

フォトカブラにおける高信頼な LED の 寿命計算

はじめに

フォトカブラは高電圧の分離、および電氣的ノイズの除去に用いられます。これは、電気システム内部の電圧が異なる部分の間で正確な情報を送信する上で重要な要件です。このようなシステムは高い信頼性を維持し、かつ長年の運用に耐える必要があります。これは産業、医療、再生可能エネルギー、さらには長い耐用年数を必要とするあらゆる分野のシステムに共通の必須条件です。

Broadcom® のフォトカブラは、クリティカルなシステムの信頼性要件を満たすため、高信頼性 LED を使用しています。LED 技術は 40 年以上の実績を経て成熟し、Broadcom は LED の性能向上および改善のため、一貫して製造プロセスの改良を続けてきました。Broadcom のフォトカブラは産業、再生可能エネルギー、自動車などに最適だけでなく、非常に高い信頼性を求められる用途、たとえば航空宇宙、ミリタリ用途などでも広く採用されています。

過酷な用途での使用実績にもかかわらず、フォトカブラの動作寿命にはいまだに懸念があります。しかし、これは安価な低品質フォトトランジスタについての話で、フォト IC 出力採用の高性能フォトカブラはこれには該当しません。本ホワイト・ペーパーでは、フォトカブラの業界リーダーである Broadcom が、ブラック・モデル（エレクトロマイグレーションに関連した配線の平均故障時間（MTTF）の予測のため J.R Black が提唱した広く認められている経験モデル^[1]）に基づく加速寿命環境で得られた LED 信頼性ストレス・データをどのように用いて寿命性能を予測しているかについて説明します。この解析は、設計者に確証と設計の柔軟性を与え、用途に最も適した順方向の LED 入力電流を選択することができるようになります。

LED 信頼性ストレス試験

フォトカブラは、LED を用いて分離バリア（または絶縁バリア）を越えてデジタルまたはアナログ情報の伝送を行います。バリアの反対側には光検出器が設置され、光信号を電気信号に変換します。推奨される LED への入力電流（ I_F ）は入力電流制限抵抗により設定されます。ただし、LED の PN 接合の熱ストレスおよび電氣的ストレスにより、LED の量子効率（入力電流の電子あたりの総光子数）は時間と共に減少します^[2]。LED の信頼性を確認するため、Broadcom は数千時間にもおよび連続動作ストレス試験を実施しています。125 °C、20mA の連続 I_F で動作する LED を用いて高温動作寿命（HTOL）試験を実施しました。

フォトカブラの電氣的パラメータの一つに電流伝達率（CTR）があります。CTR はパーセント値で与えられ、フォトダイオードにより検出される光に起因する出力コレクタ電流（ I_C ）と、LED の順方向の入力電流（ I_F ）の比率として定義されます。設計者は CTR の経時変化を LED の信頼性の指標として用いることができます。

電流伝達率 $CTR = (I_C / I_F) \times 100\%$

入力電流と温度のため、LED の結晶構造内には熱ストレスが生じます。そのため、 I_F が一定でも LED の光出力は時間と共に減少します。すなわち、フォトカブラの IC および CTR は減少します。ストレス試験時間にあらかじめ設定された各点（168 時間、500 時間、1000 時間、...）において IC が測定され、CTR の計算が行われます。収集されたデータ点に基づいて、LED の寿命性能をプロットすることができます。

加速係数

ブラック・モデルに基づく加速係数 (AF) を用いることにより、高温ストレス時間で取得された HTOL 試験データ点から、実際の使用動作条件での予測寿命が求められます。

式 1 :

$$AF = \left(\frac{J_{acc}}{J_{norm}} \right)^N \exp \left(\frac{E_a}{K} \left\{ \frac{1}{T_{norm}} - \frac{1}{T_{acc}} \right\} \right)$$

AF	=	加速係数
J_{acc}	=	加速された電流密度 (HTOL ストレス入力電流)
J_{norm}	=	公称動作電流密度 (100% デューティ・サイクルにおけるアプリケーション動作入力電流)
E_a	=	活性化エネルギー 0.43eV
K	=	ボルツマン定数 $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
T_{norm}	=	公称動作温度 (アプリケーション動作温度)
T_{acc}	=	加速された動作温度 (HTOL ストレス温度)
N	=	モデル・パラメータ 2

同じ CTR の寿命性能に対し、使用環境における LED の寿命を予測することができます。

式 2 :

使用環境における LED の予測動作時間 = AF × LED (ストレス下) 時間数

係数 AF を乗数として適用するには、Broadcom フォトカブラのストレス・データ条件の数値の例を考慮してください：

$I_F = 20 \text{ mA}$ 、温度 = 125°C 、LED タイプ AA とします。ストレス試験期間 1000 時間における CTR は、計算により 99.2% と求められます。フォトカブラが使用条件 $I_F = 5 \text{ mA}$ (100% デューティ・サイクルでの運用を仮定)、周辺温度 60°C で使用されると仮定すると、AF は次のように計算されます。

$$AF = \left(\frac{20 \text{ mA}}{5 \text{ mA}} \right)^2 \exp \left(\frac{0.43}{8.62 \times 10^{-5}} \left\{ \frac{1}{273 + 60} - \frac{1}{273 + 125} \right\} \right) \approx 184.7$$

使用環境での LED の寿命 = AF × ストレス時間数 = $184.7 \times 1,000 = 184,767$ 時間 (21 年) と、予測されます。AF の値が計算されたのち、ストレス時間のすべてのデータ点は、使用環境での予想寿命グラフにプロットされます。

Broadcom のフォトカブラで用いられている LED は、アルミ・ガリウム砒素 (AlGaAs) またはガリウム砒素リン (GaAsP) から製造されています。Broadcom フォトカブラ製品ファミリを LED のタイプ別に表 1 ~ 表 5 にまとめ、型名を記します。

LED は、いずれのタイプも同様の特性を有し、標準的な使用環境で 30 年後の CTR 損失は 10% 未満です。

表 1 : Broadcom フォトカブラ - AlGaAs (タイプ 1) LED

製品ファミリ	Broadcom フォトカブラの型名
10 MBD LOGIC	ACNV2601, ACNW261L, ACPL-C61L

表 1：Broadcom フォトカブラ - AlGaAs（タイプ 1）LED

製品ファミリ	Broadcom フォトカブラの型名
5 MBD LOGIC	ACPL-M21K/024L/W21L/K24L, HCNW2211
1 MBD TRANSISTOR	ACPL-M50L/054L/W50L/K54L
100 KBD DARLINGTON	HCNW138
ANALOG	HCNR200/201, HCNW4562
ISOLATION AMPLIFIER	ACPL-796J/C784/785J, ACPL-7900/7970/C797/C790, HCPL-7840/7860
GATE DRIVER	ACPL-352J/337J/339J, ACPL-331J/332J, ACNW3190, HCPL-316J/314J
IPM DRIVER	ACNV4506, ACPL-P484/W484, HCNW4503/4506

表 2：Broadcom フォトカブラ - AlGaAs（タイプ 2）LED

製品ファミリ	Broadcom フォトカブラの型名
10 MBD LOGIC	ACPL-M61L/064L/W61L/K64L
8 MBD LOGIC	HCPL-0300/2300
100 KBD DARLINGTON	HCPL-070A/4701
ANALOG	ACPL-K376, HCPL-4562
HERMETIC	ACPL-5160, HCPL-5200/5400/7850

表 3：Broadcom フォトカブラ - AlGaAs（タイプ 3）LED

製品ファミリ	Broadcom フォトカブラの型名
AUTOMOTIVE	ACFL-5211T/6211T, ACPL-M49T/M71T, ACPL-344JT/K30T, ACPL-C87BT
1MBD TRANSISTOR	ACFL-5211U
10MBD LOGIC	ACFL-6211U/6212U

表 4：Broadcom フォトカブラ - GaAsP LED

製品ファミリ	Broadcom フォトカブラの型名
HIGH SPEED CMOS	HCPL-0708/0738
15 MBD CMOS	ACPL-071L/074L
10 MBD LOGIC	HCPL-2611/2630/M611
5 MBD LOGIC	HCPL-0201/2231
1 MBD TRANSISTOR	HCPL-050L/053L, HCPL-250L/253L
100 KBD DARLINGTON	HCPL-070L/073L, HCPL-270L/273L/M700
GATE DRIVER	ACPL-3130/W302/P314/H312, HCPL-3120
IPM DRIVER	ACPL-4800/P480/W454, HCPL-0453/0454/4504/ M456
HERMETIC	ACPL-5600L/6750L, HCPL-5300/5500

表 5：Broadcom フォトカプラ - AlGaAs/Ge LED

製品ファミリ	Broadcom フォトカプラの型名
10 MBD LOGIC	ACNT-H61L
1 MBD TRANSISTOR	ACNT-H50L, ACNT-H511
GATE DRIVER	ACNT-H313, ACNW3430/3410, ACNU-3430/3410

図 1～図 5 は、各 LED タイプに対する 30 年以上にわたる使用環境での運用を通した寿命性能を示します。CTR の低下は 10% 未満となっています。予測計算により、技術者はシステムの予測寿命および用途に応じて適切な I_F 値を柔軟に選択することができます。動作寿命の信頼性と電力消費はトレードオフの関係にあります。ニーズに合わせてシステム設計を最適化することができます。

図 6 は、AlGaAs（タイプ 2）LED に異なる値の順方向 LED 入力電流（ I_F ）を印加した場合の LED 性能を示します。フォトカプラの 20 年以上の寿命期間を通じ、 I_F の推奨動作範囲の全域で、LED は 10% 未満という最小限の変化を示しています。LED の動作寿命を最大化する 3 つの要素は以下の通りです。

- LED の入力駆動電流 I_F を下げて運用する。
- 低いデューティ・サイクルで運用する。
- 低い周辺温度で運用する。

特筆すべき点として、Broadcom フォトカプラは数千年（数世紀）もの期間の CTR 低下が 10% という寿命性能が予測されています。図 7 に、100 年後までの寿命性能を示します。

図 1：AlGaAs（タイプ 1）LED の CTR 性能 - 使用環境
（動作 $I_F = 16\text{mA}$ 、デューティ・サイクル 50%、 $T_A = 80^\circ\text{C}$ ）

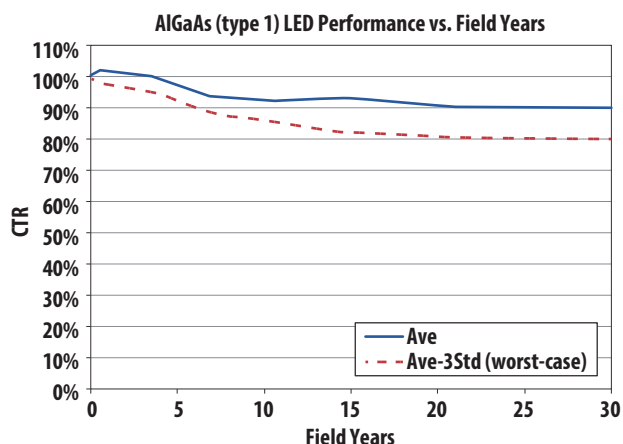


図 2：AlGaAs（タイプ 2）LED の CTR 性能 - 使用環境
（動作 $I_F = 5\text{mA}$ 、デューティ・サイクル 100%、 $T_A = 80^\circ\text{C}$ ）

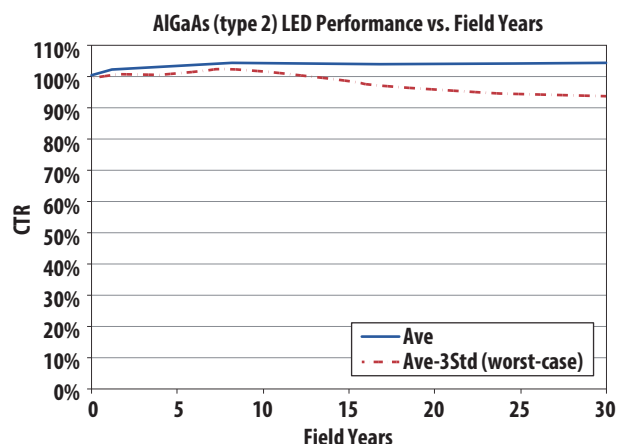


図 3： AlGaAs (タイプ 3) LED の CTR 性能 - 使用環境
(動作 $I_F = 12\text{mA}$ 、デューティ・サイクル 50%、 $T_A = 110^\circ\text{C}$)

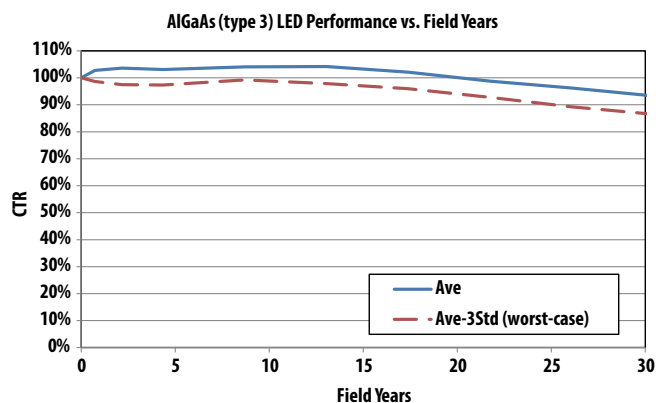


図 4： GaAsP LED の CTR 性能 - 使用環境
(動作 $I_F = 16\text{mA}$ 、デューティ・サイクル 50%、 $T_A = 80^\circ\text{C}$)

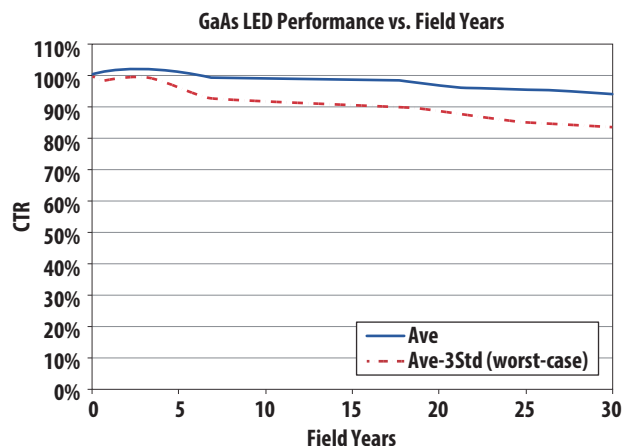


図 5： AlGaAs/Ge LED の CTR 性能 - 使用環境
(動作 $I_F = 12\text{mA}$ 、デューティ・サイクル 50%、 $T_A = 80^\circ\text{C}$)

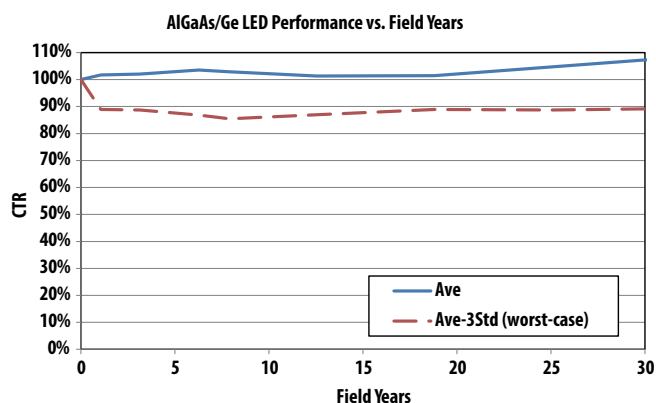


図 6： 異なる I_F における AlGaAs (タイプ 2) LED の CTR 性能
- 使用環境 (デューティ・サイクル 50%、 $T_A = 80^\circ\text{C}$)

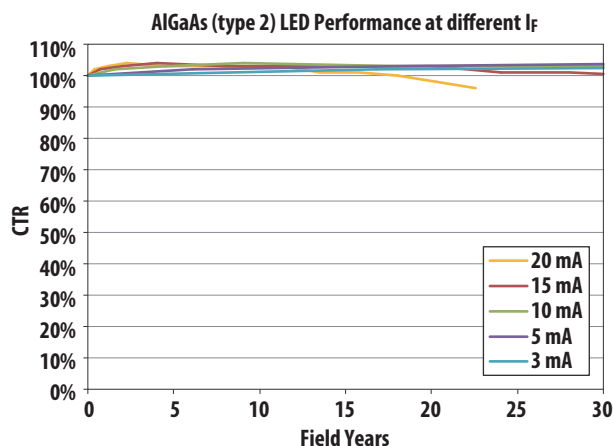
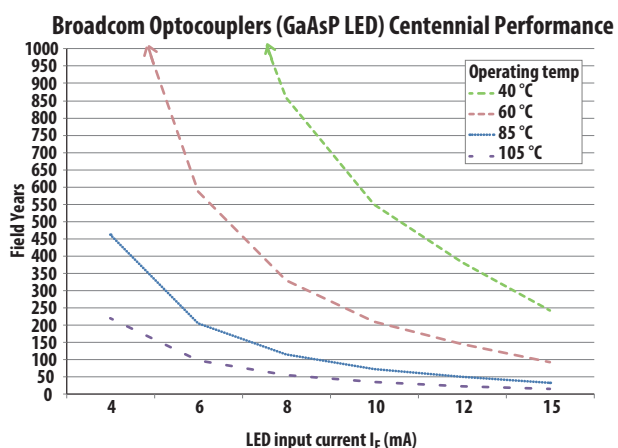


図 7： 100 年 後までの GaAsP LED 性能推移



注： ストレス試験の実データが 10,000 時間までしかないため、 $I_F = 20\text{mA}$ の条件の予測は 22.6 年で終了しています。これは使用環境での予測動作年数が 22.6 年で、このときに LED が故障することを意味しているわけではありません。使用環境での予測をさらに延ばすには、10,000 時間以上にわたる長期間のストレス・データ点を測定する必要があります。

まとめ

Broadcom のフォトカブラは、高電圧や過渡電流を扱う苛酷で厳しい応用分野で長年の運用実績を有します。フォトトランジスタを使用する廉価版製品とは対照的に、Broadcom のフォトカブラは卓越した信頼性性能（使用環境での 30 年間の運用における低下率 10% 未満）を誇ります。長寿命 LED のおかげで、実際の応用においてフォトカブラを選択する際の設計者の柔軟性が増します。設計者は、システムの運用寿命の信頼性と、低電力消費というトレードオフの関係の中から最適なレベルを見いだして、費用対効果を最大化させることができます。

参考資料

1. “Reliability Prediction Methods for Electronic Products”, Reliability EDGE volume 9, Issue 1, June 2008.
2. “CTR Degradation and Ageing Problem of Optocouplers”, Bajenescio, Electrotechnical Conference, 1994.

Broadcom、パルス・ロゴ、Connecting everything、Avago Technologies、Avago、および A ロゴは、アメリカ合衆国、他の国々および / または EU における Broadcom および / または関連会社の商標です。

Copyright © 2014-2018 Broadcom. All Rights Reserved.

用語「Broadcom」は、Broadcom Inc. および / またはその子会社を指します。詳細は、www.broadcom.com をご覧ください。

Broadcom は、信頼性、機能または設計を改善するために、本書の製品またはデータを通知なしに変更する権利を留保します。Broadcom によって提供される情報の正確さと信頼性には細心の注意を払っています。しかしながら、Broadcom は、この情報の適用または使用、あるいは本書に記載された製品または回路の適用または使用から生じるいかなる責任も負わず、特許権や他の権利によるいかなるライセンスも譲渡しません。