

TP d'introduction 2

Objectifs pédagogiques

masse vs. mode commun	appareils de mesure (propriété)
mode X-Y	appareils de mesure (manipulation)
amplitude, valeur efficace, etc.....	signal (propriété)
caractéristique $I(U)$	composant non-linéaire (caractérisation statique)
point de polarisation et petit signal	composant non-linéaire (caractérisation dynamique)

Matériel utilisé

Oscilloscope	résistance $1k\Omega \times 2$	plaque à trous
GBF	diodes 1N4148 ($\times 2$), BZX55-5V6 ($\times 2$)	
Multimètre		

Résumé du TP

Le but de ce TP est de caractériser un composant qui possède une caractéristique non linéaire : une relation non-linéaire entre la tension appliquée aux bornes et le courant le traversant. Contrairement à une résistance – où la relation courant-tension $I(U)$ est linéaire : $I(U) = U/R$ – la relation sera ici une fonction non-linéaire. On peut alors définir pour ces composants une caractéristique statique – pour une tension donnée, quel est le courant qui le traverse? – et des caractéristiques dynamiques (a priori une pour chaque fréquence) : qu'induisent des petites variations à une fréquence f autour d'une tension continue en terme de courant?

1 Introduction au TP

1.1 Représentation des signaux et incertitudes de mesure

Il s'avérera utile de bien savoir mesurer les différentes composantes d'un signal générique du type $v(t) = \langle v \rangle + \tilde{v}(t)$, il faudra donc maîtriser notamment les modes AC, DC et AC+DC sur les différents appareils.

1.2 La diode

Ce TP a donc pour but de caractériser un composant non-linéaire. Le dipôle électrique qui a été choisi est la diode.



Ce TP n'a pas pour but d'étudier la diode en soi. Elle ne servira qu'à titre d'exemple d'un composant non-linéaire.

Une diode peut-être vue comme un composant à résistance variable, car – contrairement à la loi d'Ohm où $I(U) = U/R$ – une des modélisations possibles de la diode (modèle de Schokley) donne une relation du type

$$I(U) = I_s \left(\exp\left(\frac{U}{U_t}\right) - 1 \right) \quad (1)$$

avec I_s le courant de saturation et U_t le potentiel thermique de la diode (25mV à température ambiante, 175mV à la température de 175°C, qui est proche de la température réelle de la jonction dans un cas réel), voir Fig.1a. I_s et U_t peuvent être considérés comme constants dans le cadre de ce TP. Ceci reste bien entendu un modèle théorique. D'autres modélisations peuvent être adoptées suivant l'échelle d'observation de la caractéristique – la caractéristique d'un interrupteur à seuil de tension (Fig.1c) ou encore un ensemble de deux demi-droites (Fig.1b, modèle de la diode avec tension de seuil et résistance série peuvent également être utilisés.

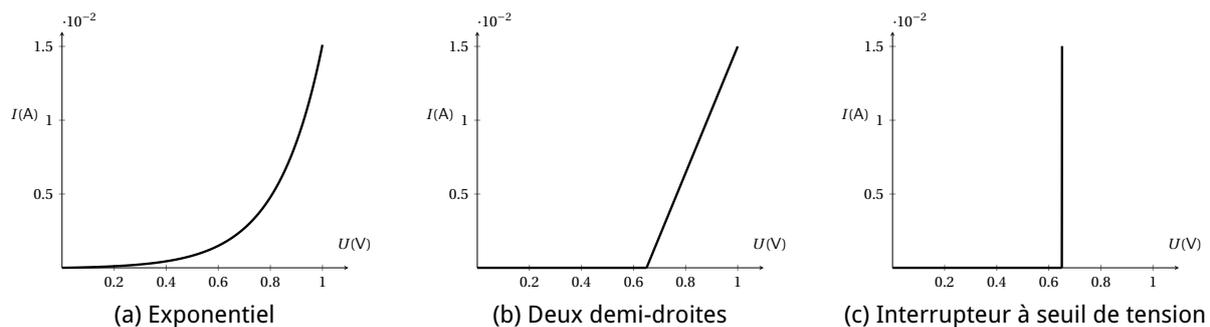


FIGURE 1: Modèles pour la caractéristique $I(U)$ de la diode soumise à une polarisation directe; du modèle le plus proche de la caractéristique physique de la jonction PN seule (a) vers l'abstraction la plus simple (c).

Physiquement, la diode est constituée d'une anode et d'une cathode. On dira que la diode est polarisée en direct¹ quand $U_{\text{anode}} - U_{\text{cathode}} > 0$, voir Fig. 2.

L'Annexe A présente la fiche technique de la diode 1N4148.

1. Ceci est le cas pour une diode idéale, en pratique une tension de seuil doit être franchie avant que la diode ne soit polarisée en direct. Typiquement, cette tension est de l'ordre de 0,6 à 0,7V pour la technologie silicium (comme pour le 1N4148) et de 0,2 à 0,3V pour la technologie germanium.

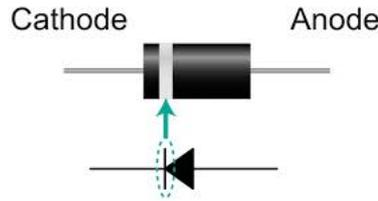


FIGURE 2: Diode avec ses deux pôles : Anode et Cathode. La cathode est repérée par un anneau clair.

1.3 Point de polarisation

Pour étudier un montage incluant un composant à caractéristique $I(V)$ non-linéaire, par exemple un montage simple comme celui de la Fig.3, on va chercher à exprimer la tension U à ses bornes en fonction de la tension U_e imposée par le générateur. Sachant que $U_R = I \cdot R$, et que $U = U_e - U_R = U_e - I \cdot R$, nous avons deux équations à deux inconnues

$$\begin{cases} U = U_e - I \cdot R & \text{[droite de charge]} \\ I = I_s \cdot (\exp(U/U_t) - 1) & \text{[caractéristique de la diode]} \end{cases}$$

que l'on peut résoudre pour U et I . Le point (U, I) est appelé le point de polarisation et dépend de la tension U_e et de la résistance R .



Quand la résistance R est de même ordre de grandeur que la résistance interne du GBF (R_g), il faut récrire les équations en fonction de la tension demandée U_g qui n'est plus la tension fournie U_e (voir TP intro 1)! La résistance totale sera alors $R + R_g$.

En pratique, la résolution est une approximation (car les équations ne sont que des modèles), et souvent une résolution graphique est utilisée pour avoir une idée des ordres de grandeur, voir Fig.4.(intersection de deux courbes dans le plan $U(I)$).

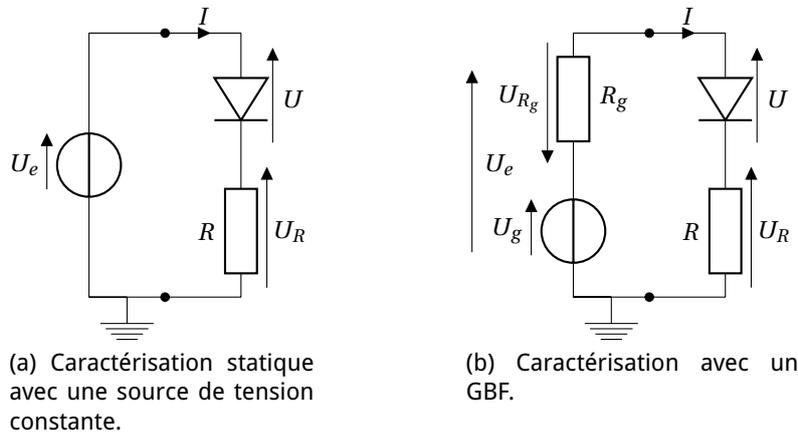


FIGURE 3: Montage pour la caractérisation d'une diode en limitant le courant avec une résistance.

1.4 Caractérisation petit signal

Pour de faibles amplitudes de variations autour du point de polarisation, un équivalent de la notion de résistance peut être définie : la *résistance dynamique* :

$$r(I) \stackrel{\text{déf.}}{=} \frac{d}{dI} U(I) \tag{2}$$

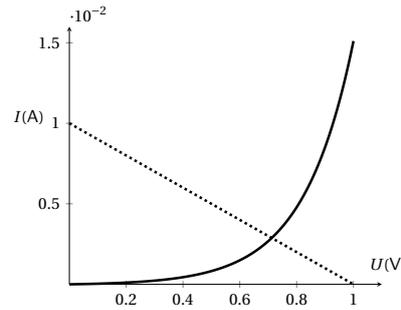


FIGURE 4: Point de polarisation estimé par la méthode graphique pour $U_e = 1V$ et $R = 100\Omega$.

Pour des composants non-linéaires ceci correspond à une linéarisation de la courbe $U(I)$ autour du point de polarisation (U, I) fixé. Plus particulièrement, c'est le développement limité au premier ordre de la caractéristique $U(I) : U(I + \delta I) \approx U(I) + \frac{d}{dI} U(I) \cdot \delta I = U(I) + r \cdot \delta I$ d'où $\delta U \approx r \cdot \delta I$.

Dans le cas de la caractéristique linéaire d'un dipôle linéaire purement résistif, on retrouve bien que la résistance dynamique est égale à la résistance ! : $r(I) = \frac{d}{dI} U(I) = R$ et dans ce cas, $r(I)$ ne dépend pas de la tension appliquée, comme attendu.

Soit maintenant une tension sinusoïdale de moyenne non-nulle $v(t) = \langle v \rangle + \tilde{v}(t)$ qui induit un courant $i(t) = \langle i \rangle + \tilde{i}(t)$ traversant le composant de caractéristique non linéaire, la résistance dynamique autour du point de polarisation $\langle v \rangle$ s'exprime alors comme

$$r \approx \hat{v} / \hat{i} = \tilde{v}_{\text{eff}} / \tilde{i}_{\text{eff}}$$

avec \tilde{v} et \tilde{i} d'amplitude suffisamment faible telle que la relation $\tilde{v}(\tilde{i})$ est approximativement linéaire². Effectivement, ceci est d'autant plus important en électronique où la linéarité garantit la préservation de l'intégrité d'un signal (une sinusoïde reste une sinusoïde, sans qu'elle change d'allure).

Pour le cas de la diode, la définition (2) et la relation (1) amènent à :

$$r(I) = \frac{U_t}{I + I_s} \quad \text{ou encore} \quad r(U) = \frac{U_t}{I_s} \exp\left(-\frac{U}{U_t}\right) .$$

La résistance dépend donc effectivement de la tension appliquée et du courant la traversant.

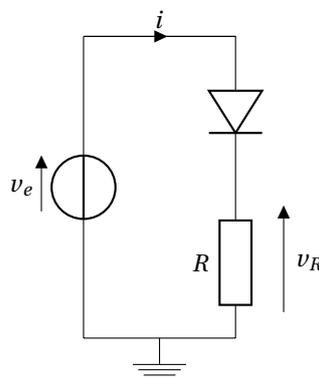


FIGURE 5: Caractérisation dynamique d'une diode en série avec une charge résistive. La charge permet de polariser la diode à un point $\langle v_d \rangle$ autour duquel des variations \tilde{v}_d seront appliquées.

2. En l'occurrence, la relation $\tilde{i}(\tilde{v})$ sera également approximativement linéaire, voir aussi en annexe.

1. Quel est le courant maximal que peut supporter la diode quand elle est polarisée en direct (*forward* en anglais)? Utiliser les données constructeur dans l'Annexe A et choisir le plus petit entre les courants continu et moyen.
2. Les résistances utilisées sont dimensionnées pour une puissance maximum de 1/2W; quelle est l'intensité moyenne maximale de courant que nous pouvons utiliser si la tension continue maximale est de 15V.

Si l'on considère que lorsque la diode est passante la tension à ses bornes est approximativement : $v_d \approx 0,6V$, choisir R_{\min} la « bonne valeur » pour la résistance de protection (valeur minimale que prendra R dans la Fig.5), sachant que le montage est soumis à une tension moyenne maximale $\langle v_g \rangle_{\max}$ de 15V.

Considérer la résistance dynamique $r = \frac{d}{di_d} v_d$ pour le montage de la Fig.5. Comment obtenir cette valeur à partir des mesures de v_d et i_d par multimètre? Et si seules les tensions v_R et v_e étaient disponibles?

1.5 Caractérisation grand signal

On s'intéresse à la fonction de transfert non-linéaire $v_R(v_e)$, montage de la Fig.5. Pour la diode, le courant est quasi-nulle pour toute tension $v_d < V_{seuil} = 0,65V$ et $v_d = V_{seuil} = 0,65V$ est constante au-delà de ce seuil. Pour des tensions avec des grandes variations $v_e = \langle v_e \rangle + \tilde{v}_e$, la sortie sur la résistance vaudra :

$$v_R = \begin{cases} 0 & \text{si } v_e < 0,65V \\ v_e - 0,65V & \text{sinon} \end{cases}$$

Pour des signaux de grandes amplitudes $v_e + \tilde{v}_e \gg 0,65$ ceci reste une bonne première approximation.

2 Travail en salle

2.1 Non-linéarité (15min)

Dans un premier temps, il s'avère utile de vérifier qu'un système tel que celui donné en Fig.5 est un système non-linéaire; autrement dit, quela sortie $v_s = v_R$ est une fonction non-linéaire de v_e . Pour cela, prendre $R = 1k\Omega$ et fair le montage de la Fig.5. Afin de vérifier la non-linéarité, un GBF fournira une tension $v_e = \langle v_e \rangle + \hat{v}_e \sin(2\pi f t + \varphi)$ avec $f = 100Hz$, $\langle v_e \rangle \in \{1V, 2V\}$ et $\hat{v}_e \in \{100mV, 1V\}$. Mesurer v_e et v_s à l'aide de multimètres pour les quatre combinaisons possibles et conclure quant à la linéarité du signal.

2.2 Caractérisation statique de la diode (45min)

Il s'agit ici de mesurer simultanément le courant traversant la diode et la tension à ses bornes. Pour cela, un seul multimètre à double affichage sera utilisé. Comme vu dans la section 1.2, la diode ne limite pas vraiment le courant qui la traverse en direct, elle se comporte quasiment comme un court-circuit à tensions directes élevées. Il faudra donc limiter le courant dans la branche de charge en rajoutant une résistance de protection en série avec notre diode (Fig. 3). Prendre $R = R_{\min}$, valeur calculée dans la préparation, section 1.3

Avec un multimètre à double affichage et une source de tension continue U_g , réaliser les mesures de I en fonction de U (voir Fig.3) :

mesures			
U_g [mV]	U [mV]	I [mA]	$I = f(U, U_e, R)$ [mA]
MMP	MMT	MMT	calcul

FIGURE 6: Tableau de mesures pour la caractérisation statique.

1. mesurer U et I simultanément au multimètre (faire le schéma de mesure avant de cabler le montage);
2. mesurer U et U_e simultanément au multimètre (faire le schéma de mesure avant de cabler le montage) et calculer I en fonction de U , R et U_g ;

Un multimètre portable servira à mesurer la tension $U_e (\neq U_g)$ aux bornes de la source de tension.

Choisir judicieusement 10 points de mesure (U, I) pour U **n'excédant pas** 1V. Un tableau de mesures comme celui de la Fig.6 sert à organiser vos mesures, mais il n'apparaîtra pas dans la fiche de mesures! L'information sera représentée sous la forme de trois graphiques :

1. $I(U)$ en log-linéaire (pour comparaison avec les données du constructeur)
2. $I(U)$ en linéaire-linéaire (pour une comparaison ultérieure)
3. $U(U_e)$.



Même si toutes les précautions sont prises pour ne pas excéder le courant maximal permis dans la diode, veiller à régler votre source de tension à la tension minimale avant de la brancher sur votre montage! **Veiller à ce que U_g reste inférieure à 15V!**

2.3 Caractérisation statique de la diode : mesures semi-automatiques (45min)

Au lieu de mesurer la caractéristique point par point, une mesure semi-automatique est proposée. Pour cela, un GBF fournira une tension v_g qui varie lentement entre 0 et 5V. La caractéristique $I(U)$ est visualisée à l'oscilloscope pour $R = 1k\Omega$.

Au GBF, programmer une tension en « rampe » à rapport cyclique 50% d'amplitude crête-à-crête 5V, de tension continue 2,5V et d'une période de 10ms. Comment faire pour afficher U et I à l'oscilloscope en convention récepteur (détailler vos démarches dans *le protocole de mesure*)? Rapporter les résultats sous forme d'un oscillogramme, en mettant U en abscisse et I en ordonnées (mode XY).

2.4 Point de polarisation et résistance dynamique (45min)

Le but de cette manipulation est de déterminer la résistance dynamique. Avant de commencer les mesures, déterminer grossièrement une valeur de la résistance dynamique, en partant des mesures de la section 2.2. Puis à l'aide de la caractérisation de la section 2.3, déterminer les valeurs de la résistance dynamique pour $U \in \{100\text{mV}, 650\text{mV}, 1,5\text{V}\}$.

Afin de pouvoir

considérer la courbe localement comme linéaire, des variations sinusoïdales \tilde{v}_d seront appliquées avec une amplitude maximale $\hat{v}_{d,\text{max}}$ qui dépendra de $\langle v_d \rangle$ (pourquoi?). Le signal d'intérêt \tilde{v}_d aura alors une atténuation plus ou moins importante selon le point de polarisation choisi, car ce point déterminera la résistance dynamique r . Afin de pouvoir polariser la diode, une résistance peut être utilisée comme charge en série avec la diode, voir Fig.5.

Visualiser à l'oscilloscope \tilde{v}_d en fonction de \tilde{i}_d en utilisant le mode d'affichage X-Y. Que se passe-t-il quand \tilde{v}_d est trop élevé en amplitude? Comment vérifier que la relation $\tilde{v}_d(\tilde{i}_d)$ est linéaire? Mesurer la pente $\frac{\Delta\tilde{v}_d}{\Delta\tilde{i}_d} \approx \frac{d}{di_d} v_d$ de la droite $\tilde{v}_d = \alpha \cdot \tilde{i}_d$ pour $\langle v_d \rangle \in \{100\text{mV}, 500\text{mV}, 650\text{mV}, 2\text{V}\}$ et en déduire la résistance dynamique r pour ces trois valeurs de $\langle v_d \rangle$.



La synchronisation par déclenchement est difficile quand \tilde{i}_d et \tilde{v}_d sont de petite amplitude. Il est cependant possible de mesurer v_e et v_R et d'en déduire la résistance dynamique r , voir la préparation de la section 1.4. Créer une fiche de mesure en détaillant le protocole de mesure

2.5 La diode comme interrupteur (10min)

La non-linéarité de la diode pour des signaux de grande amplitude peut être résumée par l'action d'un interrupteur commandé par la tension à ses bornes, voir la caractéristique de la Fig.1c. Vérifier cette approximation en utilisant le GBF avec $v_e = \langle v_e \rangle + \hat{v}_e \sin(2\pi f t + \varphi)$ où $f = 100\text{Hz}$ et $\hat{v}_e = 2,5\text{V}$. Faire varier $\langle v_e \rangle$ telle que $v_{e,\min} \geq -5\text{V}$ et $v_{e,\max} \leq 6\text{V}$. Déterminer la valeur de la tension de seuil – tension à partir de laquelle l'interrupteur se ferme – et commenter les résultats.

2.6 Pour aller plus loin : la diode Zener (10min)

Une diode Zener est principalement utilisée en polarisation inverse : $U_{\text{anode}} - U_{\text{cathode}} < 0$. Caractériser la relation $I(U)$ pour une diode Zener BZX55-5V6 avec $U \in [-10, 3]\text{V}$. Faire une étude petits signaux autour de $\langle v_d \rangle \in \{-5,60; -1,00; 0,00; 0,65; 3\}\text{V}$. À quoi correspond selon vous la partie 5V6 dans le nom du composant?

Appendix

A Notice du fabricant pour la diode 1N4148



www.vishay.com

1N4148

Vishay Semiconductors

Small Signal Fast Switching Diodes



FEATURES

- Silicon epitaxial planar diode
- Electrically equivalent diodes: 1N4148 - 1N914
- Material categorization:
For definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?99912



RoHS
COMPLIANT
HALOGEN
FREE

APPLICATIONS

- Extreme fast switches

MECHANICAL DATA

Case: DO-35

Weight: approx. 105 mg

Cathode band color: black

Packaging codes/options:

TR/10K per 13" reel (52 mm tape), 50K/box

TAP/10K per ammpack (52 mm tape), 50K/box

PARTS TABLE				
PART	ORDERING CODE	TYPE MARKING	INTERNAL CONSTRUCTION	REMARKS
1N4148	1N4148-TAP or 1N4148TR	V4148	Single diode	Tape and reel/ammpack

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Repetitive peak reverse voltage		V_{RRM}	100	V
Reverse voltage		V_R	75	V
Peak forward surge current	$t_p = 1\text{ }\mu\text{s}$	I_{FSM}	2	A
Repetitive peak forward current		I_{FRM}	500	mA
Forward continuous current		I_F	300	mA
Average forward current	$V_R = 0$	$I_{F(AV)}$	150	mA
Power dissipation	$l = 4\text{ mm}, T_L = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$	P_{tot}	440	mW
	$l = 4\text{ mm}, T_L \leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	P_{tot}	500	mW

THERMAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Thermal resistance junction to ambient air	$l = 4\text{ mm}, T_L = \text{constant}$	R_{thJA}	350	K/W
Junction temperature		T_j	175	$^{\circ}\text{C}$
Storage temperature range		T_{stg}	- 65 to + 150	$^{\circ}\text{C}$



www.vishay.com

1N4148

Vishay Semiconductors

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Forward voltage	$I_F = 10\text{ mA}$	V_F			1	V
Reverse current	$V_R = 20\text{ V}$	I_R			25	nA
	$V_R = 20\text{ V}, T_J = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	I_R			50	μA
	$V_R = 75\text{ V}$	I_R			5	μA
Breakdown voltage	$I_R = 100\text{ }\mu\text{A}, t_p/T = 0.01,$ $t_p = 0.3\text{ ms}$	$V_{(BR)}$	100			V
Diode capacitance	$V_R = 0\text{ V}, f = 1\text{ MHz},$ $V_{HF} = 50\text{ mV}$	C_D			4	pF
Rectification efficiency	$V_{HF} = 2\text{ V}, f = 100\text{ MHz}$	η_r	45			%
Reverse recovery time	$I_F = I_R = 10\text{ mA},$ $i_R = 1\text{ mA}$	t_{rr}			8	ns
	$I_F = 10\text{ mA}, V_R = 6\text{ V},$ $i_R = 0.1 \times I_R, R_L = 100\text{ }\Omega$	t_{rr}			4	ns

TYPICAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)

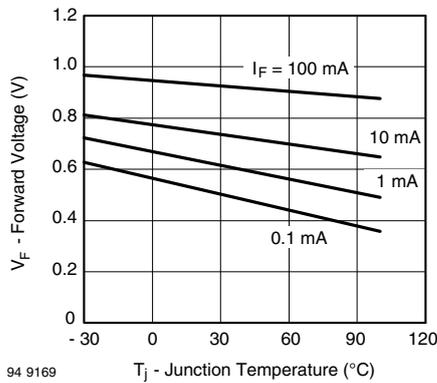


Fig. 1 - Forward Voltage vs. Junction Temperature

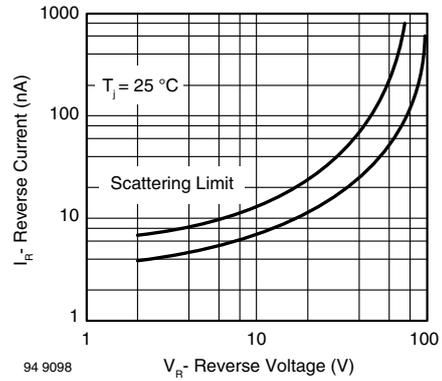


Fig. 3 - Reverse Current vs. Reverse Voltage

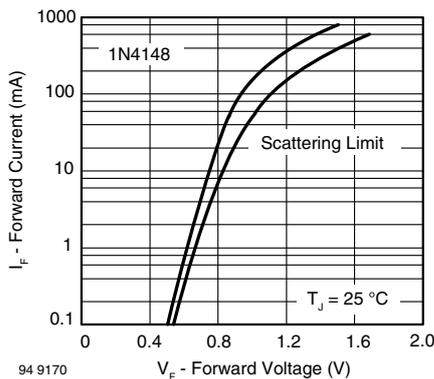


Fig. 2 - Forward Current vs. Forward Voltage

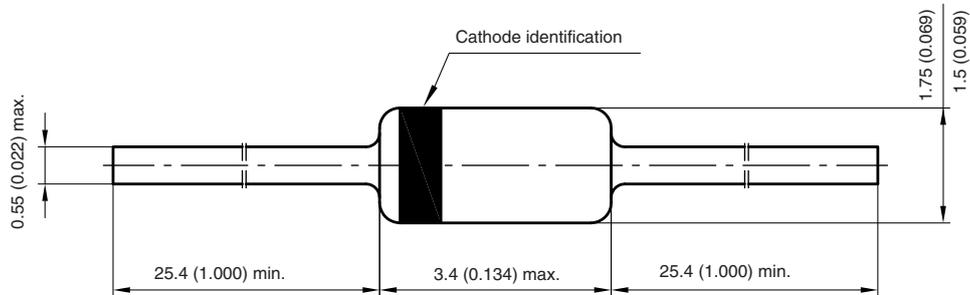


www.vishay.com

1N4148

Vishay Semiconductors

PACKAGE DIMENSIONS in millimeters (inches): **DO-35_02**



Document no.: 6.560-5004.12-4
Created - Date: 17. March 2008
21145



Disclaimer

ALL PRODUCT, PRODUCT SPECIFICATIONS AND DATA ARE SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE TO IMPROVE RELIABILITY, FUNCTION OR DESIGN OR OTHERWISE.

Vishay Intertechnology, Inc., its affiliates, agents, and employees, and all persons acting on its or their behalf (collectively, "Vishay"), disclaim any and all liability for any errors, inaccuracies or incompleteness contained in any datasheet or in any other disclosure relating to any product.

Vishay makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of the products for any particular purpose or the continuing production of any product. To the maximum extent permitted by applicable law, Vishay disclaims (i) any and all liability arising out of the application or use of any product, (ii) any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages, and (iii) any and all implied warranties, including warranties of fitness for particular purpose, non-infringement and merchantability.

Statements regarding the suitability of products for certain types of applications are based on Vishay's knowledge of typical requirements that are often placed on Vishay products in generic applications. Such statements are not binding statements about the suitability of products for a particular application. It is the customer's responsibility to validate that a particular product with the properties described in the product specification is suitable for use in a particular application. Parameters provided in datasheets and / or specifications may vary in different applications and performance may vary over time. All operating parameters, including typical parameters, must be validated for each customer application by the customer's technical experts. Product specifications do not expand or otherwise modify Vishay's terms and conditions of purchase, including but not limited to the warranty expressed therein.

Except as expressly indicated in writing, Vishay products are not designed for use in medical, life-saving, or life-sustaining applications or for any other application in which the failure of the Vishay product could result in personal injury or death. Customers using or selling Vishay products not expressly indicated for use in such applications do so at their own risk. Please contact authorized Vishay personnel to obtain written terms and conditions regarding products designed for such applications.

No license, express or implied, by estoppel or otherwise, to any intellectual property rights is granted by this document or by any conduct of Vishay. Product names and markings noted herein may be trademarks of their respective owners.

B Annexes

B.1 La linéarisation

Soit la fonction $i_d(\langle v_d \rangle) = I_s \left(\exp\left(\frac{\langle v_d \rangle}{U_s}\right) - 1 \right)$ où $\langle v_d \rangle$ est la tension moyenne ou la tension de polarisation. Son développement limité pour des variations $v = \langle v_d \rangle + \tilde{v}$ faibles autour de $\langle v_d \rangle$ est donné par

$$\begin{aligned} i_d(\langle v_d \rangle + \tilde{v}) &= I_s \left(\exp\left(\frac{\langle v_d \rangle}{U_s}\right) - 1 \right) + \frac{I_s}{U_s} \exp\left(\frac{\langle v_d \rangle}{U_s}\right) \tilde{v} + \mathcal{O}(\tilde{v}^2) \\ &\approx i_d(\langle v_d \rangle) + \left. \frac{d}{dv_d} i_d(v_d) \right|_{v_d=\langle v_d \rangle} \tilde{v} \\ &\approx \langle i_d \rangle + \underbrace{\frac{\Delta i}{\Delta v}}_{=r_d^{-1}} \tilde{v} \end{aligned}$$

tant que l'approximation linéaire est valable (donc pour \tilde{v} d'amplitude suffisamment faible). On prend alors $\Delta i \approx \tilde{i}$ et $\Delta v = \tilde{v}$ et on en déduit

$$r_d \approx \frac{\tilde{v}}{\tilde{i}} .$$