固体物理

任课教师：杨　　森

个人简历

杨　森　西安交大理学院　教授/博士生导师；
钱学森学院 常务副院长
从事相变与铁性智能材料等领域研究。

教育履历：

- 1993.09-2005.04：　西安交通大学　学士/硕士/博士
- 2001.01-2002.12：　南京大学 联合培养博士

海外经历：

- 2005.10-2007.09：　日本学术振兴学会（JSPS）　博士后
- 2007.10-2009.09：　日本国立物质材料研究院　助理研究员

人才计划：

- 2015年，西安交大青年拔尖人才入选者
- 2013年，国家优秀青年基金获得者
- 2010年，入选教育部“新世纪优秀人才”支持计划

主要学术任职:

- 中国电子学会应用磁学分会高级会员；
- 陕西省电子学会应用磁学分会主任委员；

绪 论

- ✓固体物理的基本概念及其研究对象
- ✓固体物理的发展过程
- ✓固体物理的学科领域
- ✓固体物理的研究方法
- ✓如何学习固体物理

一、固体物理的基本概念及其研究对象

1.固体物理

研究固体结构及其组成粒子(原子、离子、电子等)之间的相互作用与运动规律以阐明固体性能与用途的学科。

固体的宏观性能取决于固体的微观结构。不同固体的硬度、强度、导电性、热传导等性能之所以不同，其主要原因是不同的固体有不同的晶体结构、能带分布。

例如1 石墨和金刚石的性能比较。

(1)组成

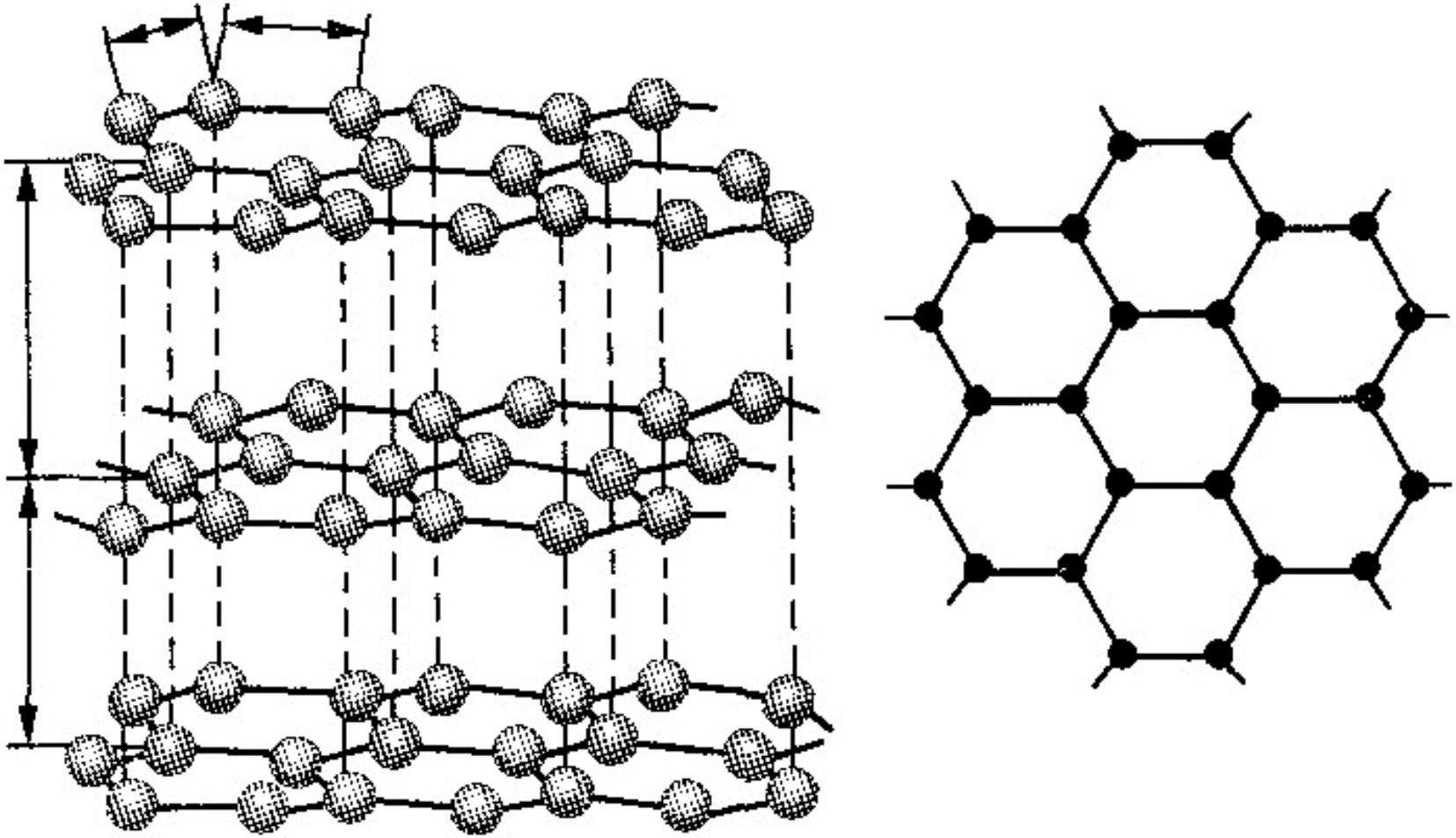
石墨和金刚石都是由同一种元素碳元素组成。

(2)性能

①石墨——导电性、导热性好，硬度低、强度低；

②金刚石——绝缘体、导热性较差、硬度高。

石墨和金刚石之所以性能差别如此巨大，主要是它们的结构有着本质的区别。



石墨层状和单层结构示意图

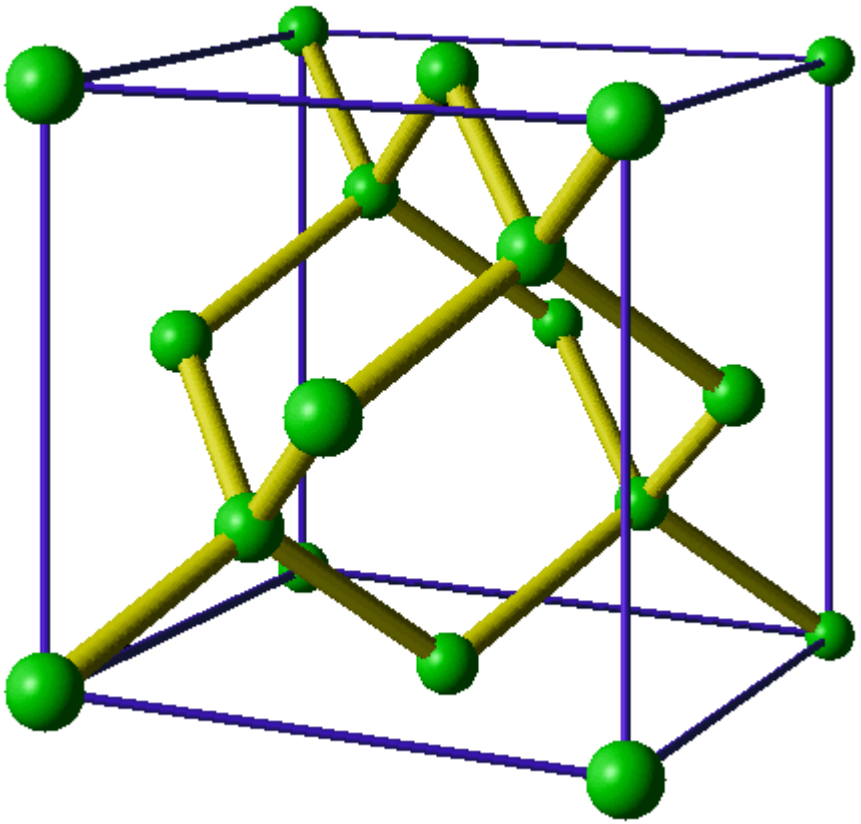
(3)石墨结构

①层状结构

石墨是层状结构，层与层之间是靠瞬间偶极矩结合在一起的，组织比较松散。所以反映在宏观上就是石墨比较松软。

②共价键组成

石墨中每个碳原子是和周围三个其它碳原子组成共价键，三个共价键几乎在同一平面内，夹角约为120度。剩下的一个电子则可以在石墨中自由运动，所以，石墨可以导电。



金刚石结构示意图

(4)金刚石结构

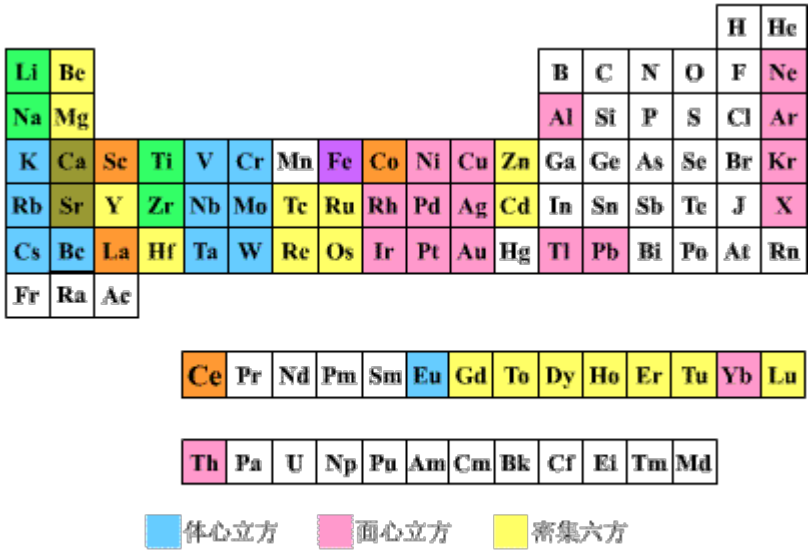
①面心立方套构

金刚石是由两套面心立方晶格套构而成，具有较大的结合能。所以反映在宏观上就是金刚石比较坚硬。

②共价键组成

金刚石中每个碳原子和周围的四个碳原子组成四个共价键，四个共价键的分布为四面体，其中没有可以用来导电的自由电子，所以金刚石是绝缘体。

例2 金刚石、硅单晶性能比较。



金刚石、硅单晶具有

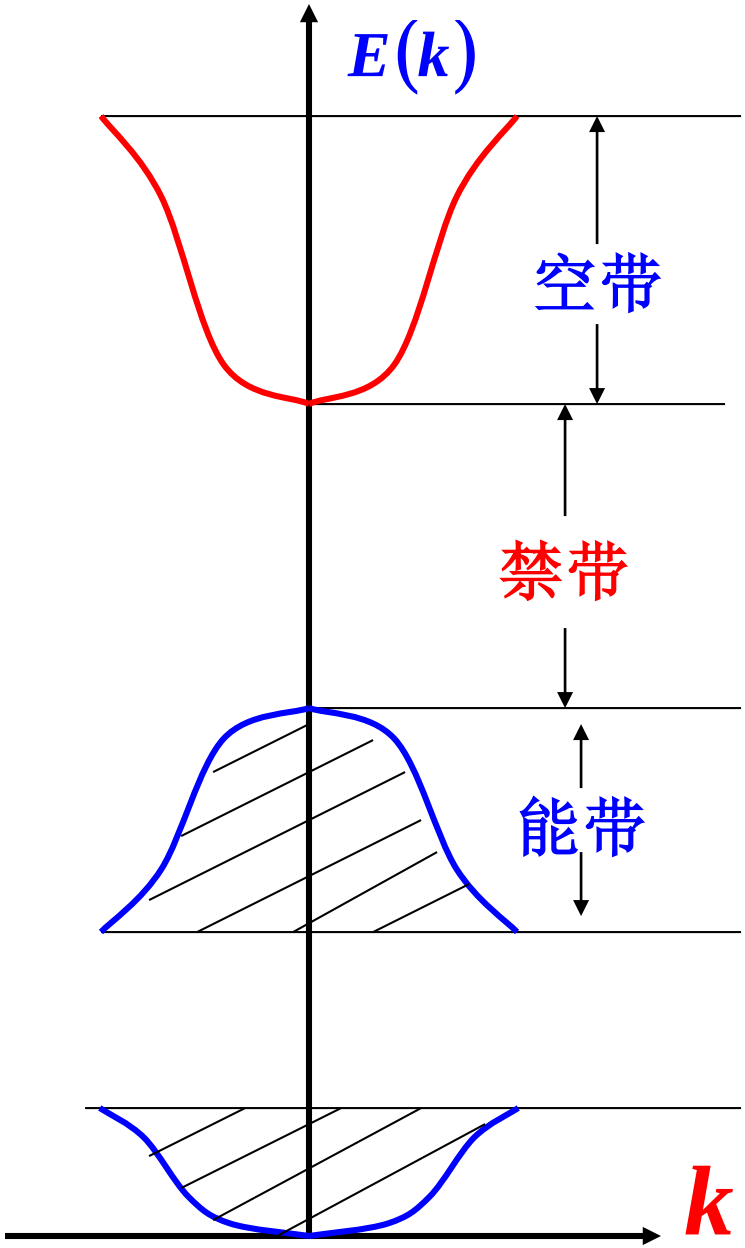
完全相同的晶体结构。

(1)金刚石——金刚石是绝缘体。

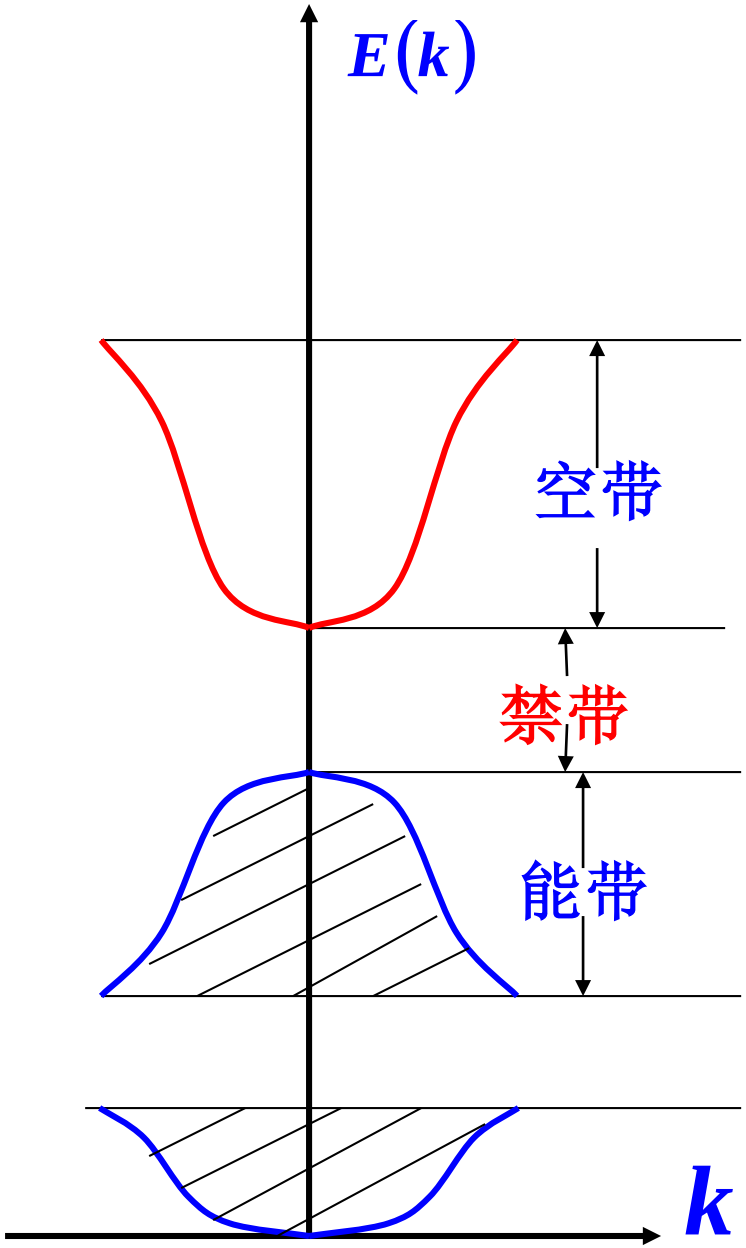
(2)硅单晶和锗单晶——半导体。

(3)原因——结构完全相同、电子能带分布十分相似，但是由于金刚石的禁带宽度(**5.5eV**)比硅单晶(**1.17eV**) 的禁带宽度宽。所以导电性能就不一样。

结构完全一样的不同晶体，由于内部电子能带分布的不同，宏观性能也会出现差异和不同。



金刚石能带分布示意图



硅单晶能带分布示意图

2.物质的分类

物质可以分成四大类：等离子体、气体、液体和固体。

(1)等离子体

宇宙中几乎99%的物质都是等离子体，等离子体是由离子、电子和中性粒子组成的，没有一定的形状和体积，粒子的排列没有规律。

(2)液体

液体有一定的体积却没有一定的形状，粒子的排列也是无序的(短时短程有序)。

(3)气体

气体没有一定的形状和体积，粒子排列没有一定的规律。

(4)固体

固体不仅有一定的体积而且有一定的形状，粒子间作用力很大，粒子间的排列可分为两种情况：长程有序和短程有序。

①长程有序是指10^3～10^4Å量级以上排列有序；

②短程有序是指10^2 Å以下量级排列有序。

3.固体物质的分类

固体物质可分为两大类——晶体和非晶体。

(1)晶体

原子(离子或分子)按一定的周期排列的固体称为晶体，又称为晶态。

从微观上讲，晶体是长程有序的，即在10^3～10^4Å量级是有序排列的。

从宏观上讲，一般的晶体都是凸多面体，即表现出对称性。

晶体又分为完整晶体和近乎完整晶体。

完整晶体——结构完全规则的晶体。

近乎完整晶体——存在少量缺陷的晶体。

例如：自然界中的盐岩(NaCl晶体)、金刚石、水晶、白宝石(Al_2O_3刚玉晶体)等。人工拉制的硅单晶、铜单晶等。

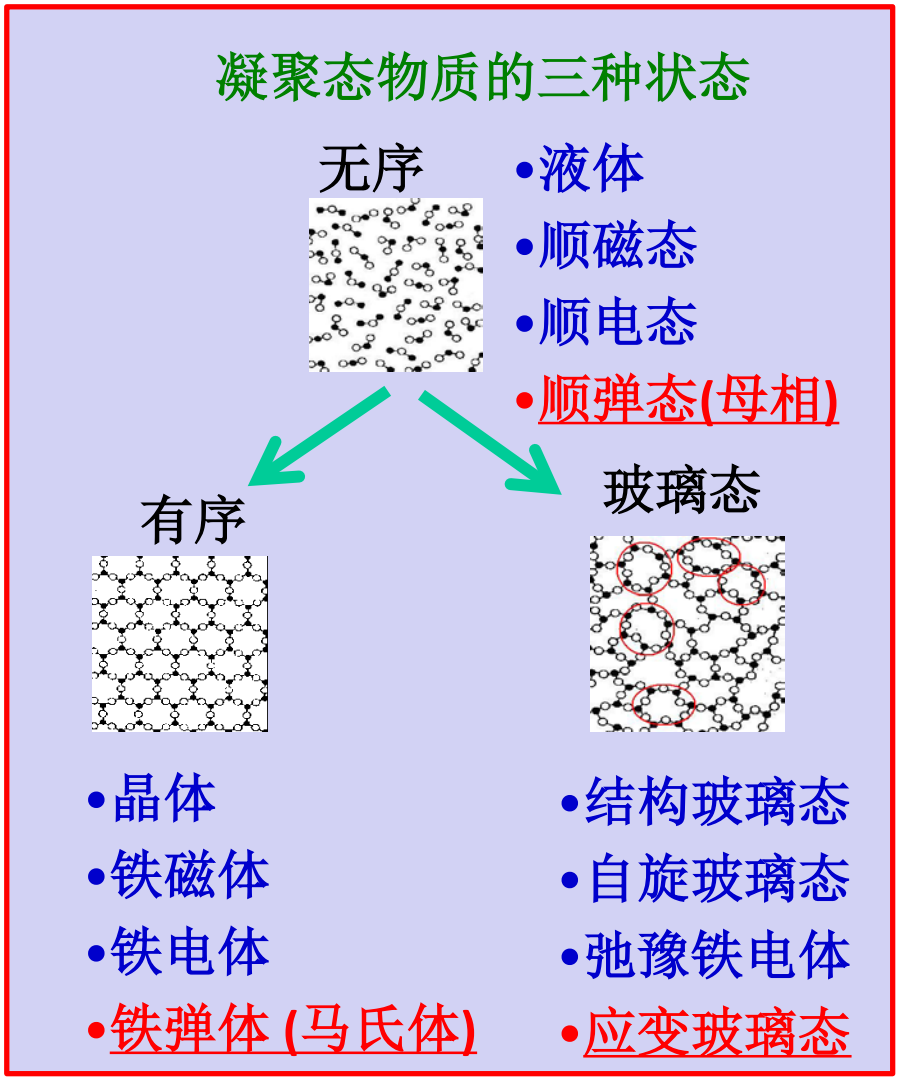
人工拉制的硅单晶

红宝石(Al_2O_3晶体中掺有少量的铬离子Cr^{3+})

(2)非晶体

原子(离子或分子)的排列没有一定的周期性的固体称为非晶体，又称为非晶态。其结构是长程无序而短程有序。

例如：玻璃、塑料、橡胶和人工生产的非晶态金属材料。

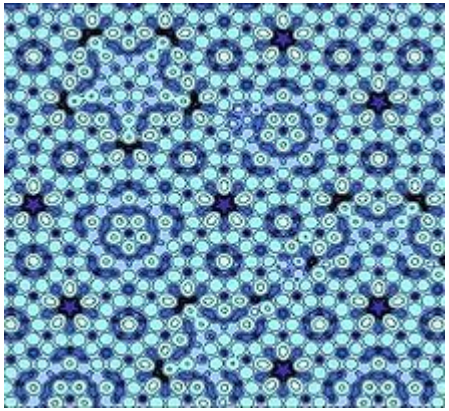


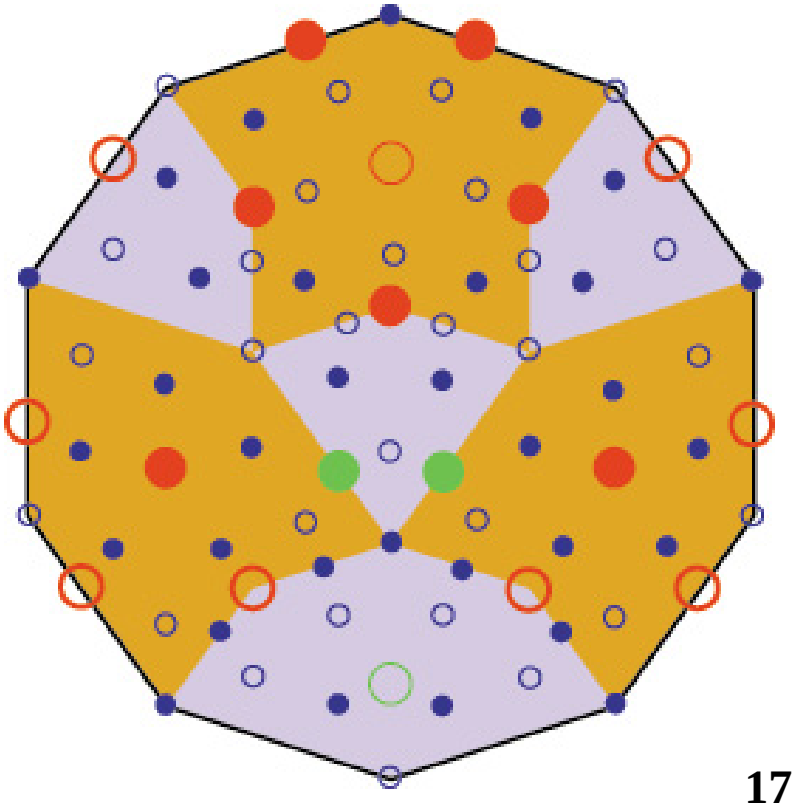
(3)准晶体

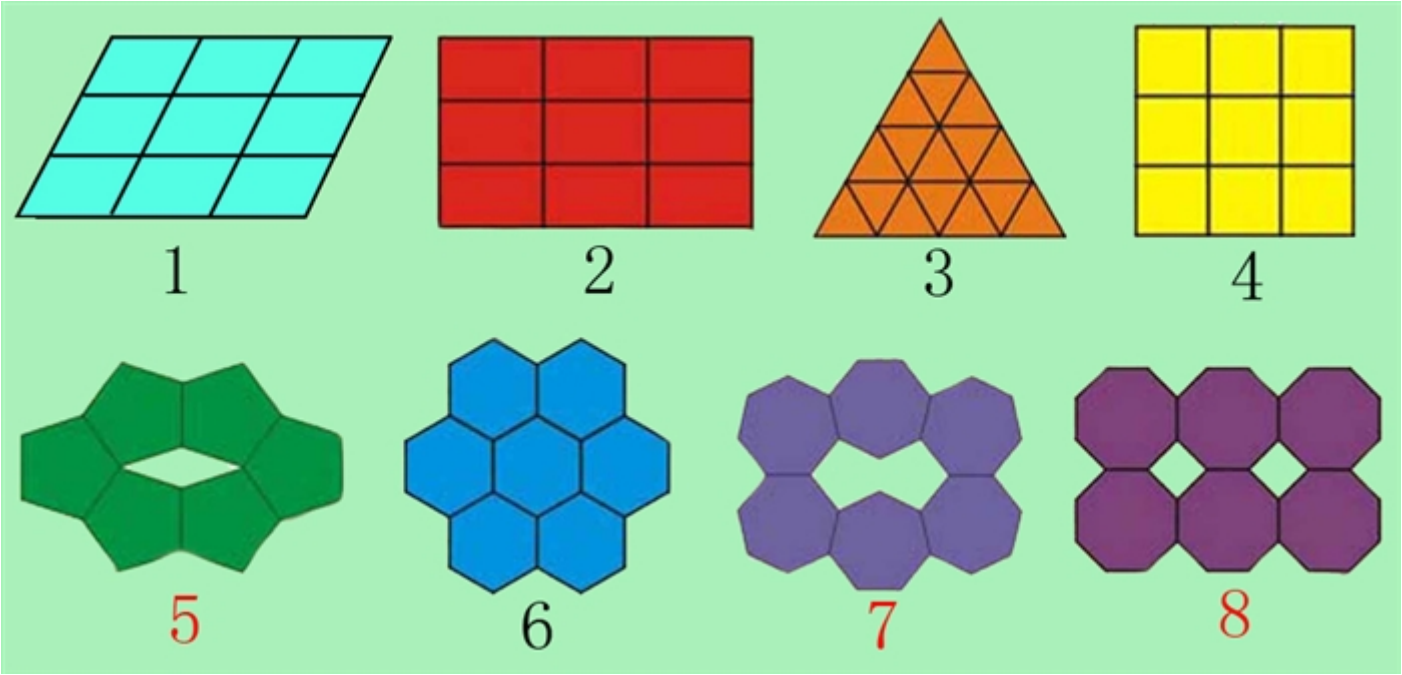
1984年Shechtman用快速冷却方法制备的AlMn合金

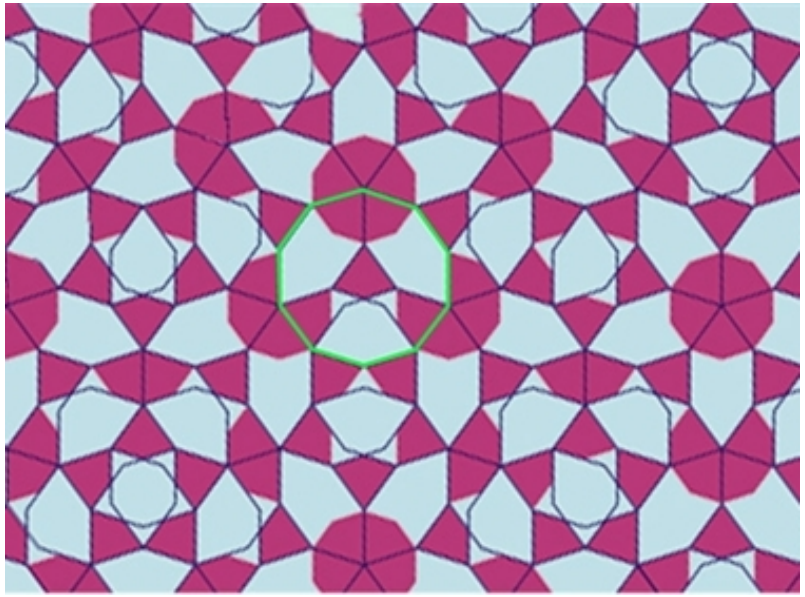
—— 电子衍射图中具有五重对称的斑点分布

—— 介于晶体和非晶体之间的新的状态 — 准晶态






1
2
3
4
5
6
7
8



二、固体物理的发展过程

1.晶体规则的几何形状和对称性与其它物理性质之间有一定联系;晶体外形的规则性是内部规则性的反映。

2.十七世纪惠更斯以“椭球”堆积的模型来解释方解石的双折射性质和解理面。

3.十八世纪，阿羽依认为晶体由一些坚实、相同的平行六面形的小“基石”有规则地重复堆集而成的。

4.十九世纪中叶，布拉菲发展了“空间点阵”学说概括了晶格周期性的特征。

5.二十世纪初特鲁德和洛伦兹建立了经典金属自由电子论，对固体认识进入一个新的阶段。

6.特鲁德—洛伦兹模型成功的解释了描述晶体比热的杜隆一珀替定律。

7.十九世纪末叶，费多洛夫，熊夫利、巴罗等独立地发展了关于晶体微观几何结构的理论体系，为进一步研究晶体结构的规律提供了理论依据。

8.1912年，劳厄指出晶体可以作为**X**射线的衍射光栅。

9.量子理论发展正确描述了晶体内部微观粒子运动过程。

10.爱因斯坦引进量子化的概念来研究晶格振动。

11.索末菲在金属自由电子论基础上，发展了固体量子论。

12.费米发展了统计理论，为以后研究晶体中电子运动的过程指出了方向。

13.二十世纪三十年代，建立了固体能带论和晶格动力学。

14.固体能带论说明了导体与绝缘体的区别，并断定有一类固体，其导电性质介于两者之间—半导体。

15.20世纪四十年代末，以诸、硅为代表的半导体单晶的出现并制成了晶体三极管—产生了半导体物理。

16.1960年诞生的激光技术对固体的电光、声光和磁光器件不断地提出新要求。

三、固体物理的学科领域

1.高纯度的完整晶体、杂质、缺陷对金属、半导体电介质、磁性材料以及其它固体材料性能的影响。

2.一般条件下金属、半导体、电介质、磁性物质等材料的各种性质。

3.强磁场、强辐射、超高压、极低温等特殊条件下材料表现出的各种现象。

4.探索新材料和设计新器件。

5.发展制备材料和器件的新工艺和新理论。

6.固体物理学负担着重多的理论课题。

7.超导理论、多体理论、非晶态理论、表面理论、光与物质相互作用等。

固体物理领域

强关联物理
固体光谱
固态光电子学
固态电子学
超导体物理
固体发光
液晶物理
电介质物理
磁学
晶体物理　纳米物理
半导体物理　介观物理
金属物理　表面物理

四、固体物理的研究方法

固体物理是一门实验性学科—为阐明固体表现出的现象与内在本质的联系，建立和发展关于固体的微观理论。

固体是一个复杂的客体—每一立方米中包含有约10^{29}个原子、电子，而且它们之间的相互作用相当强。

固体的宏观性质—就是大量粒子之间的相互作用和集体运动的总表现。

1.根据晶体中原子规则排列的特点，建立晶格动力学理论，引入声子的概念，阐明了固体的低温比热和中子衍射谱。

2.金属的研究 —— 抽象出电子公有化的概念，再用单电子近似的方法建立能带理论。

3.物质的铁磁性 —— 研究了电子与声子的相互作用，阐明低温磁化强度随温度变化的规律。

4.超导的理论 —— 研究电子和声子的相互作用，形成库柏电子对，库柏对的凝聚表现为超导电相变。

五、如何学习固体物理

- 个人因素：学会分享科学带来的快乐，而不是应付考试，拿学分。
- 学习思路：

  宏观性能 ⟷ 微观解释
- 学习工具：

  （1）晶体对称性

  （2）量子力学和统计力学

  （3）傅里叶变换

近红外（14000-4000cm^{-1}），中红外（4000-400cm^{-1}）和远红外（400-10cm^{-1}）光谱波区

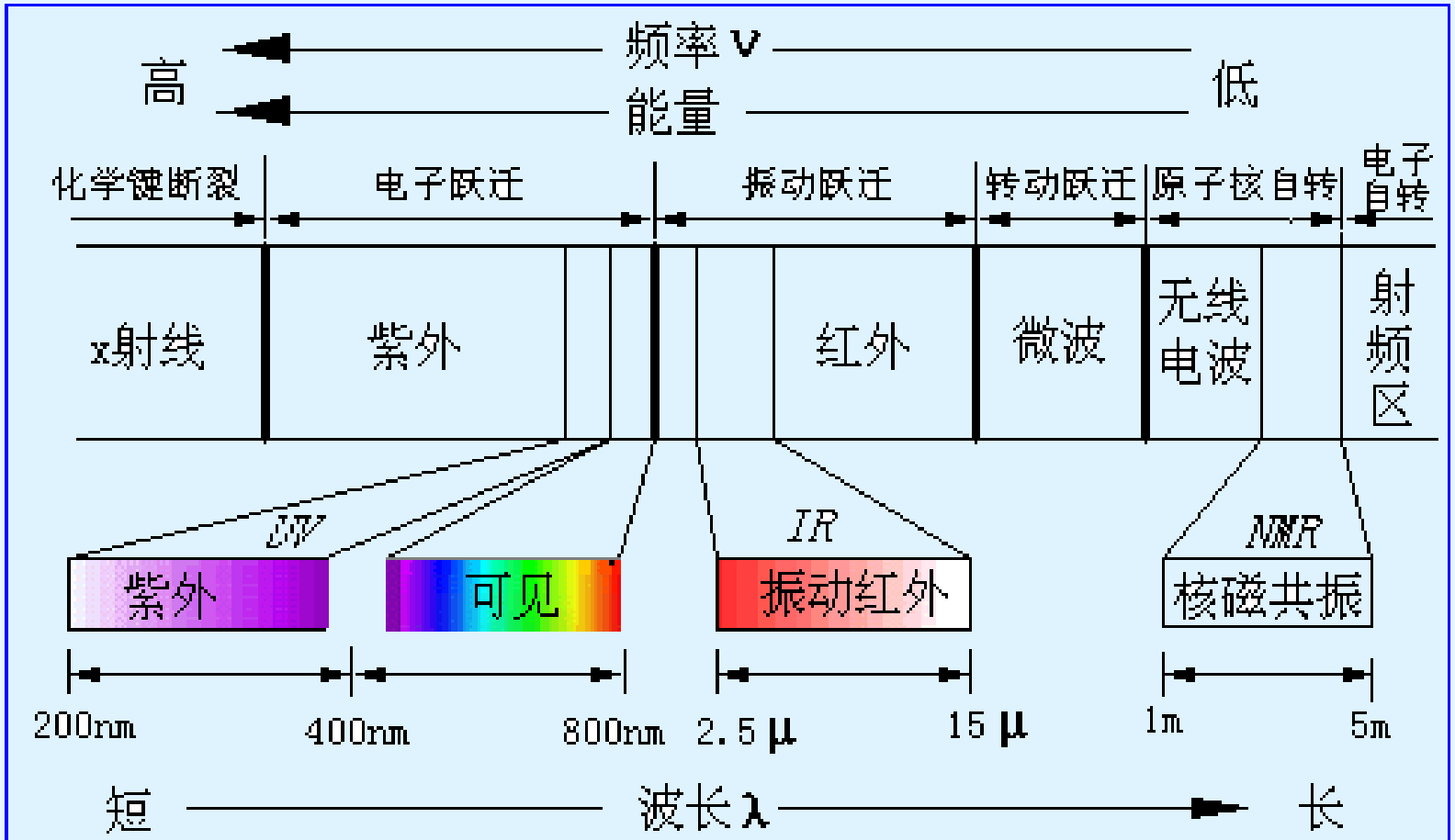
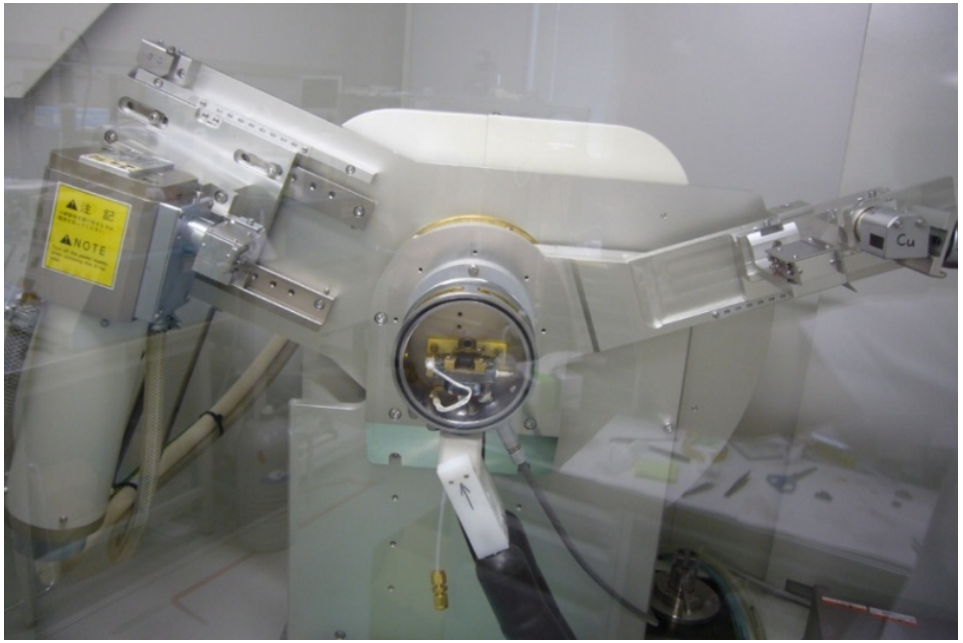
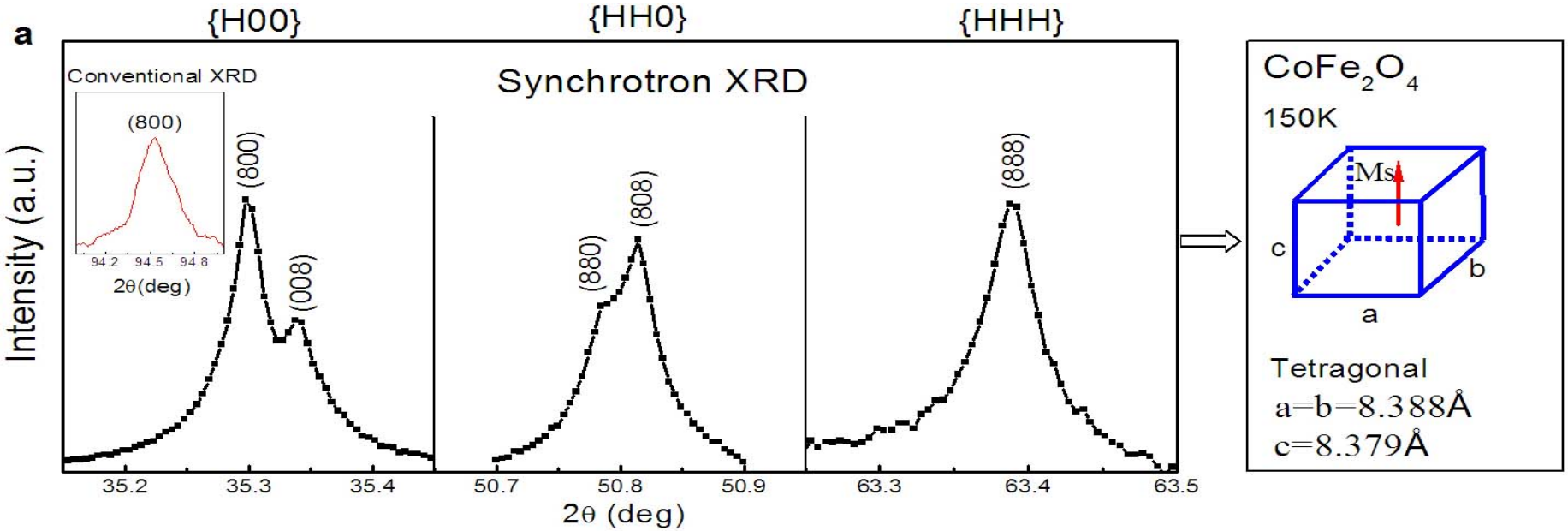


图10—1 光波谱区及能量跃迁相关图

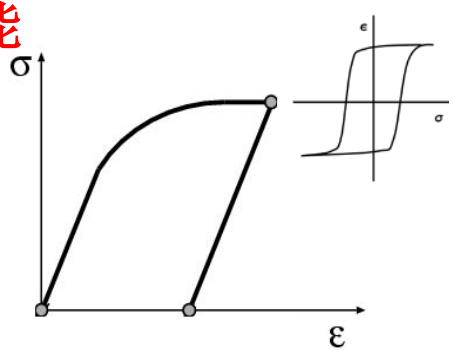


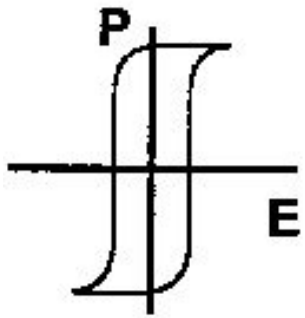

a
{H00}
{HH0}
{HHH}
Conventional XRD
(800)
94.2
94.5
94.8
2θ(deg)
Synchrotron XRD
(800)
(008)
(880)
(808)
(888)
Intensity (a.u.)
35.2
35.3
35.4
50.7
50.8
50.9
63.3
63.4
63.5
2θ (deg)
CoFe2O4
150K
Ms
c
b
a
Tetragonal
a=b=8.388Å
c=8.379Å

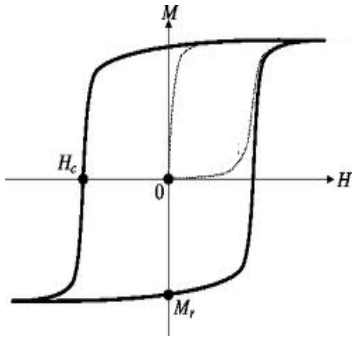
三类智能材料可能具有共同物理基础

宏观

性能

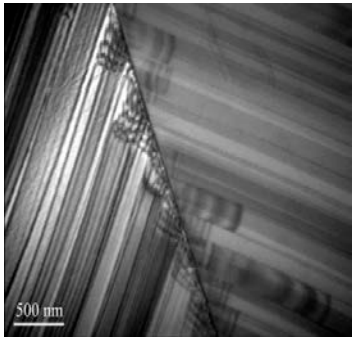


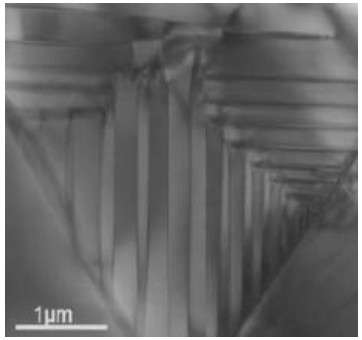


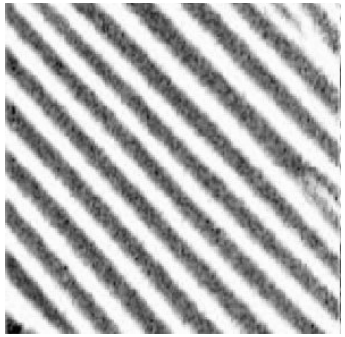


介观

畴

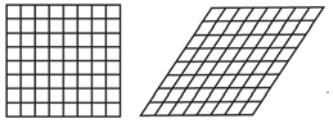


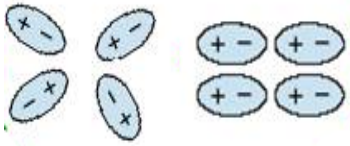


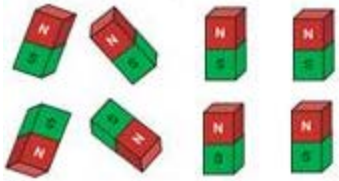


微观

序参量+缺陷







铁弹/马氏体　　铁电体　　铁磁体

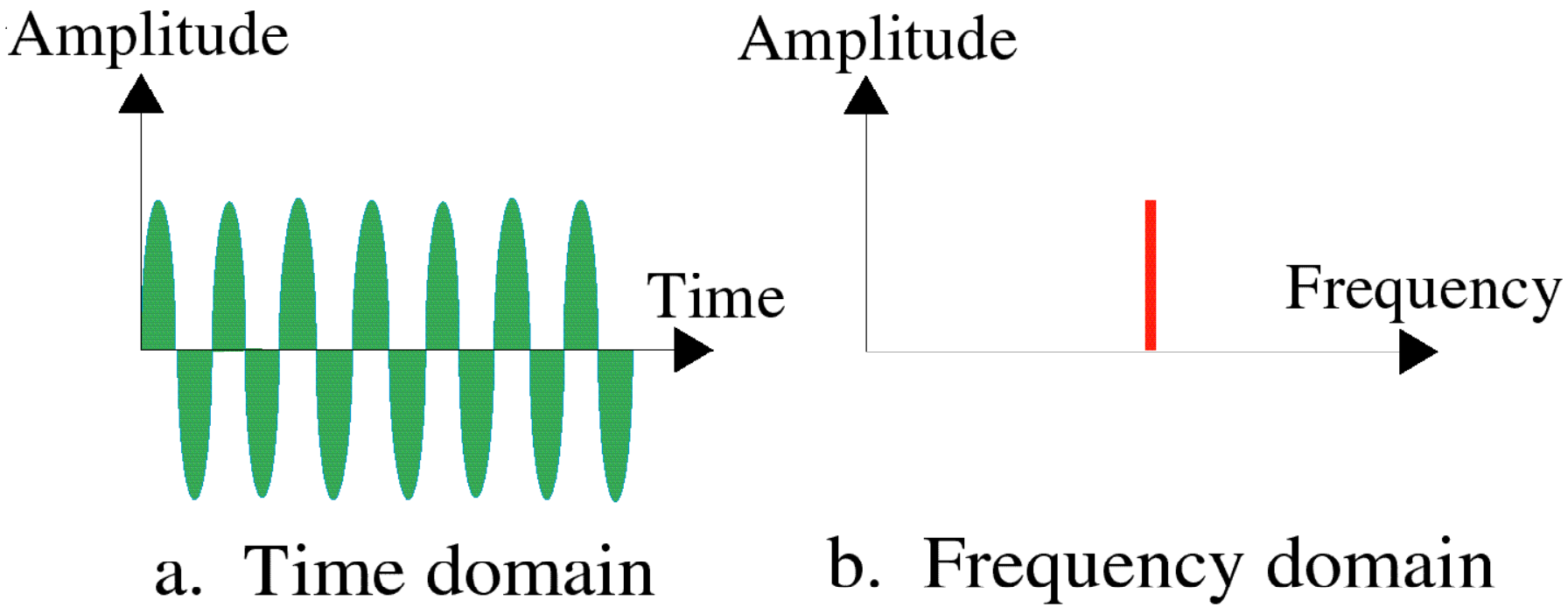
定态薛定谔方程

$$\nabla^2\psi(\vec{r})+\frac{2m}{\hbar^2}(E+\frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 r})\psi(\vec{r})=0$$

$$\boldsymbol{\psi(r)=e^{ikr}}$$

傅里叶变换

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t)$$



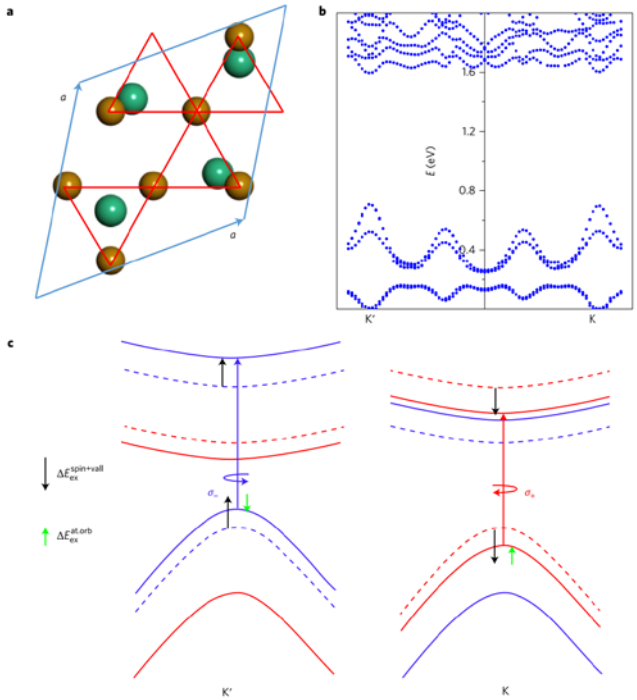
a. Time domain　　b. Frequency domain

科研论文示例01

nature nanotechnology
LETTERS
PUBLISHED ONLINE: 1 MAY 2017 | DOI: 10.1038/NNANO.2017.68

Enhanced valley splitting in monolayer WSe_2 due to magnetic exchange field

Chuan Zhao[1], Tenzin Norden[1], Peiyao Zhang[1], Puqin Zhao[1,2], Yingchun Cheng[2], Fan Sun[1], James P. Parry[1], Payam Taheri[1], Jieqiong Wang[3], Yihang Yang[4], Thomas Scrace[1], Kaifei Kang[1,3], Sen Yang[3], Guo-xing Miao[4], Renat Sabirianov[5], George Kioseoglou[6], Wei Huang[2], Athos Petrou[1] and Hao Zeng[1,3]*



关于谷劈裂增强效应的研究：

利用源自铁磁EuS基底的界面磁交换场，在单层WSe2中获得了极大增强的谷劈裂效应，并通过磁性绝缘体的磁交换场在单层过渡金属二硫化物中获得了磁有序、谷极化以及自旋极化，关于谷自由度的研究对于未来电子器件的信息存储具有重要意义。

科研论文示例02

PRL **104,** 197201 (2010) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 14 MAY 2010

Large Magnetostriction from Morphotropic Phase Boundary in Ferromagnets

Sen Yang,[1,2] Huixin Bao,[2] Chao Zhou,[2] Yu Wang,[2] Xiaobing Ren,[2,*] Yoshitaka Matsushita,[3] Yoshio Katsuya,[3] Masahiko Tanaka,[3] Keisuke Kobayashi,[3] Xiaoping Song,[1] and Jianrong Gao[4]

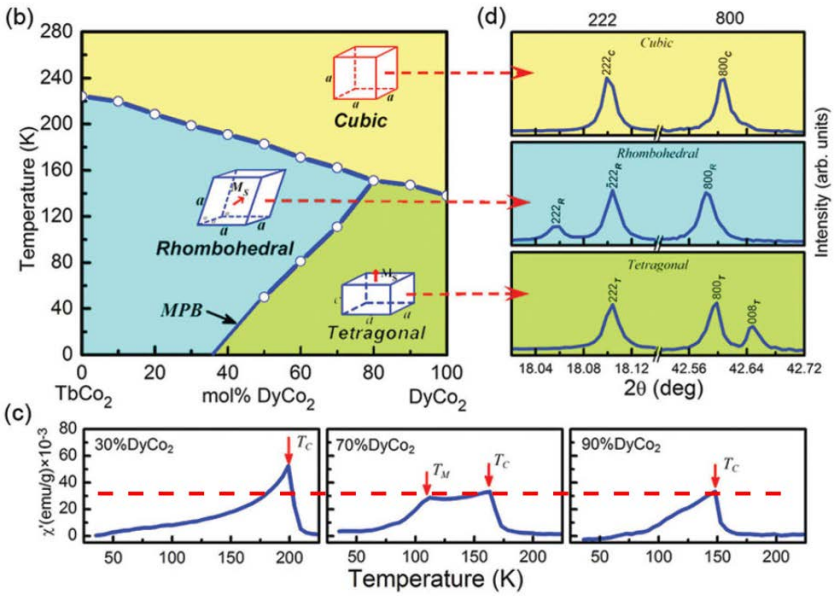
[1]*Multi-disciplinary Materials Research Center, Frontier Institute of Science and Technology, State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, and MOE Key Laboratory for Nonequilibrium Synthesis and Modulation of Condensed Matter, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*

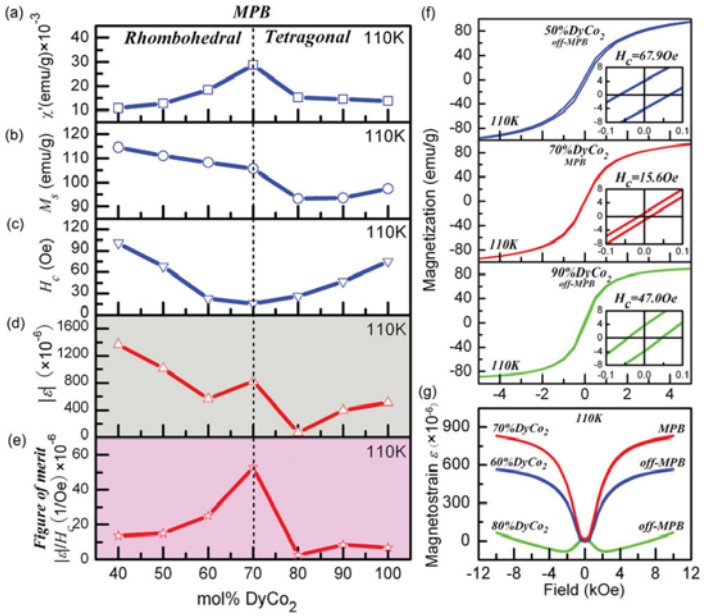
[2]*Ferroic Physics Group, National Institute for Materials Science, Tsukuba 305-0047, Ibaraki, Japan*

[3]*National Institute for Materials Science, Beamline BL15XU, Spring-8, 1-1-1 Kohto, Sayo-cho, Hyogo 679-5148, Japan*

[4]*Key Lab of Electromagnetic Processing of Material, Northeastern University, 3-11 Wenhua Road, Shenyang 110004, China*

(Received 23 October 2009; published 11 May 2010)





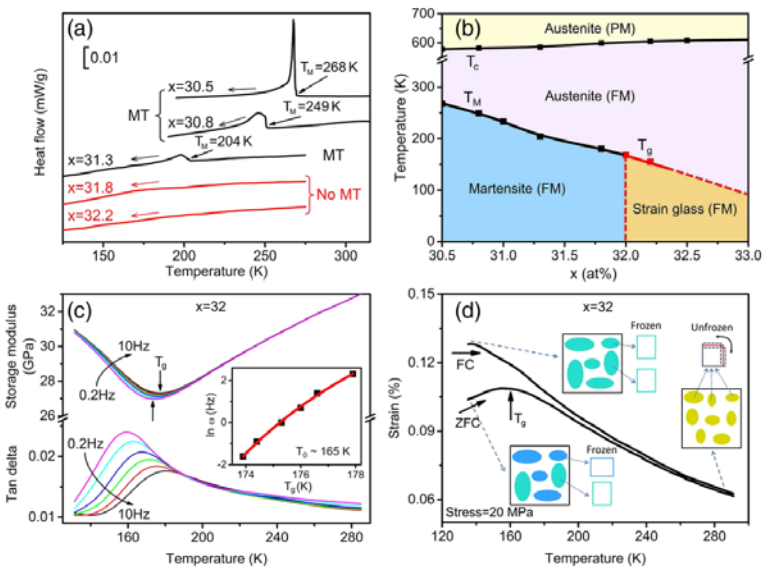
通过构建准同型相界，获得大响应磁性功能材料。

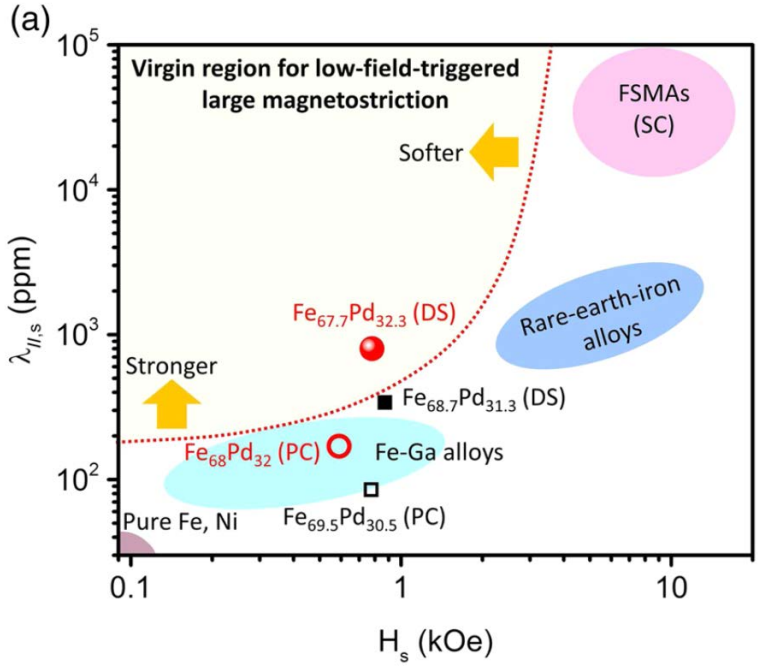
科研论文示例03

PRL 119, 125701 (2017) PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 22 SEPTEMBER 2017

Low-Field-Triggered Large Magnetostriction in Iron-Palladium Strain Glass Alloys

Shuai Ren,[1] Dezhen Xue,[1] Yuanchao Ji,[1] Xiaolian Liu,[2] Sen Yang,[1,*] and Xiaobing Ren[1,2,†]
[1]*Frontier Institute of Science and Technology, and MOE Key Laboratory for Nonequilibrium Synthesis and Modulation of Condensed Matter, and State Key Laboratory for Mechanical Behavior of Materials, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China*
[2]*Ferroic Physics Group, National Institute for Materials Science, Tsukuba, 305-0047 Ibaraki, Japan*
(Received 23 May 2017; revised manuscript received 26 July 2017; published 22 September 2017)





通过元素掺杂的方式，在铁磁材料中诱发玻璃态，获得低场大响应磁弹材料。

教材

《固体物理学》，黄昆 原著，韩汝琦 改编，高等教育出版社。

参考书

1. 《固体物理学》，（上册）：方俊鑫、陆栋 主编，上海科学技术出版社。
2. 《固体物理基础》，阎守胜 编著。北京大学出版社出版。
3. 《Introduction to solid state physics》, Kittel
4. 《固体物理学》，陆栋 蒋平 徐至中 编著 上海科学技术出版社

授课内容与学时

章	内　　容	参考学时
第一章	绪论	2
第二章	晶体结构	8
第三章	固体的结合	4
第四章	晶格振动与晶体的热学性质	8
第五章	能带理论	10
第六章	晶体中电子在电场和磁场中的运动	4
第七章	金属电子论	4
第八章	半导体电子论	2
第九章	晶体中的缺陷与扩散	2
	习题课	2
	专题讲座	2
合　计		48

学习成绩组成：

1、平时成绩：占20%。

主要包括：出勤、作业、课堂回答问题、课堂纪律。

2、期末考试成绩：占80%。

3、科研训练：鼓励

National Weather Service
Norman, Oklahoma