

# 先生之风 山高水长

## ——记梁敬魁主要科技成就

陈小龙<sup>1,†</sup> 骆军<sup>2</sup>

(1 中国科学院物理研究所 先进材料与结构分析实验室 北京 100190)

(2 上海大学 材料科学与工程学院 上海 200444)

2019-01-20收到

† email: xlchen@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20190204



梁敬魁，中国科学院物理研究所、北京凝聚态物理国家研究中心研究员，凝聚态物理专业和物理化学专业博士生导师、中国科学院资深院士。1955年7月毕业于厦门大学化学物理系物理化学专业。1960年2月在莫斯科苏联科学院巴依科夫冶金研究所金属合金热化学和晶体化学专业研究生毕业，获苏联科学院技术科学副博士学位(相当于欧美的Ph. D)。1984—1987年曾任中科院福建物质结构研究所所长。

梁先生60多年来一直在晶体结构化学、材料科学和固体物理3个学科的交叉领域从事前沿性的基础和应用基础研究工作。1960年2月回国后分配到中科院物理所工作，他以X射线晶体学科为基础，主要应用X射线粉末衍射和热学分析，并辅以物性测量等方法，深入系统

的研究了固体功能材料，包括高 $T_c$ 氧化物超导材料，电光、非线性光学材料，快离子导体材料，稀土磁性和贮氢材料等的合成、相关系、相变和晶体结构；以及X射线衍射技术及其在固体材料中的应用等诸多方面的研究工作。在多晶X射线衍射和相图研究领域，做出了大量创新性的成果，达到国际先进水平，形成自己的研究特色。以晶体结构为基础，配合热学性质和晶体点阵常数的精确测量，研究固体物质相结构随组分和外界条件而变化的规律及其对物性的影响，提出了许多有价值的见解。在氧化物体系、金属合金体系、无机盐体系、非晶玻璃体系以及实验方法等方面，他单独或与研究生和同事合作在SCI收录的国内外重要学术刊物，例如 *Phys. Rev. B*, *Appl. Phys. Lett.*, *J. Appl. Phys.*, *Z. Physik B-Condensed Matter*, *J. Phys. Condens. Matter*, *Chem. Mater.*, *J. Phys. Chem. C*, *J. Solid State Chem.*, 以及《中国科学》《物理学报》《化学学报》《科学通报》等杂志发表学术论文、综述等500篇。国家科委情报研究所根据世界3大检索中心SCI、ISTP和ISR的统计，作为第一作者在1988年和1989年梁先生分别为中国学者在国际杂志发表论文最多的第10名和第7名作者，论文被引用率高。他主持并圆满完成了

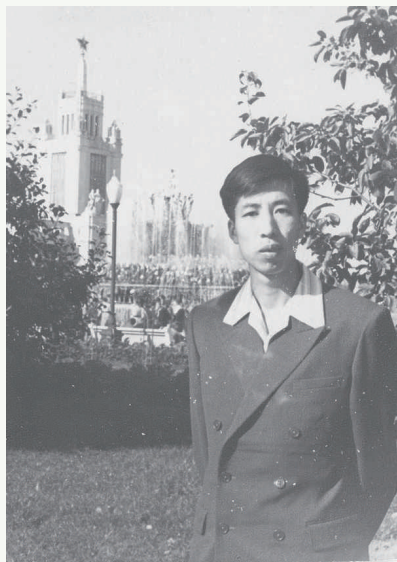
属首创的国防任务“核试验测温装置”的研制。在全面总结国内外文献的基础上，结合自己多年研究工作的积累，梁敬魁先生陆续编著了由科学出版社出版的4部著作：《相图与相结构(上下册)》(梁敬魁，1993年，59万字)；《高 $T_c$ 氧化物超导体系相关系和晶体结构》(梁敬魁，车广灿、陈小龙，1994年，59.7万字)，该书获得1995年全国优秀科技图书二等奖；《粉末衍射法测定晶体结构(上下册)》(梁敬魁，初版2003年，72万字；第二版2011年，83.2万字；第三次印刷，2012年，83.2万字)，2004年获科学出版社优秀作者奖；《新型超导体系相关系和晶体结构》(梁敬魁，车广灿、陈小龙，2006年，90万字)。这些著作内容翔实丰富，叙述简练，深入浅出，层次清晰严谨，具有很高的学术水平和学术价值，出版后受到同行的一致好评，被很多研究所和高等院校指定为参考教材。梁先生的科研成果获得多项国家自然科学基金及中国科学院、北京市和福建省科学技术进步奖。1977年和1982年被评为中国科学院先进工作者和优秀共产党员。1991年为表彰他对科学研究事业作出的突出贡献，获国务院颁发政府特殊津贴。1993年当选为中国科学院化学部学部委员(院士)，1999年获得何梁何利基金科学与技术进步奖，2011年获卢嘉锡科

学教育基金会“卢嘉锡化学奖”。

## 1 出色完成属首创核试验测温装置的研制

新中国成立初期，中国的发展和建设面临重重困难。在当时特殊的历史背景下，为了打破核垄断，抵制核讹诈，为中国的和平发展创造一个良好的外部环境，中国政府决定发展数量有限的核武器。

我国第一颗原子弹在大气层爆炸成功后，核试验从大气层转入地下进行。1965年夏，国防科工委有关负责同志来到中国科学院物理研究所，提出地下核试验测温装置研制的科研项目。要想准确测量核爆炸的瞬时温度，测温装置要求离爆炸源的位置足够近，而且要在冲击波摧毁测温装置之前的极短时间内收集到全部数据。这项国防任务的难度可想而知，常规的温度测量方法完全行不通，必须另辟蹊径。梁敬魁当时在物理所从事的是固体材料X射线晶体学研究，即利用已知波长的X射线衍射研究未知的晶体结构。基于X射线晶体学理论，他



20世纪50年代后期梁先生在苏联留影

提出了利用X射线通过已知结构的晶体分光法，反过来测量核爆炸时辐射波长分布的全新思路，根据黑体辐射Wien位移定律和Stefan—Boltzmann定律可以计算出爆炸时的瞬时温度和能量随时间的变化。热辐射是以电磁波的方式传播，在真空中传播的速度即光速，而冲击波是以声波传播的，因此在冲击波摧毁测温装置之前，在理论上完全可以实现对辐射分布的测量。这一测量方案成败的关键在于如何选择和标定已知结构的分光晶体，并排除哪怕是最微小的干扰，以实现辐射分布的准确测量。梁先生的这一总体思路周密可行，被国防科工委采纳作为一种测温方案。

这一项目对于梁先生完全是全新的研究课题，必须从设计测温装置开始。参加项目的全体同志夜以继日地进行各种实验，以确保测温方案万无一失。这是一项不可重复的测试，必须精心设计测温装置和进行准确标定。在物理所工厂的密切配合下，经历4年的千辛万苦，终于完成了地下核试验爆炸测温装置的研制。1969年9月23日，梁敬魁等人参与了中国第一次地下核试验，他们研制的测温装置在核试验中获得了成功，为国防工作作出了重要贡献。1978年，“核试验测温装置的研制”荣获中国科学院重大科技成果奖(第一完成人)。1981年，时任国防科工委领导在信中提到“梁敬魁同志，在第一次地下核试验，用X光晶体分光法测定高温X光能谱。这个方法是可行的，也是当前一个主要方法……梁敬魁同志在这项工作中是有功的，应当给予奖励。”(见1981年5月19日，中科院学部大会期间，程开甲给陆学善先生的信件)。

## 2 新物相晶体结构分析、晶体点阵常数的精确测定和X射线晶体学的应用

物质的宏观物理和化学性质与其组分及微观晶体结构密切相关。对物质晶体结构的了解，有助于在物质内部微观结构、原子水平的基础上，阐明物质各种性能，并为改善材料的性能、探索新型材料和促进材料科学的发展提供重要的科学依据。晶体的点阵常数是晶态物质的重要物理参量之一，它与晶态物质的其他的一些物理性质密切相关，晶体点阵常数的精确测量，在固体物理的研究工作中具有十分重要的理论意义和应用价值。

早在20世纪60年代初期，梁敬魁就在陆学善的指导下从事X射线晶体学研究。当时X射线源用的是20世纪30—40年代陆学善先生从英国带回来的Raymax可折式X射线发生器。没有衍射仪，收集衍射数据用的是由陆先生设计的对称型德拜—谢勒粉末衍射照相机。衍射线的位置用比长仪，强度用显微强度计和求积仪测量，没有计算机和计算程序。在十分简陋的实验条件下，梁先生用算盘和手摇计算器计算结构振幅。依靠深厚的晶体结构化学理论知识和精湛的实验技术，根据X射线衍射图谱强度分布规律、点阵常数的特点、衍射线附加消光条件，以及物理性能提供的基团配位多面体等结构信息，选择合理等效点系组合，他在国内率先应用X射线粉末衍射尝试法，成功测定了一系列金属间化合物 $\text{FeGa}_3$ 、 $\text{Mn}_3\text{Ga}$ 、 $\text{V}_2\text{Ga}_5$ 、 $\text{NiGa}_4$ 、 $\text{LaGa}_6$ 和无机盐 $\text{Zn}(\text{IO}_3)_2$ 的结构<sup>[1]</sup>。这些研究成果有的属于新发现的化合物，有的

还纠正了国外同行的错误报道。

由于近代实验设备条件的改善,近代物理分析方法的应用,以及计算机技术的提高及衍射峰形分析理论的发展和完善,利用X射线粉末衍射数据,单晶结构分析方法测定新物相结构成为可能。20世纪90年代中期,梁先生等率先在国内开展利用粉末衍射数据,直接法从头算,经16轮迭代测定了 $\text{LaFe}_3\text{Si}_4$ 的晶体结构<sup>[2]</sup>。随后测定了硼磷酸盐 $\text{Ba}_3\text{BPO}_7$ ,  $\text{K}_2\text{Zn}_3(\text{P}_2\text{O}_7)_2$ ,  $\text{Na}_2\text{ZnB}_6\text{O}_{11}$ 等晶体的结构<sup>[3]</sup>。对 $(hkl)$ 衍射线强度不能均分的空间群,其晶体结构的测定也进行了探讨<sup>[4]</sup>。这类空间群给基于X射线粉末衍射数据用单晶结构分析方法测定晶体结构带来困难。梁先生基于此提出了一种本征重叠峰衍射线强度的合理分配方法——即“位置待定原子的衍射强度贡献迭代分配法”。在这类空间群的粉末衍射图谱中,除了不能均分的本征重叠峰外,总会存在有相当数量可均分的本征重叠峰。对于含有重原子的化合物,可以利用这些可靠的振幅,进行傅里叶合成,求得重原子的位置,计算这些重原子对不能均分本征重叠峰的衍射总贡献,并将其从不能均分本征重叠峰的强度中扣除,剩余部分为结构中除了重原子外其他原子的总贡献。由于这部分的原子位置未被测定,每一个 $(hkl)$ 衍射线的强度无法计算。暂时采用均分法分配每一个 $(hkl)$ 衍射峰的衍射贡献,把根据重原子位置参数计算所得的 $(hkl)$ 衍射的强度贡献与剩余部分均分法所得的其他原子的贡献加和作为不能均分本征重叠峰每一个 $(hkl)$ 衍射峰的粗略强度。用这种方法得到的不能均分衍射线的强度和重叠峰可以通过均分得到的强度一起进行新一轮

用单晶结构分析法,会发现一些新原子的位置。重复上述操作,直至确定所有原子的位置。

以 $(hkl)$ 衍射峰强度不能均分的空间群 $P4/m$ 的 $\text{Ba}_{0.5}\text{Nb}_5\text{O}_8$ <sup>[4]</sup>和 $\text{CdNiC}_{16}\text{N}_6\text{H}_{18}$ <sup>[4]</sup>、空间群 $P\bar{4}$ 的 $\text{Ca}(\text{AuF}_6)_2$ <sup>[4]</sup>和 $\text{C}_{29}\text{H}_{25}\text{P}$ 以及空间群 $P6/m$ 的 $\text{C}_9\text{H}_{18}\text{Au}_3\text{N}_3\text{O}_3$ <sup>[4]</sup>为例,运用“位置待定原子的衍射强度贡献迭代分配法”,结合晶体结构化学知识,交替进行结构解析和衍射强度分配用以晶体结构的测定,结果表明,如果可以通过等效本征重叠衍射峰的均分法能够获得足够精确的衍射强度占总强度的30%,则其结构就有可能被解出。

梁先生早期关于Cu-Au二元系超结构的研究,是一项不仅需要扎实的理论基础,还需要极具耐心的工作。为了达到合金的平衡态,单是退火处理这一个工艺过程,就分别需要3个月、6个月或者1年的时间。通过精确的点阵常数测量,他在Cu-Au二元系中成功观察到一系列新的超结构现象<sup>[5]</sup>。其中有的是国外学者已研究多年,却始终没有观察到的现象。梁先生提出了根据粉末衍射的衍射线精确测定面间距 $d$ 值测定堆垛层数的方法,CuAu-I( $\text{Li}_0$ 型,  $P4/mmm$ )超结构不但在Au:Cu原子比为1:1处观察到,同时室温下在等原子的富Cu和富Au组分中也能观察到。此外对于CuAu-II( $\text{Li}_0\text{V}_w$ 型,  $\text{Imam}$ )超结构,不但在CuAu组分400℃淬火观察到堆垛层错数 $N=10$ 之外,在富Cu和富Au两边还观察到 $N>10$ 的CuAu-II超结构。并从实验上证实了CuAu<sub>3</sub>超结构的存在,证明了有序两相共存区是由同种化学组分,两种不同堆垛形式所组成的亚稳相,以及Cu-Au二元系有序化过程属热力学二级相

变,丰富了有序化超结构形成的实验和理论,是一项十分精细严谨的科研工作。

X射线衍射在固体材料中的应用方面,梁先生成果丰硕。 $\alpha\text{-LiIO}_3$ 在静电场作用下,中子衍射观察到强度的异常增大,电学和光学性能也发生异常变化,但国内许多实验室在静电场下X射线衍射没有观察到这种变化。他分析了中子衍射与X射线衍射的差异,主要在于中子衍射,电学与光学测量都是体效应,而X射线衍射只是表面效应,即参加效应的物质数量不同。梁先生用普通衍射仪改装成符合平行排列X射线双晶衍射的原理装置,增大入射线的发散狭缝,增加了 $\alpha\text{-LiIO}_3$ 被照射的体积和辐射的波长范围,即提高了入射X射线的强度,观察到 $\alpha\text{-LiIO}_3$ 在静电场作用下衍射强度异常变化的现象<sup>[6]</sup>,和 $\text{LiIO}_3$ 多型性的研究<sup>[7]</sup>,作为“静电场下 $\alpha\text{-LiIO}_3$ 单晶的基础理论研究”的一部分,获1980年中国科学院科技成果一等奖(第九完成人)。

梁先生提出了用衍射仪测量晶体点阵常数、无需修正其精确度可达到十万分之三的简便方法,并用于准确测定掺Nd的钇铝石榴石(YAG)激光棒中Nd的含量<sup>[8]</sup>。他还建立了在原子参数已知的情况下,从一个温度的X射线衍射强度测定晶体德拜特征温度及其各向异性和非均匀性方法。梁先生在多晶衍射分析和晶体点阵常数精确测量方面造诣深厚,具有国际先进水平。1982年梁敬魁应中国物理学会和中国金属学会联合主办的“全国第二届X射线衍射学术会议(上海)”邀请,在大会上做了有关X射线衍射法测定相图和结构的报告<sup>[1]</sup>。“X射线多晶衍射方法的建立和发展”获得1986年

中国科学院科学技术进步奖三等奖(第二完成人)。

### 3 相图在材料科学中的应用

相图是处于平衡状态下物质的组分、物相和外界条件(对于固态物质主要是温度和压力)相互关系几何描述的图示。它阐明什么组分、在什么条件下形成什么物相及其规律。相图与材料科学以及新材料的探索密切相关,它是材料科学的重要组成部分,可为具有实际应用价值的各种材料的合成、设计制备流程、热处理工艺、损坏机制评估,以及功能材料单晶体生长方法、配料组分的选择、晶体完整性提高等提供热力学依据。梁先生从20世纪60年代初开始从事功能材料相图的实验和实验与理论计算相结合的研究,在构筑相图和截面相平衡关系图方面做出了有代表性、具有指导意义的成果,鲜明的展示了相图的重要科学意义和实际应用价值。

#### 3.1 在我国开辟了相图在单晶体生长中的应用

20世纪70年代初,梁敬魁先生从事晶体生长的同事接受生长电光晶体铌酸锶钠锂( $\text{Sr}_4\text{NaLiNb}_{10}\text{O}_{30}$ )的国防任务。生长晶体初期,由于缺乏该晶体相关体系的相图资料,所生长的晶体锂含量时有时无,时多时少。按常规晶体生长后进行退火处理,以消除应力,提高完整性,反而开裂。在生长过程中由于偶然原因籽晶断了,晶体丢下来,其质量反而好。个中原因不明。经过对铌酸锶—铌酸钠—铌酸锂三元系的研究<sup>[9]</sup>,揭示了铌酸锶钠锂是约在1450℃由包晶反应形成的化合物固溶体( $\text{Sr}_4\text{Na}_{1-x}\text{Li}_{1-x}\text{Nb}_{10}\text{O}_{30}$ ),它约在1180℃包析分解。相图解释了晶体

生长中出现的现象,并为高质量的铌酸锶钠锂单晶体生长提供了配料组分、生长温度、热处理工艺等科学依据。相图工作作为“铌酸锶钠锂晶体的生长、性能和相图的研究”的一部分工作(集体),1980年获得中科院科技成果三等奖。

优质紫外倍频材料偏硼酸钡低温相(BBO)是中科院福建物构所发现的,但在研究初期,在多元硼酸盐体系中具有倍频效应的物质被错误认为是“硼酸钡钠”,无法生长出其单晶体。20世纪70年代末,梁先生建议由物构所派人来物理所,在他的指导下合作开展偏硼酸钡相关体系相图的研究,纠正了早期的错误认识,明确指出具有倍频效应的物质是偏硼酸钡低温相,而不是“硼酸钡钠”。根据相图和偏硼酸钡相变的研究结果,他和合作者利用钠盐做助熔剂,低于BBO相变温度920℃,成功地通过熔盐提拉法,首次生长出了 $2\times 4\times 6\text{ mm}^3$ 和 $2\times 4\times 8\text{ mm}^3$ 的两块BBO小单晶,并于1981年和1982年分别在《物理学报》<sup>[10]</sup>和《化学学报》<sup>[11]</sup>发表了相关研究结果,这也是中国学者在BBO研究方面最早公开发表的两篇学术论文。他的相关研究解决了BBO单晶生长的原理和实践问题,为随后福建物构所生长大块BBO单晶体的研究和出口创汇打下了重要的基础。这一研究堪称相图在材料科学和单晶生长应用的典范。随后为在硼酸盐体系中探索新型功能材料和生长BBO单晶体的优质助熔剂,梁先生主持开展了一系列硼酸盐体系相图与相变的研究工作。1988年,“碱与碱土等金属硼酸盐体系相图、相变和相结构研究”获得了中科院科技进步二等奖(第二完成人)。

相图是材料科学的重要基础,

但它通常难以取得立竿见影的应用效果。早在1984年梁先生等发表在《化学学报》关于 $\text{BaB}_2\text{O}_4$ - $\text{SrB}_2\text{O}_4$ 和 $\text{BaB}_2\text{O}_4$ - $\text{SrO}$ 截面相平衡关系的论文<sup>[12]</sup>,当时并未获得应用。20世纪90年代后期,发现了 $\text{BaB}_2\text{O}_4$ 高温相在紫外波段具有优良的双折射性能。 $\text{BaB}_2\text{O}_4$ 的熔点为1095℃,且属于固液同成份熔化,很容易从熔体中生长出 $\text{BaB}_2\text{O}_4$ 高温相的单晶体,然而降温过程易发生相变而开裂,用高温淬火法虽然也可获得亚稳存在于室温的 $\text{BaB}_2\text{O}_4$ 高温相,但在使用过程中会逐渐发生相变,导致晶体开裂而不能使用。中科院福建物质结构研究所根据上述论文<sup>[12]</sup>的研究结果,少量的 $\text{Sr}^{2+}$ 离子替代 $\text{BaB}_2\text{O}_4$ 中的 $\text{Ba}^{2+}$ 离子,可使 $\text{BaB}_2\text{O}_4$ 的高温相稳定存在于室温,由于 $\text{Sr}^{2+}$ 离子的掺入量很少,它不影响 $\text{BaB}_2\text{O}_4$ 高温相优质的紫外波段的双折射性能,成功地从熔体中生长出优质的 $\text{BaB}_2\text{O}_4$ 高温相。2014年获福建省科技进步二等奖(第三完成人),1984年发表的相关体系的相图文章<sup>[12]</sup>是其重要的内容。

#### 3.2 构筑了大量无机功能材料的相平衡关系图

50多年来梁先生和他的研究生以及同事,应用X射线粉末衍射、热学分析并辅以物理性能测试等试验方法,以及应用实验容易测得的数据,进行热力学分析,计算难以用实验测定的相图,系统地构筑了100多个二元系相图以及三元系等温截面和固态线下的相关系图,包括一系列Ga合金和稀土合金体系(主要是磁性和储 $\text{H}_2$ 材料)。碘酸盐、硼酸盐、铌酸盐和硫酸盐等无机盐体系(主要是电光、非线性光学材料和快离子导体材料)、氧化物体系(主要是高临界温度( $T_c$ )氧化物超导材料、多铁性材料等)以及常规条

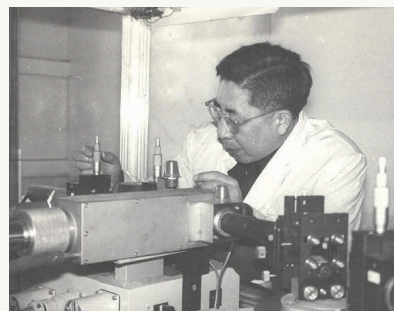
件下难以生长的晶体(例如BBO、GaN、ZnO等)相关的助熔剂体系,为这些功能材料的制备,提供了合理有效的技术路线,具有指导意义,所得到的结果被国内外有关相图汇编所收录。

20世纪60年代初国际上成功地构建了第一台红宝石( $\text{Cr}:\text{Al}_2\text{O}_3$ )脉冲激光器,继而激光通过水晶( $\alpha\text{-SiO}_2$ )晶体观察到倍频效应现象,在国际上引起了材料学家对非线性光学的关注。初期在氧八面体 $\text{MO}_6$ 畸变的钙钛矿型及其衍生结构的化合物中,开展了大量探索新型非线性光学材料的研究,继而由 $\text{MO}_6$ 八面体畸变的基团脱去三个氧组成 $[\text{MO}_3]^-$ 不具对称中心基团化合物,也被作为探索非线性光学材料的重要对象。

60年代后期, $\alpha\text{-LiIO}_3$ 晶体在非线性光学方面显示出其具有应用的前景。碘酸盐 $[\text{IO}_3]^-$ 基团具有未成键的电子对,碘酸盐及其复盐可能形成没有对称中心的极性晶体,而呈现出具有很强的电光、非线性光学效应和压电性。20世纪70年代由于当时实验室设备简陋,并考虑到碘酸盐易于合成,试验用水溶液反应蒸发法和在较低温度原料混合烧结反应合成法制备了一系列碱金属和碱土金属碘酸盐及其复盐体系,研究它们结构及其随组分的变化、复盐化合物的形成规律、组成相图的类型及其相变。研究结果揭示,碱和碱土碘酸盐主要有2种结构类型:钙钛矿型及其衍生结构和空间群为 $\text{P6}_3$ 的 $\alpha\text{-LiIO}_3$ 型及其衍生结构。其存在十分丰富的相变现象,例如 $\text{LiIO}_3$ 约在 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 升降温过程可观察到不同结构的10多种同份异构的亚稳相和中间过渡相,是研究重建型相变机制的极好对象。随着复盐阳

离子半径差异的增大,其组成二元系相图的类型:从连续固溶体体系 $\rightarrow$ 共晶体系 $\rightarrow$ 形成二元化合物体系。对于形成连续固溶体体系,其条件是两组分必须属同晶型结构,且它们的阳离子半径差别很小。例如 $\text{LiIO}_3\text{-Mg}(\text{IO}_3)_2$ 体系,属于同晶型结构,空间群均为 $\text{P6}_3$ ,阳离子 $\text{Li}^+$ 和 $\text{Mg}^{2+}$ 的六配位半径分别为 $0.76\text{ \AA}$ 和 $0.72\text{ \AA}$ ,虽然阳离子的价态不同,它们形成一种新型的连续固溶体,随着 $\text{Mg}(\text{IO}_3)_2$ 含量的增加,空位随之增加,空位有序使结构发生畸变,晶体结构的空间群从 $\text{P6}_3\rightarrow\text{P112}\rightarrow\text{P6}$ 转变。由于 $\text{H}^+$ 的离子半径小,它与大多数碘酸盐可以构成形成二元化合物的体系。

根据碘酸盐研究所得的结果,并结合国内外相关报道,梁先生对碘酸盐及其复盐的晶体结构和热力学性质进行了评述<sup>[13]</sup>,从晶体结构观点,它的 $[\text{IO}_3]^-$ 基团,具有未成键的电子对易形成不带对称中心的极性晶体,具有很强的电光、压电、非线性光学效应。另一方面,其结构是以阴离子 $[\text{IO}_3]^-$ 基团为框架, $[\text{IO}_3]^-$ 基团容易受温度、杂质、电磁场等外界因素的影响而变形,阴、阳离子也不占据在准确等效点的位置。一般情况下,晶体的完整性差,对称性低,易发生相变,结构松散,堆积系数低,约为50%,容易发生畸变,难以合成高质量的材料。晶体生长容易出现孪生、层错等缺陷,难以获得完整性好的晶体,影响了碘酸盐在相关领域的应用。然而也由于碘酸盐结构松散,阳离子容易在晶体点阵中移动,可能在快离子导体材料方面获得应用。“碘酸盐相图、相变和结构研究”获1987年中科院科技进步二等奖(第一完成人)。



20世纪80年代初梁先生在做实验

### 3.3 相图在制备新材料方面的应用

梁先生利用物相的诱导作用,根据相图的深共晶组分,在无机盐体系制备非晶态,通过在不同条件下所形成非晶态无机盐。由于可能存在着不同短程有序的离子基团,经过适当条件的热处理,有望诱导出常规条件下难以合成的物相,或某些具有特殊性能的亚稳相,根据这一思路,通过硼酸锂在非晶态中存在硼四配位的 $[\text{BO}_4]^{2-}$ 基团的诱导作用,他成功地在常压下制备了通常只有在高压下才能合成的全部为 $[\text{BO}_4]^{2-}$ 基团的 $\gamma\text{-LiBO}_2$ <sup>[14]</sup>。

全国相图学术会议纪要指出:“中国科学院物理研究所研究碘酸盐、硼酸盐、铈酸盐相图有效地指导晶体生长和材料的研究工作,具有很好的理论和实用价值。”评审专家认为梁先生的一系列研究工作具有较强的系统性和实践性,取得创新性的成果,具有国际水平,是我国相图研究工作中卓有成效的高水平的代表性工作。

## 4 探索新材料

梁先生在物理化学、材料热力学和X射线晶体学等方面的深厚理论基础,使得他能够从容游刃于晶体结构化学、材料科学和固体物理3个学科交叉领域,得心应手地进



1991年梁先生与卢嘉锡先生(右)

行新材料探索方面的研究。他的研究工作独具特色，形成了鲜明的个人风格，尤其在高温超导氧化物和稀土磁性合金等新材料探索方面取得了出色的成果。

#### 4.1 高 $T_c$ 氧化物超导体

1986年下半年，Bednorz和Müller在镧钡铜氧体系中首次发现了超导转变温度高于30 K的氧化物超导体，并因此分享了1987年诺贝尔物理学奖。在此之前基本上有关超导的报道主要都是金属材料，因而这一发现在超导研究方面具有里程碑式的意义，并迅速引起全世界科学工作者的关注。超导材料具有诱人的应用前景，室温超导若能实现，则必将引发人类历史上的又一次技术革命。面对着重要的科学意义和潜在的巨大经济效益，各国政府也争相支持超导材料研究，一场世界性的超导热随之而来。

梁先生敏锐地注意到了氧化物超导体体系的重要科学意义和应用价值，1987年初梁先生等即开始超导相的合成和晶体结构研究工作。1987年3月，较早地独立指出了Y-Ba-Cu-O体系超导相是缺氧有序畸变钙钛矿型结构<sup>[15]</sup>。3个钙钛矿型基本单胞沿Z轴阳离子有序排列，而且存在氧原子空位，其理想化合式应

为 $YBa_2Cu_3O_{9-y}$ ，这一工作推动了早期单相超导体的合成工作。同时，他还研究了一系列 $RBa_2Cu_3O_7$  ( $R$ =稀土元素)的超导转变温度和正交畸变的关系，指出偏离四方性的畸变越大，超导温度越高。在

La-Ba-Cu-O体系中观察到 $LaBaCu_2O_{4.5}$  (即所谓La-112相)的基础上，纠正了当时国际上认为La-112相是独立相的错误看法，提出并通过实验证实了La-112相是 $LaBa_2Cu_3O_{9-y}$ 超导相在富 $La_2O_3$ 区域的固溶体，在固溶区内超导转变温度随Ba含量的增加而升高<sup>[16]</sup>。

1987年中期，梁先生等率先研究了Pr对氧化物超导体超导性的影响。 $PrBa_2Cu_3O_7$ 属四方晶系，是不具有超导性的高阻半导体，根据价键理论和R-123单胞体积与 $R^{3+}$ 离子半径呈线性关系， $PrBa_2Cu_3O_7$ 单胞体积负偏离这一直线，Pr在 $PrBa_2Cu_3O_7$ 化合物中应为+3.14价。Pr-123与R-123形成连续固溶体，Pr替代不同的稀土，对其超导性的影响不同， $R^{3+}$ 有效离子半径愈大，R-123的单胞体积负偏离Vegard连线愈大，其淬灭超导性Pr含量愈少。在Pr含量相同的体系中， $R^{3+}$ 离子半径愈大，超导性被抑制愈显著。当 $R=La, Y$ 和 $Yb$ ，其淬灭超导性的Pr含量 $x$ 分别为0.15—0.20，0.50—0.60和0.65—0.70， $R_{1-x}Pr_xBa_2Cu_3O_7$ 超导性消失的Pr临界含量随 $R^{3+}$ 离子半径的减小而线性增加。Pr抑制了R-123的超导性可能与Pr离子的部分电子填入 $CuO_2$

平面的空穴，以及与固溶体单胞体积负偏离Vegard直线，加强了离子间的相互作用有关<sup>[17]</sup>。对于Bi系超导体，Pr同样对其超导性起抑制作用。 $Bi_2Sr_2Ca_{1-x}Pr_xCu_2O_8$ 属连续固溶体，Pr在固溶体中接近+3价，Pr替代Ca导致发生不同调制周期的相分离。当Pr的替代量 $x<0.4$ ，以短周期调制相为主，对超导性影响小， $T_c$ 线性缓慢下降， $x=0.4$ ， $T_c=60$  K。 $x>0.4$ ，以长周期调制相为主， $T_c$ 下降加快，当 $x=0.6$ ，超导性消失。Pr对Bi系超导性的影响，除了与超导相发生相分离有关外，另一方面，在Bi超导体中Ca呈+2价，Pr为+3价，与Pr离子多余的电子填满 $CuO_2$ 平面的空穴也有关<sup>[18]</sup>。

梁先生根据高温氧化物超导体晶胞尺寸 $a$ 轴和 $b$ 轴短，而 $c$ 轴长很多的结构特点，提出从粉末衍射图谱第一条衍射线给出的面间距值，确定高 $T_c$ 超导体结构类型和原子粗略位置的简便方法。这一方法被国内外同行采用及相关综述文献引用<sup>[19]</sup>。他们除了较早地合成了理想化合式为 $Tl_2Ba_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$  ( $n=1, 2, 3, 4$ )的双Tl-O层的一系列超导相外，还发现了在Tl-Ba-Ca-Cu-O体系中存在另一系列 $c$ 值不同的另一种结构类型的超导相，即理想化合式为 $TlBa_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+2.5}$  ( $n=1, 2, 3, 4$ )的单Tl-O层的新型超导相。并测定了这两种类型的八种铊系超导相的晶体结构<sup>[19]</sup>，成功制备了 $TlSr_2(Ca, R)Cu_2O_7$  ( $R=La, Sm, Er$ )超导相，并测定了它们晶体结构和超导转变温度，总结了超导相的结构规律，指出由于氧化物超导相的氧含量是可变的，不但物理与化学性质相似的离子可以互相替代，而且原子价不同、但在结构中配位多面体相同的离子也可以互相替代<sup>[20]</sup>。这一重要研究

结果扩大了新材料组分的选择范围,促进了氧化物超导新材料的探索。

除了稀土  $R$  系, Bi 系和 Tl 系的超导体外, 梁先生等还对 Pb 系, Fe 系, Ru 系也开展了一系列超导相的探索研究工作, 成功合成了一系列 Pb 系超导体<sup>[21]</sup>: (I)  $(\text{Pb}, \text{Cd})\text{Sr}_2(\text{Ca}, \text{Y})\text{Cu}_2\text{O}_7$  (Pb-1212), 以及 (II)  $\text{Pb}(\text{Sr}_{1-x}\text{La}_{0.8})\text{R}_2\text{Cu}_2\text{O}_9$  和  $(\text{Pb}, \text{Cd})(\text{Sr}, \text{R})_2(\text{R}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{Cu}_2\text{O}_9$  (Pb-1222) 等多稀土组分的 Pb 系超导体, 研究其晶体结构以及 Ca 含量和  $R$  的择优占位对超导电性影响。对于 Pb-1212 相随着 Ca 含量的增加,  $T_c$  可超过 50 K, 对于 Pb-1222 相,  $R=\text{Gd}$ ,  $T_c$  最高, 但都不超过 40 K。对于 Fe 系合成了  $\text{FeSr}_2\text{RCu}_2\text{O}_7$  (Fe-1212) 相<sup>[22]</sup> 和  $\text{FeSr}_2(\text{Ce}_{1.5}\text{R}_{0.5})\text{Cu}_2\text{O}_{10}$  (Fe-1222) 相<sup>[23]</sup> 等一系列化合物。它们不具有超导性, 属半导体。随着稀土元素  $R$  的原子序数增加, 在  $R=\text{Gd}$ , 晶体从四方晶系转变为正交晶系。同时合成了一系列  $\text{RuSr}_2\text{GdCu}_2\text{O}_7$  (Ru1212) 超导化合物<sup>[24]</sup>, 研究了组分替代对其结构和超导电性的影响。随着 Fe 或 Co 替代 Ru 量的增加, 超导转变温度和磁有序温度随之下降。Ba 或 Ca 替代 Sr, 超导转变温度随 Sr 位的平均离子半径增大而升高, Ca 替代 Sr 量为 0.1 时, 超导电性消失。Ba 替代 Sr 量为 0.07 时, 超导转变温度达最高值 54 K。在 5.5 GPa 高压下成功地合成了在常压下不能合成的一系列离子半径比 Gd 小的其它稀土 ( $R=\text{Tb}, \text{Dy}, \text{Y}, \text{Ho}, \text{Er}$ ) 的 Ru-1212 相, Tm, Yb 可能由于离子半径太小, 未能合成 Ru-1212 相。  $R=\text{Y}$ ,  $T_c=30\text{ K}$ ;  $R=\text{Ho}$  在低温观察到金属性 $\rightarrow$ 超导性的转变。Pb 系, Fe 系和 Ru 系一系列化合物的晶体结构和电性能的研究结果, 为高  $T_c$  氧化物超导机制的研究提供了有价值的实验依据。

梁先生在氧化物超导材料探索方面的研究成果, 得到了国内外同行的广泛关注和高度评价。他测定的许多氧化物超导体晶体结构, 被收入国际权威的无机晶体结构数据库 (ICSD), 其中铈系超导体的晶体结构还被 ICSD 刊登在封面。他还是超导研究领域引用率较高的国际学者。由于他在“七五”期间的国家高温超导攻关工作中成绩显著, 1991 年受到国家科学技术委员会表彰。梁先生作为主要参加者的“液氮温区氧化物超导体的发现”获 1989 年国家自然科学奖一等奖(第十一完成人), 作为第一完成人的“液氮温区氧化物超导体的合成、相关系和晶体结构”获 1991 年国家自然科学三等奖。

#### 4.2 稀土—过渡族金属体系功能材料

在新材料探索过程中, 梁先生十分重视我国优势资源稀土的开发和利用。20 世纪 70 年代后期, 他就开始研究稀土功能材料。早期, 他在稀土贮氢材料方面进行了大量系统的探索工作, 研究了  $\text{LaNi}_5$  基贮氢材料或其他元素替代对其相平衡关系和贮氢性能的影响<sup>[25]</sup>。发现其他金属元素替代  $\text{LaNi}_5$  中的 Ni 时, 氢化物的稳定性提高, 吸收氢的平台压力下降, 贮氢量减少; 其他稀土替代 La 时, 稳定性和贮氢量都下降。稀土对贮氢材料 TiFe 和 TiMn 起净化作用, 降低了活化的温度和压力<sup>[26]</sup>。

1983—1984 年间, 国际上发现了第 3 代优质永磁材料  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ , 梁先生等随即开展了稀土富过渡族元素金属间化合物的研究。他们早期的关于  $R\text{-Fe-B}$  ( $R=\text{Nd}, \text{Pr}$ ) 三元系等温截面和若干个通过  $\text{R}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$  的纵截面关系的研究工作<sup>[27]</sup>, 为合成优质永磁材料的组分选择和热处理工艺条件提供了重要依据。还测定了优

质永磁材料中的富硼相  $\text{R}_{1-x}\text{Fe}_x\text{B}_4$  的晶体结构<sup>[28]</sup>, 确定了该富硼相是由点阵常数  $a$  值相同,  $c$  值不同的两个四方对称的亚晶胞 FeB 和  $R$  套插而成的游标卡尺型的一维无公度结构。

20 世纪 90 年代开始, 梁先生把研究重点转向新型永磁等稀土功能材料的探索。这些材料由于在电、磁、光、热等领域具有广泛的应用前景, 因而备受国内外科研工作者的关注。稀土元素 ( $R$ ) 具有大的原子磁矩和磁晶各向异性; 过渡金属 ( $T$ ), 比如 Fe、Co 等, 具有高的饱和磁化强度和居里温度。然而, 稀土与过渡金属二元化合物稳定存在的为数不多。加入第三组元 ( $M$ ) 的稳定作用是大部分稀土与富过渡族金属合成金属间化合物的关键。基于形成焓、原子半径、电子组态和电负性等因素, 梁先生深入分析了第三组元对化合物的稳定机制, 给出了化合物稳定存在的热力学和晶体学依据。根据这一思路和方法, 他指导研究生开展了一系列  $R\text{-T-M}$  三元系相关系、成相规律、晶体结构和磁性能的研究。他们研究发现, 第三组元的加入不仅能够稳定化合物, 往往还能够改善化合物的磁性能。从晶体结构的角度, 他们阐述了第三组元的占位对磁性能的重要影响。

$\text{NaZn}_{13}$  型结构的稀土 ( $R$ ) 过渡元素 ( $T$ ) 的金属间化合物, 在二元系中只有  $\text{LaCo}_{13}$  能够稳定存在。由于在  $R\text{-T}$  二元化合物中, 它的过渡族金属含量最高, 可望有较大的饱和磁化强度和较高的居里温度, 从而可以作为优质永磁材料。然而它属立方结构, 磁晶各向异性很小, 限制了它作为永磁材料的应用前景。梁先生从晶体结构的角度入手, 指导研究生通过热力学估算和结构化学考虑选取合适的稳定元素  $M$ , 然后

对过渡族元素  $T$  进行部分无序或有序替代,成功地合成了一系列具有  $\text{NaZn}_{13}$  型结构的  $R(T, M)_{13}$  金属间化合物 ( $R=\text{La, Ce, Pr, Nd}$ ;  $T=\text{Fe, Co}$ ;  $M=\text{Al, Si}$ )<sup>[29]</sup>。他进一步指出,通过合适的热处理工艺,能够实现  $T$  与  $M$  原子的有序化占位,获得对称性较低的晶体结构,从而提高化合物的磁晶各向异性。随后的实验工作证实了他的推断,他们成功地实现了  $R(T, M)_{13}$  化合物的晶体结构由立方 $\rightarrow$ 四方 $\rightarrow$ 正交的转变,不仅保留了化合物本身较高的居里温度和高饱和磁化强度,又提高了其磁晶各向异性场。这一成果同时也成为近年来 1:13 型化合物室温磁熵效应研究的重要依据。

$RT_5$  化合物是优良的磁性能结构类型,随着过渡金属含量的增加,化合物的饱和磁化强度和居里温度也随之提高。用  $2T$  哑铃对无序或有序替代  $RT_5$  中的  $R$ ,可能形成一系列  $RT_5$  衍生化合物  $R_{m-n}T_{5m+2n}$ 。当  $n/m \leq 2/9$  时,无序替代形成  $\text{TbCu}_7$  型结构;当  $n/m=1/3 \sim 1/2$  时,有序替代形成不同结构的化合物,如  $R_2T_{17}$ 、 $R_3T_{29}$  和  $RT_{12}$  型结构等。他们成功地合成了

一系列未见文献报道的 9 个  $n/m \leq 2/9$  的具有  $\text{TbCu}_7$  型结构的  $R(T, M)_7$  化合物 ( $R=\text{Pr, Nd, Sm, Tb}$ ;  $M=\text{Si, Cu, Ti, Zr, Hf}$ )<sup>[30]</sup>,其中  $\text{SmCo}_{7-x}\text{Hf}_x$  具有优异的内禀磁性能,有望用作目前急需的高温永磁材料;合成了 6 个  $n/m=1/3$  在  $\text{La-Co}$  二元系中不存在的  $\text{La}_2(\text{Co}, M)_{17}$  化合物<sup>[31]</sup> ( $M=\text{Ti, V, Mn, Ta, Nb, Mo}$ ),并将面各向异性转变为轴磁晶各向异性;合成了 11 个  $n/m=2/5$  的  $R_3(\text{Fe}, M)_{29}$  化合物<sup>[31]</sup> ( $R=\text{Nd, Gd}$ , 混合稀土;  $M=\text{Ti, Cr, Nb, Ta, W, Re}$ ),并测定了  $M$  的占位;还合成了 4 个  $n/m=1/2$  的  $R(T, M)_{12}$  化合物<sup>[31]</sup> ( $M=\text{Si, V, Mo, Re}$ )。并且,他们将稳定元素  $M$  扩展到第五和第六周期,稀土  $R$  扩展到重稀土,扩展了新型稀土磁性功能材料的研究范围。近年来,他还开展了稀土磁制冷材料的探索工作。

利用  $\text{RCO}_5$  的高饱和磁化强度和居里温度以及  $\text{RCO}_3\text{B}_2$  的高磁晶各向异性场,他们合成了  $m\text{RCO}_{5+n}\text{RCO}_3\text{B}_2$  组合的  $m \geq 2$  的  $R_{m+n}\text{Co}_{5m+3n}\text{B}_{2n}$  系列层状磁性化合物<sup>[32]</sup>,具有典型的梁氏科研风格。他从晶体学原理出发,应用结构组合的概念,采用分子堆积

的方法,设计出了一系列国际上尚未报道的具有优异磁性能的化合物。他指导研究生,通过非平衡法合成和低温长时间退火,合成了  $m=2$ 、 $n=1$  的  $R_3\text{Co}_{13}\text{B}_2$ ,  $m=2$ 、 $n=3$  的  $R_5\text{Co}_{19}\text{B}_6$ , 和  $m=3$ 、 $n=2$  的  $R_5\text{Co}_{21}\text{B}_4$  三个系列不同轻稀土元素的新型化合物,并测定了这些化合物的晶体结构。基于原子级别的设计,这些化合物不仅保留了自身巨大的磁晶各向异性,还显著提高了居里温度和饱和磁化强度。同时,这一组合结构思想方法还可以指导其他无机新材料的探索和合成研究。

十余年来,梁先生与研究生和同事一起,先后测定了 15 个  $R-T-M$  三元系 ( $R=\text{稀土}$ ,  $T=\text{过渡族金属}$ ,  $M=\text{第三组元}$ ) 富  $T$  部分固相线下的相关系,合成了未见文献报道的、在  $R-T$  二元系中不存在的五十余个稀土过渡金属组成的金属间化合物及其固溶体,以及 3 个金属间化合物新的结构类型,测定了  $M$  在晶体结构中的占位,阐述了  $M$  对物相稳定作用的机制及其对磁性能的影响。这些研究工作得到国内外同行的普遍认可和广泛引用,认为他的工作为探索新型稀土功能材料提供丰富的研究对象,对稀土化合物的合成具有指导作用,是一项具有自己特色的颇具创新性的基础和应用基础性研究工作,具有重要的学术意义和潜在的应用价值。“稀土富过渡族金属三元系相图、化合物晶体结构和磁性能的研究”获 2004 年北京市科学技术奖一等奖(第一完成人)。

## 5 人才培养

梁敬魁先生注重培养、提携后辈,学生遍布世界各地。自 1978 年以来,他先后招收(含合作培养)了 40



2009年梁先生与部分弟子合影



多名博士生, 18名硕士生和8名博士后。除了培养研究生外还培养了一批来自高等院校的实习生和来物理所培训的有关人员。他言传身教, 精心培养了一大批优秀的科技工作者。毕业的学生大多成为所在单位的业务骨干和相关领域的学术带头人, 其中有的当选为中国科学院院士, 国家“千人计划”特聘专家, 有的获得了“百人计划”、“杰

出青年”资助, 以及入选“新世纪百千万人才工程”。由于在人才培养上的突出贡献, 他多次荣获“中国科学院优秀研究生导师奖”, 并被“中国科学院研究生院”授予“优秀教师”和“杰出贡献教师”荣誉称号。由于对北京市学位与研究生教育改革和发展所作的突出贡献, 2009年获北京市教育委员会和学位委员会表彰并颁发“荣誉证书”。

2009年获卢嘉锡科学教育基金会“卢嘉锡优秀导师奖”等诸多荣誉。

回忆起自己多年的科研生涯, 他曾深情地说:“我没有辜负党和人民的希望, 在今天中国青年一代科研工作者身上, 我看到中国的未来充满希望。”梁先生将自己的一生奉献给了给我国的教育与科研事业, 他就是这样一位可亲可敬的科学家。

梁先生, 我们永远怀念您!

## 参考文献

- [1] 梁敬魁. X射线衍射学展, 北京: 科学出版社, 1986
- [2] 唐为华, 梁敬魁, 刘泉林. 自然科学进展, 1997, 7(5), 537
- [3] Ma H W, Ji L N, Chen Y Q *et al.* *J. Solid State Chem.*, 2004, 177: 3454; *Powder diffraction*, 2008, 23: 317; *Powder diffraction*, 2010, 25: 9
- [4] Ma H W, Liang J K, Liu G Y *et al.* *Powder Diffraction*, 2004, 19(4), 333; *物理学报*, 2004, 53(8), 829
- [5] 陆学善, 梁敬魁. *物理学报*, 1966, 22(6): 669
- [6] 梁敬魁, 易孙圣. *物理学报*, 1978, 27(2): 126
- [7] Liang J K, Rao G H, Zhang Y M. *Phys. Rev. B*, 1989, 39(1): 459
- [8] 梁敬魁. *物理*, 1981, 10(5): 295
- [9] 唐棣生, 梁敬魁, 石庭俊 等. *物理学报*, 1979, 28(1): 62
- [10] 黄清镇, 梁敬魁. *物理学报*, 1981, 30(4): 559
- [11] 梁敬魁, 张玉苓, 黄清镇. *化学学报*, 1982, 40(11): 994
- [12] 王国富, 黄清镇, 梁敬魁. *化学学报*, 1984, 42(6): 503
- [13] Liang J K, Tang D S, Che G C. *Advances in Science of China, Chemistry*, 1990, 3: 129
- [14] 梁敬魁, 柴璋, 赵书清. *中国科学(中文版)*, 1990, 20(1): 105; *Scientia Sinica(英文版)*, 1990, 33A: 595
- [15] Che G C, Liang J K, Chen W *et al.* *Chinese Phys. Lett.*, 1987, 4(10): 453
- [16] Dong C, Liang J K, Che G C *et al.* *Phys. Rev. B*, 1988, 37(10): 5182
- [17] Liang J K, Xu X T, Chen X L *et al.* *Z. Phys. B-Condensed Matter*, 1987, 69: 137; *中国科学(中文版)*, 1992, 35A(10): 1053; *Scientia Sinica(英文版)*, 1993, 36A(7): 833
- [18] Chen X L, Liang J K, Min J R *et al.* *Phys. Rev. B*, 1994, 50(5): 3431
- [19] Liang J K, Zhang Y L, Huang J Q *et al.* *Phys. C*, 1988, 156: 616; *中国科学(中文版)*, 1989, 32A(1): 32; *Scientia Sinica(英文版)*, 1989, 32A: 826
- [20] 梁敬魁, 柴璋. *物理化学学报*, 1991, 7(2): 246
- [21] Min J R, Liang J K, Chen X L *et al.* *Physica C*, 1994, 229: 169; *Physica C*, 1994, 230: 389; *Physica C*, 1995, 245: 281; *Phys. Rev. B*, 1995, 51(14): 9261; *J. Phys.: Condens. Matter*, 1995, 7: L405; *J. Phys.: Condens. Matter*, 1995, 7: 5975; *J. Phys.: Condens. Matter*, 1996, 8: 2869; *Physica C*, 1995, 249: 196
- [22] Yang L T, Liang J K, Liu Q L *et al.* *Chem. Matter*, 2003, 15: 4987
- [23] Yang L T, Liang J K, Liu Q L *et al.* *J. Alloys and Compounds*, 2004, 373: 53
- [24] Yang L T, Liang J K, Liu Q L *et al.* *J. Appl. Phys.*, 2004, 95: 1942; *Physica C*, 2004, 403: 177; *J. Solid State Chem.*, 2004, 177: 1072
- [25] 梁敬魁, 车广灿, 赵景泰 等. *金属学报*, 1982, 18(5): 592; *科学通报(中文版)*, 1983, 28(3): 144; *Kexue Tongbao(英文版)*, 1984, 29(1): 29; *物理学报*, 1984, 33(6): 770; *金属学报*, 1986, 22(5): B206; *金属学报*, 1988, 14, 增刊 II: SA114; *物理学报*, 1986, 35(4): 505; *Chinese Physics*. 1987, 7(1): 29
- [26] 梁敬魁, 饶光辉. *科学通报(中文版)*, 1986, 31(24): 1861; *Kexue Tongbao(英文版)*, 1987, 32(20): 21378; *物理学报*, 1987, 36(7): 862; *Chinese Physics*, 1988, 8(1): 141
- [27] 车广灿, 田静华, 梁敬魁 等. *中国科学(中文版)*, 1985, 28A(10): 909; *Scientia Sinica(英文版)*, 1986, 29A(4): 1172; *中国科学(中文版)*, 1987, 30A(2): 159; *Scientia Sinica(英文版)*, 1987, 30A(6): 607
- [28] 田静华, 梁敬魁, 杨大宇 等. *中国科学(中文版)*, 1989, 32A(2): 173; *Scientia Sinica(英文版)*, 1989, 32A(8): 962; *Physica Status Solidi*, 1988, 107(1): 45
- [29] 梁敬魁, 饶光辉, 唐为华 等. *自然科学进展(中文版)*, 1996, 6(6): 641; *Progress in Natural Science(英文版)*, 1997, 7: 1
- [30] Luo J, Liang J K, Guo Y Q *et al.* *Intermetallics*, 2005, 13: 710
- [31] 梁敬魁, 刘泉林, 黄丰 等. *自然科学进展(中文版)*, 2011, 11(11): 1132; *Progress in Natural Science(英文版)*, 2002, 12(2): 81
- [32] 梁敬魁, 陈怡, 陈小龙. *自然科学进展(中文版)*, 2001, 11(8): 785; *Progress in Natural Science(英文版)*, 2001, 11(12): 881