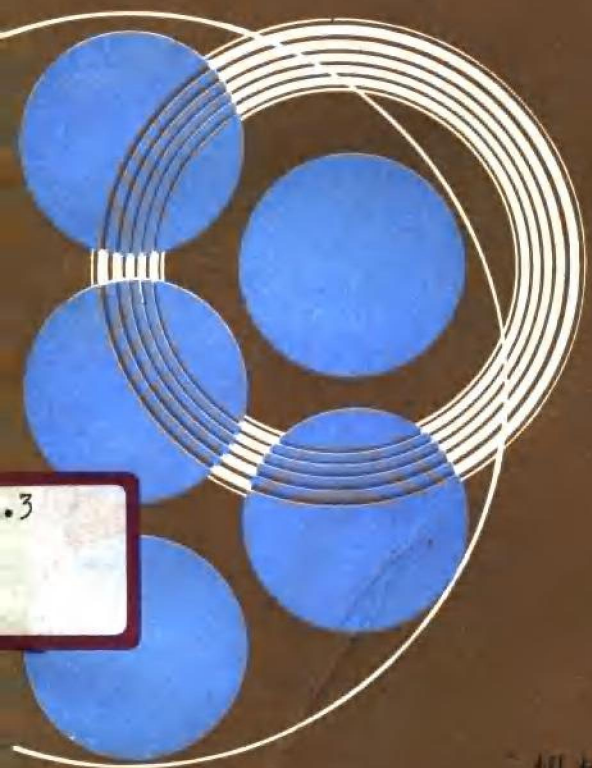


光学零件的 金刚石加工

[苏] A. И. 阿尔达玛茨基



.3

机械工业出版社

大提出的关于进一步提高光学零件生产效率这一任务。

作者从事光学零件制造的生产和研究工作，特别是从事金刚石加工工艺研究多年，决定编写本书来帮助光学生产的工作人员及与光学生产有关的金刚石工业的工作者。因此作者根据自己多年的工作和收集的当代科技文献中的一些资料，总结和系统地阐述了光学零件制造中采用金刚石工具进行加工的具体问题。在此领域中，这样的工作还是第一次，考虑到可能还存在着不足之处，因此作者并不奢求完善、彻底地阐明所有问题。但仍然希望本书将有助于光学零件金刚石加工工艺的进一步发展。在本书中，作者叙述了金刚石加工光学材料工艺的物理基础，总结了光学零件制造中关于光学材料、金刚石工具、加工机床和基本工艺等问题，且提出了提高加工效率的可能方法。

作者对参加过手稿讨论以及在全书编写中给以友好帮助、提出批评意见的专家和同志们深表感谢，这些宝贵意见对本书的出版是很有益的。

译者的话

光学零件的金刚石加工是现代化光学生产的主要技术。在光学零件生产中，采用金刚石加工所占比例的大小标志着加工水平的高低。

A.Л. 阿尔达玛茨基是苏联著名光学加工专家。本书是他专门论述光学零件金刚石加工的著作。书中论述了金刚石加工光学材料过程的机理，对金刚石工具的工作原理和制造技术，采用金刚石工具的加工设备以及加工工艺都进行了详尽的论述和介绍。本书还对光学零件金刚石加工的发展趋向进行了论述和探讨。

本书由贺佩华、张曾扬翻译，张曾扬、戚立昌校对。

由于译校者水平有限，译文中错误和不当之处在所难免，敬请批评指正。

译校者

1987年

序 言

由于在我国（苏联——译注）发现了天然金刚石的产地（1956年）和制订了合成金刚石的工业化生产工艺（1961年），才有可能将金刚石使用于技术方面。在此以前，由于缺少国产的工业金刚石，采用金刚石加工光学零件的有效工序极少。所以，使用一定数量的金刚石对于光学生产是有实际意义的。在此期间，为了编制金刚石工具的新工艺，研究工具的加工，从而确定工具的最佳应用条件，瓦维洛夫（С.И.Вавилов）国立光学研究所与一些工厂合作进行了一系列的研究。1958~1959年，当专业的金刚石工具厂还未建立起来的时候，光学机械加工企业已经采用粉末冶金法来研制工具且把它们用于光学车间的实践中。根据国立光学研究所（ГОИ）、全苏金刚石科学研究所（ВНИИАлмаз）和某些企业的研究结果，在60年代初制造了一些金刚石加工玻璃的新机床。同时，国立光学研究所、乌克兰科学院超硬材料研究所（ИСМ АН УССР）及许多企业开始研究制订合成金刚石工具的使用规范及这种工具在光学零件制造中的应用规范。这就为第九个五年计划末，用合成金刚石几乎全面地代替天然金刚石，为使许多工序过渡到金刚石加工以及研制新型的工具提供了可能性。现在，除了运用已设计成的金刚石加工新工艺并使之发展外，还要进一步完善金刚石工具的制造工艺、研究其加工的规律性、确定加工光学材料的最佳工艺条件和制造新型的设备。这些工作的目的是要完成苏共25

目 录

译者的话

序言

第一章 光学材料及其加工过程的原理	1
1. 材料及其性质	1
2. 脆性材料的研磨粉碎	17
第二章 光学零件及其制造过程	31
3. 光学零件及其加工	31
4. 光学零件制造过程的工艺特点	41
第三章 金刚石和金刚石粉料	56
5. 金刚石的性质、变体和应用	56
6. 金刚石粉料	63
第四章 金刚石工具	77
7. 镶嵌式金刚石工具	77
8. 金刚石磨轮	80
9. 金刚石磨轮的制作	86
10. 金刚石工具加工效率的确定	99
第五章 固着金刚石粒的作用	107
11. 单颗粒金刚石的作用	107
12. 颗粒群的工作情况	127
第六章 金刚石工具工作的某些规律性	142
13. 工具加工的一般条件	142
14. 工具的特性及工作条件的影响	148
第七章 金刚石加工机床	171

15. 金属加工机床	171
16. 专用机床	175
第八章 光学零件金刚石加工工艺	197
17. 加工余量和公差	197
18. 主要种类零件毛坯的预成形	201
19. 平面和球面的精密成形	226
20. 特种表面的加工	233
21. 工具和加工规范选择	236
22. 工艺发展趋向	241
参考文献	255

第一章 光学材料及其加工

过程的原理

用于制造光学零件的材料的主要特性是它们的 光 学 性质：对各种波长光线的折射、色散、吸收及一系列其他光学常数。对光学材料的这些性质的极其不同要求是由它们的本性和化学成分来满足的。因此这些材料具有各种各样的物理性质、化学性质和机械性质。目前，用于制造仪器上的光学零件的材料名称非常多。本章主要是从在这种或那种程度上影响光学材料机械加工过程的某些性质来研究这些材料的，并阐述一些关于这些过程物理本质的现代观点。

1. 材料及其性质

制造光学零件的材料有：无机玻璃、微晶玻璃、晶体、光学陶瓷和有机玻璃〔39, 55〕。

光学用的无机玻璃可以分成两类：光学玻璃和建筑用平板玻璃。光学玻璃的成分特别复杂，它用于制造仪表中光学系统的主要零件。一般成分的建筑用平板玻璃往往也可以供制造次要的光学零件用。

各种玻璃是根据其中所包含的组分是酸性氧化物还是碱性氧化物来区分的。第一类玻璃最常见的组分有：二氧化硅 (SiO_2)，氧化铝 (Al_2O_3)，硼酐 (B_2O_3)，磷酐 (P_2O_5) 和二氧化锆 (ZrO_2)。而某些金属的氧化物，如：氧化锂 (Li_2O)[⊖]，氧化钠 (Na_2O)，氧化钡 (BaO)，氧化铅

⊖ 原文为 Li_2O ，有误。——译者

(PbO) 等则为第二类玻璃的组分。任何一种无机玻璃乃是特殊类型的固化真溶液高粘度的复杂熔体, 这种熔体是酸性氧化物和碱性氧化物的不定化合物。

玻璃的物理—化学性质和机械性质, 除了与它们的成分和结构有关外, 还与热处理条件、表面状态和其他许多因素有关。玻璃的这些特点使我们能得到多种玻璃, 它们具有满足各种用途所需性质的必要组分。玻璃的机械性质可在很大范围内变化, SiO_2 含量较高的硅酸盐玻璃和无碱玻璃具有最高的机械性质指数, 而 PbO , Na_2O 和 K_2O 含量较高的玻璃则具有最低的机械性质指数。应该指出: 玻璃的实际强度大大低于用各种方法确定的其理论分子强度。这种差别是由于玻璃内部结构的无序性和不均匀性, 由于其较高的脆性及在生产、使用时必定会产生的表面疵瑕层造成的。

微晶玻璃——特殊成分玻璃的结晶产品, 它在既具有玻璃的固有性质、又具有晶体的固有性质的微晶材料。某些牌号的微晶玻璃用于制造对热学性质和光学性质有特殊要求的光学零件。

天然晶体或人造晶体是光学性质与普通光学玻璃不同的一大类物质。此外, 它们的特点是: 其他的物理—机械性质和化学性质变化范围很大。比如: 有些晶体相当软, 反之, 又有些晶体的硬度相当高。某些晶体的强度、硬度大大低于玻璃, 且易溶于水, 易潮解。

光学陶瓷——由压制和烧结相应晶体材料的粉状原料混合物而制得的多晶材料。多晶陶瓷与单晶的区别在于其机械性质各向同性且无平面解理现象。由于光学陶瓷具有较高的光学、热机械性质并可制得较大尺寸的成品而获得了广泛的应用, 而培育大尺寸的单晶则是很复杂的。

有机玻璃是人工制造的、透明的、玻璃状聚合物，它具有确定的光学性质。虽然它有许多缺点，比如：整块玻璃的光学常数不均匀、热膨胀系数较高、表面硬度较低，但仍适于制造某些光学零件。

由于光学材料的主要特点是具有较高的脆性，所以在加工过程中，除了弹性和强度性质外，还有表征其抗磨硬度的某些特殊参数起着很大的作用。

几乎所有光学材料的弹性常数——弹性模量 E （杨氏模量）、横向形变系数 μ （泊松系数）都已确定并是已知的。无机玻璃、有机玻璃以及大部分晶体、陶瓷材料的抗弯、抗压和抗张强度的极限值均已确定。

硬度定义为抵抗残余形变的能力，它对表征光学材料的可加工性具有重要的意义。可采用几种方法来确定硬度[10, 14, 23]。

显微硬度定义为在一定荷载下，由金刚石角锥体压头作用于材料表面层的形变大小，根据金刚石角锥体与被测材料接触面积的关系，它可表示成 kgf/mm^2 或 N/m^2 。显微硬度是采用 ПМТ-3 型硬度计，根据金刚石角锥体在材料抛光表面上压痕的对角线长短来测定的。

划痕硬度是用一种材料的尖端在已知材料上划痕来定义的。由各种材料划痕方法确定的硬度关系可采用著名的莫氏硬度来标定，在这种标定中，硬度最高的是金刚石，以数字 10 来表示，硬度最低的是滑石。在另一些情况下，划痕硬度定义为以金刚石尖端在一定荷载作用下在待测材料表面所形成划痕宽度的倒数。

显微断裂强度是根据 Н.К.捷尔切夫 (Н.К.Дерчев) 方法，也是采用 ПМТ-3 型硬度计来测定的。因此，必须测量金

金刚石角锥体压痕的对角线长度及在压痕角上所形成裂纹的长度。裂纹长度与压痕周围产生的应力大小和给定材料的抗断裂能力有关。再按所得的数据计算材料的显微断裂强度。

材料的脆性或塑性判据 T 是其抗剪切力与抗断裂力之比，它也是根据 ПМТ-3 型硬度计测得的数据来确定的。这一方法可以估计材料脆性的相对性。当 $T > 1$ 时，材料为脆性状态，当 $T < 1$ 时，材料为塑性状态。

最后，除了上述列举的材料的弹性、硬度和脆性外，还有一些参数对于加工具有很重要的意义，这些参数是相对可研磨性系数和相对抗磨硬度系数，它们表征着在研磨加工时的可研磨性或相对强度。

材料的相对可研磨性系数是根据 В.Д.库兹涅佐夫 (В.Д.Кузнецов) 提出的相互研磨方法确定的。为此，预先称重待测材料和标准材料的样品，采用在干燥状态或水的悬浮体状态中的磨料将两种材料相互研磨一段时间，然后根据两样品重量的损失，并考虑两种材料的密度，确定它们被磨去的体积，再按下式确定相对可研磨性 $N_{\text{ш}}$

$$N_{\text{ш}} = V_x / V_{\text{эт}}$$

式中 V_x ——待测材料被磨去的体积；

$V_{\text{эт}}$ ——标准材料被磨去的体积。

当磨粒的显微硬度比待测材料的硬度高1~2倍时，上述相对可研磨性的值是相当可靠的。

玻璃的相对抗磨硬度系数定义为在相同的条件下，标准玻璃磨去的体积与待测玻璃磨去的体积之比。这一方法用于说明光学玻璃的可研磨性，它是以С.И.瓦维洛夫 (С.И.Вавилов) 命名的国立光学研究所(ГОИ)制定的。这一方法是通过测定在一定的研磨时间里，当其他条件相等时，标准

玻璃样品与待测玻璃样品重量的损耗，再根据玻璃的密度计算它们体积的损耗。以K8冕牌光学玻璃[⊖]作为标准玻璃，假设其抗磨硬度系数等于1。由所得到的数据，再按照下式来确定相对抗磨硬度系数 K_{III} ：

$$K_{III} = V_{K8} / V_X$$

式中 V_{K8} ——K8 玻璃样品磨去的体积；

V_X ——待测玻璃样品磨去的体积。

通过以上对玻璃状材料和其他脆性材料的机械特性及其测定方法的简要评述可见：这些方法可以定量地确定以上材料的硬度、脆性及可研磨性，而它们对于加工是有很大大意义的。

在完成机械加工的某些工序时，材料的化学性质和热学性质也具有一定的影响。

光学材料的化学性质表现为它们对一些化学试剂作用的稳定性及对一些与其表面相接触物质的相互作用能力。有些化学物质与玻璃材料表面相互作用并在表面形成阻碍进一步作用的薄膜层，因此薄膜在一定程度上起保护作用。另一些试剂则使玻璃表面受到剧烈破坏，如果不形成保护膜，那么破坏就继续不断地发生且逐步地进入到材料深处。玻璃和晶体的化学破坏特点是由它们对水以及酸性、中性、碱性溶液和浓缩物作用的不同稳定性决定的。玻璃和微晶玻璃对水和酸的作用基本上很稳定，而对碱及碱性溶液的稳定性则很差。在大多数情况下，晶体对水的作用相当不稳定，大多数晶体易潮解，易溶于水、酸和碱。材料的化学破坏强度与其组分有关，且一般说来，它随着反应进行的温度和压力的提高而增加。

[⊖] 此处K8玻璃是苏联标准，相当于我国的K9冕牌玻璃。——校者

光学材料的线膨胀系数和热稳定性被认为是对加工过程具有最重要影响的热学性质。

光学材料的线膨胀系数 α 与其本质和组分有关，数值变化范围较大。无机玻璃和无机晶体的这一系数为 $(5 \sim 150) \times 10^{-7}$ ，而有机玻璃的这一系数为 $(6 \sim 13) \times 10^{-5}$ 。

玻璃材料和晶体材料的热稳定性与其极限断裂强度成正比，与其弹性及线膨胀系数成反比。脆性材料的热稳定性通常是由材料骤然冷却时不产生破裂（裂纹）的温差确定的。玻璃和晶体的热稳定性温度在 $310 \sim 1270 \text{ K}$ 范围内。以热塑性材料为基础的有机玻璃，其热学稳定性也相当高。

在光学材料加工过程中，常常产生不均匀加热、冷却或骤冷、骤热现象。因此在许多情况下，就合理地编制工艺操作过程和加工条件而言，必须考虑被加工材料的热学性质。

光学玻璃分成两类：按 ГОСТ3514—67 规定的无色光学玻璃和按 ГОСТ9411—66 规定的有色光学玻璃。其中每一类都有许多类别和牌号，它们的区别是其组分的含量和性质不同，这些组分首先使其具有必要的光学性能。这种光学性能应该严格符合全苏国定标准(ГОСТ)提出的各种技术条件和参数。玻璃的化学成分和制作工艺保证它具备这些性质。

无色光学玻璃具有以下特征：（1）对于一定的光波波长，折射率具有很精确的额定值；（2）均匀性——玻璃各点的折射率为常数且外来杂质含量最少；（3）透明度——染色最少且透光能力最大。

在光学常数中，以波长为 $589.3 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 的黄光的折射率 n_D 和色散系数 ν 作为光学玻璃的最重要特征。现有牌号玻璃的 n_D 值在 $1.4398 \sim 1.8060$ 范围内，而 ν 值在 $25.36 \sim 70.02$ 范围内。

我们把具有较低折射率和较高色散系数的玻璃称为冕牌玻璃，而把具有较高折射率和较低色散系数的玻璃称为火石玻璃，并分别以代号K和Φ表示它们。但是现有的玻璃成分相当复杂，它们可能有各种各样的 n_D 和 ν 配合，因此上述的划分在某种程度上是有前提的。属于冕牌玻璃的有各种硼硅酸盐玻璃，它主要是由二氧化硅(SiO_2)和硼酐(B_2O_3)组成。某些重冕玻璃的特点是添加了氧化钡(BaO)。火石玻璃主要是由二氧化硅(SiO_2)和氧化铅(PbO)组成的，而在某些情况下，二氧化硅(SiO_2)完全由其他氧化物所取代。与冕牌玻璃相比，通常，火石玻璃的密度较高，机械性能指标较低。

按ГОСТ3514—67的规定，国产（指苏联—译者）无色光学玻璃分成一定的组别或类别。通常在这一系统里表征每一类别基本特征的字母与主要代号K和Φ结合在一起。无色光学玻璃的类别代号列于表1中。

表 1 无色光学玻璃的类型

玻璃类型代号	名 称	玻璃类型代号	名 称
ЛК	轻 冕	БΦ	钡 火 石
ΦК	磷 冕	ТБΦ	重钡火石
К	冕	ЛΦ	轻 火 石
БК	钡 冕	Φ	火 石
ТК	重 冕	ТΦ	重 火 石
СТК	超 重 冕	ОΦ	特种火石
КΦ	冕-火石		

每一类玻璃中又分成若干种牌号，用代表类别的字母和顺序号结合作为它们的代号，因为每一类别可以有几组牌号的玻璃。

在 ГОСТ13659—68 里 规定了所有牌号无色光学玻璃的物理—化学性质及其参数。这就是：光学特性、热光学特性和热工特性、对电离辐射的稳定性、光的散射性、机械性质、化学稳定性及电学特性。

总之，对光学玻璃的机械加工，特别是对采用金刚石工具的加工过程而言，最有意义的主要是关于材料机械性质的数据，也需要一点关于化学稳定性的数据，偶而也需要热学参数。根据上述 ГОСТ，对无色光学玻璃的物理—机械性质可作以下简要的总结。

有些牌号光学玻璃的密度是在 $(2.27 \sim 3.23) \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 范围内变动，根据这一特征而称它们为轻玻璃(ЛК和ЛФ)，而把密度 $(3.06 \sim 5.19) \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 牌号的玻璃称为重玻璃(ТК、ТФ、ТБФ和СТК)。其余牌号的玻璃密度为上述两组密度之间的平均值。ТБФ、СТК、ТК、БК型玻璃的弹性模量最高 $(7.0 \sim 11.6) \times 10^{10} \text{N/m}^2$ ，而ЛК、ФК、ЛФ、ТФ、Ф和ОФ型玻璃的弹性模量最低 $(4.0 \sim 6.8) \times 10^{10} \text{N/m}^2$ 。ЛК、КФ、К组玻璃的泊松系数最小 $(0.191 \sim 0.240)$ ，而ТК、СТК和ТБФ组玻璃的泊松系数最大 $(0.243 \sim 0.310)$ 。但不同组别和不同类型玻璃的上述参数值之间没有明显的界限，因为类型完全不同玻璃的这些参数值往往可以相当接近。剪切模量的改变实际上与弹性模量的改变成正比。从各组别光学玻璃弹性常数的改变可以看出：除ТБФ火石玻璃外，冕牌玻璃的弹性常数最高、火石玻璃较低，这是火石玻璃机械强度较低的原因。

很遗憾，只测定了有限的、最有代表性的光学玻璃的显微硬度和划痕硬度，其中，显微硬度的范围为 $(288 \sim 785) \times 10^7 \text{N/m}^2$ ，而划痕硬度范围为 $0.119 \sim 0.211$ 。并且，只在个

别情况下测定了材料的脆性标准、破碎硬度和相对可研磨性系数，而尚未得到关于它们数值的足够数据。

相对抗磨硬度系数作为估计光学玻璃可加工性的主要标

表 2 无色光学玻璃的抗磨硬度

相对抗磨硬度系数 (ГОСТ13659—68)	玻璃牌号 (ГОСТ3514—67)
0.2~0.4	ФК1, ФК14, ТФ11, ОФ1, ОФ4;
0.5~0.7	ФК13; СТК7, СТК8; БФ6, БФ8, БФ11, БФ12, БФ13, БФ16, БФ19, БФ23, БФ24; ТК4, ТК8, ТК9, ТК14, ТК16; Ф1, Ф2, Ф4, Ф9; ТФ1, ТФ2, ТФ3, ТФ4, ТФ5, ТФ7, ТФ8, ТФ10; ЛК6; БК10; ЛФ7, ЛФ11; Ф6, Ф7, Ф8, Ф13; ОФ2;
0.8~1.0	ЛК1, ЛК3, ЛК4, ЛК5, ЛК7; К1, К2, К3, К5, К8, К14, К15, К18, К19, К20; БК4, БК6, БК9, БК11, БК12, БК13; ТК1, ТК2, ТК12, ТК13, ТК17, ТК20, ТК21, ТК23; СТК3; КФ1, КФ6, КФ8; БФ16, БФ18, БФ21, БФ25, БФ26, БФ27; ЛФ1, ЛФ10;
1.1~1.3	К17, КФ5, ТБФ3;
1.5~1.7	ЛК5, ТБФ4, СТК9, СТК12;

准，实际上它是各种牌号光学玻璃相对磨损速度的倒数，把 K8 玻璃的这一值取为1。

表 2 列出了无色光学玻璃的相对抗磨硬度系数，它们以 0.2~0.3 的间隔分成几组，对于实际应用完全足够了。

表3列出了机械性质不同的各组玻璃的机械参数和弹性。所列出的弹性模量、泊松系数、密度和相对抗磨硬度是与 ГОСТ13659—68 一致的，而显微硬度和划痕硬度则是根据 В.М.维诺库洛夫 (В.М.Винокуров) 的资料[14]列出的。

表 3 光学玻璃的机械性质和弹性

玻璃牌号	弹性模量 $E \times 10^{10}$ (N/m ²)	泊松系数 μ	显微硬度 $HV \times 10^7$ (N/m ²)	划痕硬度	相对抗磨 硬度系数	密 度 $\gamma \times 10^3$ (kg/m ³)
СТК9	11.60	0.298	785	—	1.5	4.11
ТБФ1	9.00	0.308	670	—	1.3	4.47
ТК13	8.40	0.250	443	0.177	0.8	3.44
К8	8.05	0.209	475	0.211	1.0	2.52
ТК8	7.64	0.266	443	0.284	0.7	3.61
БФ13	7.63	0.270	338	0.172	0.6	3.82
БК10	7.34	0.244	447	0.149	0.7	3.12
ТК2	7.20	0.247	430	0.168	0.8	3.20
БФ6	6.47	0.243	370	0.170	0.6	3.16
К1	6.19	0.226	397	0.211	0.9	3.36
ТФ8	5.61	0.229	309	0.121	0.6	4.23
Ф1	5.56	0.221	338	0.147	0.5	3.57
ТФ3	5.50	0.221	288	0.119	0.5	4.46

光学玻璃的化学稳定性即是抵抗在潮湿的气氛或介质中产生滴状一吸湿附着物的性能，它是由附着物的形成时间确定的，按这一特征，光学玻璃可分成三组硅酸盐玻璃和三组非硅酸盐玻璃。按对致斑物质（如：作用于硅酸盐玻璃的酸性溶液）作用的稳定性，光学玻璃分成四组。某些玻璃较容

易形成附着物和斑痕，这对玻璃的可加工性，特别是对最后的研磨和抛光工序具有很大的影响。因此，常常采用特殊方法加工化学稳定性较弱的玻璃；此外，这种玻璃的工件需要保护其已加工表面并在特殊条件下贮藏。

在ГОСТ13659—68里列举了无色光学玻璃最重要的热学特性。

石英光学玻璃^[10, 55]是采用熔融纯净石英的天然变体而得到的，其中二氧化硅 SiO₂ 的含量达99.95%。它的优点是在硅酸盐玻璃中，其折射率最低 ($n_D = 1.4584$)，且对紫外线有较高的透明度。石英玻璃的热膨胀系数为普通玻璃的1/15~1/10，其特点是与各种类型的玻璃相比，它具有较高的热稳定性、化学稳定性及最高的机械特性（参见表5）。在紫外线部分和较大温差的条件下工作的光学零件是用石英玻璃制造的。

表 4 有色光学玻璃的类型

各类玻璃的代号	玻璃的颜色特征	各类玻璃的代号	玻璃的颜色特征
УФС	透射紫外线的黑色	КС	红 色
ФС	紫 色	ИКС	透射红外线的黑色
СС	蓝 色	ПС	绛 红 色
СЗС	蓝 绿 色	НС	灰色（中性）
ЗС	绿 色	ТС	暗 色
ЖЗС	黄 绿 色	БС	透射紫外线、红外线的白色
ЖС	黄 色		
ОС	橙 黄 色		

微晶玻璃——结晶玻璃，是由无定形玻璃结合而成的玻璃微晶体。热膨胀系数小的微晶玻璃 СТЛ3、透明度高的微晶玻璃СТЛ4及热稳定性高的微晶玻璃СТЛ2都属光学玻璃。