



Optique géométrique et ondulatoire

I Rapports

CCINP 2024

Les constructions géométriques manquent souvent de rigueur et surtout de clarté.

En particulier, dans le dispositif des trous d'Young en montage de Fraunhofer, les rayons lumineux qui interfèrent en un point préalablement fixé sur l'écran sont très souvent tracés au hasard.

L'origine de la différence de marche dans un montage interférentiel n'est pas toujours bien comprise, que ce soit pour le dispositif des trous d'Young en montage de Fraunhofer ou pour un interféromètre de Michelson.

Les observations en lumière blanche sont souvent mal interprétées. En particulier, les cannelures d'un spectre cannelé sont souvent interprétées comme des franges d'interférences sombres, directement visibles sur l'écran. Le calcul des longueurs d'ondes absentes constitue de ce fait une réelle difficulté.

CCINP 2023 et 2022

Les constructions géométriques manquent souvent de rigueur et surtout de clarté.

En particulier, dans le dispositif des trous d'Young en montage de Fraunhofer, les rayons lumineux qui interfèrent en un point préalablement fixé sur l'écran sont très souvent tracés au hasard.

L'origine de la différence de marche dans un montage interférentiel n'est pas toujours bien comprise, que ce soit pour le dispositif des trous d'Young en montage de Fraunhofer ou pour un interféromètre de Michelson.

La notion de blanc d'ordre supérieur est souvent mal comprise. En particulier, les cannelures d'un spectre cannelé sont souvent interprétées comme des franges d'interférences sombres, directement visibles sur l'écran. Le calcul des longueurs d'ondes absentes constitue de ce fait une réelle difficulté.

Les notions de base sur les réseaux échappent à la plupart des candidats : les angles d'incidence et de diffraction ne sont pas forcément petits et beaucoup de candidats ne savent pas exploiter la condition d'interférences constructives pour retrouver la formule des réseaux.

La description des conditions d'observation dans un interféromètre de Michelson monté en configuration lame d'air, ou coin d'air et éclairé par une source étendue est généralement satisfaisante. En revanche, les conditions d'éclairage sont souvent méconnues.

Mines-Ponts 2024

L'optique géométrique est très souvent mal maîtrisée, notamment les constructions, alors qu'elles sont généralement incontournables pour étudier un interféromètre ou un système d'observation réel (lunette astronomique, microscope, appareil photographique, . . .). De même, la représentation d'une différence de marche sur un schéma est un prérequis à l'étude de la géométrie du problème.

L'importance de la discussion sur la cohérence des sources est comprise. Il est cependant regrettable qu'une définition claire de celle-ci n'est que rarement formulée. Quant au critère de brouillage, très majoritairement su, son utilisation est parfois hasardeuse.

Les considérations expérimentales, en particulier sur l'interféromètre de Michelson sont à maîtriser. Pour finir la notion de spectre cannelé est souvent mal comprise par les candidats.

Mines-Ponts 2023

Un exercice d'optique doit généralement commencer par un tracé de rayons lumineux.

Nombre de candidats ne sait pas réaliser ce type de construction, en particulier si le système possède plusieurs lentilles ou s'il mêle trous d'Young et lentilles.

En optique géométrique, le fonctionnement de l'œil et les constructions géométriques associées posent souvent problème.

En optique ondulatoire, la construction des sources secondaires sur différents dispositifs interférométriques est parfois très confuse. De plus, l'effet d'un système stigmatique tel qu'une lentille mince sur la différence de marche entre deux rayons qui la traversent issus de A et allant vers A' n'est pas maîtrisé. Trop de candidats connaissent simplement le résultat par cœur : si celui-ci peut être proposé sans calcul, il faut cependant savoir représenter cette différence de marche sur un schéma, même pour le montage des trous d'Young. Dans ce dernier cas, il est nécessaire de préciser sous quelles conditions de distance ce résultat est effectivement valide.

Le critère de cohérence pour une source spatialement ou spectralement étendue est généralement utilisé à bon escient. Cependant, le vocabulaire (cohérence, synchronisme, en phase) n'est pas interchangeable et doit être maîtrisé.

Centrale-Supélec 2024

Il subsiste encore des difficultés dans les constructions géométriques menant au calcul d'une différence de marche. Le vocabulaire est parfois mal maîtrisé. On rencontre des confusions entre différence de marche, de phase et de chemin optique. Les conditions d'interférences sont rarement bien énoncées et traduisent un manque de compréhension des bases de l'optique ondulatoire. Il importe de comprendre la physique qui permet de passer de $d = kl$ entre deux rayons diffractés par deux traits consécutifs d'un réseau à la formule des réseaux à N ondes.

Même si le diptyque retour inverse de la lumière et théorème de Malus est plus souvent évoqué que par le passé, l'énoncé de ce dernier est parfois incomplet et ses conséquences alors mal exploitées. Il faut le reprendre pour bien l'exposer.

Certains fondamentaux de l'optique géométrique font parfois défaut : défaut d'algébrisation des grandeurs et tracés approximatifs notamment.

Centrale-Supélec 2022

On note des difficultés dans les constructions géométriques menant au calcul d'une différence de marche. Certains n'hésitent pas à faire de la géométrie autour d'une lentille convergente, ignorant sa nature bombée... La condition d'interférences destructives/destructives portant sur le déphasage ou l'ordre d'interférence est méconnue, on lui préfère la formule de Fresnel et les calculs aboutissent alors rarement. Il serait bon de reprendre ce point. Le théorème de Malus porte hélas bien son nom. Il faut le reprendre pour bien l'exposer. Des tracés élémentaires d'optique géométrique ont posé d'insurmontables difficultés.

II Questions de cours

- Réflexion et transmission par un dioptre ; cas de la réflexion totale.
- Cohérence temporelle en optique.
- L'approximation de Gauss en optique géométrique.
- Prisme au minimum de déviation.
- Minimum de déviation par un réseau.
- Approximation scalaire de l'optique.
- Conditions de formation d'images en optique. Présentation de quelques instruments d'optique.

- Conditions d'obtention d'interférences entre deux ondes lumineuses.
- Protocole de réglage d'un interféromètre de Michelson.
- Phénomène d'interférences à deux ondes et applications.
- Effet laser : nécessité d'une inversion de population.

III Exercices

On rappelle les formules de conjugaison pour une lentille, donnant une image A' d'un objet A sur l'axe optique ainsi que les formules du grandissement, avec origine au centre optique O :

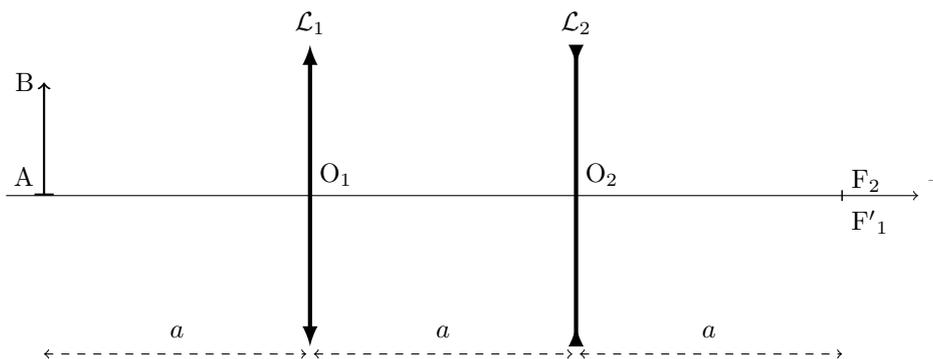
$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{\overline{OA'}} - \frac{1}{\overline{OA}} \quad \gamma = \frac{\overline{OA'}}{\overline{OA}}$$

avec origine aux foyers :

$$\overline{FA} \times \overline{F'A'} = f \times f' \quad \gamma = \frac{-f}{\overline{FA}} = \frac{\overline{F'A'}}{-f'}$$

1. Lunette de Galilée – CCINP

Une lunette de Galilée est constituée d'une lentille convergente \mathcal{L}_1 et d'une lentille divergente \mathcal{L}_2 . Déterminer géométriquement et analytiquement l'image de A . Quel est le grandissement ?



2. Projection de diapositives

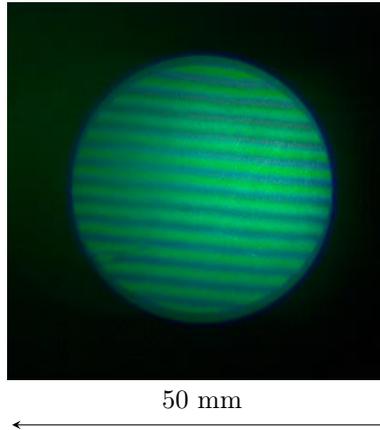
Les dispositifs de format courant sont des rectangles 24 mm x 36 mm. On assimile l'objectif du projecteur de diapositives à une lentille mince (\mathcal{L}) de distance focale image f' . On veut réaliser une projection sur un écran 2 m x 2 m. L'utilisation optimale du système consiste à produire une image dont le plus grand côté a une dimension de 2m.

1. Déterminer les positions respectives de la diapositive, de (\mathcal{L}) et de l'écran pour qu'il en soit ainsi.
2. Application numérique 1 : $f' = 85$ mm. Déterminer numériquement les positions des différents éléments du montage.
3. Application numérique 2 : La projection est effectuée dans une pièce dont la plus grande dimension est $L = 3$ m.
 - (a) Quelle condition sur la distance focale f' pour que la projection optimale soit possible ?
 - (b) Quelle est la plus grande image que l'on peut obtenir avec $f' = 85$ mm ?

3. Interféromètre de Michelson – CCINP

À la sortie d'un interféromètre de Michelson, on place une lentille de focale $f' = 50$ cm. Le diamètre des miroirs est $D = 2$ cm. On observe sur l'écran la figure ci-dessous.

- Déterminer les positions relatives de la lentille de l'écran et des miroirs.
- Quelle est la configuration de l'interféromètre conduisant à cette figure d'interférence ?
- On utilise une lampe à vapeur de mercure, dont on a sélectionné la raie verte $\lambda = 546 \text{ nm}$. Préciser quantitativement la configuration précédente.



4. Visieur – CCINP

Un viseur est constitué d'une lentille L_1 convergente ($f'_1 = 5 \text{ cm}$) et d'un écran situé à $d = 7,5 \text{ cm}$ de L_1 .

Un objet A_1B_1 est placé à 20 cm avant une lentille L dont on ignore la focale. On observe une image nette de l'objet A_1B_1 sur l'écran lorsque L est placé à 5 cm devant L_1 . Calculer la focale f' de L .

5. Microscope – CCINP

Soit un microscope composé de deux lentilles convergentes L_1 et L_2 de distance focale $f'_1 = 5 \text{ mm}$ et $f'_2 = 25 \text{ mm}$. On a $\overline{F'_1F_2} = \Delta = 16 \text{ cm}$. On place un objet AB de taille $0,1 \text{ mm}$ tel que A soit sur l'axe optique. A_1B_1 est son image à travers la lentille L_1 et $A'B'$ l'image de A_1B_1 à travers L_2 .

- Où doit se situer $A'B'$ pour qu'il n'y ait pas d'accommodation de la part de l'observateur ?
 - En déduire où est A_1 .
 - Calculer $\overline{F_1A_1}$.
 - Tracer le schéma expliquant comment on obtient $A'B'$.
- Calculer le grandissement γ_1 de la lentille L_1 .
 - On note α' l'angle formé par les rayons à la sortie de L_2 , calculer α' .
 - On place un objet AB de taille $0,1 \text{ mm}$ à la distance d de l'œil de l'observateur. En prenant une distance $d = 25 \text{ cm}$, calculer α , l'angle sous lequel l'objet est observé par l'œil.
 - On note $G_c = \left| \frac{\alpha'}{\alpha} \right|$ le grossissement du microscope, calculer G_c .

6. Interféromètre de Michelson avec un miroir défectueux – Mines-Ponts

On prend un interféromètre de Michelson réglé au contact optique. On l'éclaire avec une source étendue monochromatique placée dans le plan focal d'une lentille convergente. On projette les miroirs sur un écran avec un grandissement de 10.

- Si les deux miroirs sont parfaits, que voit-on ?
- En réalité, on voit une tache centrale brillante et un anneau sombre de rayon 5 cm . On suppose que l'un des deux miroirs est parfait et que l'autre présente un défaut de planéité. Déterminer ce défaut.

A.N. $\lambda = 500 \text{ nm}$.

7. Système afocal – CCINP

On a deux lentilles convergentes de focales f'_1 et f'_2 . Déterminer la distance entre L_1 et L_2 pour avoir un montage afocal, ainsi que le grandissement correspondant.

On considère désormais une convergente (f'_1) et une divergente (f'_3). Distance entre L_1 et L_3 pour avoir un montage afocal? Grandissement?

8. Doublet – CCINP

On réalise des interférences lumineuses non localisées avec une source qui émet, avec la même intensité, deux radiations de longueurs d'onde $\lambda_1 = 589,6$ nm et $\lambda_2 = 589,0$ nm. On notera δ la différence de marche entre les deux rayons, issus de la source, venant interférer en un point de l'écran.

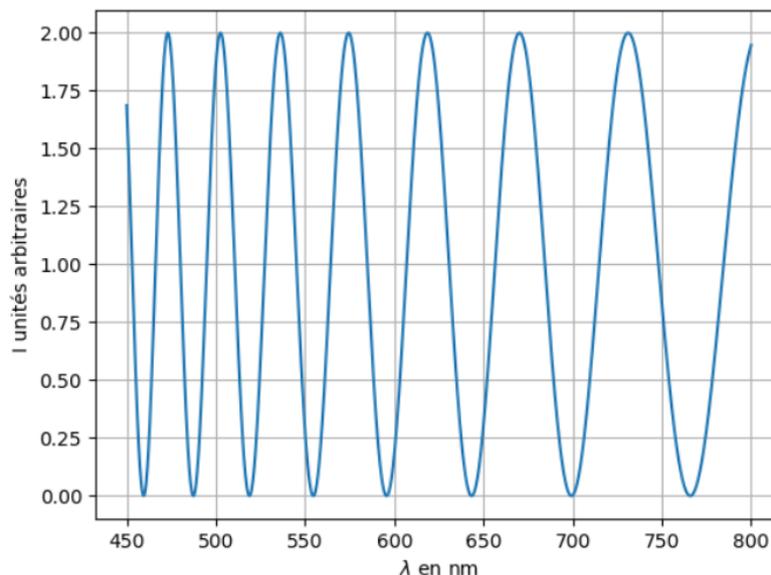
1. Exprimer l'intensité lumineuses en fonction de δ .
2. Représenter $I(\delta)$.
3. Quelle est la valeur de δ correspondant au premier brouillage.

9. Épaisseur d'un film alimentaire – Mines Telecom

1. Expliquer le fonctionnement d'un interféromètre de Michelson réglé en lame d'air.
2. On se place au contact optique et on insère un film alimentaire d'indice $n = 1,51$ et d'épaisseur e dans l'un des bras du Michelson.
On parcourt le spectre visible et on constate que pour certaines longueurs d'ondes, l'intensité est nulle. Expliquer.
3. Montrer que l'expression de ces longueurs d'ondes est :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2k + 1}{2} \frac{1}{\delta}$$

4. On place un détecteur au centre de la figure d'interférence et on trace $I = f(\lambda)$. On obtient le graphe ci-dessous. Calculer l'épaisseur du film.

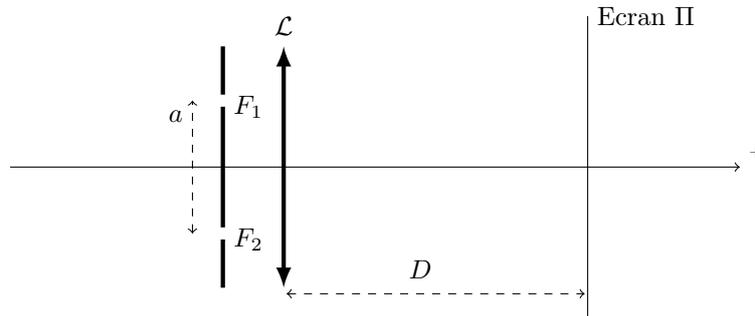


10. Fentes d'Young – Mines

F_1 et F_2 sont deux fentes d'Young très fines éclairées sous incidence normale de longueur d'onde λ , $F_1 F_2 = a$. La lentille de distance focale image f' est pratiquement confondue avec le plan des fentes.

Déterminer l'interfrange i sur le plan Π

1. Pour $D = f'$
2. Pour $D = 2f'$



11. Mesure de l'indice du monoxyde de carbone – Centrale

On considère le dispositif interférentiel ci-dessous, qui permet de mesurer l'indice du monoxyde de carbone CO, en mettant en jeu trois bacs A , B et C , chacun séparé en deux compartiments de même longueur e .

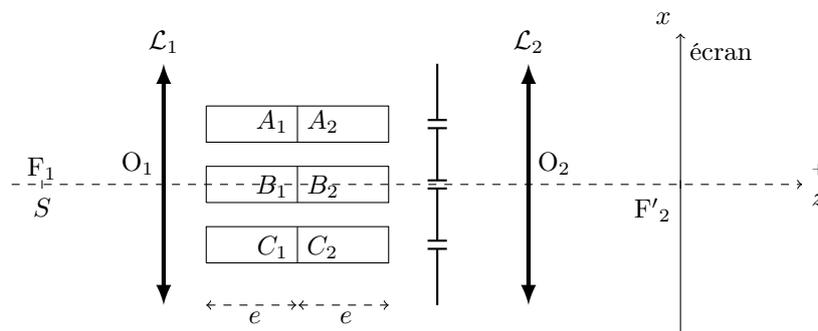
Les six compartiments sont initialement remplis d'air. Deux opérations peuvent être réalisées :

- (O_1) on fait le vide dans les compartiments A_1 , A_2 et B_1 ;
- (O_2) on remplit les compartiments A_1 , A_2 et B_1 de monoxyde de carbone CO.

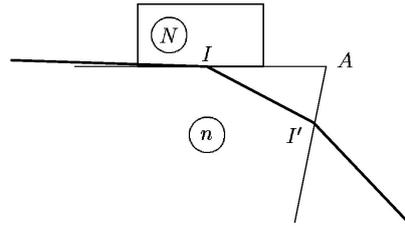
1. On réalise l'opération (O_1). Dans quel sens se sont déplacées les franges ?
2. On revient à la situation initiale (six compartiments remplis d'air). On réalise alors l'opération (O_2). On constate que, lors de cette opération, 8 franges (à plus ou moins 1 frange) défilent sur l'écran vers le haut. L'indice n_{CO} du monoxyde de carbone est-il supérieur ou inférieur à l'indice n de l'air ? Déterminer l'indice n_{CO} , ainsi que l'incertitude associée.
3. Représenter le profil de l'intensité lumineuse observée sur l'écran. Le comparer à celui observé dans le cas d'interférences à deux ondes.

Données :

- la longueur d'onde dans le vide de la source S monochromatique $\lambda_0 = 589,27 \text{ nm}$;
- l'indice optique de l'air $n = 1,00027$ (six chiffres significatifs)
- la longueur d'un compartiment $e = 1,0 \text{ cm}$



12. Réfractomètres de Pulfrich et d'Abbe



Un rayon lumineux provenant d'un milieu d'indice inconnu N tombe sur un prisme (indice n , angle A) sous une incidence rasante. Il émerge du prisme en faisant l'angle i' avec la normale à la face de sortie.

Calculer N dans les deux cas suivants :

Réfractomètre de Pulfrich	$A = 90^\circ$	$n = 1,732$	$i' = 30^\circ$
Réfractomètre d'Abbe	$A = 61^\circ$	$n = 1,60$	$i' = 15^\circ$

13. Minimum de déviation d'un réseau par transmission

Soit un réseau par transmission de pas a éclairé sous une incidence i .

1. Donner l'expression de la déviation D_k du rayon correspondant à la longueur d'onde λ dans l'ordre k .
2. Montrer que, si l'on fait tourner le réseau autour d'un axe parallèle aux traits, cette déviation passe par un minimum D_{kmin} .
3. On mesure $D_{kmin} = 19^\circ$ pour $\lambda = 550 \text{ nm}$ à l'ordre 3. En déduire le pas du réseau.

14. Oscillations d'une cavité optique résonnante

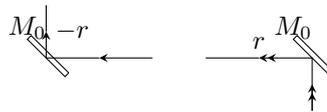


Fig. 1

On considère une cavité optique en anneau, de longueur totale L , formée de 3 miroirs : M_1 concave, M_2 plan, M_0 séparatrice partiellement transparente. M_1 et M_2 sont considérés comme parfaitement réfléchissants et n'introduisant aucun déphasage. M_0 est caractérisée par le coefficient de transmission en amplitude $t > 0$ indépendant du sens de propagation, et par le coefficient de réflexion en amplitude $r > 0$ sur la face inférieure, $(-r)$ sur la face supérieure (fig.1) : $r^2 + t^2 = 1$.

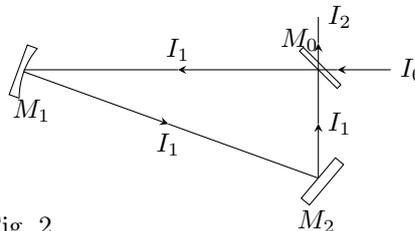


Fig. 2

1. On éclaire la cavité par un faisceau de lumière parallèle monochromatique de longueur d'onde λ_0 . Le milieu n'est ni absorbant, ni amplificateur : l'intensité du faisceau est la même en tout point du trajet intérieur (fig.2). Calculer les intensités I_1 et I_2 des faisceaux dans l'anneau et en sortie en fonction de $\phi = \frac{2\pi L}{\lambda_0}$.
2. Calculer les valeurs minimales et maximales de I_1 . Calculer dans chacun de ces deux cas la valeur de la longueur L en fonction de λ_0 . Soit $r = 1 - \epsilon$, avec $\epsilon \ll 1$. Donner l'allure de la courbe $I_1(\phi)/I_0$.

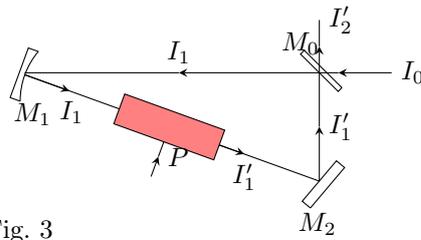


Fig. 3

3. On place désormais (fig.3) un milieu amplificateur de lumière dans l'un des bras de la cavité. Le gain en amplitude (resp. en puissance) de cet amplificateur est $\gamma > 0$ (resp. $G = \gamma^2$). On note P la puissance du faisceau pompe nécessaire pour faire fonctionner le mode amplificateur (fig.4) : $GI = P + I$.

— Calculer I_1/I_0 , I'_2/I_0 en fonction de φ , γ et r .

— À quelle condition peut-on avoir $I'_2 > I_0$? Montrer que la valeur résonnante de I'_2 peut être très élevée sous certaine condition. Quelle est la longueur de la cavité à la résonance? Discuter.

AN : $G = 1,1$; $r^2 = 0,9$. Calculer I'_{2max}/I_0 , I'_{2min}/I_0 .

4. Mode laser : I_0 est désormais nul.

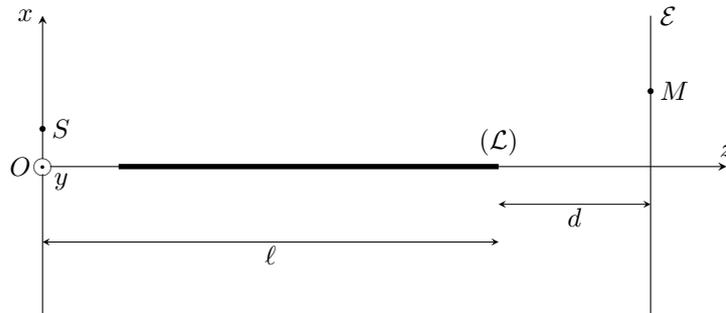
— Quelles sont les conditions à réaliser pour que I_1 et I'_2 ne le soient pas? Interpréter.

— Montrer que l'ensemble des fréquences que peut émettre un laser est dénombrable.

15. Miroir de Lloyd

On éclaire une lame de verre (\mathcal{L}), assimilée à un miroir plan, par une source lumineuse ponctuelle S , située à une distance $a/2$ du plan du miroir, émettant une radiation lumineuse monochromatique de longueur d'onde λ_0 .

On admet que la réflexion sur le miroir entraîne un déphasage de π .



1. Les interférences sont obtenues par superposition de l'onde issue directement de S et de celle réfléchi par le miroir. En déduire quelles sont les deux sources qui produisent des interférences. Sont-elles cohérentes?

2. Représenter les rayons lumineux parvenant au point M de l'écran. Vérifier que le dispositif est un dispositif de division du front d'onde.

3. Décrire le champ d'interférences ; les interférences sont-elles localisées ?

4. L'écran est placé à la distance d du bord droit du miroir. On note ℓ la distance de la source au bord droit du miroir. Déterminer en un point M de l'écran l'ordre d'interférence $p(M)$, la différence de marche $\delta(M)$ et la différence de phase $\Delta\varphi(M)$.

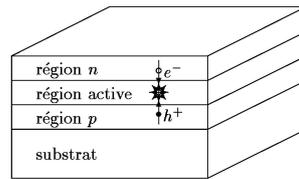
5. En déduire l'expression de l'intensité vibratoire sur l'écran. Quelle est la forme des franges d'interférences ?

6. a) Peut-on remplacer la source par une fente fine allongée dans la direction de \vec{e}_y ?

b) Soit b la largeur de la fente dans la direction de \vec{e}_x ; estimer en fonction de a , b et de l'interfrange i l'extention spatiale de la zone où les franges sont correctement contrastées.

16. Diode électroluminescente

Une diode électroluminescente peut être schématisée de la façon suivante.

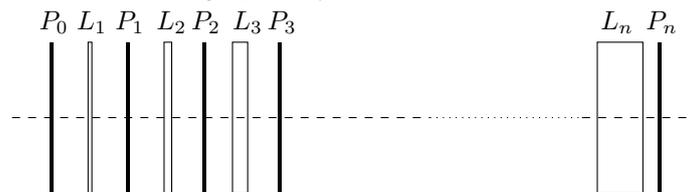


À la surface d'un substrat (semi-conducteur de permittivité relative $\epsilon_r \simeq 11$ aux fréquences optiques), sont déposées trois couches de semi-conducteurs de constantes diélectriques pratiquement égales. Dans la région dopée p , la conduction s'effectue par transport de lacunes électroniques h^+ (hole = trou), tandis que dans la région dopée n , la conduction s'effectue par transport d'électrons e^- .

- Dans quel sens doit-on établir la différence de potentiel entre les couches dopées pour qu'il y ait recombinaison de paires électron-trou dans la région active ?
 - Dans la région active, la création d'une paire électron-trou nécessite une énergie de 2 eV. Evaluer la longueur d'onde de la lumière émise par la diode électroluminescente.
- Déterminer l'angle de réfraction limite à la séparation de la zone n et de l'air sur le dioptre supérieur.
- Calculer l'angle solide du cône lumineux issu d'un point de la région active correspondant aux rayons qui émergent du dioptre supérieur.
- On suppose le substrat parfaitement absorbant et le dioptre supérieur traité anti-reflet. Déterminer la fraction des photons utiles.
- Donner les caractéristiques de la couche anti-reflet.

17. Filtre de Lyot

On réalise le montage de la figure ci-dessous, dans lequel P_0, P_1, P_n sont des polaroïds parallèles, L_1, L_2, L_n sont des lames biréfringentes ; les axes rapides de ces lames sont tous parallèles et orientés à 45° de la direction privilégiée des polaroïds. On rappelle que pour une lame biréfringente perpendiculaire à la direction de la lumière Oz , deux ondes électromagnétiques polarisées suivant les axes x et y se propagent avec les indices respectifs n_x et n_y . Les épaisseurs respectives de ces lames taillées dans le même matériau sont $e, 2e, 2^{n-1}e$. La lame L_1 introduit entre deux ondes polarisées suivant ses lignes neutres le déphasage ϕ . Le système est éclairé en lumière blanche naturelle.



- Exprimer ϕ en fonction de la longueur d'onde λ , de la biréfringence $\Delta n = |n_x - n_y|$ de la lame et de son épaisseur e .
- Exprimer l'intensité I transmise par le système en fonction de ϕ et de l'intensité I_0 transmise par le polariseur P_0 . On négligera l'absorption due aux traversées des lames.
- Déterminer la position des maxima principaux et montrer que les maxima secondaires correspondent à une intensité négligeable.
Donner l'allure de la courbe $\phi \rightarrow I(\phi)$. Pourquoi ce dispositif peut-il être qualifié de monochromateur ?
- Traiter le cas particulier de quatre lames, avec $e = 250 \mu\text{m}$, $\Delta n = 0,01$. Calculer les longueurs d'onde transmises dans le visible en supposant la biréfringence Δn indépendante de la longueur d'onde.