

Séance 5

SÉANCE 5 / PHOTODÉTECTION

Pour ce TD, on pourra s'appuyer sur la fiche résumée : [Diodes / LED / Photodiodes](#)

Mission 5.1 - Emettre une information lumineuse

En se basant sur une **LED IR** de type SFH415.

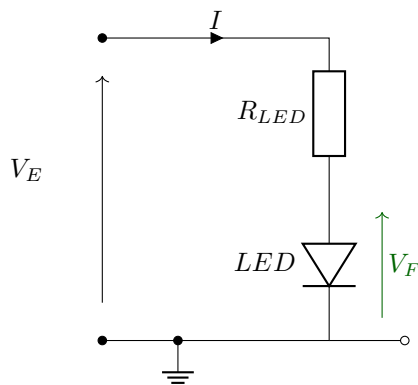
Proposer un montage émetteur permettant d'obtenir un flux lumineux sinusoïdal sans risque pour la LED, et donner les paramètres des différentes sources utilisées et des autres éléments du montage.

Il faut dans un premier temps s'intéresser aux données fournies par le constructeur pour savoir comment utiliser dans les meilleures conditions cette LED.

Il faut en particulier regarder les point suivants :

- Courant maximal direct :
- Tension inverse maximale (V_R) : 5 V
- Tension directe (V_F) : 1.3 V @ 100 mA

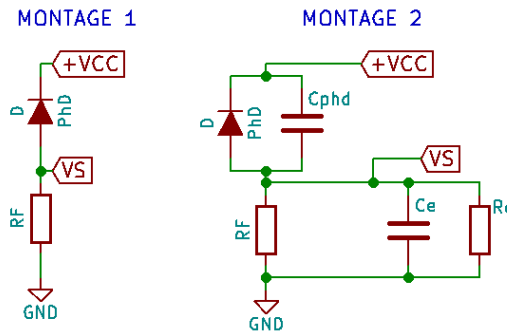
On pourra utiliser le montage suivant pour piloter la LED :



Mission 5.2 - Transmettre une information par la lumière

En se basant sur une **LED IR** de type SFH415 et une **photodiode** de type SFH229, on souhaite réaliser un système de transmission d'information par la lumière.

On se propose dans un premier temps d'utiliser le montage « simple » de photodétection.



A quoi correspondent les deux montages proposés ?

Donner la fonction de transfert du montage en fonction du flux lumineux reçu.

Quelle est alors la limite en fréquence d'un tel montage ? Peut-on transmettre des données binaires ?

On peut tout d'abord s'intéresser aux caractéristiques principales d'une photodiode :

- tension inverse maximale / Reverse Voltage (p.2)
- puissance maximale admissible / Total Power Dissipation (p.2)
- courant photonique pour un éclairage particulier / Photocurrent (p.2)
- intervalle de longueurs d'ondes utilisable / Spectral range of sensibility (p.2)
- sensibilité spectrale / Spectral Sensibility (p.2)
- demi-angle / Half Angle (p.2)
- temps de réponse / Rise and Fall Time (p.3)
- tension direct / Forward Voltage (p.3)
- capacité parasite / Capacitance (p.3)

On peut également s'intéresser aux graphiques suivants : Relative Spectral Sensibility (p.4), Dark Current (p.4), Capacitance (p.5) et Directionnal Characteristics (p.5)

Montage 1

Ce montage correspond au schéma de câblage d'une photodiode. La photodiode va imposer un courant proportionnel au flux lumineux reçu dans ce montage (Φ_e). La résistance R_F va alors servir à convertir ce courant (relativement faible) en une tension visualisable sur un oscilloscope par exemple.

Par application de la loi d'Ohms, le courant qui sort de la photodiode passe par la résistance R_F . On a donc : $V_S(t) = R_F \cdot I_{phd}(t)$.

De plus, $I_{phd}(t) = k \cdot \Phi_e(t)$, on a donc :

$$V_S(t) = k \cdot R_F \cdot \Phi_e(t)$$

Montage 2

Ce second montage correspond à la modélisation plus complète des éléments du montage 1.

On s'aperçoit expérimentalement que le système précédent n'a pas une amplitude constante quelque que soit la fréquence du signal lumineux émis.

Le phénomène observé peut s'expliquer par le fait que les éléments de mesure par exemple peuvent être modélisés par une impédance d'entrée (R_e) en parallèle avec une capacité (C_e). D'une manière équivalente, on peut modéliser une photodiode (polarisée pour fonctionner en photodétecteur) comme une source de courant en parallèle avec une capacité (C_{PHD}).

Etude du montage 2

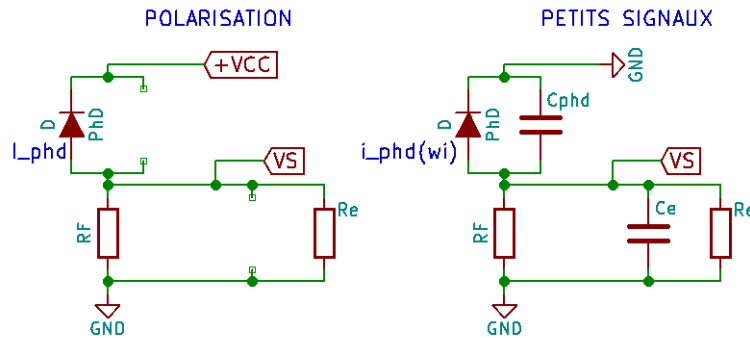
On supposera dans la suite de ce problème que le système est linéaire et que le flux lumineux reçu est une combinaison d'un flux constant et d'une somme de flux sinusoïdaux, pouvant s'écrire :

$$\phi_{lum}(t) = \Phi_{ambient} + \sum_{i=1}^N \phi_i \cdot \sin(\omega_i \cdot t)$$

On peut décomposer le signal $\phi_{lum}(t)$ en $N + 1$ sources indépendantes : $\Phi_{ambient}$ source continue et N sources de fréquence f_i .

Comme le système est linéaire, on peut alors appliquer le théorème de superposition. On peut alors sommer les causes de chacune des sources indépendantes.

On peut alors réaliser l'étude en polarisation indépendamment de l'étude en petits signaux, en s'intéressant aux 2 montages suivants :



Cas continu

Dans le cas de l'étude en continu (polarisation), on obtient : $V_{Scont} = (R_F // R_e) \cdot I_{phd} = (R_F // R_e) \cdot k \cdot \Phi_{ambient}$

Cas « petits signaux »

L'ensemble des éléments sont en parallèle. On obtient donc la relation suivante : $V_S(f_i) = k \cdot \phi_i \cdot (R_e // R_F // C_{phd} // C_e)$.

En appelant $Y = 1/(R_e // R_F // C_{phd} // C_e)$, on obtient $V_S(f_i) = k \cdot \phi_i / Y$ avec :

$$Y = \frac{1}{R_F} + \frac{1}{R_e} + j \cdot (C_{phd} + C_e) \cdot \omega_i$$

$$Y = \frac{R_e + R_F}{R_F \cdot R_e} \cdot (1 + j \cdot \omega_i \cdot (C_{phd} + C_e) \cdot \frac{R_F \cdot R_e}{R_e + R_F})$$

On obtient alors :

$$\frac{V_S(f_i)}{\phi_i} = k \cdot \frac{R_F \cdot R_e}{R_e + R_F} \cdot \frac{1}{(1 + j \cdot \omega_i \cdot (C_{phd} + C_e) \cdot \frac{R_F \cdot R_e}{R_e + R_F})}$$

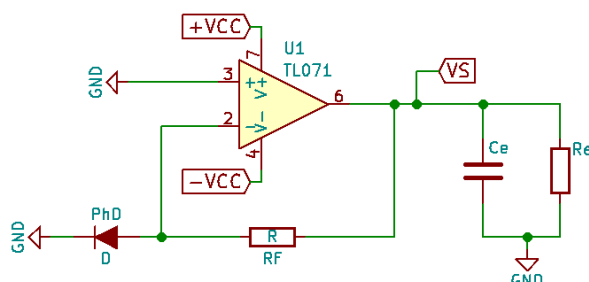
On retrouve alors le comportement d'un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure est

$$\omega_0 = \frac{R_e + R_F}{R_F \cdot R_e \cdot (C_{phd} + C_e)}$$

Mission 5.3 - Transmettre une information par la lumière - transimpédance

En se basant sur une **LED IR** de type SFH415 et une **photodiode** de type SFH229, on souhaite réaliser un système de transmission d'information par la lumière.

On se propose dans un premier temps d'utiliser le montage de photodétection de type transimpédance.



Donner la fonction de transfert du montage en fonction du flux lumineux reçu.

Quelle est alors la limite en fréquence d'un tel montage ? Peut-on transmettre des données binaires ?

On se basant sur les hypothèses habituelles pour un amplificateur intégré, on se trouve dans le cas d'un fonctionnement linéaire ($V^+ = V^-$) et on pourra supposer les courants d'entrée négligeables. On obtient alors que :

$$V_S = -R_F \cdot I_{PHD}$$

Même en modélisant le système de mesure par une capacité C_e et une résistance R_e en parallèle, on s'aperçoit que ces éléments n'interviennent plus dans le calcul de la fonction de transfert. Le courant fourni à ces éléments ne provient pas de la photodiode (contrairement au montage 1) mais provient de l'ALI (et de son alimentation).

Expérimentalement, cependant, on retrouve un phénomène passe-bas, inexpliqué par les relations obtenues précédemment (voir thème 2 de TP).

Mission 5.B1 - Modéliser le montage transimpédance

Dans l'exemple précédent, nous avons supposé l'amplificateur linéaire idéal.

On prendra le modèle suivant pour l'amplificateur linéaire :

$$V_S = \frac{A_0}{1 + j \cdot \frac{\omega}{\omega_0}} \cdot (V^+ - V^-)$$

Calculer la fonction de transfert $T(j \cdot \omega) = V_S / i_{PHD}$ du montage suivant :

Si on s'intéresse à présent au modèle un peu plus réaliste d'un ALI, on peut alors calculer la fonction de transfert du montage précédent de manière à interpréter les résultats expérimentaux obtenus.

On a $V^+ = 0$.

Calcul de V^-

Loi des noeuds : $i_{PHD} + i_C = i_R$ (on supposera $i^- = 0$).

Calcul de i_R

Loi des mailles : $V^- - R_F \cdot i_R - V_S = 0$

Ainsi :
$$i_R = \frac{V^- - V_S}{R_F}$$

Calcul de i_C

On posera $Z_C = \frac{1}{C_{PHD} \cdot \omega}$

Loi des mailles : $V^- + Z_C \cdot i_C = 0$

Ainsi :
$$i_C = \frac{-V^-}{Z_C}$$

Calcul de V^-

$$i_{PHD} + \frac{-V^-}{Z_C} = \frac{V^- - V_S}{R_F}$$

Ainsi : $i_{PHD} = V^- \cdot (1/R_F + 1/Z_C) - V_S/R_F$

On obtient alors :

$$V^- = \frac{1}{1 + j \cdot R_F \cdot C_{PHD} \cdot \omega} \cdot (R_F \cdot i_{PHD} + V_S)$$

Calcul de V_S

On a $V_S = A(j\omega) \cdot (V^+ - V^-)$.

On obtient alors :

$$V_S = -A(j\omega) \cdot \frac{V_S + R_F \cdot i_{PHD}}{1 + jR_FC_{PHD}\omega}$$

On obtient ainsi la fonction de transfert suivante :

$$\frac{V_S}{i_{PHD}} = \frac{-A(j\omega) \cdot R_F}{1 + A(j\omega) + jR_FC_{PHD}\omega}$$

Calcul complet

En remplaçant $A(j\omega)$ par $\frac{A_0}{1+j \cdot \frac{\omega}{\omega_0}}$, on obtient alors la fonction de transfert suivante :

$$\boxed{\frac{V_S}{i_{PHD}}} = \frac{-A_0 \cdot R_F}{(1 + jR_FC_{PHD}\omega) \cdot (1 + j\omega/\omega_0) + A_0}$$

Ce système correspond alors à un filtre passe-bas du second ordre. Selon les valeurs de R_F , C_{PHD} , A_0 et ω_0 , il peut y avoir une résonance (voir Thème 2 de TP).

GaAs-IR-Lumineszenzdiolen
GaAs Infrared Emitters
Lead (Pb) Free Product - RoHS Compliant

SFH 415



Wesentliche Merkmale

- GaAs-LED mit sehr hohem Wirkungsgrad
- Hohe Zuverlässigkeit
- UL Version erhältlich
- Gute spektrale Anpassung an Si-Fotoempfänger
- SFH 415: Gehäusegleich mit SFH 300, SFH 203

Anwendungen

- IR-Fernsteuerung von Fernseh- und Rundfunkgeräten, Videorecordern, Lichtdimmern
- Gerätefernsteuerungen für Gleich- und Wechsellichtbetrieb
- Rauchmelder
- Sensorik
- Diskrete Lichtschranken

Features

- Very highly efficient GaAs-LED
- High reliability
- UL version available
- Spectral match with silicon photodetectors
- SFH 415: Same package as SFH 300, SFH 203

Applications

- IR remote control of hi-fi and TV-sets, video tape recorders, dimmers
- Remote control for steady and varying intensity
- Smoke detectors
- Sensor technology
- Discrete interrupters

Typ Type	Bestellnummer Ordering Code	Strahlstärkegruppierung ¹⁾ ($I_F = 100 \text{ mA}$, $t_p = 20 \text{ ms}$) Radiant Intensity Grouping ¹⁾ $I_e \text{ (mW/sr)}$
SFH 415	Q62702-P0296	> 25
SFH 415-U	Q62702-P1137	> 40

¹⁾ gemessen bei einem Raumwinkel $\Omega = 0.01 \text{ sr}$ / measured at a solid angle of $\Omega = 0.01 \text{ sr}$

Grenzwerte ($T_A = 25\text{ °C}$)
Maximum Ratings

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Betriebs- und Lagertemperatur Operating and storage temperature range	$T_{op}; T_{stg}$	- 40 ... + 100	°C
Sperrspannung Reverse voltage	V_R	5	V
Durchlassstrom Forward current	I_F	100	mA
Stoßstrom, $t_p = 10\text{ }\mu\text{s}$, $D = 0$ Surge current	I_{FSM}	3	A
Verlustleistung Power dissipation	P_{tot}	165	mW
Wärmewiderstand Thermal resistance	R_{thJA}	450	K/W

Kennwerte ($T_A = 25\text{ °C}$)
Characteristics

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Wellenlänge der Strahlung Wavelength at peak emission $I_F = 100\text{ mA}$, $t_p = 20\text{ ms}$	λ_{peak}	950	nm
Spektrale Bandbreite bei 50% von I_{max} Spectral bandwidth at 50% of I_{max} $I_F = 100\text{ mA}$	$\Delta\lambda$	55	nm
Abstrahlwinkel Half angle SFH 415	φ	± 17	Grad
Aktive Chipfläche Active chip area	A	0.09	mm ²
Abmessungen der aktiven Chipfläche Dimensions of the active chip area	$L \times B$ $L \times W$	0.3×0.3	mm ²
Abstand Chipoberfläche bis Linsenscheitel Distance chip front to lens top	H	4.2 ... 4.8	mm

Kennwerte ($T_A = 25\text{ °C}$)**Characteristics (cont'd)**

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Schaltzeiten, I_e von 10% auf 90% und von 90% auf 10%, bei $I_F = 100\text{ mA}$, $R_L = 50\ \Omega$ Switching times, I_e from 10% to 90% and from 90% to 10%, $I_F = 100\text{ mA}$, $R_L = 50\ \Omega$	t_r, t_f	0.5	μs
Kapazität Capacitance $V_R = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$	C_o	25	pF
Durchlassspannung Forward voltage $I_F = 100\text{ mA}$, $t_p = 20\text{ ms}$ $I_F = 1\text{ A}$, $t_p = 100\ \mu\text{s}$	V_F V_F	1.3 (≤ 1.5) 2.3 (≤ 2.8)	V V
Sperrstrom Reverse current $V_R = 5\text{ V}$	I_R	0.01 (≤ 1)	μA
Gesamtstrahlungsfluss Total radiant flux $I_F = 100\text{ mA}$, $t_p = 20\text{ ms}$	Φ_e	22	mW
Temperaturkoeffizient von I_e bzw. Φ_e , $I_F = 100\text{ mA}$ Temperature coefficient of I_e or Φ_e , $I_F = 100\text{ mA}$	TC_I	- 0.5	%/K
Temperaturkoeffizient von V_F , $I_F = 100\text{ mA}$ Temperature coefficient of V_F , $I_F = 100\text{ mA}$	TC_V	- 2	mV/K
Temperaturkoeffizient von λ , $I_F = 100\text{ mA}$ Temperature coefficient of λ , $I_F = 100\text{ mA}$	TC_λ	+ 0.3	nm/K

Silizium-PIN-Fotodiode mit sehr kurzer Schaltzeit

Silicon PIN Photodiode with Very Short Switching Time

Lead (Pb) Free Product - RoHS Compliant

SFH 229

SFH 229 FA



SFH 229



SFH 229 FA

Wesentliche Merkmale

- Speziell geeignet für Anwendungen im Bereich von 380 nm bis 1100 nm (SFH 229) und bei 880 nm (SFH 229 FA)
- Kurze Schaltzeit (typ. 10 ns)
- 3 mm-Plastikbauform im LED-Gehäuse
- Auch gegurtet lieferbar

Anwendungen

- Lichtschranken für Gleich- und Wechselbetrieb
- Industrieelektronik
- „Messen/Steuern/Regeln“

Features

- Especially suitable for applications from 380 nm to 1100 nm (SFH 229) and of 880 nm (SFH 229 FA)
- Short switching time (typ. 10 ns)
- 3 mm LED plastic package
- Also available on tape and reel

Applications

- Photointerrupters
- Industrial electronics
- For control and drive circuits

Typ Type	Bestellnummer Ordering Code
SFH 229	Q62702P0215
SFH 229 FA	Q62702P0216

Grenzwerte
Maximum Ratings

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Betriebs- und Lagertemperatur Operating and storage temperature range	$T_{op}; T_{stg}$	- 40 ... + 100	°C
Sperrspannung Reverse voltage	V_R	20	V
Verlustleistung Total power dissipation	P_{tot}	150	mW

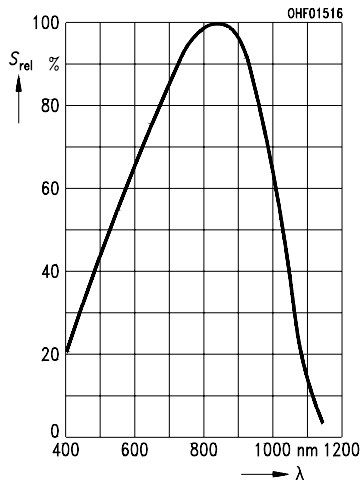
Kennwerte ($T_A = 25\text{ °C}$)
Characteristics

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value		Einheit Unit
		SFH 229	SFH 229 FA	
Fotostrom Photocurrent $V_R = 5\text{ V}$, Normlicht/standard light A, $T = 2856\text{ K}$, $E_V = 1000\text{ lx}$ $V_R = 5\text{ V}$, $\lambda = 950\text{ nm}$, $E_e = 1\text{ mW/cm}^2$	I_P I_P	28 (≥ 18) —	— 20 (≥ 10.8)	μA μA
Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit Wavelength of max. sensitivity	$\lambda_{S\text{ max}}$	860	900	nm
Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit $S = 10\%$ von S_{max} Spectral range of sensitivity $S = 10\%$ of S_{max}	λ	380 ... 1100	730 ... 1100	nm
Bestrahlungsempfindliche Fläche Radiant sensitive area	A	0.3	0.3	mm^2
Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche Dimensions of radiant sensitive area	$L \times B$ $L \times W$	0.56×0.56	0.56×0.56	$\text{mm} \times \text{mm}$
Halbwinkel Half angle	φ	± 17	± 17	Grad deg.
Dunkelstrom, $V_R = 10\text{ V}$ Dark current	I_R	50 (≤ 5000)	50 (≤ 5000)	pA
Spektrale Fotoempfindlichkeit, $\lambda = 850\text{ nm}$ Spectral sensitivity	S_λ	0.62	0.60	A/W
Quantenausbeute, $\lambda = 850\text{ nm}$ Quantum yield	η	0.90	0.88	<u>Electrons</u> Photon

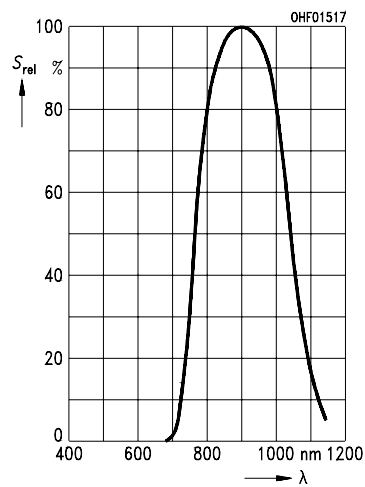
Kennwerte ($T_A = 25^\circ \text{C}$)**Characteristics** (cont'd)

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value		Einheit Unit
		SFH 229	SFH 229 FA	
Leerlaufspannung Open-circuit voltage $E_v = 1000 \text{ lx}$, Normlicht/standard light A, $T = 2856 \text{ K}$ $E_e = 0.5 \text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 950 \text{ nm}$	V_O V_O	450 (≥ 400) –	– 420 (≥ 370)	mV mV
Kurzschlußstrom Short-circuit current $E_v = 1000 \text{ lx}$, Normlicht/standard light A, $T = 2856 \text{ K}$ $E_e = 0.5 \text{ mW/cm}^2$, $\lambda = 950 \text{ nm}$	I_{SC} I_{SC}	27 –	– 9	μA μA
Anstiegs- und Abfallzeit des Fotostromes Rise and fall time of the photocurrent $R_L = 50 \Omega$; $V_R = 10 \text{ V}$; $\lambda = 850 \text{ nm}$; $I_p = 800 \mu\text{A}$	t_r, t_f	10	10	ns
Durchlaßspannung, $I_F = 100 \text{ mA}$, $E = 0$ Forward voltage	V_F	1.3	1.3	V
Kapazität, $V_R = 0 \text{ V}$, $f = 1 \text{ MHz}$, $E = 0$ Capacitance	C_0	13	13	pF
Temperaturkoeffizient von V_O Temperature coefficient of V_O	TC_V	– 2.6	– 2.6	mV/K
Temperaturkoeffizient von I_{SC} Temperature coefficient of I_{SC} Normlicht/standard light A $\lambda = 950 \text{ nm}$	TC_I	0.18 –	– 0.2	%/K
Rauschäquivalente Strahlungsleistung Noise equivalent power $V_R = 10 \text{ V}$, $\lambda = 850 \text{ nm}$	NEP	6.5×10^{-15}	6.5×10^{-15}	$\frac{\text{W}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
Nachweisgrenze, $V_R = 10 \text{ V}$, $\lambda = 850 \text{ nm}$ Detection limit	D^*	8.4×10^{12}	8.4×10^{12}	$\frac{\text{cm} \times \sqrt{\text{Hz}}}{\text{W}}$

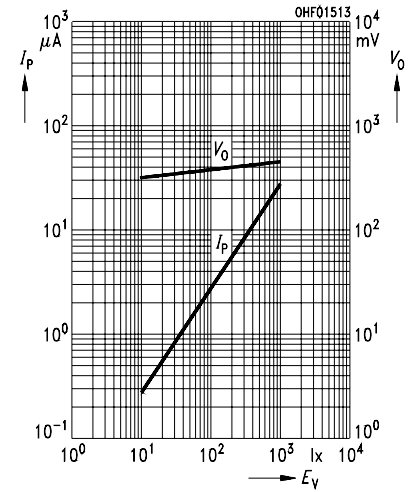
Relative Spectral Sensitivity
 $S_{rel} = f(\lambda)$
SFH 229



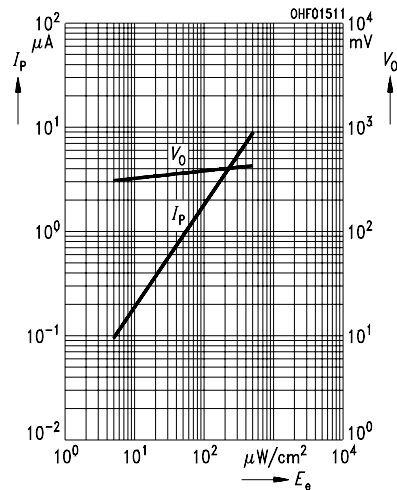
Relative Spectral Sensitivity
 $S_{rel} = f(\lambda)$
SFH 229 FA



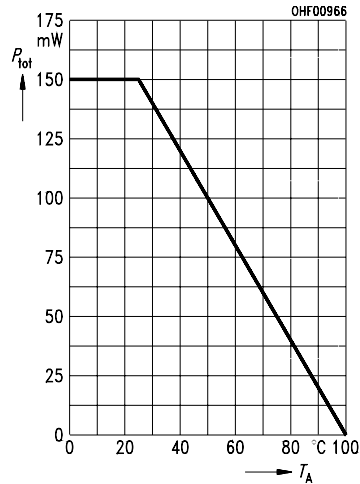
Photocurrent $I_P = f(E_v)$, $V_R = 5\text{ V}$
Open-Circuit Voltage $V_O = f(E_v)$
SFH 229



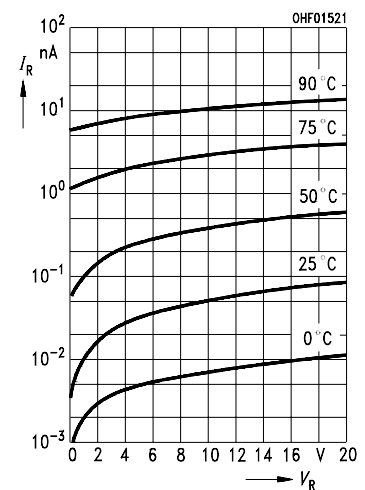
Photocurrent $I_P = f(E_e)$, $V_R = 5\text{ V}$
Open-Circuit Voltage $V_O = f(E_e)$
SFH 229 FA



Total Power Dissipation
 $P_{tot} = f(T_A)$

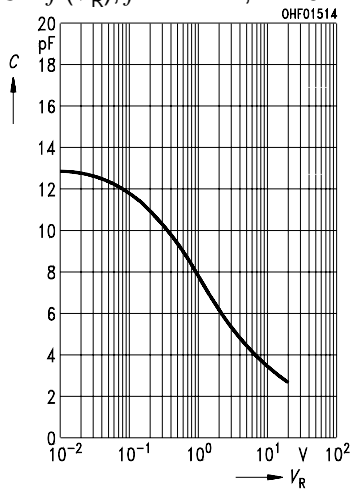


Dark Current
 $I_R = f(V_R), E = 0$



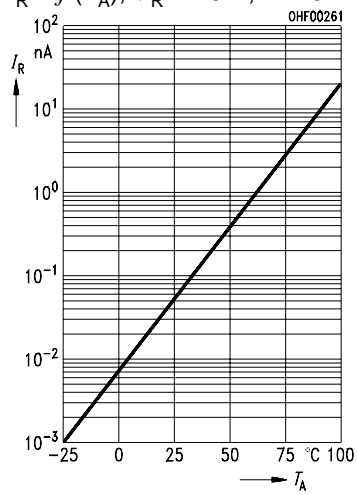
Capacitance

$$C = f(V_R), f = 1 \text{ MHz}, E = 0$$



Dark Current

$$I_R = f(T_A), V_R = 10 \text{ V}, E = 0$$



Directional Characteristics

$$S_{rel} = f(\varphi)$$

