

ディスクリート半導体の基礎

第5章 光半導体

アイソレーター/ソリッドステートリレー(SSR)

2022年2月

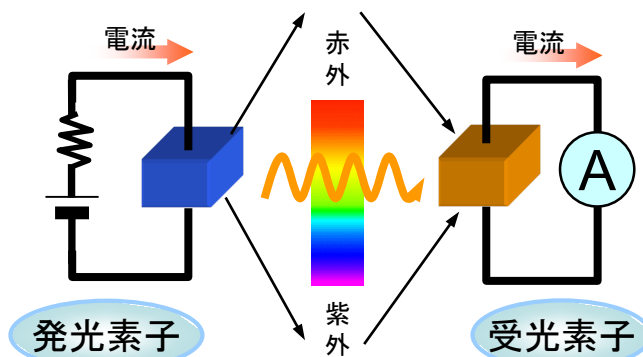
東芝デバイス&ストレージ株式会社

光半導体の種類

光半導体の種類には次のようなものがあります

- ① **発光素子** ……可視光LED、赤外LED、紫外LED、レーザダイオード
- ② **受光素子** ……光センサ、太陽電池、CMOSセンサ
- ③ **複合素子** (発光素子と受光素子の組合わせ) ……フォトカプラ、ファイバカプラ

電気を
光に
変換する
半導体



光を
電気に
変換する
半導体

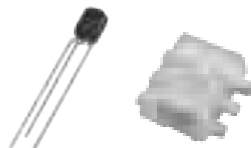
LED

紫～赤や白色など、人間の目に見える光を放射する発光素子。



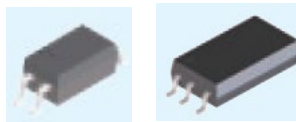
受光素子

フォトダイオード、受光ICなど。光の変化を電気信号として出力する製品群。



フォトカプラ

発光素子と受光素子をパッケージした複合素子。電氣的に絶縁したまま電気信号を伝達する製品。



ファイバカプラ

光ファイバを利用して通信を行うための電気⇄光変換を行う製品。



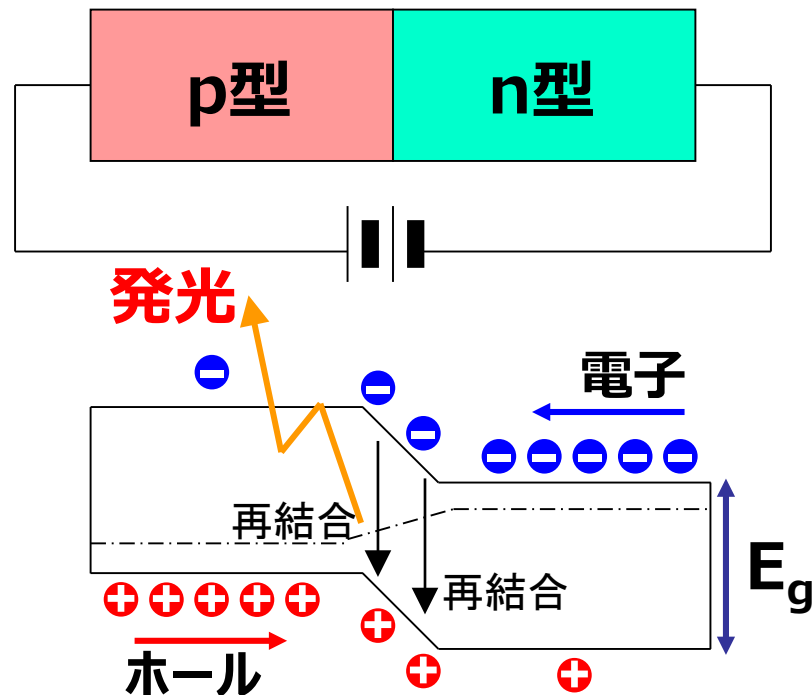
LEDの発光原理

LED (Light Emitting Diode) は、化合物半導体のpn接合に順方向電流を流すことにより発光します。

発光ダイオードに順電流を流すと、キャリア (電子とホール) が移動します。p型のホールがn型領域へ、n型の電子がp型領域へ移動します。この注入されたキャリアが再結合し、再結合前後のエネルギーの差が光として放出されます。

放出される光は、化合物半導体のエネルギーバンドギャップ (E_g) により異なります。

(備考:通常のSiダイオードは、再結合のエネルギーが熱に変わってしまう為、発光しません。)



LEDの発光波長

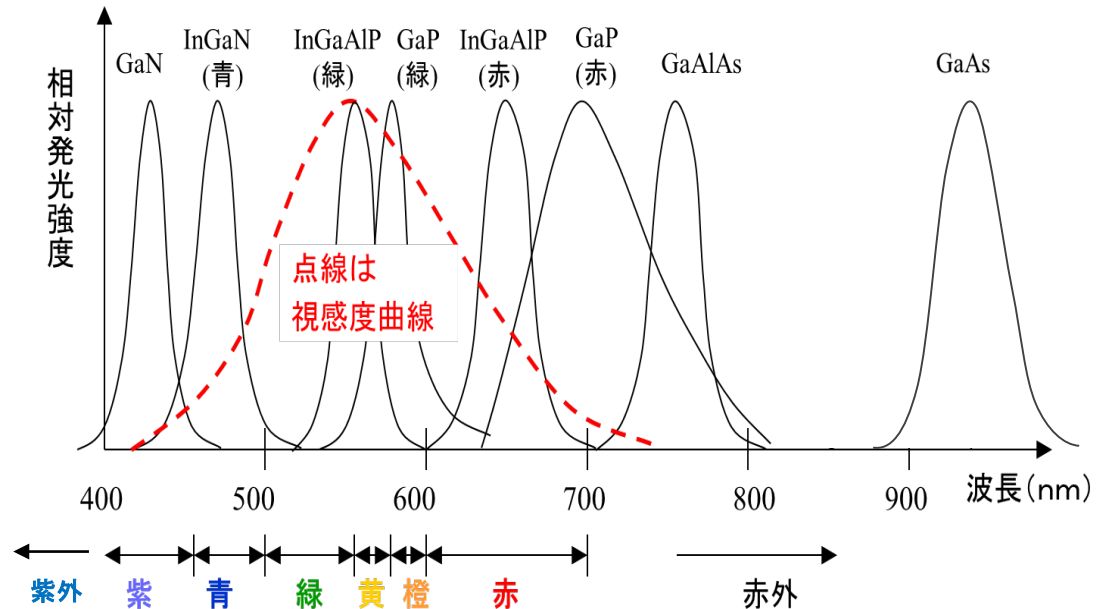
LEDは**紫外光～可視光～赤外光**とさまざまな波長で発光します。

この発光波長は、化合物半導体材料のエネルギーバンドギャップ(E_g)を用いて、次の式で表されます。

$$\lambda \text{ (nm)} = 1240/E_g \text{ (eV)}$$

E_g の大きな材料ほど短い波長、 E_g の小さな材料ほど長い波長の光を発光します。

テレビのリモコンなどで用いられる赤外LEDはGaAs(ガリウムヒ素)、赤色や緑色のインジケータ用LEDにはGaPやInGaAlPが、青色LEDにはInGaNやGaNが材料として使用されています。



材料	エネルギーバンドギャップ E_g @300K (eV)	発光波長(λ)	発光色
GaAs	1.4	885 nm	赤外
GaP	1.8 ~ 2.26	549 ~ 700nm	緑 ~ 赤
InGaAlP	1.9 ~ 2.3	539 ~ 653 nm	緑 ~ 赤
InGaN	2.1 ~ 3.2	388 ~ 590 nm	紫外 ~ 緑
GaN	3.4	365 nm	紫外 ~ 青

フォトカプラとは

フォトカプラとは、**発光素子 (LED)** と**受光素子を同一パッケージに内蔵**したデバイスです。

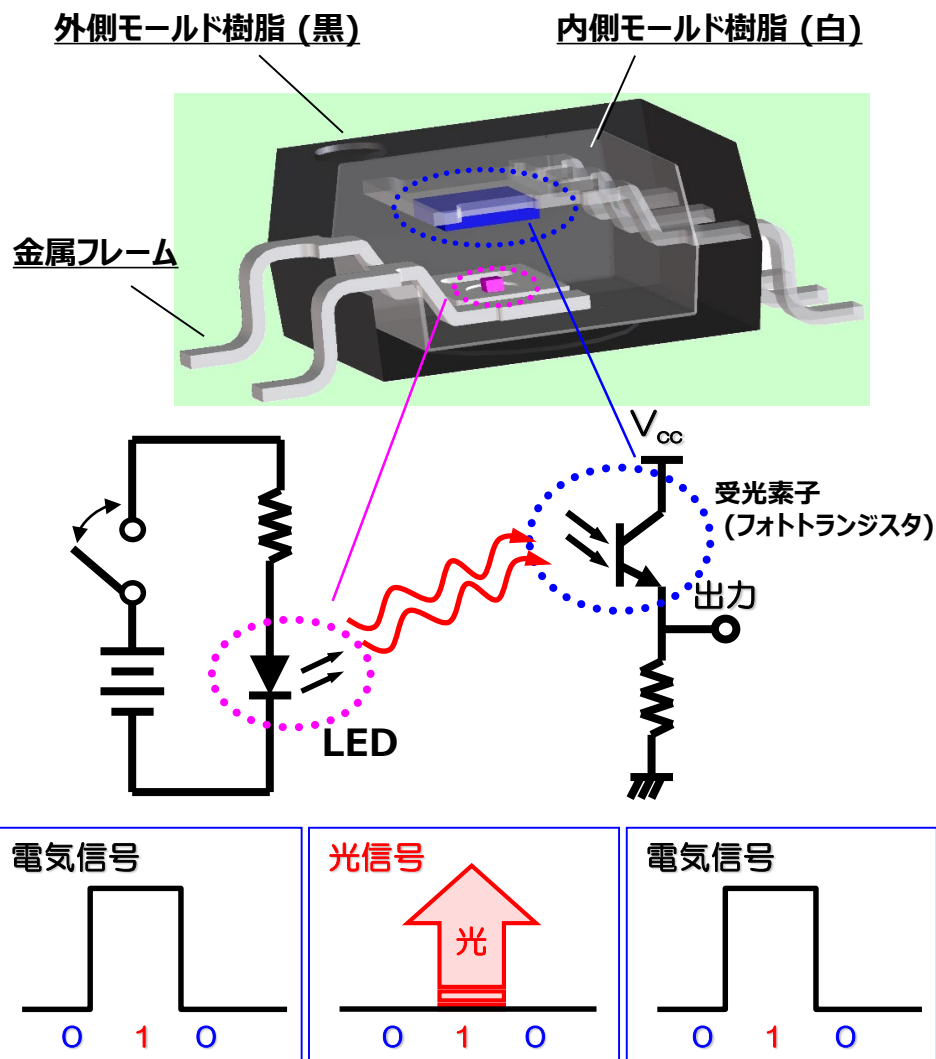
他の光半導体デバイスのように、光がデバイスの外に出る事はなく、見た目は普通の半導体と同じです。加えて、フォトカプラは光半導体でありながら、使用する際は光を取り扱うことはなく、電気信号のみを取り扱うデバイスです。

フォトカプラの動作例

- ①LEDをON ($0 \Rightarrow 1$)
- ②LED光がフォトランジスタへ入射
- ③フォトランジスタがON
- ④出力電圧は、 $0 \Rightarrow 1$

- ①LEDをOFF ($1 \Rightarrow 0$)
- ②フォトランジスタへのLED光切断
- ③フォトランジスタがOFF
- ④出力電圧は、 $1 \Rightarrow 0$

* 右のカット図は対向型ダブルモールド構造の
ランジスタ出力カプラです



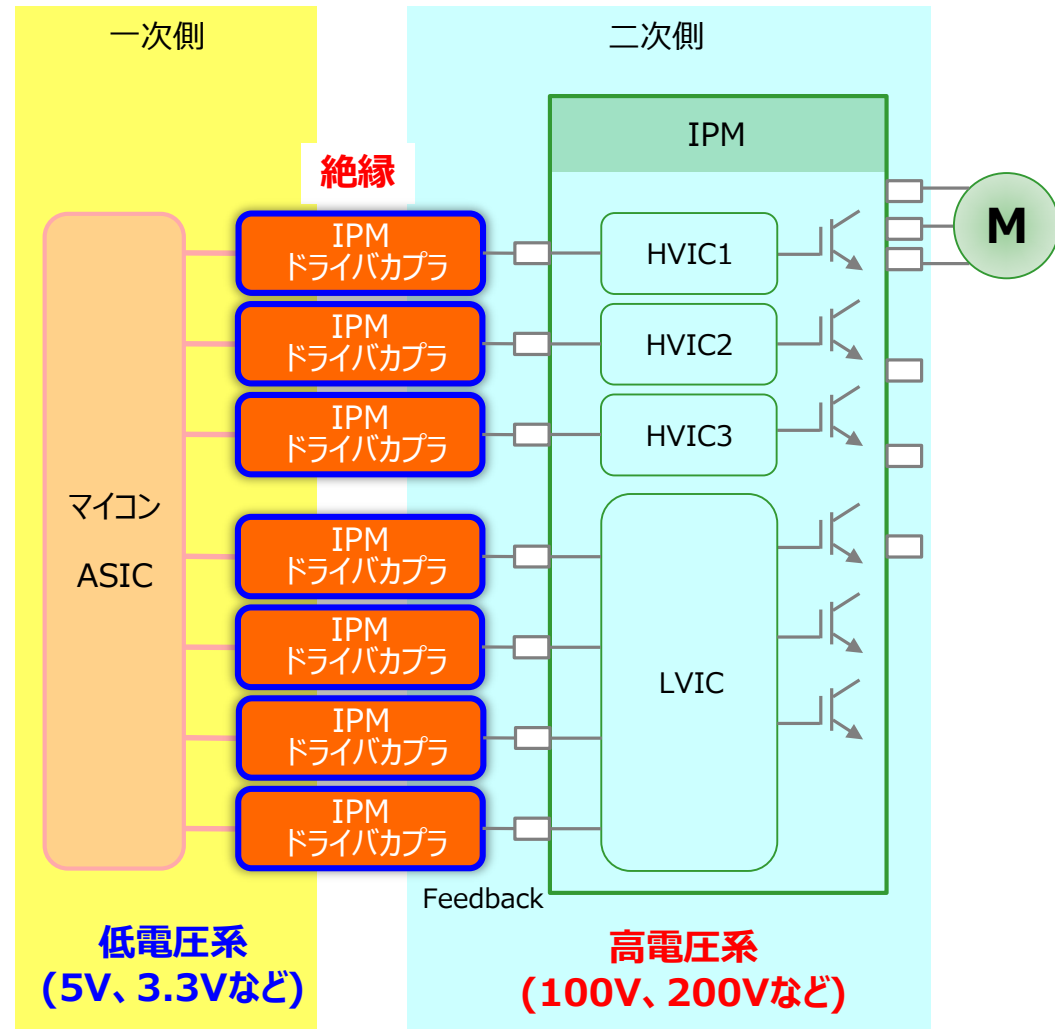
フォトカプラはなぜ必要か

インバータへの応用例

フォトカプラは、一次側(入力:LED)と二次側(出力:受光素子)が、電氣的に絶縁されているため、**一次側と二次側の電位が異なる(GNDレベルなども)場合でも**、一次側の電気信号を二次側に伝えることができます。

右図のインバータへの応用例ではマイコンなどの制御部は通常数Vの低電圧にて動作します。このマイコンからの信号を、カプラを介して200Vなどの高電圧で使用されるIPMやIGBTへ伝達することで、高電圧系の部品をマイコンから直接制御することが可能となります。

* フォトカプラは、目的に合わせた色々な出力形態の製品が用意されています。



フォトカプラの種類と機能

フォトカプラの入力側は全てLEDが使用されます。一方出力側（受光素子）にはさまざまなタイプがあります。

トランジスタ出力

フォトトランジスタが受光素子です。ダーリントンタイプもあります。

IC出力

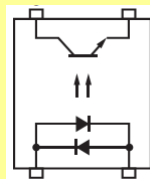
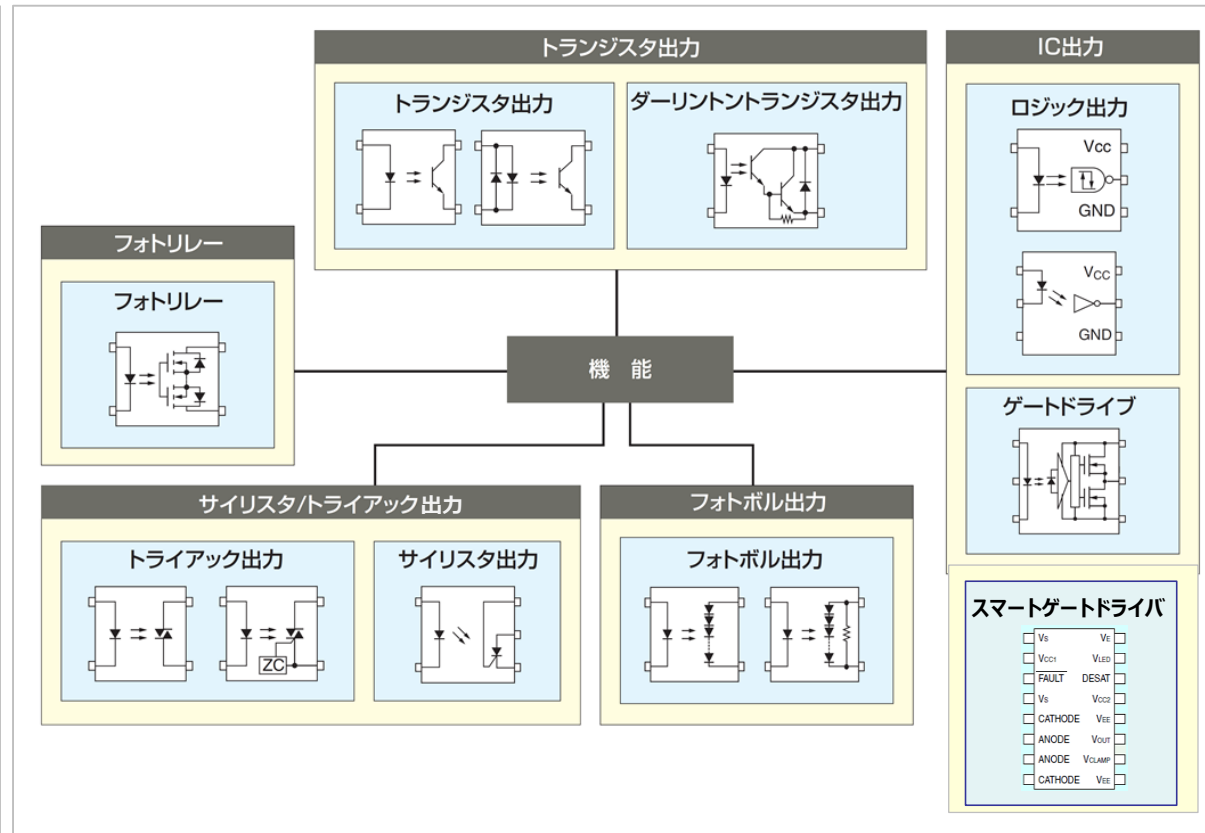
フォトダイオードを受光素子として、出力をロジックとした製品や、IGBTやMOSFETなどのゲートドライブ駆動用に大電流出力の製品や、アイソレーションアンプなどの高機能製品があります。

トライアック/サイリスタ出力

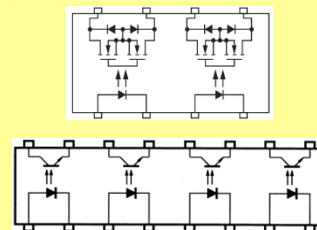
フォトサイリスタあるいはフォトライアックが出力です。主にACラインのオンオフ制御に用いられます。

フォトリレー（MOSFET出力）

出力にMOSFETを備え、リレースイッチとして使用できます。メカリレーよりも長寿命、高速応答などの点で優れています。



LEDを逆並列に接続し、AC入力に対応した製品もあります。



2回路や4回路を1パッケージ化した、多チャネル品もあります。

パッケージと安全規格

フォトプラは、安全規格に基づいたパッケージの形状や絶縁耐圧が要求されます。設計する場合には、下記項目を確認してご使用いただく必要があります。

沿面距離 (Creepage Distance)

絶縁物に沿った2つの導体間 (1次-2次間) の最短距離

空間距離 (Clearance)

2つの導体間の空間的な最短距離

絶縁物厚 (Insulation thickness)

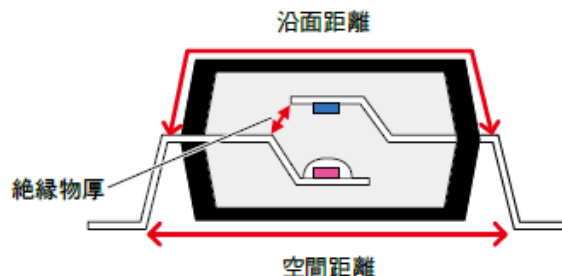
2つの導体間の絶縁物の最小距離

絶縁耐圧 (Isolation Voltage)

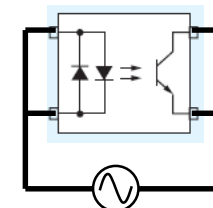
2つの導体間の絶縁電圧*

ULでは、交流1分間で絶縁が破壊されない電圧で規定しています

* 2,500 Vrms~5,000 Vrmsの製品が一般的



絶縁耐圧測定回路



AC/ 1分間



DIP4	DIP6	・汎用パッケージ
DIP8	DIP16	・面実装リードフォーミング対応可能
SDIP6		・沿面・空間距離 ≥ 7 mm、絶縁物厚 ≥ 0.4 mm ・面実装6ピン(リードピッチ = 1.27 mm)
SO6		・沿面・空間距離 ≥ 5 mm、絶縁物厚 ≥ 0.4 mm ・面実装(リードピッチ = 1.27 mm)・薄型
SO6L		・沿面空間距離 ≥ 8mm、絶縁物厚 ≥ 0.4mm
SO8		・面実装8ピン(リードピッチ = 1.27 mm)
SOP4	SO4	・面実装4ピン(リードピッチ = 1.27 mm)
SOP16	SO16	・面実装16ピン(リードピッチ = 1.27 mm)
SO16L		・沿面空間距離 ≥ 8mm、絶縁物厚 ≥ 0.4mm ・面実装16ピン(リードピッチ = 1.27mm)
MFSOP6		・面実装(リードピッチ = 1.27 mm)
2.54SOP4	2.54SOP6	
2.54SOP8		・面実装(リードピッチ = 2.54 mm)
SSOP4		・超小型・面実装(リードピッチ = 1.27 mm)
USOP4		・超小型・面実装(リードピッチ = 1.27 mm)
VSON4		・超小型・面実装 下面電極

フォトカプラの内部構造

フォトカプラには、要求される絶縁性能、パッケージサイズ、内部チップの大きさなどさまざまな制約があるため、**パッケージ内部構造に様々な種類があります。**

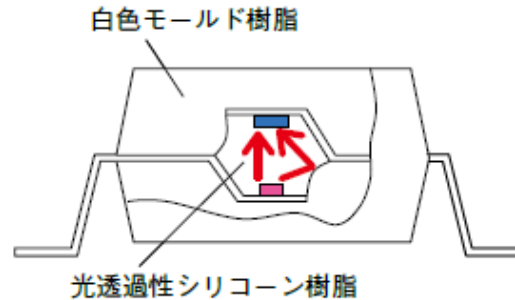
対向型シングルモールド：LEDを実装したフレームと受光素子を実装したフレームが向い合って (対向) モールドされます。

対向型シングルモールドフィルム入り：絶縁耐圧を上げるために、ポリイミド系のフィルムがLEDと受光素子間に挿入されています。

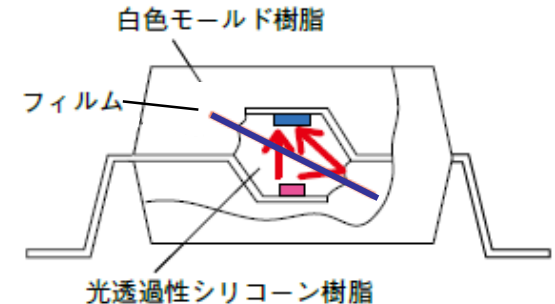
対向型ダブルモールド：対向型の構造で、内部が白モールド、外部が黒モールドされています。

反射型：LEDを実装したフレームと受光素子を実装したフレームが同一平面上にある構造です。LED光がシリコン系樹脂の内部で反射され、受光素子に届くことから、反射型と呼ばれます。

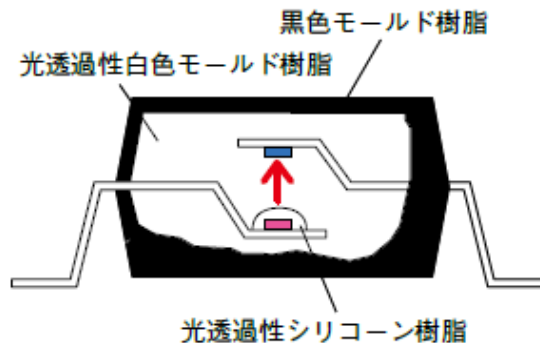
対向型シングルモールド



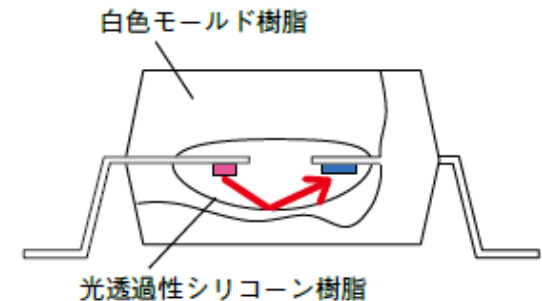
対向型シングルモールド
フィルム入り



対向型ダブルモールド



反射型



主な安全規格

フォトカプラを、感電からの人体保護など**安全確保のため「絶縁」**する手段として装置に搭載する場合、安全規格面でいろいろな**規制を受ける**ことがあります。

安全を確保するための規定、基準などが幅広く各種規格として標準化されています。

安全規格は設計・製造の立場から見ると、「セット規格」と「部品規格」に分類してとらえることができます。

装置を設計・製造する上で基本となるのは「**セット規格**」です。装置の種類、絶縁方式、そのクラス、動作電圧などによって内容が異なります。

また、フォトカプラ単体の入出力間の絶縁性能を測る試験方法と判定基準などが規定されているのが「**部品規格**」です。

主な安全規格

部品規格

UL 1577

絶縁耐圧 (1分間) に関する規定など
認定機関 = UL(米)

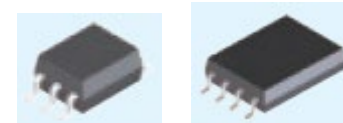
EN IEC 60747-5-5

最大許容動作絶縁電圧、最大許容過電圧、部分放電試験に関する規定など
認定機関 = VDE(独)、TUV(独) など

セット規格

EN IEC 62368-1

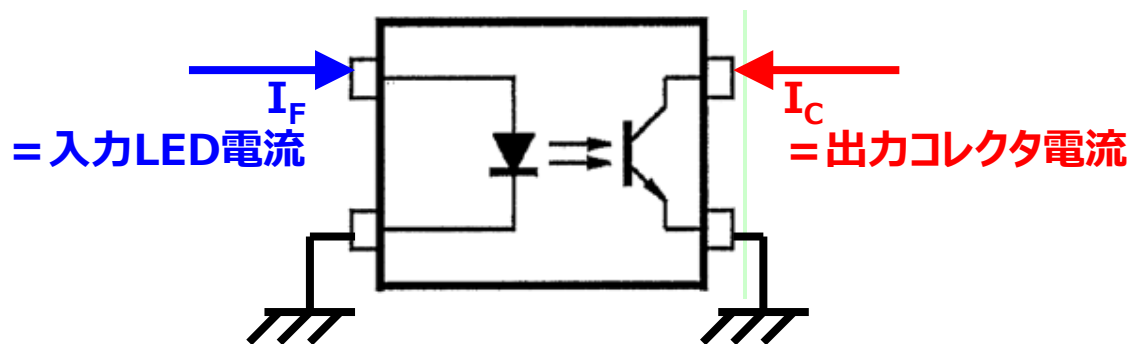
オーディオ/ビデオ、情報・通信技術機器規格
認定機関 = VDE(独)、SEMKO(スウェーデン) など



フォトカプラの特性 変換効率

トランジスタカプラの変換効率(CTR)は、トランジスタの h_{FE} と同じく、入力電流に対する出力電流の増幅率で表されます。

「変換効率」=「Current Transfer Ratio」=「CTR」
 =「 I_C / I_F 」=「出力(コレクタ)電流／入力電流×100」(%)



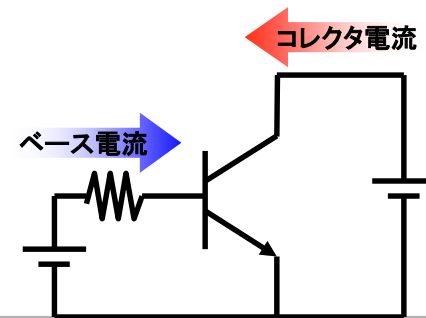
例)

$I_F = 5 \text{ mA}$ を入力した時、 $I_C = 10 \text{ mA}$ が得られる製品の場合、
 変換効率 = $I_C / I_F = 10 \text{ mA} / 5 \text{ mA} \times 100 = 200 \%$

参考: トランジスタの h_{FE}

h_{FE} (直流電流増幅率)
 = コレクタ電流 (I_C) / ベース電流 (I_B)

項目	記号	注記	測定条件	最小	標準	最大	単位
変換効率	I_C / I_F	(注1)	$I_F = 5 \text{ mA}, V_{CE} = 5 \text{ V}$	50	—	600	%
			$I_F = 5 \text{ mA}, V_{CE} = 5 \text{ V}, \text{GBランク}$	100	—	600	



フォトカプラの特性 トリガLED電流

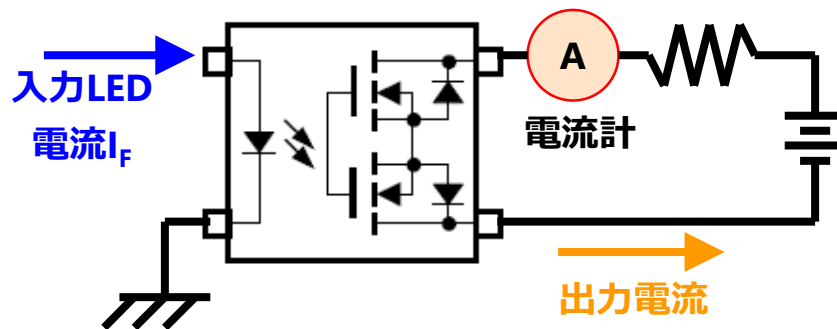
トリガLED電流

ロジック出力ICカプラ、フォトリレー、トライアック出力カプラなどでは、その出力動作を行うために必要な、トリガLED電流が規定されています。

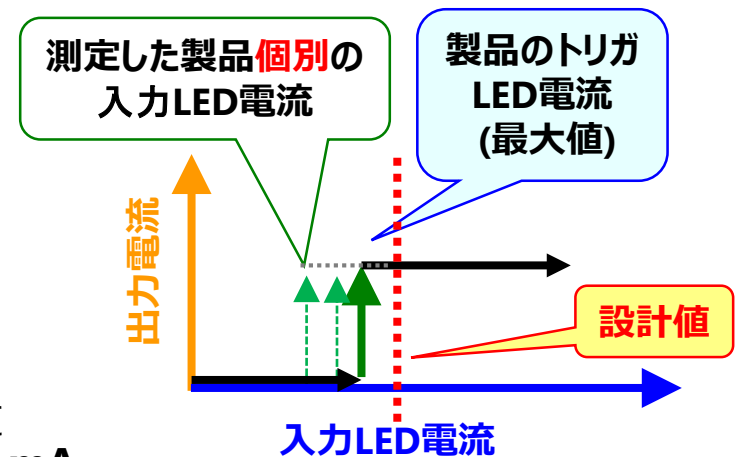
「トリガLED電流」＝「状態変化の引きがねとなるLED電流」
＝「出力の状態を変化させるために必要なLED電流」

記号としては、 I_{FT} 、 I_{FLH} 、 I_{FHL} などが使用されます。

データシートに記載のトリガLED電流は、製品での規定値を記載しています。従って、最低でもトリガLED電流(最大値)以上のLED電流を流す必要があります。



例)
 I_F を0 mAから徐々に増やし、 $I_F = 3$ mAを入力したときに
出力がオフ状態からオン状態に移行した場合、 $I_{FT} = 3$ mA



項目	記号	注記	測定条件	最小	標準	最大	単位
トリガLED電流	I_{FT}		$I_{ON} = 1.4$ A	—	1	3	mA

トリガLED電流は回路設計や寿命設計において重要な項目です。

フォトカプラの経年変化

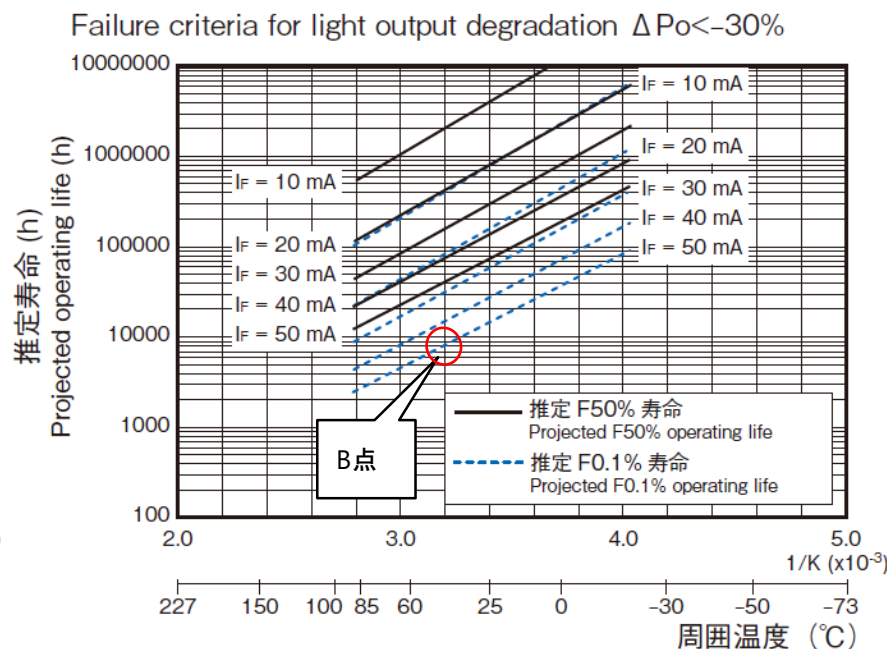
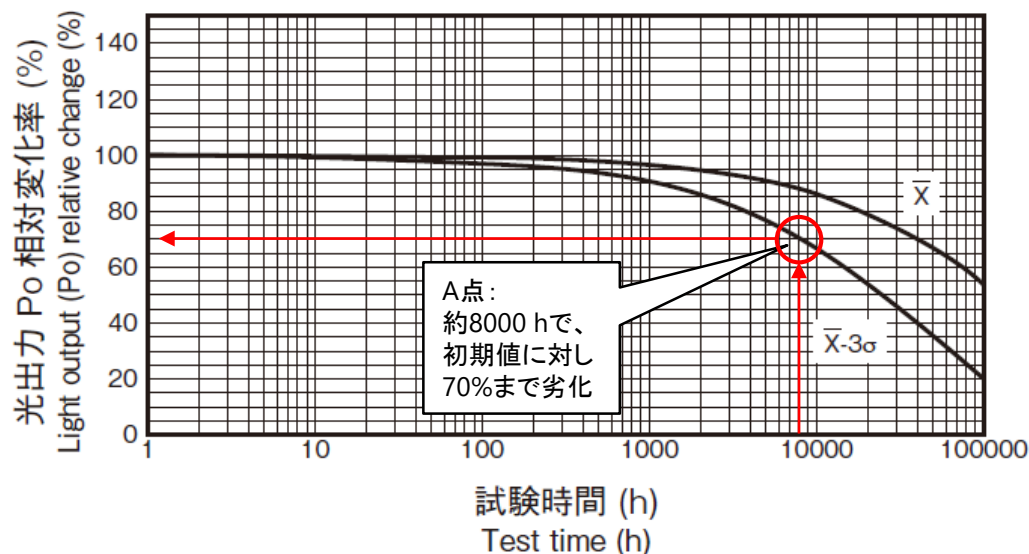
フォトカプラの経年変化推定

LEDの光出力は発光時間とともに低下します。フォトカプラは、受光素子に比べLEDの経時変化が支配的であるため、使用されているLEDの推定経時変化データを用いて経年変化を推定します。回路設計を行う際は、使用するセットでの使用環境やLEDのトータル発光時間からLEDの光出力変化を算出し、順電流(I_F)の初期値に反映させます。

* LEDのトータル発光時間は、例えば、Duty (発光と消光の比) が50 %で稼働時間が1,000時間の場合は、500時間と算出します。

GaAs LEDの光出力の経時変化データの例

Test conditions: $I_F = 50 \text{ mA}$, $T_a = 40^\circ\text{C}$



左図はLEDの光出力の経時変化データを示します。

右図はLEDの光出力が、ある故障判定基準以下となる時間を示しています。

例えば左図のA点と右図のB点は同じ条件 ($I_F = 50 \text{ mA}$, $T_a = 40^\circ\text{C}$, 8000 h) での変化を示しています。

フォトカプラの使い方

フォトランジスタカプラによる信号インタフェースの設計例

下記はDC5 V 系の信号を、DC10 V 系へ伝送するインタフェース回路例です。
LED入力側の抵抗 R_{IN} および フォトランジスタ出力側の抵抗 R_L はどのように設計すればよいでしょうか。
また、フォトランジスタカプラのCTRはどのように設定すればよいでしょうか。
次のページから以下の手順で説明していきます。

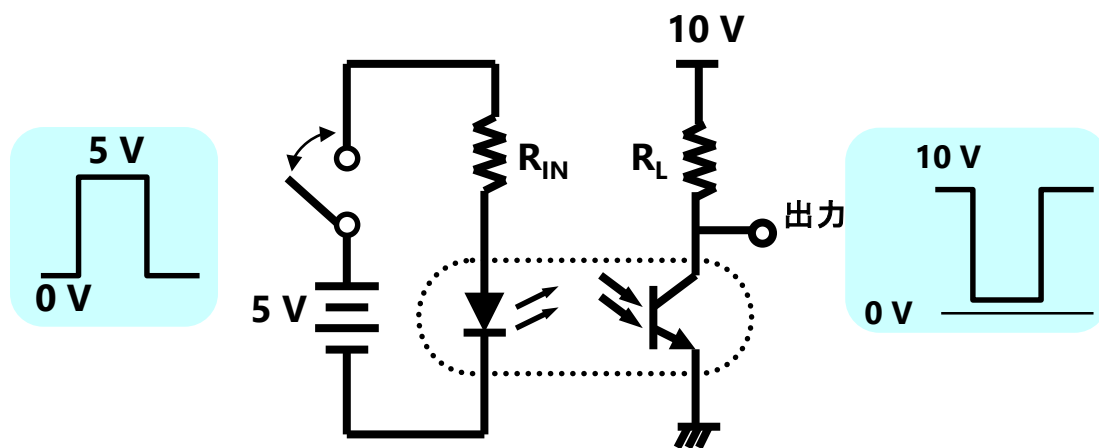
Step 1. LED入力電流 I_F と入力側抵抗 R_{IN} の設計

Step 2. I_F とCTRから、フォトランジスタ出力電流を計算

Step 3. 出力側抵抗 R_L の設計

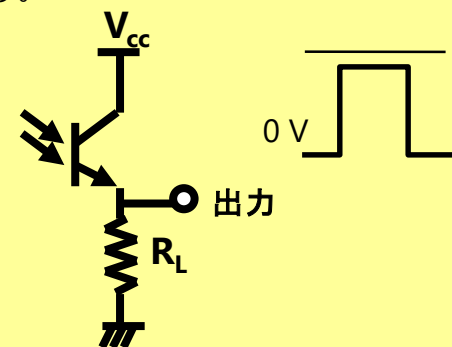
Step 4. 各定数の確認

DC5 V 系と DC10 V 系のインタフェース回路



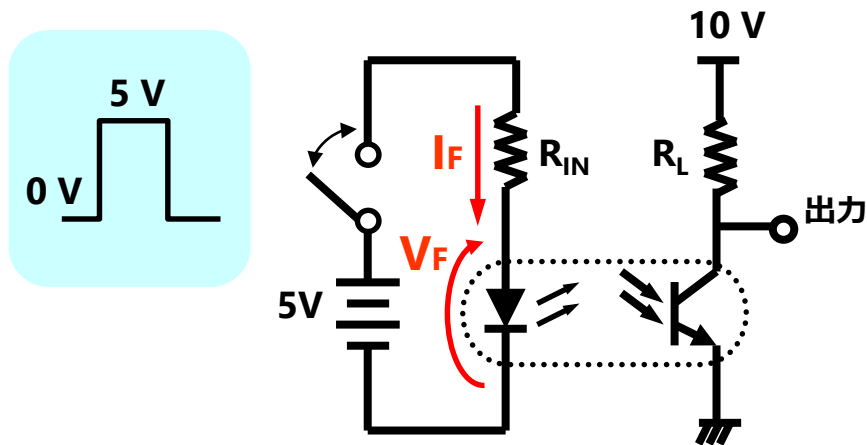
参考：

左図では、出力信号が反転していますが、
下図のように出力をエミッタフォロアとすれば、
入力と同じ出力ロジックを得ることが可能です。



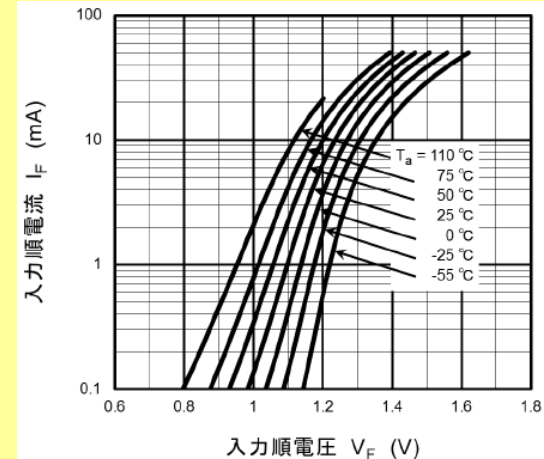
フォトカプラの使い方 入力電流

Step 1. LED入力電流 I_F と入力側抵抗 R_{IN} の設計



順電圧特性

I_F - V_F 特性は、温度によって変化します。
使用温度範囲を考慮する必要があります。



フォトカプラの入力電流(I_F)の設定と入力抵抗(R_{IN})の算出

①入力側電源電圧 (V_{CC})、②電流制限抵抗 (R_{IN})、③LEDの順方向電圧 (V_F) により決定されます。
仕様例から、順方向電圧 (V_F)、入力電流 (I_F)を決定し、電流制限抵抗を決定します。

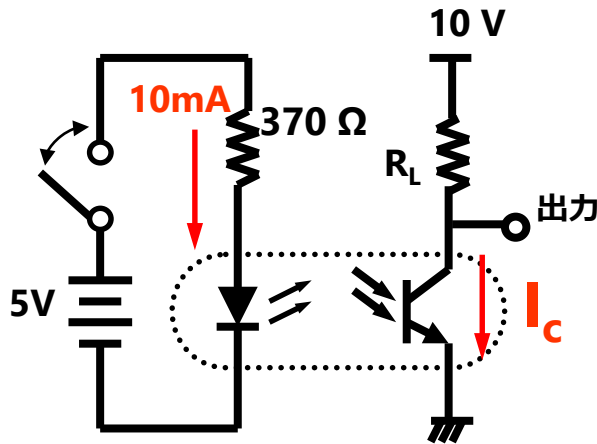
$$R_{IN} = (V_{CC} - V_F) / I_F = (5 \text{ V} - 1.3 \text{ V}) / 10 \text{ mA} = 370 \Omega$$

(仕様例)

順	電	圧	V_F	$I_F = 10 \text{ mA}$	1.0	1.15	1.3	V
---	---	---	-------	-----------------------	-----	------	-----	---

フォトカプラの使い方 出力電流

Step 2. I_F とCTRから、フォトランジスタ出力電流を計算

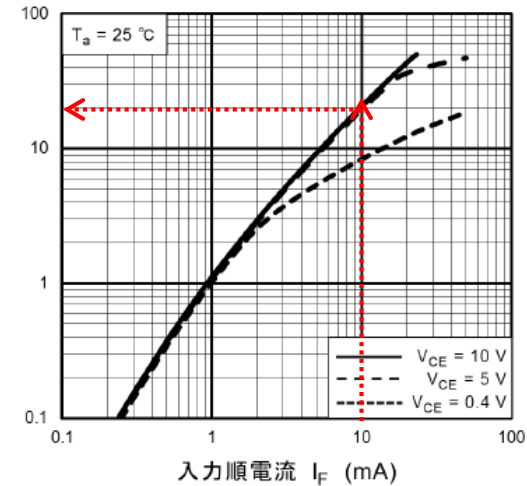


変換効率ランク

トランジスタカプラは、変換効率のランク分類を行っています。

分類名称 (注 1)	変換効率 (%) (I_C / I_F) $I_F = 5 \text{ mA}, V_{CE} = 5 \text{ V}, T_a = 25^\circ\text{C}$	
	最小	最大
無	50	600
Y ランク品	50	150
GR ランク品	100	300
BL ランク品	200	600
GB ランク品	100	600
YH ランク品	75	150
GRL ランク品	100	200
GRH ランク品	150	300
BLL ランク品	200	400

$I_C - I_F$ カーブ



フォトカプラの出力電流 (I_C)は？

入力電流 (I_F)=10 mAの場合の出力電流 (I_C)のばらつきを、変換効率 (I_C/I_F) から求めます。

右上の I_C-I_F カーブは、 $I_C=10 \text{ mA}$ (@ $I_F=5 \text{ mA}$ 、 $V_{CE}=5\text{V}$ 、 $T_a=25^\circ\text{C}$)なので、CTR=200%品 (BLランク：200～600 %の最小品)の特性カーブである事が分かります。また、このカーブから $I_C=20 \text{ mA}$ (@ $I_F=10 \text{ mA}$ 、 $V_{CE}=5\text{V}$ 、 $T_a=25^\circ\text{C}$) となります。

ここで求めた I_C の値を使って次に R_L を導出します。一般的にトランジスタカプラの変換効率の測定条件は $V_{CE}=5 \text{ V}$ の設定なので、 I_C の最小値でも V_{CE} が飽和電圧になるよう R_L を設定します。

フォトカプラの使い方 出力側抵抗 R_L

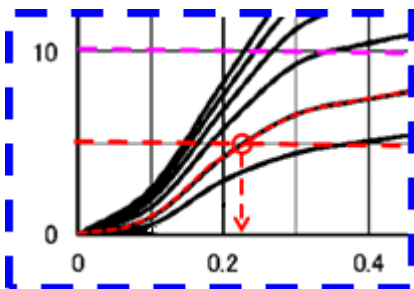
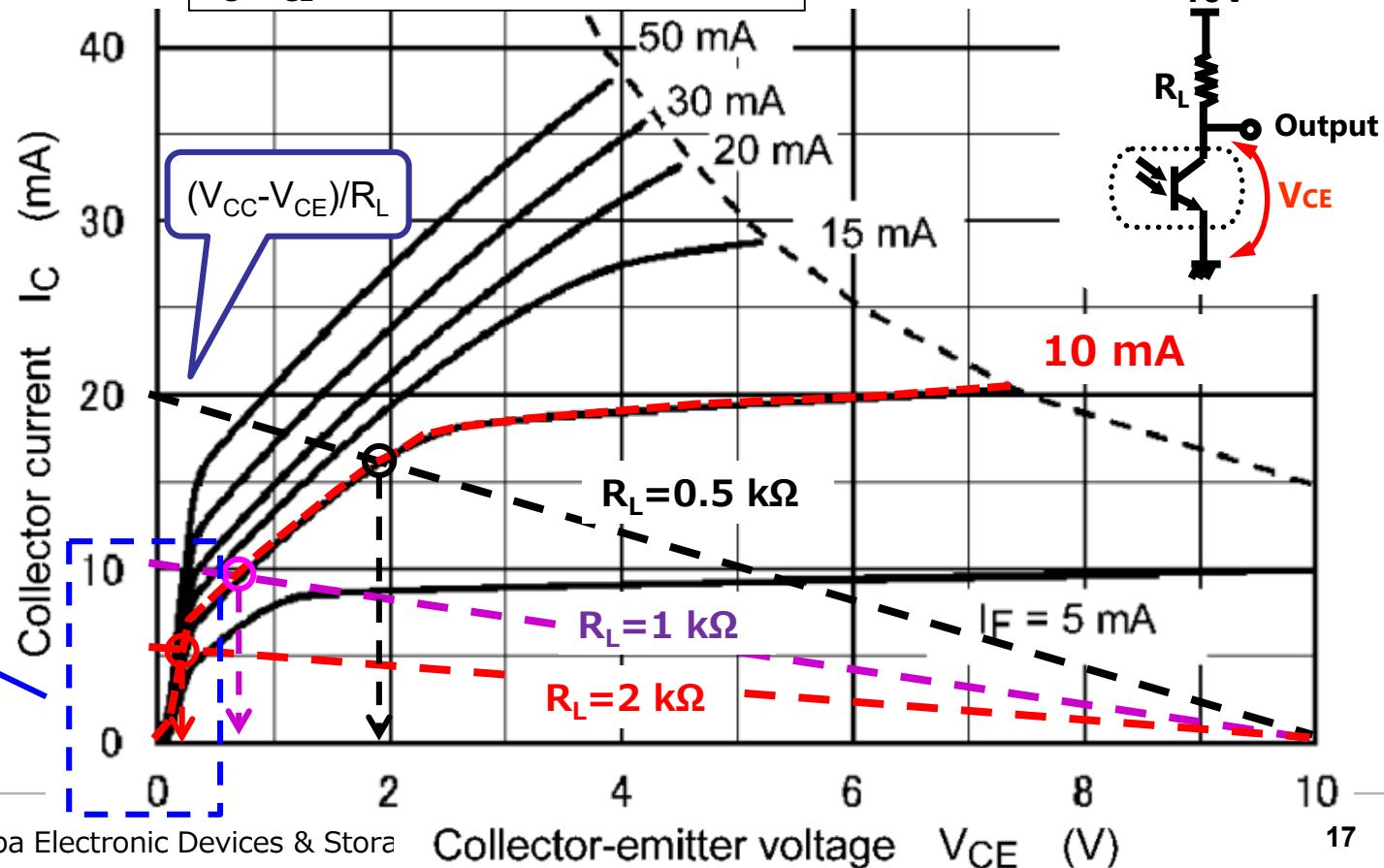
Step 3. 出力側抵抗 R_L の設計

出力トランジスタの I_C - V_{CE} 特性から R_L を決定します。信号伝送として使用するには、負荷側に接続するデバイスの“L”レベルを十分に満足する必要があります。ここでは、 $V_{CE}=0.3V$ を目標値とします。

$I_F=10\text{ mA}$ の時、 $R_L=1\text{ k}\Omega$ では $V_{CE}=0.9\text{ V}$ 程度となり不十分です。 $R_L=2\text{ k}\Omega$ では $V_{CE}=0.2\text{ V}$ 程度になっており、目標値を達成していますので $R_L=2\text{ k}\Omega$ を選定します。実設計では負荷側のインピーダンスも考慮する必要があります。

$T_a = 25^\circ\text{C}$

I_C - V_{CE} カーブと負荷線

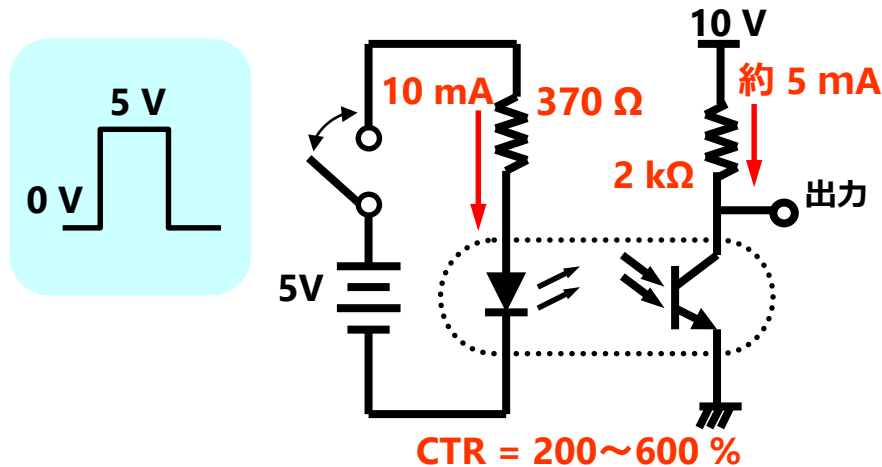


拡大図

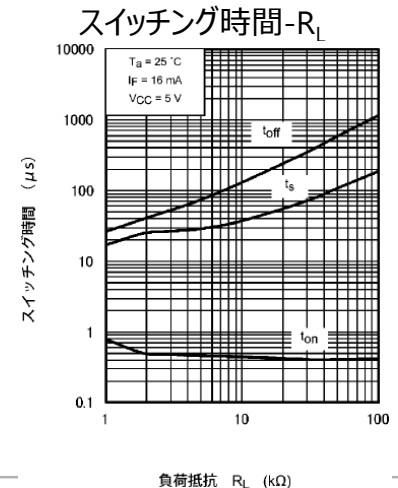
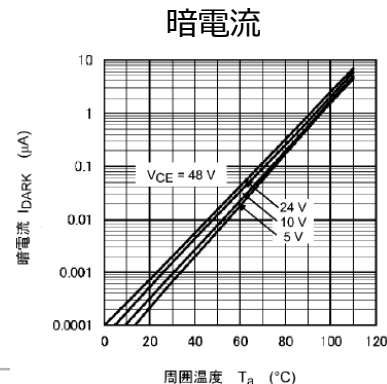
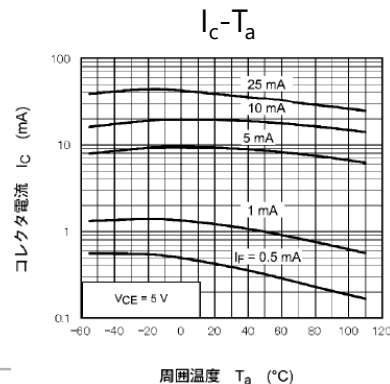
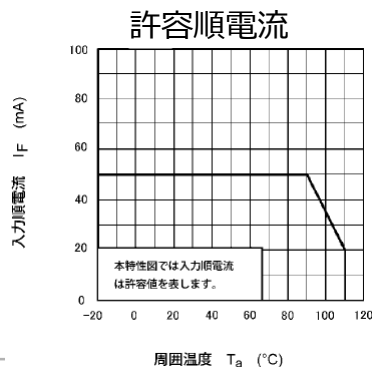
フォトカプラの使い方 確認

Step 4. 設計した定数の確認

動作温度範囲、動作スピード、設計寿命、抵抗誤差などを考慮し、十分マージンがあるかを検討します。

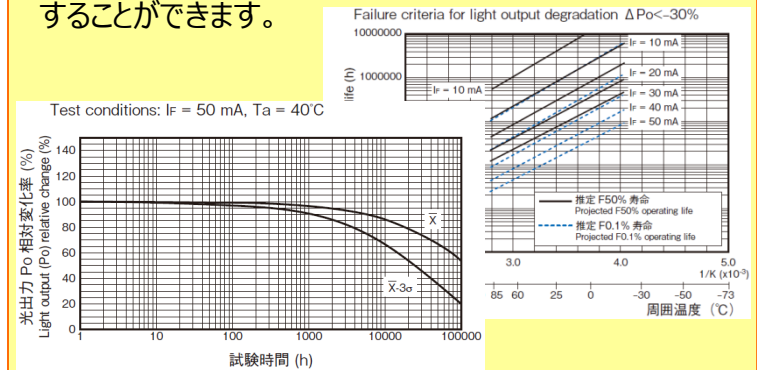


- ・温度範囲 ⇒ V_F 、CTR、許容順電流など
- ・負荷抵抗 ⇒ スwitchングスピード、暗電流の影響など



セット設計寿命の確認

フォトカプラを使用するセットの環境条件からセットの寿命を満足することを確認する必要があります。
フォトカプラは入力電流(I_F)と環境温度から寿命を算出することができます。



製品取り扱い上のお願い

株式会社東芝およびその子会社ならびに関係会社を以下「当社」といいます。

本資料に掲載されているハードウェア、ソフトウェアおよびシステムを以下「本製品」といいます。

- 本製品に関する情報等、本資料の掲載内容は、技術の進歩などにより予告なしに変更されることがあります。
- 文書による当社の事前の承諾なしに本資料の転載複製を禁じます。また、文書による当社の事前の承諾を得て本資料を転載複製する場合でも、記載内容に一切変更を加えたり、削除したりしないでください。
- 当社は品質、信頼性の向上に努めていますが、半導体・ストレージ製品は一般に誤作動または故障する場合があります。本製品をご使用頂く場合は、本製品の誤作動や故障により生命・身体・財産が侵害されることのないように、お客様の責任において、お客様のハードウェア・ソフトウェア・システムに必要な安全設計を行うことをお願いします。なお、設計および使用に際しては、本製品に関する最新の情報（本資料、仕様書、データシート、アプリケーションノート、半導体信頼性ハンドブックなど）および本製品が使用される機器の取扱説明書、操作説明書などをご確認の上、これに従ってください。また、上記資料などに記載の製品データ、図、表などに示す技術的な内容、プログラム、アルゴリズムその他応用回路例などの情報を使用する場合は、お客様の製品単独およびシステム全体で十分に評価し、お客様の責任において適用可否を判断してください。
- 本製品は、特別に高い品質・信頼性が要求され、またはその故障や誤作動が生命・身体に危害を及ぼす恐れ、膨大な財産損害を引き起こす恐れ、もしくは社会に深刻な影響を及ぼす恐れのある機器（以下“特定用途”という）に使用されることは意図されていませんし、保証もされていません。特定用途には原子力関連機器、航空・宇宙機器、医療機器（ヘルスケア除く）、車載・輸送機器、列車・船舶機器、交通信号機器、燃焼・爆発制御機器、各種安全関連機器、昇降機器、発電関連機器などが含まれますが、本資料に個別に記載する用途は除きます。特定用途に使用された場合には、当社は一切の責任を負いません。なお、詳細は当社営業窓口まで、または当社Webサイトのお問い合わせフォームからお問い合わせください。
- 本製品を分解、解析、リバースエンジニアリング、改造、改変、翻案、複製等しないでください。
- 本製品を、国内外の法令、規則及び命令により、製造、使用、販売を禁止されている製品に使用することはできません。
- 本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するためのもので、その使用に際して当社及び第三者の知的財産権その他の権利に対する保証または実施権の許諾を行うものではありません。
- 別途、書面による契約またはお客様と当社が合意した仕様書がない限り、当社は、本製品および技術情報に関して、明示的にも黙示的にも一切の保証（機能動作の保証、商品性の保証、特定目的への合致の保証、情報の正確性の保証、第三者の権利の非侵害保証を含むがこれに限らない。）をしておりません。
- 本製品にはGaAs（ガリウムヒ素）が使われているものがあります。その粉末や蒸気等は人体に対し有害ですので、破壊、切断、粉碎や化学的な分解はしないでください。
- 本製品、または本資料に掲載されている技術情報を、大量破壊兵器の開発等の目的、軍事利用の目的、あるいはその他軍事用途の目的で使用しないでください。また、輸出に際しては、「外国為替及び外国貿易法」、「米国輸出管理規則」等、適用ある輸出関連法令を遵守し、それらの定めるところにより必要な手続を行ってください。
- 本製品のRoHS適合性など、詳細につきましては製品個別に必ず当社営業窓口までお問い合わせください。本製品のご使用に際しては、特定の物質の含有・使用を規制するRoHS指令等、適用ある環境関連法令を十分調査の上、かかる法令に適合するようご使用ください。お客様がかかる法令を遵守しないことにより生じた損害に関して、当社は一切の責任を負いかねます。

TOSHIBA