

Luxeon の信頼性

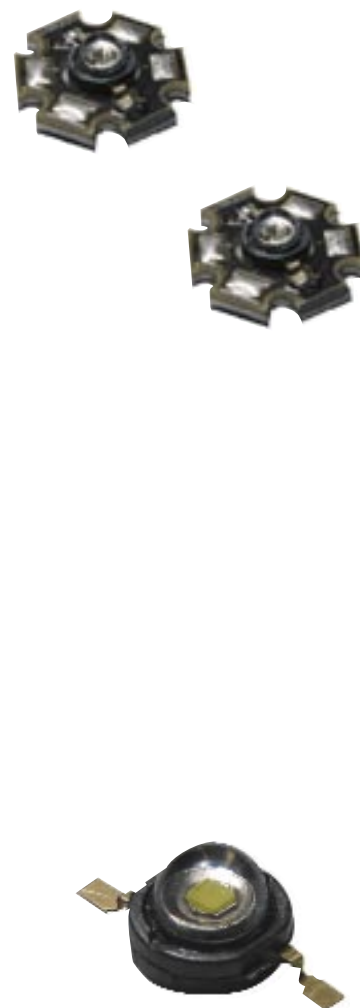
はじめに

Luxeon™ Power Light Source は、これまでの小型信号 LED 光源を超え、革新的な進歩を遂げています。このアプリケーションノートでは、Luxeon 製品群の信頼性パフォーマンスについて概説します。また、一般的な信頼性の概念、起こりうる故障モード、ユーザーの用途に影響を受ける製品信頼性のさまざまな局面についても解説しています。

Luxeon Power Light Source の信頼性は非常に高いですが、デバイスの最大定格に準拠する必要があります。全体的な製品信頼性は、ユーザーの駆動条件および推奨組み立て作業への準拠によって異なります。他の LED と同様、消費電力、以上な高熱経路、または組み立て不良により過度の結合部温度が引き起こされると、熱過大ストレス故障が発生する場合があります。また、他の LED 同様、過渡電気により電気過大ストレス故障が発生する場合があります。これらのさまざまな故障モードについては、このアプリケーションノートで解説しています。

Luxeon 光源の信頼性は、一般的なフィラメント光源と異なります。フィラメント光源は通常、一定の作動時間後に磨耗します。Luxeon 光源の場合、接合部温度と最大駆動電流が製品の最大定格以内であれば、Luxeon の突発故障率は、このアプリケーションノートに詳細が記載された MTTF 式によって定義される一定の任意故障率に区分されます。

さらに、他の LED と同様、Luxeon 光源の発光出力は、時間経過ごとに徐々に減少します。発光出力におけるこの変化は一般にルーメン維持と呼ばれ、駆動電流および作動温度により左右されます。詳細については、このアプリケーションノートに記載されています。



索引

はじめに	1
Lumileds 社より入手可能な Luxeon 信頼性情報	3
パッケージに関する一般的な注意	3
小型信号 LED のパッケージ	3
Luxeon パッケージ	3
Lumileds 社製品の品質認証プロセス	4
突発故障率と MTTF	6
故障の定義	6
突発故障	6
パラメータ故障	6
故障率対時間	6
故障までの平均時間	7
Luxeon の MTTF 予測値	8
過温度時の故障率の予測	8
システム故障率	8
一般的なルーメン維持特性	8
ルーメン維持に対する駆動電流の影響	9
ルーメン維持に対する外気温度の影響	9
Luxeon パッケージの内部構成	10
内部構成	10
電気的特性	10
電気過大ストレス故障	11
フューズ ワイヤ故障	11
電気過大ストレスによるダイ/チップ故障	11
熱過大ストレス故障	12
熱過大ストレスによるボンド ワイヤ故障	12
熱過大ストレスによる非積層	12
レンズの黄化	12
内部ハンダ付けの剥離	12
組み立て関連の故障	13
ヒートシンク接着剤故障	13
過度のハンダ温度	14
Luxeon ヒートシンク スラグと メタル コア プリント基板間の絶縁不良 (MCPCB)	14
まとめ	14
付録 A. システム故障率の例	15
参考資料	17

Lumileds 社より入手可能な Luxeon 信頼性情報

本書では、突発故障の予測、LED 劣化率に影響を与える要因、Luxeon の以上故障モード、故障を最小限に抑える良質な設計の重要性、適切な組み立てプロセスへの準拠の重要性といった基本的な信頼性の概念について解説しています。また、Luxeon と既存のエポキシベースの LED の信頼性改良点の比較についてもまとめ、Lumileds 社製品の品質認証プロセスについても解説しています。

パッケージに関する一般的な注意

これまで、LED 光源は、光学等級エポキシパッケージに実装された小信号 LED チップを使用して構成されていました。Luxeon Power Light Source は、高出力動作および長期寿命を要求されるため、これらの小型信号 LED とは多くの点で異なります。パッケージ化された LED の全体的な信頼性は、LED チップの信頼性と、LED チップ、ピン、金製ワイヤ、および周辺カプセル間の機械的な相互作用によって決定します。

外気温度の変化や自己発熱によって、LED パッケージ内部に機械的ストレスが引き起こされ、全体的な製品の信頼性に悪影響を与える場合があります。熱による膨張率が異なるため、LED パッケージは、過度の外気温度条件にさらされると機械的ストレスを受けることがあります。徐々に、この機械的ストレスが破裂、機械的非積層、またはボンドワイヤ破損を引き起こし、突発故障が発生することがあります。LED に供給される力のほとんどが熱として分散されるため、分散された力や熱の流れに対する抵抗力に応じて、接合部温度は常に外気温度より高くなります。そのため、LED の内部温度は、外気温度だけでなく、ユーザー用途における駆動電流や熱抵抗によっても決定づけられます。そして、パッケージは湿度を吸収するため、これも製品の信頼性に悪影響を与えることがあります。

小型信号 LED のパッケージ

通常の小型信号 LED のパッケージ構成を図 1 に示しました。小型 LED チップは、金属ピンのいずれかに取付けられ、もう一方の金属ピンと小さな金製ワイヤを使用して接続されます。その後、LED チップとピンは光学等級エポキシ樹脂でカプセル化されます。

光学等級エポキシによって LED パッケージに機械的強度が与えられますが、これにより作動温度範囲を制限しやすくなります。作動温度範囲を超えると、エポキシは非常に固くなります。温度の変化によりパッケージは膨張および縮小します。膨張率

は LED パッケージのコンポーネントごとに異なるため、温度が変化すると、金製ワイヤ、LED チップ、および取付け素材に機械的ストレスが加えられます。通常の作動条件では、膨張率を制御するためのエポキシによるカプセル化が動作するのは、エポキシのガラス移転温度 TG より低い温度の場合です。TG を超える温度ではエポキシは非常に高い率で膨張するため、パッケージ内に大幅な機械的ストレスを与えます。多数の熱サイクルが経過すると金製ワイヤは破損する場合があります。さらに、過度の温度衝撃により、エポキシの破裂、金製ワイヤの破損、LED ダイの破損、または LED ダイの LED ピンからの外れが発生する場合があります。これら信頼性についての課題のほとんどは、エポキシの機械的特性から引き起こされるため、特定の製品に対して最良のエポキシを選択するよう注意する必要があります。最良のエポキシを選択しても、通常、特定の LED パッケージの温度の上限/下限は、このエポキシのカプセル化の機械的特性によって決定されます。

さらに、太陽光からの UV 照射や高レベルの青色光を受けると光学等級エポキシは黄色または茶色に変色します。数年前には、太陽光によるエポキシの黄化を遅らせるために様々な UV 抑制剤がエポキシに追加されていました。しかし、青色および白色の LED のスペクトルには、高レベルの擬似 UV エネルギーが、太陽光よりずっと高い光束レベルで含まれています。そのため、UV 抑制剤を使用しても、青色および白色の小型信号 LED は、LED ダイのすぐ周りを囲んでいるエポキシのカプセル化の黄色/茶色化による発光出力の劣化によって制限されやすくなっています。

Luxeon パッケージ

パッケージに関する一般的な注意

Luxeon Power Light Source は、小型信号 LED で使用される多くのパッケージ技術を派生させたものです。こうした変更は、高出力動作に必要な熱特性の向上だけでなく、エポキシのカプセル化についてのいくつかの制限を和らげるためにも必要です。Luxeon Power Light Source のパッケージ構成を図 2 に示します。熱伝達経路と電気伝達経路が分かれていることに注意してください。強力 LED チップは、金属製のヒートシンク スラグに取付けられ、主な熱伝達経路を提供しています。また、強力 LED チップは、陽極リードや陰極リードにも電氣的に接続されています。高温プラスチックレンズはプラスチックケースに取付けられ、強力 LED チップとレンズの間の空間には、特許取得のシリコンカプセルで充填されています。Luxeon のパッケージについては、このアプリケーションノートの「Luxeon パッケージの内部構成」のセクションで詳述しています。

図 1

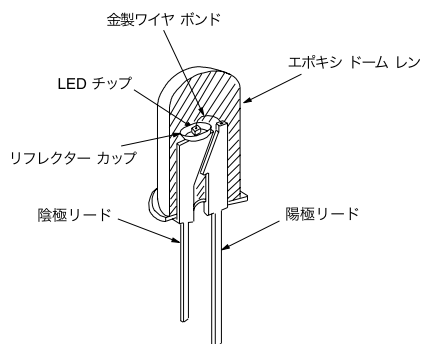
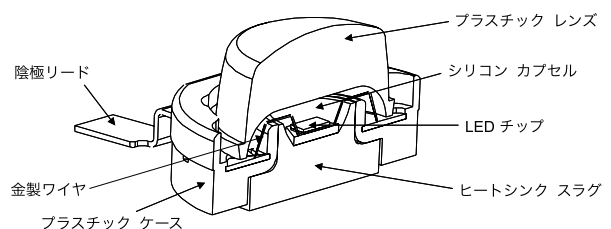


図 2



Luxeon パッケージは、小型信号 LED と比較し、非常に低い熱抵抗を実現するよう設計されています。Luxeon 製品群には、AlInGaP LED ダイ技術 (赤、赤橙、アンバー色など) と InGaN LED ダイ技術 (ロイヤルブルー、シアン、緑、白色など) の両方が含まれています。

チップの取付け

AlInGaP Luxeon LED ダイは、ヒートシンク スラグに直接ハンダ付けされています。最終的な熱抵抗 R_{θ} 接合部 - スラグ は、異なる AlInGaP Luxeon パッケージごとに 15 ~ 18°C/W です。

InGaN Luxeon ダイの接合部は、絶縁サファイア基材の上に設置され、さらにひっくり返されてシリコンチップにハンダ付けされています。シリコン チップは、ヒートシンク スラグにダイ結合されています。

最終的な熱抵抗 R_{θ} 接合部 - スラグ は、白色などの InGaN Luxeon で 15°C/W、InGaN Luxeon III パッケージで 13°C/W、InGaN Luxeon V パッケージで 8°C/W です。

シリコン カプセル

Luxeon パッケージでは、光学等級エポキシの代わりに特許取得のシリコン カプセルを使用しています。これは、より高度な機械的特性を得るのに標準の光学エポキシよりずっと適しています。非常に固く脆いエポキシと異なり、シリコン素材は非常にソフトなので、金製ワイヤをカプセル内部で移動させることができます。そのため、シリコン カプセル内の温度循環では、エポキシの同温度範囲での温度循環に比べ、金製ワイヤへの機械的ストレスはずっと少なくなります。また、特許取得のシリコン カプセルは、光学等級エポキシよりずっと高い温度に耐えることができます。

さらに、特許取得のシリコン カプセルは、UV 照射や高レベル青色光の放出による変色に対する耐久性もあります。図 3 に、ニューヨーク、トロイにある Lighting Research Center が行った独立研究で測定された、従来のエポキシ カプセル化小型信号 5 mm 白色 LED と、シリコン カプセル化強力 LED のルーメン維持の比較を示します。これらのテストでは、5 mm 白色 LED

は 20 mA で、強力 LED は 350 mA で駆動させています。どちらの場合も LED は室温で駆動させました。10,000 時間駆動後、5 mm 白色 LED の低下率は 65% でしたが、強力 LED の低下率は約 10% のみでした。

Lumileds 社製品の品質認証プロセス

Lumileds 社では、新製品の導入前に、広範囲に渡る信頼性ストレステストを行って、製品が目的の市場の信頼性要件に合致していることを確認しています。初期の Luxeon パッケージ開発当時、作動寿命の広範囲に渡るバッテリー、機械的信頼性、および環境的信頼性のテストが行われました。こうしたテストを表 1 に示しています。

数年の間に、新しい LED ダイの使用、レンズ改良、およびパッケージの小規模改良により、初期 Luxeon 製品は発展してきました。さらに、最大作動電流は、280 から 350/385、700、そして 1000 mA にまで増大しています。製品の発展と改良の性質に応じて、作動寿命テストや温度サイクルテストといった主な信頼性ストレステストが行われてきました。

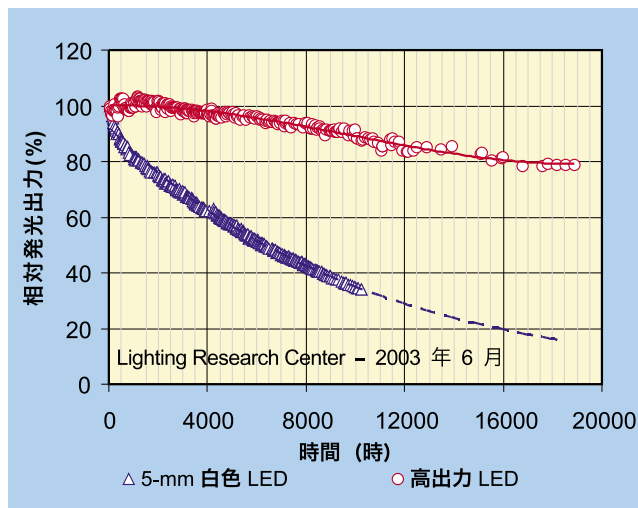


図 3. 作動時間の関数としての 5 mm インジケータランプおよびハイパワーイルミネーター LED からの相対発光出力 (Narendran, Deng, Pysar, Gu, および Yu, 2003)。¹

表 1. Luxeon パッケージに対して行われた作動寿命、機械、および環境についてのテスト。

ストレステスト	ストレス条件	ストレス期間	故障基準
高温動作寿命 (HTOL)	55°C または 85°C、 I_F = 最大 DC (注記 1)	1000 時間	注記 2
室温動作寿命 (RTOL)	25°C または 55°C、 I_F = 最大 DC (注記 1)	1000 時間	注記 2
低温動作寿命 (LTOL)	-40°C、 I_F = 最大 DC	1000 時間	注記 2
湿度高温動作寿命 (WHTOL)	85°C/60% 相対湿度、 I_F = 最大 DC	1000 時間	注記 2
動力供給温度サイクル (PTMCL)	-40/85°C、等温放置時間 18 分、 移行時間 (2 時間サイクル) 42 分、 5 分 オン/5 分 オフ、 I_F = 最大 DC	200 サイクル	注記 2
非動作温度サイクル (TMCL)	-40/120°C、等温放置時間 30 分/移 行時間 5 分	200 サイクル	突発故障なし
高温保管寿命 (HTSL)	110°C、非動作	1000 時間	注記 2
低温保管寿命 (LTSL)	-40°C、非動作	1000 時間	注記 2
非動作温度衝撃 (TMSK)	-40/110°C、等温放置時間 20 分/移行 時間 20 秒未満	200 サイクル	突発故障なし
非動作温度衝撃 (TMSK)	-40/120°C、等温放置時間 20 分/移行 時間 20 秒未満	200 サイクル	突発故障なし
機械的衝撃	1500 G、0.5 ミリ秒パルス、6 軸ごとに衝撃 5 回		突発故障なし
自然落下	コンクリート面へ 1.2 m から 3 回		突発故障なし
可変周波振動	10 ~ 2000 ~ 10 Hz (対数掃引または一様掃引)、 20 G で約 1 分間、振幅 1.5 mm、3 倍/軸		突発故障なし
可変周波振動	10 ~ 55 ~ 10 Hz、± 75 mm、55 ~ 2000、 10 G、1 オクターブ/分、3 倍/軸		突発故障なし
ランダム振動	6 G RMS、10 ~ 2 k Hz、10 分/軸		突発故障なし
ハンダ熱抵抗 (SHR)	260°C ± 5°C、10 秒、		突発故障なし
ハンダ可用性	蒸気老化 16 時間、 ハンダ付け 245°C 5 秒間		リード上 のハンダ範囲
リード強度	1 ポンド、30 秒		突発故障なし
リード疲労	1 ポンド、屈曲 3 x 45°		突発故障なし
塩気	35°C	48 時間	突発故障なし

注記 1: 最大定格低減曲線により異なる。

注記 2: 故障基準には、突発故障の回数、1000 時間経過時の 50% 以上の光強度劣化回数、または 1000 時間経過時の 35% 以上の平均光強度劣化テスト回数などがあります。

突発故障率と MTTF

故障の定義

故障とは、目的の機能を実行する能力の終了と定義されています。LED は、パラメータ故障または突発故障が起こる可能性があります。

突発故障

突発故障は、主要な電気的または光学的データシートのパラメータが、LED が点灯しないレベルにまで変化したときに起こります。LED の突発故障には、突発故障によって破裂やガラス破損が起こる場合があるという、これまでの光源と同じ意味合いは含まれていません。代わりに、ほとんどの LED 故障で、LED の非発光が起こります。

この故障の原因、つまり突発故障の故障メカニズムにはパッケージに関連する故障モードとダイに関連する故障モードの 2 つがあります。パッケージに関連する故障メカニズムには、ボンドワイヤの破損、ボール ボンドまたはステッチ ボンドの上昇、開回路やレンズの深刻な変色を引き起こすパッケージ内部での非積層などがあります。ダイに関連する故障メカニズムには、深刻な発光出力の劣化やダイ上での硬化の焼き切れ/破損などがあります。こうした故障メカニズムについては、このアプリケーションノート「電気過大ストレス故障」および「熱過大ストレス故障」のセクションで詳述します。

ほとんどの場合、LED の突発故障は、開回路（または順方向電圧の大幅な増加）を引き起こします。時には、突発故障によって短絡が発生する場合もあります。突発故障には次のものがあります。

- 開回路または短絡
- 通常の発光出力テスト条件時の発行出力の停止 (Luxeon の場合 350 mA など)

パラメータ故障

パラメータ故障は、主要な電気的または光学的データシートのパラメータが初期値から一定の量以上変化すると起こります。電気的および光学的パラメータは時間の経過にあわせ少しずつ変動することがあります。小さな変動は異常ではなく、通常は LED の動作に影響しません。こうした小さな変動は故障とは考慮されません。ただし、光強度のある程度の低下、順方向電圧のある程度の変化、または逆方向漏洩電流のある程度の変化は、パラメータ故障モードの一例です。Lumileds 社の信頼性ストレステストでは、Lumileds 社は過度の発光出力の劣化の回数もパラメータ故障としてカウントしています。特定の故障基準は、各信頼性データシートに記載されています。

故障率対時間

故障率とは、動作時間単位あたりの LED の突発故障のパーセントのことです。任意の電気部品の作動寿命は、大きく 3 つの時間区間に分割することができ、図 4 に示すように、それぞれが異なる故障率を持ちます。

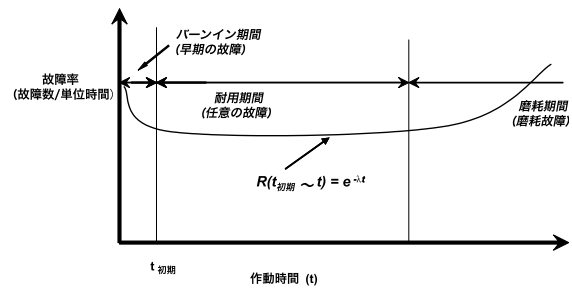


図4. 一般的な故障率曲線。

通常、作動時間の初期に高い故障率が発生していることに注意してください。この期間は、バーンイン期間または初期故障期間と呼ばれます。この期間中に、組み立て不良のあるユニットが故障します。Luxeon Power Light Source の場合、組み立て時にエミッター下部のヒートシンク スラグを外側ヒートシンクに正しく取付けて、接合部温度を推奨作動温度範囲に収めることが重要です。また、「組み立て関連の故障」のセクションで後述する推奨ハンダ付け手順に従わない場合、Luxeon パッケージに熱過負荷が与えられる場合があります。どちらの場合も、これらのユニットは早期に故障します。

故障率曲線の 2 つ目の部分は、耐用寿命期間と呼ばれます。この期間中の故障率は低く一定です。一般的に、発生する故障は不定であり、更なる電気テストや部品の焼付けによって予防できるものではありません。

故障率曲線の 3 つ目の部分は、磨耗期間と呼ばれます。この期間中、故障率は、最終的にユニットが故障するまで上昇します。磨耗期間の一般的な例には白熱電球の通常故障モードがあり、このモードでは一定の作動時間が経過するとフィラメントが突然故障します。LED には白熱電球について説明したものと同等の故障メカニズムはありませんが、その他の磨耗メカニズムが存在します。この場合、「故障」は発光出力の許容パーセント変動についての予測不可能な制限によって引き起こされる可能性があります。LED は発光出力の劣化によっても故障します。一般的に、人間の目は約 50% という発光出力の大幅な変化にのみ反応し、小さな変化は通常認識できません。

図 4 は、通常の作動条件下での LED の故障率対時間の一般的傾向を示していますが、この図に正しく計上されない異常故障も起こる場合があります。

過度の電気過大ストレス条件または熱過大ストレス条件の場合、図 4 に示した傾向は適用されなくなる場合があります。たとえば、電気駆動回路または電気主電源により生成され、電気駆動電流によって除去されないために、金製ワイヤを溶かす可能性がある過渡電流によって、こうした故障が引き起こされることもあり得ます。または、過度の熱過大ストレスによってボンドワイヤが破損する場合があります。どちらの場合も LED はすぐに発光を停止します。そのため、故障の原因が任意の故障メカニズムによるものなのか、過度に印加された電気または熱の過大ストレスによるものなのかを判断するには、詳細な故障分析を行うとよいでしょう。

故障までの平均時間

信頼性とは、デバイスが一定期間後も満足できる動作をしている可能性のことです。耐用寿命期間中(図4の2つ目の場所)の故障率は一定であり、信頼性は次のように表されます。
注記:ここでは、故障の指数分布を仮定しています)

$$R(t) = \exp[-\lambda t]$$

ここで、

$$R(t) = \text{ユニットが } t \text{ 時に動作している可能性}$$

$$\lambda = \text{故障率} = 1/\text{MTTF}$$

$$t = \text{時間コンポーネントがオンである}$$

耐用寿命期間中の突発故障の発生可能性は次の式と同等であることに注意してください。

$$P(t) = 1 - R(t)$$

故障までの平均時間 MTTF は、耐用寿命期間中の故障率の逆数であり、時間で示されます。MTTF および故障率は、作動寿命テストで測定できます。MTTF は、簡単に言うと、デバイスの総数に、デバイスごとの作動時間数を突発故障の総数で割った数を掛けた数となります(例: 1000 時間作動した 100 個のユニットに 2 つの故障がある場合、MTTF は 50,000 時間となります)。テスト期間中に故障が起きなかった場合、MTTF は 1 つの故障が起きたと仮定して計算されます。たとえば、100 個のユニットを 1000 時間作動させて故障が 1 つもなかった場合、可能性としては MTTF 値がずっと高い場合も考えられますが、MTTF は 100,000 時間であると計算されます。Lumileds 社では、一般的に、最悪の作動条件(たとえば、最大許容接合部温度かつ最大作動電流時)にて LED を作動して MTTF を決定しています。MTTF の逆数は「ポイント故障率」とも呼ばれます。

故障率は、様々な時間単位で説明することができます。

表 2 に、様々な MTTF での故障率を示します。

故障率		
MTTF (デバイス時間)	%/1000 時間	FIT (故障数/10 ⁹ 時間)
1 M	0.1%	1000 FIT
10 M	0.01%	100 FIT
100 M	0.001%	10 FIT

表 2. 故障率に一般的に使用される単位。

「90% 高信頼性制限 (略: UCL) 故障率」とは、仮定した故障の指数分布に基づき、実際の故障率が予測値と同等またはそれ以上に良い可能性が 90% ある場合の故障率です。言い換えると、テストが複数回繰り返された場合、10 回のうち 9 回は、測定された故障率が 90% UCL 予測値より良い(低い)こととなります。そのため、90% UCL 故障率は、ポイント故障率より「最悪の」故障率予測値がより多くなります。90% UCL 故障率は、MTTF の逆数と同等かそれ以上となります。90% UCL 故障率の逆数は、10% 低信頼性レベル (略: LCL) MTTF です。

図 5 に、90% UCL 故障率とポイント故障率との関係と、10% LCL MTTF と MTTF との関係を示します。90% UCL 故障率とポイント故障率の比率は、テスト中に発生した故障の数により異なります。信頼性制限についての詳細は、次の参考文献をご覧ください。(『Applied Reliability』、Tobias および Trindade、1995)。²

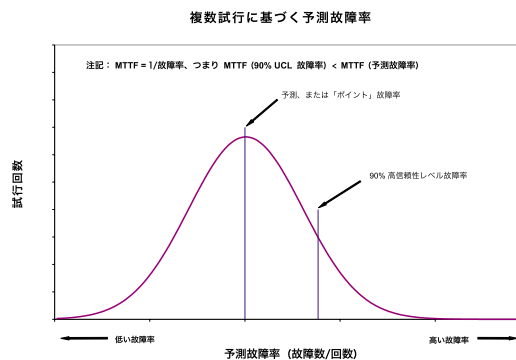


図 5a. 期待または「ポイント」故障率と 90% UCL 故障率との関係。

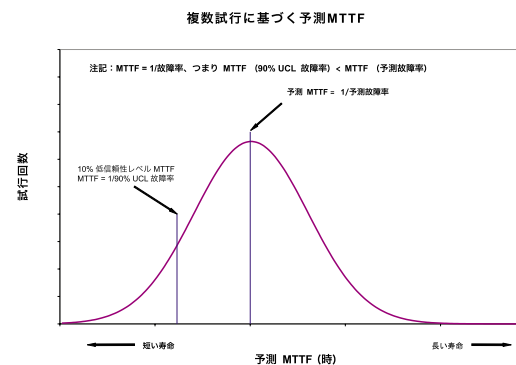


図 5b. 期待される MTTF と 10% LCL MTTF 予測値との関係。

Luxeon の MTTF 予測値

MTTF の予測値に達するには、指定された駆動条件で故障が発生するまで作動寿命テストを行う必要があります。故障が起きるまでの信頼性テストの実行要件は、Luxeon のような高信頼性の製品では故障がほとんど起きないため難しくなります。Luxeon の MTTF を正確に測定するには、10,000 時間、数万個のユニットにストレスを加える必要があります。

Luxeon High-Power Light Source が 1998 年に導入されて以来、100 万台以上の信号機で使用されています。各信号機には 12 から 18 個の Luxeon エミッターが使用され、世界中の交差点に設置されてきました。こうした信号機のヘッドは、週 7 日、1 日 24 時間連続して稼動しています。これまでの実質的にすべての信号機製品の返品は、プラスチック ケースへの水の浸入によって故障したものでした。Lumileds 社製信号機ヘッドの返品製品を検討したところ、水の浸入によって LED アレイ基板が短絡したか、電気駆動回路系で異常が発生した以外の LED 故障はありませんでした。こうした証拠に基づき、Luxeon の MTTF は、1 億から 10 億デバイス時間を越えると考えられます。故障率を予測するには、更なるデータが整うまで、80°C の接合部温度で 1 億デバイス時間の MTTF を使用することをお勧めします。

過温度時の故障率の予測

多くの場合、別の接合部温度で測定された故障率に基づいて、新しい接合部温度での故障率を予測するのが望ましいとされます。たとえば、Lumileds 社では、通常、最悪の最大接合部温度での故障率を測定していますが、ユーザーの中にはより一般的な作動条件での故障率を予測したい方もいらっしゃるでしょう。こうした計算には、下記のアレニウスの式を使用することができます。

$$\lambda_2 = \lambda_1 \exp \left[\frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right]$$

ここで、

- λ_1 = 接合部温度 T_1 での故障率
- λ_2 = 接合部温度 T_2 での故障率
- E_A = 始動エネルギー、単位 eV
- k = ボルツマンの定数 (8.617×10^{-5} eV/°K)
- T = 接合部温度、単位 °K (°K = °C + 273)

Lumileds 社では、Luxeon の始動エネルギーを決定していませんが、これまで 0.43 eV という値を始動エネルギーに使用してきました。0.43 eV は、ハイブリッド半導体の相互接続不良に対する MIL-HDBK-217C で推奨されている始動エネルギーです。0.43 eV という値は、始動エネルギーについての弊社の最善値です。この式を使用すると、故障率と MTTF は接合部温度が高くなると悪化します。アレニウスの式についての詳細は、次の参考文献をご覧ください。(『Handbook of Reliability Engineering and Management』、Ireson, Coombs, および Moss, 1996)。³

システム故障率

一般的に、1 つのコンポーネントの故障によりシステム故障が引き起こされるシステムの信頼性は、次のように計算できます。(多くのシステムでは、総発光出力またはシステム発光出力の指向性パターンを故障と判断するには、複数の LED 故障が必要です。)

$$R(t) = \exp \left[- \left(\sum_i \lambda_i \right) (t) \right]$$

n 個の同じコンポーネントで構成されるシステムの場合、システムの信頼性は次のようになります。

$$R(t) = \exp[-\lambda n t]$$

いくつかの用途では、システムが、システム故障を起こさず 1 つ以上の故障を許容する場合があります。こうした場合、信頼性は大幅に向上します。これらの状態における一般的な解決策は、2 項分布の用途です。通常、試行ごとの故障可能性が P である場合、 n 回の試行中に x 回の故障が起きた場合の故障 P の可能性は次のとおりです。これらの式を用いたサンプル式が、付録 A に記載されています。

$$P(n_x) = \frac{n!}{(n-x)!x!} p^x (1-p)^{n-x}$$

一般的なルーメン維持特性

LED は、作動中、永久的に徐々に発光出力が低下します。この現象は、発光出力の劣化と呼ばれ、LED パッケージ内部での LED ダイの光生成効率の低下または光学経路の光伝達の低下によって引き起こされます。通常、LED ダイでは発光出力の劣化率は、最初の数百時間の作動時間中が高く、その後は低下します。そのため、LED ダイの発光出力の劣化は、おおよそ時間の対数に応じて異なります。一般的に、Luxeon I の場合 350 mA、Luxeon III の場合 700 mA の DC 駆動電流で Luxeon を駆動し、接合部温度が 90°C 以下に保たれていれば、Luxeon は 50,000 時間経過後に平均して 70% のルーメン維持を提供することが予想されます。また、Luxeon III の場合、1000 mA で駆動され、接合部温度が 90 度以下に保たれている場合、20,000 時間経過後に平均して 50% のルーメン維持となることが予想されます。人間の目は発光出力の小さな変更に対応できないため、認識できる変更を行うには約 50% の変更が必要です。

図 6 に、350 mA および 55°C のスラグ温度 (71°C の接合部温度) でストレスをかけられた AllnGaP Luxeon のルーメン維持データを示します。注記：これらの信頼性ストレステストでは、ヒートシンク スラグの下側の温度が、この文書ではスラグ温度と呼ばれる固定温度に保たれるように、熱制御された平板に Luxeon を実装します。発光出力の変化は、10,000 時間経過後、約 -9% であると予想されます。

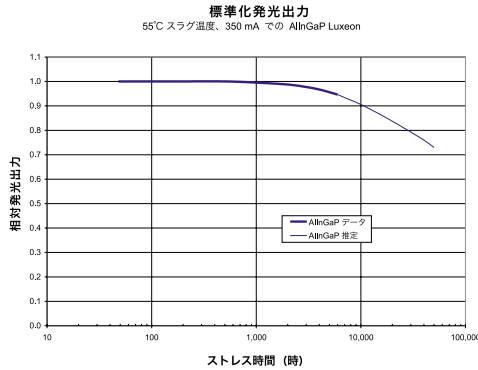


図 6.

図 7 に、350 mA および 55°C のスラグ温度 (72°C の接合部温度) でストレスをかけられた InGaN Luxeon エミッターの長期ルーメン維持データを示します。発光出力の変化は、10,000 時間経過後、約 -6% であると予想されます。同じ駆動電流および接合部温度で駆動すると、通常、InGaN Luxeon の発光出力の劣化は、AllnGaP Luxeon よりも少なくなります。

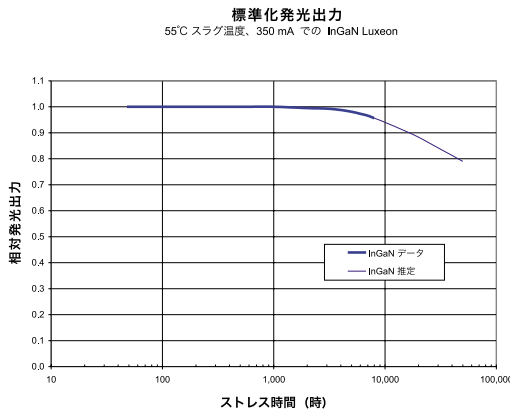


図 7.

ルーメン維持に対する駆動電流の影響

AllnGaP LED では、固定温度で駆動した場合、発光出力の劣化率は DC 駆動電流とほぼ比例します。図 8 に、280 mA、350 mA、および 500 mA の順方向電流と 85°C のスラグ温度 (97°C、101°C、および 110°C の接合部温度) で駆動した AllnGaP Luxeon のルーメン維持値を示します。発光出力の変化は、10,000 時間経過後、-17% ~ -27% ~ -45% に増加すると予想されます。

図 9 に、350 mA および 55°C のスラグ温度で駆動した InGaN Luxeon、700 および 1000 mA と 55°C のスラグ温度で駆動した InGaN Luxeon III のルーメン維持値を示します (それぞれ

72°C、87°C、および 103°C の接合部温度)。発光出力の変化は、10,000 時間経過後、-6% ~ -12% ~ -29% に増加すると予想されます。図 8 および図 9 は、AllnGaP Luxeon と比較した場合、通常、InGaN Luxeon の発光出力の劣化の方が、駆動電流に対してより感度が悪いことを示しています。

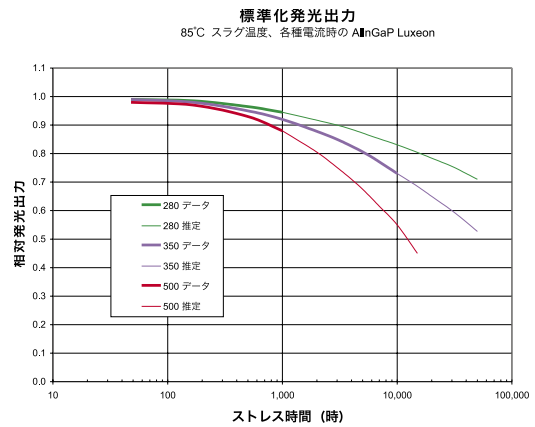


図 8.

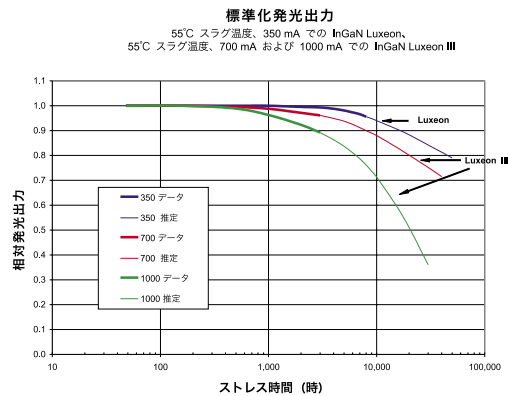


図 9.

ルーメン維持に対する外気温度の影響

固定 DC 電流で駆動した場合、発光出力の劣化率は温度が高くなるほど上昇します。図 10 に、350 mA および 55°C、85°C、および 100°C のスラグ温度 (接合部温度はそれぞれ 71°C、101°C、116°C) で駆動した AllnGaP Luxeon のルーメン維持値を示します。発光出力の変化は、10,000 時間経過後、-9% ~ -27% ~ -40% に増加すると予想されます。

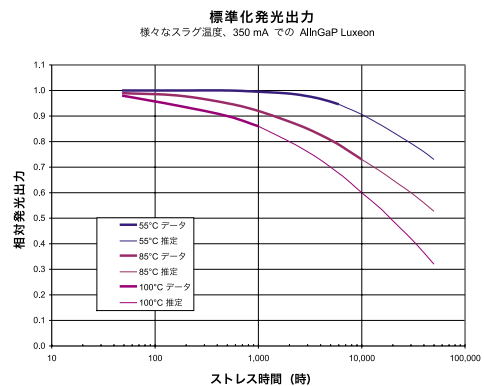


図 10.

図 11 に、350 mA および 55°C、85°C、および 100°C のスラグ温度 (接合部温度はそれぞれ 72°C、102°C、117°C) でストレスを加えた InGaN Luxeon のルーメン維持値を示します。発光出力の劣化は、10,000 時間経過後、-6% ~ -8% ~ -19% に増加すると予想されます。図 10 および図 11 は、AlInGaP Luxeon と比較した場合、通常、InGaN Luxeon の発光出力の劣化の方が、温度に対してより感度が悪いことを示しています。

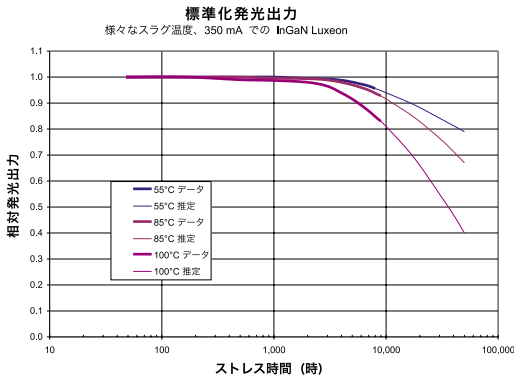


図 11.

Luxeon パッケージの内部構成

内部構成

AllnGaP

Luxeon パッケージの一般的な解説はすでに記載しましたが、Luxeon パッケージの物理的制限をより良く理解するには Luxeon パッケージの内部構成について詳細に理解することが重要です。

図 12 に、AlInGaP Luxeon の内部構成図を示します。LED チップは、ヒートシンク スラグにハンダ付けされています。この LED チップとヒートシンク スラグは、金製ワイヤを使用しパッケージ ピンに接続されています。1 本の金製ワイヤのボール ボンドは LED ダイの上部にあるボンド パッドに接続され、2 本目の金製ワイヤのボール ボンドはヒートシンク スラグに接続されていることに注意してください。これらのワイヤの反対側の端は、パッケージ ピンにステッチ ボンドで留められています。AlInGaP Luxeon ダイの内部構成は様々です。バットウィング AllnGaP Luxeon ダイの上部には陽極がありますが、ランパシアン AllnGaP Luxeon ダイの上部には陰極があります。そのため、ヒートシンク スラグは、バットウィング AllnGaP Luxeon の陰極に、ランパシアン AllnGaP Luxeon の陽極に電気接続されています。

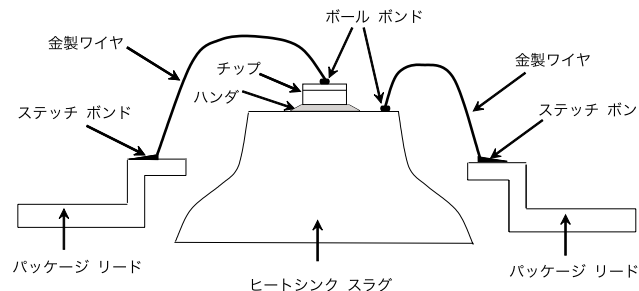


図 12. AlInGaP Luxeon の内部構成。

InGaN

図 13 に、InGaN Luxeon の内部構成図を示します。InGaN ダイの陽極および陰極の両方がダイの同じ側にあることに注意してください。LED ダイはシリコン チップの上部に実装されています。シリコン チップからは、両方の外部電気接続が LED チップに接続され、InGaN チップを静電気放電 (ESD) から保護しています。InGaN チップは、複数の冗長するハンダ隆起を使用してシリコン補助実装チップに接続されています。シリコン補助実装チップは、ダイ結合エポキシを使用してヒートシンク スラグに取付けられています。このダイ結合エポキシは電気と熱を伝播します。そして、シリコン チップは、金製ワイヤを使用しパッケージ ピンに接続されています。両方のボール ボンドがシリコン チップ上部のボンド パッドに接続されており、これらのワイヤの反対側の端はパッケージ ピンにステッチ ボンドで留められています。

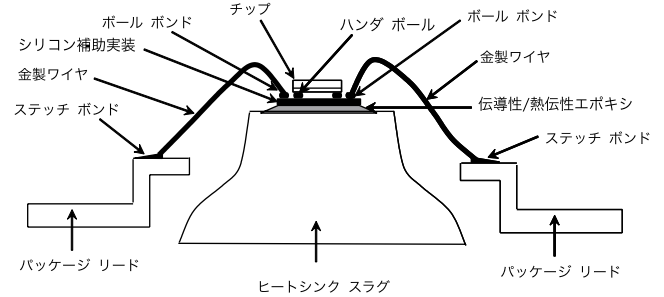


図 13. InGaN Luxeon の内部構成。

電気的特性

AllnGaP

AllnGaP Luxeon の電気図を図 14 に示します。順方向にバイアスを掛けた場合、内部直列抵抗は、印加電圧が約 2 V の起動電圧を超えるまで、非常に高くなります。この電圧を超えると、順方向電流がすばやく増加し、内部直列抵抗は非常に低くなります。逆方向にバイアスを掛けた場合、直列抵抗は、ダイを故障させるのに十分な電圧が印加されるまで非常に高くなり、その後、逆方向電流が AllnGaP ダイを通過するようになります。ほんの数 mA の逆方向電流が LED ダイを永久に損傷する恐れがあるため、逆方向の動作はお勧めしません。

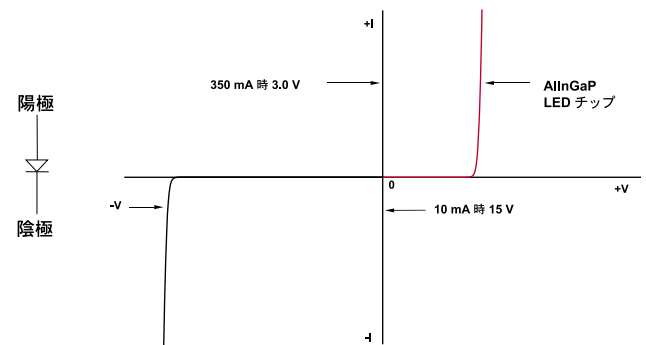


図 14. AllnGaP Luxeon の電気図。

InGaN

InGaN Luxeon I および III の電気図を図 15 に示します。InGaN ダイは 2 つの連続するシリコン ツェナー ダイオードと並列接続されています。これらの連続するシリコン ツェナー ダイオードによって InGaN は過渡 ESD から保護されています。通常の順方向バイアス条件では、InGaN ダイの順方向電圧が約 3 V であり、連続するツェナー ダイオードの故障電圧が約 7 V であるため、電流は InGaN ダイを流れます。順方向にバイアスが掛けられた場合、InGaN ダイの内部直列抵抗は約 1 オームです。逆方向にバイアスが掛けられた場合、直列抵抗は、連続するツェナー ダイオードまたは InGaN ダイが故障するまで非常に高くなります。InGaN ダイの逆方向故障電圧は通常 10 V を超えるため、逆方向電流は、InGaN ダイではなく連続するツェナー ダイオード内を通過して、InGaN ダイを電気過大ストレスから保護します。ヒートシンク スラグは、2 つの連続するツェナー ダイオードの陽極と内部接続されています。ヒートシンク スラグを他の外部回路から電気絶縁することをお勧めします。

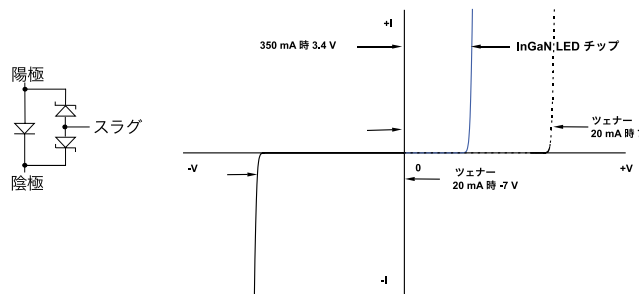


図 15. InGaN Luxeon I および Luxeon III の電気図。

Luxeon V の電気図を図 16 に示します。Luxeon I および III と同様、InGaN ダイは 2 つの連続するシリコン ツェナー ダイオードと並列接続されています。これらの連続するシリコン ツェナー ダイオードによって InGaN は過渡 ESD から保護されています。電気的には、Luxeon V の順方向電圧が Luxeon I および III の順方向電圧の 2 倍となるよう、Luxeon V は 2 つの LED が直列に接続されているように見えます。そのため、連続するツェナー ダイオードの逆方向故障電圧は、Luxeon V より高くなり、通常約 8 V となります。ヒートシンク スラグは、2 つの連続するツェナー ダイオードの陽極と内部接続されています。ヒートシンク スラグを他の外部回路から電気絶縁することをお勧めします。

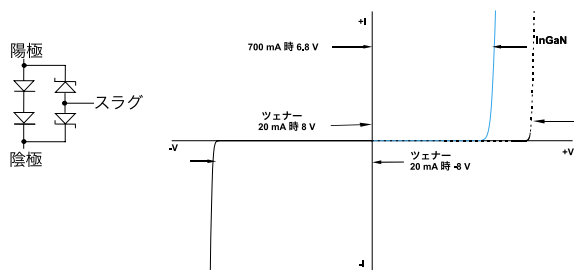


図 16. InGaN Luxeon V の電気図。

電気過大ストレス故障

データシートの制限を越えた順方向電流、または最高過渡電流に Luxeon をさらすと、発光出力の劣化率を上げるだけでなく、突発故障が引き起こされる場合があります。突発故障の種類は、電気過大ストレスの種類および Luxeon エミッターの種類によって異なります。過渡電気によって、Luxeon パッケージ内の金製ワイヤが破損する恐れがあります。また、Luxeon ダイの種類が異なると、過渡電気への反応も異なります。

フューズ ワイヤ故障

高エネルギーの過渡電気/電流も Luxeon パッケージに損傷を与える場合があります。非常に高い電流値では金製ワイヤがフューズの働きをします。図 17 に典型的なフューズ ワイヤによる突発故障を示します。

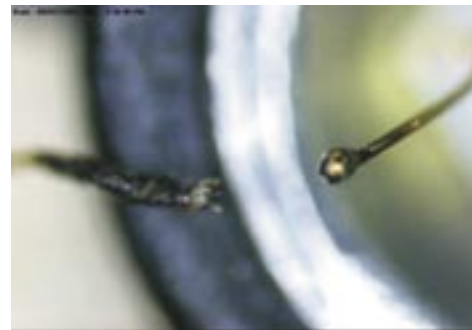


図17. フューズ ワイヤ故障。

フューズ電流は、過渡電気の振幅と期間および金製ワイヤの寸法によって異なります。また、非常に長いパルス期間を持つ過渡電気と過度の DC 順方向電流も様々な種類の熱過大ストレス故障 (熱過大ストレスのセクションで解説) を引き起こす場合があります。

電気過大ストレスによるダイ/チップ故障

Luxeon で使用される LED ダイの種類が異なると、過渡電気への反応も異なります。

AllInGaP

AllInGaP Luxeon は通常、正側過渡電気に対して耐久性があります。ダイ上部の金属接触部により、電流が接合部エリアに均等に拡散します。ダイの内部直列抵抗は非常に低く 1 オーム以下であるため、外部電流制限がないと、比較的小さなピーク過渡電圧によって高ピーク電流が LED 内を伝播します。正側の過渡電気の保護は、外部電流制限 (Luxeon の内部直列抵抗よりずっと高い抵抗) や、よりよい保護には過渡電気を吸収するアクティブな駆動回路を使用することで大幅に向上させることができます。

一方、負側の過渡電気は AllInGaP Luxeon を永久に損傷することがあります。逆方向故障電圧より高い逆方向電圧がダイに印加されると、内部 p-n 接合が故障し、逆方向電流がダイを流れます。ただし、数 μA を超える逆方向電流は、LED ダイ内部に熱を集中させ、永久的な損傷を与える恐れがあります。シリコン ダイオードは数百ボルトを超える逆方向故障電圧で利用できるため、負側の過渡電気による損傷は Luxeon アレイに直列

接続された単一の高電圧シリコン ダイオードを使用することで防ぐことができます。

AllnGaP Luxeon は ESD 過渡電気に対して耐性があり、16 kV の人体モデルを伝播します。

InGaN

InGaN Luxeon は通常、正側過渡電気に対して耐久性があります。ダイ上部の金属接触部により、電流が接合部エリアに均等に拡散します。ただし、ダイの内部直列抵抗は非常に低く 1 オーム以下であるため、外部電流制限がないと、比較的小さなピーク過渡電圧によって高ピーク電流が LED 内を伝播します。正側の過渡電気の保護は、外部電流制限 (Luxeon の内部直列抵抗よりずっと高い抵抗) や、よりよい保護には過渡電気を吸収するアクティブな駆動回路を使用することで大幅に向上させることができます。

連続するツェナー ダイオードによって InGaN ダイが保護されるため、InGaN Luxeon は低エネルギーの負側過渡電気に対して耐性があります。ただし、シリコン ダイオードは数百ボルトを超える逆方向故障電圧で利用できるため、負側の過渡電気を Luxeon アレイに直列接続された単一の高電圧シリコン ダイオードを使用して防ぐことをお勧めします。

InGaN Luxeon も ESD 過渡電気に対して耐性があり、16 kV の人体モデルを伝播します。

熱過大ストレス故障

Luxeon パッケージ内での熱による膨張率が異なるため、最大定格を超える高い内部温度にさらしたり、熱サイクルを繰り返すと、様々な種類の突発故障を引き起こす可能性があります。前述したように、シリコン カプセルはやわらかいため、通常、エポキシ カプセルより過温度に対して耐性があります。過度の内部温度は、過度の外気温度または過度の自己発熱によって引き起こされる場合があります。自己発熱は、過度の順方向電流または過度の熱抵抗によって引き起こされます (外部ヒートシンクとの熱接触が悪い場合、など)。

熱過大ストレスによるボンドワイヤ故障

Luxeon パッケージは -40°C から 120°C までの範囲で 1000 回を超える非動作温度に絶えることができます。この温度範囲は、自己発熱を引き起こす -40°C から 85°C の自動作動温度とほぼ同じです。ただし、温度偏移が高い低い場合には、突発故障がよりすばやく発生する場合があります。熱過大ストレスによる故障の最も一般的な種類は、金製ワイヤの破損です。温度偏移の大きさによって故障までのサイクル数は増加しますが、ワイヤの破損は、LED の通常の磨耗メカニズムです。

ワイヤ故障はほとんど起こりませんが、熱過大ストレスによるボンドワイヤ故障の最も一般的な種類はステッチ ボンドの破損です。この破損では、ステッチのすぐ上にあるワイヤが破損します。

熱過大ストレスによる非積層

過度の温度は LED ダイとカプセルの間で非積層 (これによりチップおよびシリコン間に空間ができる) を引き起こす場合があります。図 18 に、LED ダイおよび特許取得のシリコン カプセル間の非積層の図を示します。一般的に、この問題によって突発故障が起こることはありませんが、発行出力が永久に低下する場合があります。白色 Luxeon では、非積層はリン コーティングと特許取得のシリコン カプセルの間または InGaN ダイとリン コーティングの間で起こります。

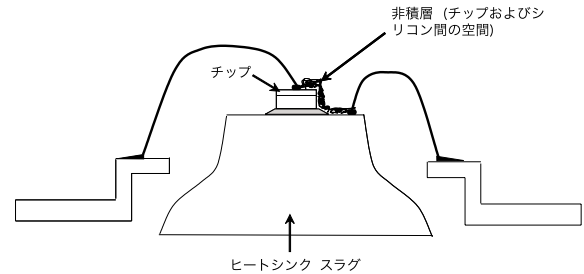


図 18. LED ダイとカプセル間の非積層。

レンズの黄化

過度の外気温度にさらされると、特に長時間、湿度の高い場所に置かれると、レンズが黄化する場合があります。これにより、LED ダイの発光出力が影響を受けることはありませんが、Luxeon レンズの吸着により Luxeon パッケージの発光出力が劣化します。

内部ハンダ付けの剥離

AllnGaP

過度の内部温度にさらされると、AllnGaP ダイをヒートシンク スラグに接合するのに使用したハンダのリフローが起こる場合があります。図 19 に、AllnGaP ダイとヒートシンク スラグ間での通常のハンダダイ結合の図を示します。このハンダの溶解温度は、最大接合部温度制限よりずっと高くなっています。ただし、接合部温度が溶解温度を超えると、Luxeon は突発的に開回路不良を起こします。図 19 に、熱過大ストレスによって発生したハンダ ダイ結合のリフローが原因で持ち上がった AllnGaP ダイの図を示します。

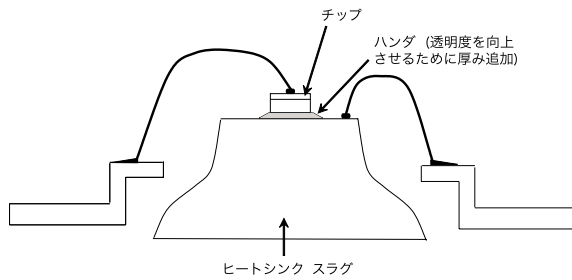


図 19a.通常のハンダ ダイ結合。

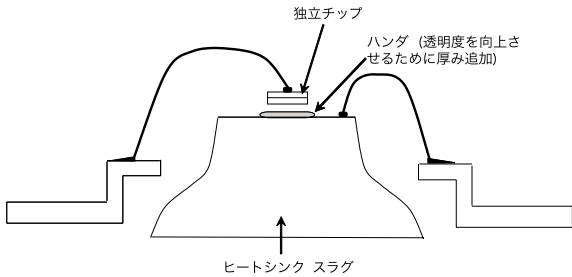


図 19b. ハンダ ダイ結合のリフローにより持ち上がった AllInGaP ダイ。

InGaN

InGaN Luxeon は、シリコン補助実装チップに InGaN ダイを取付けるのに小さな冗長するハンダ隆起を使用します。このハンダの溶解温度は、最大接合部温度制限よりずっと高くなっています。ただし、接合部温度が溶解温度を超えると、InGaN ダイは、連続するツェナーから電氣的に切り離されたり、隣接するハンダ接続間で短絡が発生する場合があります。図 20a に、InGaN ダイおよびシリコン補助実装チップ間の通常のハンダ隆起の図を示します。冗長する陽極および陰極接続があることに注意してください。図 20b および 20c は、過度の熱過大ストレスによって発生したハンダ接続のリフローが原因で起こるシリコン補助実装チップ上の変形したハンダ隆起を示しています。

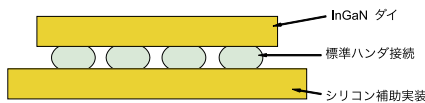


図 20a. 通常のハンダ接続。

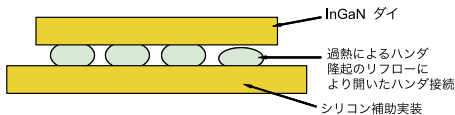
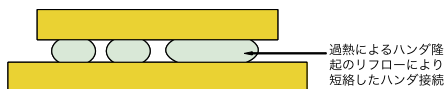


図 20a および 20c. 過度の熱過大ストレスによるリフローが原因で起こるシリコン補助実装チップ上の変形したハンダ接続。



短絡したハンダ接続

組み立て関連の故障

Luxeon は、エミッター形式だけでなく、Luxeon Star、Luxeon Line、Luxeon Ring、または Luxeon Flood などのメタル コアプリント基板 (MCPCB) 上での事前組立形式でも入手いただけます。Luxeon エミッターを購入し、それを組み立てレベル 2 と呼ばれるお客様自身の MCPCB に組み立てる場合、Lumileds 社アプリケーション ブリーフ AB10『Luxeon Emitter Assembly Information』に記載された推奨組み立て手順に従って仕上げた Luxeon 製品の信頼性はお客様に依存します。適切な量のヒートシンク接着剤の塗布、パッケージ リードのハンダ付け中の Luxeon ヒートシンク スラグの発熱の最小化、およびヒートシンク スラグが回路接地などの電氣的にアクティブなコンポーネントから電気絶縁されていることの確認などには、特に注意が必要です。

ヒートシンク接着剤故障

推奨作動接合部温度範囲内の Luxeon の動作は、一貫した内部自己発熱に頼っていますが、同時に、内部消費電力と、接合部から外気までの熱抵抗経路によっても決定されます。組み立て時、ヒートシンク スラグは、伝熱性の接着剤でメタル コアプリント基板 (MCPCB) に電気/熱接続されます。ヒートシンクの接着剤がヒートシンク スラグ領域を完全に覆わなかったり、厚すぎたり、またはヒートシンク スラグとヒートシンクの接着剤層の間に空間がある場合には、ヒートシンク スラグの接着剤の最終的な熱抵抗に悪影響を与えます。そのため、適切な量のヒートシンク接着剤 (AB10 に概説) を塗布し、一定の力 (AB10 に概説) を付加して、接着剤を適切な厚みになるよう押し付けることが重要です。塗布される接着剤の量が不十分であったり、エミッターがずれていると、接着剤がヒートシンク スラグの全表面を覆わない場合があります。熱抵抗を増加させる可能性があります。接着剤が多すぎると、非常に暑い接着剤層ができ、これも熱抵抗に悪影響を与える可能性があります。Luxeon エミッターを硬化していないヒートシンク接着剤に押しつける力 (AB10 に概説) が不十分だと、ヒートシンク スラグの下に薄い空気層ができ、熱抵抗を大幅に増加させます。

ヒートシンク接着剤の不適切な使用は、表面の熱抵抗を引き起こし、 $1^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 以下から $100^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 以上にまで表面の熱抵抗を大幅に増加させる可能性があります。こうした熱抵抗の大幅な増加は、ボンド ワイヤ、非積層、レンズの黄化、内部ハンダ接続のリフローといった前述の熱過大ストレス故障を引き起こす場合があります。

前述したように、Luxeon エミッターは、適切な量と厚みのヒートシンク接着剤で MCPCB に取付けることが重要です。お客様の Luxeon レベル 2 組み立てプロセスの一貫性は、様々な種類のプロセス時品質テストにて監視できます。MCPCB に取付けられていない Luxeon は、取付けられていないユニットは加えられた力で移動するため、接着剤が硬化した後で小さな力を Luxeon パッケージに与えることで特定できます。ヒートシンク接着剤の厚みとヒートシンク接着剤層の空洞の有無は、MCPCB に取付けられた Luxeon ユニットの断面図で測定できます。熱分析システムを使用して、接合部から外気への熱抵抗を測定するのが最良の方法です。

過度のハンダ温度

レベル 2 組み立て時、Luxeon のリードは、ハンダ ペーストとハンダ溶剤の塗布およびホットバー ハンダ付けツールを使用して MCPCB に接続されます。Luxeon エミッターはリフローをハンダ付けできる設計にはなっていません。Lumileds 社のアプリケーション ブリーフ AB10『Luxeon Emitter Assembly Information』に記載された推奨組み立て手順に準拠することが大切です。過度のハンダ温度や等温放置時間により、シリコン カプセルの深刻な膨張が起こり、Luxeon パッケージからはみ出して、気泡、非積層を引き起こしたり、深刻な場合には内部ハンダ接続のリフロー、ステッチ ボンド故障、または MCPCB の損層を引き起こす場合があります。

ワイヤを Luxeon Star、Line、Ring、または Flood の MCPCB にハンダ付けする場合、Luxeon エミッター リードに直接ではなく、ハンダ パッドにワイヤをハンダ付けし、MCPCB を 50°C に予熱してからハンダ付けすることをお勧めします。

Luxeon ヒートシンク スラグとメタルコアプリント基板間の絶縁不良 (MCPCB)

Luxeon ヒートシンク スラグは、LED ダイに電気接続されます。ヒートシンク スラグを接地に不注意に接続すると、経路切断が発生し、電気過大ストレス故障を引き起こす場合があります。AB10 に記載されているように、MCPCB は、アルミニウムコア、薄いエポキシ樹脂絶縁体、および薄い銅の層で構成されています。そして、この銅の層は、銅線に焼き付けられ、ハンダレジスト層が MCPCB の部位を覆っています。エポキシ絶縁体は、過度のハンダ温度や機械的損傷によって損傷していなければ、2000 V に絶縁することができます。そのため、MCPCB の設計では、熱抵抗を過度に妥協させずに、エポキシ絶縁体層でヒートシンク スラグの下にある銅の層を適切に電気絶縁することが重要です。

エポキシ絶縁体層は、MCPCB 成型を簡素化することで損傷を受ける場合があります。うまく行かなくなる一例として、ある Lumileds 社の「Luxeon 内部評価 MCPCB」では、銅の層/銅線を介して切断したところ、MCPCB が分断されてしまいました。ここでは、切断ツールによって薄い銅のバリができ、アルミニウム コア層との電気接触を起こしてしまいました。予期されることですが、こうした銅のバリは接地されたヒートシンクの短絡を引き起こし、特徴的な電気過大ストレス故障を引き起こしました。この問題は、上部に銅の層がないセクションを介して MCPCB を切断する (切断位置付近の銅の層を焼き切る、など) か、組み立て前に銅のバリを注意して取り除く (金属バリを弧状に落とす絶縁抵抗 テストを使用する、など) ことで回避できずです。

まとめ

Luxeon Power Light Source の信頼性は非常に高いですが、デバイスの最大定格に準拠する必要があります。現実には、製品の全体的な信頼性は、ユーザーの駆動環境によって異なります。Luxeon エミッターを購入し、ご自身で組み立てるお客様は、AB10 に記載された推奨組み立て手順に準拠することも重要です。最良の結果を得るためには、熱伝達経路の適切な制御、電気過大ストレス条件からの保護、Luxeon エミッターが

MCPCB/ヒートシンクに適切に取付けられていることの確認を行う必要があります。

Luxeon 光源の信頼性は、一般的なフィラメント光源と異なります。フィラメント光源は通常、定格寿命と呼ばれる一定の作動時間後に磨耗します。Luxeon 光源の場合、接合部温度と最大駆動電流が製品の最大定格以内であれば、Luxeon の信頼性は、MTTF 式によって定義される低い任意故障率に区分されます。1998 年以来、Luxeon は 1,000,000 個の信号機ヘッドに設置されており、ヘッドごとに 12 から 18 個の Luxeon エミッターが使用されています。信号機に設置された Luxeons の数および返品数に基づき、更なるデータが整うまで、80°C の接合部温度で 1 億デバイス時間の MTTF を使用することをお勧めします。

LED は、作動中、永久的に徐々に発光出力が低下します。この現象は、発光出力の劣化、つまりルーメン維持と呼ばれ、LED パッケージ内部での LED ダイの光生成効率の低下または光学経路の光伝達の低下によって引き起こされます。通常、ルーメン維持の変化は、最初の数百時間の作動時間中が高く、その後は低下します。ほとんどの場合、LED ダイのルーメン維持は、おおよそ時間の対数に応じて異なります。一般的に、Luxeon I の場合 350 mA、Luxeon III の場合 700 mA の DC 駆動電流で Luxeon を駆動し、接合部温度が 90°C 以下に保たれていれば、Luxeon は 50,000 時間経過後に平均して 70% のルーメン維持を提供することが予想されます。また、Luxeon III の場合、1000 mA で駆動され、接合部温度が 90 度以下に保たれている場合、20,000 時間経過後に平均して 50% のルーメン維持とすることが予想されます。ルーメン維持は、駆動電流の機能であり、駆動電流が高くなると光の劣化率も高くなります。ルーメン維持は、接合部温度が高くなった場合も悪化します。最大定格を超えた接合部温度で動作すると、レンズの黄化やパッケージ内での非積層を引き起こし、発光出力を永久的に低下させる場合があります。

付録 A システム故障率の例

個別 LED の予測故障率の例

信号機のヘッドに設置された Luxeons の数に基づき、MTTF は 80°C の接合部温度の場合、約 1 億デバイス時間になると期待されます。以下の例では、信号機ヘッドの信頼性結果から予測される、1 億デバイス時間の MTTF 期待値を使用した Luxeon システムの期待される信頼性を示しています。

たとえば、MTTF が 100,000,000 時間であるときの 10,000 時間経過後の動作可能性はどれほどでしょうか。(この場合、故障率は $1/100,000,000 = 0.001\%/1,000$ 時間)。

$$R(t) = \exp[-\lambda t]$$

ここで、

$R(t)$ = ユニットが t 時に動作している可能性

λ = 故障率 = $1/\text{MTTF}$

t = 時間コンポーネントがオンである

$$\begin{aligned} R(t) &= \exp\left[-\left(\frac{10,000}{100,000,000}\right)\right] \\ &= \exp[-0.0001] \\ &= 99.99\% \end{aligned}$$

反対に、故障の可能性は次のようになります。

$$\begin{aligned} P(t) &= 1 - R(t) \\ &= 1 - 0.9999 \\ &= 0.01\%, \text{ または } 100 \text{ ppm} \end{aligned}$$

LED アレイに対する予測故障率の例

たとえば、システムが 10 個の同じコンポーネントを使用している場合、10,000 時間経過後にコンポーネントの故障がないときの動作可能性はどれほどでしょうか。また、コンポーネントの MTTF が 100,000,000 時間である場合はどうでしょうか。

n 個の同じコンポーネントで構成されるシステムの場合、システムの信頼性は次のようになります。

$$R(t) = \exp[-\lambda nt]$$

$$\begin{aligned} R(t) &= \exp\left[-\left(\frac{(10)(10,000)}{100,000,000}\right)\right] \\ &= \exp[-0.001] \\ &= 99.90\% \end{aligned}$$

反対に、故障の可能性は次のようになります。

$$\begin{aligned} P(t) &= 1 - R(t) \\ &= 1 - 0.9990 \\ &= 0.10\%, \text{ または } 1000 \text{ ppm} \end{aligned}$$

前出の例より、10 個の同じコンポーネントが、100,000,000 時間に相当する単一コンポーネントの MTTF を持つ、10,000 時間稼動しているシステムで使用されていると仮定します。また、1 つの故障は、システム故障を引き起こさずに対処できると仮定します。このとき、複数のコンポーネントの故障発生可能性はどれくらいでしょうか。

この問題は 2 項分布の式にも当てはまります。通常、試行ごとの故障可能性が P である場合、 n 回の試行中に x 回の故障が起きた場合の故障 P の可能性は次のとおりです。

$$P(n_x) = \frac{n!}{(n-x)!x!} p^x (1-p)^{n-x}$$

ここで、前出の式の p は次のとおりです。

$$\begin{aligned} p(t = 10,000 \text{ 時間}) &= 1 - R(t) \\ &= 1 - \exp[-\lambda t] \\ &= 1 - \exp\left[-\left(\frac{10,000}{100,000,000}\right)\right] \\ &= 0.000100 \end{aligned}$$

そのため、10,000 時間経過後に故障がでない可能性は次のとおりです。

$$\begin{aligned} P(10_0) &= \frac{(10!)}{(10!)(0!)} (0.0001)^0 (1 - 0.0001)^{10} \\ &= (0.9999)^{10} \\ &= 99.90\% \end{aligned}$$

また、10,000 時間経過後に故障が 1 つだけ発生する可能性は次のとおりです。

$$\begin{aligned} P(10_1) &= \frac{(10!)}{(9!)(1!)} (0.0001)^1 (0.9999)^9 \\ &= 10(0.0001)(0.9999)^9 \\ &= 0.10\%, \text{ または } 1000 \text{ ppm} \end{aligned}$$

また、10,000 時間経過後に故障が 2 つ発生する可能性は次のとおりです。

$$\begin{aligned} P(10_2) &= \frac{(10!)}{(8!)(2!)} (0.0001)^2 (0.9999)^8 \\ &= 45(0.0001)^2 (0.9999)^8 \\ &= 0.00004\%, \text{ または } 0.4 \text{ ppm} \end{aligned}$$

そのため、複数のコンポーネントの故障発生可能性は次のようになります。

$$\begin{aligned}
 P &= 1 - P(10_0) - P(10_1) \\
 &= 1 - 0.99900050 - 0.00099905 \\
 &= 0.00004\%, \text{ または } 0.4 \text{ ppm}
 \end{aligned}$$

よって、故障が複数のコンポーネントとして定義されている場合のシステムの信頼性は次のようになります。

$$\begin{aligned}
 R(t) &= 1 - P \\
 &= 1 - 0.0000004 \\
 &= 99.99996\%
 \end{aligned}$$

例のまとめ

実行時間 10,000 時間の場合

	エミッター		システム			
	単一 Luxeon	10 個のエミッターによる Luxeon アレイ	システム内 故障数 0	システム内 故障数 1	システム内 故障数 2	システム内 故障数 3 以上
故障発生可能性						
予想される MTTF 予測値 (1 億デバイス時間)	0.01% 100 ppm	99.90%	0.10% 1000 ppm	<0.0001% 0.4 ppm		

実行時間 50,000 時間の場合

	エミッター		システム			
	単一 Luxeon	10 個のエミッターによる Luxeon アレイ	システム内 故障数 0	システム内 故障数 1	システム内 故障数 2	システム内 故障数 3 以上
故障発生可能性						
予想される MTTF 予測値 (1 億デバイス時間)	0.05% 500 ppm	99.50%	0.50% 5000 ppm	0.001% 11 ppm	<0.0001% 0.02 ppm	

参考資料

1. N.Narendran, L. Deng, R.M. Pysar, Y. Gu, and H. Yu, 『Performance Characteristics of High-Flux Light-Emitting Diodes』, SPIE, サンディエゴ 2003。
2. 『Applied Reliability』 第 2 版, Paul Tobias および David Trindade, Kluwer Academic Publishers, 1995, pp 63-70
3. 『Handbook of Reliability Engineering and Management』 第 2 版, Grant Ireson, Clyde Coombs, Jr. および Richard Moss, Mcgraw-Hill, 1996, pp 16.14 – 16.17

企業概要

Lumileds 社は発光ダイオード (LED) を世界中に供給しており、年間に数十億個もの LED を製造しています。Lumileds 社は 3 つのベースカラー (赤、緑、青) および白の基本的な LED 材料を製造している LED の総合メーカーです。Lumileds 社は、カリフォルニア州サンノゼおよびオランダのベストに研究開発センターを持っています。製造工場はカリフォルニア州サンノゼおよびマレーシアにあります。

Lumileds 社は、高光束 LED 技術を開拓しており、固体 LED 技術と照明分野の橋渡しをしています。Lumileds 社は、最も優れた、最も高輝度な LED の技術開発に専心しており、照明分野に新しい用途と新しい市場をもたらしています。

Lumileds 社は、同社製品の性能その他の特性に影響を与える工程および材料を変更する場合があります。かかる変更の後に納入される製品は、引き続き、公表されている仕様諸元を満たしますが、サンプルまたは変更前のご注文により納入される製品と異なる場合があります。

WWW.LUXEON.COM
WWW.LUMILEDS.COM

テクニカルサポートおよび最寄りの LUMILEDS の販売店の所在地については下記にお問い合わせください。

各国共通: +1 408.435.6044
米国フリーダイヤル: 877.298.9455
ヨーロッパ: +31 499.339.439
アジア: +65 6248.4759
日本: +81 426.60.8532
ファックス: +1 408.435.6855
電子メールアドレス: INFO@LUMILEDS.COM