

不可忽视的胶合面反射

——论光学系统中组合透镜胶合面的反射和镀膜

齐 钰

摘要：论证了光学系统中透镜胶合面的反射是形成杂散光和影响成像质量不可忽视的重要因素。提醒光学仪器设计工程师，必须改变目前透镜胶合面不镀减反射膜的传统设计思想和加工工艺。这对于高级光学系统尤为重要。

一、引言

光学仪器杂散光的大小是衡量仪器质量好坏的重要指标之一。

光学系统杂散光的主要来源——光学元件的镜面反射，将直接参与光学成像，这种不需要的镜面反射则成为杂散光，致使成像系统降低反差、降低分辨率而影响像质。

在传统的光学系统设计中，设计者十分注重光学元件非胶合面的减反射，而对透镜胶合面的反射并未能引起重视，往往因其反射率“量小”而忽略不计。至今，包括高档显微镜和高倍率变焦距摄影镜头等一类高级光学系统在内，其胶合面均不予镀减反膜。然而事实上，胶合面的反射并非都“小”，对于折射率差值较大的透镜组和多组胶合透镜的光学系统，其胶合面的反射已构成系统杂散光的重要组成部分，并成为影响成像质量不可低估的重要因素。

本文从分析透镜胶合面的反射入手，导出胶合面反射计算公式，给出不同型胶合透镜减反膜的设计实例和实验结果。

二、胶合面反射的分析和计算公式

如图1示出胶合透镜 N_H 和 N_L 的结构。按传统工艺设计，两透镜胶合面不镀膜，用加拿大树脂胶胶合，非胶合面镀单层 MgF_2 减反膜。

光在透镜各界面的反射示于图上。分析中假定透镜玻璃、胶层和减反膜均无吸收，胶层厚度相对减反膜很厚，故可把经过胶合透镜的反射可分为胶层中心线 L 两侧 L_1 和 L_2 两个“反射镜”的合成反射。

图中 R_1 和 R_4 为两透镜非胶合面的反射， R_2 和 R_3 为胶合面的反射。若不考虑光在界面上的多次反射，那么光经过胶合透镜的透射率为

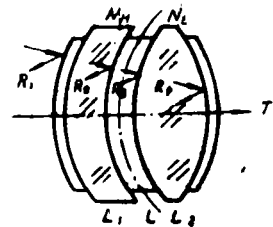


图1 胶合透镜各界面的反射示意

$$T = T_{L_1} \times T_{L_2}$$

$$= 1 - R_{L_1} - R_{L_2} + R_{L_1} \times R_{L_2}$$

反射率 $R = R_{L_1} + R_{L_2} - R_{L_1} \times R_{L_2}$ (1)

同理,“反射镜”的反射率分别为

$$R_{L_1} = R_1 + R_2 - R_1 \times R_2$$
 (2)

$$R_{L_2} = R_3 + R_4 - R_3 \times R_4$$
 (3)

$$R_{\text{胶合面}} = R_2 + R_3 - R_2 \times R_3$$
 (4)

(一)不同折射率透镜组的胶合面反射

取三种透镜组合类型进行比较:

A型: $n_H = 1.62, n_L = 1.46,$

B型: $n_H = 1.81, n_L = 1.43,$

C型: $n_H = 1.81, n_L = 1.62, (n_{\text{胶}} = 1.5)$

其中非胶合面按常规工艺镀MgF₂减反膜,胶合面不予镀膜,胶合结构同图1。

根据菲涅尔公式和单层减反膜反射公式可分别求出各界面在 λ_0 处的反射 R_i ,然后由公式(1) — (4)即可求出各项反射率。表1给出A、B、C各类透镜组的各项反射。

表1 不同透镜组胶合面无减反膜的计算反射(在 λ_0 处)

		$R_1\%$	$R_2\%$	$R_3\%$	$R_4\%$	$R_{\text{合}}\%$	$R_{\text{胶合面}}\%$
A	型	0.65	0.148	0.018	1.75	2.56	0.106
B	型	0.065	0.88	0.057	2.02	3.00	0.94
C	型	0.065	0.88	0.148	0.65	1.73	1.03

表1数值表明,胶合面的反射率与两透镜折射率差值及透镜与胶层的折射率差值相关,折射率差值越大,其胶合面的反射也越大,反射率可由0.2%到超过1%。这个反射值对光学系统的杂光来说已不是一个“量小”和“可以忽略不计”的数值。

(二)同类型透镜组胶合面有、无减反膜的反射

表2给出A、B、C三种透镜组胶合面有、无减反膜的胶合面反射。计算中胶合面的减反膜按 $n = \sqrt{n_0 \times n_s}$ 选择匹配。

表2 不同型透镜组胶合面有、无减反膜的反射(λ_0 处)

		胶合面有无减反膜	$R_2\%$	$R_3\%$	$R_{\text{胶合面}}\%$
A	型	无	0.148	0.018	0.166
		有	5.5×10^{-6}	8.4×10^{-7}	5.6×10^{-6}
B	型	无	0.88	0.057	0.937
		有	1.9×10^{-4}	8.2×10^{-6}	2×10^{-4}
C	型	无	0.88	0.148	1.026
		有	1.9×10^{-4}	5.5×10^{-6}	2.5×10^{-4}

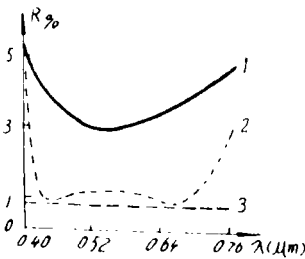
由表 2 数值表明，胶合面匹配减反膜可显著地降低胶合界面的反射，一般可有 3 个数量级以上的衰减。

三、设计实例

设计实例选取 B 型胶合透镜： $n_H = 1.76$ (ZF_6 玻璃)， $n_L = 1.43$ (CaF_2 晶体)，非胶合面镀 MgF_2 或三层宽带减反膜，胶合面有、无按匹配条件镀减反膜，其整个透镜及胶合面的反射计算结果绘入图 2 和图 3。

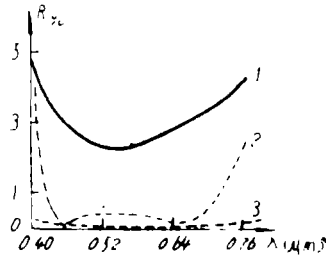
由图可见，透镜胶合面匹配减反膜可有效地减少其胶合面反射，由无膜的 0.7% 降低到整个可见区平均反射 0.07%；整个透镜的反射又以非胶合面镀三层宽带减反膜为最佳，可由原来胶合面无膜、非胶合面镀单层 MgF_2 减反膜的 3.5% 平均反射下降到小于 0.5%。

图 4 给出由 15 块透镜组成的 100 倍高档显微镜物镜的光学系统结构。其中有 6 组胶合透镜，8 对胶合面。图 5 给出 8 对胶合面有、无减反膜匹配的胶合面总反射计算值。



1—单层 2—三层 3—胶合面

图 2 计算的 B 型胶合透镜、非胶合面镀单层或三层减反膜，胶合面无匹配膜的反射



1—单层 2—三层 3—胶合面

图 3 计算的 B 型胶合透镜、非胶合面镀单层或三层减反膜，胶合面有匹配减反膜的反射

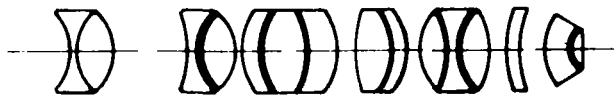
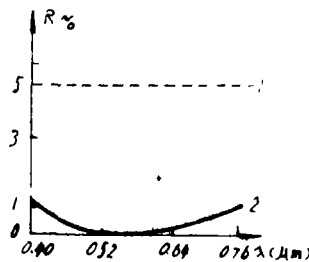


图 4 高档显微镜 100 倍物镜的光学系统图



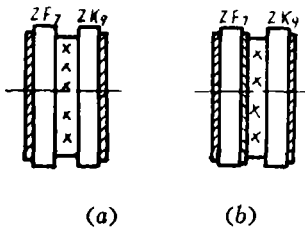
1—无膜 2—有膜

图 5 计算的 8 对胶合面有、无减反膜匹配的总反射

计算表明，该光学系统胶合面不匹配减反膜的胶合面总反射可达4.2%，这个反射值已相当于一个无减反膜的K₀玻璃表面的反射，而有减反膜匹配的胶合面平均反射可减少到0.3%，其中心波长处反射率趋于零。可见胶合面匹配减反膜十分有利于光学系统轴向杂散光的消除。

四、实验结果

选取C型胶合透镜结构： $n_H = 1.81$ (ZF₇玻璃)， $n_L = 1.62$ (ZK₉玻璃)。试件为 $\phi 30\text{mm} \times 2\text{mm}$ 平板各二块。非胶合面镀单层MgF₂减反膜。其中一对试件的胶合面不镀膜（同常规工艺），另一对试件的ZF₇玻璃胶合面按 $n = 1.64$ 镀减反膜匹配，ZK₉玻璃胶合面仍不镀膜。然后将二对试件用加拿大树脂胶胶合，用UV-365分光光度计实测其光谱反射。



(a) 胶合面无减反膜 (b) ZF₇胶合面有减反膜
图6 C型结构胶合面有、无减反膜的胶合结构

图6给出C型胶合透镜胶合面有、无减反膜的胶合结构，表3和图7给出其胶合件反射的实测结果。

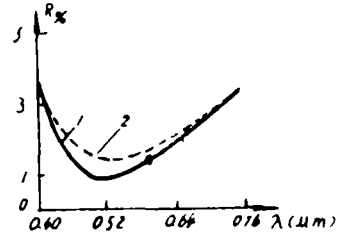
从实验结果不难看出胶合面匹配减反膜后可减少整个镜面反射的效果，如果ZK₉胶合面也同时匹配减反膜，那么减反效果则更加显著。

实测结果的无膜反射比理论计算值稍低的原因是因为理论计算时界面多次反射予以忽略之故。

表3 C型胶合件胶合面有、无减反膜时在 λ_0 处的反射比较

	胶合面无膜R%	ZF ₇ 胶合面有膜R%
理论值	1.49	0.80
实测值	1.35	0.79

注：胶层实测 $n = 1.53$ ，ZK₉胶合面无减反膜



1. ZF₇胶合面有膜 2. ZF₇胶合面无膜
图7 C型胶合透，ZF₇胶合面有减反膜，ZK₉胶合面无减反膜同胶合面均无减反膜的实测光谱反射比较

五、结论

组合透镜胶合面无减反膜所产生的反射是不可忽视的杂光来源，直接影响光学系统成像质量。胶合面按匹配条件施加减反膜可显著地减少其反射。因此，光学仪器制造者有必要改变透镜胶合面不予镀减反膜的传统设计思想和加工工艺，至少对折射率差值较大的胶合面按减反条件施加减反膜。这对各种较复杂和高级像质要求的光学系统尤为重要。

孙平、冯纪蒙和张德震同志共同参加了胶合件镀膜实验和测试工作，李秀玉同志在测试上给予大力协助，在此一并表示感谢。

Unnegligible Reflection of a Cemented Surface

Qi Yu

Abstract

Based on practical requirements for improving the image quality of an optical instrument, it is demonstrated that the reflection of the cemented surface of the combination lens in an optical system is an important factor of producing the stray light and influencing the image quality.

A new idea that anti-reflection film should be applied to the cemented surface of a combination lens is put out in the article.

The calculating formula for the total reflection of the cemented surface is derived. The cemented surface reflection of three types of cemented lenses are analyzed. The calculations show that the cemented surface reflection is related to the index difference of two lenses having been cemented and the index difference of the glue layer and two lenses having been cemented. The greater the difference is, the more seriously the cemented surface reflects. The reflective ratio is 0.1%—1.1%; the cemented surface with anti-reflective film could effectively decrease the reflection, at least by 2 orders of magnitude.

Design examples of cemented surface coating and some experimental data are also given. The results are identical with the theoretical calculations. Finally, it is put out that the traditional design and working technique of lens cemented surfaces without being coated should be changed. At least the cemented surface with great index difference should be coated with anti-reflective film. This is more important for the optical systems which are complicated and whose image quality requirements are strict.