

高性能稀土永磁体的研究

2014年9月，中国绵阳

- 美国近期的研究工作动向
- 稀土永磁材料的近年研究工作
- 纳米结构的意义
- 制备实用复合纳米磁体的技术困难和可能的应对措施
- 稀土永磁材料的历史发展和未来展望

美国近期的研究工作动向

背景

□ 应用的需求

- 高性能稀土永磁体在包括国防、交通、通讯、信息等诸多产业的不可或缺
- 各种设备向使用更多电力的发展趋势
 - 航空器
 - 车 辆
 - 舰 船
- 清洁能源和绿色技术的需要
 - 混合动力车
 - 全电力车
 - 风力发电

□ 稀土供应的趋势

- 中国掌控全世界95%的稀土生产
- 近年来中国的稀土出口减少了~50%

高性能、无稀土永磁材料研究的投资

- 国家科学基金会 (NSF)
- 国防部 (DoD)
- 能源部 (DoE)
 - ARPA-E (Advanced Research Project Agency - Energy)
 - **REACT**—Rare Earth Alternatives in Critical Technologies 关键技术中稀土的替代材料 \$31.6 million
 - 目标：发展稀土永磁材料中**稀土的替代材料**
 - **14个课题，3千1百60万美元**，每个课题的经费额为40万至340万美元

REACT课题 1 - 4

- 1. Case Western Reserve University
“向无稀土氮化物磁体的过渡”

将利用铁-氮合金的微合金化 (micro-alloying) 以达到发展为电机应用的新的不含稀土的磁体之目的

- 2. Dartmouth College
“纳米晶 τ -MnAl 永磁体”

将研究制备大块纳米晶锰-铝磁体的工艺

- 3. University of Houston
“用于高能风力发电机的高性能、低成本超导导线和线圈”

- 4. Northeastern University

“在不同规模下发展不含稀土的L10材料”

在陨石中存在一种独特的自然形成的铁-镍晶体结构。我们将应用先进的制备技术用人工方法产生这种磁性材料结构，以在不同规模的状态展示大块磁体的磁性能

REACT课题 5 - 7

□ 5. QM Power

“少用或不用稀土的高级电动车辆”

我们将发展一种不用稀土材料的重量轻、体积小、高效能、低价格的电机。其关键的创新包括新的电机设计、使用新材料、以及降低成本的先进制作技术

□ 6. Pacific Northwest National Laboratory

“在200°C具有40 MGOe的锰基磁体”

将利用锰发展一种复合材料，其磁性具有两倍于现在使用的材料的潜力。其方法为结合高性能超级计算机的模型处理及制备各种不含稀土的金属复合材料

□ 7. University of Alabama

“用于电气车辆的电机及风力发电机的无稀土永磁体：基于六方晶体对称性的Mn-Bi和M-型六方铁氧体”

将展示新的复合磁性材料的优越磁性能

REACT课题 8 - 11

□ 8. Argonne National Laboratory

“用于电动机和发电机的纳米复合交换耦合磁体”

将创制基于金属复合材料的新型永磁体。这种磁体的设计包含镶嵌在取向基体中的极小颗粒

□ 9. Brookhaven National Laboratory

“用于直接驱动风力发电机的超导导线”

□ 10. Baldor Electric Company

“用于电气车辆的无稀土牵引电机”

发展用于驱动下一代电气车辆的新型电机。关键创新包括电机冷却系统的独特设计以及高端材料的生产技术

□ 11. General Atomics

“双定子开关磁阻电机技术”

REACT课题 12 - 14

□ 12. Virginia Commonwealth University

“使用非战略元素并具有供应保障材料的新型永磁体的发现和设计”

将展示以碳化物为基的新型复合永磁体

□ 13. University of Minnesota

“体心四方亚稳Fe-N各向异性纳米复合磁体的制备及相稳定性的研究 - 制作无稀土磁体的一个途径”

本课题是发展大块铁-氮永磁材料的早期工作

□ 14. Ames Laboratory

“不含稀缺元素的新型高磁能永磁体”

发展新型Ce基合金的永磁体。Ce的储量是Nd的四倍。

Northeastern University (东北大学)

- 目标：制备无稀土磁体，其磁性介于铁氧体和烧结稀土磁体之间
- 磁性要求：在 180°C $(\text{BH})_{\text{max}} > 12 \text{ MGOe}$
- 途径：研究Fe-Ni四方相的 L10-型晶体结构以及添加间隙原子的L10-型 MnAl-基系统

明尼苏达大学

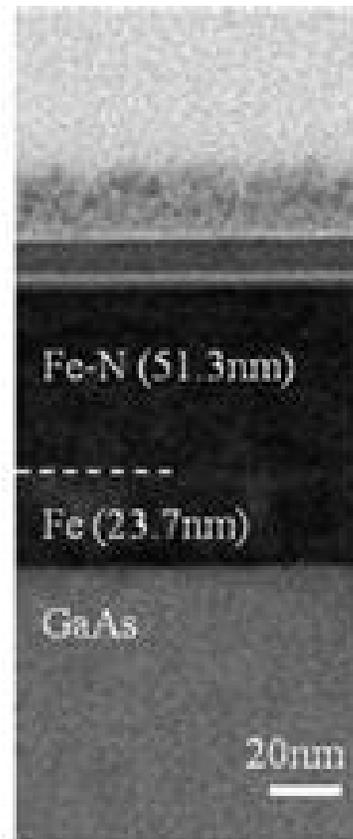
□ Dr. Jian-Ping Wang

- 兰州大学 (BS, MS); 中科院物理所 (Ph. D. 1995)
- Telephone: 612-625-9509; E-mail: jpwang@umn.edu
- [Eric Hockert](#), Technology [Marketing Manager](#) 612-624-9568

□ 铁-氮永磁体，代替稀土和钕磁体

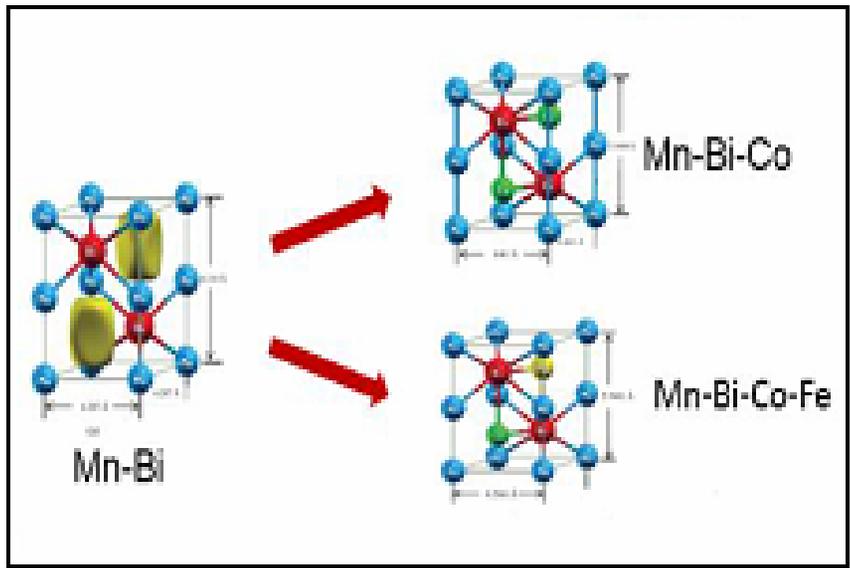
□ Fe_{16}N_2 的理论最大磁能积可达 130 MGOe

□ 以前的工作只能制备粉末或薄膜。首次制备出适于多种应用的块状材料，工艺过程与先有大生产相适应，铁、氮原料价廉，磁体的磁性超过稀土磁体。



阿拉巴马大学

- 无稀土永磁体
- 发明人：Dr. Yang-Ki Hong
 - Email: ykhong@eng.ua.edu; Phone: 348-7268
- 传统 Mn-Bi 永磁体 + 第三元素 : Cobalt (Co) 或 Co-iron (Fe) 对
- 优点
 - 能够用较廉价的合金取代稀土磁体
 - 比稀土永磁具有低的磁晶各向异性
 - 可沿不同方向进行磁化
 - 避免在永磁工业上对中国的依赖



Ames 实验室

- R. William McCallum
 - 515-294-4736; mccallum@ameslab.gov
- 目标：发展以 Ce-TM 为基的永磁体，其居里温度高于300 °C，剩磁超过10kG，矫顽力超过10 kOe
- 任务
 - 添加**间隙原子**的 Ce-TM 永磁材料 (GM)
 - 使用**置换原子**的Ce-TM 永磁材料 (Ames)
 - 交换耦合的纳米结构 $(\text{Ce}_{1-x}\text{Nd}_x)_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (Ames)
 - 间隙原子及置换原子 Ce-TM 永磁材料的理论评估 (Ames)

使用Ce的优缺点

□ 优点

- Ce 并不短缺
- Ce 的储量是Nd 和 Pr的总和的4倍
- 美国Molycorp稀土储量中的50%是 Ce
- Ce 在稀土市场中是过剩的

□ 缺点 （与Nd-TM 或Pr-TM相比较）

- 居里温度下降 25%
- 饱和磁化强度显著减低
- 低的磁晶各向异性导致低的矫顽力

电子能量公司 (EEC) / 石溪大学 (DoD STTR)

- 新的无稀土高性能永磁体
- 目标：发展下一代具有高磁能、高热稳定性、良好机械性能、无稀土的永磁体
- 途径：
 - 新的单相 Mn-Bi-X
 - 纳米复合 Mn-Bi-X/Fe 或 Mn-Bi-X/FeCo
- 预期结果
 - 新的单相 Mn-Bi-X: $(BH)_{\max} > 17 \text{ MGOe}$, 优于现在最佳 Alnico 的磁性 (10 MGOe)
 - 纳米复合 Mn-Bi-X/Fe 或 Mn-Bi-X/FeCo : $(BH)_{\max} > \sim 70 \text{ MGOe @177C}$, 优于现在最佳 Fe-Fe-B 磁体的室温磁性 (52 MGOe)

【附】日本永磁科研动向

- 北海道大学/东京理科大学，下一代无稀土电机的研发，铁氧体永磁电机/开关磁阻电机
- 大阪府立大学，高性能无稀土磁阻力矩电机的研发，同步磁阻电机
- 东海大学/名古屋理工学院，汽车用无稀土电机的研发
- 三菱电气，下一代汽车用高性能电机
- 大金，利用晶界扩散降低稀土磁体中的 Dy 含量
- TDK，发展少用 Dy 的磁体
- 日立，少用稀土金属的高效工业用永磁电机
- 丰田，无 Dy Nd-Fe-B 磁体

对 REACT 课题的评估

- 在无稀土永磁体中取得类似稀土永磁的磁性能是非常困难的
- 在未来无稀土永磁体以及廉价稀土永磁体中发展能够与Sm-Co 以及 Nd-Fe-B磁体相匹敌的实用磁体的可能性很低
- 中、远期的研究工作应当重视在三元 R-T-M 中寻求新相的基础工作以及原子间距对磁性能的影响