

Etude d'une sonde dédiée à la mesure de l'oxygène dissous dans une solution

Cet examen dure 2H. Vous avez droit à une feuille manuscrite A4 recto/verso, ainsi qu'à une calculatrice. Les trois exercices sont indépendants, même s'ils se rapportent à un schéma global. Les résultats doivent être justifiés, les étapes de calculs permettant de les obtenir (par exemple les gains et autres fonctions de transfert) doivent apparaître dans votre copie.

Contexte et généralités

L'oxygène dissous (OD) dans l'eau est d'une importance capitale et doit être contrôlé dans de nombreuses applications. Par exemple, ce paramètre est souvent suivi dans un milieu de culture cellulaire.¹ La figure 1 montre une sonde optique permettant la mesure de l'OD dans une solution¹. L'élément sensible est un revêtement fluorescent déposé sur la pointe de la sonde au moyen d'une technique appelée Sol-Gel. Le revêtement contient un fluorophore basé sur un complexe de ruthénium fluorescent qui absorbe la lumière bleue et émet une lumière rouge. L'intensité de la fluorescence (lumière rouge) et sa durée de vie sont étroitement liées à la quantité d'oxygène dissous dans l'eau, au moyen des équations de Stern-Volmer :

$$I_0/I = 1 + K_{SV} p_{O_2} \quad (1)$$

$$\tau_0/\tau = 1 + K_{SV} p_{O_2} \quad (2)$$

où I et τ sont respectivement l'intensité de fluorescence et la durée de vie de l'état excité du fluorophore. I_0 et τ_0 sont leurs valeurs en l'absence d'oxygène. p_{O_2} est la pression partielle d'oxygène et K_{SV} une constante. En d'autres termes, l'intensité de fluorescence et le temps de vie diminuent en présence d'oxygène.

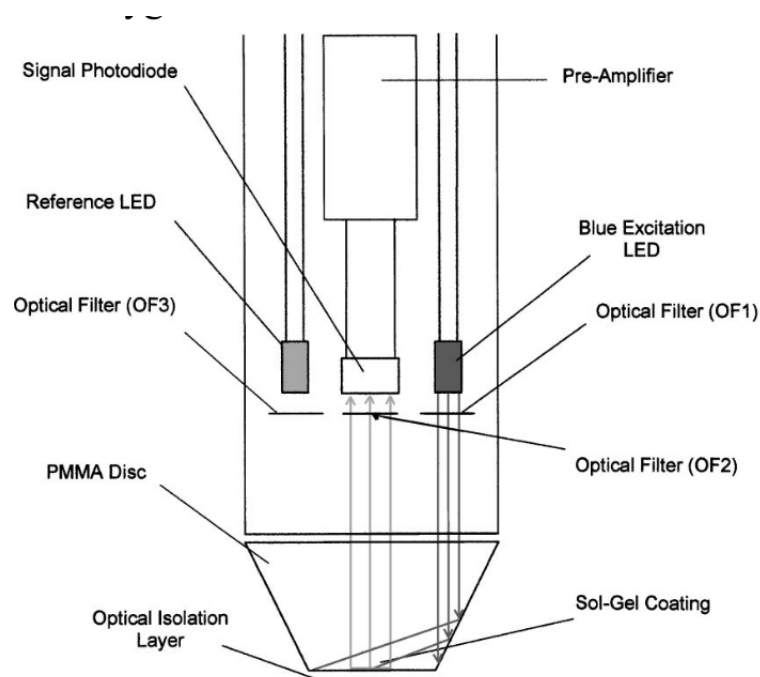


Figure 1: Schéma de la sonde optique pour la mesure de l'oxygène dissous (OD)¹

1. McDonagh, C., Kolle, C., McEvoy, A. K., Dowling, D. L., Cafolla, A. A., Cullen, S. J., & MacCraith, B. D. (2001). Phase fluorometric dissolved oxygen sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 74(1-3), 124-130.

La sonde montrée dans la figure 1 contient un système optique composé d'une DEL bleue qui est utilisée pour exciter la couche fluorescente et d'une seconde DEL rouge, pour générer un signal de référence afin de calibrer l'électronique. Un filtre optique (OF2 sur la figure 1) ne laisse passer que la lumière rouge vers une photodiode qui génère le signal de référence. Pour améliorer le rejet de la lumière ambiante, le système exploite une modulation à 20 kHz de chaque signal. Grâce aux équations (1) et (2), deux stratégies sont donc applicables : soit l'intensité de la fluorescence peut être enregistrée, donnant accès à $\frac{I_0}{T}$; soit le déphasage induit par la fluorescence peut être obtenu. Il est directement lié à la durée de vie τ dans l'équation (2).

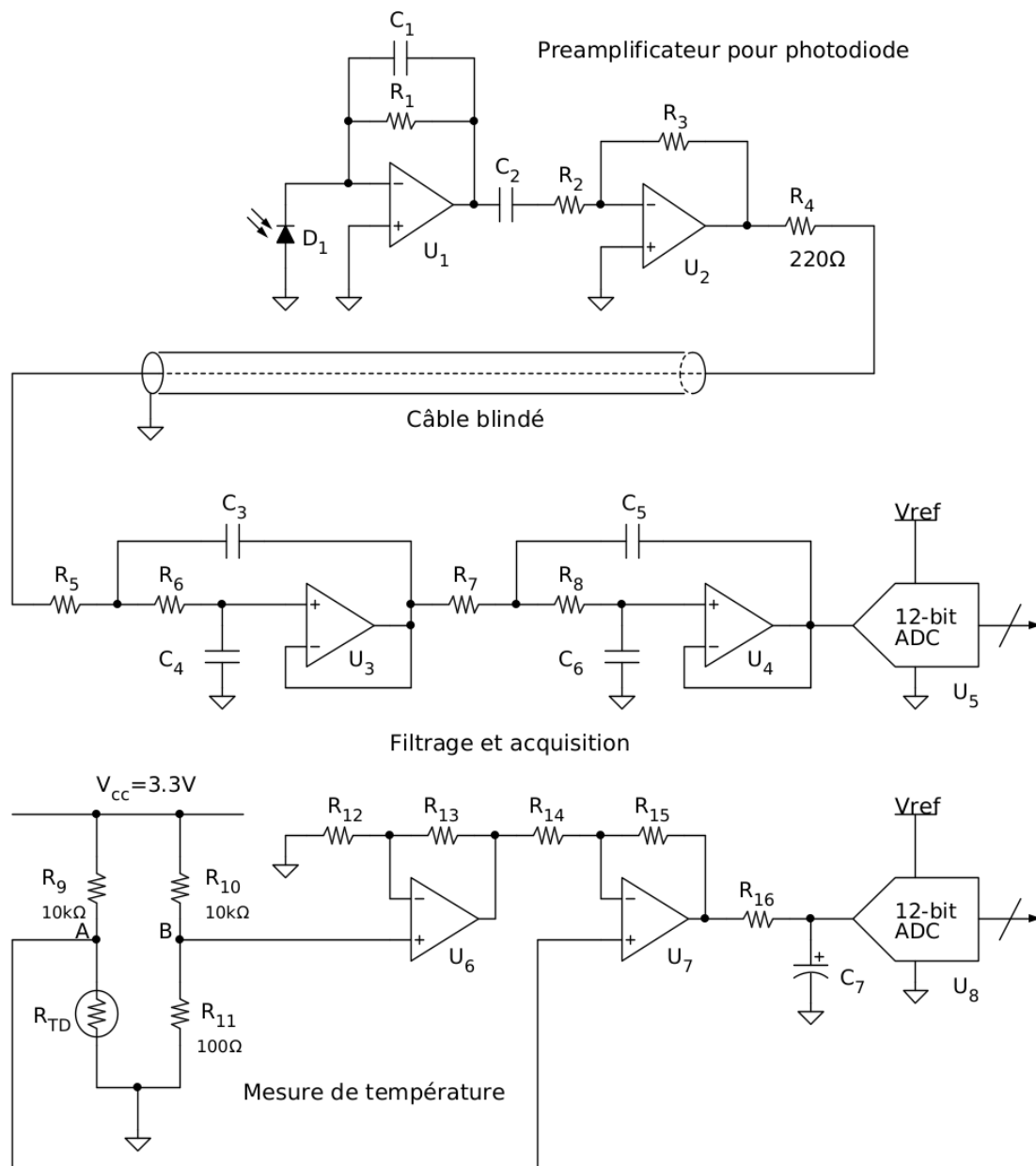


Figure 2: Schéma complet du circuit étudié dans les exercices 1, 2 et 3. Des rails d'alimentation à $\pm 3,3\text{ V}$, convenablement découplés, alimentent tous les amplificateurs opérationnels. Les sorties des convertisseurs analogiques sont connectées à un circuit d'acquisition numérique.

La figure 2 montre un circuit simplifié qui peut être utilisé pour l'acquisition des signaux provenant de la photodiode. Un capteur Pt100 est ajouté dans la sonde pour mesurer la température de la solution en même temps que la concentration en oxygène. Nous n'étudions pas le contrôle des LEDs bleue et rouge utilisées pour la référence et l'excitation. Le système fournit le signal de sortie à un convertisseur analogique-numérique et l'une des deux stratégies décrites précédemment est appliquée numériquement.

Exercice 1 : Pré-amplificateur

Nous considérons le circuit préamplificateur, monté à l'intérieur de la sonde et composé de U_1 et U_2 (AOP) ainsi que de la photodiode D1 et des éléments passifs qui les entourent dans le circuit de la figure 2.

Répondre aux questions suivantes, **en négligeant C1** (cette capacité est nécessaire pour la stabilité).

1. Considérons pour D1 une photodiode Hamamatsu S1223 et une variation sinusoïdale de lumière incidente de 15 nW (crête à crête), à une longueur d'onde de 650 nm produite par la fluorescence collectée par la sonde. Calculer la variation du photocourant I_p généré dans la photodiode. La datasheet de la photodiode est fournie à la fin du sujet.
2. Choisir la valeur de la résistance R_1 pour obtenir, à la sortie de U_1 , une tension de 0,1 V crête à crête dans les conditions précisées à la question précédente.
3. En sachant que $R_2 = 1\text{ k}\Omega$, choisir la résistance R_3 pour qu'à la sortie de U_2 , la tension soit de 2 V crête à crête.
4. Choisir la valeur de C_2 pour que ce pré-amplificateur ait un comportement passe-haut avec une fréquence de coupure à -3 dB de 1 kHz.

Exercice 2 : Synthèse de filtres

Dans cet exercice, nous considérons le **filtre composé par U_3 et U_4** , ainsi que les éléments passifs qui les entourent.

Répondre aux questions suivantes :

1. Quel est l'ordre du filtre associé au circuit représenté sur la figure 2 ?
2. Déterminer la fonction de transfert du premier étage du filtre réalisé autour de U_3 , et la mettre sous la forme : $H(j\omega) = \frac{K}{1 + j\frac{\omega}{Q\omega_0} + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2}$. Les grandeurs canoniques Q , ω_0 et K sont à exprimer en fonction de R_4 , R_5 , R_6 , C_3 et C_4 .
3. En choisissant $R_4 + R_5 = R_6 = 4.7\text{ k}\Omega$, déterminer C_3 et C_4 pour que la fréquence de coupure de cet étage soit 96 kHz et le facteur de qualité $Q = \frac{1}{2}$.
4. En choisissant $R_7 = R_8 = 4.7\text{ k}\Omega$, déterminer C_5 et C_6 pour que la fréquence de coupure du deuxième étage soit 108 kHz et le facteur de qualité $Q = 0,8$.
5. Justifier que la fonction de transfert globale est bien le produit des deux fonctions de transfert.

Exercice 3 : Mesure de température

Dans cette partie, la température de la solution est obtenue au moyen d'une thermistance Pt100 (appelée RTD dans le schéma de la figure 2), incluse dans la sonde qui mesure

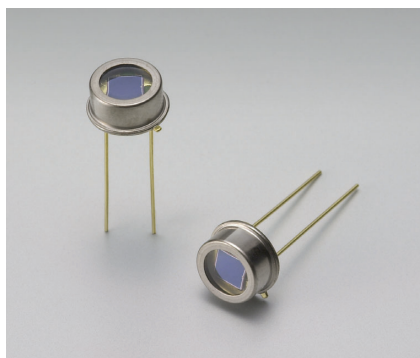
les concentrations d'OD. Sa résistance dépend de la température avec la relation suivante, où $\alpha = 0,0035/^{\circ}C$ et T est la température en $^{\circ}C$:

$$R_{TD} = 100\Omega (1 + \alpha T), \quad (3)$$

Répondre aux questions suivantes :

1. Calculer la relation entre la valeur de R_{TD} et la tension $\overset{V_{AB}}{\bar{V}_B}$, ~~entre le nœud B du pont et la référence~~. Montrer qu'elle est directement liée à la température T de l'équation (3).
2. Prendre $R_{12} = 4.7 k\Omega$. Décrire la fonction du circuit formé par U_6, U_7, R_{12} à R_{15} . Quelle relation doit-il exister entre les 4 résistances pour que la sortie ne dépende que du mode différentiel?
3. Déterminer alors R_{13} à R_{15} de façon à obtenir un gain différentiel de 35.

Pour $R_{16} = 165 k\Omega$, calculer la valeur de C_7 pour que le système soit limité en bande passante avec une fréquence de coupure à $-3 dB$ de $3 kHz$. Quel est le rôle de ce filtre?



S1223 series

For visible to near IR, precision photometry

Features

- High sensitivity in visible to near infrared range
- High reliability
- High-speed response
S1223: $f_c=30$ MHz
S1223-01: $f_c=20$ MHz
- Low capacitance

Applications

- Optical measurement equipment
- Analytical equipment, etc.

Structure

Parameter	S1223	S1223-01	Unit
Dimensional outline	(1)	(2)	-
Window material	Borosilicate glass		-
Package	TO-5		-
Photosensitive area size	2.4 × 2.8	3.6 × 3.6	mm
Effective photosensitive area	6.6	13	mm ²

Absolute maximum ratings

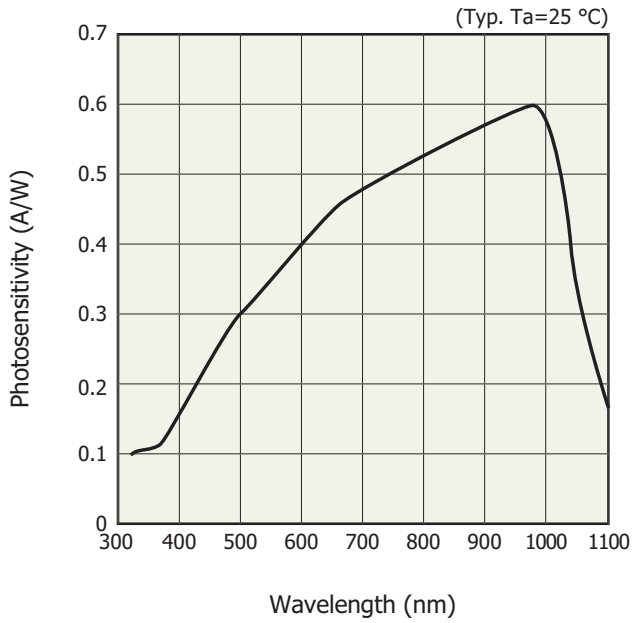
Parameter	Symbol	S1223	S1223-01	Unit
Reverse voltage	V_R max	30		V
Power dissipation	P	100		mW
Operating temperature	T_{opr}	-40 to +100		°C
Storage temperature	T_{stg}	-55 to +125		°C

Note: Exceeding the absolute maximum ratings even momentarily may cause a drop in product quality. Always be sure to use the product within the absolute maximum ratings.

Electrical and optical characteristics (Ta=25 °C)

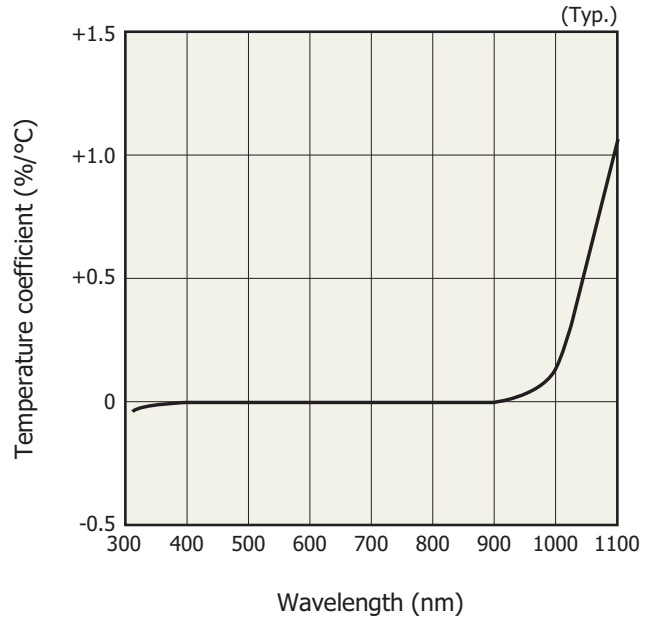
Parameter	Symbol	Condition	S1223			S1223-01			Unit
			Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
Spectral response range	λ		-	320 to 1100	-	-	320 to 1100	-	nm
Peak sensitivity wavelength	λ_p		-	960	-	-	960	-	nm
Photosensitivity	S	$\lambda=\lambda_p$	-	0.6	-	-	0.6	-	A/W
		$\lambda=660$ nm	-	0.45	-	-	0.45	-	
		$\lambda=780$ nm	-	0.52	-	-	0.52	-	
		$\lambda=830$ nm	-	0.54	-	-	0.54	-	
Short circuit current	I_{sc}	100 lx	5	6.3	-	10	13	-	μA
Dark current	I_D	$V_R=20$ V	-	0.1	10	-	0.2	10	nA
Temp. coefficient of I_D	T_{CID}		-	1.15	-	-	1.15	-	times/°C
Cutoff frequency	f _c	$V_R=20$ V, -3 dB	-	30	-	-	20	-	MHz
Terminal capacitance	C _t	$V_R=20$ V, f=1 MHz	-	10	-	-	20	-	pF
Noise equivalent power	NEP	$V_R=20$ V, $\lambda=\lambda_p$	-	9.4×10^{-15}	-	-	1.3×10^{-14}	-	W/Hz ^{1/2}

Spectral response



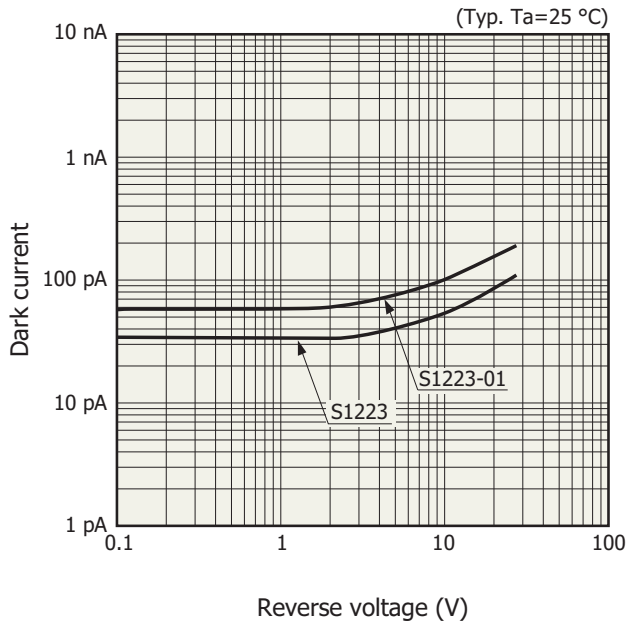
KPINB0143EB

Photosensitivity temperature characteristic



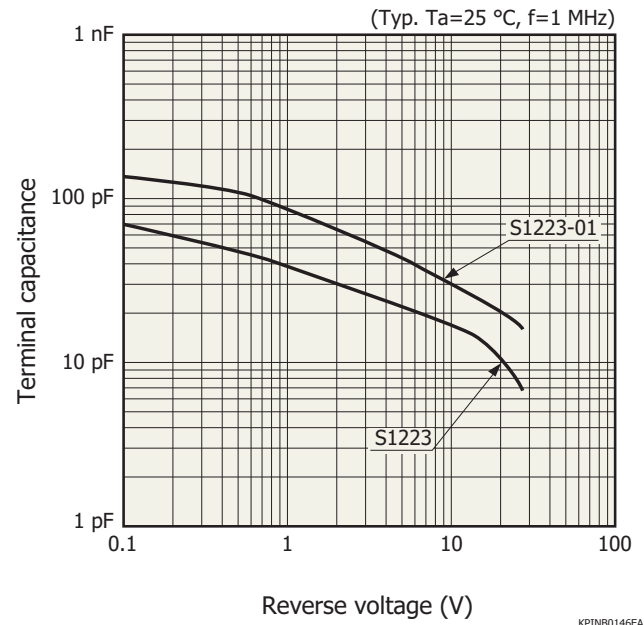
KPINB0144EB

Dark current vs. reverse voltage



KPINB0145EA

Terminal capacitance vs. reverse voltage



KPINB0146EA