

高折射率低比重光学玻璃的研究

赵东来 杜占平 李东宁

本文以 $\text{SiO}_2\text{—TiO}_2\text{—Nb}_2\text{O}_5\text{—M}_2\text{O}$ 四元玻璃系统作为高折射率、低比重光学玻璃的基础,研究了玻璃成分对性质的影响,以及添加各种氧化物的作用,并对其中某些规律进行了初步讨论。同时对玻璃组成及热处理对含钛玻璃的光透过的影响也做了初步探讨。

一、前 言

高折射率、低比重玻璃研究是发展新型光学玻璃、改善老牌号商品光学玻璃性能的主要方向之一。这类玻璃有利于大型光学仪器的轻量化,对航天光学仪器及遥感技术的发展具有重要意义。在西德及日本均已出售该类商品玻璃。

降低高折射率玻璃比重的有效途径是向玻璃中引入一定量的二氧化钛。二氧化钛作为光学玻璃的组成已有很多报导^[1-2],但是系统研究二氧化钛在复杂的四元系统中的物理化学性质变化规律的工作甚少。关于钛离子在玻璃中的结构也没有统一看法。Teichi Hanada和Nahiro^[3]在研究 $\text{Na}_2\text{O—TiO}_2\text{—SiO}_2$ 三元系统时指出,钛离子的配位数并不固定为6,它可以根据二氧化钛的含量不同由六配位变到四配位。E. L. Ahdrashitara^[4]则认为钛在硅酸盐玻璃中的结构作用是离子修饰体,还是网络生成体,取决于碱离子的浓度和种类。Bh. V. Janakirama Rao^[5]在研究 $\text{K}_2\text{O—SiO}_2\text{—TiO}_2$ 系统玻璃生成区时,提出 Ti^{4+} 离子在该系统中起着双重结构作用。在高硅区 Ti^{4+} 离子四面体配位占优势,而在低硅区,八面体配位占优势。

我们选择了 $\text{SiO}_2\text{—TiO}_2\text{—Nb}_2\text{O}_5\text{—M}_2\text{O}$ 做为研制高折射率、低比重光学玻璃的基础系统。确定了当 M_2O 为 Na_2O 、 K_2O = 20mol%时, $\text{SiO}_2\text{—TiO}_2\text{—Nb}_2\text{O}_5$ 假三元系统的玻璃生成范围。测定了该系统玻璃的光学常数、比重、析晶本领及光谱透过曲线。研究了在该系统内加入二价氧化物时,玻璃的物理性质变化及热处理与玻璃组成对含钛玻璃光透过的影响。根据对该系统的研究,得出了折射率 $n_D = 1.70\text{—}1.80$ 、 $\nu_D = 33\sim 23$ 、比重 $d = 2.9\text{—}3.3$ 克/[厘米]。高折射率、低比重光学玻璃的组成,具有实用价值。

二、实验方法

玻璃生成范围是以50克炉料在铂坩中熔化,浇注在铸铁模上,在空气中淬冷后,用目视法直接确定的。测试所用的实验玻璃,每次炉料为200克。玻璃搅拌均匀后,浇注在预热的铁模上成型,再送入马福炉中粗退火。

在梯度炉内,用强迫结晶法测定玻璃的析晶本领。

用排液失重法测定玻璃的密度，测试精度为 1×10^6 。

用V—棱镜折光仪测定玻璃的折射率 n_D 、 n_C 、 n_F ，测试精度为 2.5×10^{-5} 。

可见区的光谱透过曲线采用岛津 UV—210 自动记录分光光度计测量。样品厚度均为 5 毫米。

三、实验结果

1. 玻璃生成范围

实验确定的玻璃生成范围是图 1 图 2

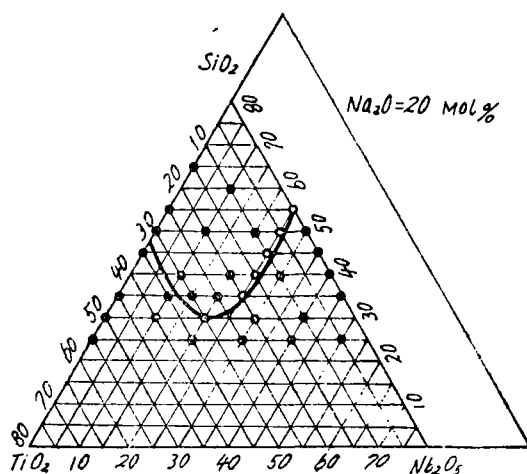


图 1 SiO_2 — TiO_2 — Nb_2O_5 — Na_2O 四元系统玻璃生成范围

●成玻璃点 ○半成玻璃点 ⊗不成玻璃点

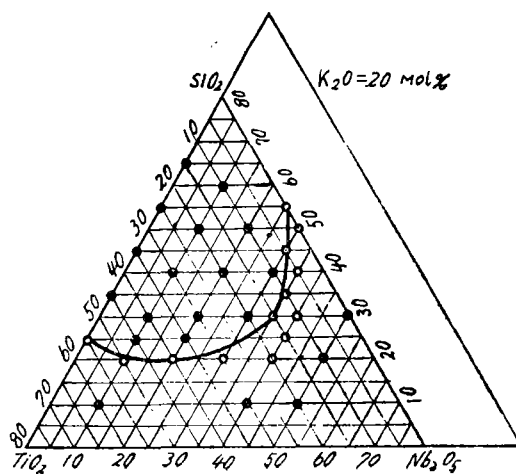


图 2 SiO_2 — TiO_2 — Nb_2O_5 — K_2O 四元系统玻璃生成范围

●成玻璃点 ○半成玻璃点 ⊗不成玻璃点

由图可见，含 K_2O 系统玻璃的生成范围大于含 Na_2O 系统的玻璃生成范围。同时也可以看出，由成玻璃区到非成玻璃区有半成玻璃区。我们确定的玻璃生成范围采用了 50 克炉料，最高熔化温度为 1500°C 。如果减少炉料量，提高熔化温度及增加淬火速度，该系统的玻璃生成范围将可扩大。

试验中我们发现，在高硅区熔体的粘度大，熔化温度高，玻璃的光透过高。在高钛区，玻璃的粘度很小，玻璃的结晶速度相当大，且常出现乳白分相，玻璃极不稳定。在高铌区熔体难熔，氧化铌在该系统中的溶解度不大，在该区常伴有未熔物沉淀于坩埚底部。

在高硅区，玻璃呈浅黄色，光谱透过率高。在高钛区，玻璃呈深棕色，光谱透过率低。在高铌区，玻璃的光谱透过率介于上述两区之间。

2. 析晶本领

将浇注成 $\phi 5 \times 300\text{mm}$ 棒状玻璃样品置于瓷舟中，在 $660 \sim 980^\circ\text{C}$ 的梯温电炉中保温一小时，冷却后，观察玻璃样品的析晶情况。

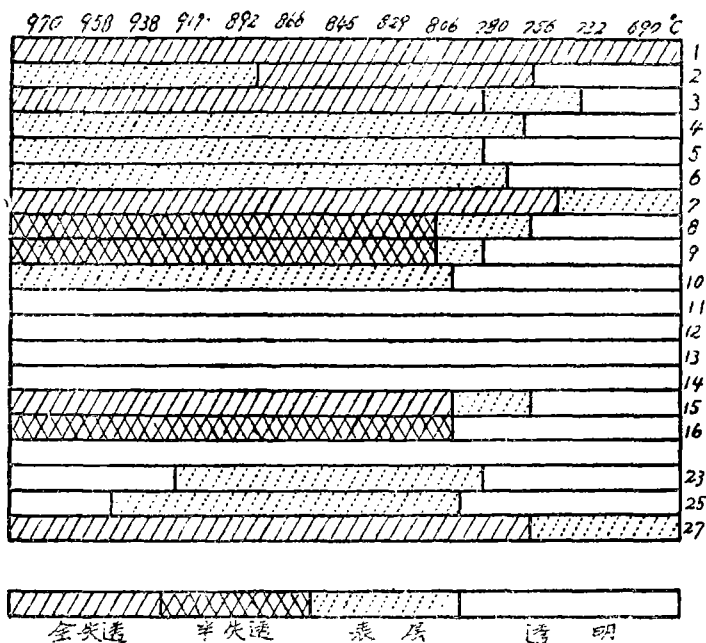


图3 $\text{SiO}_2\text{—TiO}_2\text{—Nb}_2\text{O}_5\text{—Na}_2\text{O}$ 四元系统玻璃析晶本领

图3是在 $\text{SiO}_2\text{—TiO}_2\text{—Nb}_2\text{O}_5\text{—Na}_2\text{O}$ 四元系统中用 SiO_2 代 TiO_2 、 SiO_2 代 Nb_2O_5 以及 SiO_2 代 B_2O_3 后玻璃的析晶本领变化。其玻璃组成见表1。

由图3可见，当 TiO_2 的含量在15mol%、 Nb_2O_5 的含量在5mol%以下时，均能改善玻璃的抗结晶性能。亦即玻璃的液相线温度降低，结晶速度减小。超过这个含量，玻璃的抗结晶能力变坏。

表1

熔炼号	化学组成mol%				折 射 率 n_D	平均色散 $n_F - n_C$	比 重 d
	SiO_2	TiO_2	Nb_2O_5	Na_2O			
DBZ3-1	40	30	10	20	1.8497		3.25
-2	45	25	10	20	1.8044		3.20
-3	50	20	10	20	1.7660	0.02967	3.12
-4	55	15	10	20	1.7314		3.12
-5	60	10	10	20	1.7050		3.02
-6	65	5	10	20	1.6638	0.02086	2.92
-7	40	20	20	20	1.8880		3.42
-8	45	20	15	20	1.8275	0.03628	3.28
-9	50	20	10	20	1.7660	0.02967	3.12
-10	55	20	5	20	1.6989	0.02375	2.90
-11	57	20	3	20	1.6638	0.02091	2.81
-12	60	20	0	20	1.6251	0.01781	2.68
-13	60	15	5	20	1.6585	0.02014	2.84
-14	60	10	10	20	1.6893	0.02409	2.98
-15	60	5	15	20	1.7217		3.13
-16	60	0	20	20	1.7452	0.02697	3.23

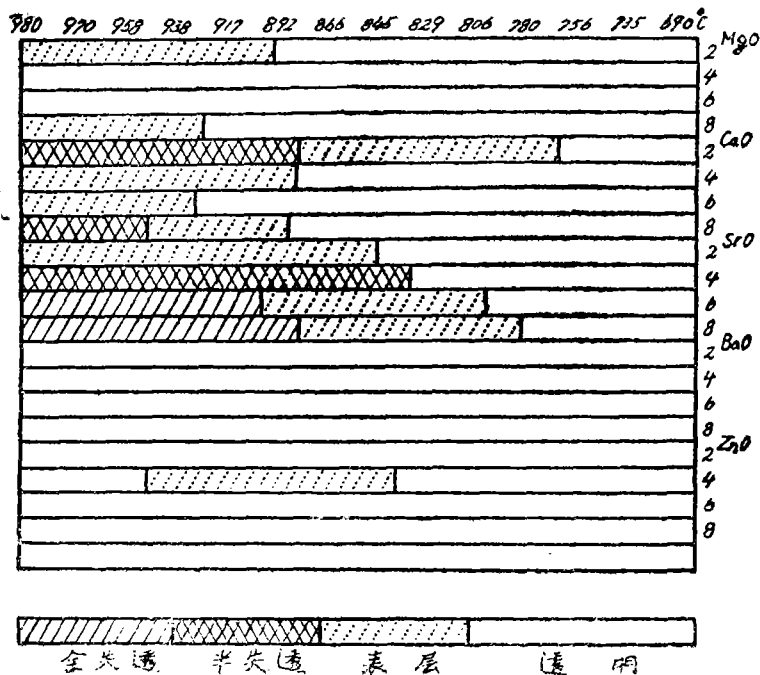


图4 在 $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Nb}_2\text{O}_5\text{-Na}_2\text{O}$ 四元系统中用 MgO 、 CaO 、 SrO 、 BaO 及 ZnO 代 TiO_2 后玻璃的析晶本领

表2

熔炼坩号	化 学 组 成						
	SiO_2	TiO_2	Nb_2O_5	Na_2O	B_2O_3	MgO	As_2O_3
DBZ3-36	53	18	5	20	2	2	0.5
-37	53	16	5	20	2	4	0.5
-38	53	14	5	20	2	6	0.5
-39	53	12	5	20	2	8	0.5
-28	53	18	5	20	2	2 ^{CaO}	0.5
-29	53	16	5	20	2	4	0.5
-30	53	14	5	20	2	6	0.5
-31	53	12	5	20	2	8	0.5
-44	53	18	5	20	2	2 ^{SrO}	0.5
-45	53	16	5	20	2	4	0.5
-46	53	14	5	20	2	6	0.5
-47	53	12	5	20	2	8	0.5
-32	53	18	5	20	2	2 ^{BaO}	0.5
-33	53	16	5	20	2	4	0.5
-34	53	14	5	20	2	6	0.5
-35	53	12	5	20	2	8	0.5
-40	53	18	5	20	2	2 ^{ZnO}	0.5
-41	53	16	5	20	2	4	0.5
-42	53	14	5	20	2	6	0.5
-43	53	12	5	20	2	8	0.5

由图3的23、25及27样品的析晶性能图可以看出：加入 B_2O_3 并不能改善玻璃的抗结晶性能，反而使玻璃结晶加剧，并且随 B_2O_3 含量的增多玻璃的结晶也越来越严重。 B_2O_3 的含量达到10mol%时，该系统已不成玻璃。

图4是在 $SiO_2-TiO_2-Nb_2O_5-Na_2O$ 四元系统中用 MgO 、 CaO 、 SrO 、 BaO 以及 ZnO 等二价金属氧化物代替 TiO_2 后玻璃结晶性能的变化情况。玻璃的组成见表2。

由图4可见，用两价金属氧化物代替 TiO_2 ，玻璃的抗结晶性能增强，玻璃的液相线温度降低，结晶速度减小，同时也可以看出随二价金属氧化物的离子半径的增加，玻璃的抗结晶能力增强。 BaO 对改善该系统玻璃的抗结晶性为最好，引入 ZnO 也明显改善玻璃的抗结晶性能。

由图3的14、15、16样品的析晶图可见，用 Nb_2O_5 代替 TiO_2 ，玻璃的抗结晶能力变坏。当玻璃组成中只含有20mol%的 Nb_2O_5 （不含 TiO_2 ）玻璃结晶严重。

3. 折射率和比重

图5是 $SiO_2-TiO_2-Nb_2O_5-Na_2O$ 四元系统中用 TiO_2 代替 SiO_2 、 Nb_2O_5 代替 SiO_2 以及 Nb_2O_5 代 TiO_2 时，实验玻璃的折射率随组成变化的关系图。

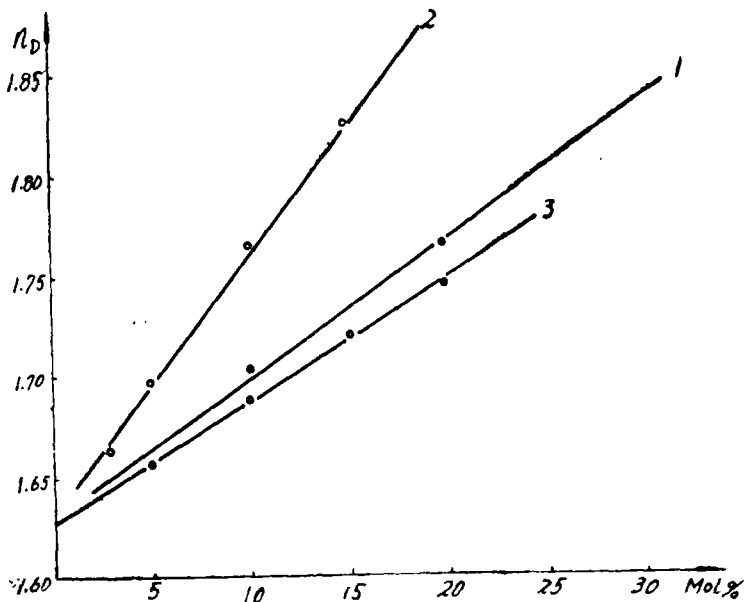


图5 ① TiO_2 代 SiO_2 ；② Nb_2O_5 代 SiO_2 ；③ Nb_2O_5 代 TiO_2 玻璃的折射率变化

由图可见： TiO_2 代 SiO_2 、 Nb_2O_5 代 SiO_2 ，玻璃的折射率急速地线性增加，这说明 TiO_2 和 Nb_2O_5 两种氧化物能显著增加玻璃的折射率。 Nb_2O_5 代 TiO_2 ，曲线的斜率比较小，说明玻璃折射率略有增加。

图6是 $SiO_2-TiO_2-Nb_2O_5-Na_2O$ 四元系统用 TiO_2 代替 SiO_2 、 Nb_2O_5 代替 SiO_2 以及 Nb_2O_5 代 TiO_2 时，实验玻璃的比重变化趋势。

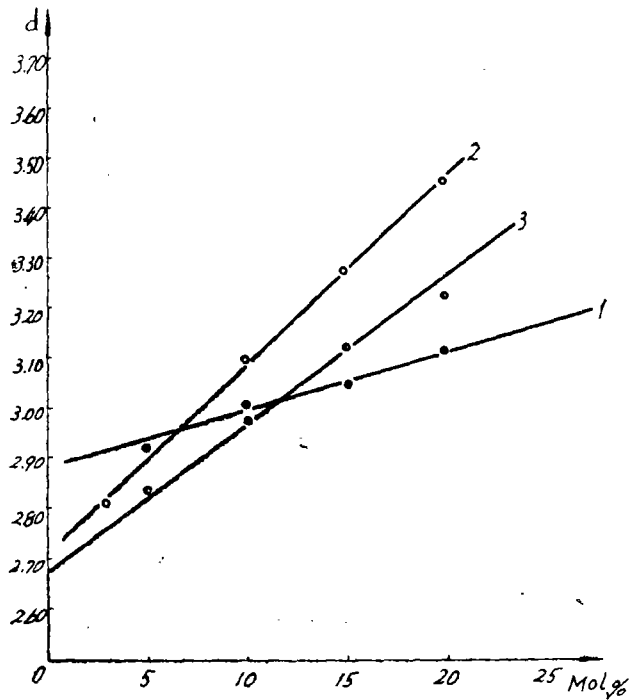


图6 ①TiO₂代SiO₂, ②Nb₂O₅代SiO₂, ③Nb₂O₅代TiO₂玻璃的比重变化

由图可见, TiO₂代SiO₂曲线的斜率明显地小于Nb₂O₅代SiO₂, 这说明在此系统内用TiO₂代替SiO₂既可以提高玻璃的折射率, 又可以使玻璃具有低比重, Nb₂O₅和TiO₂互换, 玻璃比重增加缓慢, 因此在选定高折射率、低比重光学玻璃组成时, 可用氧化铌代替部分氧化钛。

图7是SiO₂-TiO₂-Nb₂O₅-Na₂O系统与重火石玻璃折射率和比重的关系图。

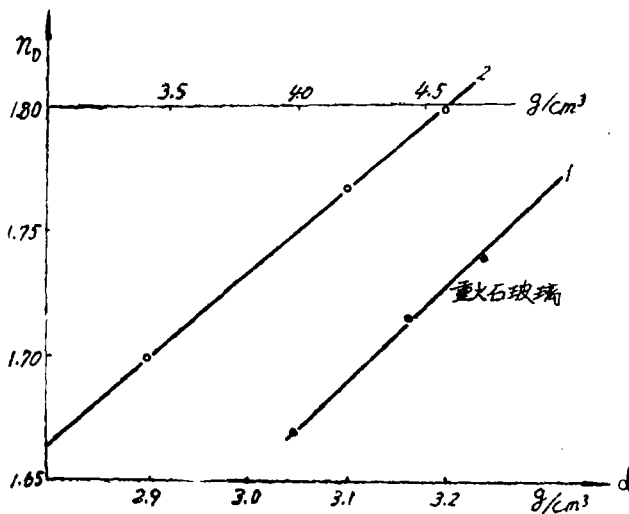


图7 SiO₂-TiO₂-Nb₂O₅-Na₂O系统与重火石光学玻璃折射率和比重的关系

由图可见，在同样的折射率时，本文选用系统的玻璃有较小的比重。

4. 光谱透过

测定实验玻璃可见光谱透过所用样品的尺寸为 $30 \times 15 \times 5$ mm，两大面抛光。

图 8 中的曲线1、2和3 是当 TiO_2 含量不变，改变 Nb_2O_5 含量所得到的光谱透过曲线。

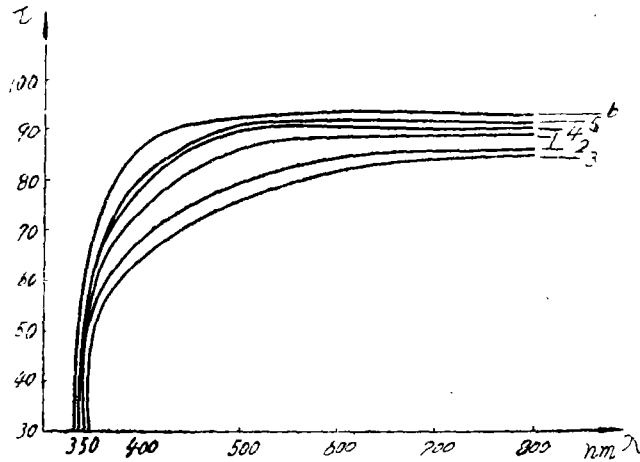


图 8 TiO_2 和 Nb_2O_5 对玻璃的光谱透过的影响

1. DBZ_s-10 ; 2. DBZ_s-11 3. DBZ_s-12 , 4. DBZ_s-14 5. DBZ_s-15 6. DBZ_s-16

由图可见， Nb_2O_5 的含量在5 mol%范围内时，将显示出随 Nb_2O_5 含量的增加而光透过率亦增加的趋势。图中的曲线4、5、6说明随 TiO_2 含量的增加，光谱透过率明显下降。

图 9 是用 SrO 分别代替玻璃中的 TiO_2 所测得的可见光光谱透过曲线。

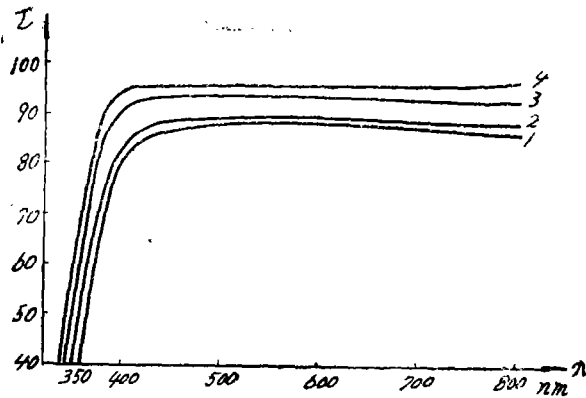


图 9 SrO 对玻璃光谱透过的影响

1. DBZ_s-44 , 2. DBZ_s-46 3. DBZ_s-45 4. DBZ_s-47

由图可见、随玻璃中SrO含量的增加，玻璃的光谱透过增加。

图10是向该系统玻璃中引入 As_2O_3 所测得的光谱透过曲线。曲线1是未加入 As_2O_3 的，曲线2和3是引入0.5wt% As_2O_3 的光谱透过曲线。引入 As_2O_3 的玻璃的光谱透过明显高于未加入 As_2O_3 的玻璃的光谱透过，这是由于氧化气氛改变了玻璃中Ti的价态平衡，使之有利于向 Ti^{4+} 离子的方向移动。减少了 Ti^{3+} 离子的相对比例，因而 As_2O_3 的引入提高了该类玻璃的光透过。

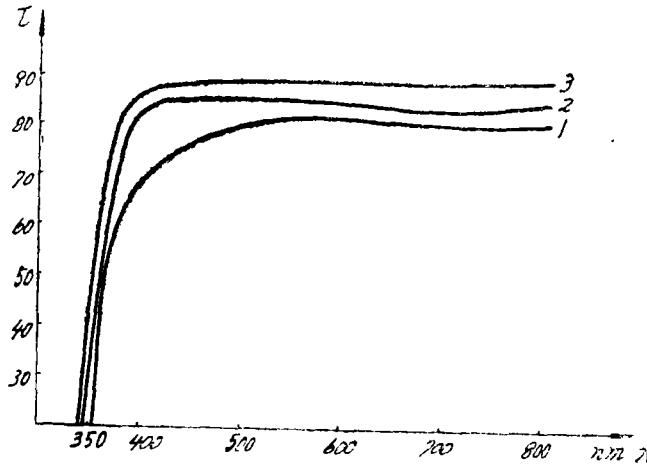


图10 As_2O_3 对玻璃光谱透过的影响

1. DBZ₃-18; 2. DBZ₃-19; 3. DBZ₃-20

热处理温度和时间对含钛玻璃光谱透过的影响也很明显。把四块同样的含钛玻璃样品分别在630°C、620°C、560°C和520°C保持1小时后，徐冷至室温，玻璃样品的光谱透过测定结果见图11。

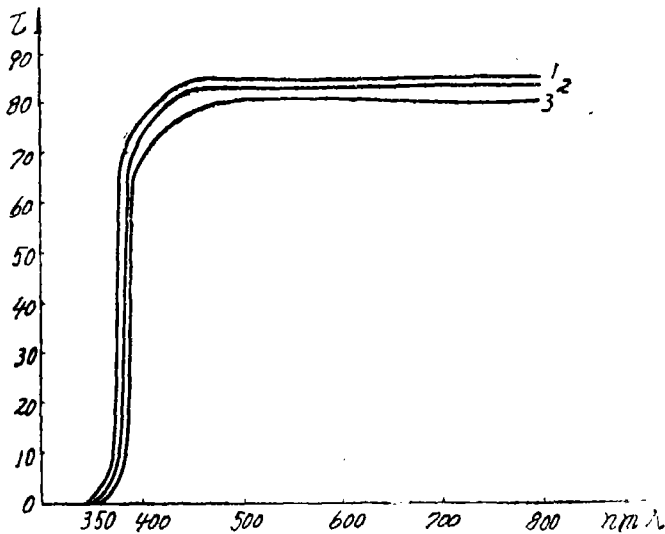


图11 热处理温度对含钛玻璃光谱透过的影响

1. DB-01-3A (退火温度520°C 1小时)
2. DB-01-3B (退火温度560°C 1小时)
3. DB-01-2A (退火温度620°C 1小时)

由图11可看出，含钛玻璃的光谱透过随热处理温度升高而明显下降。

由图12可以看出，在一定的热处理温度（620℃）下，适当延长热处理时间，可以提高玻璃的光谱透过。但保持时间过长，又会使玻璃的光谱透过降低。

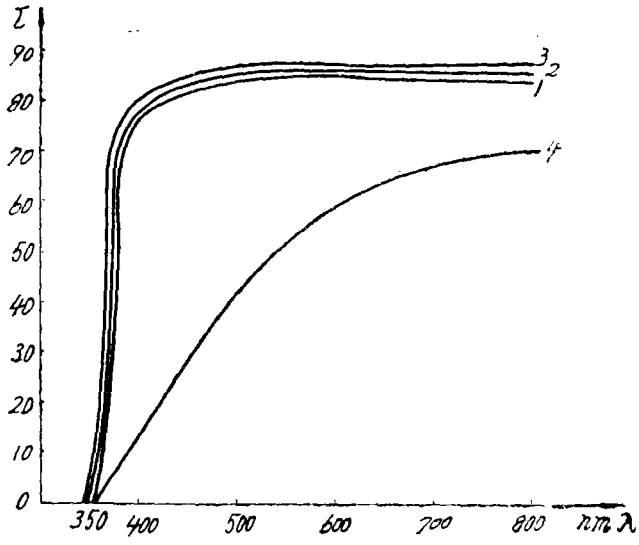


图12 热处理时间对含铁玻璃光谱透过的影响

1. DB-01-4A (620℃ 1小时)
2. DB-01-4B (620℃ 2小时)
3. DB-01-4C (620℃ 3小时)
4. DB-01-4D (620℃ 4小时)

四、讨 论

1. 关于钛在硅酸盐玻璃中的结构问题

关于钛在硅酸盐玻璃中的结构作用，这个问题目前还没有一个确切结论，而钛在硅酸盐玻璃中的配位状态也没有统一看法。二氧化钛是一种中间体氧化物，在适当的条件下，钛离子在玻璃结构中可以象硅离子那样起玻璃生成体的作用，也可以象碱或碱土金属离子那样起网络修饰体作用。

根据钛的结晶化学的研究，在复杂的钛的氧化合物中，钛常以六配位或五配位的结构存在，而以四配位存在的钛的氧化合物是很少的^[6]。钛在硅酸盐结构中有两种作用：当钛氧多面体与硅氧四面体以棱相连接则钛起修饰体阳离子的作用；当钛氧多面体与硅氧四面体以顶点相连接，与硅氧四面体形成均匀统一网络，则钛起网络生成体离子作用。因此，钛在玻璃中的结构作用，主要取决于钛氧多面体与硅氧四面体的连接方式，而不仅取决于钛离子在玻璃中的配位数。钛氧多面体与硅氧四面体的连接方式与玻璃中非桥氧的数量以及电荷平衡有关。

在硅酸盐玻璃中，加入部分碱或碱土离子，破坏了硅氧四面体组成的均匀统一结构网络，引起玻璃中单键非桥氧离子比例增多。加入中间体氧化物二氧化钛，钛离子可以受到单键非桥氧所屏蔽，电性中和一部分非桥氧，使其变成桥氧。硅离子和钛离子共用一个氧离

子, 钛氧多面体与硅氧四面体形成共顶角, 钛离子进入玻璃结构, 使结构趋于增强。当玻璃中单键非桥氧比例小的情况下, 钛离子得不到足够非桥氧的屏蔽, 只能由钛离子的配位数升高来满足电荷平衡。因此以钛离子为中心离子组成的钛氧多面体与硅氧四面体实际上是以棱相连接, 即共用两个氧离子, 因此钛在玻璃中起网络修饰体的作用。

在我们的实验中、含钾的 $\text{SiO}_2\text{—TiO}_2\text{—Nb}_2\text{O}_5\text{—K}_2\text{O}$ 四元系统的生成范围大于含钠的 $\text{SiO}_2\text{—TiO}_2\text{—Nb}_2\text{O}_5\text{—Na}_2\text{O}$ 四元系统的玻璃生成范围。这是由于钾的离子半径 ($r_{\text{K}^+} = 1.39$) 大于钠的离子半径 ($r_{\text{Na}^+} = 1.10$)。同时, 钾离子与氧离子之间的吸引力又小于钠离子与氧离子之间的吸引力 ($\text{K}^+ - \text{O}^- = 0.27, \text{Na}^+ - \text{O}^- = 0.38$)。因而在含 K_2O 系统中形成非桥氧能力大于含 Na_2O 系统的形成非桥氧能力。因而在相等的条件下, 含钾的 $\text{SiO}_2\text{—TiO}_2\text{—Nb}_2\text{O}_5\text{—K}_2\text{O}$ 系统的玻璃生成范围, 大于含钠的 $\text{SiO}_2\text{—TiO}_2\text{—Nb}_2\text{O}_5\text{—Na}_2\text{O}$ 系统的玻璃生成范围。

在低钛区, 由于碱金属离子提供了充足的非桥氧, 使多数钛离子受到非桥氧的屏蔽, 组成钛氧多面体与硅氧四面体共用顶点相连接, 形成统一的均匀网络, 使体积减小, 粘度增大, 在此区域内钛参与结构网络起着网络生成体的作用。在高钛区, 由于碱金属离子所造成的非桥氧离子不足以屏蔽大量的钛离子, 那么钛氧多面体只能与硅氧四面体共棱连接, 钛离子的配位数升高。由于钛离子的聚集作用, 使得这个区域的玻璃粘度小, 结晶速度快。在高钛区大多数 Ti^{4+} 离子处于高配位状态, 起着网络修饰体的作用。

两价金属氧化物按着离子半径的大小, 极化程度的不同, 对玻璃结构的影响也不同。表 3 给出了两价金属氧化物的离子半径和它与氧离子的吸引力^[1]

表 3

	Be^{2+}	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Sr^{2+}	Ba^{2+}	Zn^{2+}
半径 r	0.31	0.78	1.10	1.32	1.49	0.78
吸引力 $2z/a^2$	1.51	0.91	0.69	0.58	0.51	0.91

两价金属氧化物的引入, 进一步增加了玻璃中非桥氧的数目。促使更多的钛氧多面体与硅氧四面体共顶点, 而起到网络生成体的作用, 使结构趋于紧密, 增强了玻璃的抗结晶能力。同理, 随着碱土金属离子半径的增大、与氧离子的吸引力减小, 生成的钛玻璃也越稳定。其中以 BaO 为最好, 含 8mol% BaO 的钛玻璃在梯度炉内保温一小时不见结晶。

但是, 进一步增加碱或碱土金属的含量, 超过某一数值之后, 玻璃的析晶速度变快, 液相线温度上升。这是由于大量的碱或碱土离子存在, 急剧增加了玻璃中的非桥氧。除了满足钛离子的配位之后, 还有更多的非桥氧存在于结构中, 破坏了均匀统一的连续网络, 使玻璃的抗结晶性能变坏。根据我们的实验, 在 $\text{SiO}_2\text{—TiO}_2\text{—Nb}_2\text{O}_5\text{—Na}_2\text{O}$ 四元系统中 $\frac{\text{Na}_2\text{O} + \text{RO}}{\text{TiO}_2}$ 的比值在 0.8~1.2 之间所形成的玻璃是稳定的。

由以上讨论可知, 在含钛的硅酸盐玻璃中, 有大阳离子存在时, 钛离子大量占据网络生成体的位置, 而高电负性的小阳离子存在时, 钛同时占据网络生成体的位置和网络修饰体的位置。

在该系统中引入一定量的 ZnO , 可以明显改善玻璃的抗结晶性能。这是由于 Zn^{2+} 离子有 18 电子层结构, 进入玻璃网络, 增强结构。 ZnO 的引入量可以大于碱土金属氧化物的含量, 而玻璃的抗结晶性能很强。

在该系统中引入 B_2O_3 ，玻璃的抗结晶性能变坏。当 B_2O_3 的含量增至10mol%时，玻璃在高温下全部失透。 B_2O_3 是网络生成体，在玻璃中有两种配位状态，当玻璃中有充分的单键非桥氧时， B^{3+} 离子可由三配位转变成四配位，与硅氧四面体形成统一的均匀网络，增强玻璃的结构。在含钛的玻璃中，大部分非桥氧用来屏蔽 B^{3+} 离子，形成四面体进入网络，而钛离子只能受到桥氧离子的屏蔽，来满足电性中和，所形成的钛氧多面体只能与硅氧四面体共棱，起到网络修饰体的作用。由于钛离子的高场强、小半径，有强烈的聚集作用，从而造成玻璃结晶严重。

2. 含钛硅酸盐玻璃的消色问题

基质玻璃的酸碱性对钛离子的光谱影响很大。几种玻璃生成体的酸性大小的顺序是： $P_2O_5 > B_2O_3 > SiO_2 > GeO_2$ ，因而钛离子在这几种玻璃生成体中的着色能力也逐渐减弱。亦即在钛含量相同的条件下，磷酸盐玻璃的颜色最深，而锆酸盐玻璃的颜色最浅，几乎无色。过渡金属离子在碱性介质中容易呈高价态，而在酸性介质中容易呈低价态。因而钛在碱性强的基质玻璃中趋于形成高价态，玻璃的光谱透过高。所以增强玻璃的碱性是提高含钛玻璃光谱透过的有效途径。

熔炼气氛对含钛玻璃光谱透过影响也是非常明显的。根据我们的实验，含 As_2O_3 与不含 As_2O_3 的玻璃的光谱透过率相比，在可见光区的透过率可提高15%，其原因是明显的。氧化气氛促使 Ti^{4+} 与 Ti^{3+} 的平衡向着 Ti^{4+} 方向移动。 Ti^{3+} 离子的含量减少，而使玻璃的光谱透过率升高。因此在配合料中适当加入 As_2O_3 和硝酸盐，造成氧化气氛，可以提高含钛硅酸盐玻璃的光谱透过。而延长高温熔化时间，提高熔炼温度均能使含钛硅酸盐玻璃的光谱透过降低。

热处理温度和时间对含钛硅酸盐玻璃光谱透过的影响也很大，在不同的温度条件下，把同样组成的玻璃样品保持一定时间，热处理后玻璃的光谱透过是不一样的。热处理温度越高，玻璃的光吸收越大。显然，热处理促进了玻璃中邻近离子的迁移。热处理温度越高，这种迁移速度越大。由于Ti离子的作用。造成玻璃微观分相， $Fe(O)Ti$ 缔合物浓度增加，促使该类玻璃光谱透过降低。

玻璃中同时存在钛和铁时，玻璃的吸收光谱，除了铁和钛本身的吸收加和之外，还会产生铁钛相互作用的额外吸收，此额外吸收比铁钛本身的吸收要大。当钛与铁同时存在时，能形成像钛酸盐那样的键 $Fe-O-Ti$ ，钛结合到铁—氧基团上去，由于Ti通过与Fe的缔合扰动了Fe的电子能级，使吸收极限向长波方向位移，增加了可见光波段的吸收。因此降低含钛硅酸盐玻璃中的杂质铁含量，是提高该类玻璃光谱透过的根本途径。

五、结 论

本文研究了 $SiO_2-TiO_2-Nb_2O_5-R_2O$ （当 $R_2O = Na_2O, K_2O = 20mol\%$ ）四元系统玻璃的生成范围、析晶本领、光学常数、比重以及光谱透过等性质的若干变化规律，对 TiO_2 在 $SiO_2-TiO_2-Nb_2O_5-R_2O$ 四元系统中的结构作用作了初步探讨。试验工作表明：

1. $SiO_2-TiO_2-Nb_2O_5-K_2O$ 四元系统有较大的玻璃生成范围。
2. 该系统玻璃的折射率随 TiO_2 和 Nb_2O_5 含量的增加而显著增加，玻璃的比重增加缓慢。
3. 引入两价金属氧化物可以改善玻璃的抗结晶性能，引入 B_2O_3 使玻璃结晶严重。
4. TiO_2 离子在玻璃中起网络生成体作用，还是起修饰体作用，主要取决于钛氧多面

体与硅氧四面体之间的连结方式。

5. 在此系统中可制得 $n_D = 1.70 \sim 1.80$ $\nu_D = 33 \sim 23$ 、比重 $d = 2.9 \sim 3.2$ 的高折射率低比重无色光学玻璃品种系列。

参 考 文 献

- [1] M. D. Beal, J. H. Strimple Glas. Indus. 44, No9 1963, 495.
- [2] M. D. Beal J. H Strimple, Glas. Indus. 44 No10 1963, 569.
- [3] Teichi Hanada Nahiro, Jour Non-Crys. Solid 38—39 (1980) 105—110
- [4] E. I Abdrashitara, Jour Non-Crys. Solid 38—39 (1980) 75—78
- [5] Bn. V. Jama Kirama Rao, J. Amer. Cer. Soc. 46 No3 1963, 107.
- [6] Teichi Hanada Nahiro, Jour Non-Crys Solid 38—39 1980 105—110
- [7] 千福熹等著,《光学玻璃》科学出版社1964