ENIG

GCR1

ANNEE UNIVERSITAIRE 2023/2024

SAMEDI 28/10/2023
Durée : 1H30
Enseignant responsable : Mr BENZINA.H

Documents non autorisés.

DEVOIR DE CONTROLE DISPOSITIFS ET SYSTEMES MICROONDES

L'usage de calculatrices standards est autorisé. Les téléphones mobiles ou smartphone sont interdits. Ne pas oublier les unités dans vos calculs sinon ils sont faux ; une réponse parachutée est considérée comme fausse.

EXERCICES :

A t=300K, on a :

	$N_C(cm^{-3})$	$N_V(cm^{-3})$	$n_i(cm^{-3})$
Silicium	$2.8x10^{19}$	$1.04x10^{19}$	$1.5x10^{10}$
Arséniure de Gallium	$4.7x10^{17}$	$7.0x10^{18}$	$1.8x10^{6}$

I)1°)Déterminez le nombre total d'états d'énergie par unite de volume (en m^{-3} et en cm^{-3}) dans l'Arséniure de Gallium entre E_C et E_C+2kT à T=300K et à T=400K, sachant que pour l'AsGa, la masse effective des électrons est $m_n = 0.067m_o$
2°)Calculer la densité effective des états dans la bande de conduction N_C.à T=400K.

II) 1°)En Supposant que E_F soit 0,3 eV inférieur à Ec.
à T=300K, Déterminez la probabilité qu'un électron occupe un état énergétique E1 = (Ec +0,025) eV
2°)Déterminez la température à laquelle la probabilité qu'un électron occupe un état énergétique à E1=(Ec +0,025) eV est de 8×10^{-5}
3°) En Supposant que E_F soit 0,3 eV supérieur à Ev.
à T=400K, Déterminez la probabilité qu'un trou occupe un état énergétique E2 = (Ev -2kT)

III) Soit un matériau Silicium intrinsèque ; sachant que l'énergie de la bande interdite du silicium soit de 1,12 eV et en supposant qu'elle ne varie pas sur cette plage de température,
1°)Calculer la position du niveau de Fermi par rapport au milieu de la bande interdite à T=300K.
2°)Calculer la concentration intrinsèque des porteurs dans le silicium à T= 250 K et à T =400K.

IV) Soit un matériau Arséniure de Gallium
1°)a)Sachant que l'énergie de Fermi est de 0,25 eV en dessous de la bande de conduction, calculez la concentration d'électrons à l'équilibre thermique à T=300 K.
b)Calculer la concentration des trous à l'équilibre thermique à T=300 K.
2°)Calculer la concentration des électrons à l'équilibre thermique à T=370 K.

V) Soit une ligne de transmission quelconque :
1°)rappeler les 2 équations d'évolution de la tension et du courant sur la ligne en régime sinusoïdal et en notation complexe.
2°)combiner ces deux équations pour obtenir une équation en tension seulement et une autre en courant seulement qui dépendent d'un paramètre qui joue le rôle d'une constante de propagation complexe $\underline{\gamma}$ qu'on identifiera. (en fonction de R', C', G' et L' et ω)
3°) quelle est la solution pour l'équation obtenue en 2°) pour la tension. Donner cette solution en fonction des constantes complexes $\underline{u}_+$ et $\underline{u}_-$.
4°). quelle est la solution pour l'équation obtenu en 2°) pour le courant. Donner cette solution en fonction des constantes complexes $\underline{i}_+$ et $\underline{i}_-$.
5°)Montrer que $\frac{\underline{u}_+}{\underline{i}_+} = -\frac{\underline{u}_-}{\underline{i}_-} = \underline{Z}_c$ **On identifiera** $\underline{Z}_c$

ENIG-GCR1-BENZINA H

Scanné avec CamScanner

LIGNES DE TRANSMISSION

$$-\frac{\partial U}{\partial z} = -R'I - L'\frac{\partial I}{\partial t} \; ; \; \frac{\partial I}{\partial z} = -G'U - C'\frac{\partial U}{\partial t}$$

Equations des télégraphistes

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} L'C' - \frac{\partial U}{\partial t}[R'C' + L'G'] - R'G'U = 0$$

Régime sinusoïdal

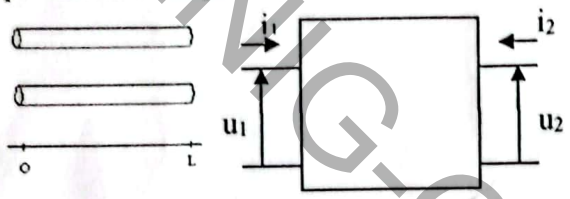
$$\underline{U}(z,t) = \underline{u}(z)e^{j\omega t} \; ; \frac{\partial \underline{u}}{\partial z} = -(R' + j\omega L')\underline{i} \; ;$$

$$\frac{\partial \underline{i}}{\partial z} = -(G' + j\omega C')\underline{u} \; ;$$

$$\underline{\gamma} = \alpha + j\beta$$

$$\underline{Z}_c = \frac{\underline{u}_+}{\underline{i}_+} = -\frac{\underline{u}_-}{\underline{i}_-}$$

Une ligne de transmission de longueur L est équivalente à un quadripôle :



$$\begin{pmatrix} \underline{u}_2 \\ \underline{i}_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \cosh(\underline{\gamma}L) & -\underline{Z}_c \sinh(\underline{\gamma}L) \\ -\underline{Y}_c \sinh(\underline{\gamma}L) & \cosh(\underline{\gamma}L) \end{pmatrix}}_{\text{matrice de chaine}} \begin{pmatrix} \underline{u}_1 \\ \underline{i}_1 \end{pmatrix}$$

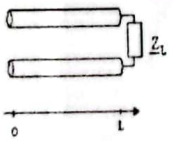
Coefficient de reflection :

$$\underline{\rho}(z) = \frac{\underline{u}_-}{\underline{u}_+} e^{2\underline{\gamma}z} \; ; \underline{u}(z) = \underline{u}_+ e^{-\underline{\gamma}z}[1 + \underline{\rho}(z)] \; ;$$

$$\underline{i}(z) = \underline{Y}_c \underline{u}_+ e^{-\underline{\gamma}z}[1 - \underline{\rho}(z)]$$

$$\underline{Z}(z) = \underline{Z}_c \frac{1 + \underline{\rho}(z)}{1 - \underline{\rho}(z)} \; ; \underline{\rho}(z) = \frac{\underline{Z}(z) - \underline{Z}_c}{\underline{Z}(z) + \underline{Z}_c}$$

LIGNE TERMINEE PAR UNE CHERGE



$$\underline{\rho}(z) = \underline{\rho}_L e^{2\underline{\gamma}(z-L)}$$

Cas d'une ligne adaptée :

$$\underline{Z}_L = \underline{Z}_c \Rightarrow \underline{\rho}_L = 0; \underline{u}_- = 0; \underline{\rho}(z) = 0;$$

$$\underline{Z}(z) = \underline{Z}_c$$

Cas d'une ligne terminée par un court-circuit(cc)

$$\underline{Z}_L = 0; \underline{u}_L = 0; \underline{\rho}_L = -1; \underline{\rho}(z) = -e^{2\underline{\gamma}(z-L)};$$

$$\underline{Z}(z) = -\underline{Z}_c \tanh[\underline{\gamma}(z-L)]$$

Cas d'une ligne terminée par un circuit ouvert(co)

$$\underline{Z}_L = \infty; \underline{i}_L = 0; \underline{\rho}_L = +1; \underline{\rho}(z) = +e^{2\underline{\gamma}(z-L)};$$

$$\underline{Z}(z) = -\underline{Z}_c \coth[\underline{\gamma}(z-L)]$$

LIGNES DE TRANSMISSION SANS PERTES

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \; ; R'=G'=0 \; ; \underline{\gamma} = j\beta \; ;$$

SEMICONDUCTEURS

Densité des états d'énergie:

$$\begin{cases} D(E) = 0 & \text{dans la B.I} \\ D_n(E) = 4\pi\left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}(E - E_C)^{\frac{1}{2}} & \text{dans la BdC} \\ D_p(E) = 4\pi\left(\frac{2m_p}{h^2}\right)^{3/2}(E_V - E)^{1/2} & \text{dans la BdV} \end{cases}$$

Extrait du tableau périodique :

Période	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
1						He
2	B	C	N	O	F	Ne
3	Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Ti	Pb	Bi	Po	At	Rn
7						

Constantes :

Masse de l'électron libre : $m_0 = 9{,}11.10^{-31}$kg ;

Constante de Planck : $h = 6{,}625.10^{-34}$J.s

Constante de Boltzman : $k = 1{,}38.10^{-23}$ J/K

kT = 0,0259 eV à 300K

Charge de l'électron : $q = 1{,}6.10^{-19}$C.

Permittivité du vide : $\varepsilon_0 = 8{,}854.10^{-12}$ F/m

Fonction de distribution de Fermi-Dirac:

$$F_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{E - E_F}{kT}\right]} \; ; \int_0^\infty x^{1/2} e^{-x} dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

Semiconducteur intrinsèque :

$$n = N_C \, exp - \frac{(E_C - E_F)}{kT}$$

$$N_C = \frac{2}{h^3}(2\pi m_n kT)^{3/2}$$

$$p = N_V \, exp - \frac{(E_F - E_V)}{kT}$$

Loi d'action de masse: $np = n_i^2$

$n = p = n_i$

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{kT}{2} Log\left(\frac{N_V}{N_C}\right) \; ;$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp - \frac{E_g}{2kT}$$

Semiconducteur extrinsèque :

Cas usuel !

Type N : $n_n \approx N_D$; $p_n \approx n_i^2 / N_D$

Type P : $p_p \approx N_A$; $n_p \approx n_i^2 / N_A$

ENG-OCR-BENZINAH

Scanné avec CamScanner

I) 1°) $N = \int_{E_c}^{E_c+2kT} D_n(E)\,dE = \int_{E_c}^{E_c+2kT} 4\pi\left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{3/2}(E-E_c)^{1/2}\,dE = \underbrace{4\pi\left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{3/2}}_{C}\int_{E_c}^{E_c+2kT}(E-E_c)^{1/2}\,dE$

$= C\left(\frac{(E-E_c)^{3/2}}{3/2}\right)_{E_c}^{E_c+2kT} = \frac{8\pi}{3}\left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{3/2}\left[(2kT)^{3/2} - 0\right] = \frac{8\pi}{3}\left(\frac{4kTm_n}{h^2}\right)^{3/2}$ ////

$T=300$; $N = 1,4254\,10^{24}$ // $9,2585\,10^{23}\,m^{-3} = 9,2585\,10^{17}\,cm^{-3}$ //

$T=400$; $N = 1,4254\,10^{24}\,m^{-3} = 1,4254\,10^{18}\,cm^{-3}$ //

2°) $N_c = \frac{2}{h^3}(2\pi m_n kT)^{3/2}$; $\frac{N_c(T=400K)}{N(T=400)} = \frac{\frac{2}{h^3}(2\pi m_n kT)^{3/2}}{\frac{8\pi}{3h^3}(4kTm_n)^{3/2}}$

$\frac{N_c}{N}(T=400K) = \frac{3(\pi)^{3/2}}{4\pi(2)^{3/2}} = \frac{3}{8}\sqrt{\frac{\pi}{2}} \Rightarrow N_c(T=400K) = N(T=400K)\frac{3}{8}\sqrt{\frac{\pi}{2}}$

AN $N_c(T=400K) = 6,6995\,10^{23}\,m^{-3} = 6,6995\,10^{17}\,cm^{-3}$ ////

autre méthode

$N_c(T=400K) = N_c(T=300K)\times\left(\frac{400}{300}\right)^{3/2} = 7,2361\,10^{23}\,m^{-3}$

$= 7,2361\,10^{17}\,cm^{-3}$

Remarque cette deuxième méthode donne un résultat différent car la donnée $N(T=300)$ ne concerne, en fait pas l'ex 1, mais plutôt mon exercice. (comme il n'y a pas d'indication sur celui qui trouvent par la deuxième méthode seront considérés comme corrects.)

16

II) 1°) $E_c - E_F = 0,3\,eV$, $T = 300K$

$f_n(E_1) = \frac{1}{1+\exp\left(\frac{E_1-E_F}{kT}\right)} = \frac{1}{1+\exp\left(\frac{E_c-E_F+0,02}{kT}\right)} = \frac{1}{1+\exp\left(\frac{0,3+0,02}{0,0259}\right)}$

A.N $f_n(E_1) = 3,5511\,10^{-6}$ ////

2°) $f_n(E_1) = 8.10^{-1}$; T ? $\Rightarrow 8.10^{-1} = \frac{1}{1+\exp\left(\frac{0,3+0,02}{kT_0}\right)}$ //

$\Rightarrow 1+\exp\left(\frac{0,32}{kT_0}\right) = \frac{1}{8}10^{1} \Rightarrow \exp\left(\frac{0,32}{kT_0}\right) = \left(\frac{10}{8}-1\right) \Rightarrow \frac{0,32}{kT_0} = \ln\left(\frac{10}{8}-1\right)$

ENIG SCRIBENINA H

Scanné avec CamScanner

$\Rightarrow kT_0 = \frac{0,32\Gamma}{\ln(\frac{0,10\Gamma}{g} - 1)} = 0,0344\Gamma 2$; $T = 300 \rightarrow kT = 0,0259$ eV

$T_0 = x \rightarrow kT_0 = 0,34\Gamma 2$

d'où $T_0 = \frac{kT_0 \times 300}{kT} = \boxed{399,06\ K}$ (2)

3°) $E_F - E_V = 0,3$ eV , $T_1 = 400$ K

$f_p(E_2) = 1 - f_n(E_2) = 1 - \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E_2 - E_F}{kT_1}\right)}$

$f_p(E_2) = \frac{\exp\left(\frac{E_2 - E_F}{kT_1}\right)}{1 + \exp\left(\frac{E_2 - E_F}{kT}\right)}$; $X = \frac{E_2 - E_F}{kT_1} = \frac{E_V - 2kT_1 - E_F}{kT_1}$

$T = 300 \Rightarrow kT = 0,0259$ eV

$T_1 = 400 \Rightarrow kT = 0,0259 \times \frac{400}{300} = 0,0345$

$X = \frac{-0,3 - 2 \times 0,0345}{0,0345}$

$\boxed{f_p(E_2) = 2,2834\ 10^{-5}}$

III) 1°) $E_F - \frac{E_c + E_v}{2}$? d'après la formulaire

$T = 300$K ; $E_F - \frac{E_c + E_v}{2} = \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right) = \frac{0,0259}{2} \ln \frac{1,04\,10^{19}}{2,8\,10^{19}} =$

$= -0,012826$ eV ($-2,052\ 10^{-21}$ J)

2°) $n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp -\left(\frac{E_g}{2kT}\right)$

$T = 300$ $n_i = 6,949\ 10^{9}$ cm^{-3} (Non demandé)

à $T_1 = 250$ K $N_c(T_1) = N_c(T) \times \left(\frac{T_1}{T}\right)^{3/2}$; $N_v(T_1) = N_v(T) \times \left(\frac{T_1}{T}\right)^{3/2}$

($2,13\,10^{19}$ cm^{-3}) ($7,912\,10^{18}$ cm^{-3})

$kT_1 = kT \times \left(\frac{T_1}{T}\right)$; $n_i(T_1) = \sqrt{N_c(T_1) N_v(T_1)} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT_1}\right)$

($0,0215$)

$n_i(T_1) = 7,0007\ 10^{+4}$ cm^{-3}

de même pour $T_2 = 400$ K

$n_i(T_2) = 2,3817\ 10^{12}$ cm^{-3}.

($kT_2 = 0,0345$) ($N_c(T_2) = 4,31\,10^{19}$ cm^{-3}, $N_v(T_2) = 1,601\,10^{19}$ cm^{-3})

ENIG-CR-BENZINA-H

Scanné avec CamScanner

(2)

a) $E_B - E_F = 0,4\ eV$

$n = N_C \exp\left(-\frac{E_C - E_F}{kT}\right) = 4,7 \cdot 10^{17} \exp - \frac{0,25}{0,0259} =$

$n = 3,0204\ 10^{13}\ cm^{-3}$ ///

b) on a $np = n_i^2 \Rightarrow p = \frac{n_i^2}{n} =$!!!

$0,10727\ cm^{-3}$ //

2°) $T_1 = 370\ K$

$n(T_1) = N_C(T_1) \exp\left(\frac{-0,25}{kT_1}\right)$

$N_C(T_1) = N_C(T) \left(\frac{T_1}{T}\right)^{3/2}$

$kT_1 = 0,0319$

$N_{C_1} = 6,4377 \cdot 10^{17}$

$n(T_1) = 2,56906\ 10^{14}\ cm^{-3}$ /////

14

V 1°) $\frac{\partial \underline{u}}{\partial z} = -(R' + j\omega L')\underline{i}$ (1) ; $\frac{\partial \underline{i}}{\partial z} = -(G' + j\omega C')\underline{u}$ (2)

2°) $\frac{d}{dz}(1) \rightarrow \frac{d^2\underline{u}}{dz^2} = -(R' + j\omega L')\frac{d\underline{i}}{dz} \Rightarrow \frac{d^2\underline{u}}{dz^2} = -(R' + j\omega L')(-)(G' + j\omega C')\underline{u}$

$\frac{d^2\underline{u}}{dz^2} = \underline{\gamma}^2 \underline{u}$ (3) avec $\underline{\gamma}^2 = (R' + j\omega L')(G' + j\omega C')$ (2)

de même

$\frac{d}{dz}(2) \rightarrow \frac{d^2\underline{i}}{dz^2} = -(G' + j\omega C')\frac{d\underline{u}}{dz}$ (1) $\Rightarrow \frac{d^2\underline{i}}{dz^2} = -(G' + j\omega C')(-)(R' + j\omega L')\underline{i}$

$\Rightarrow \frac{d^2\underline{i}}{dz^2} = \underline{\gamma}^2 \underline{i}$ (00)

3°) solution de l'equation de propagation en tension (0) :

$\underline{u}(z) = \underline{u}_+ \exp(-\underline{\gamma} z) + \underline{u}_- \exp(+\underline{\gamma} z)$ (0) //

4°) solution de l'equation de propagation en courant (00)

$\underline{i}(z) = \underline{i}_+ \exp(-\underline{\gamma} z) + \underline{i}_- \exp(+\underline{\gamma} z)$ (00) //

on remplace (0) et (00) dans (1) par exemple :

$\frac{d}{dz}\left(\underline{u}_+ \exp(-\underline{\gamma} z) + \underline{u}_- \exp(+\underline{\gamma} z)\right) = -(R' + j\omega L')\left(\underline{i}_+ \exp(-\underline{\gamma} z) + \underline{i}_- \exp(+\underline{\gamma} z)\right)$

ENIG-CR-BENZINA-H

Scanné avec CamScanner

$\underline{\gamma}\left(-\underline{u}_+ \exp(-\underline{\gamma}z) + \underline{u}_- \exp(+\underline{\gamma}z)\right) = -(R'+j\omega L')\left(\frac{1}{\underline{\lambda}_+}\exp(-\underline{\gamma}z) + \frac{1}{\underline{\lambda}_-}\exp(+\underline{\gamma}z)\right)$

en identifiant les termes en $\exp(-\underline{\gamma}z)$ et ceux de $\exp(+\underline{\gamma}z)$:

$$-\underline{\gamma}\,\underline{u}_+ = -(R'+j\omega L')\frac{1}{\underline{\lambda}_+} \quad ; \quad \underline{\gamma}\,\underline{u}_- = -(R'+j\omega L')\frac{1}{\underline{\lambda}_-} \qquad (2)$$

$$\Rightarrow \frac{\underline{u}_+}{\underline{\lambda}_+} = -\frac{\underline{u}_-}{\underline{\lambda}_-} = \frac{R'+j\omega L'}{\underline{\gamma}}, \quad \frac{R'+j\omega L'}{\underline{\gamma}} = \frac{R'+j\omega L'}{\sqrt{(R'+j\omega L')(G'+j\omega C')}}$$

$$\frac{R'+j\omega L'}{\underline{\gamma}} = \sqrt{\frac{R'+j\omega L'}{G'+j\omega C'}} = \underline{Z}_c$$ (car homogène à une impédance)

on l'appellera impédance caractéristique de la ligne

TENIG-GCR-BENZINAH

Scanné avec CamScanner

ENIG GCR1

A.U 2023-2024; Durée : 2H00
Responsable : BENZINA.H
Documents non autorisés.

DS DISPOSITIFS ET SYSTEMES MICROONDES 2

N.B :Chaque étudiant(e) dispose d'une seule abaque qu'il(elle) doit rendre sans y écrire son nom.
L'usage de la calculatrice standard est autorisé. L'usage de GSM ou tout objet connecté est strictement interdit.

EXERCICES

I) (Guides d'ondes) Soit un guide rectangulaire sans pertes rempli d'un diélectrique de permittivité relative égale à 2.2 et telle que a=7.214cm et b=3.404cm. Pour un mode TM_{11} se propageant sous une fréquence de fonctionnement égale à 1.1 fois la fréquence de coupure de ce mode (f_o=1.1 fc_{11}), calculer :

a)La fréquence de coupure.
b)La fréquence de fonctionnement f_o.
c)La constante de propagation β_g.
d)La longueur d'onde de coupure.
e)La longueur d'onde guidée.
f)La vitesse de phase.
g)Quels sont les autres modes propagatifs dans ce guide rectangulaire.
h)donner les expressions des différentes composantes du champs électromagnétique.

II)(Lignes de transmission) 1°)Sur une ligne coaxiale à air, sans pertes d'impédance caractéristique Z_c=50Ω et où la distance entre les positions de 2 minimums successifs de tension vaut 4 cm, une impédance $\underline{Z}_L$ = (55-j30)Ω termine la ligne.

Déterminer (par le calcul ou en utilisant l'abaque):

a-le rapport d'ondes stationnaires s.
b- le coefficient de réflexion $\underline{\rho}_L$.
c-l'admittance de la charge $\underline{Y}_L$ (avec la meilleure précision possible).
d-l'impédance ramenée à 13cm de la charge.

2°)Adapter cette ligne au moyen d'une ligne quart d'onde (donner tous les détails nécessaires et les solutions possibles)

3°)Adapter cette ligne au moyen d'un stub court-circuité ayant la même impédance caractéristique que la ligne principale.

III)(Semiconducteurs)A) On va appeler le niveau de Fermi intrinsèque E_i et celui du matériau dopé E_F.

1°)Dans le cas extrinsèque à l'équilibre thermique quelle est l'expression de :

a)n en fonction de E_C et E_F.
b)p en fonction de E_V et E_F.
c)ni en fonction de n et p.

2°)Tracer le digramme d'énergie avec E_C, E_V, E_F et E_i, pour :

a) Un semiconducteur de type N.
b) Un semiconducteur de type P.

3°) Trouver les concentrations en électrons et en trous ainsi que la position du niveau de Fermi pour un Silicium à l'équilibre à T=300K :

a) dopé avec du bore dont la concentration est $10^{16}cm^{-3}$.
b) dopé avec du phosphore dont la concentration est $2{,}1.10^{15}cm^{-3}$.
n_i=$1{,}45.10^{10}cm^{-3}$.

B) La concentration en électrons dans le silicium est donnée par

$n(x) = 10^{15}e^{-\left(\frac{x}{L_n}\right)}cm^{-3}(x \geq 0)$ où L_n=10^{-4}cm.

Le coefficient de diffusion des électrons est Dn=25 cm^2/s. Déterminer la densité de courant de diffusion des électrons en (a) x= 0, (b) x=10^{-4}cm, et (c) $x \to \infty$.

Bon Travail

ENIG-GCR-BENZINA H

Scanné avec CamScanner

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -R'I - L'\frac{\partial I}{\partial t} \; ; \; \frac{\partial I}{\partial z} = -G'U - C'\frac{\partial U}{\partial t}$$

Equations des télégraphistes

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} L'C' + \frac{\partial U}{\partial t}[R'C' + L'G'] + R'G'U = 0$$

Régime sinusoïdal

$$U(z,t) = u(z)e^{j\omega t} \; ; \; \frac{\partial u}{\partial z} = -(R' + j\omega L')i \; ;$$

$$\frac{\partial i}{\partial z} = -(G' + j\omega C')u \; ; \; \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = (R' + j\omega L')(G' + j\omega C')u$$

$$\gamma = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta$$

$$u(z) = u_+ e^{-\gamma z} + u_- e^{+\gamma z} \; ; i(z) = Y_c(u_+ e^{-\gamma z} - u_- e^{+\gamma z})$$

$$Z_c = \frac{u_+}{i_+} = \frac{u_-}{i_-} = \sqrt{\frac{(R' + j\omega L')}{(G' + j\omega C')}}$$

Une ligne de transmission de longueur L est équivalente à un quadripôle :



$$\begin{pmatrix} u_2 \\ i_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \cosh(\gamma L) & -Z_c \sinh(\gamma L) \\ -Y_c \sinh(\gamma L) & \cosh(\gamma L) \end{pmatrix}}_{\text{matrice de chaine}} \begin{pmatrix} u_1 \\ i_1 \end{pmatrix}$$

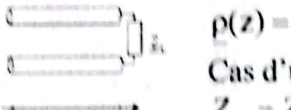
Coefficient de reflection :

$$\rho(z) = \frac{u_-}{u_+} e^{2\gamma z} \; ; u(z) = u_+ e^{-\gamma z}[1 + \rho(z)] \; ;$$

$$i(z) = Y_c u_+ e^{-\gamma z}[1 - \rho(z)]$$

$$Z(z) = Z_c \frac{1 + \rho(z)}{1 - \rho(z)} \; ; \rho(z) = \frac{Z(z) - Z_c}{Z(z) + Z_c}$$

LIGNE TERMINEE PAR UNE CHERGE



$$\rho(z) = \rho_L e^{2\gamma(z-L)}$$

Cas d'une ligne adaptée :

$$Z_L = Z_c \Rightarrow \rho_L = 0; u_- = 0; \rho(z) = 0;$$

$$Z(z) = Z_c$$

Cas d'une ligne terminée par un court-circuit(cc)

$$Z_L = 0; u_L = 0; \rho_L = -1; \rho(z) = -e^{2\gamma(z-L)};$$

$$Z(z) = -Z_c \tanh[\gamma(z-L)]$$

Cas d'une ligne terminée par un circuit ouvert(co)

$$Z_L = \infty; i_L = 0; \rho_L = +1; \rho(z) = +e^{2\gamma(z-L)};$$

$$Z(z) = -Z_c \coth[\gamma(z-L)]$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \; ; R' = G' = 0 \; ; \; \gamma = j\beta \; ;$$

$$|u(z)| = |u_+||1 + \rho(0)e^{2j\beta z}|$$

Le taux d'ondes stationnaires (TOS)

$$s = \frac{u_{max}}{u_{min}} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \Rightarrow |\rho| = \frac{s-1}{s+1}$$

ABAQUE DE SMITH

C'est la transformation : $z(z) = \frac{Z(z)}{Z_c} = r + jx \rightarrow \rho(z) = a + jb$

	z(z)	ρ(z)	Commentaire
C,A	1	0	Point O
C,C	0	-1	Point O'
C,O	∞	+1	Point O''
Resistance pure	r	$1 - \frac{2}{1+r}$	Portion de l'axe C[-1,1]
Réactance pure	jx	$\frac{jx-1}{jx+1}$	Cercle unité

Adaptation :

par une ligne quart d'onde: $Z_x = \sqrt{Z_c R}$

GUIDES D'ONDES

$$\Delta\underline{\psi} = k^2\underline{\psi} \; avec k^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) \quad et \; \underline{\psi} = \begin{pmatrix} \vec{E} \\ \vec{H} \end{pmatrix}$$

Pas de pertes $\Rightarrow k^2 = -k_0^2 = -\omega^2\mu\varepsilon$

GUIDE RECTANGULAIRE :

Résolution : $\psi(x,y,z) = X(x)Y(y)Z(z)$

$$\Rightarrow \beta_g^2 = k_0^2 - k_c^2 ; avec \; k_c^2 = k_x^2 + k_y^2$$

$$X(x) = A\sin(k_x x) + B\cos(k_x x)$$

$$Y(y) = C\sin(k_y y) + D\cos(k_y y)$$

$$Z(z) = E.\exp(-j\beta_g z)$$

conditions aux limites : $E_y = E_z = 0$ *en* $x = 0$ *et a* $E_x = E_z = 0$ *en* $y = 0$ *et b*

$$k_{cmn} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \; ; k_c = \omega_c\sqrt{\mu\varepsilon} = \frac{\omega_c}{v} = \frac{2\pi}{\lambda_c}$$

modes $TM_{mn} \Rightarrow H_z = 0$

$$E_z(x,y,z) = E_{zmn}\sin(\frac{m\pi}{a}x)\sin(\frac{n\pi}{b}y)\exp(-j\beta_g z)$$

m=1,2,3,... n=1,2,3...

modes $TE_{mn} \Rightarrow E_z = 0$

ENG-GCR-BENNAH

Scanné avec CamScanner

FORMULAIRE SEMICONDUCTEURS

Densité des états d'énergie :

$$\begin{cases} D(E) = 0 & \text{dans la B.I} \\ D_n(E) = 4\pi\left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}}(E - E_C)^{\frac{1}{2}} & \text{dans la BdC} \\ D_p(E) = 4\pi\left(\frac{2m_p}{h^2}\right)^{3/2}(E_V - E)^{1/2} & \text{dans la BdV} \end{cases}$$

Extrait du tableau périodique :

Période	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA
1						He
2	B	C	N	O	F	Ne
3	Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7						

Constantes :

Masse de l'électron libre : m_0=9,11.10^{-31}kg ;
Constante de planck : h=6,625.10^{-34}J.s
Constante de Boltzman : k=1,38.10^{-23} J/K
Charge de lélectron : q=1,6.10^{-19}C.
Permittivité du vide : ε_0=8,854.10^{-12} F/m

Fonction de distribution de Fermi-Dirac:

$$F_n(E) = \frac{1}{1+\exp\left[\frac{E-E_F}{kT}\right]} \quad ; \quad kT = 0{,}0259\,eV \text{ à } 300K$$

$$\int_0^\infty x^{1/2}e^{-x}dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad ;$$

Semiconducteur intrinsèque :

$$n = N_C\, exp - \frac{(E_C - E_F)}{kT}$$

$$p = N_V\, exp - \frac{(E_F - E_V)}{kT}$$

$N_C = \frac{2}{h^3}(2\pi m_n kT)^{3/2}$: densité effective des états dans la BdC

$$p = N_V\, exp - \frac{(E_F - E_V)}{kT}$$

Loi action de masse: $np=n_i^2$
$n=p=n_i$

$$E_F = \frac{E_C+E_V}{2} + \frac{kT}{2}\text{Log}\left(\frac{N_V}{N_C}\right) \quad ;$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V}\,\exp - \frac{E_g}{2kT}$$

Semiconducteur extrinsèque :

Cas usuel !

Type N : $n_n \approx N_D$; $p_n \approx n_i^2/N_D$

Type P : $p_p \approx N_A$; $n_p \approx n_i^2/N_A$

$$p = n_i \exp[(E_i - E_F)/kT]$$

$$n = n_i \exp[(E_F - E_i)/kT] \quad ;$$

Loi d'action de masse : $np = n_i^2$

Conduction dans les semiconducteurs :

$\langle E_{cn} \rangle = \frac{3}{2}kT$; $l_n = \tau_n v^*_{thn}$; $l_p = \tau_p v^*_{thp}$

$\vec{v}_{dn} = -\mu_n \vec{E}$; $\mu_n = \frac{q\tau_n}{m_n}$: mobilité des é

$\vec{v}_{dp} = \mu_p \vec{E}$; $\mu_p = \frac{q\tau_p}{m_p}$: mobilité des trous.

Loi d'Ohm microscopique :

$$\vec{J}_c = q(n\mu_n + p\mu_p)\vec{E} \quad ;$$

Courant de diffusion pour les électrons:

$$\vec{J}_n(x) = qD_n\,\vec{\text{grad}}(n)$$

Loi d'Einstein : $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{q}$

Cas général pour les trous :

$$\vec{J}_p(x) = \mu_p\left(qp\vec{E} - kT\,\vec{\text{grad}}(p)\right)$$

Génération- recombinaison des porteurs :

Régime de faible injection

$\Rightarrow \Delta n = \Delta p << N_D$ pour un sc de type N

pour un sc de type N (cas de recombinaison directe), on a :

$$\frac{dp_n}{dt} = G - R = G_L + G_{th} - R = G_L - U;\ U = R - G_{th}$$

U : taux net de recombinaison

En régime stationnaire et de faible injection :

$$G_L = U = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p}$$

Equation de continuité :

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \mu_n \frac{\partial n_p}{\partial x}E + \mu_n n_p \frac{\partial E}{\partial x} + D_n \frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} + G_n - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}$$

ENIG-GCR-BENZINA H

Scanné avec CamScanner

$11 \Rightarrow \underline{H}_z = 0$

$\underline{E}_z(x,y,z) = \underline{E}_{z_{11}} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{\pi}{b}y\right)\exp(-j\beta_g z)$ //

$\underline{E}_x(x,y,z) = \underline{E}_{x_{11}} \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{\pi}{b}y\right)\exp(-j\beta_g z)$ //

$\underline{E}_y(x,y,z) = \underline{E}_{y_{11}} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{\pi}{b}y\right)\exp(-j\beta_g z)$ //

$\underline{H}_x(x,y,z) = \underline{H}_{x_{11}} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{\pi}{b}y\right)\exp(-j\beta_g z)$ //

$\underline{H}_y(x,y,z) = \underline{H}_{y_{11}} \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{\pi}{b}y\right)\exp(-j\beta_g z)$ //

5 pts

II) 1) $\underline{Z}_L = (55 - j30)\,\Omega$; $\frac{\lambda}{2} = 4\,cm \Rightarrow \lambda = 8\,cm$ ///

A) Détermination par l'abaque :

$\underline{z}_A = \frac{\underline{Z}_L}{Z_c} = \frac{55 - j30}{50} = 1,1 - j0,6$ / //

$\alpha_A = 0,340\lambda$ //

a) $s \simeq 1,8$ /// et b) $|\rho| \simeq 0,28$ // $\angle\rho \simeq -65°$ //+

c) $\underline{y}_{A'} = 0,7 + j0,38 \Rightarrow \underline{Y}_L = \underline{y}_{A'} \times Y_c = \frac{\underline{y}_{A'}}{Z_c} = \frac{0,7 + j0,38}{50} = (0,014 + j0,0076)\,\Omega^{-1}$ ///

d) $z_0 = L - 13\,cm = L - 0,13\,m$

on va se déplacer vers le générateur de 13 cm c'est à dire $\frac{13}{8}\lambda = 1,625\lambda$

$1,625\lambda = 1,5\lambda + 0,125\lambda$ ///

donc $\alpha_B = \alpha_A + 0,125\lambda = (0,340 + 0,125)\lambda = 0,465\lambda$ //

$\underline{z}_B = 0,58 - j0,15$ /// $\Rightarrow \underline{Z}_B = (29 - j7,55)\,\Omega$ //

B) Par le calcul :

b) $\underline{\rho}_L = \frac{\underline{Z}_L - Z_c}{\underline{Z}_L + Z_c}$ / A.N $\underline{\rho}_L = 0,1194 - j0,2516$ // //

$|\underline{\rho}| = 0,2785$ $\angle\rho = -1,127\,rd = -64,59°$

a) $s = \frac{1 + |\underline{\rho}|}{1 - |\underline{\rho}|} = 1,772$ // c) $\underline{Y}_L = \frac{1}{\underline{Z}_L} = (0,01401 + 0,007643)\,\Omega^{-1}$ /// /

d) $\underline{Z}(z_0) = Z_c \frac{\underline{Z}_L - jZ_c \tg[\beta(z_0 - L)]}{Z_c - j\underline{Z}_L \tg[\beta(z_0 - L)]}$ / ; $z_0 - L = \lambda - 0,13\lambda$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$

A.N $\underline{Z}(z_0) = (29,178 - j7,5597)\,\Omega$ 7 pts

ENIG-GOR-BENZINA H

Scanné avec CamScanner

Corrigé du DS Disp & Sys pour ondes 1 2023-2024

I) a) $f_{c_{11}}$? $k_{c_{11}} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2} = \pi\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}$

$k_{c_{11}} = \frac{\omega_{c_{11}}}{v} = \frac{2\pi f_{c_{11}}}{v} \Rightarrow \frac{2\pi f_{c_{11}}}{v} = \pi\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}$

$\Rightarrow \boxed{f_{c_{11}} = \frac{v}{2}\sqrt{\left(\frac{1}{a}\right)^2 + \left(\frac{1}{b}\right)^2}}$ A.N: $f_{c_{11}} = \frac{3.10^8}{2\sqrt{2,2}}\sqrt{\frac{10^4}{(7,214)^2} + \frac{10^4}{(3,404)^2}}$

$\boxed{v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}}}$

$\boxed{f_{c_{11}}^{TH} = 3,285\ 10^9\ Hz} = 3,285\ GHz$

b) $f_0 = 1,1\ f_{c_{11}} = 3,6136\ GHz$

c) $\boxed{\beta_g = \sqrt{k_0^2 - k_{c_{11}}^2}}$ $\boxed{k_{c_{11}} = \frac{2\pi f_{c_{11}}}{v} = 102,05\ rd/m}$

$\boxed{k_0 = \frac{2\pi f_0}{v} = 112,25\ rd/m} \Rightarrow \boxed{\beta_{g_{11}}^{TH} = 46,765\ rd/m}$

d) $\boxed{\lambda_{c_{11}} = \frac{2\pi}{k_{c_{11}}} = 0,06157\ m = 6,157\ cm}$

e) $\boxed{\lambda_g = \frac{2\pi}{\beta_{g_{11}}} = 0,13436 = 13,436\ cm}$

f) $\boxed{v_\varphi = \frac{\omega_0}{\beta_{g_{11}}} = \frac{2\pi f_0}{\beta_{g_{11}}} = 4,855\ 10^8\ m/s}$

g) modes propagatifs : ce sont les modes dont la fréquence de coupure est inférieure à f_0

réponse donc TE_{10} TE_{20} TE_{01} TE_{11} TM_{11}

m \ n	0	1	2	3
0	X	1,4019	2,8037	~~4,2056~~
1	2,9709	3,2850	~~4,085~~	
2	~~5,9418~~			

ENIG-GCR-BENNIA H

Scanné avec CamScanner

$m_{11} \Rightarrow H_z = 0$

$\underline{E}_z(x,y,z) = \underline{E}_{z_{11}} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{\pi}{b}y\right)\exp(-j\beta_g z)$ //

$\underline{E}_x(x,y,z) = \underline{E}_{x_{11}} \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{\pi}{b}y\right)\exp(-j\beta_g z)$ //

$\underline{E}_y(x,y,z) = \underline{E}_{y_{11}} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{\pi}{b}y\right)\exp(-j\beta_g z)$ //

$\underline{H}_x(x,y,z) = H_{x_{11}} \sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{\pi}{b}y\right)\exp(-j\beta_g z)$ //

$\underline{H}_y(x,y,z) = H_{y_{11}} \cos\left(\frac{\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{\pi}{b}y\right)\exp(-j\beta_g z)$ //

5 pts

II) 1) $\underline{Z}_L = (55 - j30)\,\Omega$; $\frac{\lambda}{2} = 4\,cm \Rightarrow \lambda = 8\,cm$ ///

A) Détermination par l'abaque :

- $\underline{z}_A = \frac{\underline{Z}_L}{Z_c} = \frac{55 - j30}{50} = 1{,}1 - j\,0{,}6$ / /

$d_A = 0{,}340\,\lambda$ //

a) $s \simeq 1{,}8$ /// et b) $|\rho| \simeq 0{,}28$ // $\angle\rho \simeq -65°$ //+

c) $\underline{y}_{A'} = 0{,}7 + j\,0{,}38$ / $\Rightarrow \underline{Y}_L = \underline{y}_{A'} \times Y_c = \frac{\underline{y}_{A'}}{Z_c} = \frac{0{,}7 + j\,0{,}38}{50} = (0{,}014 + j\,0{,}0076)\,\Omega^{-1}$ ///

d) $z_0 = L - 13\,cm = L - 0{,}13\,m$

on va se déplacer vers le générateur de 13 cm c'est à dire $\frac{13}{8}\lambda = 1{,}625\,\lambda$

$1{,}625\,\lambda = 1{,}5\,\lambda + 0{,}125\,\lambda$ ///

donc $d_B = d_A + 0{,}125\,\lambda = (0{,}340 + 0{,}125)\,\lambda = 0{,}465\,\lambda$ /

$\underline{z}_B = 0{,}58 - j\,0{,}15$ // $\Rightarrow \underline{Z}_B = (29 - j\,7{,}55)\,\Omega$ //

B) Par le calcul :

b) $\underline{\rho}_L = \frac{\underline{Z}_L - Z_c}{\underline{Z}_L + Z_c}$ / A.N $\underline{\rho}_L = 0{,}1194 - j\,0{,}2516$ // //

$|\underline{\rho}| = 0{,}2785$ $\angle\rho = -1{,}127\,rd = -64{,}59°$

a) $s = \frac{1 + |\underline{\rho}|}{1 - |\underline{\rho}|}$ / $= 1{,}772$ // c) $\underline{Y}_L = \frac{1}{\underline{Z}_L}$ / $= (0{,}01401 + 0{,}007643)\,\Omega^{-1}$ ///

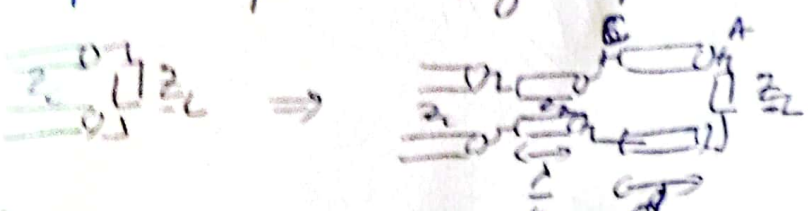
d) $\underline{Z}(z_0) = Z_c \frac{\underline{Z}_L - jZ_c \tan[\beta(z_0 - L)]}{Z_c - j\underline{Z}_L \tan[\beta(z_0 - L)]}$ / ; $z_0 - L = \lambda - 0{,}13\,\lambda$; $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$

A.N $\underline{Z}(z_0) = (29{,}178 - j\,7{,}5597)\,\Omega$ 7 pts

ENG-GOR-BENZINAH

Scanné avec CamScanner

2) Adaptation par une ligne quart-d'onde



A partir de A on se déplace pour rencontrer l'arc de cercle en C_1 et C_2

$d_A = 0,34\lambda$; $d_{C_1} = 0,5\lambda$; $d_{C_2} = 0,25\lambda$

il y a donc deux solutions

$d_1 = d_{C_1} - d_A + n\frac{\lambda}{2} = 0,5\lambda - 0,34\lambda + n\frac{\lambda}{2} = 0,16\lambda + n\frac{\lambda}{2}$

$d_1 = 1,28\,cm + n\,4\,cm$

$d_2 = d_{C_2} - d_A + n\frac{\lambda}{2} = 0,75\lambda - 0,34\lambda + n\frac{\lambda}{2} = 0,41\lambda + n\frac{\lambda}{2}$

$d_2 = 3,28\,cm + n\,4\,cm$

en C_1 → $r_1 = 0,5$ → $R_1 = Z_c \times r_1 = 27,5\,\Omega$

⇒ l'impédance caractéristique de la ligne quart d'onde est $Z_{x_1} = \sqrt{Z_c \times R_1} = 37,08\,\Omega$

en C_2 → $r_2 = 1,8$ → $R_2 = 90\,\Omega$ ⇒ $Z_{x_2} = \sqrt{Z_c \times R_2} = 67,08\,\Omega$

3°) Adaptation par un simple stub en parallèle ou en admittance réduite

$d_{A'} = 0,09\lambda$

on remonte le cercle $r = 1$ en D_1' et D_2'



$d_{D_1'} = 0,148\lambda$; $d_{D_2'} = 0,353\lambda$; $y_{D_1'} = 1 + j\,0,6$; $y_{D_2'} = 1 - j\,0,6$

$d_1 = d_{D_1'} - d_{A'} + n\frac{\lambda}{2} = 0,148\lambda - 0,09\lambda + n\frac{\lambda}{2} = 0,058\lambda + n\frac{\lambda}{2} = 0,464\,cm + n\,4\,cm$

$d_2 = d_{D_2'} - d_{A'} + n\frac{\lambda}{2} = 0,353\lambda - 0,09\lambda + n\frac{\lambda}{2} = 0,263\lambda + n\frac{\lambda}{2} = 2,104\,cm + n\,4\,cm$

avec le stub on ajoute $-j0,6$ pour la première solution et $+j0,6$ pour la seconde ⇒ $x_1 = 0,414\lambda$ et $x_2 = 0,086\lambda$

$l_1 = x_1 - d_{cc} + n\frac{\lambda}{2}$; $d_{cc} = 0,25\lambda$; $l_1 = 0,414\lambda - 0,25\lambda + n\frac{\lambda}{2} = 0,164\lambda + n\frac{\lambda}{2}$

$l_1 = 1,312\,cm + n\,4\,cm$

$l_2 = d_2 - d_{cc} + n\frac{\lambda}{2} = 0,086 + 0,5 - 0,25 + n\frac{\lambda}{2} = 0,336\lambda + n\frac{\lambda}{2}$

$l_2 = 2,688\,cm + n\,4\,cm$

ENIG GOR BENZINA H

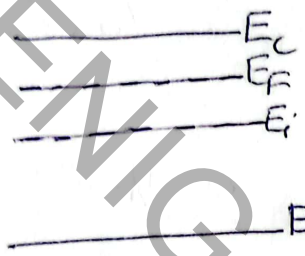
Scanné avec CamScanner

II) 1°) a) $n = N_c \exp -\left(\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$ (1)

b) $p = N_v \exp -\left(\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$ (2)

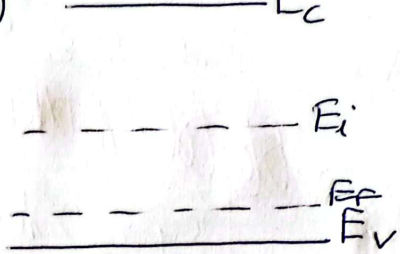
c) $np = n_i^2$

2°) a)



Type N

b)



Type P

3°) a) B est accepteur $\Rightarrow N_A = 10^{16}\ cm^{-3}$

$p \simeq N_A = 10^{16}\ cm^{-3}$ $\quad n \simeq \frac{n_i^2}{N_A} = 21025\ cm^{-3}$

(2) $\Rightarrow E_v - E_F = kT \ln \frac{N_v}{p} = 0{,}0259 \ln \frac{N_v}{10^{16}}$

b) le phosphore est donneur $\Rightarrow N_D = 2{,}1\ 10^{15}\ cm^{-3}$

$n \simeq N_D = 2{,}1\ 10^{15}\ cm^{-3}$ $\quad p \simeq \frac{n_i^2}{N_D} = 1{,}001\ 10^5\ cm^{-3}$

(1) $\Rightarrow E_c - E_F = kT \ln \frac{N_c}{N_D} = 0{,}0259 \ln \frac{N_c}{2{,}1\ 10^{15}}$

B) $J_n = q D_n \frac{dn}{dx} = q D_n \times \left(-\frac{10^5}{L_n}\right) e^{-\left(\frac{x}{L_n}\right)} = -1{,}6\ 10^{-19} \times \frac{25.10^{15}}{10^{-4}} e^{-\left(\frac{x}{10^{-4}}\right)}$

en $x = 0$ $\quad |J_n| = 40\ A/cm^2$

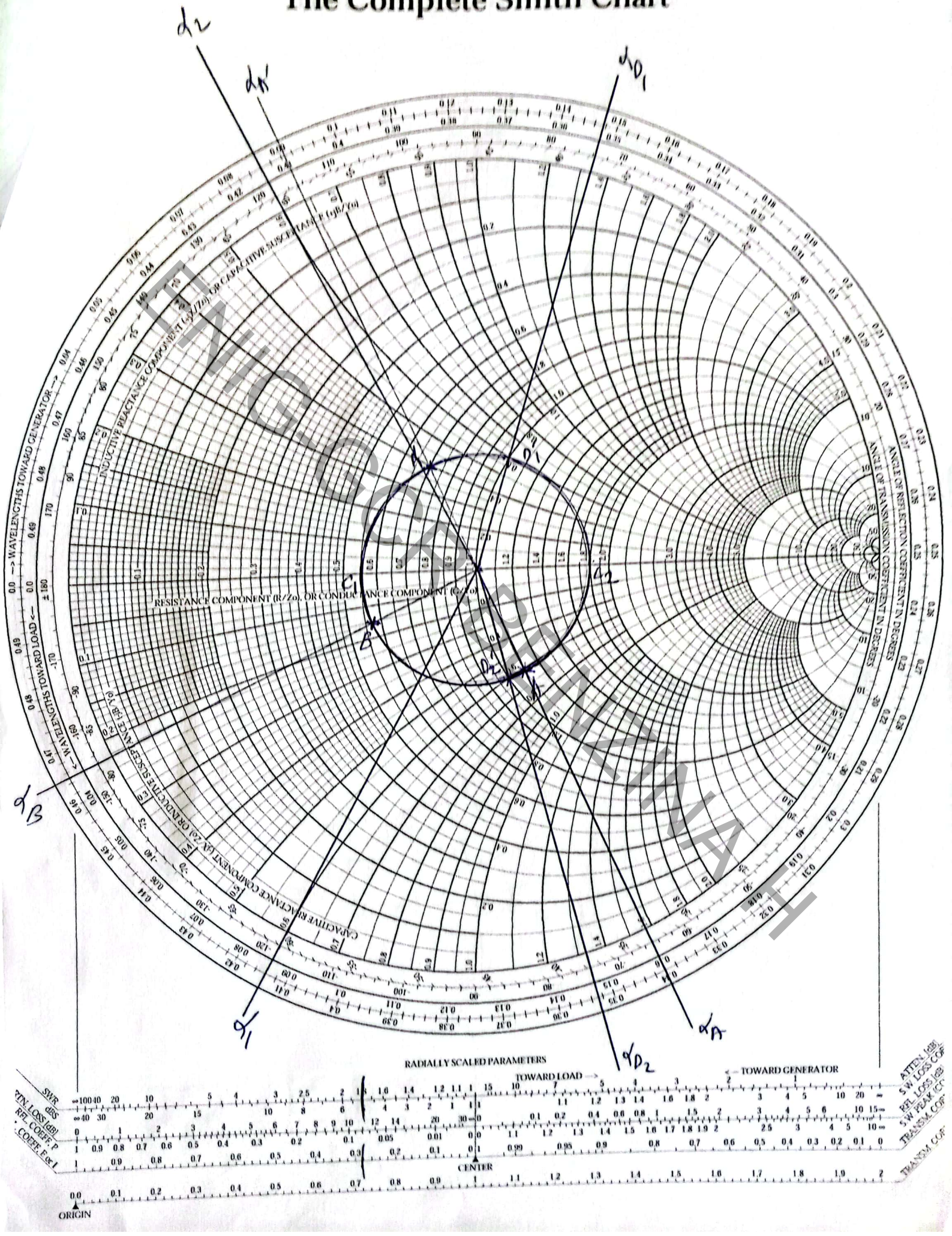
en $x = L_n$ $\quad |J_n| = 14{,}715\ A/cm^2$

en $x \to \infty$ $\quad |J_n| = 0$

ENIG-OOR-BENZMH

Scanné avec CamScanner

The Complete Smith Chart



Scanné avec CamScanner