

LED 二次光学透镜的效率探讨

一、引言：

随着功率型 LED 用于普通照明领域越来越成熟，为达到良好配光效果而采用了二次光学透镜，这些为满足不同效果而设计的各种性质的透镜，其使用材料大多为光学级亚克力（PMMA），其透光率约为 92%，但市场上有很多的透镜的效率据声称都能达到 90% 以上的效率。本文从影响光学系统效率的几方面来分析，借助相关光学软件进行模拟，从而确定目前以 PMMA 做成的透镜的效率的实际值，希望能对厂家选购 LED 二次透镜时能起到一定的借鉴。

二、透镜中光能损失的计算

二次透镜的效率 η 是一个永远小于 1 的数，这是因为实际光学系统会引起光能损失的缘故。目前能引起光能损失的主要有以下两方面原因：

- 1、透射面的反射损失。
- 2、光学材料本身的吸收损失。

然而，在实际原因 1 导致的光能损失往往被忽视，其实原因 1 造成的损失比原因 2 更大。

对于原因 1：

当光线从一介质透射进入另一介质时，在抛光界面处必然伴随着反射损失。反射光通量与入射光通量之比称为反射系数，反射系数以 ρ_1 表示，当光线垂直入射或以很小入射角入射时：

$$\rho_1 = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2$$

其中： n' 、 n 为界面两边材料的折射率。

所以，单个透射面的透过率为 $(1 - \rho_1)$ ，当光学系统有 N 个透射面时，透过率为：

$$k_1 = (1 - \rho_1)^N$$

对于原因 2:

当光束通过光学材料时,材料本身会吸收光能,引起光能的损失,材料的光吸收系数 ∂ 用白光通过 1cm 侯的介质时的透光率 k 的自然对数的负值表示,即:

$$\partial = -\ln k$$

$$\Rightarrow k = e^{-\partial}$$

所以当光束通过 M 厘米后的光学材料时,其透光率为:

$$k_2 = e^{-\partial \cdot M} = k^M$$

综上所述,LED 发出的光经过二次光学系统到达接收面时,其效率 η 为:

$$\eta = k_1 \cdot k_2 = (1 - \rho_1)^N k^M$$

例如:一束光通量为 100lm 的平行光经过一块 10mm 厚的 PMMA 板时,如 PMMA 的透光率为 92%,那光线经过这块 PMMA 板后,出射光的光通量可以通过以下方式计算:

示意图:

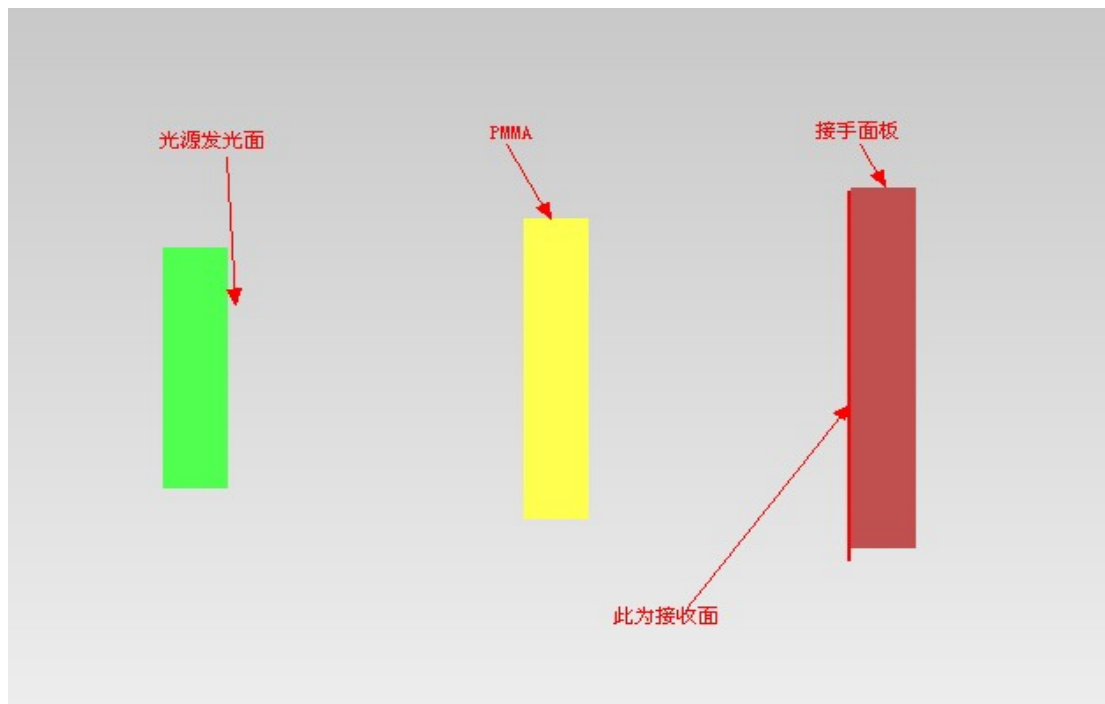


图 1, 各部件相对位置图

首先计算透射面的反射损失:

PMMA 的折射率为 $n' = 1.4935$, 周围介质为空气, 折射率 $n = 1$

反射系数

$$\rho_1 = \left(\frac{n' - n}{n' + n} \right)^2 = \left(\frac{0.4935}{2.4935} \right)^2 = 0.03917$$

透射面有两面, 所以透射面的透过率

$$k_1 = (1 - \rho_1)^2 = (1 - 0.03917)^2 = 0.92319$$

计算由于 PMMA 材料对光能的吸收而造成的透过率

材料厚度为 1 厘米, 所以 $M=1$

$$k_2 = k^M = k = 0.92$$

所以该系统的总效率为:

$$\eta = k_1 \bullet k_2 = 0.92319 \times 0.92 = 0.8493 \approx 0.85$$

出射光通量 $= 100 \times 0.85 = 85\text{lm}$

三, 利用软件模拟验证

下面通过蒙特卡洛光学软件 Tracepro 来验证以上计算的正确性

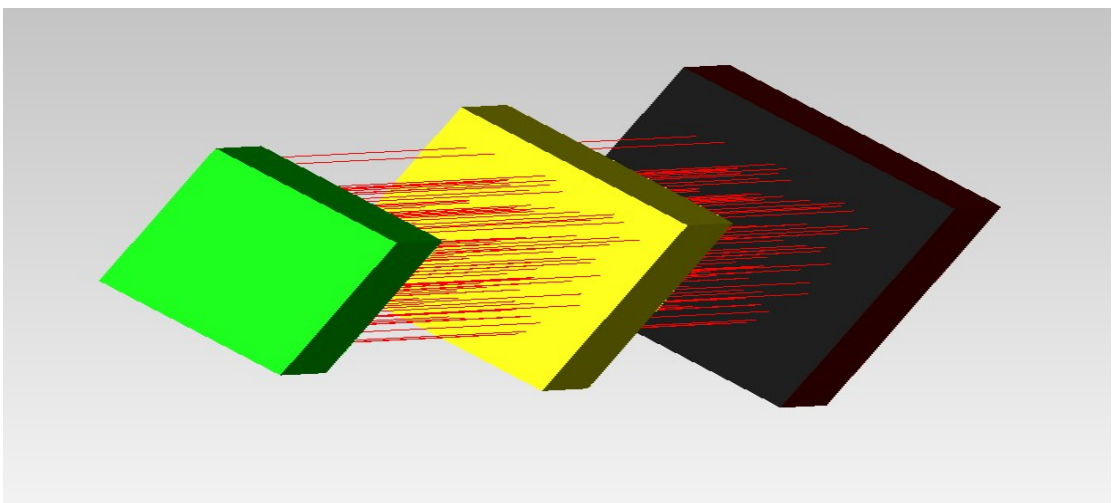


图 2, 描光示意图

在设置 PMMA 材质属性时，先将其设置为理想材料，即材料本身对光线不吸收，透过率为 100%，如下图所示：

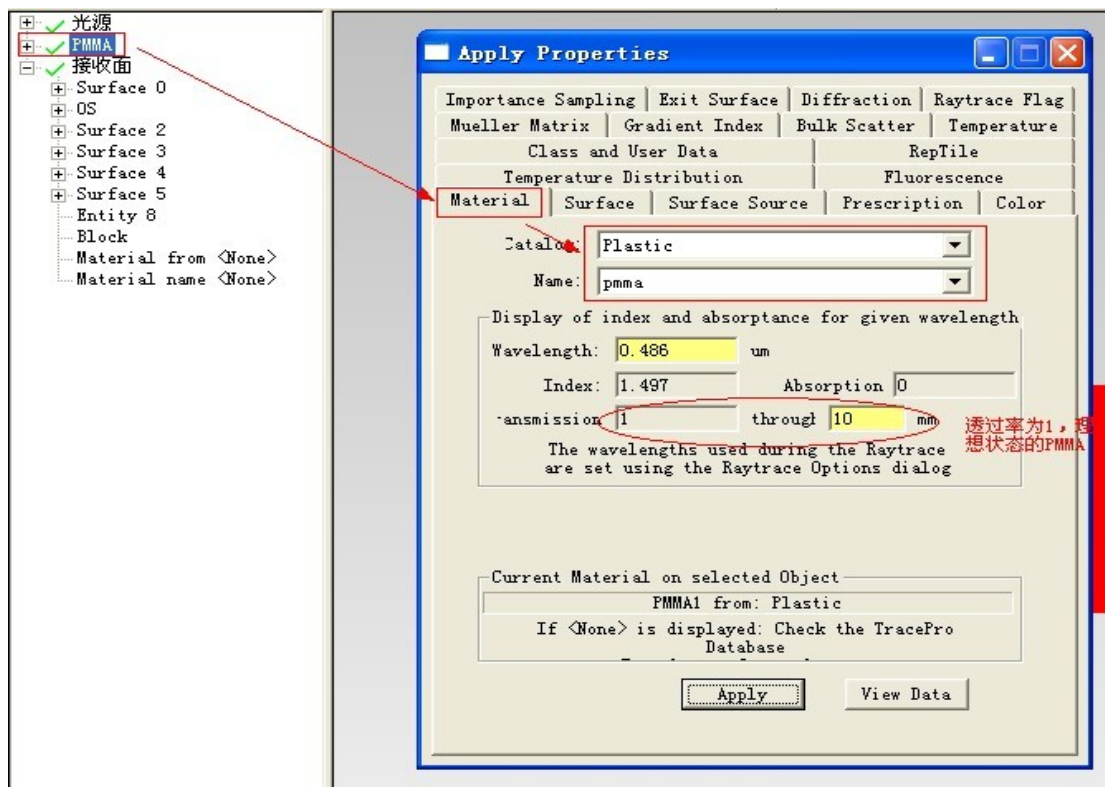


图 3，理想 PMMA 材料，透过率为 1

经过这样的设置，描光模拟后，得出的效率如下图：

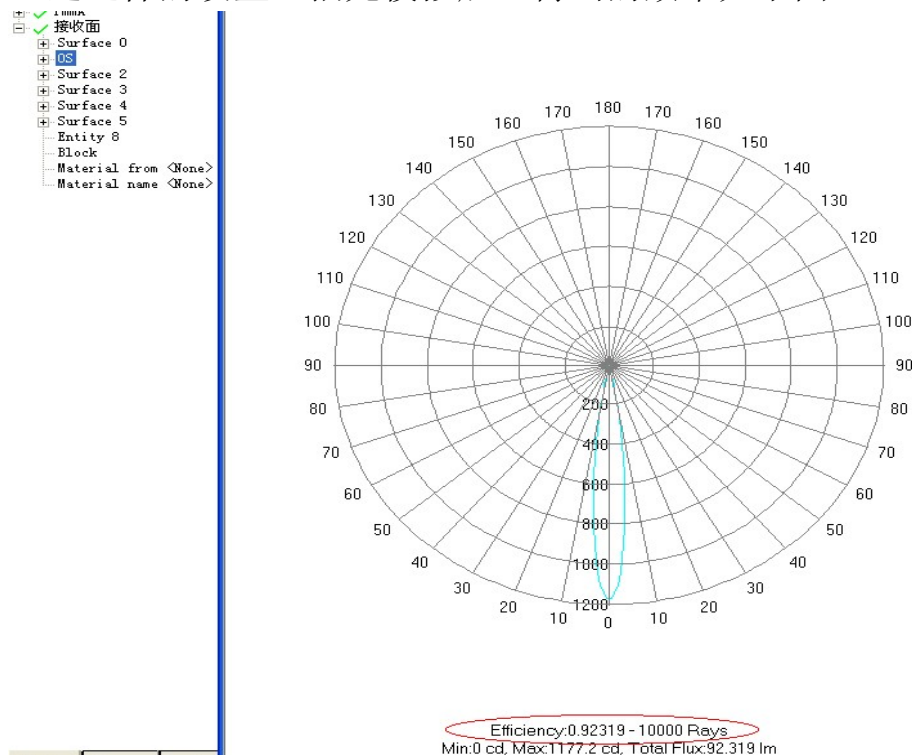


图 4，理想 PMMA 效率图

根据图 4, 效率为 0.92319, 这与上述计算中的 k_1 的值是对应的。
如果考虑到材质 PMMA 本身的吸收造成的光能损失, 则材料的设置如下图:

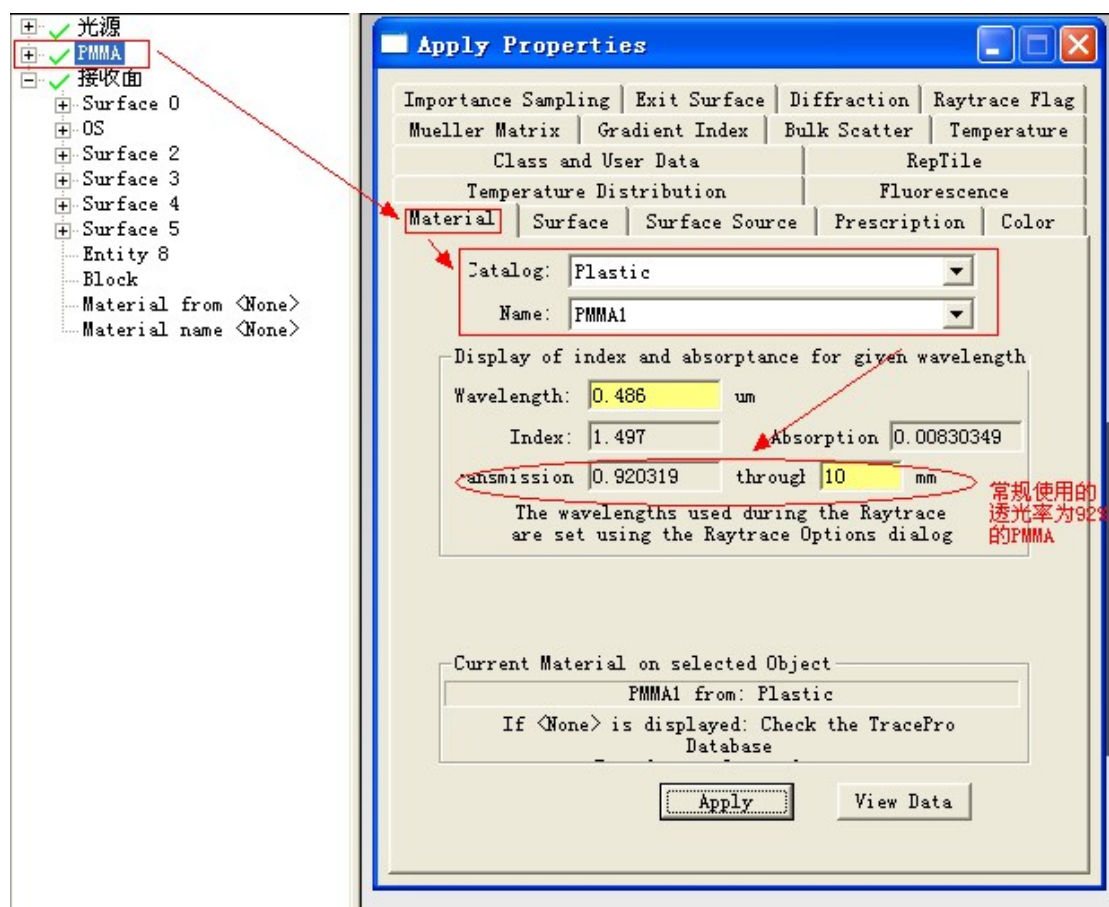


图 5, 实际用到的 PMMA 材质设定 (透光率 92%)

经过描光后, 得到的效率图:

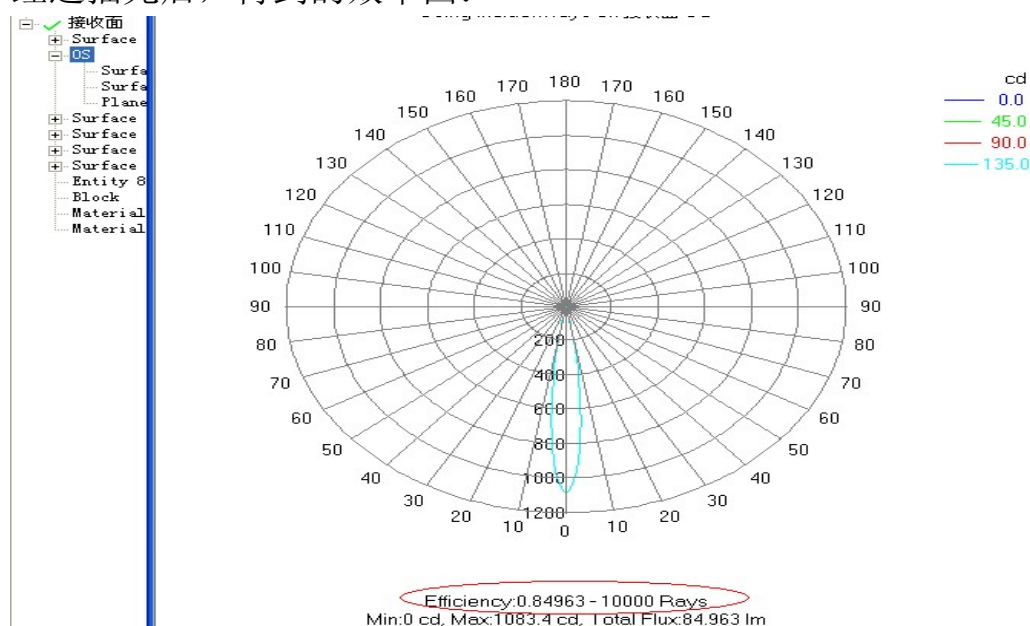


图 5, 实际用到的 PMMA 效率

在考虑到实际的材料透光率以后，算出的效率为 0.849，与上面的计算是吻合的。

四，结论

在实际使用中，LED 二次光学系统，尤其是 LED 路灯透镜，都被加工成了自由曲面，而且 LED 光源发出的光线分布为 Lambertian，入射到透镜的透射面时，造成的反射损失要比上面例子中的更大，再加之这些透镜的各向厚度均达到或超过 10mm，对光能的吸收均以超过 92%，综合起来透镜的效率绝对不会超过 0.85，更不可能达到部分厂家所宣称的达到 94% 以上。

尽管在用积分器测试过程中，LED 再加上二次透镜前后对比的效率也能超过 85%，甚至达到 90%，但这个数据是不可靠的，因为积分器测试的 LED 加透镜之后的光通量，并非全部为有效光通量，就 LED 路灯透镜而言，可能单颗 LED 加上透镜后测试的效率有 90%，但实际使用中，这 90% 的初始光通量并未全部用于道路照明上，其中有相当一部分被透镜的透射面反射回去，而最终转化为热能。

笔者作此验证，也只是抛砖引玉，旨在与同行一起为 LED 灯具效率的提高而努力。水平有限，欢迎拍砖。