

增强 LED 光效的设计考量

理解 LED 的设计、制造和封装，能让照明企业和设计师开发出最佳的固态照明产品，Synopsys 公司的 Thomas Davenport 解释道。

如今，荧光粉转换型白光 LED 的使用已经非常普遍，尽管从光效角度来说仍然还有较大的提升空间。各种 LED 企业，花费了大量的时间来对各种相关要素进行持续的改进，改进方向涵盖了元器件的设计、制造和封装等各个方面，其目的就是为了优化 LED 的光效。在本文中，我们将探讨 LED 科技在芯片、光学元件和封装架构等方面的最新趋势。贯穿整个固态照明供应链的方方面面，这些细节的重要性正显得日益突出，乃至照明设计师和规格指定方都需要去了解 LED 光源的这些独有特性。

LED 有着丰富多彩的历史。在过去的几十年里，世界各地的人们在 LED 上进行了大量的工作。我们今天认可的首批 LED 是红光 LED，它们出现在 1950 年代；紧接着是黄光、橙色光和绿光 LED，它们分别诞生于 1960 和 1970 年代。产生这些光色的半导体材料是磷化镓 (GaP) 系列材料：磷化砷镓 (GaAsP)、磷化镓铝 (AlGaInP) 和磷化镓 (GaP)。

这些早期 LED 产品在某些应用场合（比如指示灯）是可行的，但是由于没有较高的功率以及缺乏蓝色光源，它们并不适用于通用的白光照明。幸运的是，1990 年代早期，当时还在日亚化学公司 (Nichia) 的中村修二的一项突破，解决了这个问题。他开

Thomas Davenport (tdavenpo@synopsys.com) 是 Synopsys 公司光学事业部的系统工程师。

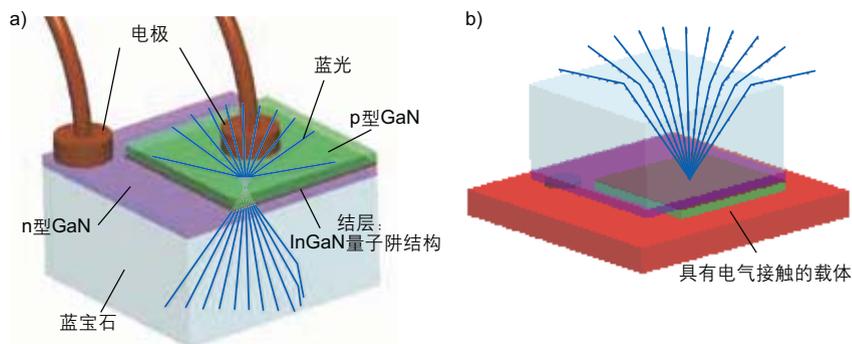


图 1. 典型的蓝光 LED 构造：(a) 生长于蓝宝石衬底的氮化镓蓝光 LED 的一种顶部发光式结构；(b) 整个芯片被翻转过来，这样蓝宝石衬底就成为了芯片的最顶层。

发成功了氮基半导体材料——专指那些使用氮化镓的半导体材料——让蓝光的产生成为了现实。

成功产生出蓝光之后，人们发现绿光也可以使用氮化镓材料来产生。在改善红光 LED 的应用（例如，用于停止信号灯以及汽车尾灯等）方面，人们也投入了大量的努力。一些设计团队甚至企图使用 RGB 混色的方式实现白光照明（例如，使用磷化镓铝制造红光，氮化镓制造绿光和蓝光）。然而，许多通用照明应用不再使用 RGB 混色的方法，转而使用基于氮化镓的蓝光 LED 芯片 + 荧光粉（通常是钇铝石榴石 (YAG) 材料）的方法。对于单一色温的白光应用场合，荧光粉转换型 LED 是结构更简单、可靠性更高的器件，它们不需要使用有源色温反馈元件，且只需更少的 LED 芯片。

器件构造

对于基于氮化镓的 LED 来说，

氮化镓外延层（附着于晶体衬底的晶体沉淀层——这里是氮化镓材料）通常生长于蓝宝石衬底（有时候是碳化硅衬底）之上。选择蓝宝石是因为它易于获取，具有晶体对称性，容易处理，而且是透明材质。

蓝宝石的透明特性常被用于倒装芯片结构。p-n 结材料首先被生长于蓝宝石衬底之上。然后，芯片被翻转过来，这样透明的蓝宝石就成了表层材料。图 1a 为一个顶部发光的氮化镓蓝光 LED 器件的内部构造，图 1b 显示的是倒装芯片结构图，蓝宝石成为了外部衬底。这种实现方式，除了让衬底材料（即蓝宝石衬底）比周围材料具有更低的折射率之外，还不需要使用连接线。在使用这种实现方式的 LED 中，还有一种激光剥离技术被开发出来，在芯片翻转完成之后，再将蓝宝石基底移除，从而实现更薄的芯片设计，其顶层就是氮化镓层。这比蓝宝石更适合做表面粗糙化 (texturing)。粗糙化处理能够提高

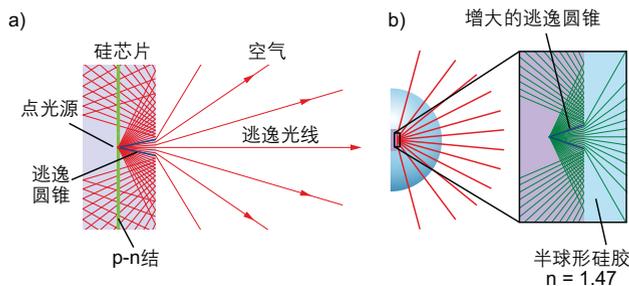


图 2. LED 中的光线逃逸圆锥：(a) 空气中硅介质内部的点光源的一个逃逸圆锥；(b) 硅芯片被包裹在尺寸比它大得多的硅胶圆顶 (dome) 之内，从而使逃逸圆锥增大。

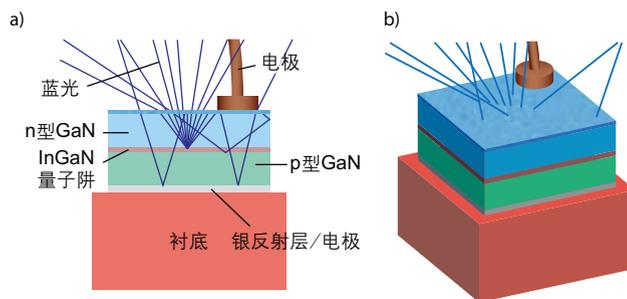


图 3. 采用循环利用功能的倒装 LED 器件：(a) 系统的平面结构图显示，那些没有立即离开芯片的光线被随机散射并反弹到下面的反射层，使它们有更多的机会逃逸。(b) 系统的 3D 视图显示了芯片顶部做了毛化处理的 n-型氮化镓表面。

LED 出光效果。在各种情况下，荧光粉都被用于发光面来产生 LED 的白光输出。

LED 光效

LED 的效率由多个部分构成。它至少包括五个部分： $\eta_{electrical}$ ，电气接触及阻抗损耗； η_{IQE} ，有源层 (active layer) 内部量子效率； η_{Lex} ，芯片光萃取率； $\eta_{package}$ ，让 LED 产生白光的荧光转换效率；以及 $\eta_{package}$ ，LED 封装光萃取率。例如，对一只没有采用荧光转换的蓝光 LED 器件来说，其总的电光转换效率 (wall plug efficiency) 可以表述如下：

$$\eta_{WPE} = \eta_{electrical} * \eta_{IQE} * \eta_{Lex} * \eta_{package}$$

白光 LED 的总体效率还包括了荧光粉转换效率，它更加复杂，因为只有一部分的 LED 发光被成功转换。实践表明，采用芯片倒装和激光剥离技术的蓝光 LED 器件，在加入一个具有知识产权的高反射性银质镜面涂层（这方面技术由欧司朗领衔）之后，其总体电光转换效率达到了 53.3%。

光萃取率

现在让我们简要考虑一下几个不同的参数，看看怎样才能使它们实现最大化。LED 的发光发生在 p-n 结上：当一个电子 - 空穴对复合时，一个光子就会在这个过程中产生。因此，光子的产生来自于材料的内部，而不是空气中——那是我们最终希望它们去的地方。有一个问题是芯片材料的折射率比空气的折射率要高。事实上，如果我们把芯片包裹在任何具有较低折射率的材料之中（比如空气或硅胶圆顶），在入射角大于全内反射 (TIR) 角的情况下，所有到达芯片 / 空气界面的光线都会完全被反射到芯片内部去。全内反射角可以通过改变斯涅尔定律的形式获得 (这里 n 代表折射率)：

$$\theta_{TIR} = \text{ArcSin}\left[\frac{n_{outside}}{n_{chip}}\right]$$

也就是说，这个角度值会随着芯片的折射率和周围物质的折射率而变化。一些常用芯片材料包括：硅晶体 (Si, 折射率范围 3.0 ~ 4.0)，氮化镓 (折射率 2.3)，以及蓝宝石 (折射率 1.77)。

如果芯片材料是硅，并放置于空气中，那么全内反射角 $\theta_{TIR} = 15.3^\circ$ (取 $n_{chip} = 3.8$)。 θ_{TIR} 定义了一个圆锥角的半值：所有位于逃逸圆锥之外的光线都会陷入芯片之中，永远都出不来。对一个长方体形固态芯片来说，根据 p-n 结的上下是否使用了透光 (transmissive) 材料的不同情况，其逃逸圆锥可能多达六个。然而，通常有一个逃逸圆锥位于衬底方向，使得本该逃逸出去的光线要么被吸收，要么被反射。

图 2a 所示为空气中硅芯片的一个逃逸圆锥。入射角大于该圆锥角的半值 (由给定) 的光线都被全反射到芯片内部，并且永远不能离开芯片。改善这种情况的方法之一，就是把芯片包裹在到折射率比空气高的材质之中。一般使用的材料是硅胶，其折射率为 1.47。将硅芯片包裹于硅胶后，其逃逸圆锥角的半值将被提高到。通常使用的是比芯片尺寸大的硅胶圆顶，因为这种结构几乎不会带来折射 (光线偏离)，从而不会带来进一步的全内反射 (TIR) 问题。

这里出现的问题还可以看成是光源和光线受体 (我们希望光线进入的地方，即空气) 的折射率之间的光学扩展量不匹配 (étendue mismatch) 问题。光学扩展量是光学系统中的一个守恒量，由下式给定：

$$\text{Étendue} = (\text{Refractive})^2 \cdot \text{Area} \cdot \text{ProjectedSolidAngle} = \text{Constant}$$

此方程表示，在一个光学系统内，光源的大小、其投射角展、以及其周围物质折射率的大小，定义了一个光学扩展量常量。如果我们试图将这个光学扩展量挤入到同样

大小但折射率更低、且光源的投射立体角已经占满（恰如本案的情况）的区域时，那么就会存在光通量的角度钳位（angular clipping）问题。这恰好是到目前我们所看到的情况。

从光学扩展量公式还可以得出其他一些结论。例如，如果我们想从一只朗伯光源（Lambertian source）得到平行光（就像一只平面 LED），该公式从数学的角度表明，其输出孔径的大小必须随着灯光角展的减小而增大。如果不增加孔径的大小，光线就

化表面，从而有机会折射并逃逸。如果逃逸不成功，就会被以随机的角度朝下反射，碰到具有高反射特性的银质涂层（位于 p 层的底部），使之再次折回并穿过芯片。图 3b 显示了芯片结构的 3D 视图，并示例了一个随机粗糙化表面。这种方法的一个代价是，需要在芯片顶部安装一个电极。

荧光粉效率

基于荧光材料的白光 LED 的另外一个关键在于荧光材料本身。在对

参数，将光谱的色温调整到期望值。此外，显色指数（CRI）是白光 LED 重要指标，即光谱对一组测试颜色的显示效果。对 LED 来说，其他一些指标对某种特定荧光粉的设计也很重要，比如较新出现的色质指数（color quality scale, CQS），它与 CRI 类似，但是采用了饱和度更高的参考颜色和全色域指数（gamut area index, GAI）。

与荧光材料效率相关的另外一个问题是所采用的几何结构。传统 LED

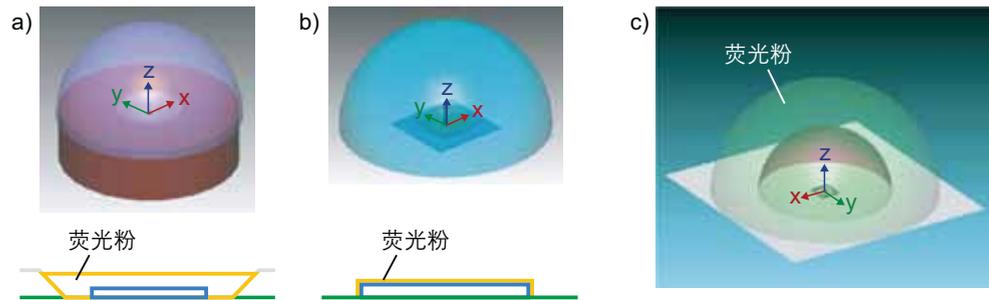


图 4. LED 的荧光粉构型：(a) 传统荧光粉浆体。(b) 涂覆于芯片上的保形荧光粉外膜。(c) 用于远程光学器件的远程荧光粉外膜。

会因为空间钳位而损失。如果你喜欢小孔径尺寸，就得付出代价来避免可能出现的光学扩展量弱化问题。

恰如图 2b 所示，我们把芯片包裹在一种较低折射率的材料之中，并让输出表面增大，以减小光学扩展量不匹配的问题。另外一种有助于解决这个问题——现在已经成了背光显示领域的标准——是使用散射表面（本例中的毛化处理），并与光线的循环利用相结合。这种方法被用于许多倒装氮化镓系统中，包括那些采用了激光剥离技术以去除蓝宝石层的系统。

在图 3 中，我们展示了一幅二维图片，以表明这种循环再生系统的工作方式。光线在氮化镓材料形成的量子阱结层产生。如果光线朝上走，就会碰到氮化镓与硅胶交界处的粗糙

荧光材料建模的时候，有许多因素必须被测量或者推导。例如，我们需要建模以了解荧光颗粒的吸收谱、发射谱、量子场（或者激发光谱）、荧光粉的平均自由程、颗粒尺寸分布，以及非转换作用的强度分布等。

一旦荧光粉建模完成，我们就可以调整模型中荧光材料的密度和其他

都包含有一个包裹在杯状外壳中的荧光粉浆体，如图 4a 所示。由于从蓝光芯片出来并通过荧光粉的路径长度会不一样，这种构型会形成一种不均匀的光强分布：在中心部分颜色会更蓝，而大角度区域则显得更黄。

图 4b 显示的是一个保形（Conformal）荧光粉外膜，它更仔细地保持着芯片的外形特性，并在全角度都能给出一致性好的颜色效果。这一类型 LED 目前已经成为标准，它有一个额外的好处就是更好地保持了光源的光学扩展量（与其他荧光粉方法比较，它并不显著提高光源的有效尺寸）。

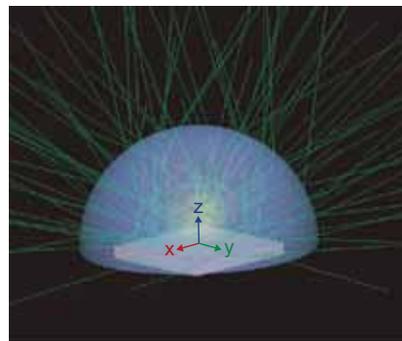


图 5. LED 圆顶封装的半径对光通量输出的影响。一只 1×1 平方毫米的芯片被硅胶圆顶包裹着（图左）。圆顶的半径被不断改变，其首径部分光输出示于坐标图。从图中可见，1 毫米半径能让 99.9% 以上的光通量离开芯片——菲涅尔效应不再生效。

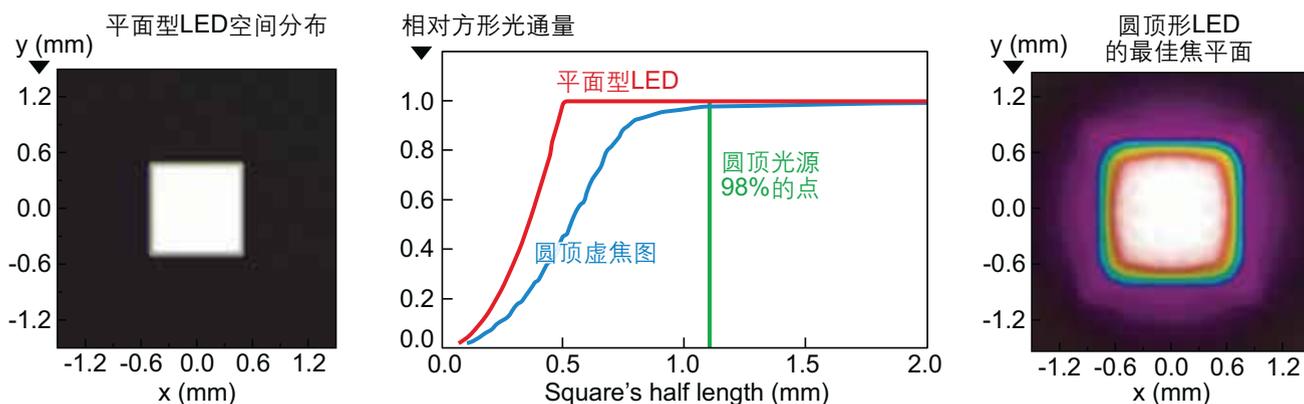


图6. 平面式LED（不带半球封装）及带半球封装的LED在最佳焦平面的光照度。左侧是不带半球封装的LED光源表面的空间光强分布。右侧是带半球封装的LED在最佳虚焦平面上的光强分布。其有效光源面积差不多被半球体扩大到了四倍大小。

图4c给出了第三种方案。这是一种远程荧光技术，目前有一些设计团队正在为之努力。现在有多种可能的远程荧光构型，但是在此示例中，一个中空的透明半球体将蓝光LED芯片罩住，黄色的荧光涂层就位于半球的内表面。跟保形外膜方案相比，这种方案会有更佳的混色效果。不过，LED光源的尺寸会被大大提高，从而削弱了光源的光学扩展量。

封装光萃取率

在过去几年里，出现了两种主要的LED封装结构：半球形封装和平面式封装。此外，还有一些在售的LED器件，其芯片上面集成了更为特别的光学元件——例如，有的LED被设计用于实现蝙蝠翼形光线分布。大体而言，LED企业提供的是半球形或平面式LED光源，而光学设计师会从一系列现成的器件中选择合适的光输出元件，或者是设计出他们专有的光学实现方式。

通常情况下，当总体光通量是实际应用中最重要的因素时，半球形输出耦合元件是更好的解决方案。不过，如果想要尽可能好地保持光源的光学扩展量，一般来说平面式封装效果更好。恰如本文前面所讨论的，在

许多场合下（例如孔径大小受限的情况下），维持光源的光学扩展量是至关重要的。

耦合到光学系统

为了更进一步探索光源的光学扩展量问题，我们来看看下面这个例子：一只 1×1 平方毫米大小的绿光LED芯片，使用或不使用折射率为1.47的硅胶圆顶封装。在图5中，左侧所示为一个半球形几何系统，右侧为其对应的离开球体的首径（first pass）源通过率（source flux）。一个1毫米半径的相对适中的半球体，容许99.9%以上的光通量从源芯片输出。

接下来让我们将半球的半径设定为1毫米，然后将所有出来的光线回推到最佳的虚焦点。在这个例子里，最佳焦点发生在距离芯片的发光面之上（即向着球形顶点方向离开芯片的方位）0.17毫米的地方。在图6中，左侧显示的是不带半球封装的LED表面的光照强度分布，右侧是带半球封装的LED在最佳焦平面上的光强分布。

两幅光栅图像的中心位置所示的是两种器件构型的方形光通量图。不带半球封装的芯片给出的是一个在0.5毫米半长位置快速截止的光强分

布特性，正如我们所期望的。但是，带半球封装的LED光源的有效尺寸被大大增加了。其98%的方形能量分布出现在1.1毫米的半长位置。这意味着，其有效光源面积差不多是原来的四倍。如果想把所有光线捕获进入光学系统，光学元件的尺寸也必须增加，以适应这种情况。

除了光学扩展量问题之外，通常，平面光源比半球形光源更容易使用。例如，对于平面光源来说，我们可以使用经典的角度/区域转换器，例如复合抛物面聚光器（compound parabolic concentrator），并能够减小设计的复杂性。从设计者的角度来看，最佳的LED光源可能会具有朗伯特特性（Lambertian）、空间分布上完美的均匀性（或许最好是圆形而不是方形！）、平面结构、以及同半球封装方法相同的效率。因此，这个领域总是存在改进的空间，而半球形和平面式封装也将同时存在一段时间。

在本文中，我们简要探讨了LED的发展历史以及目前正在使用的主要设计构型。此外，我们还研究了导致LED效率损耗的原因，并从芯片、荧光材料和封装等方面研究了提高出光效率的设计技术。LEDC