

LED的故障模式

LED是具有小型、寿命长、高效率等特点的独立光源，近年来在众多用途中得到普及。但是，这些电子零件本质上是半导体元器件，对寿命和故障的理解与传统的白炽灯、荧光灯有所不同。本文对使用中可能发生的故障进行解说。

LED故障的种类

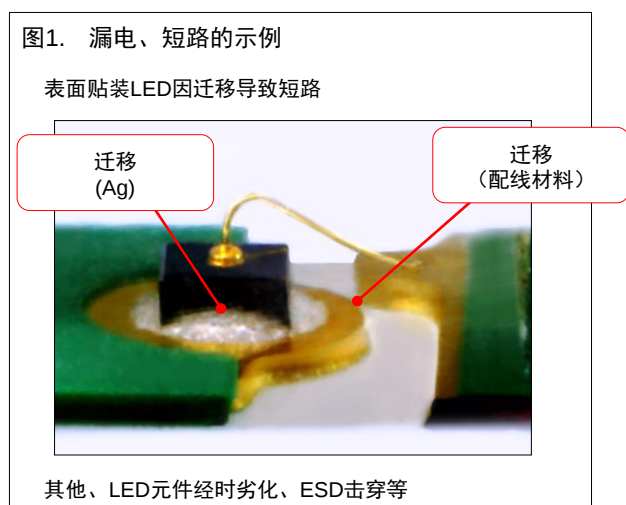
在白炽灯和荧光灯中，灯丝断裂导致断路、熄灭是最常见的寿命终结现象，而在LED中，只要遵守正确的使用条件就基本不会发生该现象。LED的寿命通常定义为光度降到初期的50%（或70%）的时间，超过寿命期限光度只会继续劣化，基本不会出现明显的不通电。但是，实际使用过程中可能因各种原因发生故障。LED发生的故障根据故障模式可分为以下几类。

- ① 漏电、短路
- ② 断路
- ③ 异常的光度劣化
- ④ 其他特性异常

① 漏电、短路

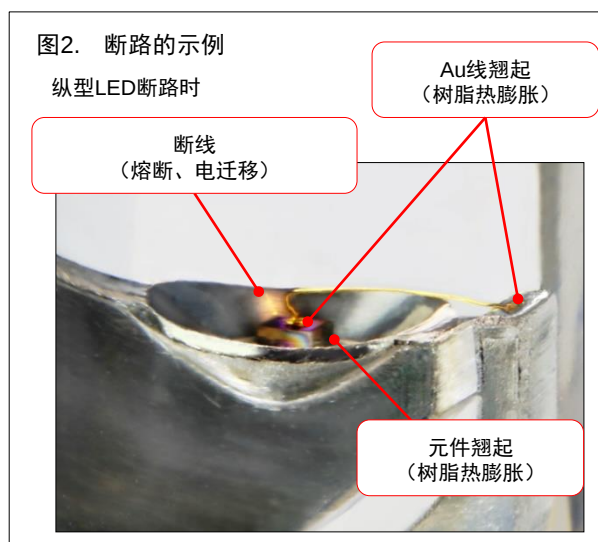
漏电和短路是LED元器件中最容易发生的故障之一。与普通白炽灯和荧光灯的故障不同，由于是短路模式，因此可能会对驱动电路造成负担。因此设计驱动电路时，必须根据短路时的情况设计电源容量和限流电阻的容许功率。

漏电和短路的原因分为两种，一种是起因于LED元件的半导体性质劣化和故障，另一种是由各种构件的电化学变化引起。（图1）



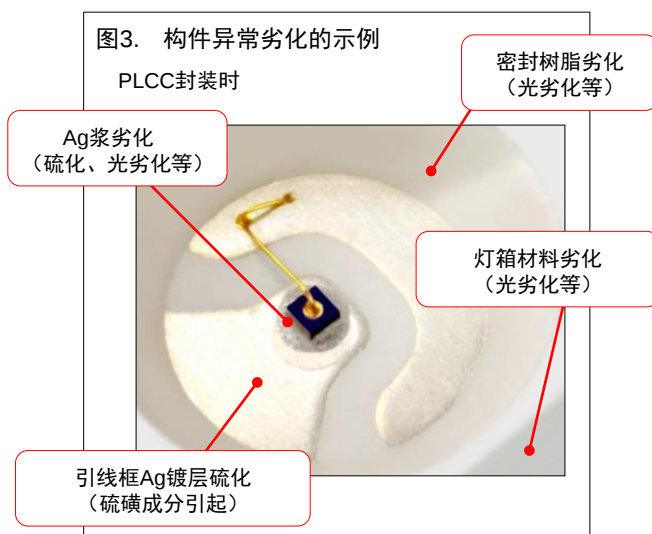
② 断路

LED内出现断线时发生。主要原因可能有过大电流引起焊线等熔断，电迁移或内部应力引起各种剥离、断线等。（图2）



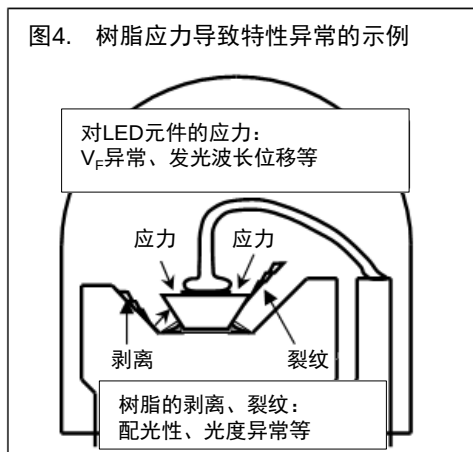
③ 异常的光度劣化

虽然LED元器件开发已通过各种可靠性试验确认产品寿命后再实现产品化，然而实际使用环境可能导致光度劣化比设计值更早发生。发生这种情况的主要原因是特殊使用环境导致LED构件劣化加快，从而吸收了LED元件的光。（图3）



④ 其他特性异常

即便不会导致光度劣化，配光性、色度、顺向电压等各项特性也有可能发生巨大变化。这与前一章一样，被认为是构件的特殊劣化现象。（图4）

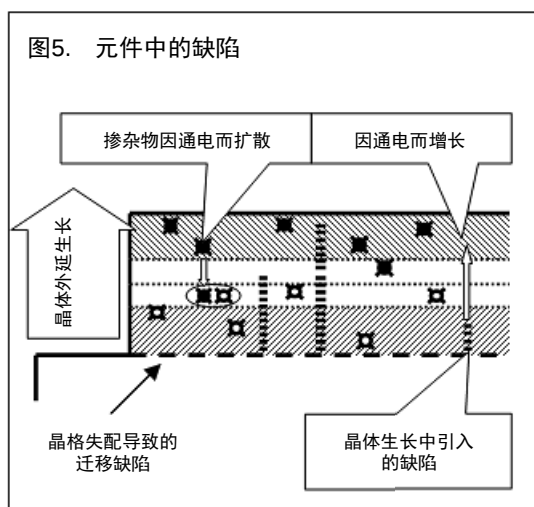


接下来将从构件劣化现象和故障的观点详细了解这些故障模式。

LED元件的故障

通电引起的光量降低

LED元件的基本结构由不同导电形式的p型和n型半导体接合而成（称为pn接合），在电气领域被归纳为名为二极管的元器件。p型半导体的带正电荷的正孔和n型半导体的带负电荷的电子是电流载体（称为载流子）。这些正孔和电子在晶体内再复合，能量以电磁波形式释放，并作为光进行提取。然而，现实中却有各种阻碍因素，主要问题就是晶体内的缺陷和杂质。



① 晶体内的缺陷（晶格缺陷、迁移）

半导体元器件因电子在固态晶体内的量子力学行为实现独特的特性，LED元件也不例外。晶体是构成固态的原子排列整齐的状态，但若存在不规则的排列，会对导电、发光产生不良影响。这种不规则的部分称为缺陷或迁移。LED元件的发光部分通常是高结晶性的单晶，利用晶体外延生长技术制造而成，经常会有某种缺陷被引入晶体生长中。在该LED元件制造的初期阶段引入的缺陷经过LED亮灯时的通电呈现逐渐增长、增大的趋势。最终导致漏电流增加，发光效率降低等，从而使元件性能逐渐降低。缺陷增大会受到运行温度、施加在元件上的应力等的影响，这些越大，缺陷的增大速度越快。

② 杂质扩散

混入晶体的杂质也是一种缺陷，p型和n型半导体是在极高纯度的半导体晶体中有意混入微量杂质制造而成的（称为掺杂物）。例如，GaP作为LED材料为人所知，纯晶体没有导电性，但添加微量Zn后，部分Ga与Zn置换，产生正孔。添加Si后，Ga与Si置换，产生多余电子。产生的正孔、电子都能够在晶体内自由移动，所以p型和n型半导体具有导电性。利用这些形成pn接合，便可形成LED元件，但此时接合界面可能形成混入p型和n型杂质的区域。混入杂质不仅会因载流子补偿产生高电阻，还有形成复合性缺陷的趋势，会出现再复合而不发光，产生诱发漏电的缺陷。半导体中的杂质可能因电场、热量发生移动，混入杂质的情况会随着时间而加剧。这种混入区域很多时候位于正孔与电子再复合的区域（称为活性层），最终导致活性层内的缺陷逐渐增大。

综上所述，LED元件由于通电，活性层内的缺陷逐渐增大，使得漏电流增大、V_f降低、发光输出降低加剧。该降低速度取决于运行温度和应力。

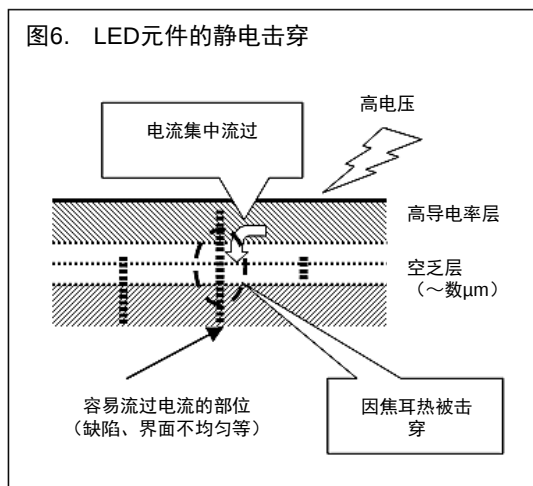
静电击穿

在pn接合界面，各自区域中的载流子受热扩散后相互进入对方区域，如此界面附近的电荷得到补偿，产生没有载流子的空乏层。载流子的相互扩散受到因此产生的内部电位的限制，所以空乏层通常只有数微米左右的厚度。另一方面，静电为人体带电水平，达到数千至数万伏。

该电压加在LED时，电压基本上都施加在无电荷的空乏层。空乏层厚度非常薄，电场极高，超过该材料的静电耐压。超过静电耐压时，储存在空乏层界面的能量通过放电以热量形式释放，这不会在pn接合上均匀发生，而是优先在静电耐压较弱的部分开始放电，储存的能量会集中在该部位。如此一来，该部分受热变质，从而以贯穿pn层的形式形成高导电性区域，pn接合部分局部被击穿。因此，LED发生静电击穿后，通常处于短路模式。如果在这种状态下再次施加高电压，电流优先流过高导电性区域，其热量使该区域蒸发，偶尔会出现pn接合恢复的情况。但是，界面不均匀状态依旧存在，很容易再次发生短路不良。（图.6）

焊线不良

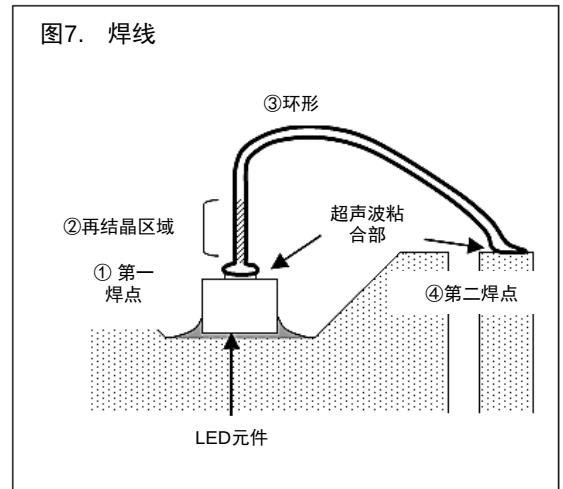
焊线是用于连接引线框或印刷基板上的电路图案与LED元件电极并向LED元件供电的构件，主要使用金焊线。金是软金属，金与各构件可通过超声波粘合简单连接。粘合后的金焊线根据焊接步骤可分为4个部分。（图.7）



电极的腐蚀、剥离

LED元件的电极需要具备两种功能。一种功能是作为接收外部供电的端子，通常用金焊线连接，因此由使用金的焊盘构成。另一种功能是向半导体高效导电，通常材料因p、n型半导体而异。半导体与金属的接合可能因材料组合产生较大的电压下降，低电阻接触的组合有限。低电阻接触的电极称为欧姆电极，代表性的有p型半导体用到的金和锗、n型半导体用到的铝，除此之外出于改善粘合状态和防止相互扩散等目的，还会使用镍、钛、钨、钼等材料。有些材料若含有水分，还容易发生腐蚀、氧化和高电阻化。

近年来LED虽然已利用钝化膜或树脂密封防止外部水分进入，但是在高温高湿环境下无法忽视水分扩散，电极腐蚀、剥离可能导致顺向电压异常上升和断路，从而引发熄灭，需要注意使用环境。



① 第一焊点部位

焊线在粘合前，顶端呈圆球状。将该球抵在元件焊盘上，一边施加超声波一边挤压，焊线会与焊盘大范围粘合。

②再结晶区域

金球通过放电对金线顶端加热使其熔融后制成。与金球相连的线部分在放电加工中受热后部分熔化并冷却。这时金属晶化加剧，形成由若干晶界组成的再结晶区域。该部分比其他线部分稍硬稍脆。

③ 环形部位

再结晶区域之后的线较为柔软，线的弯曲由该部分形成。

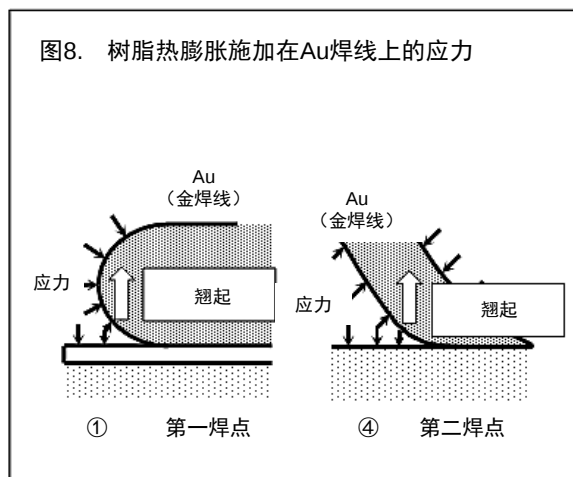
④ 第二焊点部位

在第一焊点后将线拉出抵在电路图案上，一边施加超声波一边挤压，线与电路图案粘合，而且线呈被拉扯的形状。

以上部位中，主要在①②④中可能发生断线故障。

密封树脂内部应力导致断线

树脂随着温度上升而发生热膨胀，由此产生的应力使第一焊点、第二焊点部分与元件电极或电路图案分离。产品通过热冲击试验等确认过设计安全后开发而成，但如果温度上升极快，可能因缓解应力做得不充分而导致金线与其他部位的粘合强度变弱。（图8）



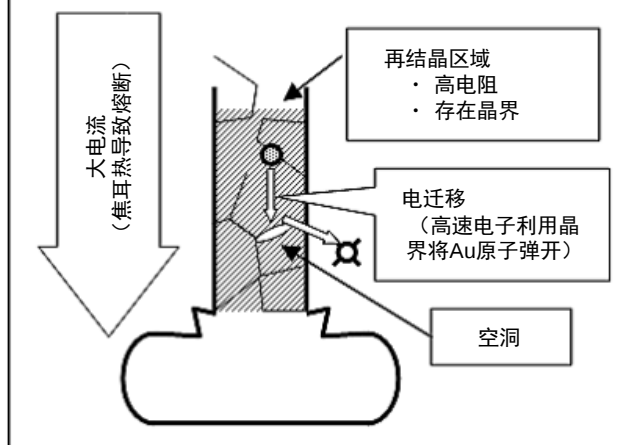
加速度导致断线

通常LED元器件为全固态，所以除非是导致元器件整体被击穿的冲击，否则很难因加速度导致断线。但是，部分金属罐型元器件没有用树脂对内部进行密封，而是填充惰性气体。这种情况下，加速度对金线施加负荷，根据该负荷的大小和反复次数可能导致断线。另外，需要注意，有些密封树脂呈柔软的橡胶状，而部分大功率产品为了避免产生密封树脂的内部应力，可能只在元件周围使用凝胶状树脂。

过大电流导致断线

金线也有电阻，很容易想象到若有过大电流流过，可能因焦耳热导致熔断。但如果时间较短，可抑制热量产生。PWM（脉宽调制）方式是LED的驱动方式之一，这种方式用间断的脉冲电代替通常的直流电使LED亮灯，优点是可以消除LED发光波长等各种特性的电流依赖性，从而使其保持稳定。脉冲的最大电流虽大，只要通电时间短，便可抑制平均电流，可以规避热量相关问题，但是最大电流不可能无限增大。焊线可能因电迁移导致断线。特别是金线的再结晶区域存在晶界，该效果很容易导致断线。（图9）

图9. 树脂热膨胀施加在Au焊线上的应力



密封树脂内部应力导致剥离现象

如焊线项目所述，密封树脂因温度上升而膨胀，可能会产生使连接部分分离的应力。该应力也可能使元件与电路图案分离。如果像普通LED那样，固晶树脂有供电功能，则LED会因断路处于熄灭状态。另外，如果LED使用的元件是InGaN元件等，在元件上面有pn两个电极且两个电极都通过焊线供电，则不会立即熄灭，但是会阻碍元件向电路图案散热，可能导致大电流驱动时性能显著降低。

这种剥离现象受元件形状、固晶形态的影响极大。因此设计LED时，要探讨与使用条件相匹配的元件形状和内部结构。

固晶树脂的劣化

固晶材料在元件附近，从元件接收的光能量密度非常大。固晶材料是树脂时，可能因元件的光产生光劣化。以蓝色发光元器件为例，若元件固晶树脂使用银浆，长时间通电后银浆会变黑，会导致明显的光度劣化。

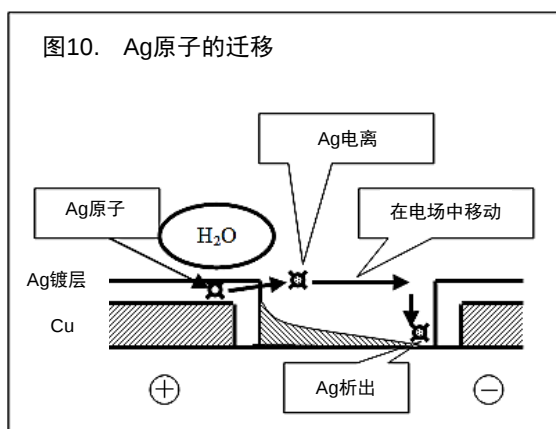
该劣化在含有水分的状态下会加速。

LED设计过程中，为了避免这种劣化，固晶可能不使用树脂材料，而是使用共晶焊或金凸块接合。使用银浆时已将设计上拥有足够寿命的产品进行了实用化，但在使用过程中还要对周围环境开展充分探讨。

迁移

迁移是多个金属材料间存在电场时，金属材料通过电场析出后生长的现象。如果存在水分，该现象有加快的趋势。在普通固晶材料的银浆中，银（Ag）是一种容易发生迁移的材料，存在水分可能使这种现象加快，引发各种短路事故。（图10）

LED的封装是用密封树脂将整个元件覆盖，不会立即发生迁移问题。但是，树脂材料中水分的扩散速度会因温度上升呈指数级增加，在高温高湿环境下使用可能引起重大问题。因此需要根据使用环境探讨是否可以使用LED元器件。



密封树脂材料的故障

密封树脂内部应力导致产生裂纹

综上所述，温度上升导致密封树脂膨胀会在LED内部产生应力，对各构件施加应力，从而引发不良。内部应力作用在密封树脂本身，严重时会导致树脂产生裂纹。是否产生裂纹很大程度取决于内部形状，可通过设计规避该问题。另外，PLCC型等的LED没有用密封树脂支撑结构，因此使用柔软的密封材料可缓和膨胀产生的应力。纵型LED有时会只在容易高温的元件周围用凝胶状树脂填满。

树脂的光劣化

密封树脂在近处接收元件发光，会产生光能密度极高的部分。因此，在固晶树脂的劣化章节阐述的光劣化问题也会出现在密封树脂上。对光劣化抗性强的材料有硅树脂，经常用在蓝色发光元器件中。

其他问题

以上对LED中发生的故障和问题进行了解说。这些都是LED在“正常使用环境”下的情况，LED的开发阶段已充分考虑到了发生上述故障的可能性，并开展了可靠性较高的设计开发。但是在特殊环境下，LED存在故障加快出现的趋势。例如，在火山气体环境中使用时，气体主成分的硫化氢透过树脂，容易与LED内的银成分发生反应，使银变黑，LED寿命会明显缩短。不仅限于火山气体，如果使用LED的设备中会释放硫成分，则可能出现相同现象。除此之外，酸性气体、高盐浓度环境等通常半导体设备不耐受的环境对LED也非常不友好，可能导致异常劣化。

水分会参与到各种故障中，也有水分本身就是故障的直接原因的例子。很多LED用树脂材料密封，但树脂有容易吸湿的特性。在充分吸湿的状态下进行锡焊等导致温度快速上升后，树脂中的水分可能引发水蒸气爆炸。