

论坛二十六：超硬材料及制品专业委员会论坛

分论坛主席：田永君 林峰 胡晓君

26-01

硼掺杂金刚石制备技术及其应用进展

周科朝

中南大学

硼掺杂金刚石（BDD）薄膜电极是电化学氧化技术领域的理想电极材料。金刚石特殊的 sp^3 杂化碳-碳共价键结构及其硼掺杂后具有的导电性，赋予了其优异的电化学特性（如最高的析氧电位、最宽的电化学窗口、优异的耐腐蚀性及抗污染性等特点）。目前，热丝化学气相沉积技术是规模化、低成本制备 BDD 电极的关键技术，而 BDD 电极的电化学性能与 HFCVD 制备工艺密切相关，可通过调节沉积气氛、温度、气压、时间等工艺来调控其硼原子掺杂浓度、晶面取向、 sp^3/sp^2 相比比例等。本报告将介绍 BDD 电极材料大面积制备的技术瓶颈与解决方案，BDD 电极电化学氧化降解高危废水的应用现状，以及应用于 PCB 微蚀液废水处理的电化学资源再生与回收系统。

关键词：掺硼金刚石，电化学，化学气相沉积

26-02

钻石提升集成电路性能

宋健民

麻省理工（MIT）

集成电路（IC）的制造必须光刻聚焦，所以硅晶圆（如 12 吋或 300mm）的表面一定要平坦至纳米级。每个晶圆要化学机械平坦（CMP）数十次，而 CMP 的界面由钻石碟在抛光垫的刻纹决定，所以芯片的良率及性能会受钻石碟的规格影响。2000 年起全球的钻石碟都採用报告人发明的矩阵排列。报告人又转型中国砂轮公司使其成为钻石碟的制造者並供应台积电，英特尔等 IC 公司。台积电制造的芯片良率及性能优于三星和使用报告人专利授权的钎焊钻石碟有关（如苹果，高通，联发科的手机芯片）。三星用电镀的钻石碟不仅会有环境污染，芯片也会有金属污染，因而产生过热及降低可靠度。由于芯片制造耗材国产化的需求，报告人现在河北石家庄协助晶国富研建立国内最先进的分形钻石碟。

钻石的散热技术可大幅提升硅集成电路的堆叠（先进封装的 3D IC）性能，碳化硅（SiC）的动力功率（如 IGBT），氮化镓（GaN）的射频功率，乃至发明结合 ECR（电子回旋共振）及 ALD（原子层沉积法），可以化学渐进外延每年超过 100 片的硅晶圆，制造出终极的钻石晶圆，这样可使人类的物质文明进入巅峰的钻石时代。

26-03

金刚石半导体器件的新进展

王宏兴

西安交通大学

26-04

高性能金刚石同位素电池

朱嘉琦

哈尔滨工业大学

金刚石被称为终极半导体材料，具有超宽禁带宽度，高的辐射能量转换效率，良好耐辐射能力，高的载流子迁移率，高的击穿场强，良好的化学惰性等，适合于辐射伏特效应同位素电池制备。金刚石具有良好的抗辐射性能，能够承受辐射粒子的长时间照射，且其理论能量转换效率高于硅、碳化硅、氮化镓、氧化镓等传统半导体材料。通过异质结制备、界面调控技术可以极大改善金刚石同位素电池的开路电压，从而提高器件的能量转化效率。金刚石同位素电池因其广阔的应用前景获得了国内外研究机构的广泛研究。报告将从高品质金刚石合成方法，金刚石同位素电池器件两方面展开讨论，重点讲述金刚石晶体合成技术研究发展现状以及金刚石同位素电池器件的研究进展。

26-05

金刚石微波功率器件技术

冯志红

中国电子科技集团公司第十三研究所

26-06

MPCVD 法金刚石同质外延生长及 MOS 器件技术

张金凤

西安电子科技大学

金刚石属于新一代超宽禁带半导体材料，具有禁带宽度大、载流子迁移率高、热导率高等优异性能，在高频大功率电子器件、辐射探测器、高效热沉等领域具有巨大的应用潜力。目前金刚石的高效体掺杂尚未解决，氢终端金刚石被广泛应用于场效应管的研究。本报告将具体介绍金刚石在场效应管领域的最新研究进展，及西安电子科技大学在金刚石外延 MPCVD 设备、高质量大尺寸金刚石材料外延、高性能金刚石场效应管领域取得的重要进展。

26-07

金刚石-石墨烯复合杂化薄膜的制备及其应用研究

熊鹰

西南科技大学材料与化学学院

近年来，金刚石-石墨烯（DGN）复合杂化薄膜由于具有高导热性、高导电性、高稳定性等优异的物理化学性质而受到业内广泛的关注，并在不同应用领域显示出极大的应用潜力。本文介绍了 DGN 复合杂化薄膜的常用制备方法及相关影响因素，综述了本课题组关于 DGN 复合杂化薄膜在火炸药分子表面增强拉曼散射（SERS）分子检测、热界面材料（TIM）、场发射、储能等领域的应用现状，并分析和展望了 DGN 复合杂化薄膜在新材料领域的应用现状及前景。

26-08

高质量金刚石材料制备与电子学应用

刘金龙

北京科技大学

金刚石具有优异的电学性能，近年来成为超宽禁带半导体的研究热点。尽管当前围绕金刚石半导体应用仍有一些瓶颈问题需要克服，但当前围绕金刚石材料、半导体技术、器件开发等方面均有了显著的进展。本次报告主要汇报当前金刚石半导体的一些最新研究进展，包括电子级材料制备、半导体开发以及电子器件的新型开发等，同时在金刚石半导体发展中的

问题提出一些解决思路以及思考，与大家一同探讨。

26-09

氧化金刚石表面的结构及其性质的第一性原理研究

鲁少华

浙江工业大学材料科学与工程学院

通过理论计算，确定了具有重要技术意义的氧化金刚石(100)表面的基态结构，提出的甲氧基丙酮表面结构同时包含羰基和环氧基，是环境温度和高温下最稳定的重构结构。这一发现有望解决氧化金刚石 (100)长期存在的表面结构不确定性。新提出构型表现出显著的电子特性：与干净或氢化表面相比，最高占据态和最低未占据表面态分别降低和升高。因此，表面电子态对体相带隙的影响很小，这使得它在电子结构上几乎是一种“无表面”的重构。这可能对开发基于金刚石的纳米电子器件以及应用于量子信息处理和传感的高效单光子发射器产生深远影响。

26-10

金刚石功率半导体材料与器件研究进展

李柳暗

吉林大学超硬材料国家重点实验室

金刚石为代表的宽禁带半导体被公认为下一代高功率密度、高开关速度、低导通损耗功率开关器件的理想材料。通过台阶流调控技术实现了英寸级单晶金刚石的拼接生长，结合镍刻蚀辅助二次外延技术有效降低了外延材料的位错密度。面向大尺寸金刚石剥离开发了氧化硅掩膜横向外延技术。针对金刚石材料 p 型和 n 型掺杂不对称及最佳掺杂晶面不对称的挑战，基于 TCAD 仿真设计了多种新型金刚石功率二极管及晶体管器件，为实现高性能金刚石功率器件提供理论基础。

26-11

金刚石的纳米力学及弹性应变工程

杨丽民

香港城市大学深圳研究院、香港大学

26-12

金刚石在电化学分析传感领域的研究进展

魏秋平

中南大学材料科学与工程学院

掺硼金刚石（BDD）电极因其极宽的电化学窗口、极低的背景电流、极高的电化学/化学稳定性，以及高的生物相容性与极低的吸附特性等优势，已成为生物传感检测领域中的热点材料。然而，由于 sp^3 杂化碳-碳共价键的缘故，传统 BDD 电极存在电化学活性低、检测限低等问题，难以满足高精度、高灵敏度生物传感电极材料的实际需求。本报告将从材料学角度出发，介绍影响 BDD 电极电化学传感检测性能的关键参数，包括硼原子掺杂浓度、晶面取向、晶粒尺寸、 sp^3/sp^2 相比、表面端基、微观形貌等。随后，将介绍金刚石生物传感器的最新进展，包括植入式金刚石超微电极、微型颗粒金刚石传感器，以及非侵入式金刚石可穿戴传感器等。

关键词：掺硼金刚石，电化学，生物传感器

26-13

掺硼金刚石薄膜传感器的设计、制备及应用李明吉
天津理工大学

26-14

金刚石涂层设计与力学性能评价黄楠
中国科学院金属研究所

26-15

硼掺杂金刚石电化学检测高楠
吉林大学

随着各种药物在人类生活生产中的大量使用以及工业生产带来的各种副产物,大量污染物对环境的负面影响与日俱增,严重威胁人类生活安全。开展环境污染物检测研究具有重要现实意义。硼掺杂金刚石膜具有电势窗口宽、低背景电流、耐腐蚀、易清洗等优异性质,是制作高性能电化学检测电极的优质材料。课题组通过表面微结构构筑和选择合适适配体的方式,成功使用硼掺杂金刚石检测了多氯联苯、壬基酚、黄曲霉毒素、瘦肉精等,都达到较低检测限和较宽检测范围。

26-16

金刚石/石墨烯复合电极电化学应用研究蒋梅燕
浙江工业大学

金刚石电极的优异特性在电催化或有机物电合成等领域十分亟需。为了在金刚石电极中引入更多更高催化活性的位点,本系列研究将易于构建缺陷的石墨烯引入金刚石薄膜电极,合成金刚石/石墨烯复合的电化学电极。有望解决金刚石电极在电化学催化及有机电合成等领域应用的难题,为理想电化学电极研制提供新范式,引领行业发展

26-17

BDD 电极的低成本制造及应用场景李卫
廊坊沃尔德超硬刀具有限公司

CVD 金刚石(包括(微米、纳米和超纳米)金刚石薄膜、金刚石厚膜(自支撑膜)和金刚石单晶)是一种典型的超极限多功能材料,除了作为超硬材料之外,在光学、电学、热学、声学、电化学、核和生物、超高压实验(包括物理与化学实验)、探测和传感、以及量子计算等一系列学科领域都有十分重要的应用前景。但因为价格高昂,实际应用受到了很大的限制。所以大幅度降低 CVD 金刚石的制造成本是真正实现产业化的必由之路。本报告初步探讨了一种低成本工业化生产 CVD 金刚石的方案,以及采用该技术路线生产的 BDD 电极的应用场景和实例。

26-18

宽禁带半导体原子尺度制造与表征研究

徐宗伟

天津大学

碳化硅 SiC、氧化镓 Ga₂O₃ 和金刚石等宽禁带半导体是制造量子及高功率半导体器件的优良材料。基于氢离子束、飞秒激光等超快能量束加工、变温光致发光光谱、分子动力学模拟等研究方法，研究了 SiC 硅空位、双空位色心和金刚石色心等加工产率，开展了飞秒激光原位退火、微结构阵列等色心荧光增强方法研究，基于共聚焦光致发光光谱表征了色心三维分布。基于纵光学声子与等离子体激元耦合模(LOPC 模)，开展了共聚焦拉曼光谱表征 p 型掺杂 SiC 的载流子浓度无损表征研究。最后，建立了面向宽禁带半导体色心和载流子浓度探测的共聚焦光谱修正模型。

26-19

高质量一维纳米单晶金刚石构筑及性能研究

杨兵

中国科学院金属研究所

金刚石色心由于具有优异的光学性能在量子传感、单声子源等领域具有潜在的应用前景。将原子力显微镜 AFM 与金刚石色心结合起来可实现纳米尺度的物性测量，但是在 AFM 针尖上掺杂高亮度色心仍然是一项具有挑战性的工作。在此，我们提出了一种简单的两步法来解决这一问题。第一步，在微波等离子体化学气相沉积(MPCVD)系统中，使用四甲基硅烷(TMS)气体作为掺杂源沉积出(001)取向的微米/纳米复合薄膜。随后，利用空气退火选择性刻蚀纳米金刚石和 sp² 无定形碳，[001] 取向的微晶颗粒被保留下来形成带有硅空位中心的金刚石纳米针。

26-20

超硬材料的高压合成

侯慧阳

北京高压科学研究中心

探索和发展新材料对于未来材料的技术应用和创新至关重要。高压是寻找和发现具有优异物理和化学特性新材料的有效手段。我的报告将汇报典型材料的高压结构演变规律以及高压相结构特点，由此发现金刚石的新型态---次晶金刚石的现象和证据，探索具有新颖结构功能材料的高效制备途径和策略。此外，汇报我们在寻找硬质材料--过渡金属硼化物方面的一些研究进展，揭示晶格、轨道杂化和力学性能之间的相互关联。

26-21

基于金刚石 NV 色心的量子传感及其应用

张少春

中国科学技术大学

金刚石氮-空位(NV)色心因其优秀的量子属性，长期被应用于量子传感领域，其成功实现了磁场、温度、电场、应力等物理量高灵敏测量。为了实现量子传感技术的实用化，将光纤与金刚石材料进行光学耦合，既保证物理量测量的灵敏性，也可提高传感器的可靠性与稳定性。本报告将介绍基于 NV 色心的光纤量子传感器研制以及量子传感方法，基于此分别实现了的 0.47pT/Hz^(1/2) 磁场探测灵敏度和 1.1mK/Hz^(1/2) 温度探测灵敏度，同时具有带宽大、空间分辨率高、鲁邦性强等优点；目前此量子传感器已用于材料性质表征、芯片温度探

测、电力行业中，具有十分广阔的应用前景和发展空间。

26-22

金刚石中硅空位色心构建及性能调控

陈成克

浙江工业大学材料科学与工程学院

金刚石中的光学活性硅空位 (SiV) 色心由于其室温下结构稳定性好、光稳定性强、激发态寿命短、零声子线带宽窄和发光峰避开生物自体荧光的特点,在量子信息、纳米光子学、生物标记和传感领域具有十分广阔的应用前景,受到了国内外研究者的广泛关注和深入研究。报告将重点讲述金刚石晶体尺寸、晶体表面态和晶体表面微纳结构对 SiV 色心发光的影响。

26-23

超硬材料与刀具制造及其应用

郑李娟

广东工业大学

26-24

基于热管传热原理的磨削高效冷却技术研究进展

钱宁

南京航空航天大学

磨削是难加工材料高效精密加工的重要方法,航空航天难加工材料磨削过程中易产生大量热从而引发磨削高温,制约了磨削质量和效率的持续提升。针对这一瓶颈难题,开展了基于热管原理的磨削强化传热与高效冷却研究,一方面利用钎焊超硬磨料砂轮提高砂轮的锋利度,减少磨削热产生;另一方面,在砂轮中设计热管结构,产生热管传热效应,通过砂轮直接稳定疏导磨削热,实现磨削高效冷却,有效控制磨削温度,改善磨削质量并显著提升磨削效率。

26-25

柔性复合磨料制备及其力流变抛光性能

王金虎

浙江工业大学

抛光是硬脆材料高性能元器件获得高质量表面的关键技术。为了提高硬脆材料抛光效率、抑制表面/亚表面损伤,研究基于力流变抛光工艺特点,采用热塑法制备了大颗粒柔性复合磨料,并对熔融石英玻璃、镁铝尖晶石等硬脆材料进行了抛光实验。结果表明,大颗粒柔性复合磨料表面的氧化铈、金刚石等磨粒在柔性基体上具有良好的附着力,且相比纯氧化铈、金刚石磨粒抛光,其表面的磨粒能够更充分地参与化学反应和微切削过程,更好的实现材料选择性去除,而不增加表面/亚表面损伤。因此,毫米尺度柔性复合磨料用于力流变抛光工艺,能够获得更高的材料去除率,更小表面粗糙度。

26-26

基于金钢石单颗粒划擦的硬脆材料去除机制研究进展

隋天一

天津大学机械工程学院

基于实验室自主开发的次摆线划痕方法研究了多类型硬脆材料表面/亚表面损伤机理，建立了划擦过程中的材料应力场模型，通过宏量化多源异构数据分析了不同划擦深度下的材料去除特性，为硬脆材料的高效低损伤加工提供重要的理论研究基础。

26-27**CVD 金刚石在机械密封领域中的应用**

李赫

浙江省海洋材料与防护技术重点实验室副主任

机械密封是阻止旋转设备输送介质泄漏的关键装置被广泛用于石油化工、航空航天、深海装备等行业，其密封性能主要由对磨的机械密封摩擦副决定。在高压、高速、高温、强摩擦等恶劣工况下，传统的材料难以满足极端环境的需要，亟需开发新型低摩擦高耐磨的材料来满足机械密封装备高可靠性长寿命的需求。CVD 金刚石材料具有高硬度、低摩擦、高耐磨的特性，并且具有很好的抗腐蚀性能，是一种理想的极端环境机械密封环端面材料。在本报告中，我们将详细阐述 CVD 金刚石机械密封环的制备加工和实验室评价及其在石油钻探领域中的应用。

26-28**金刚石线锯切割晶圆表面线痕形成机制及调控研究**

廖信江

华侨大学

面向信息、光伏、照明、新能源等领域对半导体材料线锯切割高效高质加工需求，报告分析了金刚石线锯切割晶圆表面线痕产生的影响、研究现状及存在问题，通过切割实验系统地研究了锯切参数对线痕几何形状的影响，根据线痕形貌的比对结果，揭示了金刚石线锯切割过程中线痕的形成机理，建立并验证了线痕形貌的仿真模型，最后提出了晶圆线锯切割线痕控制的策略。

26-29**强化当前前沿性新技术学习积极探索超硬材料行业发展新途径**

方啸虎①② 崔祥仁③

上海昌润极锐超硬材料集团

中国材料学会超硬材料专业委员会

三河市晶日金刚石复合材料有限公司

当前，国际流行的现代前沿技术发展迅猛，以 5G、6G 等通信技术、墨子卫星 / 量子技术、智能制造技术、数字化技术等技术为代表的现代前沿技术的发展，不仅影响着人类的社会生产力的发展进程，也将影响着未来整个社会生产关系的变化，各行各业的生产方式和管理方式将面临着一次革命性的转变，这一转变也将必然会影响着我们超硬材料行业的发展。本文主要论证现代前沿技术对超硬材料领域的影响及应对措施。

文章先简介了与超硬材料相关的现代前沿技术，主要是现代通信技术、量子技术、数字化技术、智能制造技术，并从现代前沿技术将带来超硬材料学科基础研究方向和方法的改变、超硬材料生产方式的改变、超硬材料应用领域和应用方式的改变、行业和企业生产方式的转变等四个方面描述了这些技术的发展对超硬材料的影响及超硬材料产业将发生的变化。

在此基础上，文章仔细分析了在现代前沿技术发展给各行业带来的革命性变革中超硬材

料如何发展和应对，并提出了加强行业整体新技术的学习、加快行业企业数字化建设、加强新技术应用的基础建设、加快新型人才培养等四个方面的应对措施。

文章最后指出，超硬材料行业必须先行一步，积极应对现代前沿技术的快速发展，利用现代前沿技术推动本行业的快速发展，以适应现代前沿技术的发展需求，推动整个行业和国民经济的发展。