



LED 的光输出效率

万文才 刘宇 朱绍龙

(复旦大学电光源研究所)

摘要: 运用菲涅耳折射反射公式, 首先计算从 LED 芯片出射到封装材料中的配光曲线, 以及这一界面的光输出效率; 其次计算了封装材料与空气界面的出光效率; 并由此得到简单封装形状 LED 的封装材料折射率对光出射效率的影响。

关键词: LED; 配光曲线; 效率; 光出射效率

LED 被认为 21 世纪很有前途的照明新光源。作为继白炽灯、荧光灯和高强度气体放电灯之后的第四代光源, LED 有着极其光明的发展前景, 它具有功耗小、寿命长、体积小、发热低、坚固耐用等特点; LED 在颜色种类、发光功率和性价比上都还有上升空间, 现已得到广泛应用, 比如在交通信号灯、显示灯和大屏幕显示器等方面的应用日益增多, 可是 LED 的发光效率还不够高^[1]。如何进一步提高效率, 是当前的研究热点之一。

本研究从 LED 的封装材料的折射率出发, 采用简化的 LED 结构模型, 并通过菲涅耳折射反射公式, 计算各个界面的光出射效率, 从而得到总的光输出效率; 以及封装材料折射率对光出射效率的影响。

1 模型的建立

1.1 点光源假设

LED 是由 p 型半导体和 n 型半导体组成的晶片, 它们之间形成过渡层——p-n 结, 当 p-n 结正向偏置时, 电子和空穴将分别从 n 和 p 型半导体注入 p-n 结, 并复合而发光^[2], 如图 1 所示。假定 p-n 结是一正方形发光面, 面积大约为 0.7 mm^2 ^[3], 而 LED 柱状截面面积一般为 20 mm^2 , 因而 p-n 结发光面积占其 4%, 非常小, 故可以假定 p-n 结发光是一个点光源。



图 1 p-n 结发光示意图

1.2 全反射圆锥

光线从光密媒质射向光疏媒质，当入射角大于临界角时，将发生全反射。假定 LED 晶片采用折射率为 3.9 的砷化镓材料，外面的封装材料采用折射率为 1.5 的环氧树脂，则全反射角 $i_c = 22.6^\circ$ (已假定 p-n 结发光是一个点光源 O)，因此只有在 $i_c = 22.6^\circ$ 为半角的一个圆锥以内的光子才能溢出晶片，如图 2，而反射回去的光子则假定因内部吸收不再出射。另外 p-n 结点光源向下半平面发射的光子由于基底和内部吸收也假定不出射。

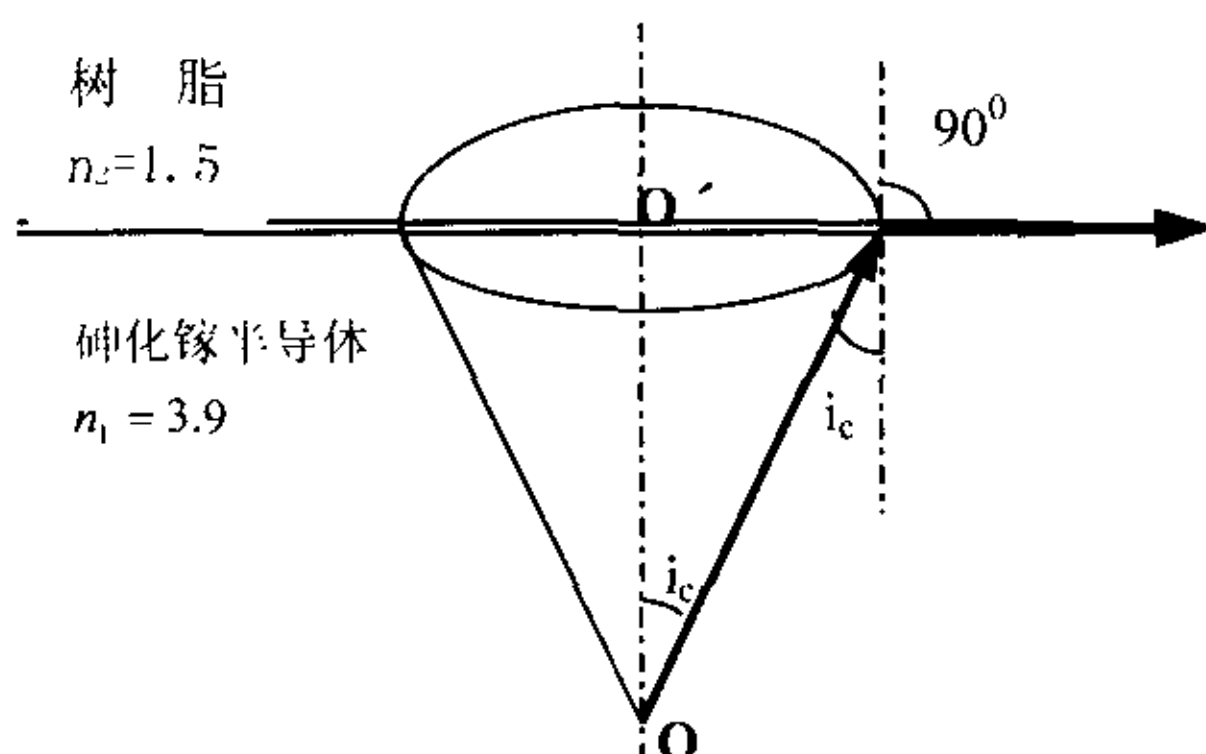


图 2 在晶片/环氧树脂界面上的全反射示意图

1.3 半球形封装

为保护半导体晶片，通常用透明介质将它固定起来，称为封装^[1]。封装一般采用环氧树脂，封装的形状直接决定着输出光的分布，如图 3。假定 p-n 结发光是一个点光源 O，一般 LED 晶片厚度为 0.5 mm^2 左右^[3]，由临界角可算出圆锥的底半径为 $r = 0.2 \text{ mm}$ ，而封装半球的半径大约为 2.5 mm ，圆锥尺寸是它的 0.8%，可忽略不计，故假定光是从 p-n 结发光点 O 对应的 O' 发出。如果采用图 3 所示的顶部半球形封装，晶片处于球心，可以粗略认为晶片发出的光垂直于环氧树脂-空气界面，不存在全反射，其光子溢出的损失就是反射损失，计算很方便。

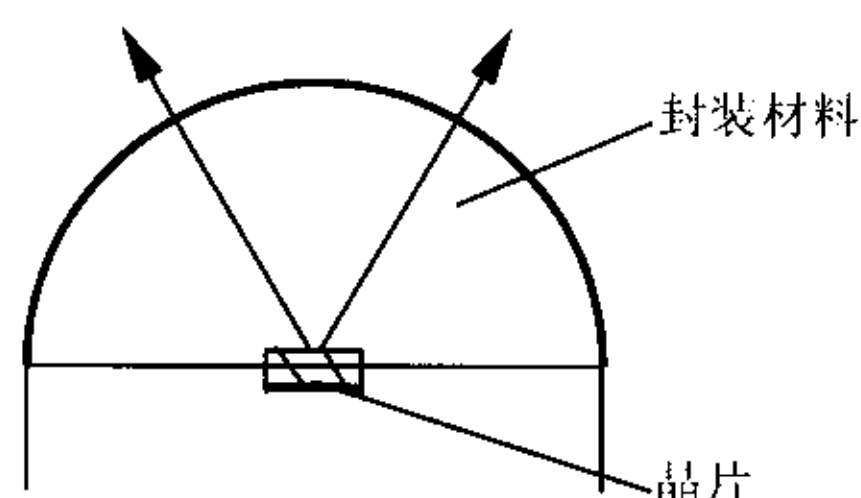


图 3 半球形封装示意图

2 相对光强分布和光输出效率的计算

2.1 LED 晶片出射相对光强分布曲线

根据两种透明媒质界面的本征振动理论，一束光经过两种透明媒质界面时，将分解为平行于入射面的 p 分量和垂至于入射面的 s 分量，并且在反射、折射过程中，p、s 两个分量的振动是相互独立的^[5]。再由菲涅耳折射公式可知，在折射过程中 p、s 分量的光子透过率是不一样的，因此计算时要分别处理。

由以上发光模型，从圆锥中溢出的光子，其光分布是旋转对称的，因而可以只要选取任一通过光轴的平面，计算出此平面 0~90° 的光分布就能推知整个空间的光强分布曲线。

p-n 结发射的光子入射到晶片-树脂界面上，由于反射角的存在，入射角 i_1 的范围在 0~ i_c 之间，而出射角 i_2 为 0~90°。具体计算过程如下：

- (1) 将出射角 i_2 以 $\Delta i_2=1^\circ$ 为间隔划分为 90 等分；
- (2) 由折射公式反推对应于每一出射角下的入射角 i_1 ；
- (3) 根据菲涅耳光子透过率公式^[5]

$$\zeta_p = \frac{n_2 \cos i_2}{n_1 \cos i_1} |t_p|^2 = \frac{4 n_1 n_2 \cos^2 i_1}{(n_2 \cos i_1 + n_1 \cos i_2)^2}$$

$$\zeta_s = \frac{n_2 \cos i_2}{n_1 \cos i_1} |t_s|^2 = \frac{4 n_1 n_2 \cos^2 i_1}{(n_1 \cos i_1 + n_2 \cos i_2)^2}$$

可分别计算得到对应于每一角度下 p、s 分量的光子透过率 ζ_p 、 ζ_s ;

(4) 取 p-n 结的发光强度 (光子密度) 为单位数量 1, 则出射光强为

$$T_p = 1 * \zeta_p * \Delta i_1 / \Delta i_2$$

$$T_s = 1 * \zeta_s * \Delta i_1 / \Delta i_2$$

(5) 以零度出射角时的光强值为 1, 计算其它角度下的出射光强的相对值 w_p 、 w_s , 并计算它们的平均值 \bar{w} 由相对光强 w_p 、 w_s 及平均值 \bar{w} 与角度 i_2 的一一对应关系, 可以得到直角坐标系下的相对光强分布曲线, 并将平均值曲线与余弦值 $\cos i_2$ 进行比较, 如图 4 所示。从图 4 可以看出, 相对光强平均值曲线基本符合余弦分布。

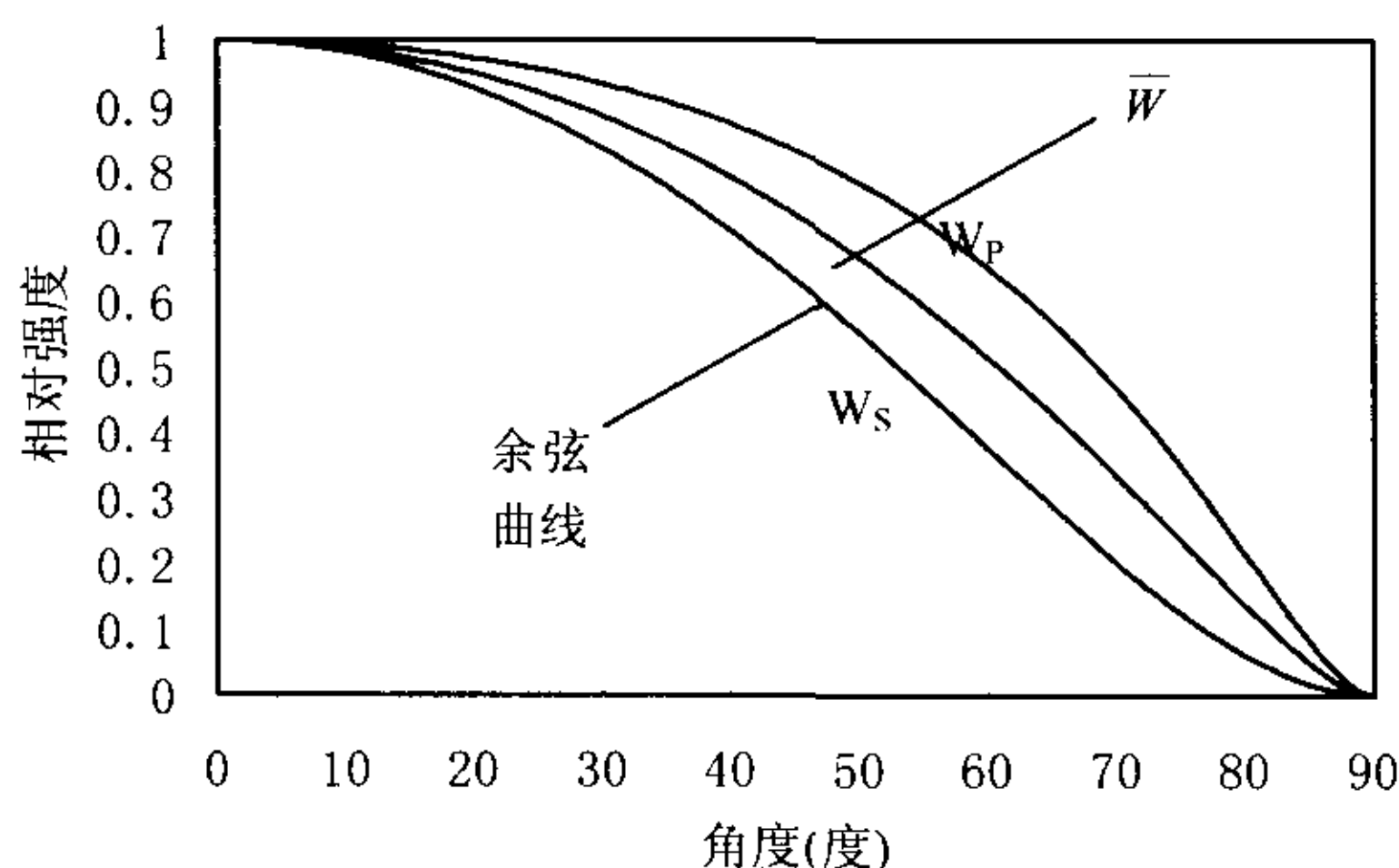


图 4 直角坐标系下的相对光强分布曲线

如果取: $X_1 = \bar{w} * \cos i_2$; $Y_1 = \bar{w} * \sin i_2$

并以 Y_1 为纵坐标值, X_1 为横坐标值, 就可以得到极坐标系下 $0 \sim 90^\circ$ 之间的配光曲线, 如图 5, 将它左右复制, 就能得到 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 的配光曲线。

2.2 封装材料折射率对光输出效率的影响

采用半球形封装, 从晶片发出的光近似垂直入射到环氧树脂-空气界面。根据菲涅耳折射公式, 在正入射时, 即 $i_1 = i_2 = 0$, p、s 分量的光子透过率相等其中 n_2 、 n_0 分别表示环氧树脂

$$\zeta_p = \zeta_s = \frac{4n_2 n_0}{(n_2 + n_0)^2}$$

和空气的折射率。环氧树脂的折射率取 1.5, 空气的折射率一般取 1.0, 这样可以计算光子在

环氧树脂-空气界面的透过率。由于 p-n 结发射 p、s 分量的光子强度假定为 1，则 p-n 结在任一半平面发射的光子总数为 180；对于出射光，角度间隔 $\Delta i_2=1^\circ$ ，将 $0\sim 90^\circ$ 下光强值 T_p 、 T_s 分别求和，得到的结果就是 p、s 分量在任一半平面中溢出的光子数，将这两个结果都除以 180，就能得到晶片-树脂界面 p、s 分量的光子透过率，取二者的平均值，即为晶片-树脂界面的光输出效率。

改变环氧树脂的折射率，以 0.1 为间隔取空气折射率和晶片折射率之间的值，并分别求出晶片-环氧树脂界面的光输出效率和环氧树脂-空气界面的光输出效率，将二者相乘，得到对应于不同环氧树脂折射率条件下 LED 的光输出效率，结果如图 6。

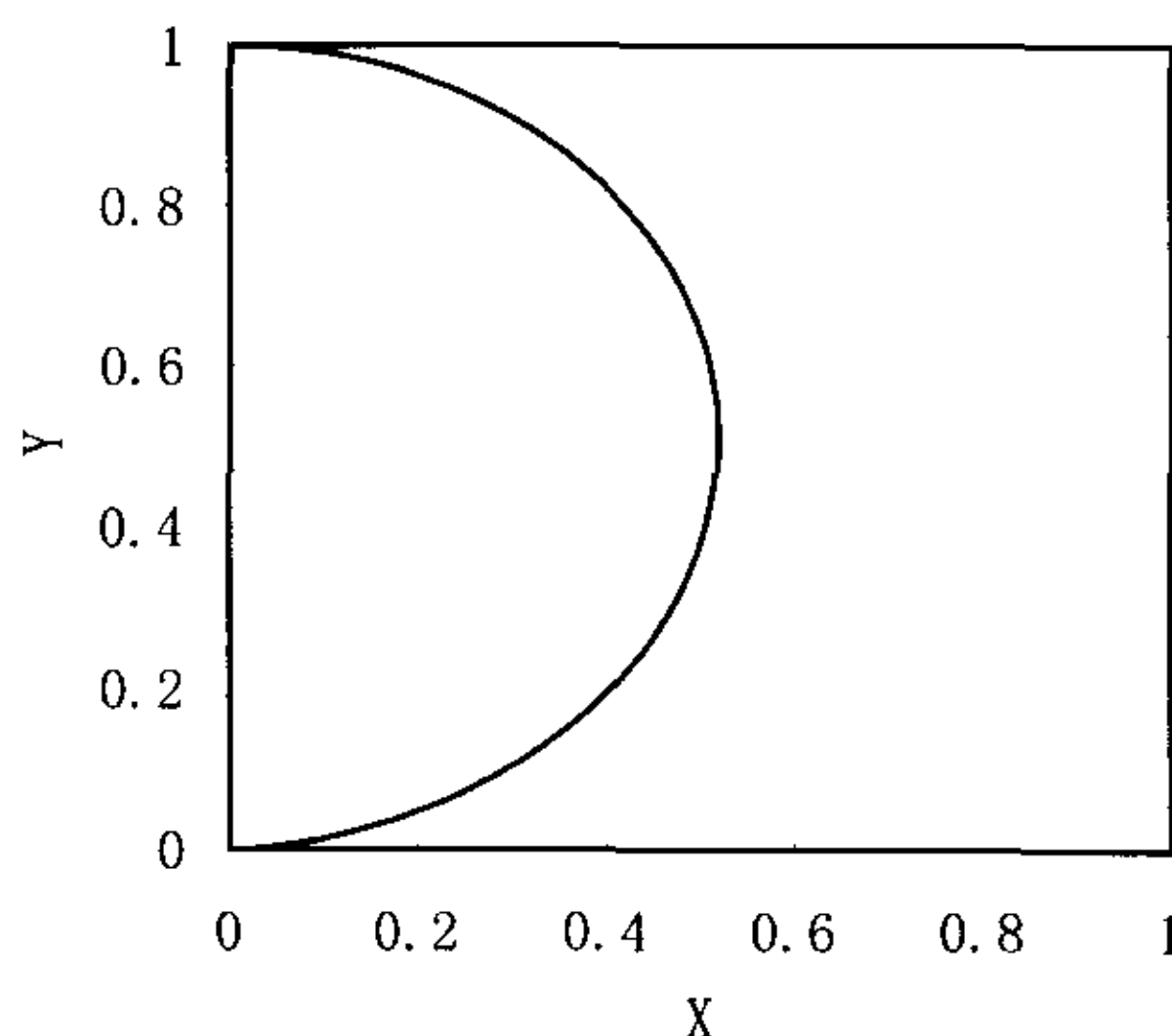


图 5 极坐标系下的相对光强分布曲线

2.3 非半球形封装 LED 的光强分布

所谓非半球形封装，其实顶部仍是半球，而下面增加一段圆柱，如图 7，这种形状与实际跟接近。这时出射光将分为两部分，一部分是从顶部半球形射出，一部分从圆柱射出。

现假定圆柱高为 1/2 球半径 ($h = r/2$)，则圆柱部分最大入射角为 $\arctg(1/2)$ ($=26.5^\circ$)。圆柱部分入射角是容易得到的，至于半球形部分，则根据正弦定理，如图 7 中三角形 $\triangle ABO$ ，有：

$$\frac{h}{\sin \angle B} = \frac{r}{\sin \angle A}$$

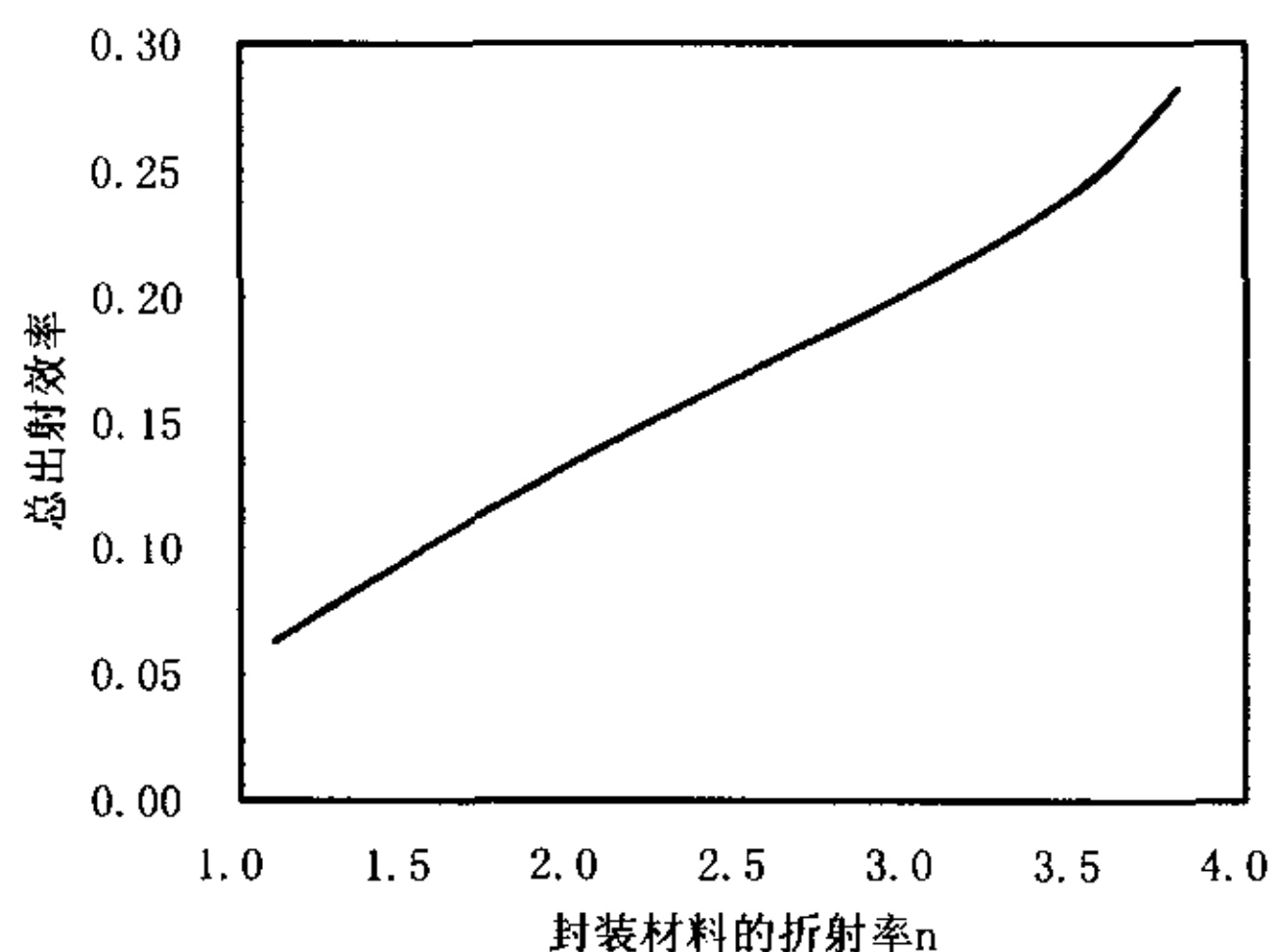


图 6 光输出效率随封装材料折射率的变化

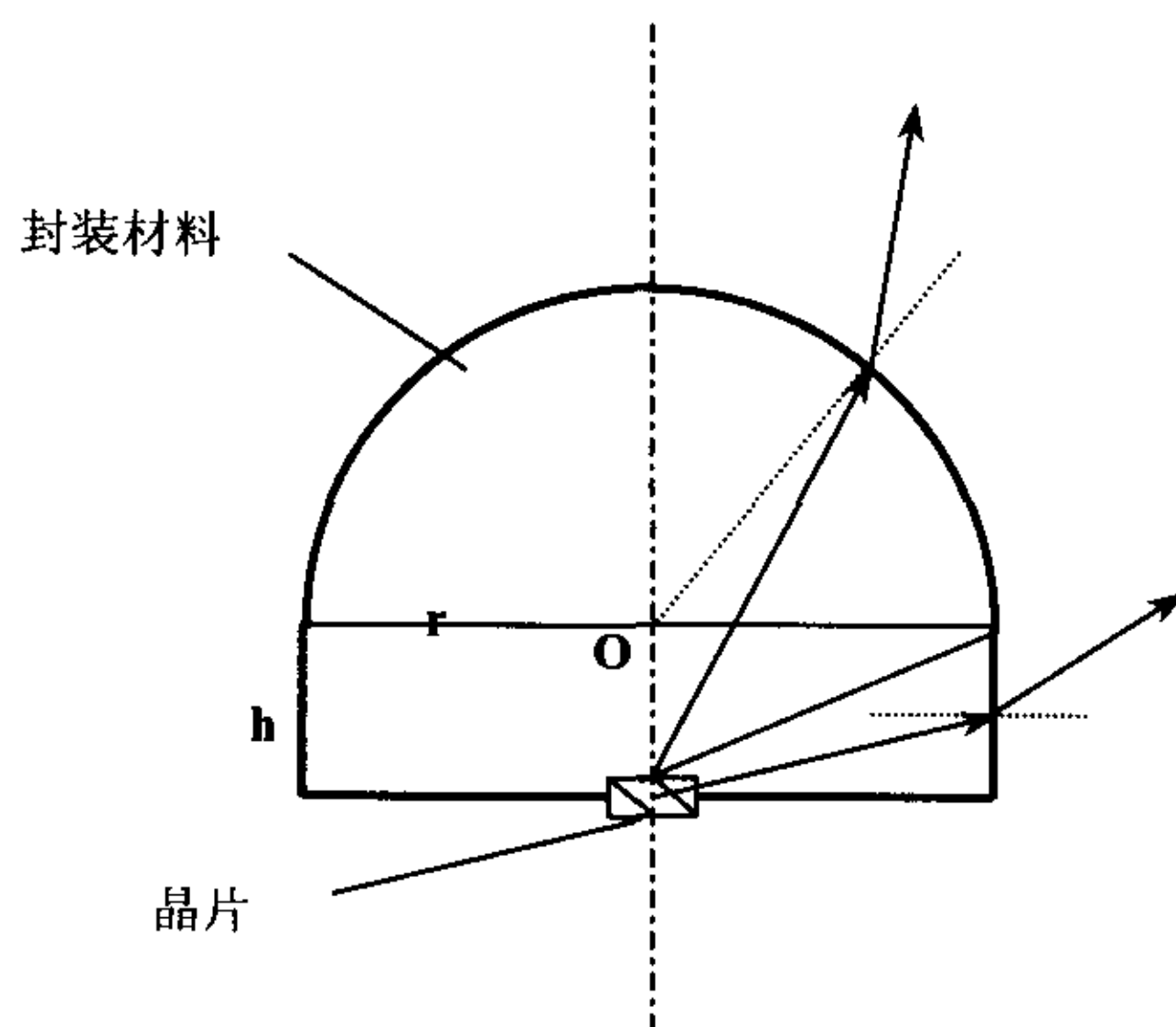


图 7 非半球形封装示意图

这样可算出圆柱部分的入射角。设封装材料的折射率为 1.5，经计算，全反射角为 42° ，而这种形状封装的 LED 的入射角都没有超过此值。根据折射定理计算出折射角，再经过一定的角度计算，可以得到出射光线相对于对称轴的角度——空间方位角。

2.1 中得到 $0 \sim 90^\circ$ 间的光强分布曲线，取空间方位角 θ ，及其对应的 p、s 分量相对光强值 W_p 、 W_s ，由角 θ 推出入射角 i_1 ，算出出射角 i_2 ，及 p、s 分量的出射平均光强值 T_p 、 T_s ，取二者平均值，再计算相对值，得到 $0 \sim 90^\circ$ 间的相对光强分布曲线，如图 8。

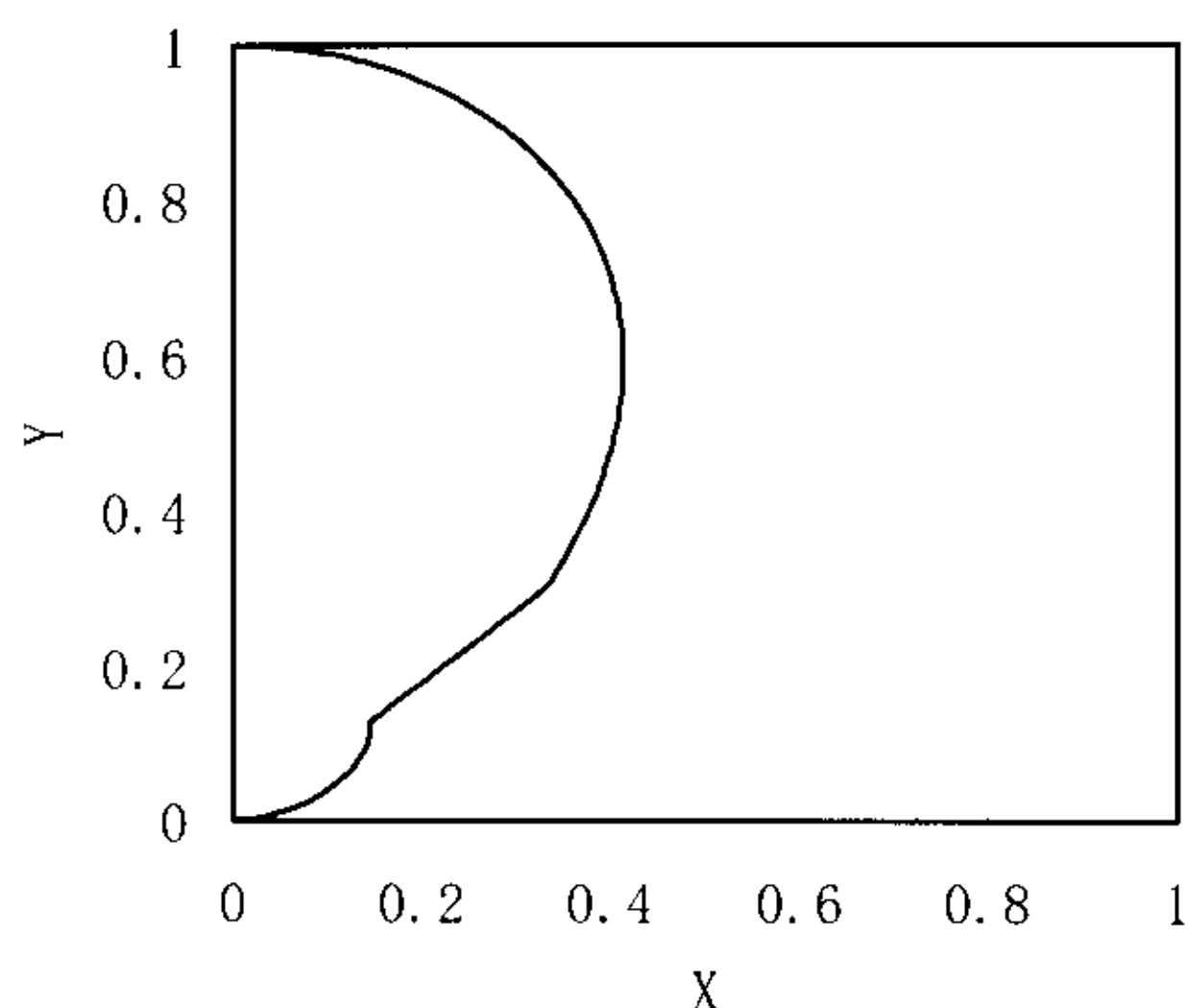


图 8 非半球形 LED 相对光强分布曲线

圆柱与半球的连接处造成上图相对光强分布曲线的不光滑。根据计算结果，当圆柱高为 0.5 个球半径时，光束角约为 90° ，从圆柱出射的光约占总出射光通的 10%，由于这部分光在实际中一般是不起作用的，因此在计算效率时只要考虑顶部效率，经计算顶部出射光约占晶片总出射光的 88%。以 0.1 为间隔取圆柱高分别是球半径的 0.5~1.3 得到相同折射率、不同圆柱高的情况下的效率，见下表

圆柱高/ 球半径	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3
顶部 效率	0.880	0.851	0.814	0.772	0.738	0.702	0.664	0.639	0.589

作曲线如图 9

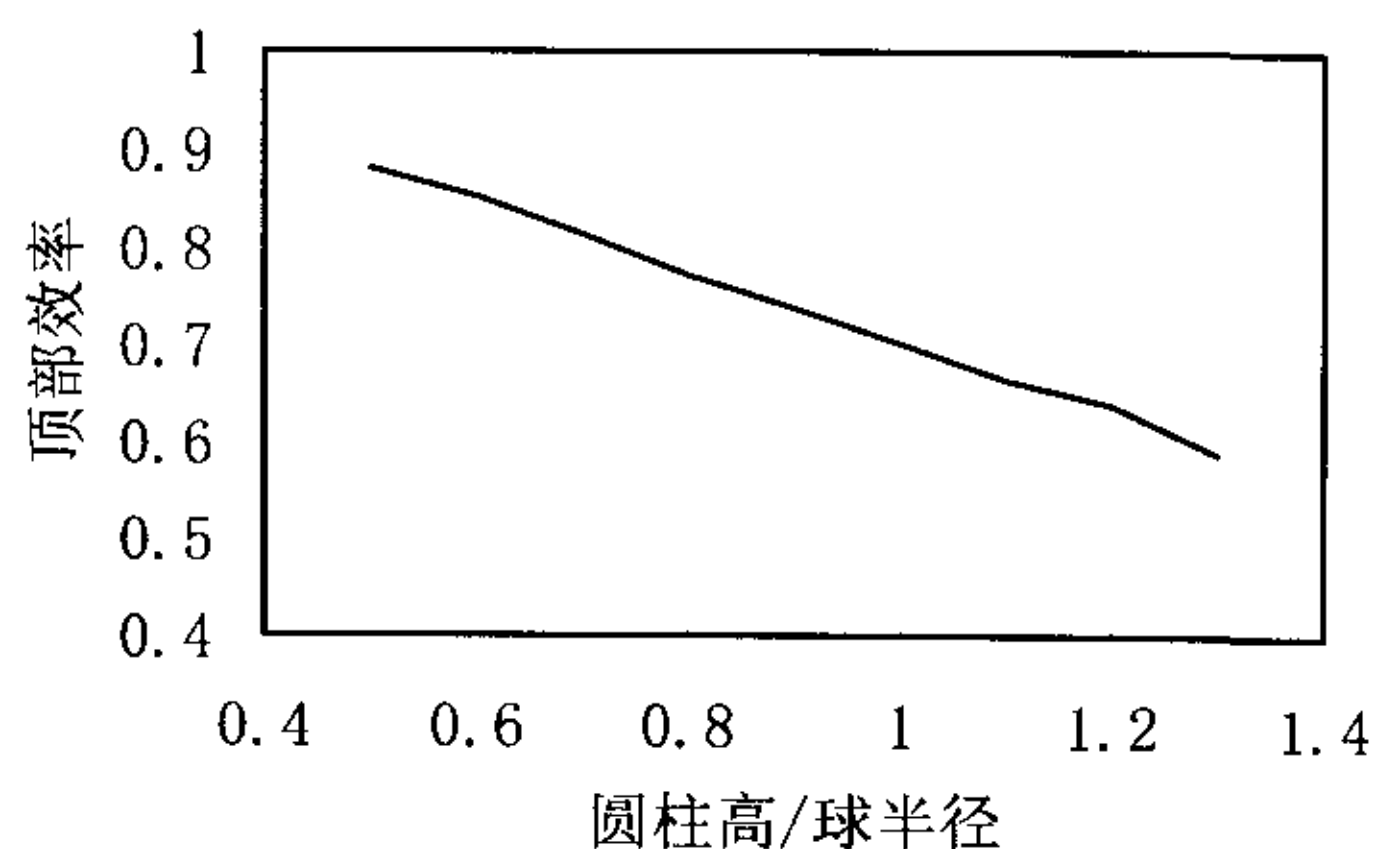


图 9 圆柱高与球半径比值对效率的影响

3 结论

从计算得到的 LED 晶片的相对光强分布曲线可以看出,平面形发光 p-n 结的辐射属于朗伯 (Lambertian) 型,即光束强度按出射角的余弦变化^[6]。说明将 p-n 结简化为点光源是合理的,用菲涅耳透射率公式计算光强的方法是可靠的,得到的晶片相对光强分布曲线和这种光强计算方法将是研究复杂封装结构 LED 的基础。

从图 6 中可大致看出,在忽略封装材料对光的吸收时,采用半球形封装的 LED 其光输出效率随着封装材料折射率的增大而增大。但是,目前的环氧树脂封装材料的折射率一般在 1.4~1.6 之间^[4],改变有限,所以应寻找新的封装材料通过其他方法来提高 LED 的光输出效率。

圆柱高对 LED 效率有一定影响,主要表现在圆柱越高,侧面面积越大,光损失大,造成整体效率下降。通常为了减小侧面光损失,在晶片后面加反光杯,这样圆柱高的影响就相对小了,这将是我们的下一步的研究对象。

参考文献:

- [1] 朱秋东,安连生,黄一帆等. LED 信号灯科技研讨会专题报告论文集. 广州:中国照明学会, 2002. 52-61.
- [2] 朱绍龙,皇甫内炎,万文才. LED 信号灯科技研讨会专题报告论文集. 广州:中国照明学会, 2002. 107-115.
- [3] Wierer J J, Steigerwald D A, and Krames M R, et al. Appl Phys Lett, 2001, 78(22): 3379-3381.
- [4] 方志烈. 半导体发光材料和器件[M]. 上海:复旦大学出版社, 1992.
- [5] 赵凯华,钟锡华. 光学[M]. 北京:北京大学出版社, 1984.
- [6] 黄德修. 半导体光电子学[M]. 四川:电子科技大学出版社, 1989.