

千 T 量级。磁通压缩法的缺点是，磁通压缩的部件会被破坏，每次实验之后必须更换部件。

非破坏性的百 T 以上的磁场可以借助等离子体焦点来实现。在等离子体聚焦期间，捕获在等离子体中的磁通被快速压缩，从而得到很高的场强。日本学者曾原理性地演示了利用等离子体焦点产生的 14T 磁

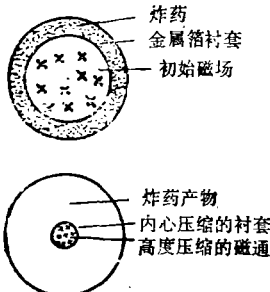


图 3 使金属箔衬套爆聚来实现的磁通压缩

场，并以此做了物性研究。下一代超强磁场可能利用等离子体焦点或激光压缩空心球等方法来实现。

二、强磁场的应用

1. 半导体研究：利用较强的磁场，能在适当的温度和浓度条件下通过冻结低朗道能级聚居中固有的动能来观察向较低维数的跃迁；研究磁性半导体的电子结构；试验有效质量近似；研究浅杂质态和深杂质态的 Zeeman 分裂等。

2. 材料研究：研究在通常的金属研究中很难进行的研究课题，例如由电子驱动的相变，钾中的电荷密度波，外来金属的电子结构以及浓缩的二元合金等。在强场条件下还可研究：强场超导性；冶金相变。在地球物理领域可研究由磁场引起材料的温度和压强的变化。借助核磁共振方法可研究与材料机械强度有关的各种成核现象。

3. 低温物理：在强磁场条件下，自旋排列的氢的玻色凝聚和液 He^3 A 相的铁磁矩的两个相变成可能，这在通常条件下是无法观察得到的。

4. 化学研究：强磁场有助于：理解在凝聚相中的复杂反应；确定分子中的原子动力学行为和分子形成期间原子的动力学因素；高激发态的电子结构。

5. 生物研究：较强磁场（例如 75T）有助于获得高分辨率的核磁共振，由此可研究：转移核糖核酸（RNA）的溶液结构；核糖核酸的热褶皱和热伸展；蛋白质抗原-抗体的相互作用；细胞膜类脂物相互作用；组织和核酸的相互作用；酶酪化物集合等等。

6. 磁量子电动力学：利用强磁场和高能电子，可比较精密地检验量子电动力学而无需计算许多其它非电动力学效应。

7. 原子分子光谱：可以研究蔡曼能量和库伦能量在可比较时高里德堡运动的斯塔克效应的线型，反交叉现象的观察以及碰撞动力学过程。

8. 金属氢的研究：利用 TNT 炸药作为磁通压缩的能量源，获得 1KT 的超强磁场，从而可获得极高的压强。实验报道，氢气在 200GPa (2M bar) 压强下密度约为 $1.06g/cm^3$ ，在此条件下氢气变成了导体。

固体离子学概述

薛荣坚

固体离子学是研究固体中离子行为及其相关应用的科学。它是在七十年代才兴起的新学科。内容包括快离子导体（又叫固体电解质），混合导体（又称电极材料）和它们的应用。它是物理、化学、材料、器件的交叉学科，因而引起广泛领域的科学家和工程师的兴趣和关注。自然界的固态材料依据其导电能力来分类可分为导体、半导体和绝缘体。在不特别指明电荷载流子的情况下，这种分类都是相对于电子（或空穴）的导电能力而言的。而本文涉及的这一类固态材料的电导是全部或者一部份是由离子传导决定的。前者是离子导体，后者是离子-电子混合导体。对离子传导溶液的研究已有很长的历史，化学家们把这类溶液叫做电解质溶液。他们给离子导电的固体材料也起了一个类似的名字叫做固体电解质。下面就其内容的三个主要方面作一简要叙述。

一、快离子导体

顾名思义，快离子导体指的是离子电导率较高的一类固体材料，确切地说其离子电导与溶液的最高电导接近，而电子电导比离子电导应小两个数量级以上。例如作者及同事们研究过的 $Rb_xCu_{1-x}F_2Cl_2$ ，其室温电

9. 受控热核聚变研究：在磁约束受控热核聚变装置（例如托卡马克、反场收缩等等）中的高温等离子体，都是通过由各种线圈产生的磁场组成所要求的磁场位形来约束的。

10. 工业应用：利用脉冲强磁场产生的巨大磁力，可将金属件压成各种形状，对金属工件进行加工。这是强磁场在工业上的典型应用。

11. 国防工业应用：利用电流和磁场的相互作用力，可使物体瞬间获得高速，其速度远远超过现有炮弹的速度，因而射程可以很远，这就是所谓的电磁炮或轨道炮。

由此可以清楚地看到，强磁场不仅是许多基础学科的重要实验条件，而且还与工业生产和国防工业密切相关。

导率为 $0.34-0.44(\Omega\text{cm})^{-1}$, 是真正的室温铜的快离子导体。RbAg₄I₅ 中银的电导率也有类似的值 ($0.3\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$, 在 30°C)。它们的高电导率都是因为材料发生相变后离子处在高无序态, 迁移激活能很小的原故。除了与这两种材料结构相近的银、铜离子导体在室温下具有高电导率外, 其余绝大多数离子导体只有在较高的温度下才有较高的离子电导率, 才算得上快离子导体。例如, $\text{ZrO}_2 + 12\text{mol}\text{CaO}$, 1000°C 时是氧的快离子导体 ($0.8\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$), 室温下几乎不导电。从快离子导体作为电池隔膜的应用角度出发, 人们将它和液体电解质溶液的作用等同起来, 称它为固体电解质。然而这样称呼它实际上已经将快离子导体扩展到普通离子导体。例如 $\text{LiI}(40\text{mol}\% \alpha\text{-Al}_2\text{O}_3)$ 是心脏起搏器电池的隔膜, 它的室温电导率比较低仅为 $1 \times 10^{-7}\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 。但目前科学家们仍喜欢用固体电解质这个名词。

固体电解质从化学上分类有无机的, 有机的, 高分子聚合的。从结构的大类别来看可分为晶态和无定形(非晶态)两类。晶态的多数属开放型结构, 也就是说结构中有允许离子迁移的通道, 这些通道有一维的(如 $\text{K}_x\text{Mg}_{1-x}\text{Ti}_{1-x}\text{O}_6$), 二维的(如 $\text{Na-B-Al}_2\text{O}_3$)和三维的(如 $\text{Li}_x\text{Zn}(\text{GeO}_4)_2$)。无定形材料中的离子迁移与液体中的离子扩散比较接近。因为无序固体与液体都是无定形结构。无定形材料只有玻璃转变温度 T_g , 不存在有序-无序的相变。由于某些玻璃态固体电解质的电导率远高于它们的晶态的电导率, 如 LiNbO_3 高约 20 个数量级; 因此玻璃态固体电解质材料也引起人们的很大兴趣。1985 年法国波尔多实验室研制出锂离子电导率在室温下最好的硫系锂玻璃 $\text{B}_2\text{S}_3\text{-Li}_2\text{S-LiI}$, 其最佳组分的电导率可达 $10^{-3}\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ 。随后物理所固体离子学实验室也成功地合成了这种玻璃。

近年来高分子聚合物电解质更具有吸引力, 这不仅是因为它的锂离子电导在室温下可接近 $10^{-4}\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$, 而且是由于它易成膜, 富弹性; 更便于在电池中应用。

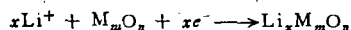
从导电离子的种类来区分固体电解质, 可分为阳离子导体和阴离子导体两类。到目前为止, 研究较多的阳离子导体主要指 Ag^+ , Cu^+ , Li^+ , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , H^+ 或 H_3O^+ 及 Tl^+ 等一价阳离子导体和 Mg^{2+} , Zn^{2+} , Ca^{2+} 等少数二价阳离子导体。阴离子导体主要指 O^{2-} 和 F^- 离子导体。

从相构成来看, 固体电解质又可分为单相和多相(复合相)两类。起初人们研究的多是单相材料, 自从 1973 年有人提出在 LiI 中混入适量的绝缘材料 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, 可使 LiI 的电导数量级地增加以来, 多相固体电解质的研究十分活跃。物理所固体离子学组在这方面作了许多基础性的研究。发现 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3 + <5\text{wt}\% \text{C}$ 也能使离子电导增加, 甚至晶相与非晶相的混合也

使电导增大。这些都证明不论引入的第二相是绝缘体, 电子导体(如上例中引入的碳, C)还是离子晶体本身, 只要比例合适复相材料的离子电导就能增大。有人在聚合物固体电解质, PEO(聚环氧乙烷)与锂盐的复合物中引入适量 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, 使该材料的机械性能改善。因此复相固体电解质的研究引人注目。

二、混合导体

混合导体是指离子电导与电子电导的值相近的一类材料。这种双重特性使得它们能够接纳正离子和传递电子, 是电池理想的阴极材料, 或称电极材料。能够传导电子是因为这类材料中导带电子或价带空穴的浓度比较大。离子传导则是由于材料中有可供离子传输的通道。这些通道也分一维的(如 Na_xWO_3), 二维的和三维的。目前在锂电池中应用较多的是层状结构的具有二维离子传导特征的过渡金属二硫化物和钒的氧化物。例如 TiS_2 和 $\text{Li}_{1-x}\text{V}_2\text{O}_5$ 。锂离子嵌入这些材料后靠浓度差势扩散, 得到由阳极来的电子后变成原子嵌在主体材料的层间, 形成嵌入化合物, 其电极反应为:



式中 M_mO_n 泛指金属氧化物。x 值是连续可变的, 它的值的大小决定电池的容量。

三、应用

最主要的应用是固体电解质电池。根据所用电极材料的不同可以分为气体电极, 液体电极和固体电极三种类型。用气体电极的典型例子是氢氧燃料电池, 可表示为:

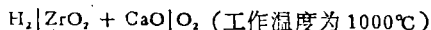


图 1 是它的工作原理示意图。左边的氧经多孔催化电极离子化。氧离子通过氧离子导体到达另一个多孔催化电极与作为燃料的氢会合, 进行氧化还原反应生成水。这时两电极间的外电路有电子流动可以提供电能。这是直接的燃料发电。它不像通常的燃料发电那样, 先燃烧

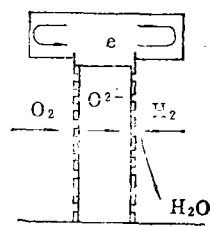
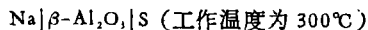


图 1 燃料电池的工作原理

变成热能, 再把热能转换成机械能然后再转换成电能。它的简单的总电池反应是氢氧结合成水。它的逆过程就是电解水制氢和氧。这种电池的中间的固体电解质可以不用 ZrO_2 , 可代之以别的氧离子导体或质子导体(即氢离子导体)使工作温度进一步降低。这方面的研究工作正在进展中。

用液体电极的典型例子是钠/硫电池, 可表示为:



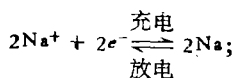
在此工作温度, Na 和 S 都是液态。它们的电极反应

现代物理知识

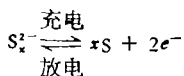
1989年 第3期

目 录

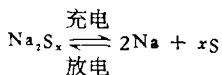
是, 负极:



正极:



总反应为:

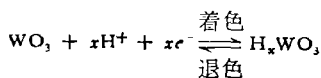


此电池的理论比能量高达780瓦时/公斤,实际上可达200瓦时/公斤左右,比铅酸蓄电池高3—4倍,是真正的高能量密度电池。中科院上海硅酸盐研究所固体电解质室多年来一直从事这方面的研究。

用固体电极可组成了结构紧密,便于小型化,长寿命的全固态电池,其中最诱人的是全固态锂电池。因为金属锂重量轻,电负性大,与正极配对可产生较高的电压。在 $20\mu\text{A}$; 2.8V 条件下工作的 $\text{Li LiI}(\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3)\text{I}$ 电池已在心脏起搏器中应用。虽然它是一次原电池但寿命可达5—10年。能够大电流放电和反复充电的二次全固态锂电池正在研制中。

除电池之外的其它器件型式的应用可以统称为固体离子器件。就功能和形态而论可以和电子元器件相比拟,但不同之点是它们的工作原理是基于离子传导和电极反应过程。对于把离子信息(如浓度、种类、电导)转换成电测量信号的场合,它能更直接准确地给出结果。根据这一原理可以设计出众多的离子器件。日本研制的离子二极管和离子记忆管已经商品化,我国1449所研制的离子定时器也已通过鉴定。各种形式的离子传感器件(对温度、湿度、特定离子等)的研究也时有报道。离子场效应管是把离子导体和半导体器件结合起来的新型器件,它可以快速测定特定离子的浓度。作者曾研究过法拉级的大容量双电层电容器,它是利用离子导体和电子导体界面形成紧密双电层的原理制作的。

近年来电色显示器的研究引起广泛的重视。以 WO_3 与 H^+ 离子导体组成的显示器为例,其工作原理如下:



施加一工作电压(小于电解质的分解电压,一般一伏左右就能工作)使离子和电子同时注入 WO_3 ,把它由无色变成兰色的 H_xWO_3 。反向加电压颜色消失又返回到 WO_3 。这种显示器件结构简单,操作方便,可望在多种场合找到应用。

对非器件型的应用也可举出若干例子,例如利用测电势来确定体系的自由能,确定相结构的固态电化学方法在基础科学研究中十分有用。

固态离子学是一新兴的学科,它的应用还有待于

(下转第8页)

等离子物理的前沿和展望.....	朱士尧 (1)
分形凝聚和物质生长模型.....	黄 驹 (3)
令人瞩目的光折变材料——钛酸钡晶体.....	
.....	朱 镛 (6)
第二届吴健雄物理奖评选工作开始.....	
.....	中国物理学会 (9)
新学说: 磁场空间分布的新概念.....	张光华 (10)
高科技领域又一重大成就	
——我国最大的重离子加速器建成出束.....	
.....	求 是 (11)
带弦的夸克.....	侯儒成 编译 (12)
GSI 效应与开罗事例.....	何景棠 (15)
光电子能谱.....	徐彭寿 编译 (17)
泡利和电子自旋.....	杨建邺 (20)
举足轻重的物理常数.....	郭奕玲 (23)
分析电镜的原理及其应用.....	刘 维 (25)
冷中子与冷中子源.....	王连璧 (27)
波动力学的创立者——薛定谔.....	沈亚先 (28)
强磁场的产生及应用.....	赵汝文 (29)
固体离子学概述.....	薛荣坚 (30)
地球磁场的分布.....	张光华 供 封面图片
中科院物理所钛酸钡实验.....	朱 镛 供 封二
电子显微镜下的物质世界.....	刘 维 供 封三
兰州重离子加速器.....	兰州近代物理所 供 封四

主 办 中国科学院高能物理研究所
编 辑 《现代物理知识》编辑部
邮政编码 100039 北京 918 信箱

主 编 黄 涛
出 版 科 学 出 版 社
北京东黄城根北街 16 号

印刷装订 中国科学院印刷厂
总发行处 北京市 邮政局
订购处 全国各 邮电局
国外总发行 中国国际图书贸易总公司
(中国 国际 书店)

北京 2820 信箱

一九八九年五月出版

国内统一刊号: CN 11-2441

时光波。图 4(a) 中, 共轭波 I_r 沿入射波 I_s 反方向传播, 而且在空间具有相同的波阵面。这样, I_r 沿 I_s 的反方向传播, 并将会聚在点光源 O 所在的位置, 如图中虚线所示。图 4(b) 为入射光波在普通反射镜上反射的情况。此时反射波为一发散的光束。

位相共轭反射镜这一现象在光学信息, 图象的实时处理中有很重要的应用价值。如果位相共轭的输出波相对于相应的输入波反向传播, 那么可用它来补偿光波或图象在传播过程中引起的位相畸变。如图 5 中所表明的那样, 入射光波通过畸变介质后, 波前遭到畸变。与普通的反射镜不同, 位相共轭反射镜使入射光

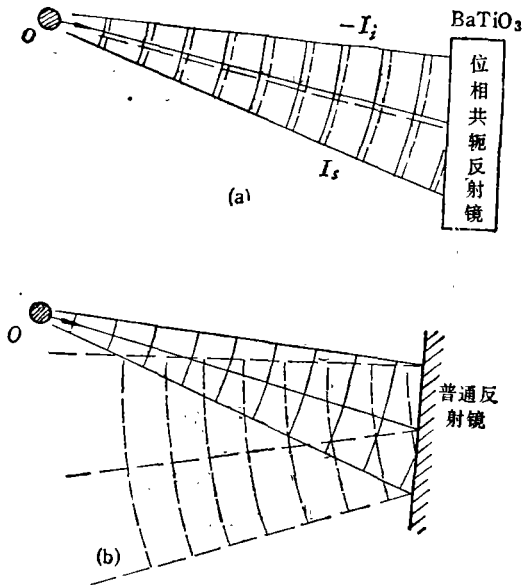


图 4

波的波前畸变在反射后被颠倒了。于是, 当此位相共轭光波反射回来再通过此畸变介质后, 原来的波前畸变就完全消除, 如图 5(b) 所示。由于位相共轭光波有消除波前畸变的效能, 因此可用它来恢复畸变的象。最早指出这一现象的费因伯格 (J. Feinberg) 教授曾生动地展示了经畸变处理过的他自己喂养的 7 只猫的照片, 图象中甚至连猫的胡须都清晰可辨。位相共轭镜也因此得了一个别名: “猫镜”。

其它应用前景

对弱光学信号的放大, 也引起了人们很大的兴趣。如前所述, 光照在钛酸钡晶体中形成了空间电荷电场, 进而引起了折射率的改变, 在晶体内形成一个折射率光栅。经分析可知, 形成的空间电荷电场与入射光波之间存在 $\pi/2$ 的位相差。由于存在这一位相差, 使得当两束相干光入射到钛酸钡晶体上时, 在这两束光之间可发生能量交换。当二束光相对于钛酸钡晶体晶轴

的取向确定时, 这两束光之间能量传递的方向也是确定的, 这就是二波耦合效应。在无泵浦光波 I_p 同时入射到晶体上时, 如果只有很弱的信号光波 I_s , 透过晶体的信号光波仍很弱。但若泵浦光也同时入射至晶体上时, 就会将泵浦光的一部份能量转移至信号光波上去。对钛酸钡而言, 在入射光为 $1W/cm^2$ 的情况下, 转移能量的时间约为 0.5 秒。利用这一效应就可以实

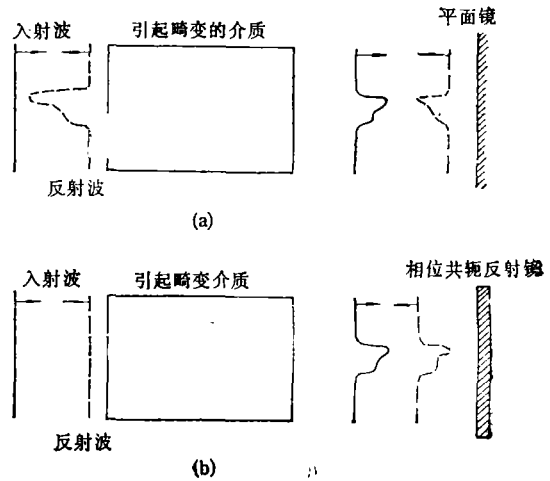


图 5

现弱光强信号放大。

有关钛酸钡晶体其它的许多有意义的和潜在的重要应用, 这里不再赘述, 有兴趣的读者可进一步参看有关资料。

综上所述, 四方相的钛酸钡晶体是一种光折变性能很好的材料。它在非线性光学及相关的技术领域中有重要的研究价值和广泛的应用前景。为了提高晶体的成品率, 消除晶体中不均匀分布的细小包裹物, 还需进一步改进晶体的生长工艺和生长条件。为了提高其光折变性能, 国内外的研究工作者正在研究掺入少量杂质元素来改善晶体。可以预期, 不久人们将获得结构完整、性能更好的晶体。

(上接第 32 页)

进一步开发。几年前作者和同事们开展了固体电解质, $\beta-Al_2O_3$, 在金属防腐中的应用研究, 首次把固体电解质引入金属防腐领域。研究结果得到国内外同行的承认。由于我国科学工作者的努力, 我国固态离子学的研究已在国际上受到很大的重视。1990年将在北京召开第三届亚洲固态离子学会议。由此可见我国这门学科的研究在国际上的地位。为了使这门新兴学科获得更大进展和为我国四化建设服务, 我们还应付出更大努力向高峰攀登。