

现代照相机 和照相物镜 技术

〔日〕小仓 磐夫 著

XIANDAI ZHAOXIANGJI
HE ZHAOXIANGWUJING
JISHU

机械工业出版社

现代照相机和照相物镜技术

〔日〕 小倉 磐夫 著

傅维喬 等译



机械工业出版社

本书内容包括：照相机的内表面反射、连动测距、对焦屏、单反对焦、自动调焦、塑料透镜、照相物镜成象质量及其评价等。

本书可供高等学校光学、光学仪器及照相摄影仪器专业师生参考，也可供从事照相机的研究、设计和制造的工程技术人员，以及专业摄影师、业余摄影爱好者参考。

現代のカメラとレンズ技術

〔日〕小倉 磐夫 著

写真工業出版社

昭和57年

* * *

现代照相机和照相物镜技术

〔日〕小倉 磐夫 著

傅维喬 等译

*

责任编辑：林静贤 版式设计：冉晓华

封面设计：郭景云 责任校对：熊天荣

责任印制：王国光

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16·印张 16 1/4·字数 396 千字

1989年12月北京第一版·1989年12月北京第一次印刷

印数 0,001—1,350·定价：15.30 元

*

ISBN 7-111-01609-2/TH·273

译 者 的 话

随着近代科学技术的发展,照相摄影技术已广泛应用于各个领域,尤其照相机,更是日益成为人们的文化生活和科学研究中所不可缺少的一部分。众所周知,日本的照相机工业已在国际独占鳌头,而我国近年照相机工业的进展,也是令人可喜的,今后将会有更多的科技工作者献身于照相机的研究、设计和制造,同样,也将会有越来越多的人把照相机应用到自己的工作和生活中去。

作者小倉磐夫博士,现任日本东京大学生产技术研究所教授。在此之前,他曾剖析过200多台照相机,并于1975年后被邀为日刊《照相工业》的“照相机性能及评价”专栏作者。本书是他选自自己已发表和未发表文章中之精华汇编而成的。其特点是取材新颖、图文并茂,既有一定的理论深度,又侧重于实际的应用,并以专题的形式进行具体的论述与分析。像这样的书籍,国内还未曾出版过。因此,将它译出,奉献给高等学校有关专业师生和从事照相机研究、设计、制造的工程技术人员,成为一本有价值的参考书。

参加本书译校工作的有,傅维喬(译I~IV、V₈、VI_{15,16},校VI₁₋₁₄);戴晓芳(译VI₁₋₁₄,校VI₁₇₋₂₈);郁道银(译VI₁₇₋₂₈、VII,校I~IV);鹿景荣(译V₁₋₇)。全书并由曹志鹏同志协助审校,最后由傅维喬整理定稿。另外,在本书的翻译过程中,还得到了余章鼎同志和辛兵同志以及天津大学精密仪器工程系光学仪器教研室有关同志的关心与帮助,在此向他们表示感谢。

由于我们水平有限,译文中的缺点、错误在所难免,希望读者和同志们批评指正。

译者

1986年7月于天津大学

前 言

一架照相机，即使包括镜头在内，也只不过重达数百克，但它却高度地密集了现代的科学和技术，不是某一个人的能力所能全面掌握的。简单地讲，摄影过程主要包括调焦和曝光两个方面。而这里所谈的调焦及其关联技术问题，只是把已在《照相工业》月刊上发表过的文章加以综合归纳。所以，对本书有重复之处，或应该充实的内容而又没有写进去等缺点，望读者谅解。

“不要像老师那么糊涂”，这虽然是一句笑话，但在一定程度上，反映了大学老师的现实情况。东京大学代理校长加藤一郎先生曾说过“东京大学的教授中，有相当一部分是专业面太窄，这姑且不谈，而更可笑的是有些教授甚至连自己的专业都不懂”。其实，这并不局限于东京大学，而是当时一般大学中所普遍存在的现象。那么，造成这种状态的原因又是什么呢？很明显，这主要是由于老师整天在讲台上讲课，或在家里撰写教材、文章等，忙得连自己再学习和深造的时间也都没有了，其结果必然会导致知识面不宽，甚至连自己的专业也掌握得很肤浅。尤其是工程技术界或工厂企业内部技术的日新月异飞快发展，这就更使大学里的老师落后于技术的进步了。反之，出自工厂企业的技术人员赴任大学老师或教授的例子也不少，但他们也未必都能胜任这一工作。因工厂、企业是作为技术的统一体来积累技术知识，并在专门技能大量积累的基础上进行开发和生产，而对于每个人来讲，所掌握的知识范围却是很有局限的，特别是大工厂企业，这种倾向就更为严重。所以，即使有数十年工作经验的老技术人员，一旦走出工厂企业大门成为大学老师或教授时，就会束手无策、深感知识贫乏，这种感受是学生一时难以理解的。

当然，笔者素来也是属于这类知识肤浅者之列，有幸的只是在总编的安排和催促下，并借鉴其他杂志的有关内容而完成了每月的文稿。若因此而谓之编著者，那是受之有愧的。

另外，这些文章在《照相工业》上连载过程中，引起了大家的热烈评论，特别是对文中和笔者思考有误之处提出了批评指正，在此表示衷心的感谢，并希望今后仍能多多给予指导和鞭策。

笔者在连载一开始，就以刚参加工作的年青技术人员为自己文章的读者，而事至今日，笔者再度执笔的同时，仍然还是在回味着当时与各工厂年轻人座谈时的种种情景。在新人教育或入厂等教育中，恐怕是以技术教育的难度为最大。当然，它完全可以通过实际工作来锻炼，这好比把不会游泳的小孩放到足不着底的水中去学游泳一样。当你还在担心之际，小孩却已不知不觉地学会了游泳。虽然这种做法是可取的，然而，倘若有人在旁随机再加指点，岂不是能学得更快了吗？另外，科学和技术是一种专业性的知识，青年人也许三年成材、或许经过五年的努力，就能成为某一方面的专家。但也不能因此而心安理得，因为科技世界的发展是一日千里蒸蒸日上，往往会在不知不觉之中，感到自己的专业知识老化而不寒而栗。对此，年青人只有两条道路可选择：其一是学会使用人材的技术，将来成为一个优秀的管理者；其二是趁青春年华，努力学习科学和技术。青年人的学习，是最富有成效的，他们最盼望能得到一本好的光学技术或照相机技术的教科书。虽然本书不是一本教科书，但它是由杂志的连载中汇编而成的，所以可从任一篇开始阅读。本书若能对青年读者的自学起到帮助的话，笔者将深感荣幸。

1981年11月笔者

目 录

前言

I 照相机的内表面反射 1

- 一 单层膜的功效 1
- 二 多层膜的剩余反射率 4
- 三 照相机、物镜的防反射涂饰——接近于完全无反射的黑—— 8
- 四 小型单镜头反光照相机中反光镜箱的栏光现象 12

II 连动测距照相机的精度 15

III 35mm 单镜头反光照相机的对焦屏 24

- 一 裂象棱镜的测距精度 24
- 二 裂象棱镜的暗转（阴影）现象 30
- 三 缩小光圈下使用双合焦方式对焦 34
- 四 倾斜45°的裂象 39
- 五 单镜头反光照相机的调焦容易吗（1）——单镜头反光照相机不宜用于广角物镜—— 42
- 六 单镜头反光照相机的调焦容易吗（2）——莱卡和单镜头反光照相机的比较—— 44
- 七 单镜头反光照相机的调焦容易吗（3）——M型莱卡和莱卡弗莱克司相机—— 49
- 八 单镜头反光照相机的调焦容易吗（4）——与连动测距器的测距比较—— 54
- 九 单镜头反光照相机的成像毛玻璃面 60
- 十 成像毛玻璃面的新技术——美能达高锐度毛玻璃面—— 65
- 十一 毛玻璃面的漫反射特性 67
- 十二 毛玻璃面亮度的定量测量 73
- 十三 毛玻璃面上看到的弥散情况 76

IV 调焦 82

- 一 物镜的调焦——前镜片转动式和后镜组移动式—— 82

V 自动调焦 87

一 电子测距法 87

二 理想的自动调焦照相机——用CdS检测对比度的方法—— 89

三 霍尼威尔（Honeywell）VAF组件和它的光学系统 94

四 霍尼威尔VAF组件的信息处理 97

五 自动调焦的调焦档数——柯尼卡C35AF—— 101

六 单镜头反光相机用TTL自动调焦系统（1）——霍尼威尔公司的TCL方式—— 105

七 单镜头反光相机用TTL自动调焦系统（2）——潘太克司ME-F—— 109

八 超声波自动调焦——波拉洛依特SX-70声纳自动调焦照相机—— 114

VI 物镜的成像质量 121

一 理想物镜的适用范围——多大光圈才能称为理想物镜—— 121

二 理想物镜的分辨率板象 125

三 轴外象的分辨本领 130

四 分辨率与MTF的关系（1） 135

五 分辨率与MTF的关系（2） 139

六 MTF——理论值与实测值 144

七 MTF测定仪 148

八 中级相机物镜的演变 151

九 照相机物镜象质提高了吗？——50mm F2物镜的变迁—— 156

十 引入OTF定义的方法^{〔1〕} 162

十一 球面象差与聚焦（1）——几何光学的照度分布—— 166

十二 球面象差与聚焦（2）——几何光学的照度分布—— 170

十三 球差的过校正与双线模糊——散焦面和模糊程度—— 175

十四 球差与前景、背景的模糊程度——散焦面解剖—— 179

十五 自动光圈的焦点移动 185

十六 无象差物镜的成像性能 190

VI

十七	三级球差和波动光学的最佳象面 ——摘自中国光学学会理事长王大 珩先生青年时代的论文——	195	二十四	象差的矢量表示	224
十八	波动光学的最佳象点图解法	200	二十五	Maréchal的评价方法——波象差 容限及其应用范围——	228
十九	相似物镜	204	二十六	Nieboer的象差理论	231
二十	垂轴象差的表示	209	二十七	阿贝正弦条件(1)——不存在大 于F0.5的大孔径物镜——	240
二十一	彗差	213	二十八	阿贝正弦条件(2)——存在球差 情况——	244
二十二	波面的地形图——象散的考虑 方法——	217	VII	其他	250
二十三	象散产生照相机的弥散象	220	一	塑料透镜	250

1 照相机的内表面反射

一 单层膜的 功效

1 任何照相机都存在内表面反射

照相机的内表面反射，起因于某些意外而复杂因素的相互影响。虽然采用多层膜，是一种重要的技术进步，然而仅仅依靠它，也未必就能彻底消除。其次是在较复杂的情况下，要想弄清哪个因素对内表面反射起主导作用，这也并非是一个照相机评论家所能解释清楚的问题。总之，无内表面反射的照相机是没有的，即任何照相机都会有内表面反射。因此，为了进一步减小内表面的反射，仍需继续付出一番努力。

内表面反射的存在，究竟会导致哪些不良的效果呢？一般情况下，光线不能全部聚集在成像上，而是部分地会聚到不该被会聚和散射到不该被散射的地方，这种现象，称为内表面反射。由于它的存在，其结果将会损坏阴暗部位的影调层次，即阴暗部位的物体不能获得相对应暗黑的图象。而更严重的甚至还会在原来根本没有物体的部位出现幻象 (ghost) 或耀斑 (flare) 等光线集中的现象 (照片1.1.1)。有时，虽然倒也相反地利用了这种幻象的效果拍下了造形美观的照片，但绝不能将此说成幻象的存在是无关大局而被允许存在的理由。

关于耀斑的含意，在有关的文献中说法不一，然而一些厂家，对它都已相应地给出一个合适的定义。经归纳可大致区分为如下四种。

(1) 由透镜玻璃和空气分界面、或胶合面等处所反射的非成像光(non image forming light) 到达胶片平面上而形成的耀斑。

(2) 特别是当光源置入被摄体中时，由于(1)的原因，在胶片平面上也将会产生不规则的耀斑。这与幻象的情况相类似。

(3) 由于球差、彗差的存在，使象点的能量强度扩散为广范围低强度能量的分布，例如彗差耀斑 (comatic flare)。

(4) 由于镜筒内表面、或胶片片框等的反射，在与透镜成像系统无关的部位上产生反射光而到达胶片平面上。这种现象，一般称为机械耀斑或随机耀斑 (mechanical flare)。

2 玻璃和空气分界面的反射

物镜玻璃和空气分界面上，存在着反射 (图1.1.1)，这也是透明的固体或液体的表面一定会产生反射的原因。对于普通玻璃，都认为在一般的情况下，每一个表面的反射



照片1.1.1 照相物镜的幻象实例

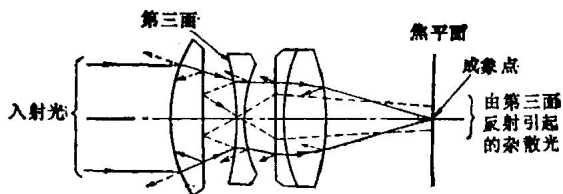


图1.1.1 在玻璃和空气分界面引起的反射

率约为4%。如在夜行车中,从车厢向窗外张望时,窗玻璃犹似镜面一样,对着它能清楚地看到自己的脸。这就是由于窗玻璃表面的反射而引起的。可是,在白天,只是因为车外的光线过强,使这表面反射的象受到干扰至难以识别,而并非这时表面反射象不存在了。

内表面反射,是相对于正常成像光而言的。一般认为它是在拍摄夜景、以及太阳光已进入或刚进入画面时的几种情景下而易于产生的现象。在希腊神话中,有水仙美少年(Narcissus)看得入神的水镜,其实它就是水的表面反射现象。这里的表面反射,在物理学中就叫做菲涅尔(Fresnel)反射。即当入射角为零度时,其反射是随固体或液体的折射率 n 的改变而变化的。若从光强度的角度上加以考虑的话,这时光的反射率 R 可写成

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (1.1.1)$$

在这个式子中,若取 $n = 1.5$ 时,则

$$R = (1.5 - 1)^2 / (1.5 + 1)^2 = 0.04$$

这也就是前面所说的把每一个玻璃表面的反射率认为是4%的根据。而当入射角为零度(即垂直入射)以外的情况下,其反射将随之加强(图1.1.2)。另外,折射率 n 增大时,菲涅尔反射也将随之增加。如折射率为1.65时,即每一面的反射将变为60%。其次,玻璃有上下两个面。若认为这两个面的总反射合计为4%的二倍等于8%的说法是正确的话,那么这时需要加上一点说明,这就是由玻璃上下两个面所反射的两光束之间,应该看作是不存在干涉现象。即这时应把相干性好的激光光束入射于厚玻璃的情况除外。而在通常情况下,只是采用一般光束,所以就不必考虑这些问题了。

由表示表面反射的式(1.1.1)中,可以看到,当玻璃的折射率为1时,反射率则变为零。这是理所当然的,因为空气的折射率也是等于1。所以,假若有这样的玻璃,即它的折射率也等于1,那么它和空气的分界面既无法区分,而且在这个分界面上也不会发生任何反射现象。然而这种玻璃,实际上是不存在的。

这么说来,虽然玻璃表面的反射犹似无法避免,但是采用表面镀膜的技术,那乃是一种非常有效的补救方法。大家知道,若在玻璃表面上镀上一层透明度好,而且折射率低于玻璃的薄膜介质时,就能减少玻璃表面的反射。这是因为利用了入射(这时简化为垂直入射)光线中分别由薄膜表面和薄膜与玻璃分界面上反射后的两光束相干涉的效应。

根据上述情况,说明我们经常所看到的吹肥皂泡时的颜色变化、以及浮在水面上油层的彩色及其亮度随油膜厚度变化等现象,其原理都是相同的(图1.1.3)。

3 薄膜和玻璃分界面的反射

设薄膜的厚度为 d 、折射率为 n ,其表面反射光的波动方程表示为 $a \sin \omega t$ 。其中 a 为振幅、 ω 是角频率、 t 是时间。即这时薄膜和玻璃分界面上反射光的方程可近似写成 $a \sin$

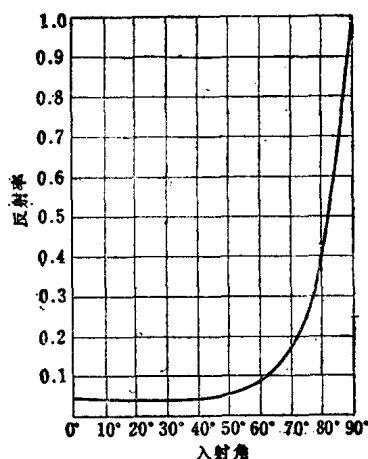


图1.1.2 在介质和空气分界面上的菲涅尔反射率同入射角间的关系曲线(介质折射率 $n = 1.5$)

$\times \left(\omega t + \frac{2\pi}{\lambda} 2nd \right)$ 。这意味着波长为 λ 的光,通过折射率为 n 、厚度为 d 的薄膜往返一次后,

光程差 (optical path difference, OPD) 为

$2nd$ 时,所产生的位相差是 $2\pi \times (2nd)/\lambda$ 。

而这时由薄膜表面所反射的光强度降低,并且膜层下反射光的振幅也不再是 a 。但是表面反射光的振幅,仍然可近似地认为是 a 。总之,若设 $\delta = 4\pi nd/\lambda$,则这两束反射光相干结果,其合成的谐振方程可表示为

$$\begin{aligned} & a \sin \omega t + a \sin(\omega t + \delta) \\ &= 2a \cos \frac{\delta}{2} \sin \left(\omega t + \frac{\delta}{2} \right) \end{aligned} \quad (1.1.2)$$

因合成反射光的振幅,是与 $a \cos \frac{\delta}{2}$ 成比例,

则光强度与它的平方 $a^2 \cos^2 \frac{\delta}{2}$ 成比例。所以,

根据薄膜表面和下面反射光的位相差 δ ,其合成反射光将在一些地方振动始终加强,另一些地方振动始终减弱,而产生稳定的明暗交替的干涉条纹。由上可知,采用镀膜效应,若要使反射光为零,其条件之一应是

$$\cos \frac{\delta}{2} = 0 \quad \text{则} \quad \frac{\delta}{2} \left(m + \frac{1}{2} \right) \pi \quad (1.1.3)$$

或换言之

$$\delta = (2m + 1)\pi \quad \text{即} \quad nd = (2m + 1) \frac{\lambda}{4} \quad (1.1.4)$$

这就是膜层的光学厚度应等于 $\frac{1}{4}$ 波长的依据。虽然采用 $\frac{1}{4}$ 波长整数倍的 $\frac{1}{2}$ 波长膜时,从理论上讲没有什么不妥,但是为了不增加膜层的厚度,在非特殊的情况下,一般均取 $m = 0$ 。所以 $\frac{1}{4}$ 波长膜厚的条件就称为防反射的位相条件。另外,必须严格控制薄膜表面和膜层下反射光的振幅,为此,膜层折射率 n 和玻璃基底折射率 n_g 的相互关系应满足

$$n = \sqrt{n_g} \quad (1.1.5)$$

若上式成立,则其反射率可完全等于零。这又称为振幅条件。因此,只要同时满足上述的位相条件和振幅条件,至少在垂直入射的范围内,反射光可消除到最小。关于振幅条件的数学推导方法,在这里虽然不再加以叙述,但归根到底是要求由薄膜表面和膜层下面所反射的光强度应该相等。因为任何一方过强,即使满足了位相条件,两者的强度有所减弱,然而这过强的部分,将还会有剩余的反射光。再则,实际的玻璃折射率为1.5左右,其平方根是1.22,像这样的蒸镀物质也很难找到。因此,平时经常采用与此接近的折射率为1.39的氟化镁(MgF_2)进行镀膜。由于氟化镁既易于蒸镀,又具有一旦蒸附在玻璃表面上时,则形成不易脱落而坚固的膜层的特点。因此,自古以来都喜欢用它来对透镜进行镀膜。即使至今,也都首先选用氟化镁作为单层膜的蒸着物质。氟化镁尽管具有此等可贵的特性,而它只能近似地满足防止反射的振幅条件,所以残余的反射仍然存在,图1.1.4为其一例。但不管怎样,它与无任何

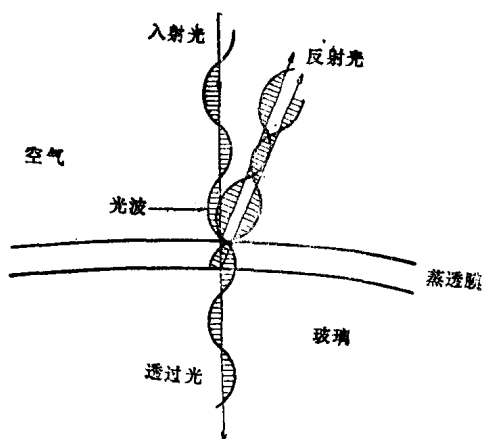


图1.1.3 菲涅尔反射例

防反光处理措施的玻璃表面相比,要减少 $1/3$ 的反射。所以说,近年来就是由于依赖了氟化镁镀膜技术,才使面数极多的变焦摄影物镜等走向实用化。

设薄膜和玻璃对光不产生任何的吸收作用,则入射于玻璃表面的光能,除一部分变为反射光和另一部分变为透射光外,便没有其它的去向,即

$$\text{入射光} = \text{反射光} + \text{透射光}$$

若入射光为一定,则所减少的反射光部分就成为透射光所增加的部分。因此,如能侥幸地开发出使反射光为零的防反光膜,则入射光将全部地变为透射光。

另外,即使反射光不能为零,但它与无镀膜的相比,由于减少了反射而增加了透射,所以将这反光膜称为增透膜。表1.1.1表示物镜中空气和玻璃的接触面数同有无镀膜时的透过率变化情况。

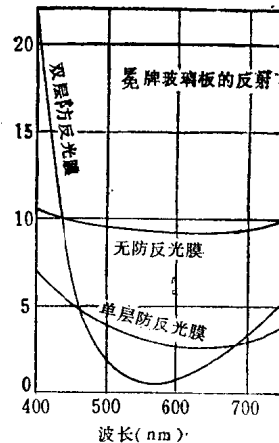


图1.1.4 单层膜的功效率

表1.1.1 玻璃、空气的接触面数和光线的透过率(%)

	分 界 面 数							
空气和玻璃分界面的反射率	2	4	6	8	10	12	20	30
4 %	92	87	78	72	66	60	44	29
0.8%	98	96	95	94	91	90	81	73
0.2%	99.6	99.2	98.8	98.4	98.0	97.6	96	94
0.1%	99.8	99.6	99.4	99.2	99.0	98.8	98.0	97.0

注) 无镀膜时,每一面的反射率相当于 4 %

单层膜时,每一面的反射率相当于 0.8%

多层膜时,每一面的反射率相当于 0.2% 以下

同一氟化镁单层膜,对于不同波长的光,其防反光效果是不一样的。一般常把控制波长入选在人眼最灵敏的波长 550nm 附近的黄绿光处。这时,虽然这些波长附近的光谱反射率达到最小值,但太阳光中除去黄绿光后所剩下的红光和紫光,将偏离上述的条件,而有较大的反射率。这就是有些光学透镜经镀膜后易呈现紫色或品红色的原因。

由于上述本来是以眼的视觉灵敏度为基础的,所以对于望远镜等目视光学仪器是合适的话,那么对于装有胶片的照相机的物镜来说,就应考虑作些必要的修正。根据胶片的光谱灵敏度,若把防反光的重点过分地移向短波段时,则最后将会呈现出所谓琥珀色彩的效果。

由此可见,镀膜虽然已成为固有的技术,但它又应以更快的速度向增加层数和采用更高的专门控制技术方向发展,其方向就是多层膜(MC)。

二 多层膜的剩余反射率

1 眼神和普尔钦·沙逊象

始自“凡尔赛的野玫瑰”之后,无数漫画中登场少女的共同形象,无不炯炯有神,眼放光

芒, 显得格外华丽 (图1.2.1)。当然, 在现实的生活中, 人眼不可能如此光芒四射, 这只不过是对漫画中的美丽少女赋以一种浪漫色彩的描绘罢了。但事实上, 人眼是能产生明亮的反射象的, 一般称这为眼神光。它对人物的半身肖象来说, 倒是显得非常重要, 因为它能给人物增添生动的表情, 而带来生机。

1932年, 普尔钦 (Purkinje) 在眼科学的研究中, 首先对这个问题作了解释, 尔后又得到沙逊 (Sanson) 的证实。因此, 现在都把眼睛上所能看到的反射象, 叫做普尔钦·沙逊象。当用近似点光源照明眼睛时, 在通常的情况下, 一般可看到三个普尔钦·沙逊象。如图1.2.2所示, 为眼的光学系统。可知光线在角膜前的反射为最强。又根据角膜的曲率半径, 它将生成虚象, 其位置正好与虹彩 (眼的光栏) 相重合。对于半身肖象来说, 固然眼神很重要, 但由于距离近, 所以, 当对眼神光调焦时, 所得照片的图象将会引起模糊。而当改对眼睫毛或角膜的前面进行调焦时, 虽然这时能获得称心如意的半身象, 可是眼神又会变得平淡无光。因此, 只有满足前者的情况下, 才能理想地突出眼睛的各种特殊效果。总之, 这里应注意的是由角膜前面到虹彩之间有 3 mm 的距离。



图1.2.1 漫画中眼放光芒的少女

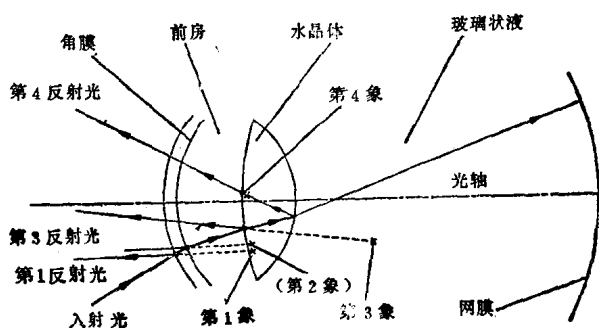


图1.2.2 眼的光学系统及其反射象

因角膜的折射率是1.376, 其反射率为

$$\left(\frac{1.376 - 1}{1.376 + 1} \right)^2 = 0.025.$$

它与测试值2.5%相吻合。再看所谓普尔钦·沙逊的第二个象。虽然角膜和前房分界面上也有反射象, 因前房的折射率为1.336, 所以在这里的反射率是

$$\left(\frac{1.376 - 1.336}{1.376 + 1.336} \right)^2 = \left(\frac{0.04}{2.71} \right)^2 = 0.00022$$

这0.02%比第一个象的 $\frac{1}{100}$ 还要弱, 实际上已看不见这个象。第三个反射象, 是在水晶体和前房的分界面上产生的。若水晶体的折射率为1.405, 则该面上的反射率为

$$\left(\frac{1.405 - 1.336}{1.405 + 1.336} \right)^2 = \left(\frac{0.069}{2.741} \right)^2 = 0.0006$$

这计算值虽然是0.06%, 但实测值约为0.1%, 因此这个象基本上还能看得见。再是根据水

晶体和玻璃状液之间的折射率差所形成的第四个反射象，实际上它与第三个反射象相似，其理论反射率为0.06%，实测值也为0.1%。此外，经各反射面之间的反复反射后，虽然还将产生第五、第六，……等反射象，但由于反射率低，事实上都已难以观察到。所以，在眼瞳中所能看得见的普尔钦·沙逊象，只是第一、第三和第四这三个象。因此，我们可以把人眼看成是相应于角膜—前房、水晶体、玻璃状体组成的一组三片透镜光学系统。照片1.2.1，是调焦在虹彩附近时所拍下的第一、第三和第四个象的照片。由于这时只是对普尔钦·沙逊象调焦，所以周围其它的目标，均为模糊象。

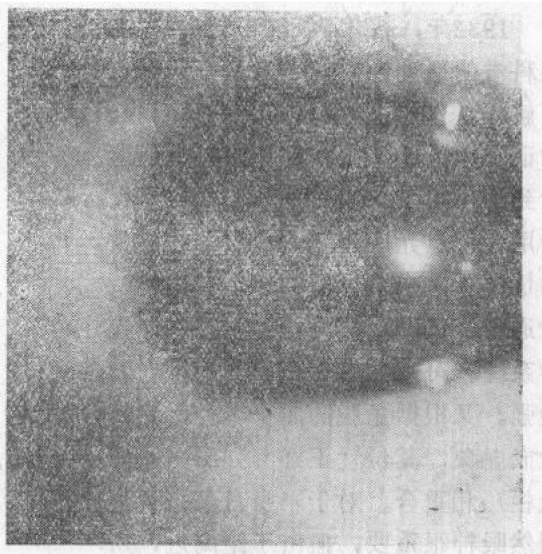
人眼的眼神光或眼科学中的普尔钦·沙逊象，不仅可用来突出漫画中少女的艺术效果，而更重要的还是自古以来就用它测定光学系统的构成要素，尤其是对水晶体折射率的测定。正因为是人的眼睛，不能像照相机物镜那样经分解后进行测试。而恰恰相反，所需要的是采用非破坏性的检查，所以只能对通过外来的光线经系统反射后所获得的反射象来进行各项的有关测试。

2 照相机物镜的反射象

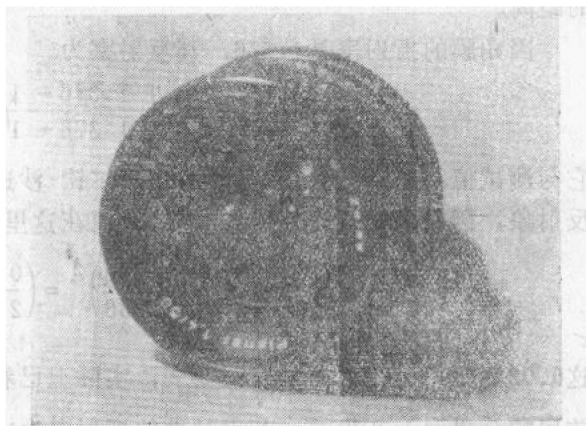
同普尔钦·沙逊象相比，在照相物镜上能看到的反射象为数较多。因对于眼睛来说，只有角膜的前面与空气接触，而在照相物镜中，空气和玻璃分界面数就要多的多。设有 n 组透镜，则空气和玻璃的分界面数就有 $2n$ 处。这明显地意味着这时反射象至少也有 $2n$ 个。当然，眼的普尔钦·沙逊象也同样，若按光源方向望去，它将根据不同凸、凹面的反射，而形成虚象或实象。若更确切地讲，则应把置于反射面前的光学系统的影响也考虑在内。

近年来，如何考虑多层膜的功效，已成为重要的话题。应该说，它对于空气、玻璃分界面多的多片透镜变焦物镜全面提高光线的透过率，具有最直接、最显著的应用效益。但遗憾的是这种效果，实际上在这方面并没有得到充分的发挥。其原因之一，是考虑到多层膜的成本与市场效果的均衡问题。因此，它在这方面的适用性受到限制。所以，这时若再冠以多层并过分强调它的效益，从长远来看，也未必是最妥当的。

另外，通过适当的选择，多层膜对减低幻影或耀斑的现象也有明显的效果。如以眼镜为例，没有镀膜眼镜的透过率为92%，施以多层膜后的眼镜透过率是96%或98%。然而在生活中，果然这所增加的4%乃至6%的透过率，就能被明显地觉察出来吗？这还是值



照片1.2.1 第一、第三和第四普尔钦·沙逊象



照片1.2.2 激光束照在透镜组上时所看到的情况

得怀疑的。虽然根据韦伯-菲克哪 (Weber-Fechner) 法则, 眼的明感度是随着光强度的加强而成对数地增加, 但从减少耀斑的角度来考虑的话, 这又是言外之题³。而事实上, 在傍晚和夜间, 以夕阳或汽车头灯为背景光源时, 则整个视场中的耀斑数量, 在无镀膜和有多层膜的不同情况下, 其差别将是很大的, 甚至达到数倍的关系。

照相物镜也是同样的道理。这里以标准物镜作为讨论的对象。对于透镜片数较少的物镜来说, 镀多层膜的目的其实并非单是为了增透效果, 而更重要的还是以减少耀斑或幻影作为立足点来考虑的。在这当中, 耀斑是包括镜筒内壁反射性质等问题; 而幻影是属于与镀膜和物镜本身设计等有关的性质问题。这是因为点光源的反射成象于胶片平面上, 或接近于成象状态而聚集成小光斑等, 可由几何光学获得预测。但与一般的物镜相比, 变焦物镜的条件苛刻, 在变倍过程中, 易于产生反射象而形成较多的幻影。从这个意义上来看, 可以说在变焦物镜中, 真正发挥了多层膜原有的特征。

3 多层膜效能的测定

现在, 经常能看到由厂家公布的关于多层膜的效能计算值。其实, 从数量上测量这种效能, 并非是一件容易的事。假若某个效能非常大, 那么也就易于测量。可是对于幻影来讲, 因为它在通常的摄影条件下, 不是经常能出现的, 所以很难处理。虽然把白天里的太阳或夜间的照明光源置入构图也是摄影实验中一贯所采用的方法, 但是这样也无法进行测量。

为了直接测定构成物镜组的空气和玻璃分界面的反射率, 最适宜采用激光。因在它的照射下, 物镜上所出现的现象, 与少女漫画上所追求的闪闪发光的眼瞳一样, 排列着许多美丽的反射象点 (照片1.2.2)。不过, 根据防反膜性能的不同, 这反射象的明亮度也各之有异。作为激光光源来讲, 在这种场合, 主要是利用了它的高亮度和良好的方向性。当然, 若改用白炽钨丝灯或电容脉冲灯, 其原理还是不变的。但是从高亮度这点上, 激光是远远超过以往固有的光源而独占鳌头。而且, 利用激光为光源, 实验也将会显得格外容易奏效。

实验装置与顺序如图1.2.3所示, 使激光束稍微偏离物镜光轴入射。这样将便于直接对入射和反射激光束的输出能量进行测量。否则, 若激光束完全按照物镜光轴入射时, 则反射光束再次返回到激光器, 使反射光的强度无法测定。

另外, 通过图1.2.3中的投影屏, 可对反射光点进行适当的安置。输出的功率, 可选用菲捷克斯公司的407C型频谱功率计来测量。开始时, 先将测量头对

着入射激光束, 测得功率为 P_0 , 然后将测头转向反射光束, 并逐个测出反射光的功率。设这时分别为 P_1 、 P_2 、 P_3 、..., 则它们与最初入射激光束输出值的比为 $R_1 = P_1/P_0$ 、 $R_2 = P_2/P_0$ 、 $R_3 = P_3/P_0$, 这即为各膜层的剩余反射率。它们的综合表示为

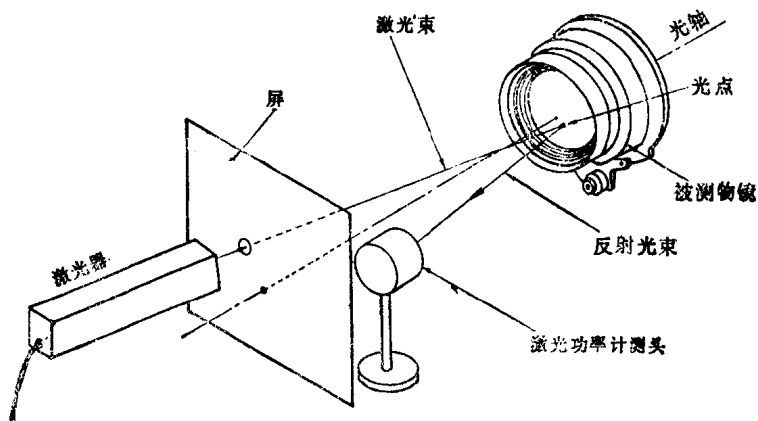


图1.2.3 测定多层膜效能的实验顺序

$$R = \sum_{i=1}^n R_i$$

上式则为物镜所有膜层的综合剩余反射率。当然，此值越接近零越好。但要注意，用这种方法测定时，在测得第一面的反射率后，再测第二面时，因光线需经第一面往返一次，所以应乘上一个修正值，即

$$R_2 = \frac{1}{(1 - R_1)^2} \cdot P_2 / P_0$$

以后的面都同样进行。虽然这种方法是较精确的，只是由于各面的反射率都很小，所以在实际测量计算中，这个修正值可忽略不计。表1.2.1表示了这种方法所测得的结果。

表1.2.1 多层膜的剩余反射率

物 镜 名 称	波 长 (nm)	构 成	剩余反射率
自动库西依MC55mm F1.4	490	5组7片	3.0%
SMC潘太克司50mm F1.2	630	6组7片	2.9%
SMC塔库玛35mm F2	510	7组8片	10.2%
SMC塔伟玛85mm F1.8	510	6组6片	4.5%
REGN托普康鲁M50mm F1.4	510	6组7片	2.3%

三 照相机、物镜的防反射涂饰 ——接近于完全无反射的黑——

1 寻求无反射的涂饰

“接近于完全透明的蓝”，是1976年度芥川奖获得者24岁青年村上龙的作品。而为了减少由照相机内表面反射引起的随机耀斑所需的黑色涂饰，也正好是“接近于完全无反射的黑”。但是，绝对黑色的涂料是不存在的。其原因如前所述，因物质的折射率与空气的不同，所以在它的表面上，必然会产生反射。这就如同在玻璃或水的表面上反射一样，即使在黑色的珐琅与黑漆的表面上，也将同样会产生菲涅尔反射。

一般吸收物质的折射率用复数表示为^[1]

$$n = n_1 - ik_1 \quad (1.3.1)$$

式中 k_1 为吸收率。与前面玻璃等透明体完全相同，即垂直入射时的反射率可写成

$$R = \left| \frac{n - n_0}{n + n_0} \right|^2 \quad (1.3.2)$$

其中 n_0 是空气的折射率。这里若用式 (1.3.1) 代入，则

$$R = \frac{(n_1 - n_0)^2 - k_1^2}{(n_1 + n_0)^2 + k_1^2}$$

金属的场合，因吸收率 k_1 在数量上要比折射率的实数部 n_1 大得多，所以反射率 R 接近于1，或100%反射。在极限的情况下，当吸收率趋向无限大时

$$\lim_{k_1 \rightarrow \infty} R = 1$$

则反射率可表示为100%。因此说,吸收率非常大的物质,它将接近于完全反射,这也就是金属具有高反射率的原因之一。但吸收率大的物质,并非在通常的情况下就能实现所谓“接近于完全无反射的黑”。下面不妨来介绍一下既不依靠涂料面几乎又能完全吸收光的一种方法。

2 乌道的光陷阱

最早的物理光学教科书,恐怕要算是罗巴特·乌道(R.W.Wood)的Physical Optics^[2]。它所包括的内容,有从基本概念、光谱学到光物性等,比现在的物理光学要多得多。但其中最令人感兴趣的是图1.3.1所谓共鸣灯的构造^[3]。

共鸣灯的内部充有某种气体,在外部激励光源的照射下,即可观察到被激励的原子所不断发出的共鸣光。虽然激励光仅从单方向射入,但共鸣光却是向四面八方散射。所以,若从管的横方向望去,激励光看不见,而只能看到共鸣光。这时,若对激励光处理不妥当,它

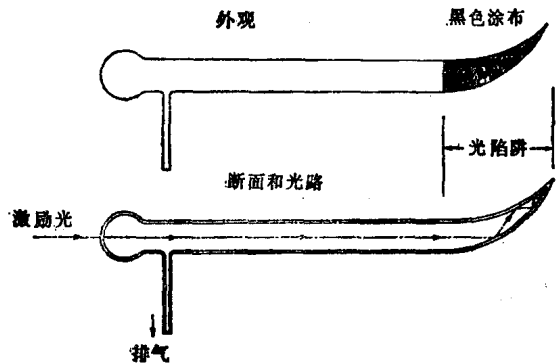


图1.3.1 乌道的光陷阱

经再次反射后,又可混入共鸣光中。由于共鸣光本身很微弱,有反射光存在时,将会引起一定的测量误差。为此,乌道作了如下的考虑:即在激励光前进方向上,与激励光相遇处的玻璃管开始做成锥度,且越来越细,并使其逐渐偏离光轴。然后将这象牙形的玻璃容器外壁涂成黑色。当然,这种制造工艺若用文章加以叙述的话,恐怕会显得冗长乏味。可是在具体制作过程中,对玻璃工来说,这却是瞬间易成的事。

由左方入射的光,激励气体后又射到玻璃管的锥体部,并经壁面反复多次反射而到达象牙体的端部。总之,光在玻璃管锥体处每经反射一次,就有一部分由玻璃进入黑色涂料而被吸收转换为热。其实,这时并不一定吸收率越高越好,而只要反射次数足够多,就可认为光几乎完全被吸收衰减,不再返回到入口处。设在涂黑的玻璃壁面反射一次,其平均吸收率为 α ,则经 n 次反复反射后,所剩余的光量为 $(1-\alpha)^n$,这时是把入射光作为1来考虑的。实际上,若锥体的锥度过大,最初与光轴平行的光线再经反射时的反射角就很小。而当入射角接近于零,则反射光线就会返回到起始点。因此要设法使返回光线尽量减弱。

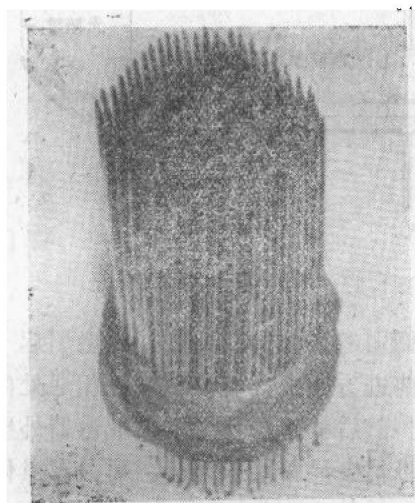
这种装置,若经精心制作,则能取得很好的效果。它可以使入射的光就象真正被捕捉住那样,最后不再反射出来。因此,从这个意义上来说,就把它叫做光陷阱(Light trap)。事实上,从乌道光陷阱的入口处仔细观察时,真能看到所想象那样的暗黑。如上所述,虽然是通过特殊的实验让光线在陷阱里熄灭或吸收,但它深刻地牵涉到有关黑色本质的探讨与阐述。

3 真正暗黑的针山

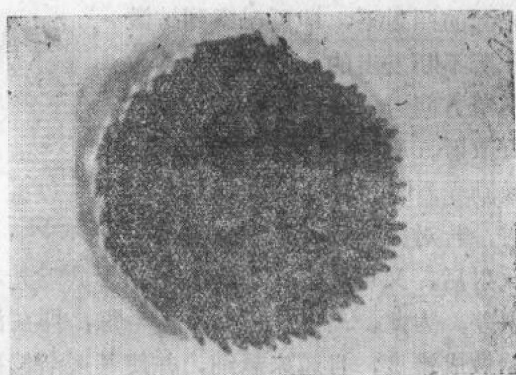
乌道的物理光学,乍看起来好象内容比较陈旧,但它所谈到之处,从现在使用的观点分析,它仍然有其珍贵所在,确是一册耐人寻味的好书。书中还例举了其它类似的实验^[4]。例如他先把数百根的针捆扎在一起,然后朝针尖的方向望去,就能看到如照片1.3.1那样象涂上了一层薄墨。其实,这时并没有在针尖涂上什么黑墨,若把它一根一根取出,将会证

实它却是经研磨后再镀上一层金属而发出亮光的针尖。这说明一根针能闪闪发光，而许多针集中在一起时，就变黑了。

这种不可思议的现象，尤其如照片 1.3.2，由针尖束正顶上所看到的情况，可由针尖集中处的光陷阱效应加以解释。当然，这里并不是真的全暗。对于每一根来说，针尖都在闪闪发光，而只是作为整体来看，才出现非常理想的“黑”。针尖为什么会表现出光陷阱的效果呢？如图 1.3.2 所表示那样，它基本上与乌道的光陷阱效应相同。针是铁或镀镍等金属材料，如同前面所讲，因它的吸收率大，所以具有高反射率，因此在针束的光陷阱效应下，便获得了暗黑的效果。当然，这并不限于针束，而大多数黑的物体，都与这光陷阱效应有着极其密切的联系。



照片1.3.1 375根针的针山



照片1.3.2 从正顶上所看到的针山

例如典型黑色涂料的原材料碳黑，是一个一个多孔的炭素微粒子。当不同波长的光入射到这多孔的陷阱后，便再也反射不出来了。另外，经真空镀膜后的表面，将呈现出金属光泽，而在溶液中经化学沉淀的银，又是黑色的；再如在低压气体中镀膜，也会得到近似黑色的表面，这些都是光陷阱的效应。又如照相胶片经曝光、显影后，银象黑化的现象，是属于照相化学的范畴，但仍需用光陷阱效应加以深入的说明。

光学实验时，为了消除室内或器械表面的反射，最好采用黑丝绒。因它在所有黑色装饰中反射为最少。绒布，是在布地上几乎垂直地植以细纤维而构成的。照片 1.3.3 是显微镜下的绒布表面形状。这时将可看到绒布的表面尤似针山。由于针山的光陷阱效应，绒布也就呈现出黑色。因为绒布本身很容易吸附尘土，所以，为了能更好地发挥它的这一特性，就应该经常用清洁的刷子把绒布表面清刷干净。

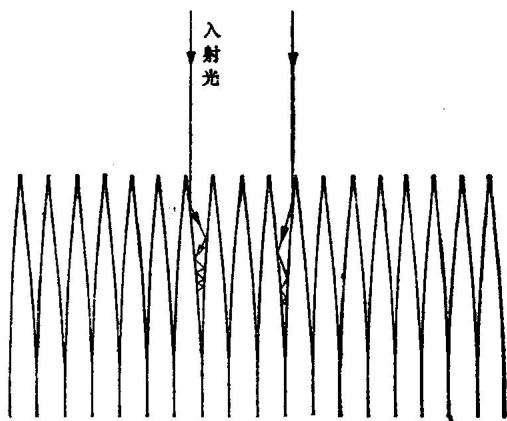


图1.3.2 针山的光陷阱作用