

## 中国科学院金属研究所磁性材料及磁学研究部

中国科学院金属研究所磁性材料及磁学研究部隶属于沈阳材料科学国家(联合)实验室。由我国著名冶金物理学家庄育智院士于 20 世纪 80 年代初创建,研究方向从难熔合金、合金相图等逐步转为稀土过渡金属化合物的结构和磁性研究。1986 年,孙校开研究员从奥地利维也纳技术大学获博士学位归国,开始筹建磁性和磁性材料研究室,并担任研究室主任。张志东博士从 1991 年起负责研究室工作。2001 年研究室加入沈阳材料科学国家(联合)实验室,设磁性材料与磁学研究部。



### 1 研究方向

**永磁材料**(稀土过渡金属化合物的结构和磁性、稀土亚稳相、纳米复合稀土永磁材料等)、**磁致伸缩材料**(新型廉价轻稀土实用磁致伸缩材料、复合磁致伸缩材料)、**巨磁电阻材料**(金属材料的结构、磁性和磁输运效应)、**薄膜磁性材料**(金属薄膜材料中的量子干涉效应与磁性交换耦合、磁电耦合及其输运性质)、**磁性纳米胶囊**(新型纳米胶囊,研究其微观结构和形成机理)、**磁致冷材料**(过渡金属化合物以及纳米材料的磁熵变与结构、磁性和相变的关系)、**铁电材料**(铁电、压电、导电和介电等薄膜功能材料的制备、评价与应用)、**磁性理论**(三维伊辛模型、玻色-爱因斯坦凝聚的动力学、超流等理论)。

### 2 研究成果

**永磁材料** 通过人工设计使纳米复合稀土永磁薄膜磁体中软磁相和硬磁相产生有效的交换耦合。并通过大量各向同性的纳米复合永磁材料研究,明确了制备各向异性纳米复合永磁薄膜是提高纳米复合永磁材料磁性能和确定其交换耦合机制的重要途径。在取向的硬磁层和软磁层中间插入非磁隔离层,实现了  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}/\alpha\text{-Fe}$  各向异性的纳米复合永磁薄膜磁体,发现其交换耦合行为及临界相关长度存在明显的各向异性,并给出了合理的解释,软磁和硬磁层的交换耦合是间接的和长程的。同时发现在  $\text{FM1}/\text{AF}/\text{FM2}$  3 层薄膜中层间和内界面交换耦合的竞争存在温度依赖关系,报导了这类 3 层膜中铁磁材料的各向异性的变化和与反铁磁层相连的铁磁材料的反射系数的自旋不对称性分别显著地影响 3 层膜中界面和层间耦合的强度。在纳米尺度  $\text{Co}/\text{NiO}$  铁磁/反铁磁反点阵列中交换偏置场  $H_E$  随铁磁性  $\text{Co}$  厚度的变化,既可以增加,也可以减少交换偏置,在反点阵列中观察到高的温度稳定性。

**磁致伸缩材料** 从各向异性唯象理论出发,通过同时考虑立方晶体的各向异性常数  $K_1$  和  $K_2$ ,得出了在  $\text{Dy}_{1-x}\text{Pr}_x\text{Fe}_2$  合金系统中存在成分各向异性补偿的结论,并用实验证明了该结论。得到了一些既有大的室温磁致伸缩又有良好的低场性能、具有很好应用前景的实用磁致伸缩候选材料。其中  $\text{Sm}_{0.9}\text{Pr}_{0.1}(\text{Fe}_{0.4}\text{Co}_{0.6})_2$  不含昂贵的重稀土元素,价格低廉,室温自发磁致伸高达  $4\,000 \times 10^{-6}$ 。

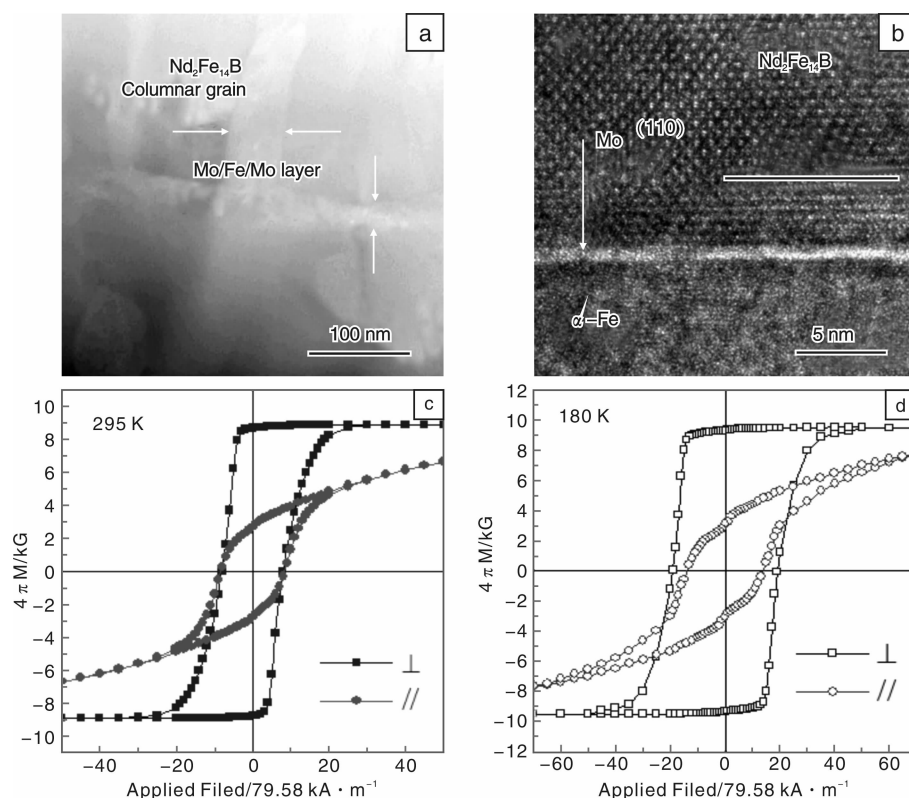
**薄膜磁性材料** 发现了  $\text{Nd}_{0.45}\text{Sr}_{0.55}\text{MnO}_3$  薄膜中依赖于温度和磁场的 2 次对称与 4 次对称的角度相关磁电阻及其相互转变。在电荷有序的  $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  薄膜中,发现不同温度下各向异性磁电阻由  $\cos^2\theta$  关系变为  $\sin^2\theta$  关系,进一步研究了其中复杂的相分离过程。发现有应力  $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$  薄膜中的相复合体导致膜中的电荷有序融化场远大于块体和无应力的薄膜。

**磁致冷材料** 在一系列化合物和纳米颗粒中发现大磁熵变效应、大可逆制冷容积,特别是其在低磁场下的优异性能使它们成为在不同温度区域的磁制冷候选材料,同时也为寻找新的磁致冷材料开辟了新的研究方向。

**磁性纳米胶囊** 制备的  $\text{Fe}/\text{ZnO}$ 、 $\text{Ni}/\text{ZnO}$ 、 $\text{FeCo}/\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{FeCo}/\text{C}$  等磁性纳米胶囊具有优秀的电磁波吸收性能,在不同的厚度和超高频段上的反射损失都超过了  $-20\text{ dB}$ 。它们可以作为电磁波吸收材料得到应用。

**铁电材料** 实现了铁电薄膜在微波磁场中  $450\text{ }^\circ\text{C}$  下的低温制备。用脉冲激光沉积法制备了  $\text{LaSrMnO}_3\text{-NiO}$  纳米复合薄膜,其居里温度在  $200\sim 345\text{ K}$  的范围内连续可调,具有良好的低场磁电阻。用化学溶液沉积法制备了  $\text{Au-LaNiO}_3$  纳米复合导电薄膜,其室温电阻率与  $\text{LaNiO}_3$  薄膜相比降低了近 70%,作为电极材料在微电子器件上具有广泛的应用前景。

**磁性理论** 通过引入第四卷曲起来的维和本征矢量上的权重这两个猜想作为处理三维伊辛模型的拓扑学问题的边界条件。发现了三维简单正交晶格伊辛模型的居里温度确定条件,且系统的对称性越高,居里温度越高。在猜想的基础上,用微扰技术严格推导出了三维简单正交晶格伊辛模型的自发磁化强度。并给出了一个一维非线性薛定谔方程的严格解,它描述了在一个排斥势中随时间变化的原子间相互作用的玻色-爱因斯坦凝聚的一个亮孤子的动力学。提供了一个实验工具来确认一维 Gross-Pitaevskii 方程的适合应用的范围,并实现了对玻色-爱因斯坦凝聚态的挤压与控制。研究了零温 BCS-BEC 跨越时 Rashba 型自旋-轨道耦合对一个二分量费米气体的凝聚密度和超流密度张量的影响。在各向异性的三维体系中,研究发现了自旋-轨道耦合对凝聚(增强)和超流具有相反的影响。



取向的磁性多层膜 Si/Mo (50 nm)/Nd<sub>16</sub>Fe<sub>71</sub>B<sub>13</sub> (800 nm)/Mo (2 nm)/Fe (11 nm)/Mo (2 nm)/Nd<sub>16</sub>Fe<sub>71</sub>B<sub>13</sub> (800 nm)/Mo (50 nm) 的横截面 TEM(a) 和界面处 HRTEM(b) 图片; (c), (d) 分别为该薄膜样品在 295 K 和 180 K 的面内和面外的磁滞回线

### 3 人才培养

磁性材料及磁学研究部现有在职研究人员和研究生 50 余人,其中研究员 7 人,副研究员 6 人,80% 以上具有博士学位,其中国家杰出青年 1 人,中国科学院百人计划 1 人。先后承担国家“973”项目/课题 3 项、“863”项目 3 项、国家重点基金项目 3 项、国家自然科学基金面上基金 20 多项。并获得多项国家和院级奖励,其中“铁基三元稀土过渡金属化合物的结构和磁性”获国家自然科学基金三等奖、“磁技术在油田的应用研究”获国家科技进步三等奖、“磁性纳米胶囊的制备、磁性和电磁性能研究”获辽宁省自然科学奖一等奖。另获得国家发明专利 10 项,实用新型专利 13 项。在国际知名学术刊物上发表论文 600 余篇。已培养博士 56 名,硕士 24 名,博士后 7 名。现有硕士生 12 名,博士生 31 名,博士后 1 名。

### 4 交流与合作

中国科学院金属研究所磁性材料与磁学研究部与荷兰阿姆斯特丹大学、美国加州大学 Irvine 分校、美国凯斯西储大学、美国纽约州立大学布法罗分校、美国宾州州立大学、美国内布拉斯加大学林肯分校、美国 Rutgers 大学、奥地利维也纳技术大学、韩国材料研究院、香港理工大学、台湾中正大学等国家和地区的研究机构开展长期合作研究。

## 中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室 M02 课题组

中国科学院物理研究所磁学国家重点实验室 M02 课题研究方向为“自旋电子学材料、物理和器件”，研究课题主要集中在巨磁电阻(GMR)和隧穿磁电阻(TMR)效应相关的材料、物理及其器件设计原理等方面；同时包括有机薄膜、金属和磁性半导体等复合磁性隧道结以及低维磁性纳米线和纳米管的制备研究等。韩秀峰研究员担任该课题组组长，现有在职研究员 1 名、副研究员 3 名、助理研究员 1 名和在站博士后 1 名、在读硕博连读研究生 12 名以及国外博士留学生 2 名，是一支有较强科研攻关能力和一定国际学术影响力的研究团队。



### 1 平台建设

近 10 年来，在国家自然科学基金委杰出青年基金、创新群体基金和重点基金以及中国科学院“百人计划”和 MRAM 课题专项研究经费、科技部“纳米计划”项目及其“973”课题经费的资助下，M02 课题组建立了有 150 m<sup>2</sup> 的超净



实验室和进行薄膜磁电阻材料研究的实验平台，其中包括 TMR R&D 超高真空、低溅射速率、多功能磁控溅射仪，国产紫外曝光机和 Ar 离子刻蚀机等微加工设备；另外还拥有 EV9 - VSM 振动样品磁强计、AFM/MFM - 原子力和磁力显微镜、以及自组装搭建的真空变温高频四探针测量系统。近 10 年来，M02 课题组先后培养博士毕业生 25 名，发表相关 SCI 学术论文 100 多篇，获得中国发明专利和美国及日本授权专利 50 余项。同时与美国橡树岭国家实验室、亚利桑那大学、加拿大麦吉尔大学、日本东北大学、爱尔兰三一学院、英国利兹大学、英国牛津

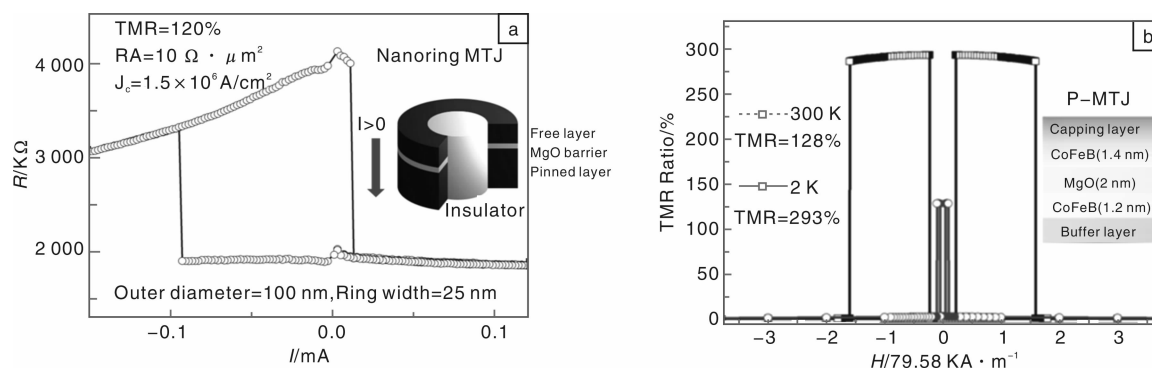
大学、法国南锡大学、俄罗斯国立远东大学等国外科研机构以及国内多家科研院所和高校的相关自旋电子学实验室及其国际知名学者和研究人员建立了长期的优势互补、强强合作的学术研究伙伴关系，取得了系列具有国际先进水平和一定学术影响力的科研进展和研究成果。

### 2 代表性科研进展

(1) 制备出具有高室温隧穿磁电阻比值的非晶 Al - O 或准单晶 MgO 势垒磁性隧道结材料以及纳米环磁随机存储器 (Nanoring MRAM) 原理型演示器件

课题组制备出室温磁电阻比为 81% (4.2 K 高于 100%) 的非晶金属 Co<sub>60</sub>Fe<sub>20</sub>B<sub>20</sub>/Al - O/Co<sub>60</sub>Fe<sub>20</sub>B<sub>20</sub> 磁性隧道结，是目前国际上公开报道的基于非晶 Al - O 势垒所能制备出的最好水平的 Al - O 势垒体系磁性隧道结 [JAP 101 (2007) 09B501]。成功优化制备出目前国际上所报道的环壁最窄、尺寸最小的外直径为 100 纳米尺度的环状磁性隧道结，并在室温下利用自旋极化电流可直接驱动磁矩翻转 [APL 91 (2007) 122511]；还基于 LLG 方程结合自旋转移力矩效应，进一步研究了这种 100 纳米尺度环状磁性隧道结中以自旋转移力矩效应为主的自旋极化电流驱动磁矩进动和磁矩翻转的物理过程 [PRB 77 (2008) 134432]。提出了一种基于“1 晶体管 + 1 纳米闭合型磁性隧道结”为基本结构单元的新型纳米环磁随机存储器 (Nanoring MRAM) 设计结构，并研制了纳米环磁随机存储器的原理型演示器件。该项设计可以克服第一代常规磁场驱动下 MRAM 存储器功耗高、存储密度低等瓶颈问题，能为研制 1 Gbit/inch<sup>2</sup> 以上高密度和大容量的第二代电流驱动型 MRAM 存储器，提供一种可供选择的有知识产权的优化设计方案。通过美国物理学会有关专家的推荐和投票遴选，该项“纳米环磁性隧道结及其纳米环磁性随机存储器”的研究工作，被 2007 年在美国召开的“第 52 届磁学和磁性材料 (MMM) 大会”以及在台湾召开的“第 4 届亚洲磁学论坛”上选为邀请报告；相关邀请文章发表在美国应用物理杂志上 [JAP 103 (2008) 07E933, Invited]。目前已获中国发明专利授权 [授权号：ZL200610000191.7] 以

及美国[授权号: US7, 936, 595 B2]和日本[专利特许证: 特许第 4959717 号]专利授权。



(a)核心结构为CoFeB/MgO/CoFeB的100纳米环状MgO势垒磁性隧道结的磁电阻随自旋极化电流的变化曲线,(b)核心结构为CoFeB/MgO/CoFeB的垂直磁性隧道结的磁电阻随外磁场的变化曲线

(2) 通过合作研究发展出纳米尺度下有效观测自旋翻转长度的新方法、基于第一性原理定量计算了双势垒磁性隧道结中的量子阱和量子阱共振隧穿效应、并提出了一种自旋相关的新型库仑阻塞磁电阻(CBMR)效应和一类基于尖晶石氧化物的新型磁性隧道结势垒材料

发展出一种利用纳米尺度的自旋电子学器件有效观测自旋翻转长度可达微米量级的新方法[PRL 97 (2006) 106605]、并基于第一性原理方法研究了单晶双势垒磁性隧道结 Fe/MgO/Fe/MgO/Fe 中的量子阱以及量子阱共振隧穿效应[PRL 97 (2006) 087210]。这种准确观测和探测自旋翻转长度的新方法和量子阱共振隧穿效应的研究,对当前研制磁随机存储器、纳米振荡器和旋晶晶体管等,具有重要的参考价值和学术指导意义。通过对 Fe(001)/M/MgO/M/Co/Fe [M = Co, Mg, Cr]具有插层结构的磁性隧道结材料进行了第一性原理计算研究,证实了在 Fe/MgO 界面处加入数个原子层的超薄 Co, Mg 或 Cr 膜后,能够显著调制隧穿磁电阻效应或产生周期的振荡磁电阻效应[APL 93 (2008) 172501; PRB 82 (2010) 054405; PRB 82 (2010) 134449]。提出一种新的自旋相关库仑阻塞磁电阻(CBMR)效应。在具有铁磁性纳米颗粒的双势垒磁性隧道结中,势垒中铁磁性纳米颗粒形成的量子点之间的耦合而导致了与自旋相关的库仑阻塞临界电压。自旋极化电子在量子点之间的隧穿,使量子点之间产生耦合,实现了库仑阻塞电压的自旋相关性,可产生巨大的磁电阻比值。这种自旋相关库仑阻塞磁电阻(CBMR)效应,不同于以往已知的各向异性磁电阻(AMR)、庞磁电阻(CMR)、巨磁电阻(GMR)和隧穿磁电阻(TMR)等效应,有可能成为一种全新的磁电阻效应[PRB 81 (2010) 155122]。利用第一性原理计算的方法,设计和研究了一类基于尖晶石势垒材料的新型磁性隧道结,由于尖晶石氧化物[MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, SiMg<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, SiZn<sub>2</sub>O<sub>4</sub>等]势垒与多种常用铁磁电极材料之间的晶格失配度小、并且具有与 MgO(001)单晶势垒一样具有  $\Delta 1$  对称性的自旋过滤效应,因此该类磁性隧道结也具有较大的磁电阻比值、同时能显著降低结电阻。该研究为实验上寻找有显著隧穿磁电阻效应的新型势垒磁性隧道结材料提供了理论指导[APL 100 (2012) 222401]。

### (3) 利用电化学沉积和有机聚合物模板及氧化铝模板,制备出多种单质或合金磁性纳米线及纳米管

通过简单的、成本低廉的直接电化学沉积方法和有机聚合物模板及氧化铝模板,成功制备出 Fe, Co, Ni 等多种单质磁性纳米线及纳米管和 NiFe、CoFe、CoPt、CoPd、FePt、FePd、CoFeB、CoFeCr 等多种铁磁合金纳米线及纳米管以及其它[Co/Cu]<sub>N</sub>多层膜纳米线等。特别是铁磁性的纳米管,由于它的中空结构及其具有在纳米医药和生物技术、有机复合材料制备、催化、吸波和射频材料及纳米磁性传感器等方面的潜在应用,将是一类有重要用途的磁性纳米材料[APL 92 (2008) 032505; APL 94 (2009) 203101; Adv Mater 21 (2009) 1-6]。

## 3 今后研究重点

今后五至十年, M02 课题组将在自旋电子学研究领域重点开展新型磁性隧道结及隧穿磁电阻效应(TMR)、多铁性/铁磁复合隧道结(MTJ)材料、基于电场或电压调控的第三代新型磁随机存取存储器(MRAM)、自旋纳米振荡器和微波探测器、磁逻辑、TMR 磁电阻磁敏传感器等器件原理的研究,力图取得更深入系统的研究进展。

(钢铁研究总院 周 栋 供稿)

## 2013 年中国工程院化工、冶金与材料工程学部候选院士名单

姓名	研究方向	单位	姓名	研究方向	单位
蔡小平	高分子化工	中国石油天然气股份有限公司	蔡玉良	无机非金属材料	中国中材国际工程股份有限公司
陈芬儿	精细化工	复旦大学	陈建峰	化学工程	北京化工大学
丁文江	金属材料	上海交通大学	杜 磊	含能材料	中国航天科技集团公司院
高金森	石油与天然气化工	中国石油大学	顾松青	有色金属冶金	中国铝业公司
郭文叁	无机非金属材料	安徽海螺集团有限责任公司	韩恩厚	金属材料	中国科学院金属研究所
胡伯平	功能材料	北京中科三环高技术股份有限公司	胡曙光	无机非金属材料	武汉理工大学
华 炜(女)	化学工程	中国石化股份有限公司北京燕山分公司	黄小卫(女)	有色金属冶金	北京有色金属研究总院
黄小义	材料合成与加工	中国人民银行印制科学技术研究所	蹇锡高	有机高分子材料	大连理工大学
姜 宏	无机非金属材料	海南大学	介万奇	材料合成与加工	西北工业大学
康永林	金属压力加工	北京科技大学	李保卫	过程工程	内蒙古科技大学
李春龙	钢铁冶金	包头钢铁(集团)有限责任公司	李凤生	含能材料	南京理工大学
李贺军	复合材料	西北工业大学	李 楠	无机非金属材料	武汉科技大学
李小松	化学工程	青海盐湖工业股份有限公司	李元元	粉末冶金	吉林大学
李仲平	复合材料	航天材料及工艺研究所	刘中民	煤化工	中国科学院大连化学物理研究所
毛炯辉	金属材料	武汉钢铁集团公司国	聂祚仁	粉末冶金	北京工业大学
潘 峰	功能材料	清华大学	潘复生	金属材料	重庆大学
彭金辉	有色金属冶金	昆明理工大学	彭 寿	无机非金属材料	安徽省薄膜太阳能电池工程技术研究中心
钱 锋	化工系统工程	华东理工大学	乔金樑	有机高分子材料	中国石油化工股份有限公司
邱显扬	矿物加工	广东省工业技术研究院	沈政昌	矿物加工	北京矿冶研究总院
史玉升	材料合成与加工	华中科技大学	宋宝珍(女)	无机非金属材料	中国科学院过程工程研究所
宋修明	有色金属冶金	铜陵有色金属集团控股有限公司	苏志国	生物化学工程	中国科学院过程工程研究所
孙丽丽(女)	石油与天然气化工	中国石化工程建设有限公司	唐芳琼(女)	纳米材料	中国科学院理化技术研究所
汪传生	高分子化工	青岛科技大学	王富耻	金属材料	北京理工大学
王吉坤	有色金属冶金	云南冶金集团股份有限公司	王继扬	功能材料	山东大学
王新华	钢铁冶金	北京科技大学	王玉忠	有机高分子材料	四川大学
翁 端	无机非金属材料	清华大学	吴 彬(女)	高分子化工	新疆天业(集团)有限公司
吴冲泮	有色金属冶金	厦门钨业股份有限公司	武高辉	复合材料	哈尔滨工业大学
肖志国	无机非金属材料	路明科技集团有限公司	谢建新	金属压力加工	北京科技大学
熊惟皓	粉末冶金	华中科技大学	许并社	功能材料	太原理工大学
许仲梓	无机非金属材料	南京工业大学	严大洲	有色金属冶金	中国恩菲工程技术有限公司
杨 斌	有色金属冶金	昆明理工大学	殷敬华	有机高分子材料	中国科学院长春应用化学研究所
尹衍升	材料合成与加工	上海海事大学	张宝砚(女)	高分子化工	东北大学
张福明	钢铁冶金	北京首钢国际工程技术有限公司	张建春	高分子化工	解放军总后勤部
张立群	有机高分子材料	北京化工大学	张联盟	复合材料	武汉理工大学
张新明	金属压力加工	中南大学	张一敏	矿物加工	武汉科技大学
张忠铨	金属材料	宝钢集团有限公司	周 济	功能材料	清华大学
周清跃	金属材料	中国铁道科学研究院	朱建勳	材料合成与加工	中材科技股份有限公司

(本刊通讯员)