

光学零件制造工艺学

402 教研室 编

(上册)

北京工业学院

1974.9

毛主席语录

我们的教育方针，应该使受教育者在德育、智育、体育几方面都得到发展，成为有社会主义觉悟的有文化的劳动者。

学制要缩短、课程设置要精简，教材要彻底改革，有的首先删繁就简，学生以学为主，兼学别样。也就是不但要学文，也要学工，学农、学军，也要随时参加批判资产阶级的文化革命的斗争。

我们不能走世界各国技术发展的老路，跟在别人后面一步一步地爬行。我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

中国应当对人类有较大的贡献。

要认真总结经验。

前 言

在党和伟大领袖毛主席的英明领导下，我国广大光学工人和技术人员，认真学习马列主义、毛泽东思想，在毛主席无产阶级革命路线的指引下，正在迅速改变我国光学工业的原有面貌。

光学零件的粗磨工艺，不少工厂已初步摆脱了“一把砂，一把水”的落后面貌，代之以高效率的金刚石铣磨工艺。精磨工艺，国内已开始着手金刚石精磨片的磨削试验。高速抛光的试验包括准球心高速抛光与范成法高速抛光都取得了很大的成绩，尤其前者，逐步普及推广，用于正式生产。氧化铈抛光剂已比较全面地代替了原有的氧化铁抛光剂。光学零件的定心磨边已由光学法定心磨边逐渐向机械法定心磨边发展，使定心磨边的生产率大幅度提高。光学零件的薄膜工艺有着很大的发展，从真空紫外到远红外的各个光谱区域，各种薄膜元件都有生产，近年来对光学薄膜的理论、膜系设计、薄膜的内应力、微观结构以及氧化物反应蒸发技术等全面进行了研究。光学零件的胶合和胶合用胶正在进行不同程度的研究。分划板工艺，包括精密机械刻划，照相分划工艺以及无底层真空镀铬法等都取得了较好的成绩，分划板品种、精度与产量不断增加。

所有这些成绩都是在党和毛主席的英明领导下，遵照毛主席“自力更生、艰苦奋斗”的教导，高举鞍钢宪法的红旗，坚持政治挂帅，大搞群众性的技术革新运动所取得的。特别是通过无产阶级文化大革命以及批林批孔运动，使光学工艺呈现出一派欣欣向荣的景象，我们坚信，我国人民在伟大的战无不胜的毛泽东思想的指引下，树雄心，立壮志，一定能在不久的将来赶上并超过世界先进水平。

由于我们水平有限，编写仓促，有不当与错误之处，诚望同志们多加批评指正。

目 录

第一篇 光学零件的基本工艺

第一章 光学玻璃的性能

- § 1 . 无色光学玻璃的性能..... 1. 1
 - (一) 光学玻璃的光学性能
 - (二) 光学玻璃的化学稳定性
 - (三) 光学玻璃的热性能
 - (四) 光学玻璃的机械性能
- § 2 . 耐辐射光学玻璃的性能..... 1. 23
- § 3 . 有色光学玻璃的性能..... 1. 25
- § 4 . 光学玻璃的测量..... 1. 29
 - (一) 光学玻璃折射率测量
 - (二) 光学玻璃内应力检验
 - (三) 光学玻璃吸收系数的测定
 - (四) 光学玻璃光学不均匀性的测定
 - (五) 光学玻璃条纹度的测定
 - (六) 光学玻璃气泡度的测定

第二章 光学零件冷加工的技术条件

- § 1 . 光学零件的材料质量..... 2. 1
- § 2 . 光学零件的技术条件..... 2. 1
 - (一) 光学零件表面曲率半径
 - (二) 光学零件的外径
 - (三) 透镜边缘及中心最小厚度

- (四) 透镜有关公差
- (五) 光学零件的倒角
- (六) 透镜中心偏差
- (七) 角度公差
- (八) 光学零件的气泡度要求
- (九) 光学零件的表面光洁度
- (十) 光学零件的表面误差

第三章 光学零件毛坯的热压成型加工

- § 1 · 热压成型的工艺过程..... 3.1
 - 一、备料
 - 二、加热及压制成型
 - 三、压型另件的退火
- § 2 · 热压过程常出现的问题..... 3.19
- § 3 · 热压成型工艺主要设备介绍..... 3.24
 - 一、加热炉（拍型炉）
 - 二、压型机
 - 三、压模
 - 四、精密退火炉
- § 4 · 毛坯形状和公差要求的合理性..... 3.30

第四章 光学另件块料毛坯的加工

- § 1 · 玻璃下料及整平..... 4.1
 - 一、锯切
 - 二、整平
 - 三、划割
 - 四、下料余量及公差

§ 2 . 胶条与磨外园.....	4. 16
一、胶条工艺	
二、磨外园	
三、磨外园的余量及公差	
第五章 粗磨銑削加工工艺	
§ 1 . 基本原理.....	5. 1
一、研磨与銑磨	
二、球面銑磨原理	
三、平面銑磨原理	
§ 2 . 銑磨机.....	5. 10
一、QM30A型小直径透镜銑磨机	
二、QM68A型中型透镜銑磨机	
三、QM300型大型透镜銑磨机	
四、PM500型大平面銑磨机	
五、PM25型平行平面銑磨机	
六、銑磨机典型部件	
§ 3 . 磨削用量的选择和机床调整.....	5. 34
一、磨头转速	
二、工件转速	
三、銑磨深度	
四、銑磨压力	
五、机床调整	
§ 4 . 磨料与磨具.....	5. 46
一、磨料的种类及性能	
二、磨具的选择	

三、磨具的修整	
§ 5 . 夹具设计	5.59
一、基面及其选择	
二、球面銑磨夹具设计	
三、平面銑磨夹具设计	
§ 6 . 銑磨液	5.82
一、使用銑磨液的目的	
二、銑磨液的种类和性能	
三、冷却液的用量和喷射方式	
§ 7 . 銑槽及磨园弧	5.87
一、銑槽	
二、磨园弧	
§ 8 . 粗磨余量及公差	5.91
一、粗磨余量	
二、粗磨公差	
三、砂面及擦貼度	

第一篇 光学零件的基本工艺

第一章 光学玻璃的性能

毛主席教导我们：“不论做什么事，不懂得那件事的情形，它的性质，它和它以外的事情的关联，就不知道那件事的规律，就不知道如何去做，就不能做好那件事。”我们学习光学零件的加工，它们的加工对象主要是光学玻璃，所以，我们首先应该对加工的对象进行一番调查研究，从而，使我们在加工过程中能够符合光学玻璃的各种性质，以便顺利地进行加工。这就是我们学习这一章的目的。

§ 1. 无色光学玻璃的性能

毛主席教导我们：“不能把过程中所有的矛盾平均看待，必须把它们区别为主要的和次要的两类，着重于抓住主要的矛盾。”光学仪器对光学玻璃有着一系列的性能要求，例如，光学性能，化学安定性，热性能、机械性能等。这里那些性能是主要的呢？光学玻璃当用作折射材料时最主要的是光学性能，光学性能是达到光学仪器设计要求的主要依据。其次就是化学安定性。化学安定性是长期保持并满足仪器使用要求的重要因素，玻璃的化学安定性不好，随着使用时间的增加，光学镜头生霉生雾，严重的就会丧失仪器的使用能力。光学玻璃当单片用作第一面反射时，主要的要求就不再是光学性能，而是热性能和机械性能。我们在学习无色光学玻璃的性质这一节时，要分别不同情况用全力抓住其主要矛盾。

(一) 光学玻璃的光学性能：

在这一节里我们主要讨论光学玻璃的光学常数、光能损失的因素

以及影响光学玻璃光学性能的缺陷。

(1) 光学玻璃的光学常数：

光学常数是光学玻璃分类的依据，也是光学玻璃各种牌号的依据。光学常数包括：折射率、中部色散、色散系数、部分色散和相对色散这些都是根据光学设计的要求而提出来的，光学玻璃厂在光学玻璃出厂时，对每一种牌号的不同光学常数都应符合光学玻璃国家标准的规定。这些光学常数中最基本的是折射率，其他的光学常数都是由折射率演变出来的。

一般所指的玻璃的折射率，都是指玻璃对于空气的折射率。玻璃的折射率不仅随玻璃牌号的不同而不同，而且，随温度而变，随测量折射率时所用的光波的波长而变。在20°C下玻璃的折射率用 n_{λ} 表示， λ 表示测量玻璃折射率时所用的光源的光波波长，常用的谱线如表1-1-1所示。其中最常用的为D、F、C线。它们所代表的折射率为 n_D 、 n_F 、 n_C 。

光学玻璃在透明波段内折射率的大小随波长的增加而减少。理论和实践证明在透明波段内，折射率与波长的关系可用下述公式表示：

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} \dots\dots\dots$$

式中a、b、c对某一种玻璃来说是常数。对某一种牌号的玻璃若测得 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 的折射率 n_1 、 n_2 、 n_3 ，则代入上式后得：

$$n_1 = a + \frac{b}{\lambda_1^2} + \frac{c}{\lambda_1^4}$$

$$n_2 = a + \frac{b}{\lambda_2^2} + \frac{c}{\lambda_2^4}$$

$$n_3 = a + \frac{b}{\lambda_3^2} + \frac{c}{\lambda_3^4}$$

解上述三个方程式，可求得 a 、 b 、 c 三个常数。由 a 、 b 、 c 三个常数就可以计算其他波长的折射率。

表 1-1-1

光谱范围	波长 $m \mu$	谱线代号	元素
紫 外	365.0	—	H _g
可 见	404.7	h	H _g
	434.1	G'	H
	435.8	g	H _g
	486.1	F	H
	546.1	e	H _g
	587.6	d	H _e
	589.3	D	Na
	656.3	C	H
红 外	766.5	A	K
	863.0	—	—
	950.8	—	—

其他的几个光学常数如中部色散、色散系数、部分色散和相对色散，都是属于色散。光学玻璃的色散是指不同波长的光经光学玻璃折射后，因折射率不同而分开的现象。最常见的色散现象是一束白光投射到三稜镜上时，经稜镜折射后，射出一系列有彩色的光带。光学玻璃的色散大小常用对两种选定的波长的折射率之差来表示。当选用 F C 线的折射率之差时，即 $n_F - n_C$ ，称为中部色散。当选定某二个波长 λ_1 与 λ_2 的折射率之差，即 $n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}$ ，称为部分色散，在国家标准中部分色散选用 $n_d - n_D$ 和 $n_G - n_g$ 。色散系数以 ν 表示，在国家

标准中选用三个数值，即 $\frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$ ， $\frac{n_{863} - 1}{n_A - n_{950}}$ ， $\frac{n_h - 1}{n_{365} - n_g}$ 。

相对色散是部分色散与中部色散之比，在国家标准中选用 $\frac{n_F - n_D}{n_F - n_C}$ ，

$\frac{n_F - n_g}{n_F - n_C}$ ， $\frac{n_g - n_F}{n_F - n_C}$ 。每一种牌号的光学玻璃的上述各种光学常数

在中华人民共和国无色光学玻璃国家标准 GB903-65 中规定。

光学玻璃的品种繁多，它们是如何分类的？它们与光学常数之间又是如何的关系呢？下面就来讨论这个问题。

光学玻璃的品种我们可以把它分成最基本的两大类。一类是冕玻璃，以 K 表示。它的折射率 $n_D = 1.50 \sim 1.54$ ，而 $\nu = 55 \sim 66$ 。另一类是火石玻璃，以 F 表示，它的折射率 $n_D = 1.60 \sim 1.64$ ，而 $\nu = 35 \sim 38$ 。

再从这两大类玻璃分类。冕玻璃分为轻冕、冕、重冕，它们的折射率依次递增， ν 值依次递减。火石玻璃分为轻火石、火石、和重火石，折射率依次递增， ν 值依次递减。介于冕玻璃与火石玻璃之间的称为冕火石。

在冕玻璃与火石玻璃中增加 BaO 的成分时，就出现了钡冕，钡火石、重钡火石等。冕玻璃中增加磷的成分或镧的成分，就出现了磷冕、镧冕等。

光学玻璃的牌号，除冕和火石分别以 K 和 F 表示外，凡是轻和重都是以“轻”（Qing）或“重”（Zhong）这两个字的拼音字的第一个字母即“Q”和“Z”表示。例如轻冕（QK）轻火石（QF）重冕（ZK）、重火石（ZF）等。凡是含有元素钡、磷和镧等，则以化学元素符号表示，即钡（Ba）、磷（P）、镧（La）等，然

后组合起来，如钡冕（BaK）、钡火石（BaF）、磷冕（PK）、镧冕（LaK）等，另外还有一种特种火石玻璃（TF）。同一类玻璃中，又按不同的光学常数分为许多牌号，它们就在符号的右下角注以1、2、3……等。我们例如以 n_D 为纵座标， ν 为横座标，则每一种牌号的光学玻璃都可在此图上占居一个座标点。此图如图1-1-1所示。

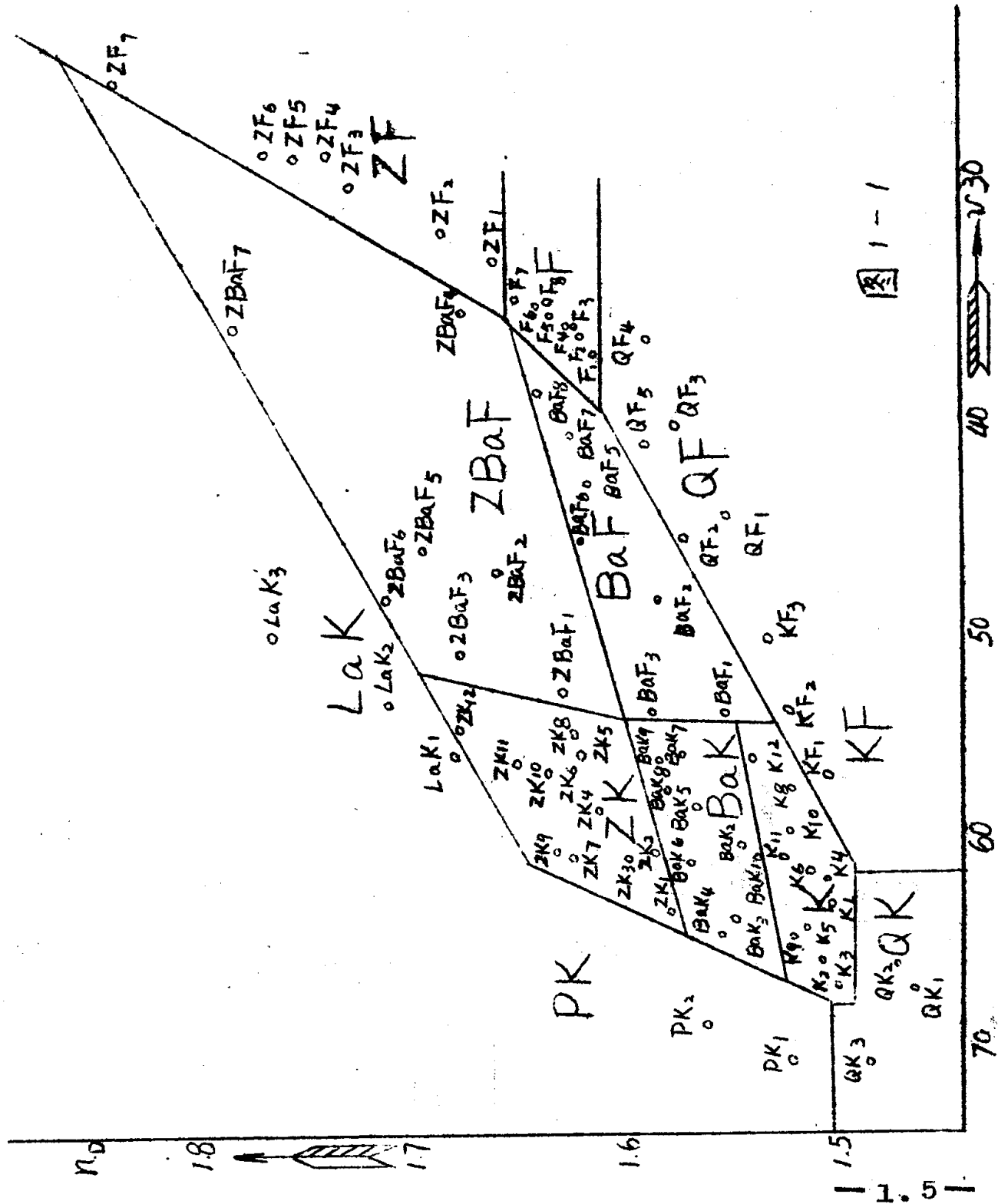


图 1-1-1

毛主席教导我们：“事物发展的根本原因，不在事物的外部而是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性。”那么，光学玻璃的光学常数主要决定于什么呢？当然决定于事物内部的矛盾性，也即制造光学玻璃时所用的原料，也即组成光学玻璃的化学成分。上面我们所叙述的无色光学玻璃它的最基本的成分是 SiO_2 ，另外含有一定成分的碱土金属氧化物和碱金属氧化物。每一种氧化物都有它自己的折射率。玻璃的折射率就决定于组成玻璃的氧化物品种以及各种氧化物的百分含量。假如我们粗略的表示的话，可以利用下面的“加和式”计算。

$$n = \sum n_i p_i$$

式中 n 表示玻璃的折射率； n_i 表示玻璃中各组成氧化物的折射率； p_i 表示玻璃中各组成氧化物相应的百分含量。在各种氧化物中对光学常数影响最大的要算 PbO 。 PbO 本身 n_D 大， ν 值小，所以 PbO 含量增加，玻璃折射率增高， ν 值减小，例如：轻火石、火石、重火石在化学成分上都是依次使 PbO 的含量增加，所以它们的折射率依次增加； ν 值依次减小。下面将各种氧化物的光学常数与某些光学玻璃概略的光学成分列于表 1-1-2 表 1-1-3。

表 1-1-2

氧化物	SiO_2	$[\text{B}_2\text{O}_3]$	$[\text{B}_2\text{O}_3]$	Al_2O_3	Sb_2O_3	As_2O_3	PbO	BaO	ZnO	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
n_D	1.745	1.464	1.49	1.98	1.57	2.46	2.03	1.96	1.83	1.64	1.59		
$n_F - n_C$	0.00695	0.00670	0.00850	0.03800	0.07700	0.02850	0.01360	0.01600	0.01750	0.01200	0.01400		
ν	68	69	58	26	36	19	45	34	47	49	42		
比重 d	2.27	1.85	2.5	5.6	3.3	11.7	8.1	6.8	3.7	2.9	2.95		

表 1-1-3

化学成分 玻璃种类	SiO ₂	B ₂ O ₃	Sb ₂ O ₃	As ₂ O ₃	PbO	ZnO	BaO	K ₂ O	Na ₂ O
冕	69	11	-	0.4	-	-	3.0	6.0	12
重冕	50	43	0.6	0.1	-	9	30	5.6	-
轻火石	61	-	-	0.2	25	-	-	8.1	5.4
火石	47	-	-	0.5	46	-	-	6.4	-
重火石	41	-	-	0.5	52	-	-	5	-
钡冕	68	36	-	0.3	-	0.9	10	3.6	13
钡火石	42	-	-	0.2	33	5	11	7.5	1.0

(2) 光学玻璃的光能损失

光能通过光学玻璃就会受到损失，这主要是光的反射、吸收和散射。现在就从这三方面来讨论。

光的反射是在光能投射到两种折射率不同的物质的分界面上时发生的。在光学仪器中，由空气到玻璃或玻璃到空气或者两种不同折射率的玻璃的分界面时都会产生反射。凡是反射的光能量与投射的光能量之比称为反射系数。玻璃的反射系数为多少呢？它与那些因素有关系呢？我们假定光线由折射率为 n_1 的物质垂直入射到折射率为 n_2 的物质的界面上，它的反射系数 ρ 可按下式计算：

$$\rho = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

玻璃对于空气的反射系数，则由于空气折射率 $n_1 = 1$ ，所以上式可改写为：

$$\rho = \left(\frac{n_2 - 1}{n_2 + 1} \right)^2$$

由上式我们可以看到玻璃对空气的反射系数随玻璃的折射率而变，折射率越高的玻璃，反射系数越大，也就是它的反射损失越大。一般冕牌玻璃的反射系数在5%左右，火石玻璃的反射系数在6~7%。在光学仪器中，凡是光学零件数越多，则光学表面就越多，由于反射而产生的光能损失也就越多，某些光学仪器它们的反射损失往往是很可观的，有的竟达到70~80%之多。尤其是在军用光学仪器中，照明主要依靠自然光，特别是在气候恶劣的情况下，反射损失更是影响观察。所以，光学零件的镀透光膜主要是为了达到减少反射损失的目的。

由上面的公式，我们还可以看到一点，就是玻璃的折射率是根据玻璃牌号、光波波长、温度而定的，因此，玻璃的反射系数也应与这些因素有关。

上面所述是说明反射系数引起光能的损失，但是，反射系数也并不是只有有害的一面。我们知道光学仪器中为了光轴的转向，往往需要反射面或半反半透面，这时我们就应该尽量地提高反射面的反射系数或者达到所需要的某一个反射系数的值。这就要通过镀反射膜或半反射膜来达到。

光的吸收是指光通过任何物质时，光能被介质所吸收。玻璃是透明物质，但是，并不是说玻璃对光不吸收，而仅仅是比起其他非透明物质来，它的吸收系数很小而已。但是，对于光学玻璃来说对于吸收系数的要求是很严格的。

光的吸收用吸收系数 μ 表示。吸收系数 μ 的定义是光在玻璃中行进1厘米长的路程被吸收的光能的百分比。设进入玻璃的光强度为

I_0 ，经过1厘米长路程后为 I_1 ，则

$$I_1 = I_0(1 - E)$$

经过2厘米后应为 $I_2 = I_1(1 - E) = I_0(1 - E)^2$ ，依此类推，则经过厚度为 l 厘米的玻璃后

$$I = I_0(1 - E)^l$$

光学玻璃的吸收系数 E 依光学玻璃的牌号而定，一般在0.4~1.5%范围内。 E 值又依光波波长而变，这就是吸收的选择性，对无色光学玻璃来说， E 值的选择性并不很明显，当然，某些牌号的玻璃还是略带淡黄色的。

散射是指光的漫反射。当玻璃表面凹凸不平时，反射光便向各个方向杂乱地反射，这就是光的散射。例如，研磨以后的玻璃表面为什么不透光呢？这主要就是由于散射的结果。光学零件的表面都是经过抛光的，因此，一般来说，散射损失不大，但是，麻点和擦痕都是产生散射的原因，这就是光学零件所以要严格地规定表面光洁度的原因之一。

下面我们举一个例子，看一看光能在玻璃中的损失。假设玻璃是经过抛光的，散射损失忽略不计。第一块玻璃为 K_0 ，第二块玻璃为 F_2 ，当光线垂直入射时，光能的损失为多少呢？

K_0 的折射率 $n_1 = 1.5163$ ， F_2 的折射率 $n_2 = 1.6128$ ，则根据反射系数公式

$$\rho_1 = \left(\frac{n_1 - 1}{n_1 + 1} \right)^2 = \left(\frac{1.5163 - 1}{1.5163 + 1} \right)^2 = 0.205^2 = 0.0420$$

$$\rho_2 = \left(\frac{n_2 - 1}{n_2 + 1} \right)^2 = \left(\frac{1.6128 - 1}{1.6128 + 1} \right)^2 = 0.234^2 = 0.0548$$

查国家标准 K_0 的吸收系数 $E_1 = 0.004$ ， F_2 的吸收系数

$E_2 = 0.004$ 。K₉玻璃厚度 $l_1 = 2$ 厘米，F₂玻璃厚度 $l_2 = 1$ 厘米，设入射光强 $I_0 = 1$ ，通过计算透过第二块玻璃以后的光强 I 为 0.81 ，光能损失为 19%

$$I = I_0 (1 - \rho_1) (1 - E_1)^{l_1} (1 - \rho_1) (1 - \rho_2) (1 - E_2)^{l_2} (1 - \rho_2)$$

$$= 1 (1 - 0.0420) (1 - 0.004)^2 (1 - 0.0420) (1 - 0.0548) (1 - 0.004) (1 - 0.0548) = 0.81$$

(3) 光学玻璃的质量指标

毛主席教导我们：“完全的纯是没有的，……不纯才成其为自然界，成其为社会”。前面我们把每一种玻璃牌号都规定了它的光学常数，而且认为它的内部是均匀的。实际上，每一种牌号的玻璃都不可能正好是规定的光学常数，只能在某一个公差范围内；它的内部也是有这样或那样的缺陷，并不是完全均匀的，只能是相对均匀。现在我们就来讨论光学玻璃应有的质量指标。

光学玻璃的质量指标根据中华人民共和国无色光学玻璃的国家标准应包括这样七项，即(1)折射率、中部色散与标准数值的允许差值；(2)同一批玻璃中，折射率和中部色散的一致性；(3)光学均匀性；(4)双折射；(5)条纹度；(6)气泡度；(7)光吸收系数。

① 折射率、中部色散与标准数值的允许差值，根据国标规定分为三级，如表 1—1—4 所示：

表 1—1—4

类别	允 许 差 值	
	折 射 率	中 部 色 散
1	$\pm 5 \times 10^{-4}$	$\pm 5 \times 10^{-5}$
2	$\pm 7 \times 10^{-4}$	$\pm 7 \times 10^{-5}$
3	$\pm 10 \times 10^{-4}$	$\pm 10 \times 10^{-5}$