相, 最终到再结晶相的连续相变; 输运结果表明 SiP 具有三种高压超导相, 分别对应非晶, 四方和立方结构。此外, 研究发现 PdPSe 的光电流在 25.9 GPa 时增强了两个数量级, 而在 25.9 GPa 之上突然消失; 金属化和超导现象在 25 GPa 左右同时出现。同步辐射 X 射线衍射和拉曼光谱实验一致表明, 光电流的消失和超导电性的出现都与高压非晶相的形成有关。我们揭示了两种新型 vdW 半导体的结构-性能关系。这不仅为探索不同结构和功能之间的转变提供了一个新平台, 而且为设计基于 vdW 材料的先进器件提供了新机遇。

D04-74

质子辐照对 SiC 功率 MOSFET 栅氧击穿特性的影响研究

许菁怡¹, 魏莹*¹, 梁晓雯¹, 余学峰¹, 向宇璐¹

1. 中国科学院新疆理化技术研究所

宇宙空间中广泛分布的质子引发的辐射效应是制约 SiC MOSFET 器件的航天应用的因素之一。为探究 SiC MOSFET 在质子辐照后的器件损伤规律及可靠性退化特性, 开展了不同辐照条件和不同偏置电压下的质子辐照试验, 包括选取了 100 MeV 和 300 MeV 的质子能量, 600 V-1000V 的偏置条件以及不同的辐照剂量, 辐照同时在线监测了器件栅极和漏极漏电流。试验结果显示, 随质子能量增大, 器件在较低的偏置电压即可发生单粒子烧毁; 器件烧毁前, 在线监测的漏电流基本不变, 烧毁时突然增大至限流, 表现出质子与重离子辐照的区别; 对低偏置电压下未发生单粒子烧毁的器件进行电学特性测试, 静态参数及转移特性改变不显著, 但对其进行阶梯应力测试后发现栅氧击穿电压相比未辐照器件降低, 且随着剂量的增大而减小。试验结果为 SiC MOSFET 在空间环境中的可靠应用提供了参考依据。

D04-75

极低温条件下 ICF 靶热机包柔性界面“热-力”耦合特性研究

杨洪¹, 梁桦曦¹, 高莎莎¹, 代飞¹, 杨毅¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

“热机包 (TMP)”是惯性约束聚变 (ICF) 低温靶的重要组成部分, 直接决定了燃料冰层制备过程中靶丸温度场的有效调控, 均匀分布, 稳定可重复性, 间接影响了燃料冰层制备可行性, 厚度均匀性及内表面粗糙度水平。为确保从常温到极低温 (20K) 时传热性能可靠, TMP 通常在单晶硅冷却臂与黑腔套筒之间建立柔性接触结构, 以适应大范围温度变化时不同材料之间的膨胀或收缩差异。然而, 在复杂激光束的极端空间约束条件下, 基于传统美国 NIF 靶的旋臂式柔性冷臂结构存在降温时剪切应力过大导致界面接触失效, 硅爪断裂等问题。本文提出一种新的柔性冷臂结构, 采用在接触单元中耦合粘接剂材料性能的方法, 建立了冷却臂与套筒界面非线性力学计算模型, 分析了不同冷臂结构, 接触界面几何, 胶层材料时, 大范围温度变化过程中 TMP 柔性界面“热-力”耦合性能, 并对其开展了低温实验验证。本文研究结果表明, 新的冷却臂结构在 TMP 从常温到极低温的温度变化过程中能大幅降低其与套筒接触界面剪切应力, 具有稳定, 可靠的“热-力”耦合性能, 对 ICF 低温靶的进一步优化奠定了重要基础。

D04-76

熔石英光栅元件表面湿法浅刻处理研究

刘太祥¹, 杨科¹, 李昌朋¹, 严鸿维¹, 蒋晓东*¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

激光系统是用于产生瞬时高温, 高压极端条件的复杂系统之一。在激光系统中, 熔石英光栅元件在激光光束能量测量方面发挥着重要作用。然而, 熔石英光栅元件在进行光束能量测量的同时, 会承受超强激光的辐照, 并在激光辐照下极易产生表面损伤。光栅元件产生激光损伤后, 可能会导致激光系统中光学元件组件产生级联性的崩溃性损伤增长, 进而严重制约激光系统的安全, 高效率运行。因此, 迫切需求提高熔石英光栅元件的抗激光辐照损伤性能。本工作对熔石英光栅元件表面状态进行了分析, 提出应用表面湿法浅刻处理以提升熔石英光栅元件抗激光损伤性能的方法。研究表明, 通过调节湿法浅刻工艺参数, 一方面可以保持熔石英光栅元件的光束能量测量功能和性能, 另一方面可以有效去除熔石英光栅元件的表面激光损伤前驱体, 进而大幅度提升光栅元件的抗激光损伤性能。本工作提出的表面湿法浅刻处理方法有望克服激光系统中熔石英光栅元件抗激光损伤性能较差的弱点, 进而延长光栅元件的使役周期, 降低激光系统运行成本。

D04-77

超薄聚苯乙烯薄膜的制备研究

朱方华¹, 徐嘉靖*¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

为获得满足 ICF 物理实验要求的超薄, 厚度均匀的自支撑聚苯乙烯薄膜, 本文从聚苯乙烯溶液溶剂选择, 溶液性质及成膜工艺两方面开展了研究。研究发现: (1) 选择挥发性较低的溶剂有利于获得均匀的薄膜, 特别是聚苯乙烯-对二甲苯溶液的表面张力对温度和浓度均不敏感, 更容易制备均匀的薄膜。(2) 聚苯乙烯流变性对成膜性有显著影响, 需要控制聚合物溶液的低于 0.2g/mL, 更易获得均匀的超薄薄膜。(3) 采用自组装单分子层结合基片边缘处涂覆牺牲层, 改变基片表面性能, 解决了超薄薄膜脱膜难题, 成功获得厚度 10 nm~50 nm 的自支撑超薄聚苯乙烯薄膜。(4) 发现高旋涂速度时, 薄膜厚度与旋转速率无关, 且薄膜厚度与溶液浓度之间存在着指数约 1.3 的幂律关系, 可以简单地调节溶液浓度即实现厚度 2μm 以下薄膜的可控制备。

D04-78

含 U 高熵合金的制备及其性能研究

时洁¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

核燃料作为核反应堆的关键材料, 其发展决定了反应堆的先进性, 经济性及安全性。含 U 高熵合金利用高熵合金高强度高硬度, 良好耐腐蚀性的独特优势, 成为未来商用核燃料的重要候选材料。采用磁控溅射的方法制备了不同 U 含量的(NbTiZr)_{100-x}U_x(x=50,80)系列高熵合金薄膜。通过调控 NbTiZr 靶材和 U 的溅射功率和溅射时间进行双靶磁控溅射, 实现 NbTiZrU 高熵合金薄膜所需原子比的配比调控。通过 XRD, SEM 等手段对 NbTiZrU 高熵合金薄膜组织结构进行分析, 采用纳米压痕对力学性能进行表征, 采用电化学腐蚀和浸泡实验对耐腐蚀性能进行表征。结果表明, (NbTiZr)₅₀U₅₀, (NbTiZr)₂₀U₈₀ 高熵合金薄膜均为简单的体心立方 (BCC) 固溶结构, 并且薄膜表面光滑致密, 所有元素均呈现均匀化的分布, 无第二相。电化学腐蚀和浸泡实验测量评估 U 含量对含 U 高熵合金腐蚀行为的影响, 并制备 UMo 合金薄膜进行对比。动电位极化曲线表明(NbTiZr)₅₀U₅₀ 的腐蚀电位为 32.98mV vs.SCE, (NbTiZr)₂₀U₈₀ 和 UMo 合金的腐蚀电位分别为-315.28 mV vs.SCE 和-369.89 mV vs.SCE。通过 SEM 对浸泡实验结果进行表征, (NbTiZr)₅₀U₅₀ 高熵合金薄膜的耐腐蚀性能明显优于(NbTiZr)₂₀U₈₀ 和 UMo 合金。本文通过对 NbZrTiU 体系高熵合金薄膜的制备与性能研究, 得到了含 U 高熵合金薄膜的组织结构及腐蚀性能, 为进一步探究与设计新型的含铀高熵合金及核燃料提供有益指导。

D04-78

基于 CVD 法的 Ta₂O₅ 泡沫制备技术研究陈云建¹, 李宁¹, 易泰民^{*1}

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

黑腔在间接驱动惯性约束聚变 (Indirect-Drive Inertial Confinement Fusion, ICF) 中扮演着关键角色, 它直接影响到驱动器能量的转换效率以及辐射场的均匀性和清洁度。理论研究表明, 使用低密度多孔材料作为黑腔内衬可有效降低辐射能量的损耗, 并抑制发光区的运动。基于此理论, 利弗莫尔国家实验室 (Lawrence Livermore National Laboratory), 激光聚变研究中心 (Laser Fusion Research Center) 的团队分别采用了五氧化二钽 (Ta₂O₅) 泡沫和金 (Au) 泡沫作为黑腔内衬开展实验, 验证了低密度多孔结构黑腔内衬的有效性。传统的 Ta₂O₅ 泡沫通常采用溶胶-凝胶法 (Sol-Gel Process) 制备获得, 然而, 该方法制备的泡沫材料普遍存在材料机械性能差, 加工成形困难的问题, 这也限制了其在制靶领域的应用。为了解决泡沫材料在机械加工和成形方面的挑战, 包括材料加工困难, 易开裂粉碎, 尺寸精度差, 成品率低等问题。本文探索了采用化学气相沉积法 (chemical Vapor Deposition, CVD) 制备低密度 Ta₂O₅ 泡沫材料的可行性, 探讨了 RF 气凝胶烧结温度对 Ta₂O₅ 薄膜材料结构稳定性的影响。扫描电镜 (SEM) 和透射电镜 (TEM) 表明该结构呈均匀的网络结构, 比表面积可达 835.65 m²/g, 密度为 83 mg/cm³, 加工获得了壁厚~100.8 μm 的 Ta₂O₅ 泡沫内衬样品, 初步验证了 CVD 法制备的 Ta₂O₅ 泡沫材料加工性能。

D04-79

冲击下过渡金属的高温高压电阻率测量技术与应用

甘波^{*1}, 尹远², 张友君¹

1. 四川大学原子与分子物理研究所, 成都

2. 中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳

过渡金属的高温高压输运性质是凝聚态物理学的一个重要研究方向, 在高压科学和行星科学中有着重要应用。利用激光加热金刚石对顶砧 (DAC) 技术, 已经实现在 170 GPa 和 3500 K 条件下测量过渡金属的高温高压电阻率。然而, 由于静态高压技术的加载能力有限, 更极端的高温高压条件 (如行星核心深处) 需要动态高压技术的支持。目前, 动态冲击下的电阻率测量技术尚不成熟, 早期实验结果可能受到趋肤效应的影响。在本研究中, 我们进一步开发了冲击电阻率测量技术, 并以典型过渡金属铜作为研究对象。我们采用四电极方法, 基于金刚石对顶砧测量了室温下铜在 50 GPa 压力范围内的电阻率, 并进一步利用二级轻气炮冲击波技术获得了铜在高达 118 GPa 和 1800 K 的高温高压电阻率。同时, 我们利用第一原理分子动力学模拟了铜在实验温压范围内的电热输运性质, 并获得了与实验结果总体一致的模拟结果, 表明所开发的冲击电阻率测量技术可以有效获取过渡金属在超高温高压条件下的电输运性质。理论和实验结果显示, 铜的电阻率随着压力的增加而减小, 并随着温度的升高而线性增大。这些趋势可以通过 Bloch-Grüneisen 模型有效拟合, 表明电子-声子散射是铜在高温高压下电阻率的主要影响机制。值得注意的是, 铜的高温高压洛伦兹数超过了理想的 Sommerfeld 值, 意味着在极端条件下, 铜不再适用于理想的 Wiedemann-Franz 公式。我们的动态与静态高压实验结合理论模拟研究, 为过渡金属在极端条件下的电热传输特性提供了有力工具和新的视角。

D04-80

黑腔柱面平台电火花铣削加工

谢军^{*1}, 张昭瑞¹, 黄燕华¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

在 ICF 研究中, 间接冲击波实验相对于直接驱动实验而言可产生更高的冲击压力, 形成较均匀的辐射

场等优势。黑腔是间接驱动实验必不可少的靶零件，且需要在黑腔柱面诊断孔区域放置平面金属材料台阶样品，为了实现样品与黑腔的紧密贴合，需要诊断孔区域为平面。黑腔制备一般采用在芯轴上电镀后去除芯轴工艺制备，因此，要在黑腔柱面形成平台，需要预先在芯轴柱面加工平台。然而，由于黑腔端面入射孔直径较小，导致芯轴难以承受较大的切削力；由于机械加工切削力的存在，电火花加工不存在宏观切削力，为了确保芯轴加工过程不变形，拟采用电火花铣削加工工艺实现芯轴柱面平台加工。实验设备为微细电火花机床，采用钨钢实心电极，工件材料为紫铜。通过软件对零件进行三维建模，规划加工工艺路线，分层铣削厚度控制在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下，在零件表面非加工区域定义基准点，每层加工完成后电极自动回到基准点测试电极损耗数值，从而自动补偿到程序中，零件加工前，通过计算机对加工刀路轨迹进行模拟，模拟结果正确，则自动生成电火花机床能够识别的数控加工程序。根据电火花铣削加工平台的扫描电子显微镜照片看出，平台表面平整，无明显的高低起伏，平台呈长方形结构。通过 Veeco NT1100 白光干涉仪测量平台表面形貌，可以看出，平台在芯轴轴线方向，不存在明显的凸起区域，平台的平面性较好。从加工尺寸精度来看，样品在长，宽方向尺寸误差可控制在 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以内；而在 Z（即平台深度）方向，通过较小的分层厚度，将放电区域集中在电极底部，通过电极损耗在线检测与补偿后，测试值与程序设定数值偏差小于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ，说明样品在高度方向尺寸精度可控制在 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以内。通过 Veeco NT1100 白光干涉仪相关软件分析可知，样品表面均方根粗糙度小于 $Ra0.3\text{ }\mu\text{m}$ ，峰谷高度小于 $2\text{ }\mu\text{m}$ 。

D04-82

氢气传感器梯度薄膜电输运机制研究

刘广权¹，王新明¹，吴卫东*¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心，绵阳

作为化石燃料的理想替代品，氢气是未来燃料电池动力车辆，高效能源存储设备等的关键能源载体。同时，人们在制备，储存，运输和使用等环节安全检测方面的研究兴趣也日益增加。例如，在纯钯（Pd）体系中，研究者通过减少 Pd 颗粒尺寸来降低功耗。有研究者通过在纯 Pd 薄膜中添加金属镍（Ni）来缓解，因相变导致的氢脆现象。在钯基合金材料研究中，耐久性始终是限制其全面发展的关键因素之一。在本文的研究中，创新性的将渐变梯度薄膜引入材料结构的设计中，有效的将应力延薄膜垂直于表面方向逐渐释放。在对不同氢浓度的测试中发现，PdNi 梯度薄膜均呈现出不同的响应值。同时，在高浓度氢气测试中，发现梯度 PdNi-30W 也呈现不同的响应，并且在去除氢气后，样品电阻值又恢复到初始状态。最后，在对不同渐变状态的 PdNi 梯度薄膜循环稳定性测量中发现，梯度 PdNi-10W 和梯度 PdNi-20W 样品出现了不同程度的波动。随着渐变层中金属 Ni 含量的增加，氢响应的稳定性均处于稳定状态。以此说明，梯度膜的引入很好的解决了 Pd 基合金薄膜传感器的稳定性问题。

D04-83

基于假想温度分布的激光表面热处理熔石英残余应力定量分析技术

张传超¹，廖威¹，蒋晓龙¹，方振华¹，王海军¹，蒋晓东¹，朱启华*¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心，绵阳

CO₂ 激光已经广泛应用于熔石英元件的加工处理，例如：损伤修复，表面抛光，切割，表面图案制备等，但是处理后可能产生较大的残余应力，不仅会导致元件表面变形降低表面质量，而且存在应力开裂导致元件报废的风险，因此，需要对熔石英 CO₂ 激光加工处理后的残余应力进行精准评估。本工作提出了一种从熔石英假想温度分布获取残余应力分布的方法，通过测量熔石英的假想温度分布状态，并设定熔石英假想温度初始冻结状态为残余应力零点，计算各个位置假想温度状态从初始冻结温度降低到室温时的降温体积收缩量，获得相对体积应变量，把获得的相对体积应变量输入应力应变方程，通过数值求解获得熔石英内部的残余应力分布。本工作实现了快速准确地获取熔石英 CO₂ 激光作用后残余应力分布特征，为熔石英的 CO₂ 激光加工处理提供理论和技术支撑。

D04-84

激光冲击下铈微喷及其气混过程研究席涛¹, 辛建婷¹, 袁宗强¹, 单连强¹, 王欣欣², 王裴¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳
2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京

当冲击波从金属-真空或金属-气体界面反射时通常会发生微喷现象。在内爆压缩科学和工程领域, 喷射物质成为引发界面混合的一个主要来源, 对冲击压缩效果产生直接影响。因此, 微喷物的产生及其与气体的混合过程已成为冲击波物理研究中十分重要的热点和难点问题。获得不同条件下材料微喷气混过程的关键物理图像与量化数据, 解读材料微喷气混规律对于深入认识微喷颗粒演化过程具有重要作用。本研究基于星光 III 激光装置开展了活泼金属铈在不同气体环境下微喷及其气混过程研究, 采用双轴高能 X 射线照相和光子多普勒测速(PDV)技术对喷射及其气混过程进行了观测。通过比较不同输运环境下的实验结果, 发现输运环境对射流速度谱分布影响较大, 而对面密度分布影响较小。通过本研究, 为理解气体环境中活泼金属微喷及其气混过程提供了重要支撑。

D04-85**掺镱石英光纤暗化微缺陷研究**石兆华¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

恶劣辐照环境中高功率光纤的暗化成为制约光纤激光器稳定运行的关键因素。在辐照环境和高能激光的共同作用下, 掺镱光纤输出功率显著降低, 光束质量劣化, 导致激光系统稳定性降低甚至寿命缩短。关键原因是纤芯在辐照或高能激光的作用下产生了暗化微缺陷。当前暗化效应研究揭示了部分微缺陷结构及其产生机制, 但是存在以下几个问题: (1)微缺陷的结构研究使用掺杂块体玻璃代替光纤, 材料纯度和制备工艺差异较大, 不能完全阐明光纤的暗化问题; (2)微缺陷的产生基于存在多个 Yb^{3+} 团簇的假设, 但是目前在国际上掺镱光纤中 Yb^{3+} 的团簇尚未得到实验验证; (3)高能激光诱导损伤缺陷的前驱体缺陷仍不明确。由于对导致暗化的材料损伤认识不深刻, 耐辐照高功率掺镱光纤的研制仍然面临挑战。针对以上问题, 我们分别开展了辐致暗化和高功率激光诱导的暗化微缺陷特性研究, 旨在揭示微缺陷对掺镱光纤应用性能的影响。在辐致暗化研究中采用自研弱信号精密分析技术结合先进表征技术, 分别从基质缺陷, Yb^{3+} 发光性能和微团簇方向探索了纤芯损伤机制; 在强激光诱导暗化研究中通过在线监测技术分别研究了泵浦端和输出端非线性光谱特性, 进一步揭示了光致暗化的缺陷演变。研究结果表明纤芯中的 Yb^{3+} 相关团簇, 载流子和 Yb^{3+} 配位场稳定性是影响掺镱光纤抗暗化性能的关键缺陷, 抗暗化掺镱光纤研制需要抑制纤芯中的 Yb^{3+} 相关团簇和载流子浓度, 并提高 Yb^{3+} 配位场稳定性。据此, 提出了优化或开发制备工艺, 纤芯材料体系中引入可捕获电子和空穴等载流子的组分(如 Ce), 纤芯材料体系中引入稳定 Yb^{3+} 配位场的组分(如 F)。研究结果将支撑国产抗辐照抗功率掺镱光纤性能的不不断提升。

D04-86**Wonderland of 2D black phosphorus under pressure**Yang Lu^{*1}

1. Center for High Pressure Science & Technology Advanced Research

Black phosphorus (BP) has recently emerged as a promising two-dimensional (2D) semiconductor for optoelectronic applications mainly due to its thickness-dependent direct bandgap, relatively high charge mobility, and remarkable in-plane anisotropy. Pressure can effectively and continuously tune lattice parameters, especially the interlayer distance in layered 2D materials, hence alter their properties and performances. In this study, we discovered the anomalous layer-dependent shift of optical transitions in few-layer BP under pressure via infrared spectroscopy. The bandgap of 2L BP is enlarged with the pressure increasing to 2 GPa, while the bulk counterpart undergoes a semiconductor to semimetal transition under ~ 1.8 GPa. These results can be described by a physical

model involving the intra- and interlayer coupling. This work highlights the novel properties of 2D black phosphorus under pressure.

D04-87

Superior high-temperature strength of a carbide-reinforced high-entropy alloy with ultrafine eutectoid structure

Xiao Wang^{1,2}, Guoqiang Luo¹, Qinqin Wei^{1,3*}, Yi Sun^{1,2}, Jian Zhang¹, Junjun Xu¹, Xinting Wu¹, Xiaohong Chen¹, Peibo Li¹, Shiqing Liang¹, Qiang Shen¹

1. Wuhan University of Technology

2. Hubei Longzhong Laboratory, Xiangyang 441000, Hubei, China

3. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, 430070, China

Refractory alloys with high-temperature softening resistance are crucial for extreme high-temperature components in aerospace and weapon equipment. Traditional alloys and single-phase refractory high-entropy alloys suffer from unstable microstructures and loss of strength at high temperatures. Here we report a strategy to obtain a superior strong high-entropy alloy by introducing eutectic carbides to form micro-nano scale eutectic and eutectoid structures. These metal-carbide interfaces remain stable under high-temperature deformation and exhibit strong dislocation blocking effects. The ultrafine eutectoid structure provides a primary strengthening effect due to its numerous enhanced phase interfaces. The resulting alloy achieves a high temperature yield strength of 1.17 GPa at 1473 K and 0.92 GPa at 1673 K. This work provides valuable insights for optimizing the high-temperature performance and microstructure design of high-temperature composites to further extend their potential applications in high-temperature areas.

D04-88

Disorder-broadened phase boundary with enhanced amorphous superconductivity in In₂Te₅ under Pressure

Yi Zhao¹, Tianping Ying^{*2}, ChuiZhen Chen³, Yanpeng Qi¹

1. ShanghaiTech University, shanghai

2. 中国科学院物理研究所, 北京

3. 苏州大学, 苏州

As an empirical tool in materials science and engineering, the iconic phase diagram owes its robustness and practicality to the topological characteristics rooted in the celebrated Gibbs phase law ($F = C - P + 2$). When crossing the phase diagram boundary, the structure transition occurs abruptly, bringing about an instantaneous change in physical properties and limited controllability on the boundaries ($F = 1$). Here, we expand the sharp phase boundary to an amorphous transition region ($F = 2$) by partially disrupting the long-range translational symmetry, leading to a sequential crystalline-amorphous-crystalline (CAC) transition in a pressurized In₂Te₅ single crystal. Through detailed in-situ synchrotron diffraction, we elucidate that the phase transition stems from the rotation of immobile blocks [In₂Te₂]²⁺, linked by hinge-like [Te₃]²⁻ trimers. Remarkably, within the amorphous region, the amorphous phase demonstrates a notable 25% increase of the superconducting transition temperature (T_c), while the carrier concentration remains relatively constant. Furthermore, we propose a theoretical framework revealing that the unconventional boost in amorphous superconductivity might be attributed to an intensified electron correlation, triggered by a disorder-augmented multifractal behavior. These findings underscore the potential of disorder and prompt further exploration of unforeseen phenomena on the phase boundaries.

D04-89

Superconductivity with Pauli limit violating upper critical field in Ta-Te granular nanowires under high

pressureLingxiao Zhao¹, Yi Zhao¹, Yanpeng Qi^{*1}

1. ShanghaiTech University, Shanghai

Nanoscale superconductors present exotic properties compared with their bulk isomers. In the cases of few-layer 2D superconductors and some kinds of superconducting nanowires, the upper critical field ($\mu H_{c2}(0)$) is much higher than the corresponding bulk materials. In this work, we have synthesized the Ta-Te granular nanowires. Superconductivity is induced via high-pressure modulations in these nanowires. The superconducting temperature T_c and $\mu H_{c2}(0)$ is about 4 K and 16 T under high pressure, two times beyond the Pauli limit. The combinations of transition metal chalcogenides' elemental compositions, nanowires and high-pressure modulations have succeeded in realizing a large $\mu H_{c2}(0)$ in the Ta-Te nanowires. Our work demonstrates that the Ta-Te nanowire is a possible candidate for applications in high magnetic fields, and it also provides an ideal platform for further investigations of the mechanisms between nanowires and large $\mu H_{c2}(0)$.

墙报**D04-P01****RuAs₂ 单晶中的局域化效应**王义炎^{*1}, 易哲铠¹, 刘琪¹, 光双魁², 徐升³, 李祎冉¹, 岳小宇⁴, 梁慧¹,
李娜¹, 周颖¹, 吴丹丹¹, 孙燕¹, 李秋菊¹, 程鹏³, 夏天龙³, 孙学峰¹

1. 安徽大学, 合肥
2. 中国科学技术大学, 合肥
3. 中国人民大学, 北京
4. 苏州城市学院, 苏州

过渡金属磷族化物 $X\text{Pn}_2$ (X =过渡金属; Pn =磷族元素)表现出丰富的物理性质, RuAs_2 作为其中一员, 其单晶仍有待合成和研究。本项工作中, 我们制备了高质量大尺寸的 RuAs_2 单晶, 对其磁输运和热学性质开展了详细研究。研究发现, RuAs_2 展现出半导体行为和局域化效应。随着温度降低, 电子传输行为经历了从正常态到弱局域化态下的扩散输运, 再到强局域化态下变径跃迁输运的转变。该转变可以反映在电阻率和塞贝克系数的测量中。负磁阻现象伴随着局域化效应的产生而出现, 从中拟合提取的相位相干长度也表明了导电机理从弱局域化到变径跃迁的转变。本研究表明 RuAs_2 单晶是研究局域化效应的合适平台。

D04-P02**基于全息原理的光栅制备关键技术**王雪敏^{*1}, 蒋涛¹, 刘莹¹, 湛治强¹, 罗佳文¹, 韩尚君¹, 彭丽萍¹, 吴卫东¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

光栅作为重要而简单的元件已经广泛应用于科研, 国防和国民经济的许多领域, 其主要功能是色散, 可以把不同级次, 不同波长的光波分散开并衍射到不同的方向上。根据用途不同, 制作方式不同和槽形不同可分为计量光栅, 光谱光栅, 耦合光栅, 辐射光栅, 全息光栅, 电子束曝光光栅, 紫外光刻光栅, 矩形光栅, 正弦光栅, 锯齿形光栅, 梯形光栅等。其中, 全息光栅具有具有生产周期短, 杂散光少, 无罗兰鬼线, 光谱适用范围宽等优势。针对分布反馈激光器, 光栅光谱仪, 光通信等对可调光栅的迫切需求, 开发了基于全息原理的可调光栅制备技术。突破了曝光光强均匀化, 杂散光消除, 光束夹角精密调节, 扩束支撑架精密稳定等关键技术, 成功研制出 Si 衬底, InP 衬底, 4 μm -8 μm 中红外量子级联激光器等表面制备周期 680 nm-2.0 μm 可调, 占空比 40%-70%可调, 深度百纳米的精密光栅。

D04-P03

STI 结构对 FinFET 总剂量辐射损伤特性的影响机制分析

魏莹^{*1}, 崔江维¹, 崔旭¹, 余学峰¹

1. 中国科学院新疆理化技术研究所, 乌鲁木齐

鳍式场效应晶体管 (FinFET) 是 22nm 以下工艺的主流技术, 在航天领域中具有良好应用前景。但空间环境中的高能粒子对 FinFET 器件产生电离总剂量效应, 导致器件阈值漂移, 漏电增大。已有研究表明, 由于器件栅氧层很薄, 总剂量效应主要作用于器件的浅槽隔离区 (STI)。由于器件具有复杂的三维结构, 且 STI 受工艺制备影响显著。本文利用 TCAD 仿真技术, 通过构建精确的三维仿真结构和总剂量效应模型, 研究了 STI 宽度和深度对器件总剂量效应的影响, 结果显示 STI 越宽, 鳍与鳍之间的耦合作用越小, 器件总剂量效应受鳍数的影响减小; STI 越深, 产生的辐射缺陷数量越多, 器件总剂量效应受沟道长度影响越大。研究结果可为器件的抗辐射加固设计提供参考依据。

D04-P04

共晶 Nb₂C 增强的高强塑含 Nb 多主元合金魏琴琴¹, 罗国强¹, 沈强^{*1}

1. 武汉理工大学

钼合金在航空航天技术中有着广泛的应用。传统的钼合金存在高温强度不足或室温塑性有限的问题。我们借鉴多主合金和碳化物共晶合金的设计概念, 通过引入难熔合金元素和碳化物, 开发了新型 Nb₂Mo_{0.5}W_{0.5}C_x 共晶钼合金。合金含有体心立方 (BCC) 固溶体和碳化物相组成的共晶结构, 相界面具有强键合半相干关系。通过优化成分, 由 BCC 和 Nb₂C 组成的 Nb₂Mo_{0.5}W_{0.5}C_{0.25} 钼合金表现出高强高塑的特性, 室温屈服强度为 1.27GPa, 断裂应变为 17.8%, 1200°C 高温屈服强度为 0.7 GPa。多主元固溶强化和碳化物相强化共同提高强度, 层状金属相对微裂纹尖端有钝化作用, 有效缓解了室温脆性。这一策略为设计新型高温材料提供了理论借鉴, 可以克服共晶合金的低熔点限制和传统高温合金中扩散主导的软化现象。

D04-P05

新型无铅烧绿石透明陶瓷 γ 射线/中子辐射防护材料梁乐行¹, 王秀玲¹, 张聪¹, 卢开雷¹, 董岩皓², 谭广繁², 石彦立¹, 齐建起^{*1,3}, 卢铁城^{1,3}

1. 四川大学物理学院, 成都

2. 清华大学材料学院新型陶瓷与精细工艺国家重点实验室, 北京

3. 四川大学辐射物理及技术教育部重点实验室, 成都

核能对于可持续能源基础设施和经济发展至关重要。在反应堆的高辐射极端环境中需要用于观察和监视的辐射防护窗口来避免放射性污染和辐射暴露。然而, 传统的铅玻璃由于辐射引起的变暗, 机械性能差, 以及其带来的重金属污染, 无法满足未来的需求。因此, 迫切需要找到具有多电离辐射屏蔽能力 (特别是对深穿透的伽马射线 (γ) 和中子 (n) 辐射), 理想的光学和机械性能, 以及优异的抗辐照暗化稳定性和无毒性的新的窗口材料。在此, 我们报道了一类透明稀土烧绿石结构陶瓷 La_xGd_{2-x}Zr₂O₇, 其具有理想的物理化学性能, 非常适合作为稳定的辐射屏蔽窗口材料。实验结果表明, 其对平均能量为 0.662 MeV 的 ¹³⁷Cs 源 γ 辐射的屏蔽系数为 0.51, 平均能量为 1.25 MeV 的 ⁶⁰Co 源 γ 辐射的屏蔽系数为 0.34, 对能量低于 0.5 eV 的 Am-Be 源热中子屏蔽率高于 95%, 具有良好的辐射防护能力。值得注意的是, 这项工作展示了 La_xGd_{2-x}Zr₂O₇ 透明在暴露于 1 MGy 的重剂量 ⁶⁰Co 源 γ 辐射下仍保持高透明度的能力。同时我们发现, 富镧 (La) 的成分可以大大提高抗辐射变暗的服役稳定性, 而富钆 (Gd) 的成分则经历浅变暗, 并且可以在可见光照射下可逆恢复。这一机制归因于富镧成分中晶格内从 4f 到 8a 位置的氧迁移减缓, 这些成分具有高的萤石相稳定性和良好的原子结构有序性; 而富钆成分中的氧在 4f 和 8a 之间可逆迁移, 在室温下仍然活跃。这项作为透明辐射防护材料提供了新的设计理念和解决方案, 为推动功能性透明陶瓷窗口材料在

高辐射极端环境中的应用开启了广阔的机会。

D04-P06

碳点中光诱导动态变色发光和压力诱导静态变色发光动力学研究

闫传焮¹, 刘才龙^{*1}

1. 聊城大学

具有良好发光特性的碳点(CDs)在光催化, 化学传感, 能源和生物领域受到了广泛关注。由于 CDs 存在复杂的碳芯结构和多样的表面态, 其荧光发射机制的解释仍存在争议。本工作系统地探究了 CDs 在激光和压力双重调控下的荧光发射机理。利用激光对 CDs 的电子能级进行修饰加工。利用稳态吸收光谱探测到 CDs 在不同时间的激光照射下, 其碳芯的电子跃迁方式未受影响, 而表面态的电子跃迁方式发生了变化, 归因于 CDs 中的电子能级对称性受激光调制。利用稳态光致发光光谱探测到 CDs 在不同时间的激光照射下呈现出时间依赖的动态变色发光现象, 归因于 CDs 中光诱导多种表面官能团荧光辐射能力的连续性变化。进一步利用时间分辨光致发光光谱探测到 CDs 在不同时间的激光照射下碳芯和多种表面官能团的辐射复合寿命, 揭示了 CDs 中光诱导动态变色发光动力学机制。利用压力对光诱导处理后的 CDs 的电子能带结构进行调致, 碳芯和表面态的带隙和辐射复合能力受压力调致, 伴随着压力诱导静态变色荧光增强和猝灭。

D04-P07

Metal-organic Framework Molecular-scale Encapsulation of Copper Azide via Single-Crystal-to-Single-Crystal Transformation to Prepare Laser-sensitive Primary Explosives

Ruibing Lv¹, Qi Zhang^{1*}

1. Institute of Chemical Materials (ICM) China Academy of Engineering Physics (CAEP), Mianyang

Laser-sensitive primary explosives (LSPEs), crucial to the material basis of safe and reliable laser initiation technology, are a major research focus in their design and synthesis. Copper azide (CA), a primary explosive with excellent detonation properties, is limited in preparation and application due to its extremely high sensitivity. Thus, incorporating CA into LSPEs relies on precise desensitisation strategies. Here, a strategy involving molecular-scale sensitive unit confinement encapsulation has been successfully implemented. A novel two-dimensional energetic metal-organic framework (EMOF) $[\text{Cu}(\text{ATRZ})(\text{N}_3)_2]_n$ (CA-ATRZ) (ATRZ = 4,4'-azo-1,2,4-triazole), was designed and synthesized in pure phase through a safe and facile single-crystal-to-single-crystal (SCSC) transformation from 3D EMOF $[\text{Cu}(\text{ATRZ})_3(\text{NO}_3)_2]_n$. Leveraging its distinctive structural attributes of encapsulated sensitive unit confinement and the synergistic benefits derived from various assembly units, CA-ATRZ substantially improves in safety compared to CA, while maintaining its superior detonation performance. Furthermore, CA-ATRZ produced by combining MOFs with CA has high laser sensitivity characteristics, is free of toxic metals and perchlorate, has a high energy density, high initiating ability, and decent thermal stability. These combined properties and outstanding ultrafast laser initiation enhance its potential for developing advanced high-energy LSPEs.

D04-P08

HEPS 硬 X 射线相干散射线站及极端原位环境建设

王萱^{*1}, 周亮¹

1. 中国科学院高能物理研究所, 北京

高能同步辐射光源 (High Energy Photon Source, HEPS) 是国家重大科技基础设施建设“十三五”规划确定建设的十个重大科技基础设施之一, 是基础科学和工程科学等领域原创性, 突破性创新研究的重要支撑平台。HEPS 的主要性能指标位居世界前列, 具有世界最高光谱亮度, 高于目前世界上现有和正在或即将建设的光源。硬 X 射线相干散射线站做为 HEPS 上专门的相干性应用线站, 将会充分的利用 HEPS 的高亮度

和高相干性,主要包含有两大类相干实验方法,相干 X 射线衍射成像(CDI)和 X 射线光子相关谱(XPCS)。CDI 主要用于样品的纳米分辨率 3D 结构成像和应变成像,同时跟 X 射线荧光和吸收谱学结合实现元素成像和价态成像,可用于金属玻璃剪切带 3D 结构的测定,从而提供其塑性变形和屈服的物理机制;可用于各种纳米晶体应变的量,在多晶材料中测量其单个晶粒的边界和缺陷等。此外,相干线站基于 XPCS 实验方法能够得到系统的基本动力学函数,例如中间散射函数和动力学结构因子等,主要用于凝聚态物质的平衡态动力学,非平衡态动力学以及动力学异质性的测量,空间尺度 0.1-200nm,时间尺度 1000s-1 μ s。基于此可用于各种玻璃系统和胶体系统弛豫动力学的研究,以及于表面界面动力学的测量等。在硬 X 射线相干散射线站的建设过程中,充分考虑了极端条件下材料物性表征的需求,将实现高低温, DAC 高压环境,拉伸,电池等原位环境,以及提供相应的接口便于用户自带的原位环境安装,最大化兼容用户自带装置或者更复杂的样品环境。

D04-P09

Generation and Evolution Mechanism of Cracks in HMX Single Crystals around Phase Transition Temperature

Rucheng Dai¹, He Wang¹, Wentao Liang¹, Xiangqi Wang², Zhongping Wang¹, Zengming Zhang^{1*}

1. University of Science and Technology of China

2. Ji Hua Laboratory Testing Center, Ji Hua Laboratory

Thermal damage and cracking have a significant impact on heat conduction for energetic materials. Cracks due to different causes such as thermally induced volume expansion, crystal dislocations or phase transitions are different in character and have different effects on heat conduction. Few studies have focused on the generation mechanism of different cracks in the classical energetic crystal HMX and the relationship between cracks and heat condition, especially around the phase transition temperature. In this work, the generation and evolution of cracks under the heating condition of 185 °C and 180 °C above the phase transition temperature were investigated for HMX. Different formation mechanisms and distribution properties of fast cracks, slow cracks and small cracks were proposed and systematically studied by optical microscopy, scanning electron microscopy, 3D X-ray computed tomography, X-ray diffraction and Raman spectroscopy. The results indicate that fast cracks form due to thermal expansion, tend to be perpendicular to the lattice b-direction, and run through the entire crystal. Slow cracks form due to the or plane dislocations and exist only in a very small region of the subsurface. Small cracks originate from the β - δ phase transition of HMX, are denser and more disordered, and mostly exist close to the heated bottom surface. These results provide a further theoretical basis for the relationship between thermal damage and the heat conduction characteristics of HMX crystals, and will help in the understanding of the safety of energetic materials, as well as in related applications.

D04-P10

可耐受火药燃气的激光点火窗口组件研制研究

李佳¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

火炮激光点火是通过激光通过照射窗口点燃火药,使得炮膛内形成脉冲高压以实现火炮发射过程。在激光点火系统中,激光传输窗口必须在保证激光通过率 80%,并承受多次 350~400Mpa 的脉冲压力冲击。本文开展了可耐受火药燃气冲击的激光点火窗口组件的研制研究。开展了一系列不同工艺条件加工的蓝宝石窗口元件的抗冲击实验,研究了元件材料的力学性能,晶体位错,装配应力,表面质量等因素对窗口元件对火药燃气抗冲击性能的影响,结合脆性断裂力学理论,确立了通过控制窗口元件的表面质量提升元件抗火药燃气冲击能力的方法,实现了蓝宝石窗口承受 400Mpa 的 20ms 脉冲压力 90 发次无破损的目标。通过对蓝宝石元件的酸洗研究,钝化了加工过程中形成的亚表面缺陷,并获得了不同加工工艺下亚表面缺陷分布特征,确立了进一步提升承压能力的加工工艺路线。通过对不同尺寸的蓝宝石元件工装结构的仿真分

析, 获得了火药燃气冲击下窗口元件的疲劳损伤模型, 获得了优化的花瓣形状的工装结构以减小冲击震荡的影响。

D04-P11

环境污染对介质膜光学元件损伤性能的影响

刘红婕¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳

传输反射镜是高功率激光装置中的关键光学元件之一, 要满足 $R > 99.5\%$ @1053nm, $R > 97\%$ @378nm, $R < 33\%$ @351nm & @450~700nm 需求的多层复杂膜系, 对环境污染极为敏感。传输反射镜使用环境中的器件主要有两种: 支撑镜框和管道, 这两种器件均由铝合金制备而成, 因此其环境污染来源主要有两个: 一是铝合金材料, 尽管铝合金器件均经过高压喷淋清洗掉表面污染物, 但由于周围环境可能存在低通量杂散光辐照到铝合金表面上, 进而引发激光喷发污染。二是光学元件自身, 对于超过 400mm 大尺寸光学元件来说, 加工缺陷很难避免, 在运行通量下这些缺陷可能诱发激光损伤, 损伤喷发出来的污染物会导致环境污染。基于上述两种污染来源, 我们建立了模拟激光装置使用环境的密闭环境污染实验平台, 以低通量激光辐照金属材料模拟杂散光辐照管道腔壁引发的污染, 以主激光通量辐照介质膜元件损伤位置模拟激光损伤喷发颗粒污染, 离线开展了两类污染对介质膜元件损伤性能的影响。结果显示, 在 $50\text{mJ}/\text{cm}^2$ 及以下激光通量辐照下金属表面无任何激光辐照痕迹, 但仍会导致介质膜激光损伤阈值可降低一半以上。铝合金的表面形貌分析可以看出, 表面布满几十微米尺度的凹坑, 这些凹坑内嵌埋的加工冷却液, 碎屑等杂质成分, 在高压喷洗过程中很难完全去除。而低通量激光辐照可能会清除掉这些成分, 喷发到外部空间而污染介质膜元件, 从而导致介质膜元件损伤性能的降低。激光辐照介质膜元件产生的损伤会导致大量的颗粒污染物溅射, 这些污染物沉积在光学元件表面, 会吸收激光并引起传输激光的场增强, 从而导致光学元件损伤阈值的大幅度降低。研究结果对评估高功率激光装置服役环境下污染对介质膜元件损伤性能影响有重要意义, 并为杂散光控制提供依据。

D04-P12

α 相对硝基苯酚的高压相变研究

谈笑^{*1}, 马策¹

1. 表面物理与化学重点实验室, 江油

药物多晶型的稳定性和有效药物构象的探索与获得是制药工业中至关重要的问题之一, 研究基于氢键的具有多晶型的有机晶体在高压下的稳定性及构象变化, 对于药物多晶型的研究具有重要意义。我们选择 α 相对硝基苯酚 (PNP) 进行高压拉曼光谱与同步辐射 X 射线衍射研究。高压拉曼实验结果表明 α -PNP 在 1.2 GPa 发生不可逆的结构相变, 同步辐射 XRD 实验结果证实了该相变, 我们解析了高压新相的结构并将其命名为 γ 相 (Pna21)。该相变在快速加压过程中可以被抑制, 其原因可能是由于相变所需越过的激活势垒强烈依赖于压力, 导致当压力升高达到一定数值时, 势垒无法越过进而抑制相变的发生。 γ 相在高压下保持稳定, 但在卸压过程中相变到已知相 β 相。这一研究对于理论预测, 实验探索以及实际的应用具有重要的意义。

D04-P13

高压下绿光/蓝光稀土 MOFs 荧光增强研究

王艺璇¹, 杨新一¹, 邹勃^{*1}

1. 吉林大学物理学院超硬材料国家重点实验室, 长春

金属有机框架 (MOFs) 由于可设计的拓扑结构和多种类的发射中心使其成为发光材料的优秀候选材料。然而, 迄今为止, 由于较低的能量/电荷转移效率, 许多 MOFs 材料仍然表现出微弱的发射。基于此, 我们

报道了一种通过压力处理提高 $\text{Tb}(\text{BTC})(\text{H}_2\text{O})_6$ 和 $\text{Y}(\text{BTC})(\text{H}_2\text{O})_6$ -MOFs 荧光性能的策略。这两种 MOFs 都是由 π - π 堆积和氢键结合形成的三维网络结构。经过压力处理后, $\text{Tb}(\text{BTC})(\text{H}_2\text{O})_6$ 展现出亮绿色荧光发射, 其荧光量子产率 (PLQY) 由初始的 50.6 % 提高到 90.4 %; $\text{Y}(\text{BTC})(\text{H}_2\text{O})_6$ 展现出蓝色荧光发射, 其 PLQY 从 2.8 % 提高到 75.0 %。结合实验和理论计算结果表明, 压力处理后的氢键协同效应提高了氢键结合能, 锁住了平面化构型。增加的平面化构型表明压力处理工程可以优化配体单重态/三重态与 Tb^{3+} 间的能隙并增加电子跃迁多样性和振子强度, 促进 $\text{Tb}(\text{BTC})(\text{H}_2\text{O})_6$ 中配体到金属的能量转移和 $\text{Y}(\text{BTC})(\text{H}_2\text{O})_6$ 中金属到配体的电荷转移。我们的研究结果为设计具有高 PLQY MOFs 材料的结构开辟了新的途径。

D04-P14

Pressure-induced first-order antiferromagnetic to ferromagnetic transition in MnN

Xu Zheng^{*1}, Jiao Tan², Qianqian Wang², Xiaohui Yu², Yifeng Yang², Yujie Wang¹, Changqing Jin²

1. Chengdu University of Technology

2. Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics and Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China.

MnN systems have been widely used to investigate Mn incorporated into III-V compounds, which combines the spin and electron charge as promising diluted magnetic semiconductors (DMS). However, few experiments have demonstrated the magnetic transformation of MnN with lattice constant changes, although it has been mentioned many times in previous theoretical calculations. In this study, we synthesize MnN single crystal under high pressure and temperature. Furthermore, we perform high-pressure resistance, magnetic resistance and synchrotron radiation on MnN single crystal/polycrystalline and observe the first-order phase transition accompanied with antiferromagnetic (AFM) to ferromagnetic (FM) magnetic structure transition under 34GPa. The experimental result and first-principles calculations reveal the same magnetic and structural transition of MnN in the compression process from equilibrium volume $18.2 \text{ \AA}^3$ to $16 \text{ \AA}^3$. An analysis of electronic structure and magnetic interactions in terms of the Heisenberg Hamiltonian indicates a strong FM coupling in the [001] plane due to the double exchange mechanism of Mn eg orbitals. With the reduced Mn-N bond length under high pressure, the enhanced FM double exchange interactions could induce the magnetic transition from AFM to FM and subsequently lead to a structural transition from a face-centered tetragonal structure to a cubic structure. These findings provide the foundations for GaMnN or MnN layer DMS.

D04-P15

中国散裂中子源高压中子衍射谱仪工程

高德祥¹, 申旭东¹, 袁宝¹, 康乐^{*1}

1. 中国科学院高能物理研究所, 北京

高压中子衍射谱仪由散裂中子源科学中心与南方科技大学合作建设。该谱仪具有衍射及成像功能, 通过衍射与成像相结合的工作模式, 可获得样品多尺度的信息。谱仪提供力, 热, 磁等多场耦合极端样品环境, 可以精准模拟材料服役状态。谱仪匹配不同压力设备设有两个样品位置, 实现小型压力设备的大 d 值覆盖及大型压力设备较高分辨率的功能。谱仪将于 2023 年 6 月出光调试, 预计于 2024 年开放给科研用户使用。

D04-P16

高压下含能材料的炔基聚合研究

齐广宇¹

1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 绵阳

压力能够显著缩短分子间距离, 改变物质电子结构, 甚至引发化学键的变化。就含能材料而言, 压力

引发的密堆积将获得更高密度的含能材料，契合其高能量密度的发展需求，对于合成更高能量密度含能材料有着独特的优势。然而，高压结构难以保存到常压下，近年来的一系列研究工作表明，作为一种固态化学反应，高压拓扑化学聚合反应往往是不可逆的，这为获得含能材料高压下的高密度结构提供了重要研究思路。由于缺少不饱和化学键，普通含能材料很难在高压下发生聚合反应。研究团队通过化学合成方法，制备出同时具有含能基团和高压可聚合炔基基团的 PIP-1 单体。不同单体分子的可聚合炔基单元中的最近 C 原子距离仅为 4.065 Å，有可能发生高压拓扑化学聚合反应。通过原位高压吸收，红外，拉曼以及同步辐射 X 射线衍射光谱对 PIP-1 的高压行为进行了系统的表征。由于共轭结构的改变，PIP-1 发生了明显的颜色变化；且在红外卸压光谱中，出现了新的 C-C，C=C 伸缩振动；同步辐射 X 射线衍射光谱也出现了新的衍射峰。以上均说明在高压作用下，PIP-1 发生了聚合反应，其相邻分子中的 C≡C 键发生断裂，形成新的 C=C 键与 C-C 键。理论计算表明，在高压下 PIP-1 将发生聚合，形成一维聚合分子带。完全卸压后，聚合结构较单体结构焓值更低，具有较好稳定性，且密度得到了提升，这对爆轰能力的提升有积极作用。本工作通过高压拓扑化学聚合策略，合成了一种常压稳定的聚合型含能材料，证明高压拓扑化学聚合有可能作为一种新方法用于含能材料合成。

仅发表论文

D04-PO01

单晶金刚石微纳机械振子应用介绍

孙换莹¹

1. 北京量子信息科学研究院，北京

微纳机械振子是几何尺寸在微米或纳米量级的可活动机械结构，是微纳机电系统的核心部件，具有体积小，敏感度高，能耗低等优秀特点，在传感，致动以及量子科技等领域有着重要应用前景。在制备微纳机械振子的材料中，金刚石由于优秀的性能而受到广泛关注。例如，金刚石有着优秀的机械性能，室温下其杨氏模量高达 1100 GPa。这使得，相比于同样尺度下由其他材料制备的振子，由金刚石材料制备的微纳机械振子有着更高的谐振频率。同时，金刚石是宽禁带半导体材料，其禁带宽度约为 5.5 eV，超宽的带隙使得其内杂质通常具有深能级性质，杂质的深能级性质使得其不易被激发，相比于其他材料，金刚石有着更低的本征能量耗散。另一方面，金刚石是天然材料中最好导热系数的保持者，室温下其热导系数高达 2300 W/m K，良好的导热率有助于量子系统与环境平衡建立，提高量子态的保真度和读取有效性。金刚石微纳机械振子已在机械开关，磁性传感，单分子探测，力学探测等方面得到了快速发展。关于缺陷对单晶金刚石机械能耗散的影响，我们研究了室温到 1000K 温度变化下硼缺陷和氮缺陷对金刚石机械能耗散的影响，指出了金刚石的低本征耗散性质。利用微纳机械振子共振频率对环境的高敏感性，我们研究了基于单晶金刚石微纳机械振子的应力探测和磁场探测，研究了单晶金刚石杨氏模量随温度的变化关系。另外，利用单晶金刚石的宽带隙性能，我们首次实现了基于金刚石的 N 型金属氧化物场效应晶体管。随着微纳加工技术的进步，声子屏蔽的单晶金刚石微纳机械振子将展现更高的共振频率和品质因子，借助于金刚石内氮缺陷色心的良好量子属性以及机械运动可以和其他自由度很好地耦合。基于单晶金刚石微纳机械振子的混合系统将在高精度传感和量子信息领域展现重要作用。

D04-PO02

Enhanced cuprate superconductivity from elongated to compressed coordination

Wenmin Li¹, Jianfa Zhao², Changqing Jin^{2*}

1. Institute of Quantum Materials and Physics, Henan Academy of Sciences

2. Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences

The discovery of high T_c cuprate superconductivity was motivated by the Jahn-Teller polaron mechanism in Cu^{2+} with the elongated copper oxygen coordination combined with strong interlayer Coulomb interactions. It

gives rise to the orbital order scenario that the $\text{Cu}3dx^2-y^2$ is located near Fermi surface while the $3dz^2$ is far below where single band is favorite. We recently discovered a new type of cuprate superconductor $\text{Ba}_2\text{CuO}_{4-y}$ (Ba214) using extreme high oxygen pressure synthesis that shares a similar crystal structure to the first cuprate superconductor La214. But most notably a rare compressive type octahedron is present in Ba214, resulting from the longer in-plane Cu-O bond length than that of apical bond length. The compressed octahedron will lead to a reversed orbital order, i.e. the $3dz^2$ will be lifted above $3dx^2-y^2$ that is generally considered unfavorable to superconductivity based on the current main stream theories of high T_c cuprates. Ba214 however exhibits bulk superconducting transition with T_c above 70K at ambient pressure, a surprisingly 80% enhancement from that for isostructural La214. Here we briefly introduce the unique structural features of Ba214 in comparison with other cuprate superconductors, indicating the paradigm shift (I) role of $3dz^2$ orbital to enhance superconductivity based on related experimental and theoretical progress, (II) the multiband scenario; (III) the possible s wave pairing mechanism.