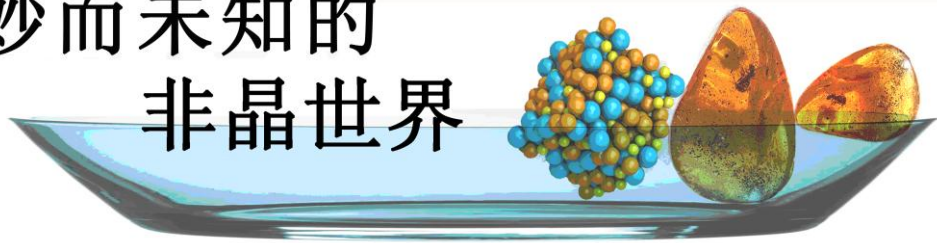


奇妙而未知的 非晶世界



高萌 刘诗彤 王峥 汪卫华

一、什么是非晶态物质？

大自然中存在着丰富多彩、各种各样的物质，如果不考虑它们在宏观性质上的差异，而直接探究它们在微观结构上的特点，我们就会发现其实物质大致可以分为两类：一类是有序结构的物质，另一类是无序结构的物质。这里的“序”是从微观原子排列角度上来说的，从字面上来看是指原子排列有一定的秩序、规律，从物理角度来看是指原子的排列具有长程的平移对称性或旋转对称性。因此，像钻石等内部具有严格平移对称性(原子周期性排列)或旋转对称性的晶体、准晶是典型的有序结构，而像空气、水、玻璃等不具备这些长程对称性的气体、液体和一些固体则可大致归为无序结构，其中具有无序结构的固体物质就常被称为非晶态固体物质。现在对于非晶态固体物质还没有像晶体那样的严格定义，比较一致的观点认为，组成物质的原子、分子在空间排列不呈现像晶体那样的长程对称性，只在几个原子间距的范围内保持着某些有序特征的一类物质称为非晶态固体物质，简称为非晶态物质。非晶态物质既可以由熔融液体通过急速冷却抑制其结晶而形成，也可以直接由原子或分子通过气象沉积、粒子束混合、机械合金化、强变形、激光制备等方法得到。通常非晶态物质也可称为无定形或玻璃态物质(amorphous and glassy materials)，但是“非晶态”与“玻璃”这两个术语有着不同的含义，一般情况下，玻璃(glass)这个术语常指由高温熔体快速冷却的方法得到的非晶态物质，而非晶态物质(amorphous materials)则可泛指上面原子排列没有周期性的任何固体。不过大部分情况下两者可以不加区别地使用。

二、非晶态物质的结构特点和原子结构模型

非晶态物质由于结构上呈现长程无序，因此当

用研究晶体等有序结构物质的手段来研究非晶态物质时会在一定程度上失效，这使得我们很难清楚地探知到底这类物质内部的结构是怎样的。到目前为止，我们用于测定非晶态物质结构的常用方法有 X 射线衍射、中子散射、电子显微镜等，但这些手段并不能唯一地、精确地给出非晶态物质中原子的三维排布状况，所以要想研究非晶物质的微观结构，只能依靠建立原子结构模型并与具体的实验结果对比的方法，来得到非晶态物质的可能的原子结构图像。下面我们就简单介绍一下非晶态物质一些普遍的结构特点以及常见的几种非晶态物质原子结构模型。

非晶态物质的结构特点主要表现在：1. 长程无序。晶体结构的根本特点是它的长程周期性，通俗一点讲就是指在晶态固体中，原子会像我们排队买饭一样，一列一列很整齐的排列。而在非晶态物质中，这种类似排队买饭的秩序则消失了，原子之间彼此杂乱无序的排列，这种结构特点我们一般称之为长程无序性。如果我们用电子显微镜进行观察就会发现，这类结构的电子衍射花纹只有一些类似我们在晚上常见的月晕一样的较宽的晕和弥散的环，并没有在观察晶体时所呈现的典型的明亮斑点阵列(图 1)。2. 短程有序。我们可能会问，非晶态物质既然丢掉了晶体的长程周期性，那它是不是像气体、液体那样处于完全无序的状态呢？通过对同种成分的晶态物质和非晶态物质的密度和导电性进行研究发现两者并没有太大的差别，这就说明这两类物质的近邻原子之间的关系是相类似的，也就是近邻原子间的键合(如配位数、原子间距、键角、键长等)具有一定的相似性，这种特点就是短程有序性。可见，非晶态物质与传统意义上气体、液体的完全无序是有区别的。3. 结构的均匀性和能量上的亚稳态。在宏观物理性质上，不同于晶体材料所呈现出

的各向异性，非晶态物质一般会呈现出各向同性的特点，也就是说非晶态物质的物理性质与测量方向是没有关系的，这正是由于没有长程有序性的结果。在能量上，根据能量最小原理，微观原子排列的能量最低状态应该是周期性排列，因此对于原子呈无序排列的非晶态物质，实际上是处于一种能量较高的亚稳态，在足够长的时间下，它总会转变为相应条件下的晶态结构，就像高处的水总会“千方百计”地向低处流一样。只不过，有的非晶态物质可能在几天的时间内就晶化了，有的则可能在经过上百、上千甚至上万年后仍然能保持无序的结构。

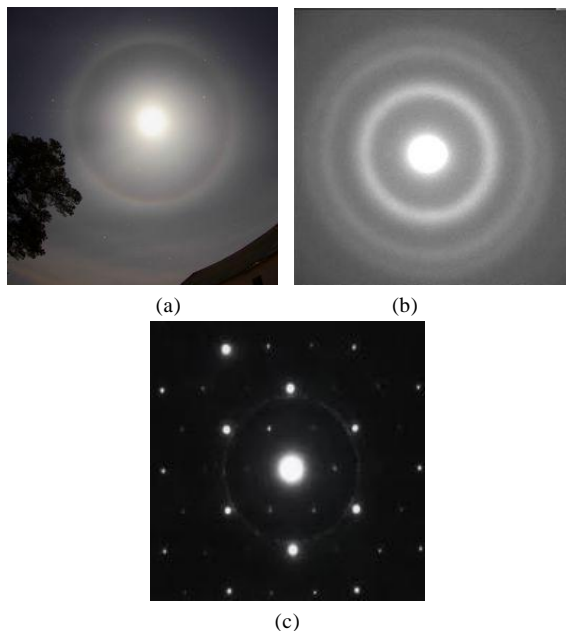


图 1 表征非晶态物质长程无序、短程有序的电子衍射花纹
(a) 月晕；(b) 非晶合金的电子衍射花纹；
(c) 晶态合金的电子衍射花纹

在非晶态物质的结构研究中我们经常使用两种原子模型：1. 无规密堆积模型。这是最早提出的用于描述非晶态结构的模型，常被用来描述简单金属玻璃的原子结构，该模型把非晶态结构看作是一些均匀连续、致密填充、混乱无规的原子球的集合（图 2(a)），这与晶体的原子密堆模型是相对应的（图 2(b)），只不过，一个看起来杂乱无章，而另一个则井然有序。2. 连续无规网络模型。对于以共价键结合的玻璃结构，例如常见的氧化物、硫化物、氟化物玻璃，其最近邻原子关系与晶态基本相似，人们由此提出了非晶态的连续无规网络模型。这个模型要求近邻原子间的键长、键角关系与晶态结构类似，

但是允许在一定范围内的涨落，非晶态的长程无序性就表现在“键”的无规排列上。图 3 是 (a) 晶态 A_2O_3 网络结构模型与 (b) A_2O_3 玻璃的连续无规网络结构模型。

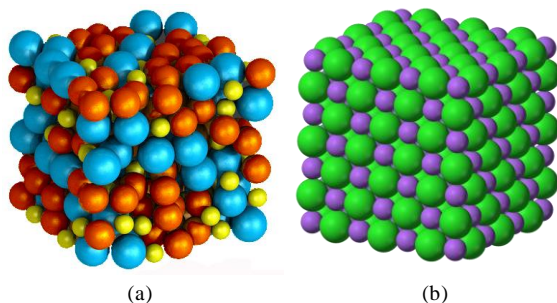


图 2 原子密堆结构模型
(a) 三元连续无规密堆非晶结构；
(b) 二元面心立方密堆晶格结构

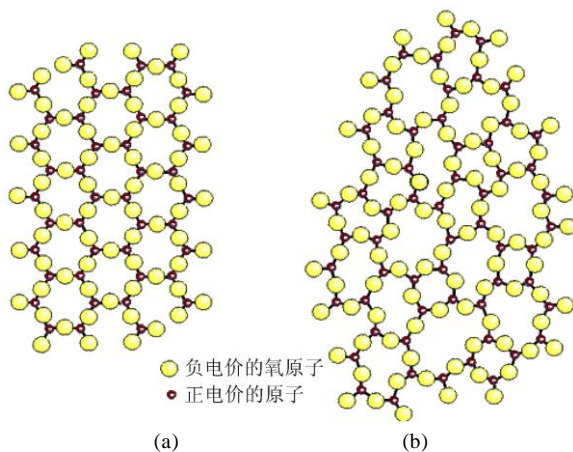


图 3 二维原子网络结构模型
(a) A_2O_3 晶体；(b) A_2O_3 玻璃

除了上面这两种常用的模型外，人们还提出了诸如描述非晶聚合物的无规线团模型、描述非晶金属玻璃的 FCC 密堆团簇堆积模型、准等同团簇模型、长程拓扑结构以及长程的分形网络拓扑结构模型等，来描述各种非晶态物质的结构。尽管这些模型是理想化的，但是它们给出了非晶态物质在原子尺度上微观结构最好的可用图像，这些模型的提出不仅加深了我们对于非晶态结构的理解，而且为我们以后开发性能更加优良的新型非晶态材料提供了理论上的指导。

三、非晶态物质的特征

非晶态物质有很多的特征。特征之一是普遍性。在自然界和人们的日常生活中非晶态物质几乎如影随行，遍及我们视力所能及的方方面面，比如

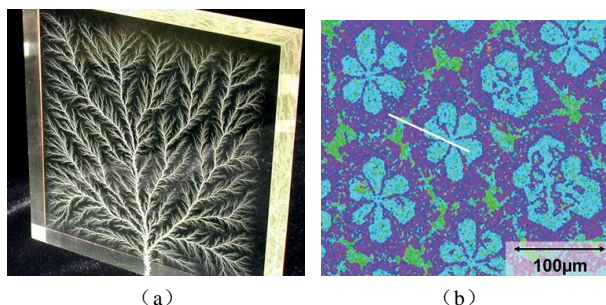
自然界中随处都可见的树脂、琥珀等令人惊叹的自然艺术品，又比如现在正在大力发展的非晶态半导体、非晶态电解质、非晶态离子导体、非晶态超导体和非晶态合金（金属玻璃）等新型非晶态物质，甚至于我们日常生活中常见的透明玻璃、塑料、橡胶、食品等几乎都属于非晶态物质这个大家族（图4）。



图4 常见的非晶态物质
依次是火山玻璃、琥珀、天然橡胶、
塑料、普通玻璃、金属玻璃

非晶态物质第二个特点是复杂性。非晶态物质是由大量的原子组成的多体系统，而原子排列的无序性又使得这类多体系统呈现出复杂性的特征，许多在晶态物质中没有发现的新奇现象也在这类物质中呈现出来。分形是在自然界中普遍存在的一种很美丽的风景，大到高耸入云的参天大树，小到生物体内的细胞，都呈现出分形的特征。研究表明这类神奇的现象与非晶态物质的无序结构存在着紧密关系，图5（a）展示了有机玻璃在高压电的作用下产生的击穿分形图案。自组织现象是多体系统远离平衡态时所经常发生的一类现象，像雪崩、地震、断裂都会伴随着这类现象。这类现象主要表现在当复杂系统远离平衡态时，系统整体可以在不存在外部“指令”或者外部作用的条件下，通过各个单元的

协调，自发的形成某些有序结构，这就是“自组织”的由来。由于非晶态固体是由高温熔体在远离平衡态时制备而成的，因此制备过程中的远离平衡态特点就被保留在非晶态物质中，而非晶物质本身所特有的无序性也就体现了这种远离平衡态的特征，这使得非晶态物质可以在满足某些条件时呈现出自组织现象。图5（b）展示了 $\text{Co}_2\text{Dy}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Sn}$ 非晶合金熔体快速冷却时自组织而成类似花瓣状的分离区域。



(a) (b)

图5 非晶态物质中的复杂性现象
(a)有机玻璃电击穿的分形花样；(b) $\text{Co}_2\text{Dy}_{0.5}\text{Mn}_{0.5}\text{Sn}$ 非晶合金的自组织形成的花瓣状的分离区域

非晶态物质另一个重要特征是其结构和性能与时间密切相关。非晶态物质由于处于亚稳态，很容易受到周围环境因素比如温度、压强等的影响，这就使得原子总会自发地随着时间向有序的晶态结构靠拢，这很类似于我们常见的流体如水、油等的流动性。这种奇特的现象是非晶态物质所特有的现象，我们常称作结构弛豫，因此，时间这个潜在的因素对于非晶态物质来说要比晶态物质更加重要。如果我们仅仅从结构弛豫与液体流动性的相似性来看，在长时间的尺度下，我们甚至可以将非晶态物质简单地看作高粘性的液体，因此，现在有很多科学家将玻璃态看作物质的“第四态”，一种介于液体和固体之间的新型物质状态。

液体和熔体变为玻璃的过程称为玻璃转变，它是各种玻璃制造中几乎都涉及的一个不可缺少的过程。尽管到目前为止人们还不能真正地理解玻璃转变本质，但玻璃化转变过程涉及自然界的很多现象，给有生命的与无生命的物质带来许多奇妙的现象和结果。现在，科学家通过对德干火山岩（即玄武岩）中玻璃的成分痕迹的分析，发现该火山玻璃中残存有硫、氯等元素，而在火山玻璃形成的过程中，玻璃熔体包含了当时环境中各个气体成分的信息并保存在所形成的火山玻璃中。考虑到火山玻璃中的化

学成分随时间变化很缓慢，因此可近似认为火山玻璃的化学成分就是当时环境中的气体化学成分，通过与现在环境中的气体成分进行对比，科学家发现当时环境中的硫、氯等有毒元素的含量大大超过生物所能承受的最大限度，所以科学家由此推测，可能是火山喷发中喷涌到大气中的硫、氯等有毒元素，导致了大范围的物种包括恐龙灭绝。由于玻璃化过程没有破坏液体的结构，所以可以用来保存新鲜食物（速冻食品），甚至可以短时间保存人类的器官，像最近刚刚兴起利用玻璃化冷冻卵子和精子的方法就是利用了这个原理（图6）。玻璃化冷冻，我们常称作快速冷冻或者急速冷冻，能使保护液在短时间内呈玻璃态，这可以避免细胞内由于水分结晶而形成的冰晶所导致的伤害以及细胞外界引起的渗透压影响，从而可以使植物细胞和卵母细胞所受到的伤害明显减少，从而达到保鲜的效果。

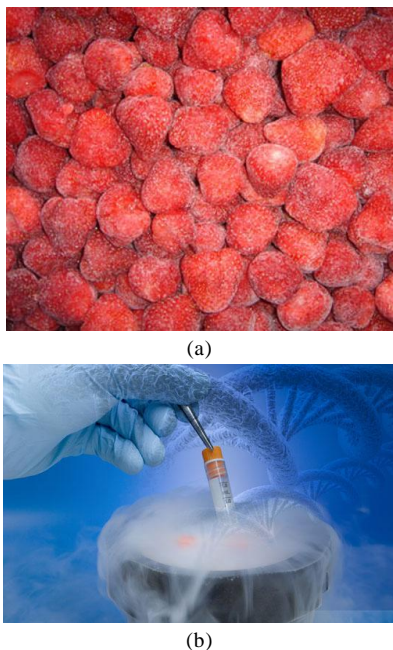


图6 玻璃化冷冻方法的应用
(a) 速冻草莓 (b) 精子的玻璃化冷冻

在非晶态物质中，存在两个很奇妙的“粒子”状态由自由态到局域态的转变。第一个转变是玻璃化转变，即由液态直接转变为非晶态固态。在这种转变中，组成非晶态物质的原子或分子的可移动性经历了剧烈的变化，从一个可以自由移动的“自由者”转变为一个只能在某个小空间范围内运动的“被囚禁者”，这在宏观性质上表现为非晶物质的黏度发生急剧增加。图7是定量表示玻璃转变的一种方法，

称为 Angell plot。图中的“Strong”、“Fragile”分别代表强、脆玻璃体系。Angell 图主要描述了在玻璃转变过程中，当以 T_g/T 为单位变量时 (T_g : 玻璃转变温度; T : 测试温度)，在 $T = T_g$ 附近很小的温度范围内，玻璃熔体的黏度发生了十几个数量级的变化，玻璃熔体瞬间由类液体的状态转变为类固体的状态。第二个转变是安德森转变，这种转变过程中的“粒子”指的是电子。在非晶态物质中电子可以通过一种微妙的结构无序来实现金属与绝缘体之间的转变，在这种转变过程中，电子也经历了类似玻璃化转变过程中原子的可移动性的剧烈变化，宏观上表现为导电性由导体到绝缘体的转变。非晶态物质所呈现出的这两种奇特的局域性特点，用传统的凝聚态理论很难得到解释，因此，1977年的诺贝尔物理学奖获得者安德森 (P. W. Anderson) 教授提出了安德森局域化理论来解释第二种转变并因此荣获诺贝尔奖，然而，对于第一种转变，现在仍然没有很好的理论能加以解释。

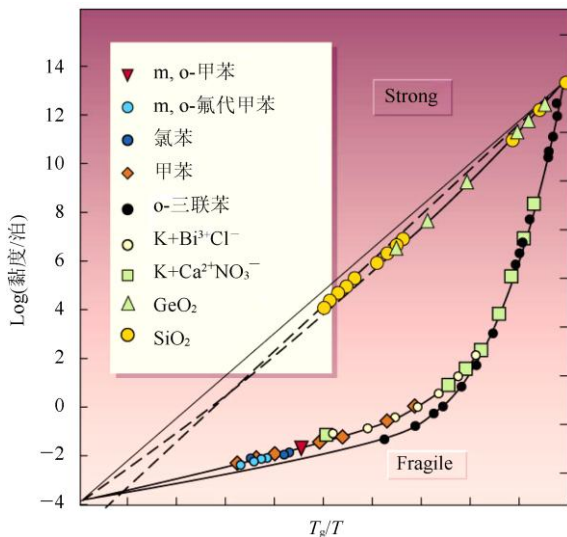


图7 描述非晶态物质在玻璃转变过程中黏度变化的 Angell plot

四、非晶态物质的物理性质

非晶态物质所具有的独特的原子结构特点使得这类物质在力学、光学、磁学、电学性质等方面呈现出与晶体物质截然不同的特点，这些独特的物理性质使得非晶态物质成为一种潜力巨大的新型材料。下面以非晶态半导体和非晶态合金（金属玻璃）这两种非晶态物质为例来简单介绍一下非晶态物质的特殊物理性质。

非晶态半导体

作为非晶态领域最为活跃的方向之一，非晶态半导体以其独特的光学、电学性质得到人们广泛的注意。目前研究最多的非晶态半导体有两类：一类是以四面体作为基本原子组合单元的非晶态半导体，例如非晶 Si、非晶 Ge 等；另一类是硫系非晶态半导体，例如含有硫族元素的非晶 As_2Se_3 、 $\text{As}_{30}\text{Te}_{48}\text{Si}_{12}\text{Ge}_{10}$ 等。这两类非晶态半导体都是以共价键结合为主，原子结构特点可以用上面的无规网络结构模型得到很好地描述。为了能让我们更好地理解非晶态半导体的电学和光学性质，首先简单介绍一下非晶态半导体的能带模型，即 Mott-CFO 模型，这个模型是由诺贝尔物理学奖得主莫特 (Mott) 与其合作者科恩 (Cohen)、弗里兹希 (Fritzche)、奥弗辛斯基 (Ovshinsky) 等人共同提出的。这个模型的主要观点包括：1. 相对于晶态半导体电子的共有化运动 (即电子可以在整个晶体中运动)，非晶态半导体的电子运动状态分为两类，一类是扩展态，类似于晶态中的共有化运动，另一类是定域态，电子运动只能局限在一些很小的空间范围内。2. 类似于晶态半导体的能带结构 (图 8 (a))，非晶态半导体的能带结构也包括价带和导带，所不同的是非晶态半导体的能态密度存在着尾部区 (图 8(b) 的阴影部分)。因为能带结构的物理含义就是表明电子的运动状态，所以导带和价带向两边扩展就表明了电子可以在整个晶态中运动，而在非晶态半导体中，电子则会表现出局域化的运动，这种局域化的运动在能带图上就表现为在导带和价带的尾部出现了一个小区域，即尾部区。3. 在晶态半导体中由于只存在

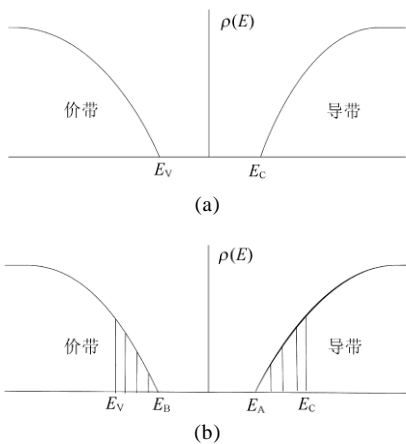


图 8 晶态和非晶态半导体的能带结构
(a) 晶态半导体 (b) 非晶态半导体

少量的缺陷，这些缺陷可以通过其对电子状态所造成的影响即电子的缺陷所导致的定域状态来描述，但是非晶态半导体由于固有的整体结构无序，缺陷密度很大，因此这就需要引入大量的缺陷定域态来描述结构缺陷，这些缺陷定域态对应的能量状态会形成很窄的能量区域，简称能带。这些不同于晶态半导体的特点反映了非晶态半导体的长程无序、短程有序的结构特点对其电子结构的影响。

在电学性质方面，相对于晶体半导体中比较“自由”的电子运动，在非晶态半导体中电子由于非晶态结构上的无序性使其所受散射加剧，平均自由程大大减小，当平均自由程接近于原子间距的数量级时，在晶体半导体中所建立的电子漂移运动的图像就不再适用于非晶半导体了，此时电子就处于图 8 (b) 中尾部区所描述的局域态中。这样的电子状态使得非晶态半导体的电学性质表现为两个特点：1. 当电子处于局域态时，要想从一个局域态到另一个局域态，电子只能通过与晶格振动的相互作用来交换能量，从而进行跳跃式导电，这种运动方式与电子一般运动方式相比比较难以实现，因此就使电子的迁移率变得很低，从而使非晶态半导体的电阻率变的很大。2. 在晶态半导体中可以通过掺杂来控制材料的导电类型和电导率，而非晶态半导体也能实现掺杂效应，这首先是由斯皮尔 (Spear) 等人在 1975 年利用硅烷分解的硅烷放电技术在非晶硅中实现的，这成为非晶硅中的重要突破，为非晶硅的应用奠定了重要基础。

在光学性质方面，与晶态半导体相比，非晶半导体主要在光吸收、光电导、光致发光等方面存在重要区别。1. 光吸收。在晶态半导体中，光吸收主要是通过电子从价带到导带之间的跃迁来实现，可以分为竖直跃迁与非竖直跃迁，这里的“竖直”与“非竖直”主要是由于晶体的长程周期性排列所导致的。在描述晶体电子状态的能带论中，我们常在 k 空间 (与位置空间对应的波矢空间) 中来描述电子的运动。在 k 空间中，当导带底、价带顶在同一点 (即有相同的 k 值) 时，此时发生的电子跃迁称为竖直跃迁，而发生非竖直跃迁时，导带底、价带顶不在同一点。而非晶态半导体的光吸收谱除了位置有所移动之外，并没有太大的改变，但是由于不存在长程周期性，所以并不存在竖直跃迁和非竖直跃迁之分。2. 光电导。所谓光电导，就是指光照可

以使非晶态半导体产生非平衡载流子，进而引起电导率的改变，这是非晶态半导体的一个基本性质，特别是非晶硅。由于非晶态半导体是高电阻材料，而且存在大量的缺陷定域态，因而具有显著的陷阱效应。这种效应会使非晶态半导体在产生非平衡载流子的同时，使缺陷态上的电子浓度也发生改变，因此可以通过掺杂来调节这种效应，从而使光电导达到最佳效果，这就使得非晶态半导体可以成为良好的太阳能光电材料。3. 光致发光。所谓光致发光是指当用某频率的光照射材料时，材料中就有相应频率的光发射出来。光致发光现象主要在硫系半导体中发生，这与非晶态半导体的缺陷定域态紧密联系着，而且处于这些缺陷定域态中的电子，可以通过与晶格的相互作用来交换能量，进而可以产生不同于所吸收光波频率的光，这种效应被称作斯托克斯效应。4. 在硫系非晶态半导体中存在着由于光照所引起的可逆的结构变化的现象，其中最引人注意的是光黑化与光漂白现象。当光照时，可以引起非晶态半导体材料透光性的降低，称为“光黑化”，而当退火时，该材料的透光性又可复原，称为“光漂白”，这种奇特的性质为非晶态半导体在光学上的应用提供更加广阔的天地。

金属玻璃

非晶态合金又称作金属玻璃、玻璃态合金、玻璃态金属，我们在科幻电影《终结者》中所看到的可以任意在固态和液态转变的变形人其实就是由金属玻璃制作而成的。由于结构上的无序和原子结合键的金属特性，使非晶合金表现出不同于晶态合金的优异的力学、磁学、化学等物理性能，下面将主要介绍一下非晶合金的力学性能和磁学性能。

由于非晶合金并不存在像晶态合金那样的长程有序结构，这就使得非晶合金本身没有晶态结构中的晶界以及位错结构，这样的结构特点使金属玻璃具有优异的力学性能，主要表现在：1. 极高的断裂强度。相对于同种合金系的晶态材料，非晶合金具有极高的断裂强度，几乎每个合金系的非晶态材料的最高性能都达到了对应晶态的数倍，例如，Co基金属玻璃的断裂强度达到 5185 MPa，创造了自然界金属材料强度的最高纪录。2. 高弹性应变和高弹性极限。不论哪个非晶合金系，在压缩变形过程中弹性应变值都在 2% 之上， $Mg_{65}Cu_{20}Zn_5Y_{10}$ 的弹性应变甚至达到了 3.7%，这在晶态合金中，是很难实现

的，接近于理想的弹性极限。3. 极高的断裂韧性和极宽的断裂韧性范围。现在已开发出来的金属玻璃体系中，断裂韧性值从接近于脆性氧化物玻璃的 Dy 基金属玻璃的 $1.26 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 到断裂韧性可达 $200 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 的现在已知的自然界最大断裂韧性的 Pa 基金属玻璃，其断裂韧性的跨度达两个数量级，这是在晶体材料中所不存在的。此外，非晶合金还表现出超塑性变形、高硬度、极低弹性模量等其他一系列优异的力学性能，这使得金属玻璃成为未来最具潜力的工程材料。

非晶合金的结构特点也使得其磁学性质呈现出一些独特的特点：1. 非晶磁性合金中的磁矩会随着磁性原子浓度的变化而呈现出不同于晶态磁性合金的变化趋势。当磁性原子浓度比较小时，由于孤立的磁性杂质的作用，非晶合金的电阻率随着温度的变化会出现一个极小值，也就是通常所说的近藤效应，这与晶态磁性合金是相似的。所不同的是，当磁性原子浓度继续增加时，晶态合金中的近藤效应就消失了，而对于非晶合金，其近藤效应仍可存在，这主要是由于非晶合金本身结构无序，使得材料本身在磁性原子浓度较高时，仍有一些可产生近藤效应的局域磁性稀释区所造成的。2. 由于非晶合金缺乏长程的晶格结构，因此在非晶合金材料中并不会出现由于长程周期性所引起的长程铁磁或者反铁磁结构，只能出现类似于自旋玻璃的磁结构。3. 由于非晶结构无序所导致的磁性的局域涨落特点，使得非晶磁性合金的磁激发包含两类，一类是从自旋向上的状态激发到自旋向下的 Stoner 激发，另一类是局域的单离子磁激发，这是不同于晶态磁性合金材料的。

五、非晶态材料的应用

表 1 简单地列出了日常生活中常见的也是最主要的三类非晶态材料的分类、实例以及主要用途。在这三种非晶态材料中，后两者的研究比较成熟，分别形成了独立的分支学科。而非晶半导体、金属玻璃、非晶超导体和非晶等离子体等材料，是近几十年随着科学技术的发展涌现出的几种新型材料，现在已经在很多领域尤其是高科技领域得到广泛的应用。下面我们将简单介绍一下非晶态材料在能源、催化以及通信领域的发展和应用。

能源材料——非晶硅薄膜太阳能电池

随着光伏工业的高速发展，全球对太阳能电池原材料高纯硅的需求急剧增加。据统计，现在世界

表 1

非晶态材料分类	物质	举例	应用
普通低分子非晶态材料	非晶态半导体	a-Si、a-Ge Te ₈₀ Ge ₂₀	非晶硅太阳能电池、薄膜晶体管、计算机记忆元件
	金属玻璃	Fe ₈₀ B ₂₀ Fe-Si-B	电源变压器铁芯、磁头
传统的氧化物和非氧化物玻璃	氧化物玻璃	SiO ₂	玻璃板、光纤
	非氧化物玻璃	硫系玻璃 Se、As ₂ Se ₃	存储器、复印鼓、红外光学器件
非晶态高分子聚合物	塑料	聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯	日用品各个领域，非常广泛
	橡胶	丁苯橡胶、异戊橡胶、乙丙橡胶	轮胎、电线、电缆的包皮、日用品

上生产的高纯硅中，有 70% 是用于制造集成电路中的二极管、三极管等半导体器件，而我们知道，要想制备出纯度极高的单晶硅所需的成本是极高的，这就使得光伏工业中高纯硅的供需矛盾越来越突出。能不能找到一种可以替代高纯硅的新型的低成本材料呢？非晶硅就能！由于非晶硅本身所具有的结构特点以及半导体的掺杂特点，使得它可以成为单晶硅的最佳替代者。对非晶硅的工业化应用促进了非晶硅太阳能电池产业的发展，其中最重要的是非晶硅薄膜太阳能电池。

非晶硅薄膜太阳能电池是由卡里森 (Carlson) 和朗斯基 (Wronski) 在 20 世纪 70 年代中期首先开发成功的，并在 80 年代达到工业发展的高潮，现在其产量约占全球太阳能电池总量的 20%。相比于晶体硅太阳能电池，非晶硅薄膜太阳能电池最大的优点就是成本低。晶体硅太阳能电池的成本中的主要部分是硅片，这是因为硅是间接带隙半导体，理论上要求厚度大于 100 μm 才可以吸收足够多的太阳光，电池制造工艺制造硅片厚度下限 150 μm，所以硅片厚度是制约电池成本的重要因素。而非晶硅太阳能电池正好弥补了这个缺陷，由于非晶硅太阳能电池的主要部分是非晶态硅，它的光吸收效率比晶体硅高，0.5 μm 的非晶硅薄膜足以把可利用的太阳光完全吸收，但是非晶硅内部载流子寿命短，扩散长度短，仅有 200~300nm，因此，非晶硅仅仅适合制作薄膜太阳能电池。现在商用的单结非晶硅太阳能电池的厚度约 1μm (而商用的晶体硅太阳能电池的厚度约为 200

μm)，其主要原材料是硅烷，这种气体可由化学工业大量供应，比较便宜，制造一瓦非晶硅太阳能电池的原材料成本约需要人民币 3.5~4 元。此外，非晶硅太阳能电池的能量返回期短，可以进行大面积自动化生产，短波响应高等特点也是单晶硅太阳能电池不能比拟的。图 9 是上海尤力卡公司曾在中国甘肃酒泉市安装的一套 6500 瓦非晶硅太阳能电站，其每千瓦发电量为 1300KWh，而晶体硅太阳能电池每千瓦发电量为 1100~1200KWh。

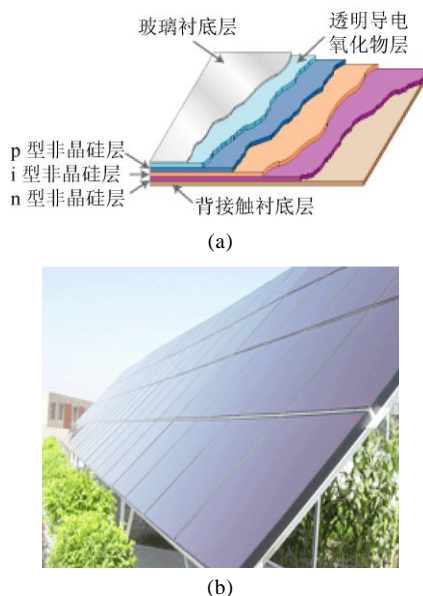


图 9 (a) 非晶硅薄膜太阳能电池的多层膜结构示意图；
(b) 商业化的非晶硅太阳能电池板

然而，现在的非晶硅太阳能电池还是存在有许多缺陷的，例如，它的效率较低，稳定性差，生产设备成本也相对较高，而且相比于单晶硅太阳能电池的单体效率的 14%~17%，柔性基体非晶硅太阳能电池组件的效率也较低，约为 10%~12%。其中，影响非晶硅太阳能电池大规模生产的最主要的原因就是它的光致衰减效应。非晶硅太阳能电池的 a-Si:H 薄膜在经过较长时间的强光照射或电流通过时，其内部将产生缺陷而使薄膜的使用性能下降，从而使电池的稳定性变差。

虽然非晶硅太阳能电池存在着以上诸多不足，但是随着我们对其生产工艺的改进，这些缺点正在被逐步改善。目前，非晶硅太阳能电池正逐步走进千家万户，例如，鉴于非晶硅太阳能电池在冬天仍具有优良的发电效果，上海市松江区已经率先使用了非晶硅太阳能路灯电源，它的照明时间比同样功率的晶

体硅太阳能电池的照明时间长 20%。非晶硅太阳能电池还具有在弱光条件下也能发光的优点，这种特点被人们加以利用应用在一些弱光场合下，并制备出了一系列发光装置，像非晶硅太阳能钟、太阳能手电、太阳能显示牌等等。

软磁材料——非晶合金变压器铁芯

非晶合金作为一种新型的非晶态材料，具有许多优于晶态和其他非晶态材料的独特的磁学性能，这使它在近几十年得到了快速发展并且被广泛应用于磁头、磁屏蔽、传感器和变压器铁芯等领域。变压器中的铁芯是由矫顽力小，磁导率高，铁损耗小的软铁磁材料组成的，经常用来传送电磁功率或电磁信号，产生或变换各种信号。因为变压器具有不间断工作和自身损耗电能等特点，所以在选择变压器铁芯材料时有一定的要求，其中最基本的要求就是，在一定频率和磁通密度下应具有较低的铁芯损耗和在一定磁场强度下具有较高的磁通密度。传统变压器的铁芯材料是硅钢片，但是用这种材料制作的铁芯，其铁损耗比较大。能否找到一种既具有传统铁芯特点又能使磁损耗减小的新型铁芯材料至关重要，具有软磁性的非晶合金就是这样一种理想的铁芯材料。由于不同用途的变压器对铁芯材料的要求不同，这就对材料的可调性提出了很高的要求，而非晶合金材料可以通过用不同的热处理和调节成分配比的方法，得到不同磁学性能的铁芯材料。

现在，作为变压器铁芯的理想材料，非晶合金已经得到了广泛的应用。人们对于非晶合金在变压器方面的探索可追溯到 20 世纪六七十年代。1960 年，美国人杜威兹 (P. Duwez) 发明快淬金属工艺，制造出非晶合金。之后，1968 年 GE 公司的卢博斯基 (Luborsky) 发现铁基非晶合金具有低损耗的特点，1979 年单辊非晶制带法的出现带动了非晶合金的工业化生产也促进了非晶合金变压器的发展。把液态合金 (Fe-Si-B) 以每秒百万摄氏度的冷却速度直接冷却到固态，就可以得到非晶结构的软磁合金材料，这种材料具有很高的磁感应强度 (约为硅钢晶态合金材料的 80%)，低的铁损耗 (约为硅钢片的 1/2~1/3)，以及许多其他的优良品质。据统计，1995 年我国在配电变压器上的铁损耗电量高达 180 亿千瓦，若将现有的全部的配电变压器铁芯都换成非晶合金铁芯，则一年可以节省 126 亿千瓦时电，若以 10 亿度电需要燃烧煤炭 50 万吨计算，就相当于全

年向大气排放的二氧化碳量减少 2880 万吨，二氧化硫量减少 50 万吨，二氧化氮量减少 22 万吨。因此，非晶合金铁芯的开发无论对于节能减排，还是对于人类的长远发展都具有至关重要的作用。据此，非晶合金变压器被我国三委列为“九五”期间重点推广的节能科技成果项目，同时被列为重点国家级火炬计划项目。

虽然具有一系列优点，但与硅钢材料制作的变压器相比，现在研制的大功率非晶合金铁芯变压器仍存在诸多不足。例如，在同样的传输条件下，用磁感应强度为硅钢材料 80% 的非晶合金制作的变压器，其重量要比硅钢材料制作的变压器增加 30%。此外，由于非晶合金条带的厚度一般只有 30~60 μm ，用其制作的变压器的填充系数比硅钢变压器低 10% 左右，所以也会增加非晶合金变压器的体积。但是，随着人们对于非晶合金材料的不断探索，相信这些不足终究会被弥补的。

催化材料——非晶态合金催化剂

1980 年史密斯 (Simth) 等发表了一篇关于非晶态合金催化剂的论文，正式开创了非晶态合金催化剂的新领域。非晶合金作为催化剂，与其他类型的催化剂相比，有许多优越的特点。首先，从热力学角度看，非晶态合金处于亚稳态，存在向晶态转化的趋势，从而显示出了独特的物理化学性质。其次，从结构上讲，非晶合金具有长程无序而只短程有序性，这使得其具较多的表面活性中心和利于反应物吸附的原子结构。此外，在化学上，非晶态合金保持着近乎理想的均匀性，不会出现不利于催化的结构因素例如晶界、位错等。这些特点使得非晶态合金催化剂具有较高的催化活性和可选择性。特别是现在，随着能源危机和环境污染问题的日益突出，人们对清洁能源日益关注，作为能量转化的重要媒介，新型催化材料吸引了许多全球科学家的目光，其中具有高效催化活性的新型非晶合金催化剂更是引起了人们广泛的兴趣。

非晶态合金催化剂作为一种高效的催化材料，可用于电催化反应，加氢反应，脱氢反应以及氨合成反应等各种催化反应。例如，在电催化反应中，一些过渡金属组成的非晶态合金对于氢电极反应具有很高的电催化活性，这是因为非晶合金的组成成分可以连续性的改变，因此可以达到预期的电子结构，形成很高的电催化活性，这是一般晶态合金无

法达到的。而且通过改变金属玻璃电极的形状、尺寸，可以大大增加接触面积，提高催化效率，例如科学家利用金属玻璃纳米丝制备出了新型燃料电池电极（图 10(a)）。最近，科研人员又利用金属玻璃的高催化性能开发出一种新的铁基金属玻璃粉末用于降解有机染料（图 10(b)），这为近年来日益困扰国际社会的海洋污染问题提供了又一个可供选择的新的解决途径。

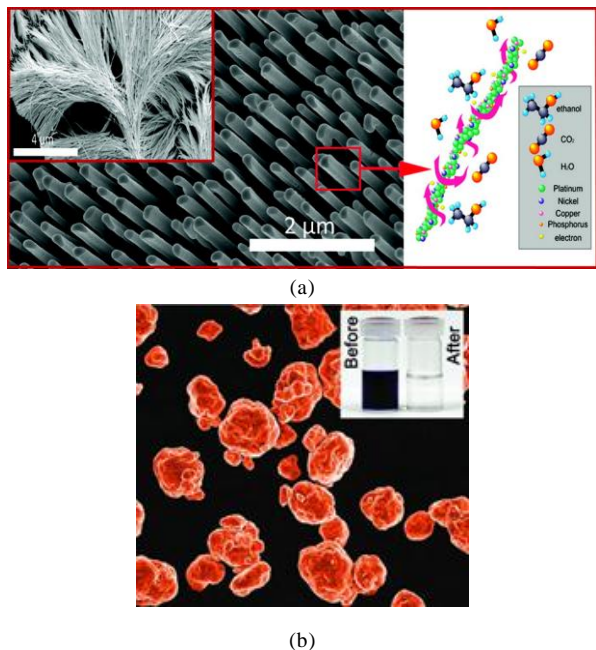


图10 (a)金属玻璃纳米丝电极的微观结构图(左)和催化反应的分子示意图(右);(b)处理污水的铁基金属玻璃粉

作为一种催化材料，非晶合金催化剂具有巨大的发展潜力，但是，目前它仍然存在一些问题，这些问题主要集中在非晶合金催化剂的比表面比较小和催化性能不稳定两个方面。针对这两个问题，科学家正试图通过研究非晶态合金的结构与其催化性能的关系来解决，但是，由于非晶合金结构上的无序，对于其催化性能的科学研究工作仍存在着一定的困难。

通信材料——光纤

光导纤维，简称光纤，是一种用玻璃或塑料制成的纤维材料。这种非晶材料有一个显著的特点，光能在该材料中发生全反射而达到光传导的目的。然而就是这样一种结构十分简单的非晶态纤维材料，却推动了全球互联网时代的到来，成为电信史上一次非常重要的革命。1966年，英籍华裔博士高锟在 *PIEE* 杂志上发表一篇题为《光频率的介质纤

维表面波导》的论文，在这篇文章中，他利用无线电波导通信的原理，首次提出了低损耗的光导纤维的概念，阐述了利用光线进行信息传输的理念。紧接着，1970年美国康宁公司根据高锟的光纤传输原理成功研制出了损耗为 20db/km（光波沿光纤传输 1km 后，光损耗仅为原有的 1%）的石英光纤，为大规模的应用光纤传输奠定了材料基础，这开创了光纤通信的新纪元，也使高锟荣获 2009 年诺贝尔物理学奖。由于光纤的原材料是取之不尽的石英，再加上其优良的传导性能、大的通信容量、强的抗干扰性以及径细、重量轻、柔软、易于铺设、温度稳定性好、寿命长等优点，使得光纤在通信方面得到广泛应用，几乎普及到人们日常生活的方方面面。近些年来，光纤在医学、传感器、工程检测控制甚至艺术等方面也被逐渐引入并加以应用。例如，用光纤制成的内窥镜，柔软又灵活，可以方便地插入病人的胃肠道中，把胃肠道里的图像清晰地传输出来，帮助医生进行诊断。同样是利用光纤可传输光和图像的性能，科研人员将其与敏感元件组合制作成可测量应力、温度、位移和颜色等的各式各样的传感器。在艺术领域，这种低成本、可发光的柔软细丝，极大地激发了艺术家的灵感，像现在随处可见的光纤艺术品，可以发出五光十色的颜色的广告牌等都是光纤的产物。同样是一根光纤，在不同的领域表现出截然不同的效果，这或许才是光纤的魅力所在吧！

六、非晶态物理的现状和未来

非晶态物理作为凝聚态物理的一个前沿领域，在过去几十年里发展迅速，成绩卓越，但是相比于成熟的晶态物理学，它还是处于一个初级阶段，无论是基础理论、微观结构、宏观特性、研究手段，还是新材料，新工艺探索研究方面，都存在着许多具有挑战性的科学问题，这些问题的解决对于推动凝聚态物理学和当今社会的发展都具有重大的意义。目前，在非晶态物理领域中，最为令人困扰的几大难题是：1. 非晶态物质的结构表征。由于非晶态物质的无序结构，现在的实验技术和方法还无法对其微观原子结构进行很好地表征，这极大地阻碍了人们对非晶态物质的优良性能和微观结构之间相关性的探究；而理论上，用于研究晶体结构的晶格理论、能带理论以及群论等成熟的理论已经不能直接用来研究非晶态物质的结构，再加上非晶态物

她用物理的情趣，引我们科苑揽胜； 她用知识的力量，助我们奋起攀登！

欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。

为进一步提高《现代物理知识》的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn，并将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

所投稿件一经本刊录用，作者须将该篇论文各种介质、媒体的版权转让给编辑部所有，并签署《现代物理知识》版权转让协议书（全部作者签名），如不接受此协议，请在投稿时予以声明。来稿一经发表，将一次性酌情付酬，以后不再支付其他报酬。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随笔

和科苑快讯等栏目，并于 2009 年增加了彩色中心插页。

2012 年《现代物理知识》彩页进一步增加，每期待价 9 元，全年 6 期 54 元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

编辑部订阅 汇款到：北京市玉泉路 19 号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要过去杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992 年合订本，18 元；1993 年合订本，18 元；1994 年合订本，22 元；1994 年增刊，8 元；1994 年附加增刊合订本，36 元；1995 年合订本，22 元；1996 年合订本，26 元；1996 年增刊，15 元；1997 年合订本，30 元；2000 年附加增刊合订本，38 元；2000 年增刊，10 元；2001 年合订本，48 元；2002 年合订本，48 元；2003 年合订本，48 元；2004 年合订本，48 元；2006 年仅剩 4、5、6 期，每期 7 元；2007~2011 年单行本每期 8 元；2007~2011 年合订本每本 50 元。

质本身的复杂性，这就需要引入一些新的思路和概念来建立完善的非晶态固体理论。2. 非晶态固体中“缺陷”的本质和结构形貌也是非晶态物理学中的一个未解之谜。无论在晶态固体还是在非晶态固体中，缺陷都是一个基本科研课题，因为它和固体的宏观性能，包括力学、热学、电学、磁学等都有十分紧密的关系，而且它也是影响物质微观原子扩散和结构弛豫的重要因素，但是至今人们还无法从实验上直观地看到非晶态固体中的“缺陷”，对其概念也没有明确的定义，这就直接导致了人们对非晶态材料很多独特物理性能的本质没有深刻的认知，从而制约了人们开发性能更加优良的非晶态材料。3. 液体-玻璃体转变的热力学和动力学问题，这是凝聚态物理中最难克服的问题之一，至今还没有一个能让人们满意的理论，为此，*Science* 杂志在 2005 年将玻璃转变列入当今世界最难解决的 125 个科学难题的行列。正如诺贝尔物理学奖获得者安德森（1977 获奖）在 1995 年的一篇文章中所说的那

样，“或许在凝聚态领域中最深奥但也是最有趣的未解之谜就是玻璃的本质与玻璃转变的问题”。尽管现在对于这个奇妙的非晶世界我们还知之甚少，但是正是这样一个未知却充满奥妙的世界才为我们提供了无限可能，也正是这种无限可能才会吸引更多渴望挑战的青年人投身到这一新领域中来，来发挥自己的智慧和才华。相信在不久的将来，非晶这一新兴领域必将释放出更加夺目的光彩！

（中国科学院物理研究所 100190）

作者简介

汪卫华，男，安徽宁国人，1993 年在中科院物理所获博士学位，1994 年至 1997 年先后在德国 Göttingen 大学、柏林 Hahn-Mitner 所作博士后和洪堡学者；现任中国科学院物理研究所研究员、博士生导师，中国科学院极端条件物理重点实验室副主任。1999 年国家杰出青年基金获得者。国家基金委创新群体学术带头人。