

1. Introduction

Dans cette partie, nous évoquons le calcul théorique de la densité locale des états mesurée en champ proche près d'une surface du silicium chargée en électrons et trous (dopage p et n respectivement). Nous adoptons l'hypothèse que le silicium fait contact avec l'air ambiant. Nous montrons en particulier les contributions des champs électrique et magnétique à la densité locale, détectées à la distance z de l'interface. La résonance observée est relative à la présence des modes de l'onde de surface. Cependant, nous retrouvons quantitativement la présence des PPS sur l'interface considéré et pour lesquelles nous décrivons deux caractéristiques principale : - le caractère d'évanescence et leur pic de résonance.

2. Contribution du champ électrique à la densité local des états proche d'une surface chargée p

Pour montrer l'effet de la concentration notée N , de porteurs de charge selon le type de dopage (p ou n) sur la densité locale des états du silicium, nous incluons les contributions en champ proche du champ électrique et magnétique. Suite au caractère évanescent de l'onde de surface, la densité LDOS est mesurée à des distances z proches de la surface de l'échantillon considéré.

Théoriquement, la densité électromagnétique d'énergie d'une interface entre un matériau et un diélectrique est définie selon la littérature [Shchegrov et al, Henkel et al, K. Joulain et al] par :

$$\rho(z, \omega) = \frac{\text{Im } \varepsilon_{\text{Si}}}{|1 + \varepsilon_{\text{Si}}|^2} \frac{1}{16\omega z^3 \pi^2} \quad (\text{III} - 1)$$

A partir de l'étude analytique de Eq. III-1 pour des distances z fixées, deux éléments sont remarquables sur le profil représenté sur la fig.(III-1) . Un pic de résonance apparait à une fréquence angulaire qui est en fait lié à la condition $\varepsilon(\omega) < -1$ des PPS et l'ordre de grandeur de l'amplitude qui est inversement proportionnelle à z relatif au caractère évanescent de l'onde de surface (cf. fig(III-2).

2.1. Champ électrique

Nous nous intéressons à étudier le comportement de la densité électromagnétique d'énergie mesurée en champ proche sur les contributions des champs électrique et magnétique du silicium. Leurs expressions respectives sont exprimées par

$$\rho^E(z, \omega) = \frac{\rho_v}{|\epsilon_m + 1|^2} \frac{\epsilon''}{4K_0^3 z^3} \quad (\text{III} - 2)$$

$$\rho^H = \rho_v \left[\frac{\epsilon''}{16K_0 z} + \frac{\epsilon''}{|\epsilon + 1|^2 K_0 z} \right] \quad (\text{III} - 3)$$

avec

$$\rho_v(\omega) = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3}$$

Ces quantités sont étudiées dans les conditions

$\lambda = 1\mu\text{m} - 50\mu\text{m}$ et à une distance depuis l'interface à $z = 15\text{ nm}$.

Pour le cas du dopage n, l'augmentation de la concentration entraîne une contribution décroissante du champ électrique et où la résonance du pic est décalée vers les hautes fréquences. Fig(III-1) Ce comportement est normal puisqu'il rejoint celui des métaux.

Pour le dopage p, la contribution du champ est similaire au cas précédent. Toute fois, pour une concentration faible (seuil), l'intensité du pic de la LDOS est plus ou moins marquée et reste légèrement constante tout en augmentant la concentration. L'effet de la concentration en trous induit un décalage du pic de résonance vers les hautes fréquences. Fig(III-2) Ce qui est important à signaler sur cette analyse quantitative est que l'interface silicium-air ambiant est le siège de la génération d'une émission lumineuse mesurable en transmission. Selon le type de dopage, Tab.(III-1) les paramètres de cette émission radiative sont contrôlés sur la concentration, et la distance d'approche z . On peut également faire intervenir la

notion de température qui modifie les propriétés optiques du silicium et donc faire de l'émission thermique de structure dont les perspectives sont orientées à la conception des cellules photovoltaïques pour l'énergie solaire. Nous appuyons notre étude via le silicium pour une telle application menant à améliorer le rendement énergétique à savoir la maîtrise des paramètres que nous avons évoqué précédemment.

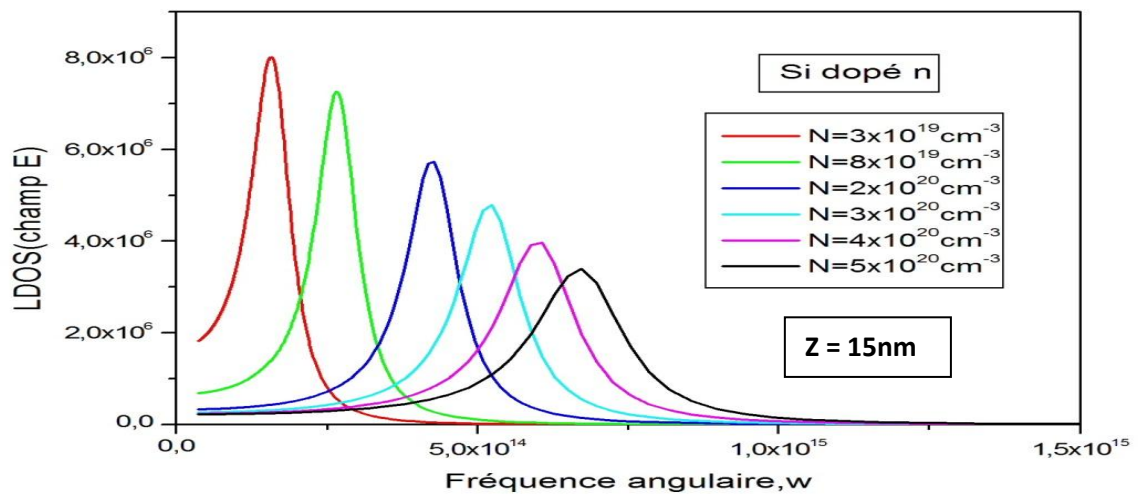


Fig.(III-1) Contribution du champ électrique en fonction de la fréquence angulaire dans différentes conditions en concentration N de porteurs de charge pour le dopage n du silicium

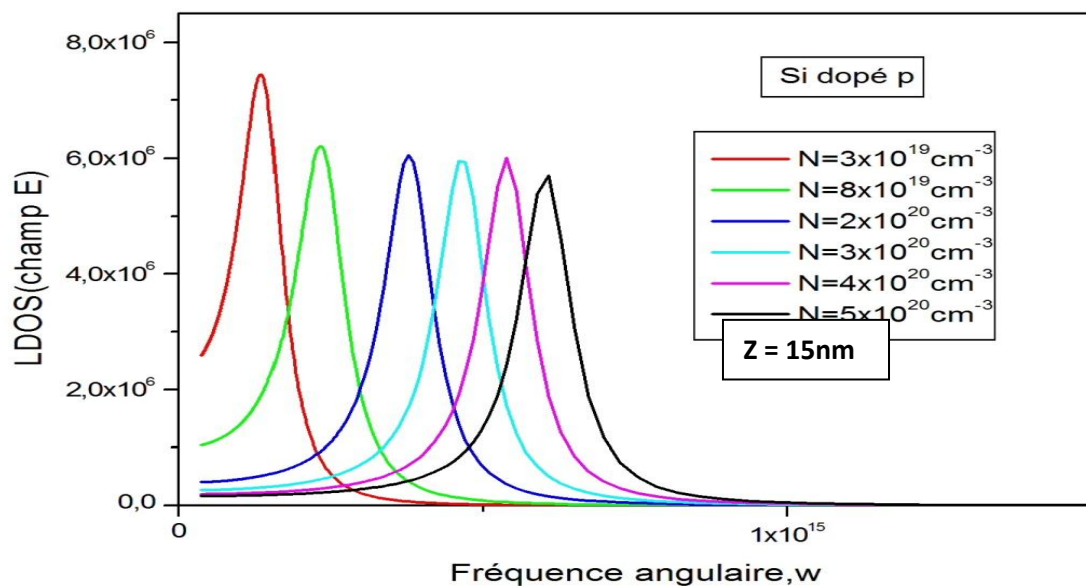


Fig.(III – 2): Contribution du champ électrique en fonction de la fréquence angulaire dans différentes conditions en concentration N de porteurs de charge pour le dopage p du silicium.

- Fréquence angulaire de la résonance du LDOS (champ électrique)

Concentration (cm^{-3})	Fréquence angulaire de la résonance. (rd S^{-1})	
	Si dopé p	Si dopé n
3×10^{19}	1.36×10^{14}	1.56×10^{14}
8×10^{19}	2.31×10^{14}	2.66×10^{14}
2×10^{20}	3.78×10^{14}	4.26×10^{14}
3×10^{20}	4.65×10^{14}	5.15×10^{14}
4×10^{20}	5.31×10^{14}	5.95×10^{14}
5×10^{20}	6.06×10^{14}	6.71×10^{14}

Table.(III- 1) résumé des paramètres caractéristiques de la résonance angulaire de la LDOS mesurés sur le silicium dopé p et n pour chaque concentration

2.2. Champ magnétique

Pour le cas du dopage n, l'augmentation de la concentration entraîne une contribution croissante du champ magnétique et où la résonance du pic est décalée vers les hautes fréquences. Fig(III-3) Ce comportement est normal puisqu'il rejoint celui des métaux.

Pour le dopage p, la contribution du champ est similaire au cas précédent. concentration. L'effet de la concentration en trous induit un décalage du pic de résonance vers les hautes fréquences. Fig(III-4) Ce qui est important à signaler sur cette analyse quantitative est que l'interface silicium-air ambiant est le siège de la génération d'une émission lumineuse mesurable en transmission. Selon le type de dopage, Tab.(III-2)

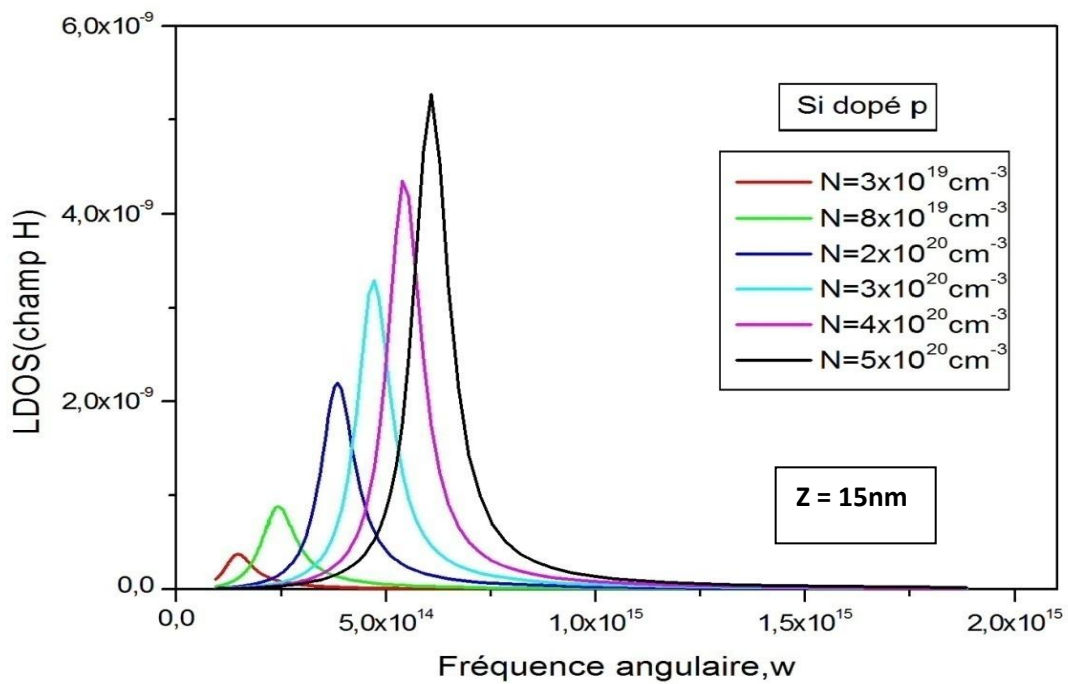


Fig.(III – 3): Contribution du champ magnétique en fonction de la fréquence angulaire dans différentes conditions en concentration N de porteurs de charge pour le dopage p du silicium.

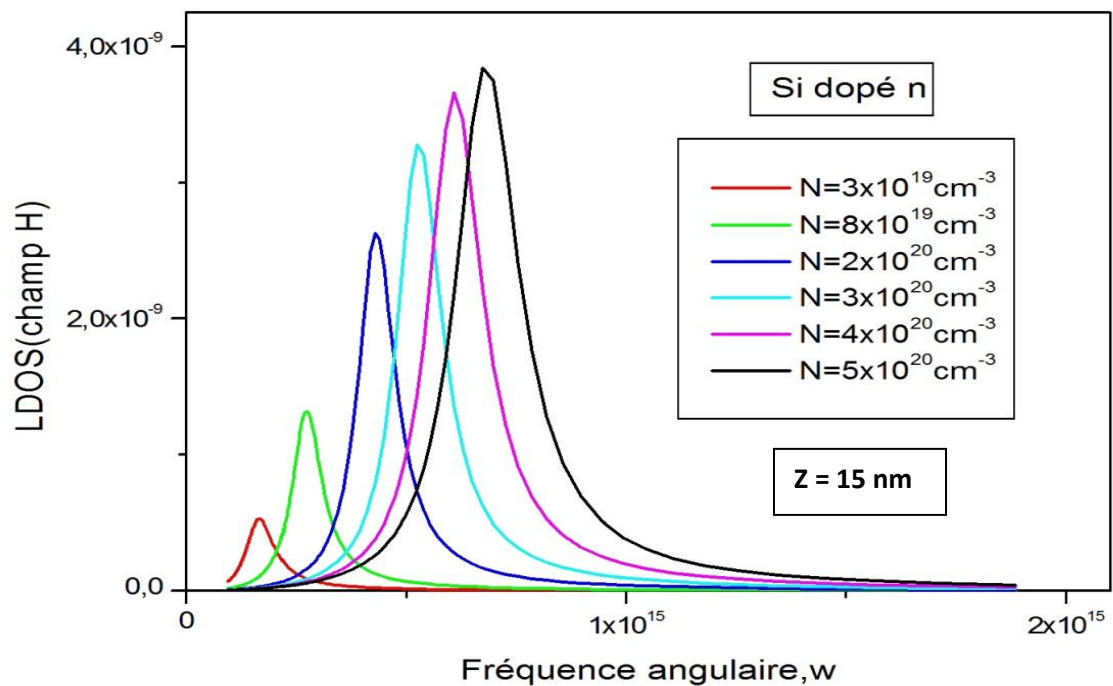


Fig.(III – 4): Contribution du champ magnétique en fonction de la fréquence angulaire dans différentes conditions en concentration N de porteurs de charge pour le dopage n du silicium.

- Fréquence angulaire de la résonance du LDOS (champ électromagnétique)

Concentration (cm^{-3})	Fréquence angulaire de la résonance(rd S^{-1})	
	Si dopé p	Si dopé n
3×10^{19}	1.42×10^{14}	1.60×10^{14}
8×10^{19}	2.44×10^{14}	2.71×10^{14}
2×10^{20}	3.82×10^{14}	4.30×10^{14}
3×10^{20}	4.65×10^{14}	5.20×10^{14}
4×10^{20}	5.38×10^{14}	6.04×10^{14}
5×10^{20}	6.06×10^{14}	6.78×10^{14}

Table.(III- 2) résumé des paramètres caractéristiques de la résonance angulaire de la LDOS mesurés sur le silicium dopé p et n .

3. Effet de positions z depuis l'échantillon sur la contribution de champ proche

- Pour étude la comportement de la contribution du champ E proche trace LDOS(champ électrique) En fonction de la fréquence angulaire

3.1.Champ électrique

A parte l'équation (III-3) Pour une concentration fixe l'effet de la position z sur LDOS pour le dopage p et n, l'augmentation de la position z elle donnée une contribution décroissante du champ électrique où la résonance angulaire est constante pour tous les valeurs de concentration égale ($4.65 \times 10^{14} \text{ rd S}^{-1}$) et ($6.71 \times 10^{14} \text{ rd S}^{-1}$) pour les deux typé de dopage p et n respectivement et l'intensité du pic de la LDOS décroissante vers zéro avec l'augmentation de la position z .(cf . Tab (III-3) pour le dopage p et Tab (III-4) pour le dopage n cette effet que montre la caractère évanescent de l'onde de surface

Concentration cm^{-3}	3×10^{20}		
Z nm	10	20	40
LDOS	2×10^7	0.25×10^7	0.05×10^7

Table. (III-3) résumé des paramètres caractéristiques de la résonance angulaire de la LDOS mesurés sur le silicium dopé p pour chaque position z et concentration fixé

Concentration cm^{-3}	5×10^{20}		
Z nm	10	20	40
LDOS	11.5×10^6	1.5×10^6	0.15×10^6

Table. (III-3) résumé des paramètres caractéristiques de la résonance angulaire de la LDOS mesurés sur le silicium dopé n pour chaque position z et concentration fixé.

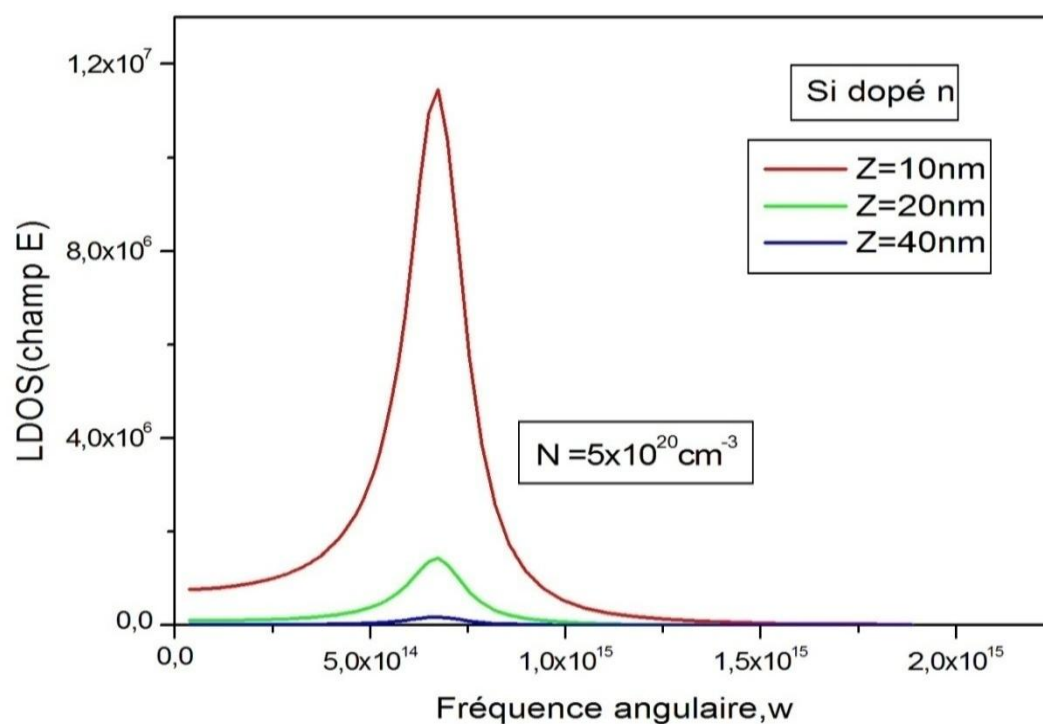


Fig. (III– 5) : Contribution du champ électrique en fonction de la fréquence angulaire pour une concentration N de porteurs de charge pour le dopage n du silicium et pour différentes positions z depuis l'échantillon

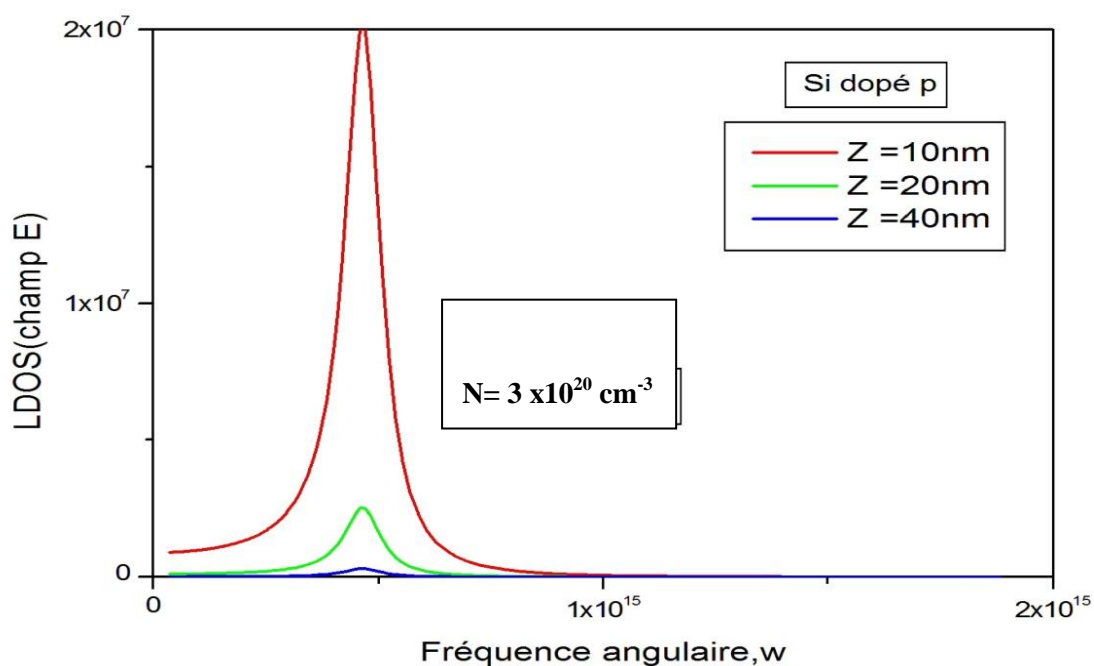


Fig. : (III – 6) : Contribution du champ électrique en fonction de la fréquence angulaire pour une concentration N de porteurs de charge pour le dopage p du silicium et pour différentes positions z depuis l'échantillon .

3.2. Champ magnétique

Pour étudier le comportement de la contribution du champ H proche trace LDOS (champ magnétique) En fonction de la fréquence angulaire .

A partir de l'équation (III-3) et Pour une concentration de porteurs de charge fixe N . l'effet de la position z sur LDOS pour le dopage n et p, l'augmentation de la position z elle donne une contribution décroissante du champ magnétique où la résonance angulaire est constante pour toutes les valeurs de concentration égale (4.64×10^{14} rd S^{-1}) et (6.78×10^{14} rd S^{-1}) pour les deux types de dopage p et n respectivement et l'intensité du pic de la LDOS décroissante vers zéro avec l'augmentation de la position z .(cf . Tab (III- 5) pour le dopage p et Tab (III-6) pour le dopage n cette effet qui montre le caractère évanescent de l'onde de surface

Concentration (cm^{-3})	3×10^{20}		
Z (nm)	10	20	40
LDOS	5×10^{-9}	2.5×10^{-9}	1.2×10^{-9}

Table. (III-5) résumé des paramètres caractéristiques de la résonance angulaire de la LDOS mesurés sur le silicium dopé p pour chaque position z et concentration fixé

Concentration cm^{-3}	5×10^{20}		
Z nm	10	20	10
LDOS	5.8×10^{-9}	3.8×10^{-9}	1.5×10^{-9}

Table. (III-6) résumé des paramètres caractéristiques de la résonance angulaire de la LDOS mesurés sur le silicium dopé p pour chaque position z et concentration fixé

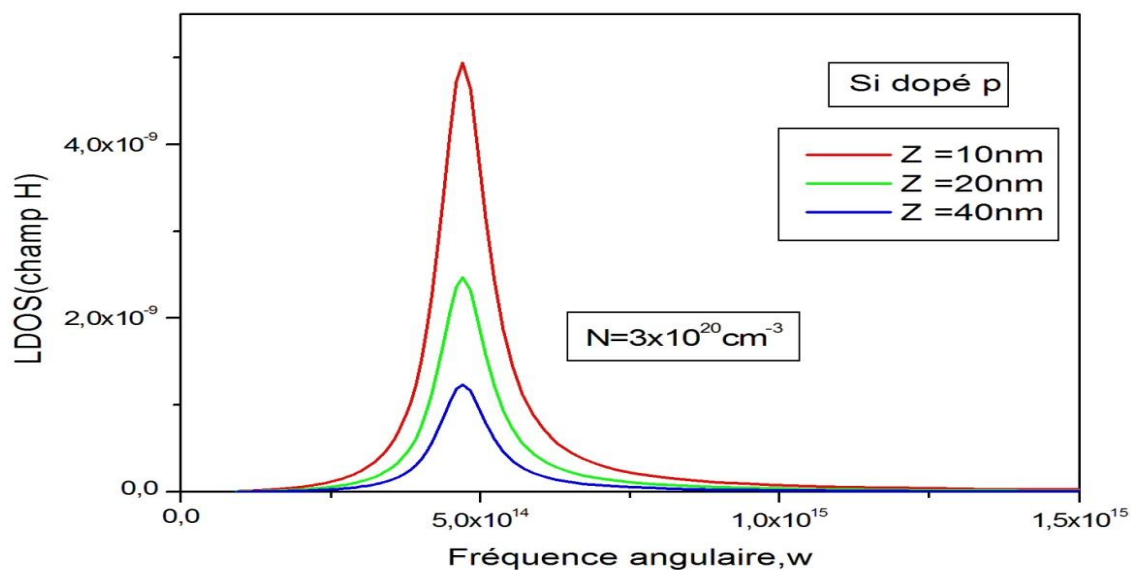


Fig. (III-7): Contribution du champ magnétique en fonction de la fréquence angulaire pour une concentration N de porteurs de charge pour le dopage p du silicium et pour différentes positions z depuis l'échantillon

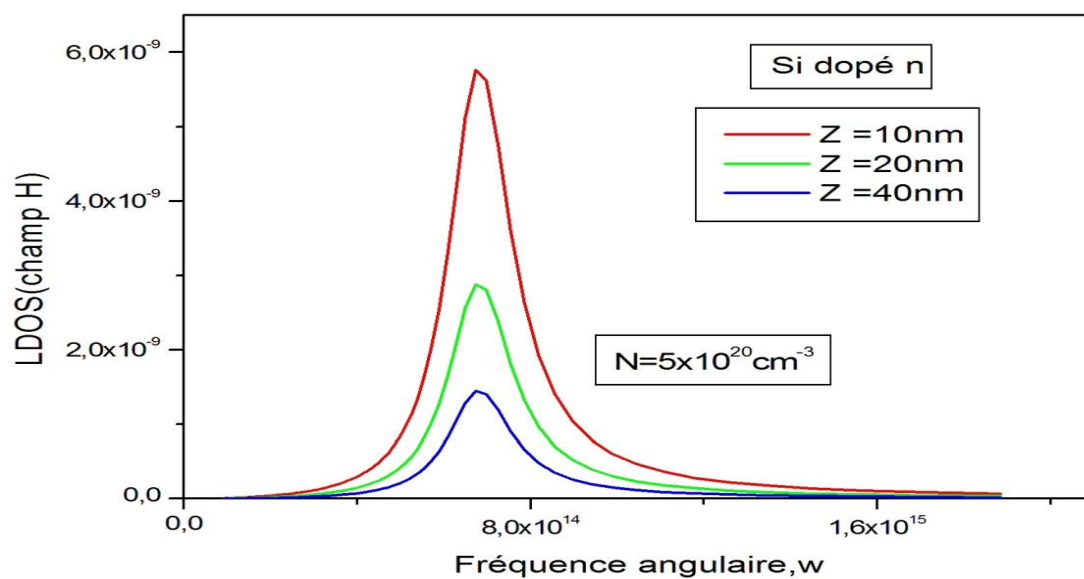


Fig. (III-8): Contribution du champ magnétique en fonction de la fréquence angulaire pour une concentration N de porteurs de charge pour le dopage n du silicium et pour différentes positions z depuis l'échantillon .

4. Contribution totale à la densité locale des états proche d'une surface

chargée p

Dans le cas de contribution Total et pour la position $z=15\text{ nm}$, l'augmentation de la concentration entraine une contribution de la LDOS décroissante comme la champ électrique et le résonance angulaire est décalée vers les hautes fréquences(cf.fig.(III-9)). Mais l'effet de champ magnétique est lâche par rapport la champ électrique (cf.fig.(III-10)) cette comportement toute égal la comportement de champ électrique et ces la même pour le silicium dopé n.et p voir le Table (III-7)

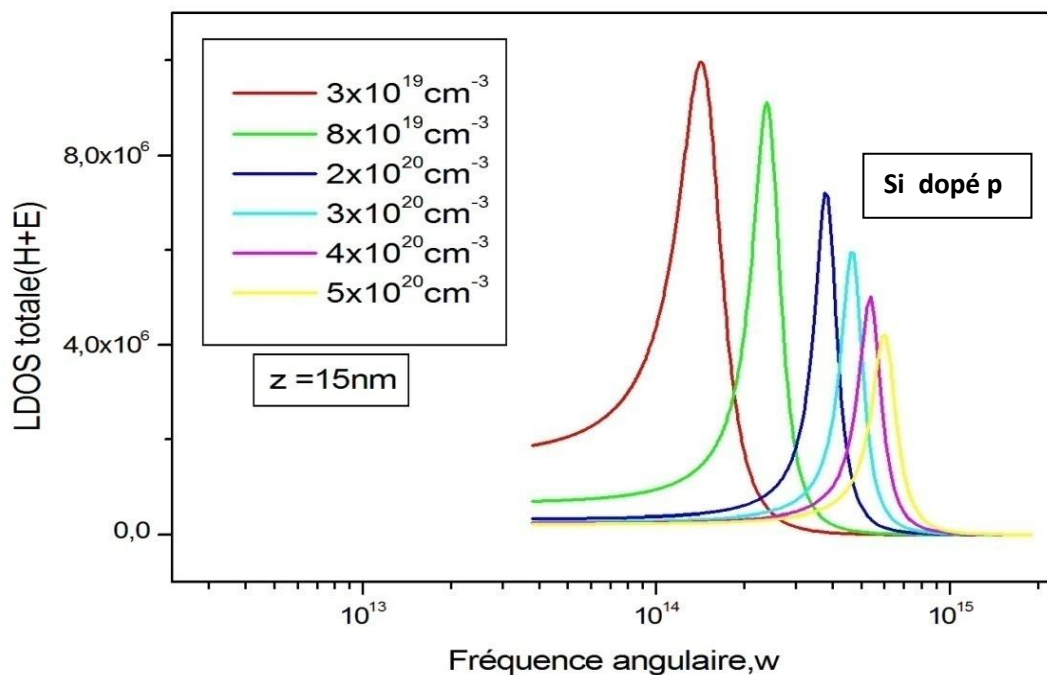


Fig. (III-9).: Contribution du champ électromagnétique en fonction de la fréquence angulaire dans différentes conditions en concentration N de porteurs de charge pour le silicium dopé p.

- Fréquence angulaire de la résonance du LDOS Totale

Concentration (cm^{-3})	Fréquence angulaire de la résonance(rd S^{-1})	
	Si dopé p	Si dopé n
3×10^{19}	1.38×10^{14}	1.57×10^{14}
8×10^{19}	2.35×10^{14}	2.68×10^{14}
2×10^{20}	3.80×10^{14}	4.30×10^{14}
3×10^{20}	4.63×10^{14}	5.15×10^{14}
4×10^{20}	5.37×10^{14}	5.98×10^{14}
5×10^{20}	6.06×10^{14}	6.73×10^{14}

Table.(III- 7) résumé des paramètres caractéristiques de la résonance angulaire de la LDOS totale mesurés sur le silicium dopé p et n .

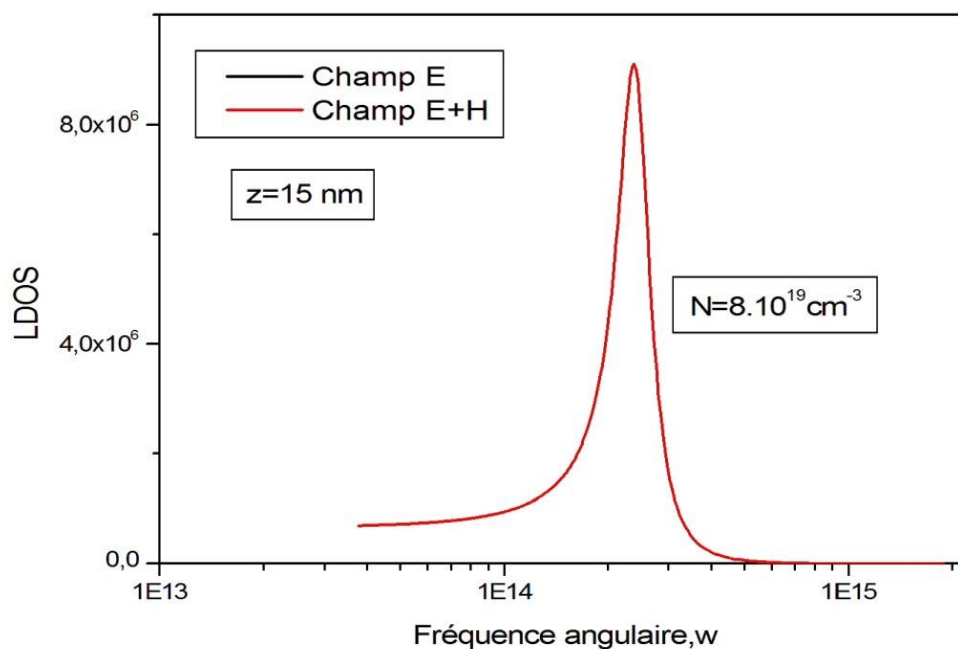


Fig. . (III-10): Contribution du champ électromagnétique et champ électrique en fonction de la fréquence angulaire dans différentes conditions en concentration N de porteurs de charge pour le silicium dopé

- longueurs d'onde de LDOS (champ électrique) pour la résonance

Concentration (cm^{-3})	Longueur d'onde de la résonance(μm)	
	Si dopé p	Si dopé n
3×10^{19}	4.61	4.02
8×10^{19}	2.75	2.36
2×10^{20}	1.65	1.47
3×10^{20}	1.35	1.22
4×10^{20}	1.17	1.05
5×10^{20}	1.03	0.93

Table.(III-4) résumé des paramètres caractéristiques de les longueurs d'onde de la LDOS mesurés sur le silicium dopé n et p.

Note : Le silicium dopé joue le rôle d'une structure radiative de lumière émise sur une plage de longueur d'onde contrôlée sur la concentration des porteurs de charge.