

フォトリレー ～高周波回路におけるフォトリレーの 留意点～

概要

フォトリレー (MOSFET 出力フォトカプラー)にはさまざまなメリットがあり、機械式リレー (メカニカルリレー)からの切り替えが進んでいます。しかしながら、半導体テスター・計測器応用などの高周波回路で使用する際には、メカニカルリレーと比較して注意しなければいけない点があります。

このアプリケーションノートでは、フォトリレーで高周波信号を制御する際の留意点をおもに説明します。

なお、ここでは周波数帯域が数 100 MHz から数 10 GHz の信号を高周波信号と位置づけます。また、a 接点フォトリレー (入力側 LED 信号がオンの時に、出力側 MOSFET がオンとなるフォトリレー)を前提とした説明とします。

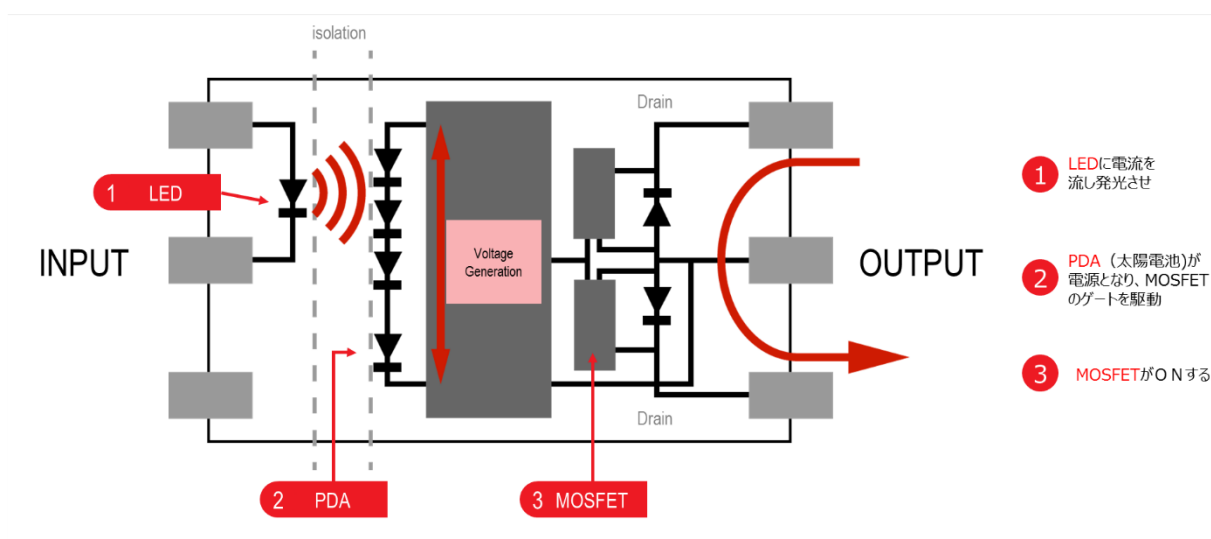
目次

1.	はじめに.....	3
2.	フォトリレーの高周波信号に対する振る舞い.....	5
3.	高周波回路にフォトリレーを使用するときの留意点	5
4.	Sパラメーター (Scattering Parameters).....	6
4.1	フォトリレーに対する S パラメーター	7
4.2	インサージョンロス (LED: オン)	7
4.3	アイソレーション (LED: オフ)	8
4.4	リターンロス	8
4.5	位相	9
5.	Sパラメーターの例	10
6.	フォトリレー選定のポイント.....	10
7.	高周波信号制御に適したフォトリレー製品の紹介	11
8.	さいごに.....	11
	変更履歴.....	12
	製品取り扱い上のお願ひ	13

1. はじめに

フォトリレーは MOSFET を出力段に持つ半導体リレーの形態です (図 1)。表 1 にフォトリレーとメカニカルリレーの比較を示します。

近年、信頼性の担保およびフォトリレーのパッケージの小型化が進み、省スペースの観点で機械式リレー (メカニカルリレー) からの置き換えが進んでいます。しかしながら、メカニカルリレーと比較してオン時には抵抗成分 (オン抵抗 R_{ON}) が存在し、オフ時には出力側 MOSFET の寄生ダイオードの PN 接合容量を主とした容量成分 (出力端子間容量 C_{OFF}) が存在します (図 2)。また、周波数が高くなるに従ってインダクタンス (L) 成分も見えてきます (図 3)。この点で高周波信号を伝送する回路において、メカニカルリレーをフォトリレーに置き換える場合には配慮が必要です。このアプリケーションノートでは、フォトリレーで高周波信号を制御する際の注意点をおもに説明します。



- (1) 入力側の LED に電流を流すと LED が発光し光信号が発生します。
- (2) 光信号は接点側の PDA により電気信号に変換され、MOSFET の制御端子 (ゲート) に電気信号を入力します。
- (3) ゲートに電気信号が入力されることで MOSFET がオンし、接点が接続された状態になります。

図 1 フォトリレーの動作原理 (1a 接点)

表 1 フォトリレーとメカニカルリレーの比較

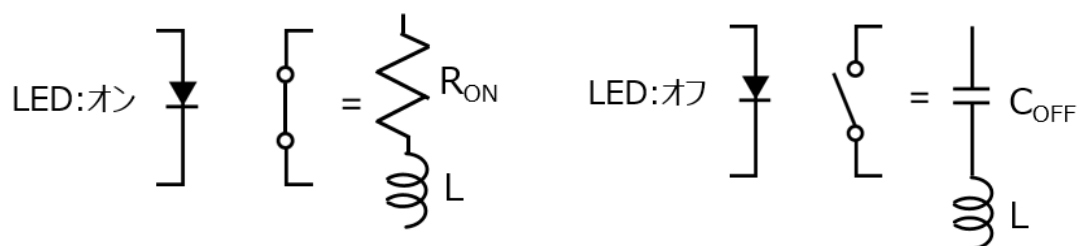
	Mechanical relay (Signal relay)	Photorelay	Remarks (Feature of Photorelay)
寿命	△ (接点回数制限あり)	◎ (接点回数制限なし)	長寿命
接点開閉容量	◎ (2A~数100A) ※Ta 85℃/AC・DC兼用	○ (~5A) ※Ta 25℃/Voff=60V ベース	
接触抵抗(オン抵抗)	約0.1Ω (開閉劣化あり)	約0.02~25Ω (開閉安定)	高信頼性
出力間耐圧	◎ (例: AC 250V, DC 30V)	○ (例: 20V~600Vまでラインナップ)	
入出力間耐圧	○ (例: 1kVrms)	◎ (max: 5kVrms)	
動作/復帰時間	△ 約5ms	○ 約0.1ms	高速
動作音	△あり	◎なし	静音
小型化	○ (例: 60mm ²)	◎ (S-V50N4T: 2.8mm ² - 1.45 × 1.3 mm)	省面積
入力側消費電力	× (コイル) 100mW~	◎ (LED) 約0.5mW~	低消費電力
接点構成	1 c、2 cメイン	1a、1b、2a、1a1b	
漏れ電流	◎ なし	○ 微少 20pA~	



(a) LED: オン時 (接点: オン)

(b) LED: オフ時 (接点: オフ)

図 2 フォトリレー出力部の R_{ON} と C_{OFF}



(a) LED: オン時 (接点: オン)

(b) LED: オフ時 (接点: オフ)

図 3 高周波信号ではインダクタンス (L)成分も現れる

2. フォトリレーの高周波信号に対する振る舞い

前述のように、フォトリレーにはオン抵抗 (R_{ON})と出力端子間容量 (C_{OFF})が存在します。メカニカルリレーとの大きな違いはこの点です。

フォトリレーの入力側に規定の電流・電圧を印加すると、フォトリレーがオンします。このとき出力の MOSFET は、印加電流の周波数が DC から低周波の範囲では抵抗成分と等価ですが、高周波になるにつれ抵抗成分に加えインダクタンス成分が現れてきます。一方、フォトリレーの入力側にバイアス印加がない場合は出力の MOSFET はオフします。このとき、MOSFET は印加信号周波数が DC から低周波の範囲では容量成分と等価ですが、高周波になるにつれ容量成分に加えインダクタンス成分が現れるため LC 共振が生じます。高周波信号をフォトリレーで制御する場合には、この点に注意が必要です。つまり、期待している出力信号に対して、フォトリレー通過後の信号にひずみが生じます。このひずみを表すパラメータとしてよく使われるのが、後述する S パラメータです。

3. 高周波回路にフォトリレーを使用するときの留意点

フォトリレー動作時の問題点として出力オン時の通過特性が挙げられます。

扱う信号の周波数が高くなるとフォトリレーのインダクタンス成分の影響により、フォトリレーの入力波形の立ち上がり時間 (t_{rin})に対して、フォトリレーを通過した出力波形の立ち上がり時間 (t_{rout})に変化が生じます。この変化を等価立ち上がり時間 (ERT: Equivalent Rise Time)で表します。ERT は図 4 に示す式で定義され、値が小さいほど信号の変化が少なく、良い特性といえます。通過特性は後で述べる S パラメータでも表現できます。

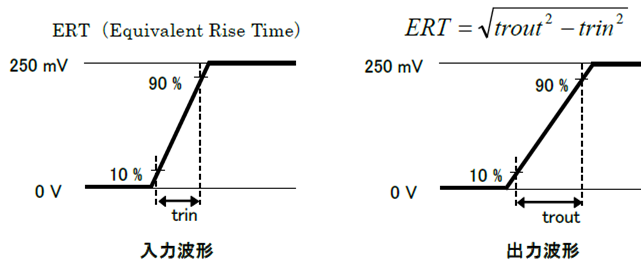


図 4 通過特性

また、フォトリレーの出力 (接点)がオフ時の問題点として漏れ電流 (リーク電流)が挙げられます。接点オフの状態でも急峻な立ち上がりの電圧が印加されると、漏れ電流が発生します (図 5)。近似的には $I_L = C_{OFF} \times dV/dt_r$ の漏れ電流が流れます。交流回路における電気の流れにくさをインピーダンスといい、直流回路でいう抵抗にあたりますが、 C_{OFF} のインピーダンスは周波数が大きいほど小さくなり、漏れ電流が流れやすくなります。この場合には C_{OFF} の小さな製品を選定することを推奨します。

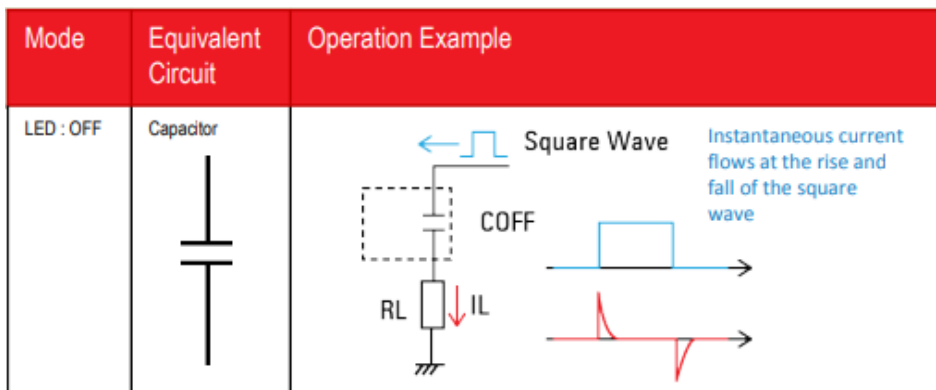


図 5 接点オフ時の漏れ電流

4. Sパラメーター (Scattering Parameters)

Sパラメーターとは、高周波電子回路・部品の特性を表すために使用される回路パラメーターのひとつです。Sパラメーターはマトリクスで表現され (S行列)、回路網の伝送 (回路網を介して信号が伝わる)・反射 (回路網から信号が戻ってくる)電力特性を表現しています。

<二端子対回路網の定義>

Sパラメーターは2対の端子を持つ回路網 (二端子対回路、すなわち四端子回路網)で使われることが多く、入力側の端子対を端子対1、出力側の端子対を端子対2とした場合には次のように定義されます (図6)。記号の定義はそれぞれ以下の通りです。

a_1 : 端子1から入力される電力 (注)の平方根 b_1 : 端子1へ出力される電力の平方根
 a_2 : 端子2から入力される電力 (注)の平方根 b_2 : 端子2へ出力される電力の平方根
 (注) 当社における評価では $0 \text{ dBm} = 1 \text{ mW}$

- S_{11} : 端子1における信号の反射率。デシベル表示は、端子1のリターンロスを示す。
- S_{21} : 端子1から信号を入力したときに端子2へ通過する信号。デシベル表示は、端子1から端子2へのインサージョンロス (アイソレーション)を示す。
- S_{12} : 端子2から信号を入力したときに端子1へ通過する信号。デシベル表示は、端子2から端子1へのインサージョンロス (アイソレーション)を示す。
- S_{22} : 端子2における信号の反射率。デシベル表示は、端子2のリターンロスを示す。

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{bmatrix}$$

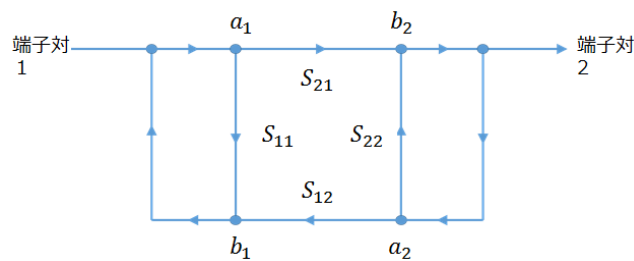


図6 Sパラメーターとシグナルフローグラフ

4.1 フォトリレーに対する S パラメーター

扱う信号の周波数が高くなると接点間での信号の損失が大きくなり、正確な信号伝達ができなくなったり、発熱を引き起こす原因にもなります。

従って、周波数が高くなった場合でも接点が閉じている時（フォトリレーオン時）に信号の損失が少なく（インサージョンロスが小さい）、接点が開いている時（フォトリレーオフ時）に信号の漏れが少ない（アイソレーション特性が良い）製品を選択する必要があります。フォトリレー選択時、S パラメーター測定結果で主に必要となるデータとして一般的にインサージョンロスとアイソレーションが挙げられます。

1. フォトリレーがオン状態の信号の損失（インサージョンロス）
2. フォトリレーがオフ状態の信号の損失（アイソレーション）

以上のことから、高周波信号を制御するためには R_{ON} が小さなフォトリレー、または C_{OFF} の小さなフォトリレーが必要になります。

当社製品例) 低 R_{ON} 品 : TLP3475/TLP3475S 低 C_{OFF} 品 : TLP3440/TLP3440S

4.2 インサージョンロス (LED: オン)

インサージョンロスはフォトリレーオン時の出力端子間抵抗に相当します。高周波においては、フォトリレーオン時に出力端子間で信号の損失が発生します。この信号の損失の度合いをインサージョンロスといい、入力電力 P_{in} と出力電力 P_{out} の比で、dB (デシベル) で表します。

インサージョンロスの値は、次の計算式で得られます。マイナスの値が大きいほど損失が大きいことになります。周波数が大きくなるとインダクタンス成分の影響を受けインサージョンロスのマイナス値が大きくなります (図 7)。これは伝送効率が良くないことを意味します。

$$\text{インサージョンロス (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

- 例) -0.1 dB: 約 2% の信号の損失 -1.0 dB: 約 20% の信号の損失
 -3.0 dB: 約 50% の信号の損失 -6.0 dB: 約 75% の信号の損失

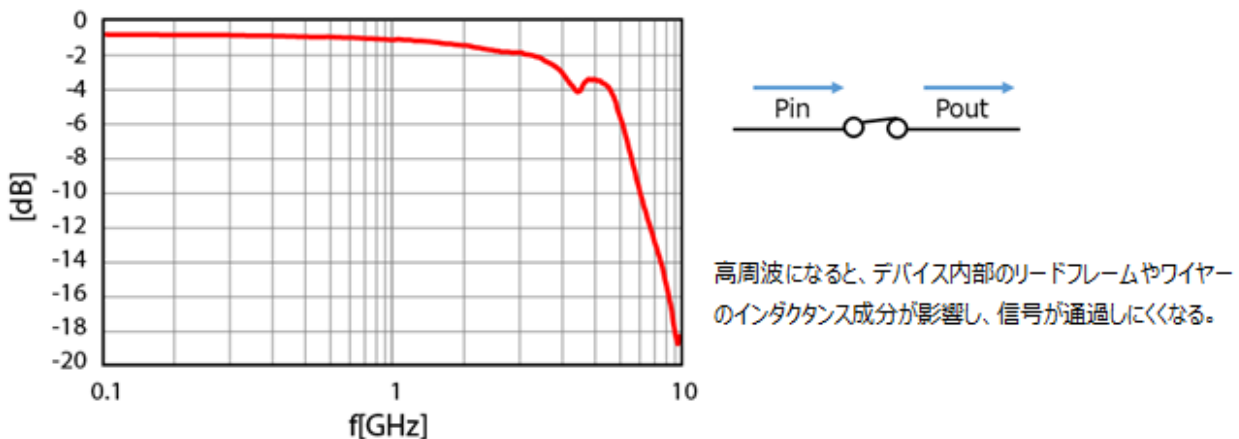


図 7 インサージョン特性

4.3 アイソレーション (LED: オフ)

アイソレーションはフォトリレーオフ時の出力端子間抵抗に相当します。高周波においては、フォトリレーがオフ状態でも、C_{OFF}による信号の通過（漏れ）が発生します。アイソレーションはこの信号の漏れ度合いを示し、入力電力 P_{in} と出力電力 P_{out} の比で、dB（デシベル）で表します。

アイソレーションの値は次の計算式で得られます。マイナスの値が大きいほど漏れが少ないということになります。周波数が大きくなると漏れが大きくなるため、アイソレーションの値は大きくなります（図 8）。

$$\text{アイソレーション (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right)$$

- 例) -10 dB: 1/10 (10 %)の信号の漏れ -20 dB: 1/10²(1 %)の信号の漏れ
 -30 dB: 1/10³ (0.1 %)の信号の漏れ -60 dB: 1/10⁶ (0.0001 %)の信号の漏れ

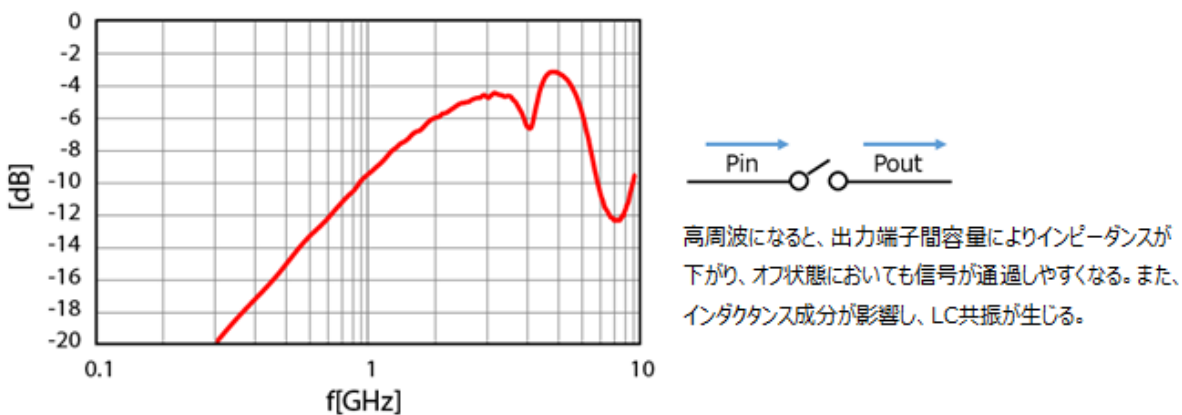


図 8 アイソレーション特性

4.4 リターンロス

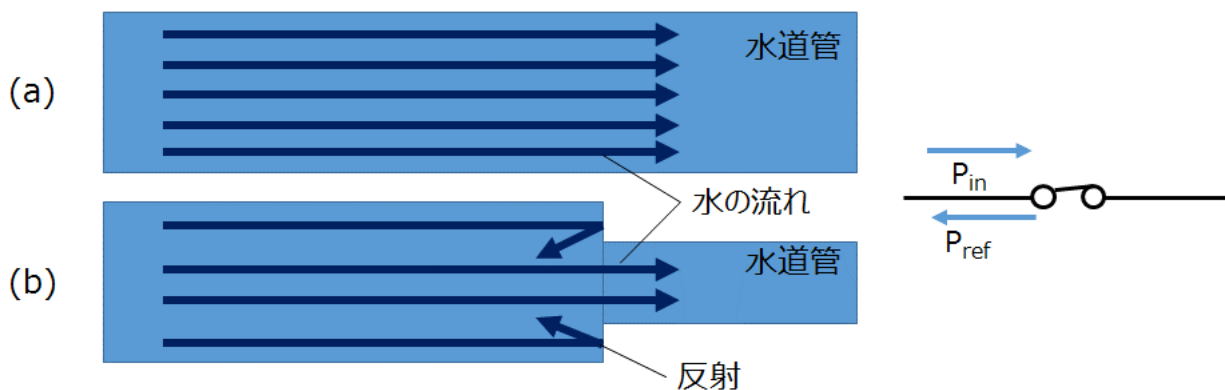
インピーダンス不整合があると、信号の反射が生じます。

このインピーダンスの不整合は、水の流れに置き換えるとイメージがつかめるといいます（図 9）。水道管の太さ（インピーダンス）が、図 9(b)のように途中で変化すると水（信号）はスムーズに流れずに一部は反射します。また、水の流れが乱れることになるので、これはノイズ発生源に相当することになります。

信号の反射の度合いをリターンロスといい、フォトリレーオン時の入力電力 P_{in} と反射電力 P_{ref} の比で、dB（デシベル）で表示します。また、リターンロスの値は次の計算式で得られ、マイナスの値が大きいほど反射が少ないと言えます。また、周波数が大きくなるとインピーダンス不整合の影響が大きくなるため反射も大きくなり、リターンロスの値は大きくなります。反射が大きくなると伝達される信号の電力が減ることにもなるので、インサージョンロスも大きくなります。

$$\text{リターンロス (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{ref}}{P_{in}} \right)$$

- 例) -10 dB: 1/10 (10 %)信号の反射 -20 dB: 1/10² (1 %)信号の反射
 -30 dB: 1/10³ (0.1 %)の信号の反射 -60 dB: 1/10⁶ (0.0001 %)の信号の反射



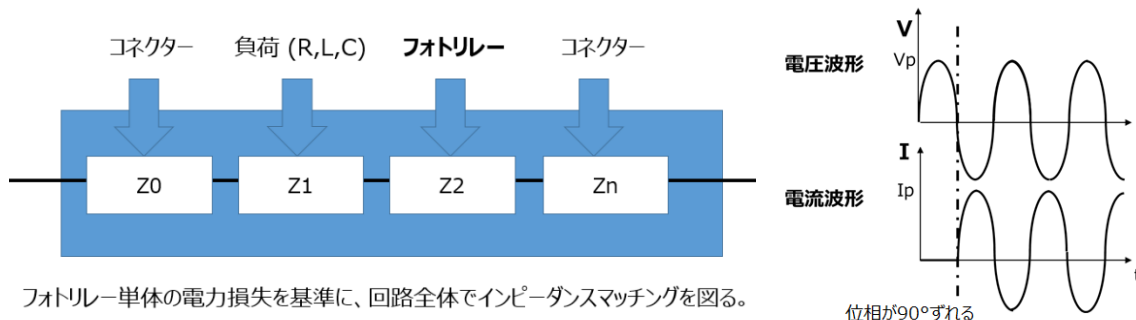
- (a) 水道管の太さが一定=インピーダンスが整合していると信号はスムーズに流れる。
- (b) 水道管が途中で細くなる=インピーダンスが整合していない場所があると反射が発生する。

図 9 リターンロス (水道管の中の水の流りに例える)

4.5 位相

周波数が高くなると伝送線路の寄生リアクタンスの影響で、図 10 のように負荷における電圧と電流の間には位相差が生まれます。低周波領域では寄生リアクタンスの値は小さいため位相差は小さいですが、周波数が高くなると寄生リアクタンスの影響を受け位相差が大きくなります。電圧を V 、電流を I 、電流と電圧の位相差を θ とすると、実効電力 $P = VI \cos \theta$ となります。位相が 90° ずれると $\cos 90^\circ = 0$ となるので、負荷へ供給される電力がゼロとなることを意味します。

高周波回路で部品 (フォトリレー) 選定の際の重要度としては、位相差より部品単体の損失部分、前述のインサーションロス、アイソレーションに注目する必要があります。当社は S パラメーターで位相データも提供しておりますが、実際の回路設計においては伝送線路全体でインピーダンスマッチングを図る必要性から、外付け部品を含めた回路全体での位相の合わせ込みが必要です。



フォトリレー単体の電力損失を基準に、回路全体でインピーダンスマッチングを図る。

図 10 位相差とインピーダンスマッチング

5. Sパラメーターの例

<Sパラメーターファイル (s2p ファイル)のフォーマット>

s2p ファイルは測定した S パラメーターデータを回路シミュレーターに取り込む際に使用されるデータフォーマットです。当社でサポートしている S2P ファイルを表形式に変換した後のデータの例を表 2 に示します。S₁₁、S₂₂ はリターンロス、S₁₂、S₂₁ はインサージョンロスを表しています。

表 2 Sパラメーターの数値例

周波数 (Hz)	S11 (dB)	S11位相 (°)	S21 (dB)	S21位相 (°)	S12 (dB)	S12位相 (°)	S22 (dB)	S22位相 (°)
10000000	-38.81	2.11	-0.09	-0.19	-0.09	-0.20	-40.34	-11.38
34993750	-39.38	-16.31	-0.10	-0.64	-0.09	-0.64	-39.50	-9.87
59987500	-38.97	-22.27	-0.10	-1.08	-0.10	-1.08	-39.30	-22.62
84981250	-38.24	-30.25	-0.10	-1.52	-0.10	-1.51	-39.02	-27.91
109975000	-38.12	-37.51	-0.10	-1.96	-0.10	-1.95	-37.89	-35.18
134968750	-37.50	-42.12	-0.11	-2.42	-0.10	-2.41	-37.34	-43.70
159962500	-36.97	-51.15	-0.12	-2.85	-0.11	-2.85	-36.94	-48.80
184956250	-37.10	-57.27	-0.13	-3.28	-0.12	-3.28	-36.77	-57.37
209950000	-36.16	-55.13	-0.12	-3.64	-0.12	-3.63	-36.82	-57.21
234943750	-34.73	-62.05	-0.12	-4.11	-0.12	-4.10	-35.66	-61.88
259937500	-34.36	-64.47	-0.13	-4.57	-0.12	-4.56	-34.80	-66.71
284931250	-33.55	-69.62	-0.14	-5.04	-0.13	-5.04	-33.80	-70.15
309925000	-33.58	-77.99	-0.16	-5.46	-0.16	-5.45	-33.41	-77.13

6. フォトリレー選定のポイント

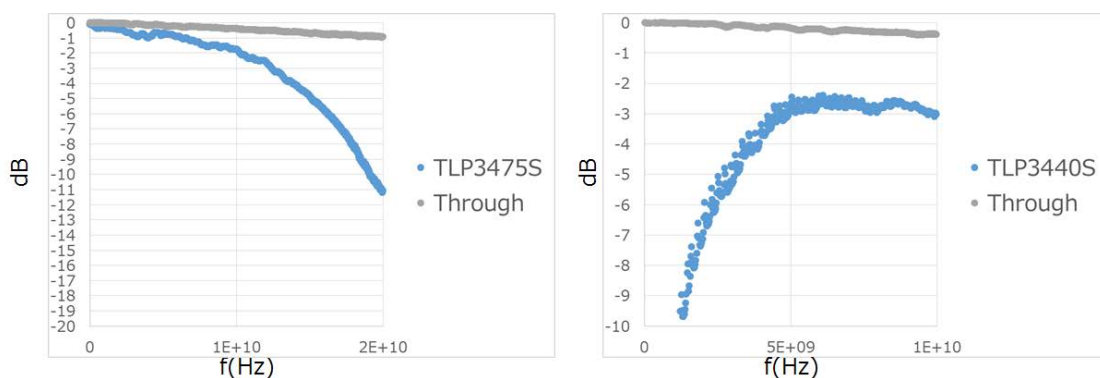
当社製品のうち S₂₁ (インサージョンロス、アイソレーション特性)が良い製品として、TLP3475S / TLP3440S があります。

- ① TLP3475S は R_{ON} が小さく (1.1 Ω (typ.)), またパッケージ構造の工夫によりインダクタンス成分を削減しており、インサージョンロス特性に優れた製品です。
- ② TLP3440S は C_{OFF} が小さく (0.45 pF (typ.)), アイソレーション特性に優れた製品です。

しかしながら GHz オーダーの信号を扱う際には、可能であればインピーダンスの高い部品をフォトリレーの出力に直列に入れることを推奨します。

図 11 にそれぞれの、インサージョンロス (アイソレーション)特性グラフを示します (ディエンベディング(*)無し)。

*ディエンベディング: 測定時に含まれる測定基板などの成分を測定系から差し引き、測定対象のデータのみを抽出すること。



(a) TLP3475S インサージョンロス (LED: オン時) (b) TLP3440S アイソレーション (LED: オフ時)

図 11 インサージョンロス、アイソレーション特性例

7. 高周波信号制御に適したフォトリレー製品の紹介

最後に当社の高周波信号制御に適した製品を紹介します。低 R_{ON} 、低 C_{OFF} 、低 CR 積 (C_{OFF} と R_{ON} の積) の製品、また、小型パッケージを選ぶこともインピーダンス低下に有利となるため、高周波回路向けの製品として選定のポイントとなります。半導体テスターや計測器用途では一般的に R_{ON} は $1\ \Omega$ (typ.)程度、 C_{OFF} は $1\ \text{pF}$ (typ.)程度が好まれます。

フォトリレーとして業界最小レベル (注)である、VSON4、S-VSON4、S-VSON4T パッケージからお選びください (表 3)。

(注) 2020年9月 当社調べ

表 3 推奨製品 (2020年9月時点)

品名	接点	パッケージ	VOFF (min.)	ION (max.)	IFT (max.)	RON (typ.)	RON (max.)	COFF (typ.)	IOFF (max.)	tON (max.)	tOFF (max.)	BVs(min.)
TLP3431	1a接点	VSON4	20V	450mA	3mA	0.8Ω	1.2Ω	5pF	1nA	0.5ms	0.5ms	500Vrms
TLP3475		VSON4	50V	300mA	3mA	1Ω	1.5Ω	12pF	1nA	0.5ms	0.4ms	500Vrms
TLP3450		VSON4	20V	200mA	3mA	3Ω	5Ω	0.8pF	1nA	0.2ms	0.2ms	500Vrms
TLP3442		VSON4	40V	100mA	3mA	15Ω	20Ω	0.3pF	1nA	0.2ms	0.2ms	500Vrms
TLP3440		VSON4	40V	120mA	3mA	12Ω	14Ω	0.45pF	1nA	0.2ms	0.3ms	500Vrms
TLP3441		VSON4	40V	140mA	3mA	5Ω	10Ω	0.7pF	1nA	0.2ms	0.2ms	500Vrms
TLP3451		VSON4	60V	120mA	3mA	10Ω	15Ω	0.7pF	1nA	0.2ms	0.2ms	500Vrms
TLP3406S		S-VSON4	30V	1500mA	3mA	0.1Ω	0.2Ω	120pF	1nA	2ms	1ms	500Vrms
TLP3475S		S-VSON4	60V	400mA	3mA	1.1Ω	1.5Ω	12pF	1nA	0.5ms	0.4ms	500Vrms
TLP3440S		S-VSON4T	40V	120mA	3mA	12Ω	14Ω	0.45pF	1nA	0.2ms	0.3ms	500Vrms

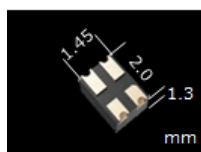


図 12 S-VSON4T パッケージ

8. さいごに

本資料では、フォトリレーを使用して高周波信号を制御する場合の留意点を紹介しました。当社ではフォトリレーの性能向上・小型化を引き続き進め、より高い周波数領域の信号を扱える製品ラインアップを拡充してまいります。半導体テスターや各種計測器へのフォトリレーの検討をお願いします。

なお、新規設計にあたっては、弊社ホームページで最新の製品情報をご確認ください。

変更履歴

バージョン情報	日付	対応頁数	変更内容
Rev. 1.0	2020-09-30	-	初版

製品取り扱い上のお願

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、粉砕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。

東芝デバイス&ストレージ株式会社

<https://toshiba.semicon-storage.com/jp/>