

LEDの故障モード

LEDは小型、長寿命、高効率を特徴とする個体光源で、近年では多くの用途に普及しています。しかしこの電子部品は本質的に半導体デバイスであり、寿命や故障の理解についても従来の白熱灯や蛍光灯と異なったものになります。本稿では利用の際に発生する可能性のある故障について解説します。

LED故障の種類

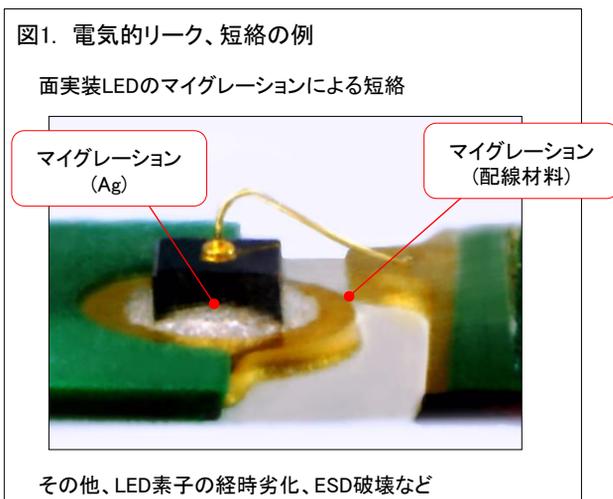
白熱灯や蛍光灯においてはフィラメントの切断による電氣的オープン不灯が最もポピュラーな寿命現象ですが、LEDでは適正な使用条件を守っている限りほとんど起こりません。LEDの寿命は通常は光度が初期の50%(または70%)に達するまでの時間と定義されており、寿命時間が過ぎても光度の劣化が継続するだけで、明らかな電氣的不導通が起こることはほとんどありません。しかし実際の利用では様々な理由で不具合が発生することが考えられます。LEDで発生する不具合は故障モードにより以下のように分類できます。

- ① 電氣的リーク、短絡
- ② 電氣的オープン
- ③ 異常な光度劣化
- ④ その他の特性異常

①電氣的リーク、短絡

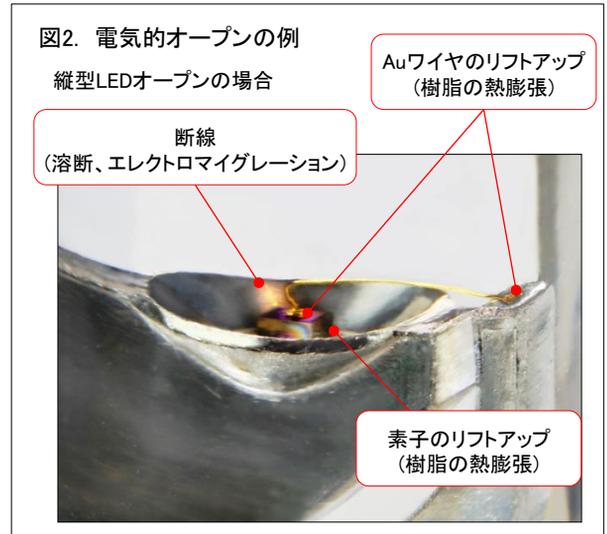
電氣的なリークや短絡はLEDデバイスでは最も起こりやすい故障の一つです。一般的な白熱灯や蛍光灯の故障と異なり短絡モードとなりますので駆動回路に負担をかける可能性があります。このため駆動回路の設計には電源の容量や制限抵抗の許容電力を短絡時の状況に則して設計する必要があります。

電氣的リークや短絡の原因はLED素子の半導体的な性質の劣化や故障に起因するものと、各種部材の電氣化学的変化によるものに分かれます。(図1)



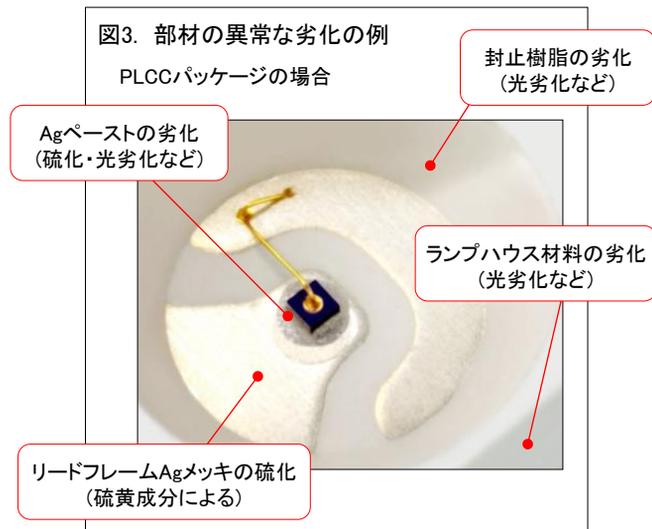
②電氣的オープン

LED内で断線が起こることにより発生します。原因としては主に過大電流によるボンディングワイヤーなどの溶断、エレクトロマイグレーション、もしくは内部ストレスによる各種剥離、断線などが考えられます。(図2)



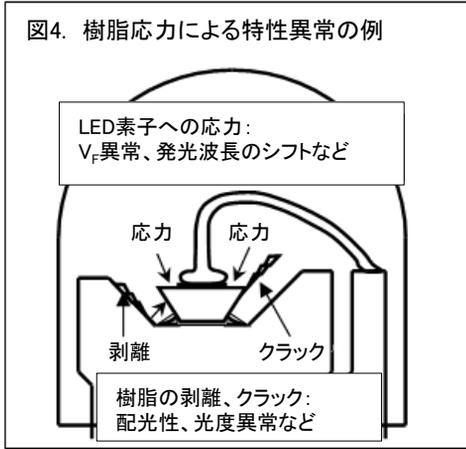
③異常な光度劣化

LEDデバイスの開発は各種信頼性試験により製品の寿命を確認してから製品化されますが、実際の使用環境によっては設計値より極めて早く光度劣化が進むことがあります。主な原因は特殊な使用環境によりLED部材の劣化が早く進行し、LED素子の光を吸収するために起こります。(図3)



④その他の特性異常

光度劣化とはならなくても、配光性、色度、順方向電圧などの諸特性が大きく変化する場合があります。これらも前章と同様に部材の特殊な劣化現象と考えられます。(図4)

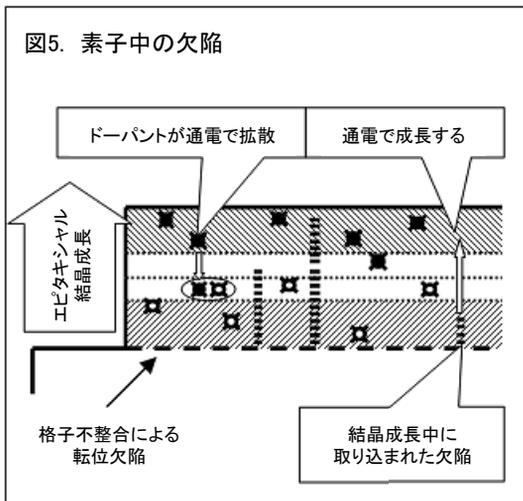


次にこれらの故障モードを部材の劣化現象・不具合の観点から詳しく見ていきます。

LED素子の故障

通電による光量低下

LED素子の基本構造は電気の伝導形式が異なるp型及びn型半導体が接合しており(pn接合といいます)、電気的にはダイオードと呼ばれるデバイスに属します。p型半導体は正の電荷をもつ正孔が、n型半導体は負の電荷をもつ電子が電流の担い手(キャリアと呼びます)となります。これら正孔と電子が結晶内で再結合することにより、エネルギーが電磁波の形で放出され、光として取り出されます。しかし、実際にはさまざまな阻害要因があり、主に結晶内の欠陥および不純物の存在が問題になります。



①結晶内の欠陥(格子欠陥、転位)

半導体デバイスは固体結晶内での電子の量子力学的振る舞いによりその特異な特性が実現されており、LED素子も例外ではありません。結晶は固体を構成する原子が規則正しく並んだ状態ですが、不規則な配列が存在すると、電気伝導や発光に悪影響を与えます。この不規則な部分は欠陥や転位と呼ばれます。LED素子の発光部分は通常結晶性の高い単結晶で、エピタキシャル結晶成長技術を用いて作製されますが、結晶成長には常に何らかの欠陥が導入されます。このLED素子製造の初期段階で導入された欠陥は、LED点灯時の通電を通して成長、増大していく傾向があります。この結果、リーク電流の増大や発光効率の低下などを招き、素子の性能は低下していきます。欠陥の増大は動作温度や素子にかかる応力などに影響され、これらが大きいと増大速度は大きくなります。

②不純物の拡散

結晶に混入する不純物も欠陥の一種ですが、p型及びn型半導体はきわめて高純度の半導体結晶に微量の不純物を意図的に混ぜて作られます(ドーパントと呼びます)。例えばLED材料として著名なGaPは、純粋な結晶では電気伝導性はありませんが、微量なZnを添加すると部分的にGaとZnが置き換わり、正孔が発生します。Siを添加するとGaとSiが置き換わり余分な電子が発生します。発生した正孔、電子とも結晶内を自由に移動できるためp型及びn型半導体は電気伝導性を有します。これらを用いてpn接合を形成することによりLED素子が形成されますが、その際接合界面にはp型とn型の不純物が混在した領域が形成されることがあります。不純物の混在はキャリアの補償で高抵抗化をもたらすのみならず、複合的な欠陥を形成する傾向があり、光の放出を伴わない再結合や、電氣的リークを促す欠陥も発生します。半導体中の不純物は電界や熱により移動することもあるので、この混在は時間とともに進行します。この混在領域は正孔と電子が再結合する領域(活性層と呼ばれます)にある場合が多く、この結果活性層内の欠陥が増大していきます。

以上のように、LED素子は通電により徐々に活性層内の欠陥が増大し、リーク電流の増大、V_fの低下、発光出力の低下が進行します。その低下速度は動作温度や応力により左右されます。

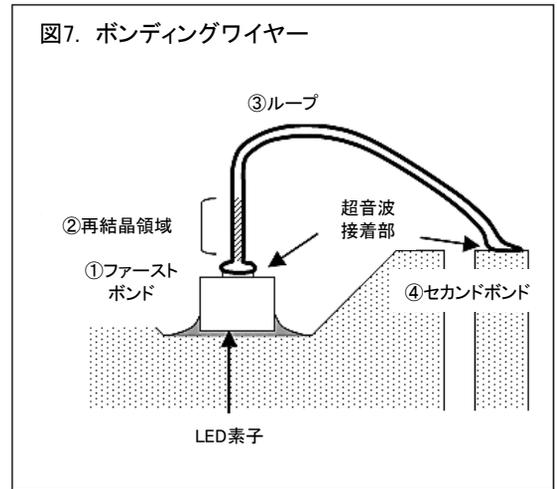
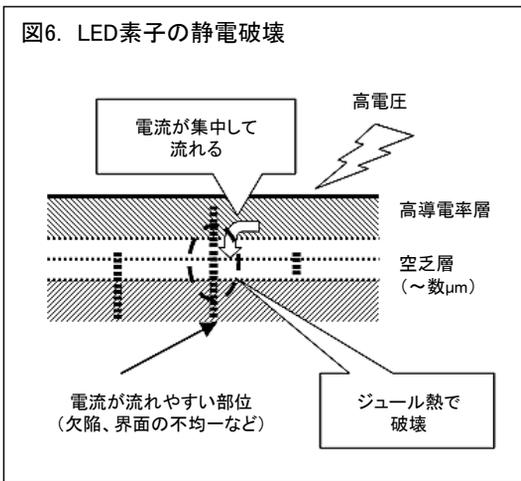
静電破壊

pn接合界面はそれぞれの領域にあるキャリアが熱による拡散により互いの領域に進入するので、これにより界面付近の電荷が補償され、キャリアが無い空乏層と呼ばれる層が発生します。キャリアの相互拡散は、それにより発生する内部電位により制限されるため空乏層は通常は数ミクロン程度の厚さで収まります。一方静電気は人体が帯電するレベルで数千から数万ボルトに達します。

この電圧がLEDにかかった場合、ほとんどの電圧は電荷のない空乏層に印加されます。空乏層の厚さは非常に薄いので、電界はきわめて高くなり、その材料の静電耐圧を超えるものとなります。静電耐圧を超えた場合、放電により空乏層界面に蓄えられたエネルギーが熱として開放されますが、それはpn接合に均一には起こらず、静電耐圧の弱い一部分に優先的に放電が開始され、蓄えられたエネルギーがその部位に集中します。これによりその部分は熱により変質し、導電性の高い領域がpn層を貫通する形で形成され、pn接合部分は局所的に破壊されます。このため静電破壊後のLEDは通常短絡モードとなります。この状態で再度高電圧を印加した場合、導電性の高い領域に優先的に電流が流れ、その熱によりその領域が蒸発してpn接合が復活する場合があります。但し界面の不均一な状態は温存されるため再び短絡不良を起こしやすくなっています。(図.6)

ボンディングワイヤーの不良

ボンディングワイヤーはリードフレームやプリント基板上の回路パターンとLED素子の電極を結び、LED素子を給電するための部材で、主に金ワイヤーが用いられます。金は軟らかい金属のため、金と各部材は超音波接着により容易に接続されます。接着後の金ワイヤーはボンディングの手順に従って4つの部分に分けられます。(図.7)



電極の腐食、剥離

LED素子の電極は二つの機能が求められます。一つは外部から給電を受けるための端子としての役割で、通常は金ワイヤーで接続されるため、金を用いたボンディングパッドで構成されます。もう一つは半導体に効率よく電気を伝える役割で、通常はp、n型半導体で材料が異なります。半導体と金属の接合は材料の組み合わせにより大きな電圧降下を生じることがあり、電気抵抗の低い接触の組み合わせは限られます。電気抵抗の低い接触の電極はオーミック電極と呼ばれ、代表的なものはp型半導体では金やゲルマニウム、n型半導体ではアルミニウムがあり、その他に接着状態の改善や相互拡散の防止などでニッケル、チタン、タングステン、パラジウムなどの材料が使用されることがあります。これらの中には水分が存在すると容易に腐食したり、酸化して高抵抗化するものがあります。最近のLEDはパシベーション膜や樹脂封止で外部からの水分の浸入を防いでいますが、高温高湿雰囲気の下では水分の拡散は無視できず、電極の腐食、剥離により順電圧の異常な上昇や電氣的オープンによる不灯を招く恐れがあり、使用環境に注意が必要です。

①ファーストボンド部位

接着する前のボンディングワイヤーの先端は丸い球状になっています。この球を素子のボンディングパッドに当て、超音波をかけながら押しつぶすと、ワイヤーは広い範囲でボンディングパッドと接着します。

②再結晶領域

金の球は放電により金線の先端に熱を加えて溶融させて形作られます。金の球に続く線の部分は放電加工の際に熱により部分的に溶解し、冷却されます。このとき金属の結晶化が進み、いくつかの結晶粒界からなる再結晶領域が形成されます。この部分は他の線の部分より若干硬く、脆くなっています。

③ループ部位

再結晶領域以降の線は柔らかいため、線の曲がりはこの部分で形成されます。

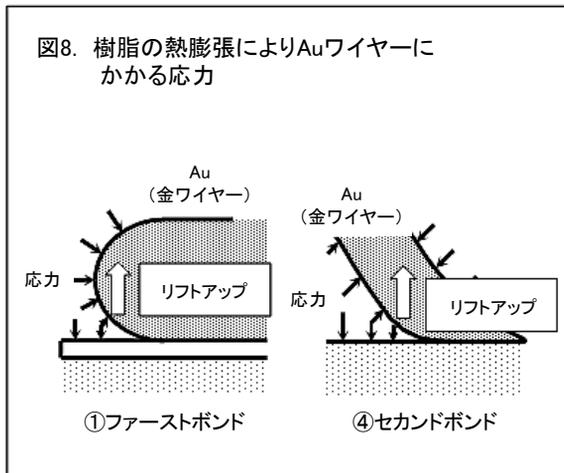
④セカンドボンド部位

ファーストボンドの後、線を引き出して回路パターンに当て、超音波をかけながら押しつぶすと線が回路パターンに接着し、また線は引きちぎられた形になります。

以上の部位の中で、主に①②④において断線の不具合が発生する可能性があります。

封止樹脂の内部応力による断線

樹脂は温度上昇に伴い熱膨張しますが、それによる応力がファーストボンド、セカンドボンド部分と素子電極または回路パターンの間を引き離すように作用することがあります。製品はヒートショック試験などで設計上の安全を確認した上で開発されますが、きわめて速い温度上昇が起こった場合に応力の緩和が不十分で金線と他の部位の接着強度がもたない場合があります。(図8)



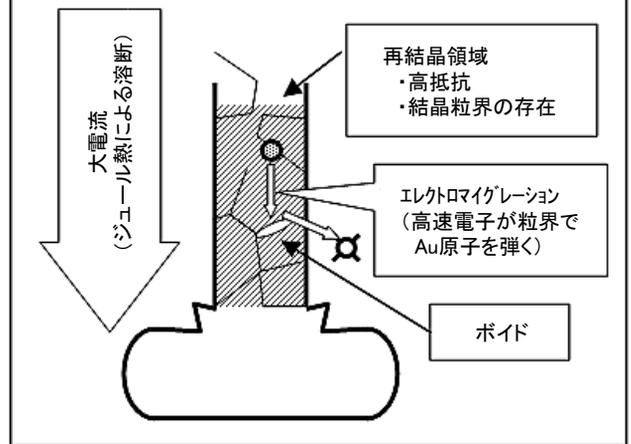
加速度による断線

通常のLEDデバイスは全固体であるので、デバイス全体が破壊されるような衝撃は別として、加速度による断線は考えにくいものです。しかし一部のメタルカン型のデバイスは内部を樹脂で封止せず、不活性ガスを充填させるものがあります。この場合、加速度で金線に過重がかかり、その大きさや繰り返し回数によっては断線の可能性があります。また封止樹脂が柔らかいゴム状のものや、一部の大電力品で封止樹脂の内部応力を避けるために素子周辺のみでゲル状の樹脂を用いたものがあり、注意が必要です。

過大電流による断線

金線にも電気抵抗があり、過大な電流が流れればジュール熱により溶断してしまうことは容易に想像できます。しかし短時間であれば熱の発生が抑えられます。LEDの駆動方式の一つにPWM(パルス幅変調)方式があり、これは通常の直流電流の代わりに断続的なパルス電流でLEDを点灯させるもので、LEDの発光波長などの各種特性の電流依存性をなくし安定化させることが出来る利点があります。パルスの最大電流が大きくとも通電時間が短ければ平均電流が抑えられ熱に関する問題は回避されますが、最大電流を無制限に大きく出来るものではありません。ボンディングワイヤーに関してはエレクトロマイグレーションによる断線の可能性があります。特に金線の再結晶領域では結晶粒界が存在し、この効果による断線がおきやすいといえます。(図9)

図9. 樹脂の熱膨張によりAuワイヤーにかかる応力



ダイボンドの不具合

封止樹脂の内部応力による剥離現象

ボンディングワイヤーの項で述べたとおり封止樹脂が温度上昇により膨張し、接続部分を引き離すような応力が発生することがあります。この応力が、素子と回路パターンを引き離す様に作用する場合も考えられます。通常のLEDのようにダイボンド樹脂が給電の機能を持っていると、LEDは電気的オープンによる不灯状態となります。また、InGaN素子などのように素子上面にpn二つの電極を持ち、両者ともボンディングワイヤーで給電するようなタイプの素子を用いたLEDの場合、直ちに不灯に至るわけではありませんが、素子から回路パターンへの放熱が阻害され、大電流駆動時の著しい性能低下を招くおそれがあります。この剥離現象は素子の形状や、ダイボンドの形態に大きく依存します。このためLEDの設計時には、使用条件に見合った素子形状や内部構造の検討がなされています。

ダイボンド樹脂の劣化

ダイボンド材料は素子の間近にあるため、素子から受ける光のエネルギーの密度は非常に大きくなります。ダイボンド材料が樹脂である場合、素子の光による光劣化が懸念されます。例として青色発光デバイスの場合、素子のダイボンド樹脂に銀ペーストを用いると長時間通電により銀ペーストが黒化し、著しい光度劣化を招くことがあります。この劣化は水分の存在で促進されます。LEDの設計においてはこうした劣化を避けるためダイボンドに樹脂材料を使わず共晶接合や金バンプ接合を用いる場合があります。銀ペーストを用いた場合でも設計上十分な寿命を持った製品として実用化されますが、使用においては周囲環境の十分な検討が必要でしょう。

マイグレーション

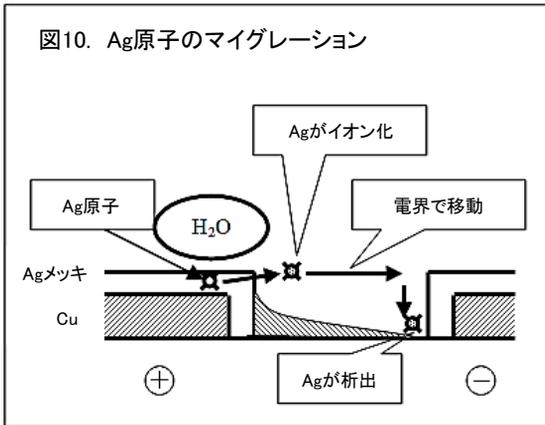
マイグレーションは複数の金属材料の間に電界が存在する場合、金属材料が電界を伝って析出し、成長する現象です。水分が存在するとその現象は加速される傾向があります。一般的なダイボンド材料である銀ペーストにおいて、銀(Ag)はマイグレーションを起こしやすい材料の一つで、水分の存在により促進され各種短絡事故を起こすと懸念されます。(図10)

LEDのパッケージは封止樹脂で素子全体を覆うため、ただちにマイグレーションが問題となるわけではありません。しかし、樹脂材料中の水分の拡散速度は温度の上昇により指数関数的に増大しますので、高温高湿下での利用では大きな問題となる可能性があります。そのため使用環境によりLEDデバイスの利用可否を検討する必要があります。

その他の問題

以上、LEDで発生する故障や不具合について解説してきました。これらはLEDが「通常使用される環境」下の場合で、LEDの開発段階においても以上の不具合発生の可能性を十分考慮にいれて信頼性の高い設計開発を行っています。ただし特殊な環境下においてはLEDに不具合が加速される傾向が認められます。例えば火山性ガス雰囲気での使用の場合、ガスの主成分である硫化水素ガスは樹脂を透過し、LED内の銀成分に容易に反応し、銀を黒化させ、LEDの寿命を著しく縮めます。火山性ガスに限らず、LEDが使用される機器の中に硫黄成分が放出されることがある場合も同様の可能性が考えられます。その他、酸性ガス、塩分濃度の高い雰囲気など、一般に半導体機器が苦手とする環境はLEDにとっても好ましくなく、異常な劣化の原因となります。

水分については各種故障に関与しますが、水分自体が故障の直接原因となる例もあります。多くのLEDは樹脂材料で封止されていますが、樹脂は吸湿しやすい特性があります。十分吸湿した状態でハンダ付けなどの急激な温度上昇が起きると樹脂中の水分が水蒸気爆発を起こす場合があります。



封止樹脂材料の不具合

封止樹脂の内部応力によるクラックの発生

前述のとおり、温度上昇による封止樹脂の膨張はLED内部に応力を発生し、各部材にストレスを加え不良を引き起こす原因となります。内部応力は封止樹脂自身にも作用し、甚だしい場合は樹脂に亀裂を作ります。亀裂の発生は内部形状によるところが大きく、設計上の工夫により回避が可能です。また、PLCCタイプなどのLEDは封止樹脂で構造を支持しないので、柔軟な封止材料を使用して膨張に伴う応力を緩和させることが出来ます。縦型LEDにおいても高温になりやすい素子周辺のみゲル状の樹脂で満たす場合があります。

樹脂の光劣化

封止樹脂は素子の発光を直近で受けるため、光エネルギー密度の非常に高い部分が生じます。したがってダイボンド樹脂の劣化の項で述べた光劣化問題は封止樹脂にも当てはまります。光劣化に対する耐性が大きい材料としてシリコン樹脂があり青色発光デバイスにおいてよく用いられます。