

Travail 4

Remise

- Votre notebook (.ipynb) ou un document au format PDF contenant vos démarches, réponses clairement identifiées et vos scripts (Python, Matlab ou autre)
- Sur la boîte de dépôt dans monportail
- Au plus tard le mercredi 3 décembre 2025 à 12h30

Équipe

- Ce travail est *individuel*

Pondération :

- GEL-4203 : Ce travail vaut pour 10% de la note finale
- GEL-7041 : Ce travail vaut pour 10% de la note finale

Identification

- **Nom :**
- **Matricule :**

Consignes pour répondre aux questions

- Utilisez des cellules de Markdown pour fournir des explications écrites et des équations mathématiques.

- Vous pouvez faire une équation $LATEX$ sur une ligne: $\sum_{n=0}^{\infty} x^n$.
- Vous pouvez faire une équation $LATEX$ centrée:

$$\sum_{n=0}^{\infty} x^n.$$

- Vous pouvez imbriquer des listes:
 - Niveau 2
 - Niveau 3

- Utilisez des cellules de code pour effectuer vos calculs numériques. Prenez soin de bien commenter votre code, de choisir des noms de variables explicites et de "print()" vos réponses.
- N'hésitez pas à encapsuler vos calculs répétés dans des fonctions. À plusieurs endroits, il vous sera suggéré de créer des fonctions spécifiques. Ce n'est pas obligatoire mais fortement conseillé.
- **Indiquez les unités des réponses.**
- **Identifiez correctement vos figures (axes, titre, etc.)**
- **Donnez les démarches complètes aux solutions.**

```
In [1]: """
Librairies permises
N'utilisez que les librairies Python suivantes
"""
%matplotlib inline
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.constants as cte
# from GEL4203_utils import *
plt.rcParams.update({'font.size': 14})
```

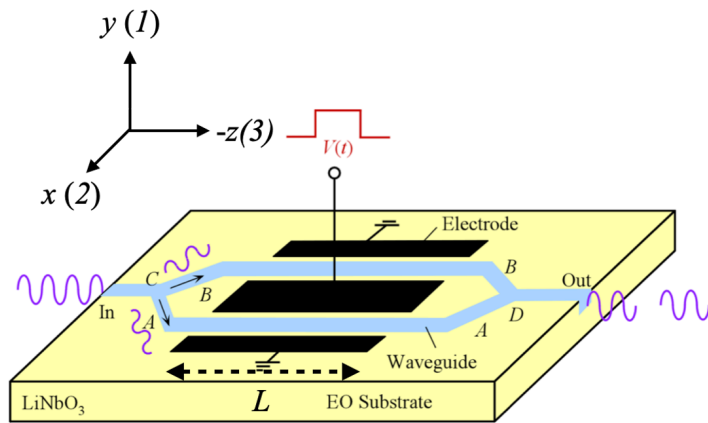
Question 1 - Modulateur de Mach-Zehnder (40%)

Considérez un modulateur de Mach-Zehnder (MZM) en niobate de lithium (LiNbO_3) tel que montré à la figure ci-bas. Chacun des bras du MZM est formé par un guide de LiNbO_3 inscrit par diffusion d'ions de Ti. L'axe 2 du cristal est aligné avec l'axe x du système de coordonnées. L'orientation des axes du cristal est indiqué entre parenthèses dans la figure. La variation de l'indice de réfraction est:

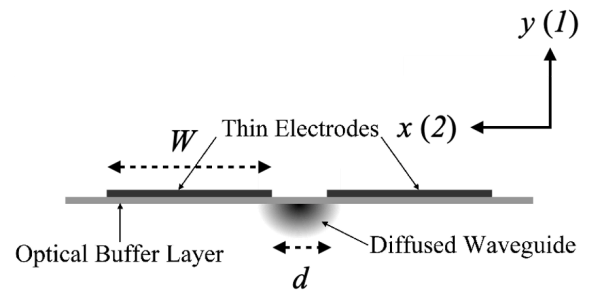
$$\Delta n_x = +\frac{1}{2}n_x^3 r_{22} E_x$$

$$\Delta n_y = -\frac{1}{2}n_y^3 r_{22} E_x$$

Le guide d'onde a un coefficient de recouvrement électro-optique $\Gamma = 0.6$ avec la composante x du champ électrique établi entre les électrodes. La distance entre les électrodes est $d = 5 \mu\text{m}$ et la largeur des électrodes est $W = 10 \mu\text{m}$. Le modulateur opère à $\lambda = 1550 \text{ nm}$. La longueur de chacun des bras est $L = 20 \text{ mm}$. Les indices de réfraction sans champ appliqué sont $n_z = 2.20$ et $n_x = n_y = 2.286$. Considérez la polarisation TE et l'indice effectif égal à l'indice de réfraction du matériau. Le coefficients de Pockels est $r_{22} = 6.8 \text{ pm/V}$.



(a)



(b)

1.A (5%) Calculer la valeur de V_π pour obtenir un saut de phase de π dans un des bras du modulateur.

In []: # - Réponse -

1.B (10%) Tracer la transmittance du modulateur en fonction de la tension appliquée V . Assumez des coupleurs parfaits (50-50). Identifiez la position de V_{pi} calculée en (A) sur votre graphique. Quelle est la transmittance à V_{pi} ?

In []: # - Réponse -

1.C (5%) Vous utilisez un signal électrique avec un composante DC $V_{DC} = 3$ V et une composante AC peak-to-peak $V_{AC,pp} = 1$ V. Quel est le ratio d'extinction ER ?

In []: # - Réponse -

1.D (5%) Trouver une combinaison V_{DC} et V_{AC} vous permettant de maximiser le ratio d'extinction. Quel est le ratio d'extinction à ce moment? Qu'est-ce qui limite ER ?

In []: # - Réponse -

1.E (5%) Quelle tension V_{DC} devez-vous appliquer afin d'opérer autour de la plage linéaire du modulateur?

In []: # - Réponse -

1.F (5%) Quel serait l'effet d'utiliser le modulateur en polarisation TM? Cela serait-il problématique pour son opération? Justifier avec un calcul.

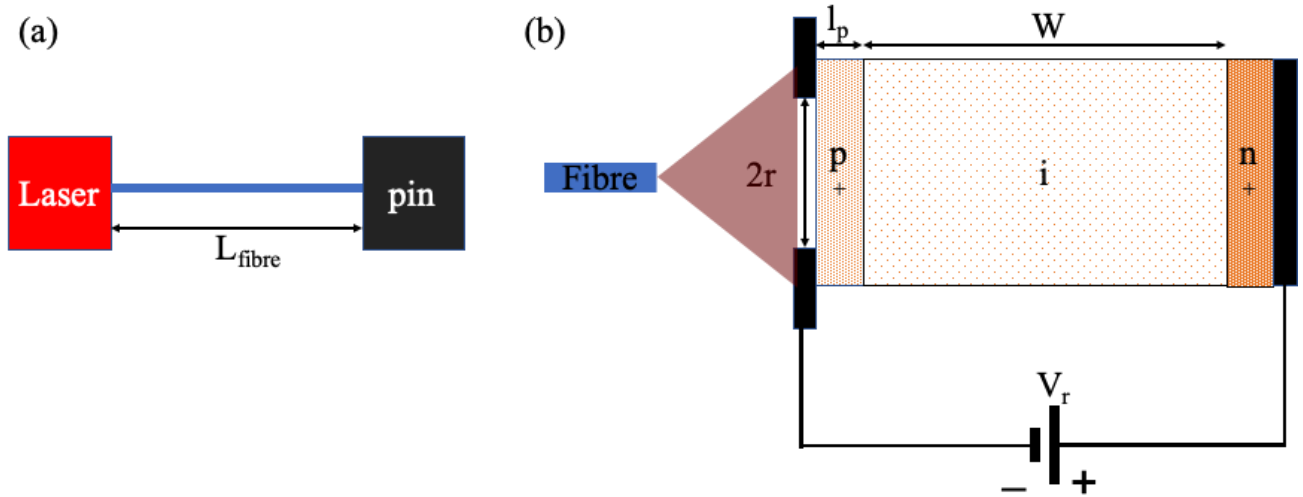
In []: # - Réponse -

1.G (5%) Expliquez qualitativement et dans vos mots quel serait l'effet d'utiliser un coupleur imparfait pour le Mach-Zehnder? C'est à dire que la répartition de la puissance entre le bras A et le bras B ne serait plus 50-50.

In []: # - Réponse -

Question 2 - Photodétecteur (60%)

Considérez le système de transmission présenté à la figure ci-bas en (a). Vous disposez d'une longueur fibre illimitée avec des pertes de propagation de $\alpha_{fibre} = 1$ dB/km. Le faisceau incident sur le photodétecteur (en sortie de la fibre) à une aire de 1 mm^2 . Le photodétecteur *pin* est montré en détail sur la figure ci-bas en (b). Il n'y a pas de recouvrement anti-reflet à l'entrée. Approximez que tous les électrons générés dans la zone *p* atteignent la zone intrinsèque. Vous devez considérer l'absorption dans la zone *p* dans votre analyse. Tous les photoélectrons atteignant la zone *n* participent au photocourant. Votre système est opéré à $T = 300$ K.



Les paramètres de la diode laser sont:

- Courant de seuil: $I_{th} = 10 \text{ mA}$
- Efficacité de pente: $\eta_{slope} = \frac{dP}{dI} = 0.3 \text{ mW/mA}$
- Temps de vie des photons: $\tau_p = 10 \text{ ps}$
- Temps de vie du au couplage (miroirs): $\tau_m = 10 \text{ ps}$
- Volume du mode optique: $V_p = 1 \times 10^{-16} \text{ m}^3$
- Gain différentiel: $B = 1.5 \times 10^{-20} \text{ m}^{-1}$
- Indice de groupe: $n_g = 4$
- Longueur d'onde d'émission: $\lambda_0 = 900 \text{ nm}$

Les paramètres du photodétecteur sont:

- Courant d'obscurité: $I_d = 2 \text{ nA}$
- Rayon de l'ouverture à l'entrée du *pin*: $r = 0.1 \text{ mm}$
- Coefficient de diffusion des électrons dans la zone *p*: $D_e = 3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
- Longueur de la zone *p*: $l_p = 1 \mu\text{m}$
- Longueur de la zone intrinsèque: $W_i = 20 \mu\text{m}$
- Tension d'opération en polarisation inverse: $V_r = 60\text{V}$
- Efficacité quantique interne: $\eta_i = 0.95$
- Coefficient d'absorption dans la zone intrinsèque: $\alpha_i = 3 \times 10^4 \text{ m}^{-1}$

- Coefficient d'absorption dans la zone p : $\alpha_p = 10 \times \alpha_i$
- Indice de réfraction: $n = 3.5$
- Vitesse de dérive des porteurs: $v_{d,e} = v_{d,h} = 5 \times 10^4$ m/s
- Résistance de charge: $R_L = 50 \Omega$

2.A (20%) Quelle est la longueur maximale de fibre que vous pouvez utiliser sans avoir besoin d'amplification si le laser émet 10 mW de puissance, tout en gardant un ratio signal-sur-bruit (SNR) supérieur ou égal à 10?

** Suggestion: écrire une fonction qui calcule le photocourant généré en fonction de la puissance incidente sur le photodétecteur **

In []: # - Réponse -

2.B (5%) Quelle est la responsivité du photodétecteur? Quelle est la puissance équivalente au bruit NEP ?

In []: # - Réponse -

2.C (5%) Proposez deux façons de modifier votre système afin d'augmenter le SNR . Justifiez avec des calculs.

In []: # - Réponse -

2.D (5%) Considérez une modulation directe petit signal du laser de votre système, vous conservez tout mais êtes libre de choisir le courant injecté au laser. Quel courant DC appliquez-vous afin d'obtenir un $SNR \geq 10$?

In []: # - Réponse -

2.E (5%) Encore en modulation directe du laser, quelle est la profondeur de modulation maximale si vous devez être en mesure de différencier l'état "0" au récepteur du bruit d'obscurité?

In []: # - Réponse -

2.F (5%) Proposez une façon d'augmenter la vitesse de modulation directe du laser tout en conservant les conditions de modulations énoncées en (D) et en (E). Justifiez avec un calcul.

In []: # - Réponse -

2.G (5%) Pour les conditions trouvées en (D) et (E), quel est le photocourant généré par le photodétecteur à l'état "1"?

In []: # - Réponse -

2.H (5%) Calculer la fréquence de résonance de la diode laser en modulation petit signal.

In []: # - Réponse -

2.I (5%) Identifiez l'élément limitant la vitesse d'opération de votre système. Justifiez avec un calcul.

In []: # - Réponse -