



材料工艺学 II

——玻璃工艺学

主讲人：韩高荣教授 赵高凌教授

2018年9月



授课方式与要求

课堂讲授、案例分析与作业讨论。

成绩考核方式

- 作业报告：35%；
- 课堂作业、讨论：15%；
- 考试：50%。



内容

- | | |
|-----|--------------|
| 第一章 | 玻璃的定义、结构与性能 |
| 第二章 | 玻璃成分设计与配合料 |
| 第三章 | 玻璃形成与熔制工艺 |
| 第四章 | 玻璃的成型工艺及热处理 |
| 第五章 | 浮法玻璃的生产工艺与装备 |
| 第六章 | 瓶罐玻璃的生产工艺与装备 |
| 第七章 | 玻璃深加工与表面处理 |
| 第八章 | 新玻璃与新技术 |



目录

第一章 玻璃的定义、结构与性能

玻璃历史悠久、应用广泛



彩绘

古玻璃

公元前
3700年前



熔炼

光学玻璃

19世纪初

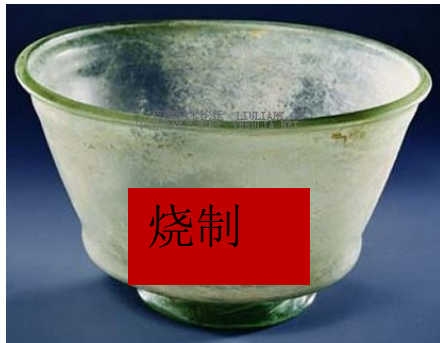


浮法

浮法玻璃

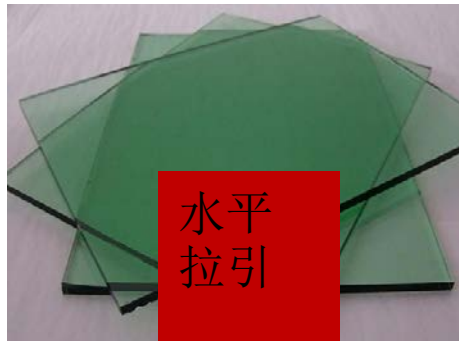
20世纪
50年代末

无色玻璃



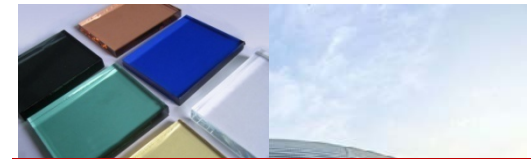
烧制

平板玻璃



水平
拉引

镀膜玻璃

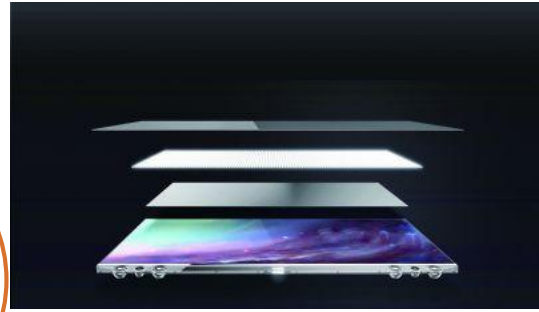


- 磁控溅射（离线）
- 热喷涂
- 化学气相沉积（在线）



日用
玻璃

电子信
息玻璃



建筑节
能玻璃



21世纪
新玻璃

太阳能
光伏玻
璃



车载
玻璃

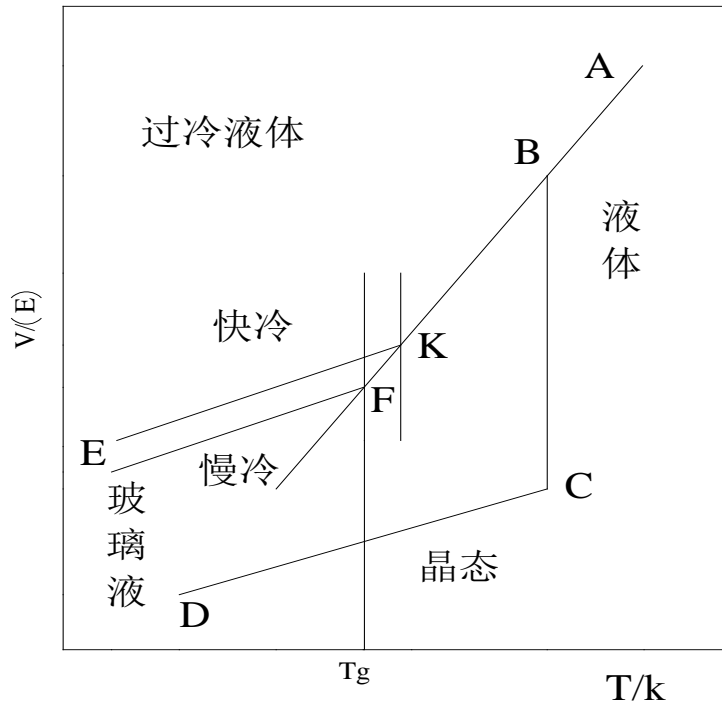




1.1 玻璃的定义

狭义：指熔融物在冷却过程中不发生结晶的无机物质，仅指无机玻璃，其包括氧化物玻璃、非氧化物玻璃、非晶半导体。

广义：具有转变温度(T_g)的非晶态材料，如图1-1所示。其中包括无机玻璃、有机玻璃、金属玻璃等。



结晶：A → B → C → D

内能和体积在熔点温度发生突变

玻璃态：A → B → K → F → E

内能和体积是连续和渐变的。KF

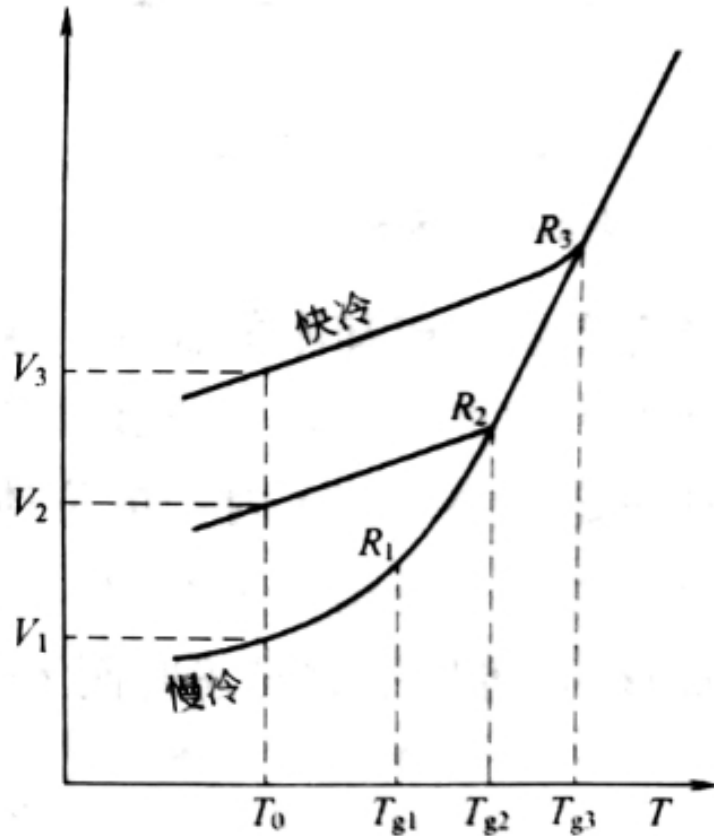
称为“转变区”（常以 $T_g - T_f$ 温度

区表示）。玻璃的黏度、密度、

折射率、比容等性能随着这一区

间温度变化快慢而变化。

物质内能 (E)、体积 (V) 与温度变化关系图



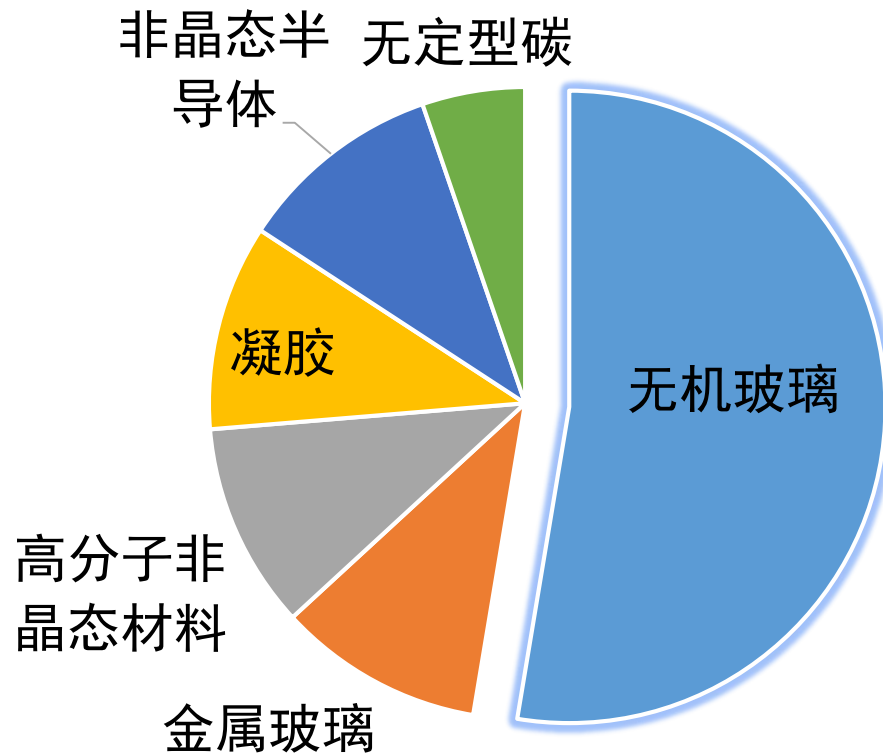
玻璃在温度 T_0 时的比容可能是 V_1 ， V_2 ， V_3 它决定于玻璃的降温速率，随熔体降温速率增大而增大，说明玻璃转变区的热历史与室温时的某些物理性质密切相关。

不同冷却速率下玻璃的比容与温度的关系图



非晶态材料是其原子排列在近程有序，而远程无序，原子排列不具有平移周期性关系；当温度连续升高（或降低）时，在某个温度范围内发生明显结构变化。

非晶态材料的种类

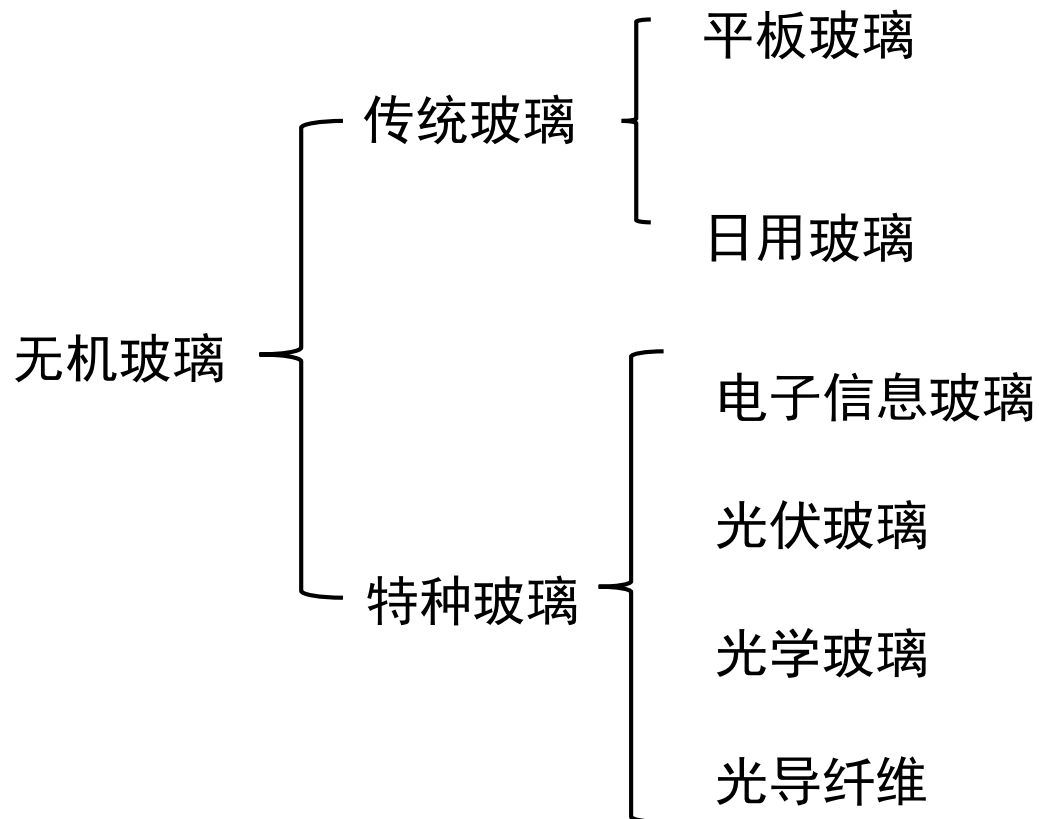


非晶态材料的种类



种类	材料特例	化学组成
无机玻璃	石英玻璃 平板玻璃 光学玻璃 氟化物玻璃	SiO_2 $16\text{Na}_2\text{O} \cdot 12\text{CaO} \cdot 72\text{SiO}_2$ $53\text{La}_2\text{O}_3 \cdot 37\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{ZrO}_2 \cdot 5\text{Ta}_2\text{O}_5$ $\text{NaF} - \text{BeF}_2$
金属玻璃	软磁性合金 高强度无定形合金	$\text{Fe}_{80}\text{P}_{13}\text{C}_7$ $\text{Co}_{70}\text{Fe}_5\text{Si}_{15}\text{B}_{10}$
有机玻璃	环氧树脂	$[\text{C}_{11}\text{H}_{12}\text{O}_3]_n$
无定形炭	炭黑、炭膜	C
凝胶	硅胶 硅矾土	SiO_2 $\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$
非晶态半导体		
a. 硫系玻璃	静电复印用Se膜 显像管用光电导膜	Se $\text{As}_{40}\text{Se}_{30}\text{Te}_{30}$
b. 非晶态元素玻璃	光伏用无定形半导体	Si 、 Ge

1.2 玻璃的分类





1.2 玻璃的分类

■ 平板玻璃

厚度远远小于其长度和宽度，上下表面平行的板状玻璃制品。

按成型方法

浮法玻璃，平拉法玻璃，垂直有槽引上法玻璃，垂直无槽引上法玻璃，压延法玻璃

按厚度方法

普通平板玻璃(4-8mm)，薄玻璃(1.8-3mm)，超薄玻璃(0.1-1.5mm)，极超薄玻璃(小于0.1mm)，厚玻璃(8-12mm)，超厚玻璃(12-19mm)，特超厚玻璃(19-30mm)



1.2 玻璃的分类

■ 平板玻璃

厚度远远小于其长度和宽度，上下表面平行的板状玻璃制品。

按功能

普通平板玻璃，隔热玻璃，低辐射玻璃，电磁辐射屏蔽玻璃，防火玻璃，自洁玻璃，光致变色玻璃等

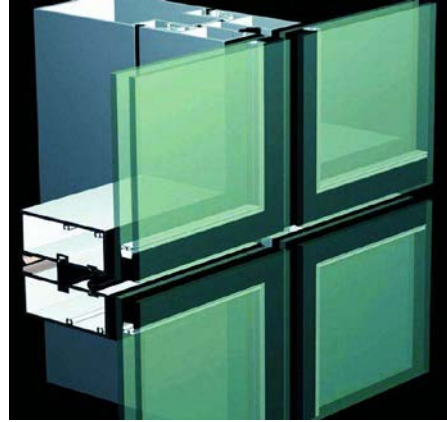
按用途

建筑门窗玻璃，幕墙，安全玻璃（钢化，夹层，夹丝玻璃），显示基片玻璃，灯饰玻璃以及各种装饰玻璃

建筑玻璃



镀膜玻璃幕墙



钢化、中空玻璃



玻璃构件



装饰玻璃





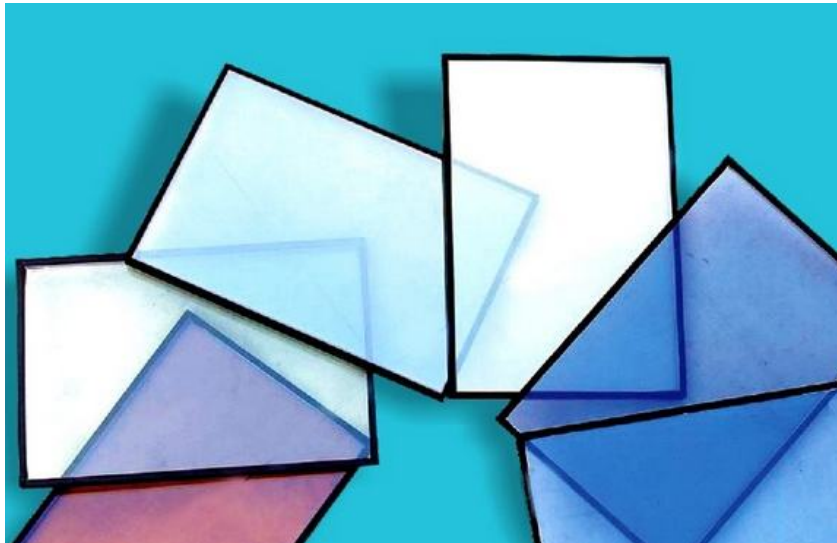
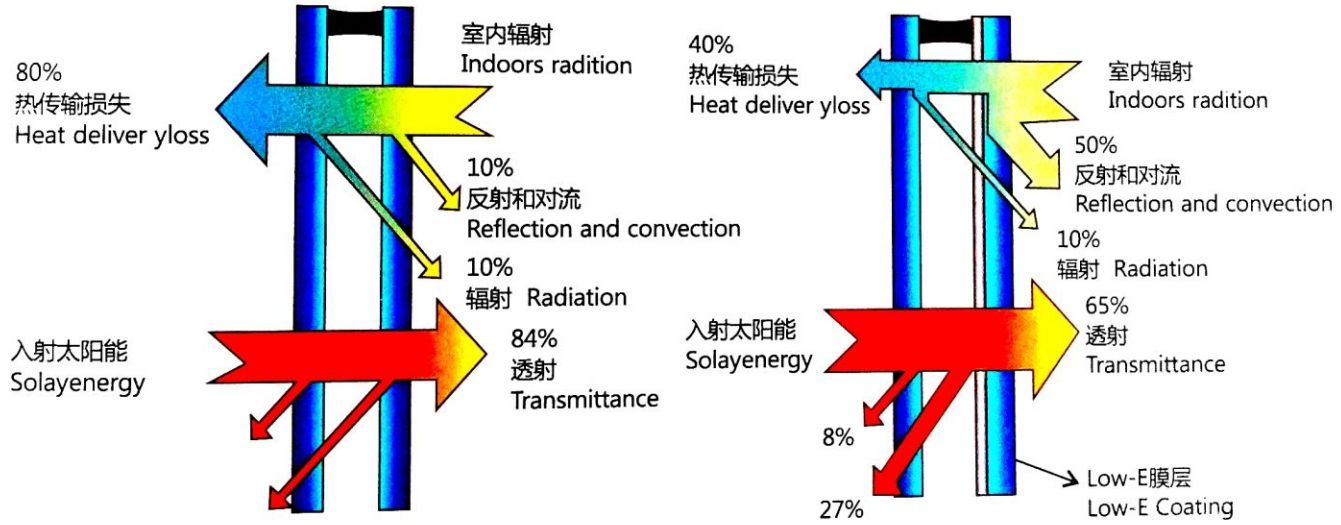
浮法玻璃



Tough,
yet beautiful.



康宁大猩猩超薄玻璃



低辐射玻璃



1.2 玻璃的分类

■ 日用玻璃

- 瓶罐玻璃
- 器皿玻璃
- 仪器玻璃
- 光学玻璃
- 电真空玻璃
- 玻璃纤维与玻璃棉

器皿玻璃、瓶罐玻璃



瓶罐玻璃



器皿玻璃



仪器玻璃、医用玻璃



仪器玻璃

医用玻璃

玻璃杯



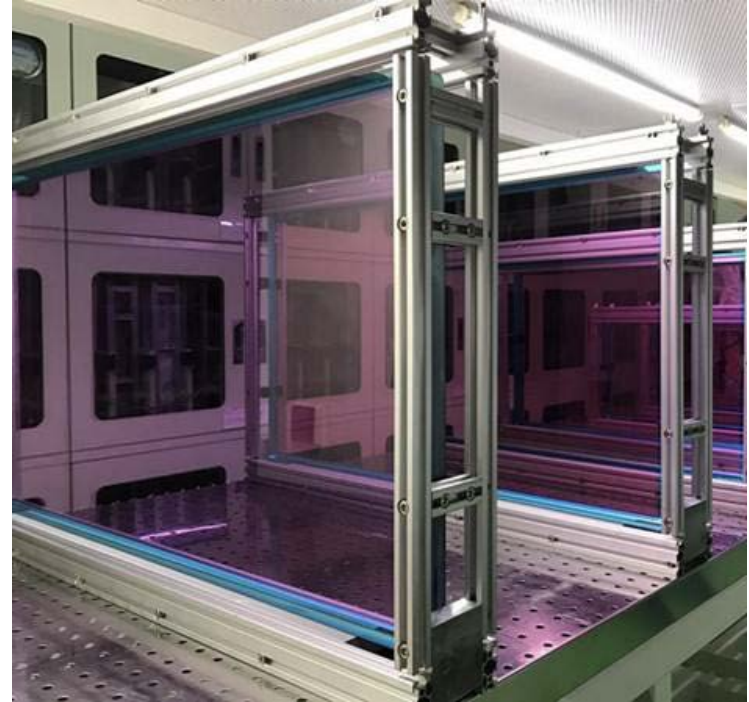
透镜



棱镜

1.2 玻璃的分类

■ 特种玻璃



激光钕玻璃

电子玻璃



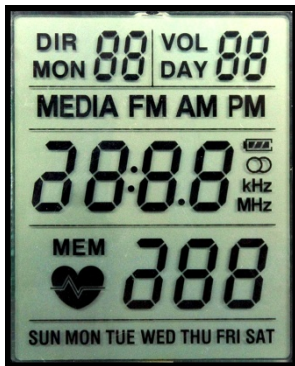
笔记本



手机



显示器



工业仪表盘

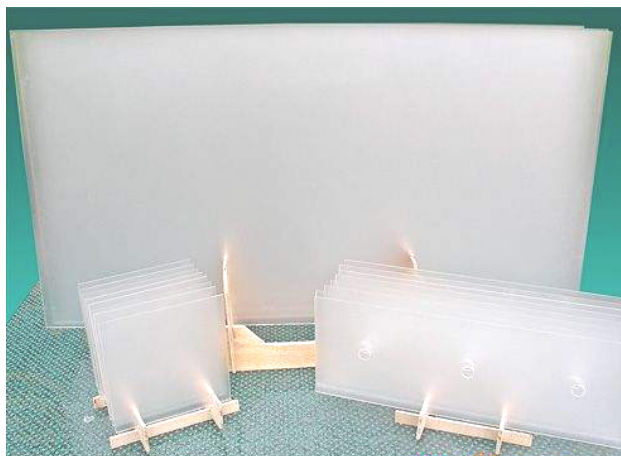


汽车液晶仪表盘



复印扫描机

光伏玻璃



超白压花光伏玻璃



薄膜电池光伏电站

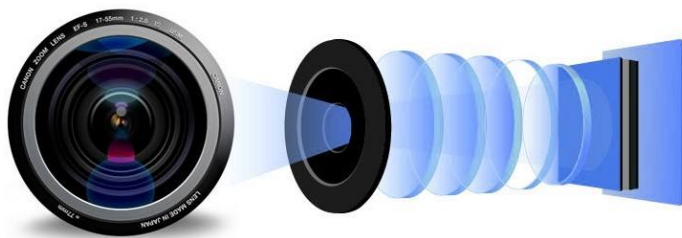
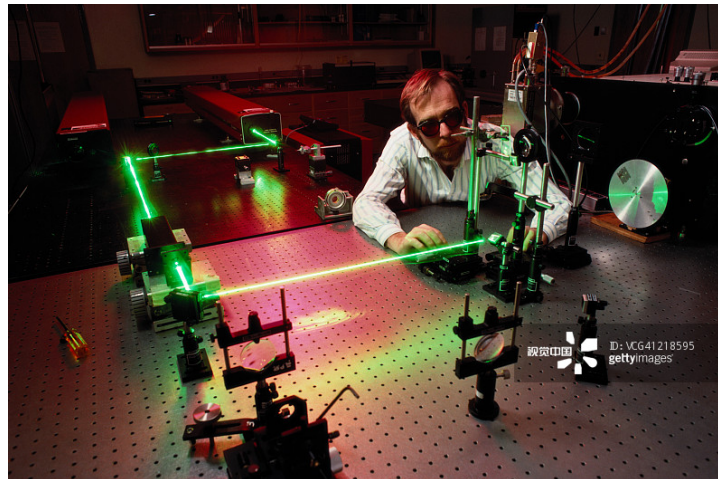
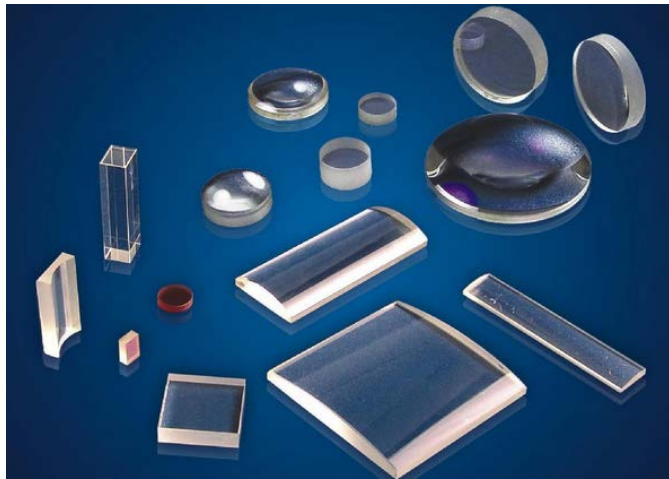


光热电站



多晶硅电池光伏电站

光学玻璃



光导纤维



光纤



光缆



光纤预制棒



连接中国的海底光缆



1.3 玻璃的历史

世界玻璃

1.3000多年前，一艘欧洲腓尼基人的商船，由于海水落潮，商船搁浅了，于是船员们纷纷登上沙滩。有的船员还抬来大锅，搬来木柴，并用几块“天然苏打”作为大锅的支架，在沙滩上做起饭来。

船员们吃完饭，竟然发现沙地上有些闪烁发光的東西，原来炽热的火焰产生的高温把苏打及其周围的沙石一起熔化为晶莹的液体……这就是最早的玻璃。

2.埃及是一个很早就知道玻璃制造奥秘的国家。他们用它来制作首饰，并揉捏成特别小的玻璃瓶。

到了公元前1000年，古埃及人就掌握了玻璃吹制的工艺，能吹制出多种形状的玻璃产品。

3.公元1世纪，罗马成为玻璃制造业的中心。古罗马战败古埃及后，将古埃及战俘放在威尼斯岛上专做玻璃，由此玻璃制作技术传到意大利。

大约16世纪中叶，意大利的工匠们开始挖掘和利用天然水晶。由此发明了“人工水晶”，又称为水晶玻璃。迎来了意大利玻璃的鼎盛时期。



1.3 玻璃的历史

4. 17世纪，欧洲的玻璃工业发展迅速，法国已经用铸造法生产大面积的玻璃镜和平板玻璃。英国人发明了两项最重要的技术：一是铅玻璃。二是熔化技术的革新。
5. 1790年法国化学家卢布兰-碱灰制造法，降低玻璃生产成本。
6. 1828年，法国罗宾，吹制玻璃瓶机器；20世纪初英国欧文斯玻璃瓶自动成型机，2500个/小时啤酒瓶。
7. 1903 压延法（亨利福特法）
8. 20世纪50年代末，英国人阿拉斯泰尔·皮尔金顿爵士开始倡导以革命性的**浮法生产**工艺生产玻璃，今天，超过90%的平板玻璃使用浮法工艺生产。



中国玻璃

- 1.中国古代的玻璃制造工艺始于西周时期，历经两千余年，至清代发展到顶峰。
- 2.自汉代以来，大量国外的钠钙玻璃传入我国，我国在传统玻璃配方的基础上产生了新的配方，将其改造成为铅玻璃和碱玻璃，
- 3.隋唐时代玻璃器的突出成就表现在陈设品、生活用具玻璃器的制作上，主要是玻璃瓶、玻璃茶具、玻璃杯等。
- 4.清初，欧洲制造的晶莹的玻璃制品传入我国后，颇受统治者的喜爱。当时清宫征调了全国最优秀的技术人员在玻璃厂轮班供职，同时还有欧洲的技术人员进行技术指导与制作。



1.4 玻璃的通性

1. 各向同性

玻璃的原子排列是无规则的，其原子在空间中具有统计上的均匀性。在理想状态下，均质玻璃的物理化学性质（如折射率、硬度、弹性模量、热膨胀系数、热导率、电导率等）在各方向都是相同的。

2. 无固定熔点

玻璃由固体转变为液体是在一定温度区域（即软化温度范围）内进行的，它与结晶态物质不同，没有固定的熔点。软化温度范围为 $T_g \sim T_L$ ， T_g 为转变温度， T_L 为液相线温度，对应的粘度分别为 $10^{13.4} \text{ dPa}\cdot\text{s}$ 、 $10^{4\sim 6} \text{ dPa}\cdot\text{s}$ 。



1.4 玻璃的通性

3. 介稳性

玻璃态物质一般是由熔融体快速冷却而得到，从熔融态向玻璃态转变时，冷却过程中粘度急剧增大，质点来不及作有规则排列而形成晶体，没有释出结晶潜热，因此，玻璃态物质比结晶态物质含有较高的内能，属于亚稳状态。

4. 状态变化的渐变性与可逆性

玻璃态物质从熔融状态到固体状态的过程是渐变的，其物理化学性质的变化也是连续的和渐变的。这与熔体的结晶过程明显不同，结晶过程必然出现新相，在结晶温度点附近，许多性质会发生突变。



1.5 玻璃的结构与形成

形成玻璃的条件

■ 热力学条件

体系的自由能变化可以表示为 $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ ，低温时，主要是焓 ΔH 起决定作用，因此当温度低于液相点时，体系会向热焓相对较小的晶态结构转化。一般来说，如果同组成的玻璃体和晶体内能差别大，则在过冷状态下，晶化倾向大于形成玻璃。

■ 动力学条件

析晶过程必须克服势垒，包括成核所需建立新界面的界面能以及晶核长大所需的质点扩散的激活能。如果势垒较大，尤其熔体冷却速度很大时，粘度增加甚大，质点来不及进行规则排列，晶核形成和长大难以进行，有利于玻璃的形成。



1.5 玻璃的结构与形成

形成玻璃的条件

■ 结晶化学条件

(1) 熔体中质点的聚合程度

熔体自高温冷却，原子或分子动能减小，将聚合形成大的阴离子团，如 $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$ ，从而使熔体黏度增大。冷却时熔体由于结构复杂，转动和重排都很困难，不易调整为晶体结构。

(2) 键性

单纯的金属键、离子键和共价键化合物一般不容易形成玻璃，当离子键和金属键向共价键过渡时，或极性过渡键含有离子键和共价键双重性质时。共价键成分利于形成近程有序的固定结构配位多面体，离子键成分促进形成远程无序的不对称变形，形成玻璃倾向大。



1.5 玻璃的结构与形成

形成玻璃的条件

■ 结晶化学条件

(1) 熔体中质点的聚合程度

熔体自高温冷却，原子或分子动能减小，将聚合形成大的阴离子团，如 $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$ ，从而使熔体黏度增大。冷却时熔体由于结构复杂，转动和重排都很困难，不易调整为晶体结构。

(3) 键强

化学键键强大者不易被破坏，难以调整成有规则的排列，易于形成玻璃。根据单键强度可以将氧化物分为三类：键能大于 334.94KJ/mol 称为网络形成体；键能小于 251.21KJ/mol 称为网络外体；处于中间的为网络中间体。



玻璃的结构学说

玻璃的结构是指组成玻璃的离子或原子在空间的基本几何构造单元。由于玻璃结构的复杂性，**至今尚无统一玻璃结构理论。**

目前能够较好解释玻璃性质，又能普遍被接受的玻璃结构学说是**晶子学说**和**无规则网络学说**。



1.5 玻璃的结构理论

■ 晶子学说

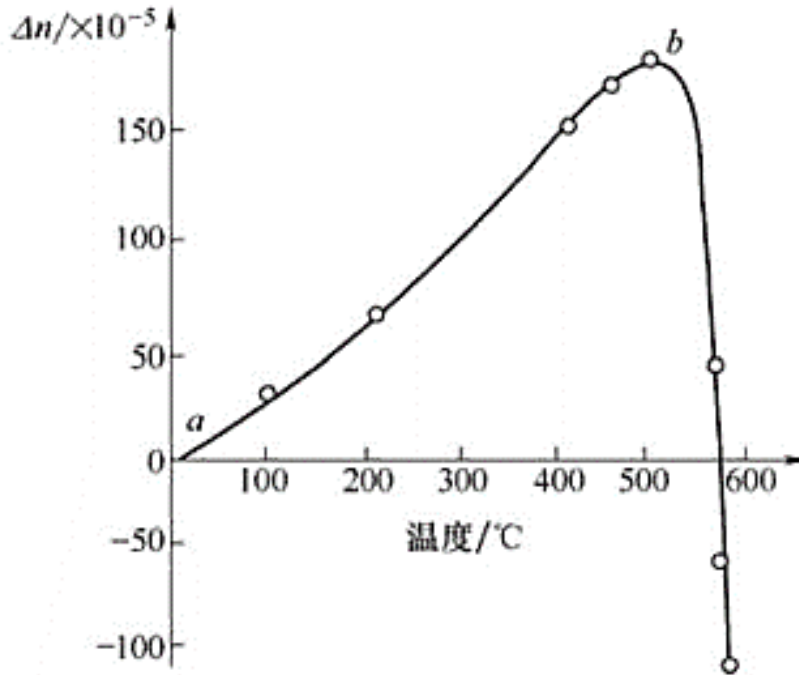


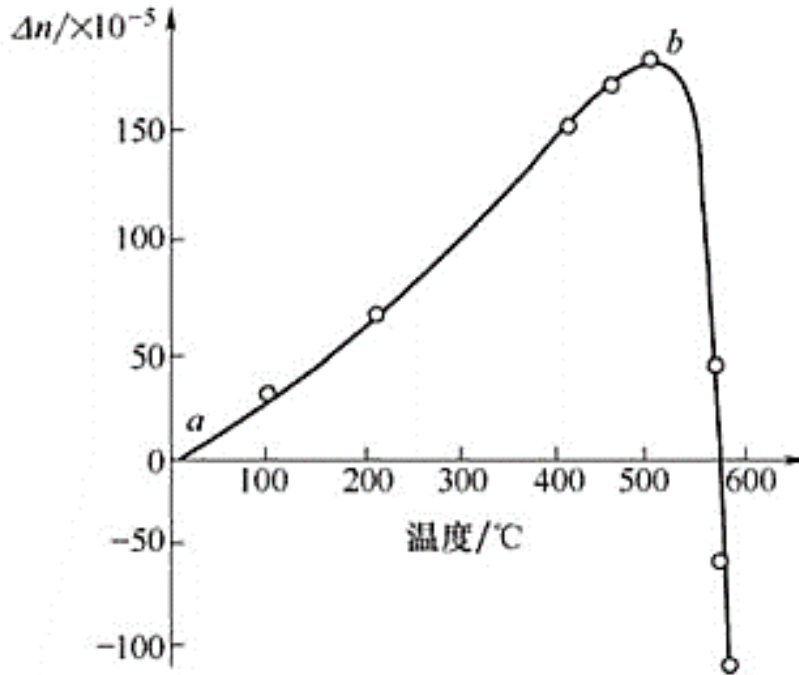
图1-2 玻璃折射率随温度变化的曲线图

1921年，苏联学者列别捷夫在研究硅酸盐玻璃退火时发现，在玻璃折射率随温度变化的曲线上（图1-2），于570°C附近出现突然的变化。他把这一现象解释为玻璃中的石英“微晶”发生晶形转变所致。因为 β -石英与 α -石英之间的转变温度为573°C，他认为玻璃是由无数“晶子”所组成。



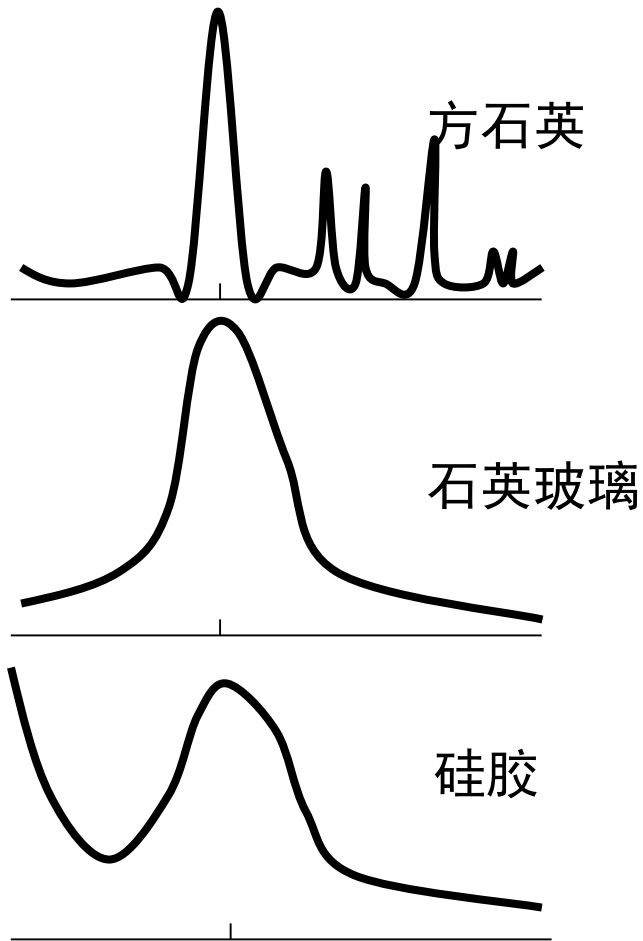
1.5 玻璃的结构理论

■ 晶子学说



1930年，兰德尔（Randall）认为玻璃由“晶子”和无定形物质两部分组成，“晶子”具有规则的原子排列，并且与无定形物质间有明显界限，但是“晶子”取向是无序的。

图1-2 玻璃折射率随温度变化的曲线图



晶子学说后来被X射线衍射分析所证实：
玻璃的X射线衍射谱一般为宽而弥散的衍射峰，与相同成份的晶体强烈尖锐衍射峰有明显不同，但两者所处位置基本相同。

另外实验证明，把晶体研磨成颗粒度小于 $0.1\mu\text{m}$ 时，其X射线衍射谱也是一种宽广的衍射峰，与玻璃类似，而且颗粒度愈小，衍射图的峰值宽度愈大。这些都是玻璃中存在“晶子”的佐证。



■ 无规则网络结构学说

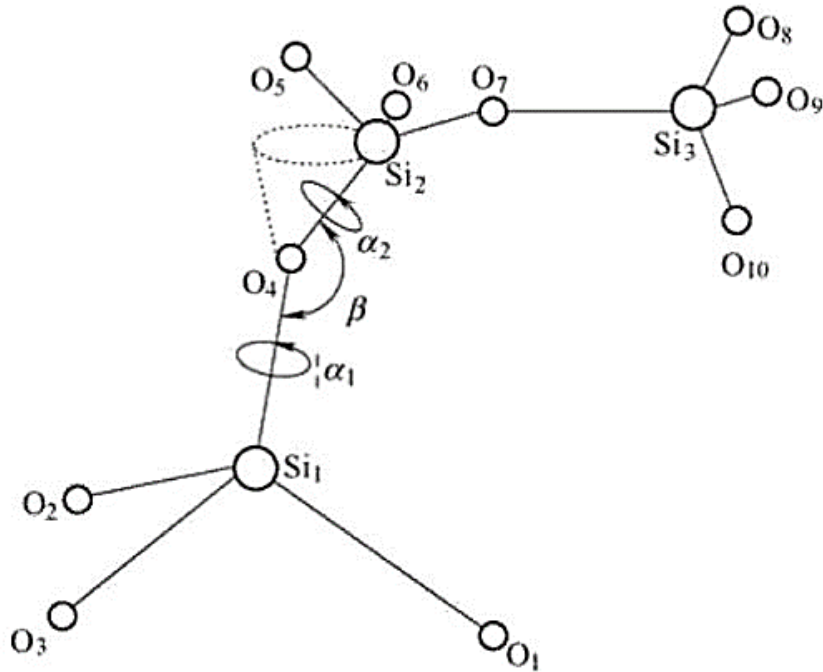


图1-4 Si-O四面体由氧离子顶角相连形成的三度空间示意图

1932年，查哈里森 (W.H.Zachariasen)提出了无规则网络学说。他认为玻璃结构单元是由氧化物 (A_mO_n) 组成，而熔融石英玻璃与石英晶体结构类似，基本结构单元是硅氧四面体 $[SiO_4]$ ，其是由氧离子顶角相连形成的三度空间网络（如图1-4所示），其排列是无序的，缺乏对称性和周期性，故不同于石英晶体结构。

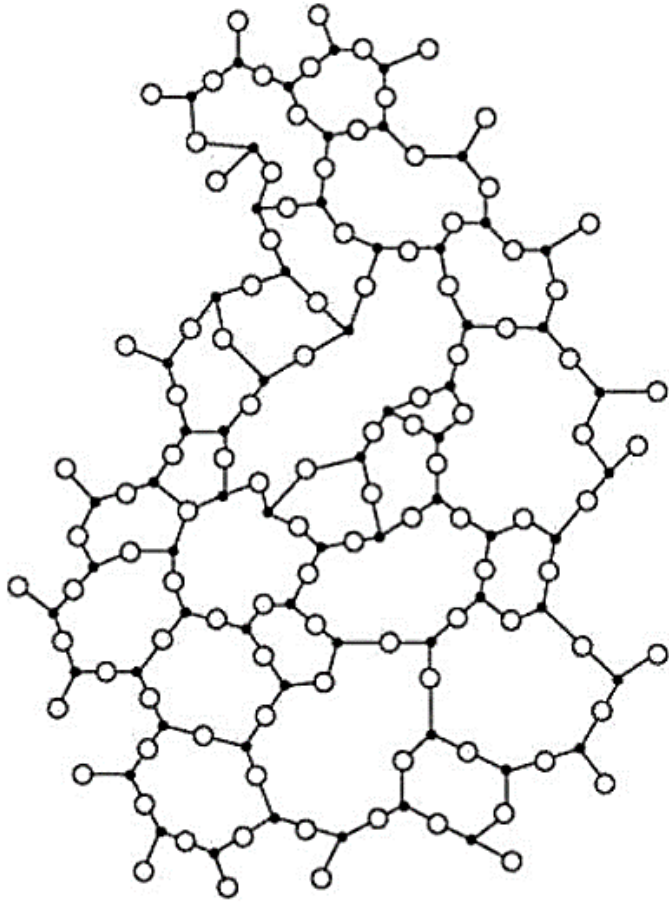
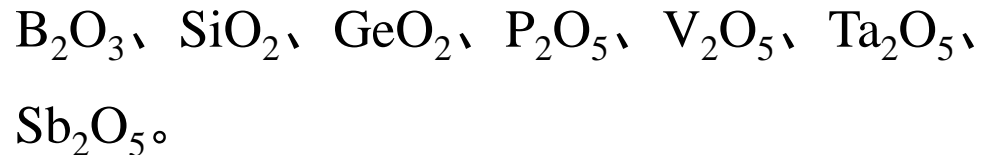


图1-5 无规则网络结构学说的
玻璃结构模型示意图

无规则网络学说认为玻璃结构单元 (A_mO_n) 形成玻璃的所具备的条件为:

- 1) 每个氧离子应与 ≤ 2 个阳离子相连;
- 2) 围绕阳离子A周围的阴离子数 (配位数) 为3或4;
- 3) 网络中结构单元通过顶角相连, 不能为共有边或共有面相连;
- 4) 每个结构单元至少有3个顶角与阴离子相连, 并且形成三维无规则连续网络。

满足上述条件的玻璃结构单元分别为:





■ 两种学说的比较

晶子学说：

1. 玻璃是由无数“晶子”所组成；
2. 晶子不同于一般微晶，是带有点阵变形的有序区域，它们分散在无定形介质中；
3. 晶子区域到无定形区域是逐步过渡的，两者没有明显的界限。

晶子学说揭示了玻璃结构的**微观不均匀性**和**近程有序性**。该学说对于**玻璃分相**、**晶化**等本质的理解有重要价值，但是也存在尚未解决的问题，如晶子尺寸大小、晶子化学组成、晶子含量。

无规则网络学说：

1. 玻璃的近程有序性与晶体结构相似，结构单元是三角体或四面体；
2. 玻璃的远程无序性体现在结构单元以顶角相连形成的无序三维空间连续网络。

无规则网络学说强调了玻璃中多面体相互间排列的**连续性**、**均匀性**和**无序性**。这可以解释玻璃的各向同性，以及玻璃性质随成份变化的连续性等基本特性。获得较为广泛的应用和认可。

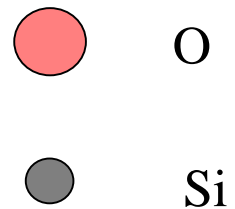
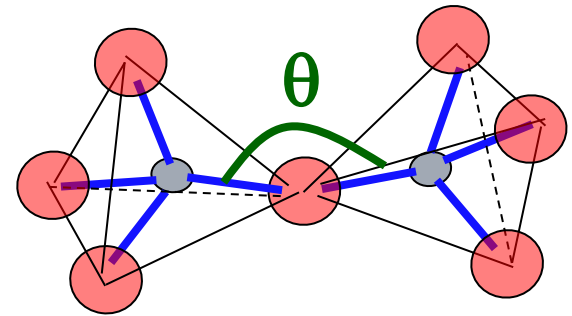
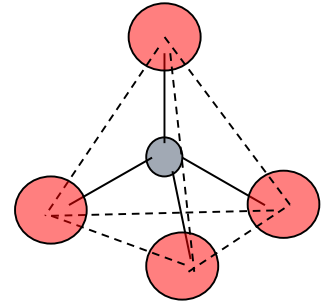


1.6 几种典型的玻璃结构

1.6.1 硅酸盐玻璃结构

■ 石英玻璃

- 仅由 SiO_2 组成，基本结构单元硅氧四面体 $[\text{SiO}_4]$ ；
- 硅位于四面体的中心，氧原子位于四面体的顶角；
- O-Si-O键角 $120\text{-}180^\circ$ ，Si-O键是极性共价键，键强大，离子与共价各占50%；
- 硅氧四面体正负电荷重心重合，不带极性；
- 硅氧四面体以顶角相连形成三维空间的架状结构；



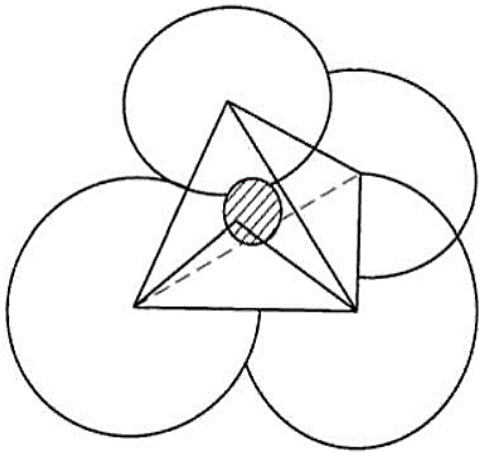
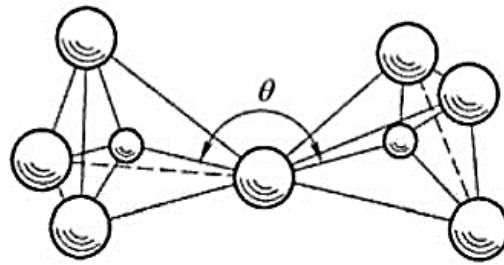
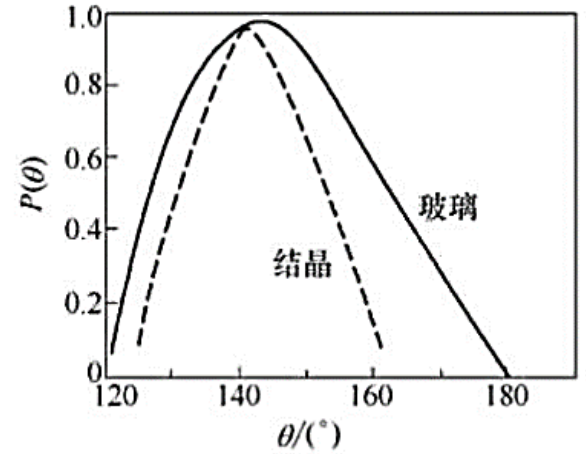


图1-6 $[\text{SiO}_4]$ 四面体示意图



(a)



(b)

图1-7 Si—O—Si 键角的分布

(a) 相邻两硅氧四面体之间的Si—O—Si 键角示意图 (b) 石英玻璃和方石英晶体的Si—O—Si 键角分布曲线图



[SiO₄]结构特性决定了石英玻璃:

- 高软化点
- 高粘度
- 膨胀系数小
- 机械强度高
- 化稳性好
- 透紫外、红外线好
- 结构开放 高压透气

硅酸盐玻璃中SiO₂含量愈高, 上述各种性质就愈好。



1.6 几种典型的玻璃结构

1.6.1 硅酸盐玻璃结构

■ 碱硅酸盐玻璃

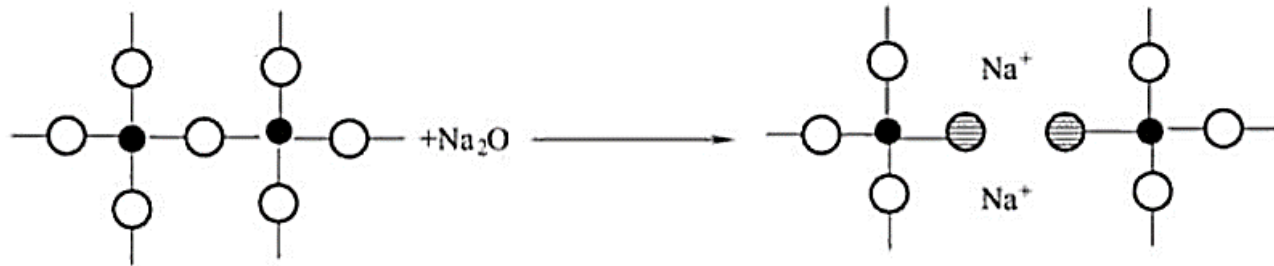
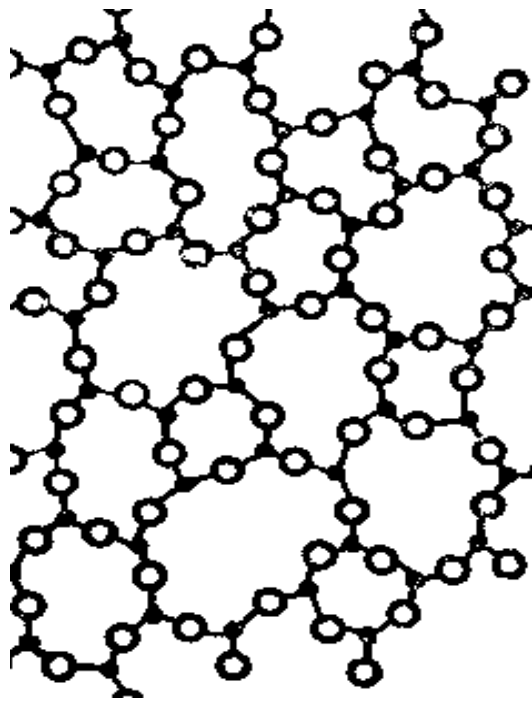


图1-8 Na_2O 对 SiO_2 网架结构的解聚作用

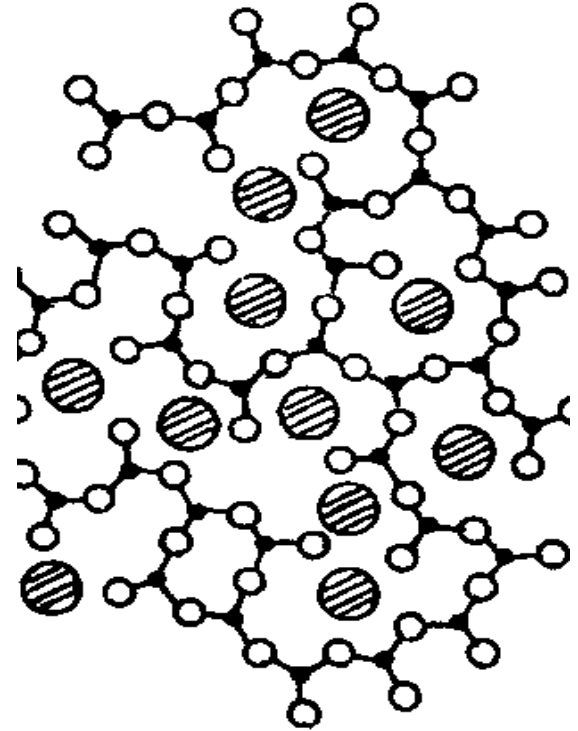
○ — 桥氧 ◐ — 非桥氧 ● — 硅

碱金属氧化物提供氧，使原有的三度空间网络发生解聚作用。1个O原子都为2个Si原子所共用称为桥氧(见图1-8)，开始出现与1个Si原子键合的氧称为非桥氧。

非桥氧的出现，使硅氧四面体失去原有的完整性和对称性，使玻璃结构疏松，并导致粘度变小、热膨胀系数变大、机械强度和化学稳定性下降。



加入
RO或R₂O





玻璃结构网络参数表达式:

$$\begin{cases} X=2R-Z \\ Y=2Z-2R \end{cases}$$

式中 X—表示氧多面体的平均非桥氧数；

Y—表示氧多面体的平均桥氧数；

Z—表示氧多面体的配位数；

R—表示氧多面体的O与中心离子（Si、B、P、Ge）原子比值，即O/Si等。

如某钠硅玻璃组成(mol%)为：Na₂O 20%， SiO₂ 80%。Z=4，
R=O/Si= (20+2×80) /80=2.25， 则计算结果X=0.5， Y=3.5



1.6 几种典型的玻璃结构

1.6.1 硅酸盐玻璃结构

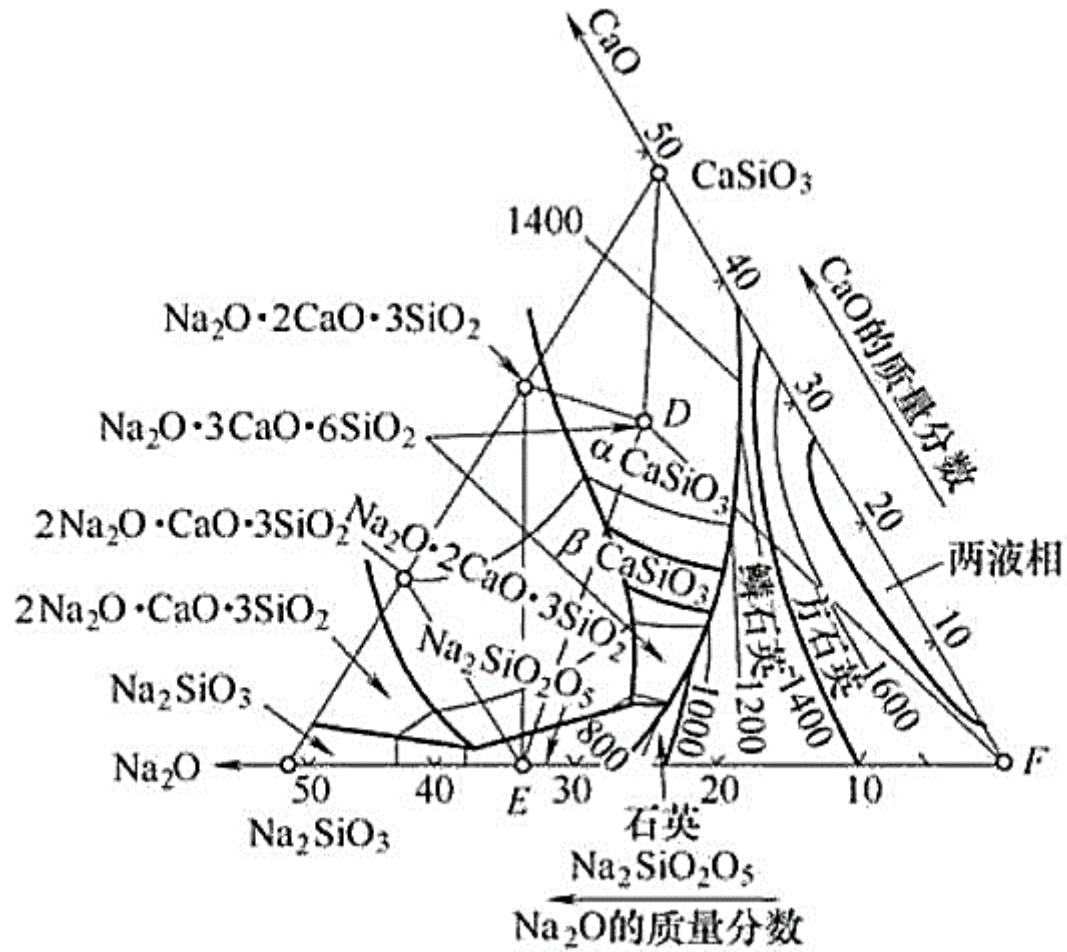
■ 二元碱硅酸盐玻璃 ($\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$)

比石英玻璃性能变差，一般无实用价值。

■ 钠钙硅玻璃

Ca^{2+}

钠硅玻璃中加入 CaO ，使玻璃的结构和性质发生明显的改变，表现在结构的加强，一系列物理化学性能变好。目前大多数的实用玻璃都属于以钠钙硅为基础的玻璃，例如瓶罐玻璃、平板玻璃、器皿玻璃。为了改善其性能，还需要添加少量 Al_2O_3 和 MgO 。



NaO-CaO-SiO₂系统相图

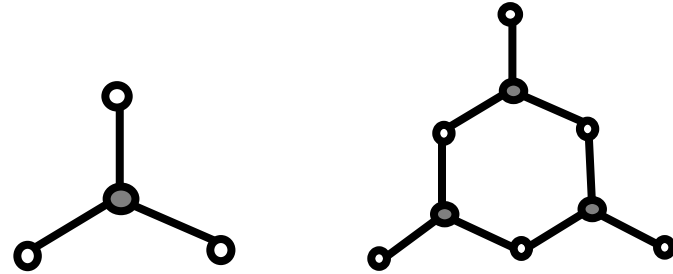


1.6 几种典型的玻璃结构

1.6.2 硼酸盐玻璃结构

■ 氧化硼玻璃

B₂O₃玻璃结构模型



1. [BO₃]或硼氧环构成层状结构，[BO₃]三角体结构是B原子突起的平面三角形构造，3个O原子形成三角形。层间以范德华力或 π 键相连。
2. B-O键是极性共价键，其共价键占56%，[BO₃]正负电荷重心重合，不带极性；
3. 低温时，该玻璃结构由桥氧连接的硼氧三角体和硼氧三元环形成向空间发展的层状网络，而较高温度形成链状结构。

单组分硼氧玻璃性能表现：

软化点低（约450°C），化学稳定性差，热膨胀系数大，没实用价值。

层状 \longrightarrow 链状

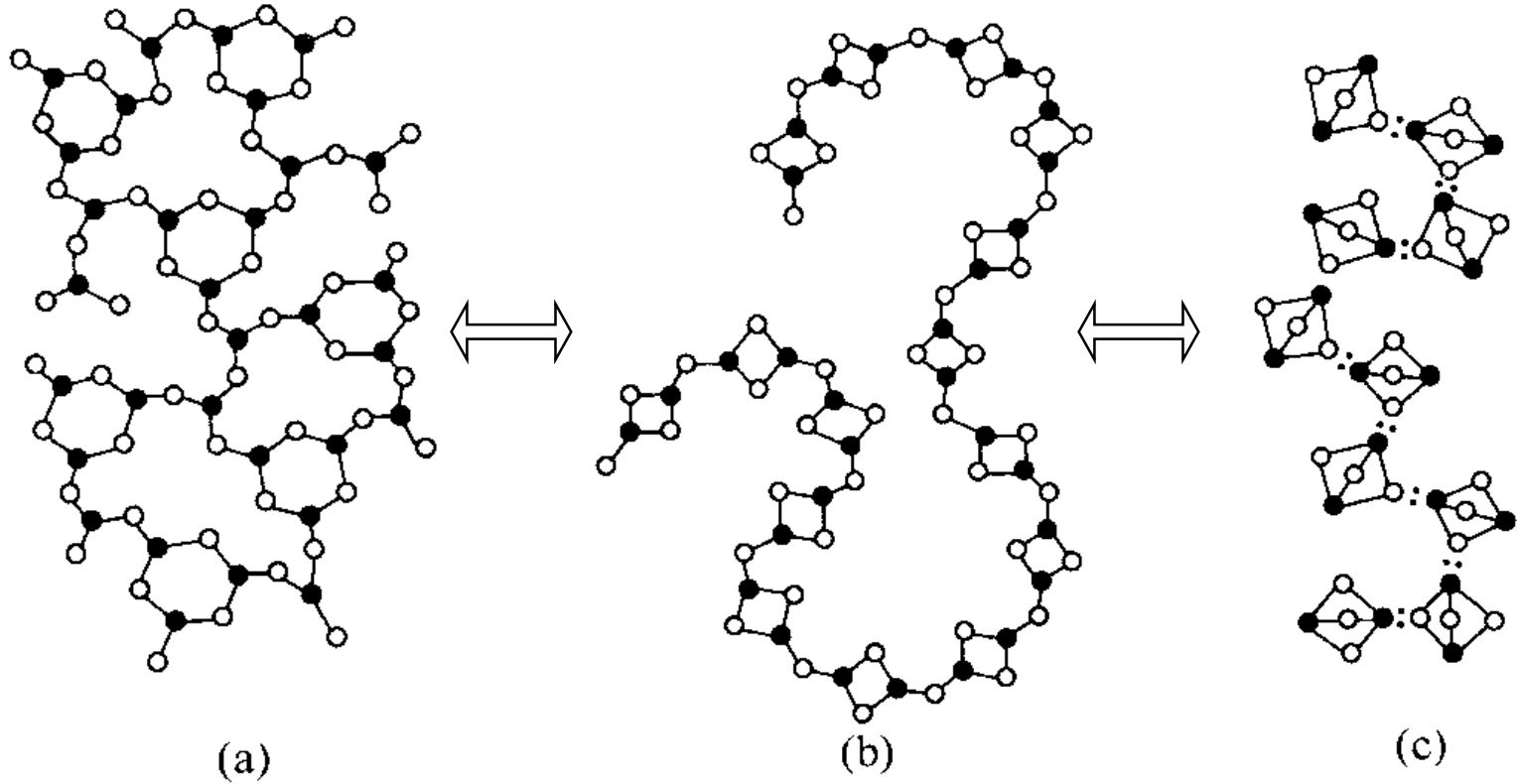


图1-11 氧化硼在不同温度的结构模型

● 硼 ○ 氧



1.6 几种典型的玻璃结构

1.6.2 硼酸盐玻璃结构

■ 碱硼硅酸盐玻璃

硼氧反常：

在钠硅酸盐玻璃中加入氧化硼时，性质曲线上产生极值的现象。

原因： Na_2O 提供的游离氧使 $[\text{BO}_3] \rightarrow [\text{BO}_4]$

结构 层状 \rightarrow 架状 性质变好

游离氧过多后， O_{nb} 多，转化停止，性质又变差

结构特点：

$\text{Na}_2\text{O} / \text{B}_2\text{O}_3 = 1$ 为极值点（摩尔比）

$\text{Na}_2\text{O} / \text{B}_2\text{O}_3 > 1$ 时： $[\text{BO}_3] \rightarrow [\text{BO}_4]$ 网络得以加强，性质变好。

$\text{Na}_2\text{O} / \text{B}_2\text{O}_3 \leq 1$ 后，玻璃中链状、层状结构相对增多，性质又向相反方向变化。

优点是热膨胀系数小，具有良好的热稳定性、化学稳定性和电学性质。

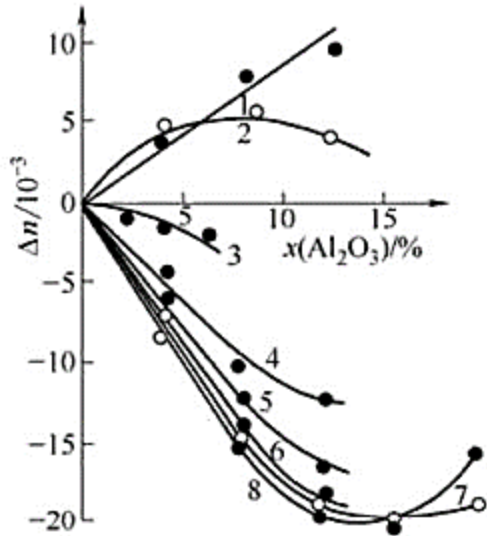


图1-16 $16\text{Na}_2\text{O} \cdot \gamma\text{B}_2\text{O}_3 \cdot x\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (84-x-\gamma)\text{SiO}_2$ 系列玻璃折射率变化
1 $\rightarrow \gamma=0$ 2 $\rightarrow \gamma=4$ 3 $\rightarrow \gamma=8$ 4 $\rightarrow \gamma=12$
5 $\rightarrow \gamma=16$ 6 $\rightarrow \gamma=20$ 7 $\rightarrow \gamma=24$ 8 $\rightarrow \gamma=32$

硼--铝反常现象:

钠硼铝硅玻璃中，当玻璃中不存在 B_2O_3 时， SiO_2 能使折射率、密度上升；当玻璃中存在 B_2O_3 时，用 Al_2O_3 代替 SiO_2 ，随着 B_2O_3 含量的不同出现不同的趋势。



1.6 几种典型的玻璃结构

1.6.3 磷酸盐玻璃结构

- 基本结构单位 $[PO_4]$ ，P是5价离子，故 $[PO_4]$ 中有一个键是双键，无法与其它四面体产生键合，最多只与三个四面体连接
- 层状结构，层间为范德华力，导致磷酸盐玻璃的软化温度及化稳性较低、粘度小、吸湿性强无实用价值。
- 引入一定量的 Al_2O_3 或 B_2O_3 ，将形成 $[AlPO_4]$ 或 $[BPO_4]$ 组团，使 P_2O_5 玻璃中的层状或链状结构转变为架状结构，导致性能改善。
- 磷酸盐玻璃常用于制造光学玻璃，透紫外线玻璃，吸热玻璃和耐酸玻璃等。
- 极易析晶、化稳性差、易挥发，成本高。

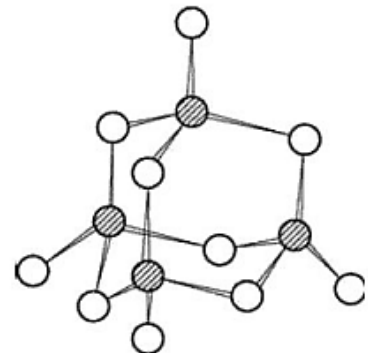
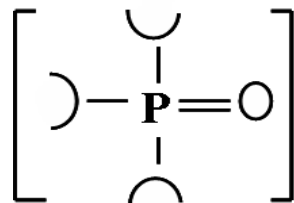


图1-18 P_4O_{10} 分子结构示意图

●—磷 ○—氧



1.6 几种典型的玻璃结构

1.6.4 重金属氧化玻璃结构

重金属氧化物主要是以 PbO 、 Bi_2O_3 等高原子量金属氧化物为主形成的玻璃，并且重金属氧化物含量大于50wt%。

重金属氧化物以离子键为主，其不能单独形成玻璃，必需添加第二或第三组分才能形成玻璃。

当 $\text{PbO-Bi}_2\text{O}_3$ 中加入 B_2O_3 后， B^{3+} 以 $[\text{BO}_3]$ 孤立状态存在，随着 B_2O_3 加入量增加，形成了聚合结构阳离子团。这种结构对 $[\text{PbO}]^{2+}$ 、 Bi^{3+} 起到阻隔作用，导致 $[\text{PbO}_x]$ 、 $[\text{BiO}_y]$ 多面体的畸变，并且无序堆积在一起，因而形成了无定型玻璃。



1.6.5 其他玻璃结构

■ 硫系玻璃

硫系玻璃主要是以As-S和Se-S系统组成，聚合形成链状网络结构的玻璃态物质，主要通过硫属元素（S、Se、Te）的“桥联”作用来实现的。

硫属化合物玻璃是重要的半导体材料、透红外材料、电子封接材料等。它具有特殊的开关效应，近年来已用作光开关的光电导体。

■ 卤系玻璃

卤化物玻璃通常是由金属卤化物(主要是氟化物)组成，它的结构特点是通过第VII A族元素的“桥联”作用，把结构单元连接成架状、层状或链状结构。

氟化物玻璃具有超低折射和色散的特性，是重要的光学材料。



1.6.5 其他玻璃结构

■ 金属玻璃

金属玻璃是一类由金属合金经过快速凝固的方法制成的非晶态玻璃材料，其兼有玻璃和金属的特性，并且有超常的物理化学性能。

■ 有机玻璃

有机玻璃在工业上又叫作聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）。PMMA是一种长链高分子，它具有非晶结构。

有机玻璃在了广告宣传、防弹材料、建筑采光板、高速公路隔音反射板、灯罩等方面得到了广泛应用。

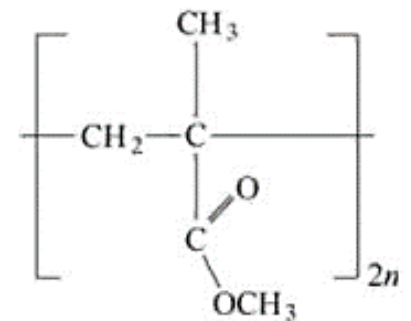


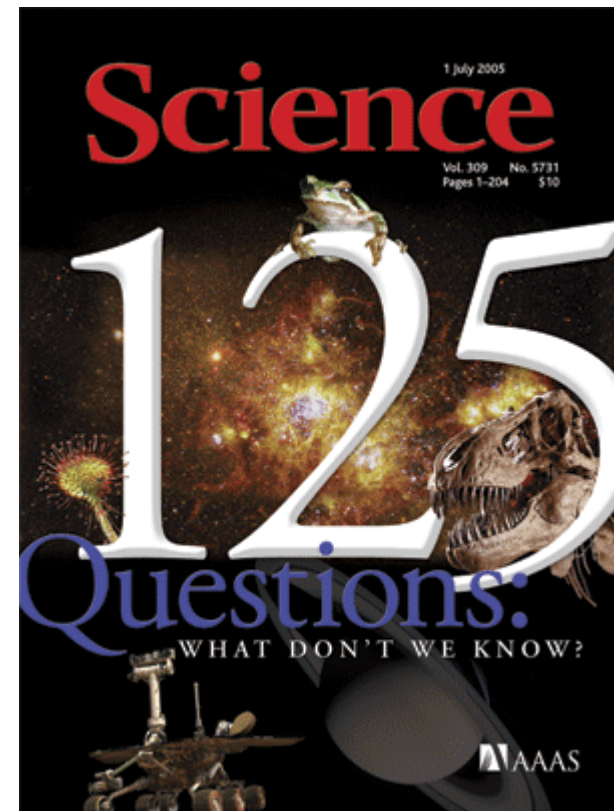
图1-22 聚甲基丙烯酸甲酯分子结构示意图

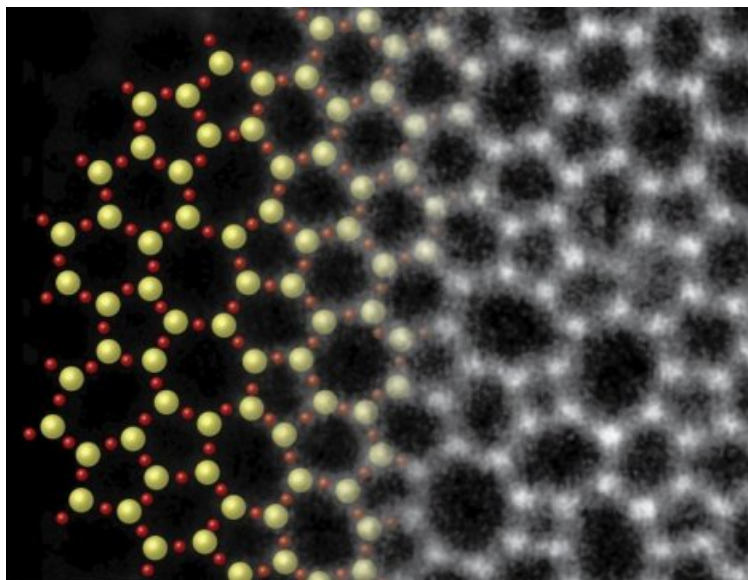


为纪念创刊125周年，*Science* 杂志于2005年7月提出了125个重要的科学问题，其中包含25个最突出的重点问题

（highlighted questions）以及其他100个生命科学、物理学、数学等领域的难题。[\(*Science* 125th Anniversary SPECIAL ISSUE Vol 309, Issue 5731\)](#)

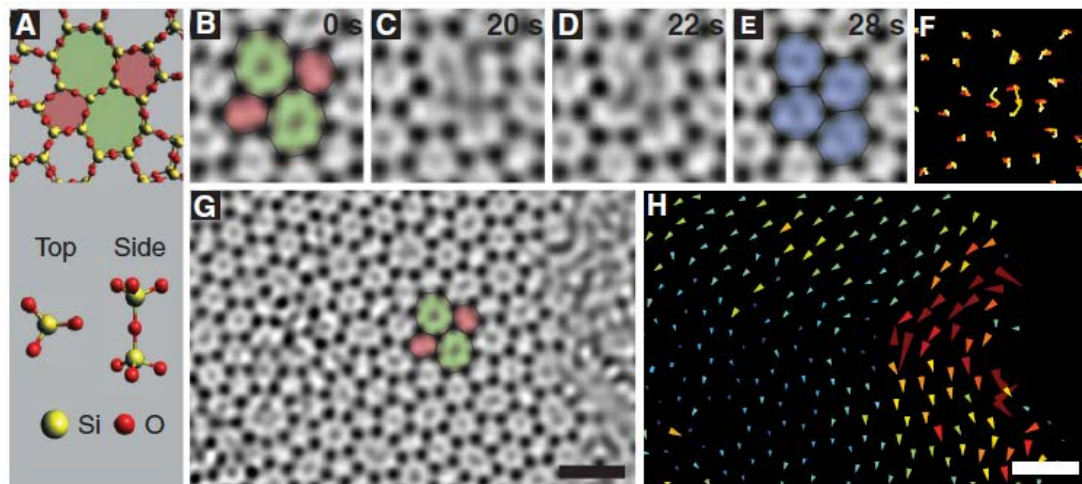
47 玻璃态物质的本质是什么？





2013年吉尼斯世界纪录：世界上最薄的氧化硅玻璃，仅两个原子层厚度2D结构硅酸盐玻璃负载在石墨烯上，使得透射电子显微原子级别分辨Si-O网络成为可能。

(ACS Nano Lett, 2012, 12:1081-1086)



原子级别分辨率的电子显微镜，直接观测到2D结构硅酸盐玻璃的Si-O原子舞动 (Science, 2013, 342:224-227)



问题1：玻璃为什么是透明的？

问题2：请介绍玻璃的种类和用途