

Travail 2

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 lundi le 13 octobre 2025 à 12h30

Équipe

- Ce travail est *individuel*

Pondération :

- GEL-4203 : Ce travail vaut pour 5% de la note finale
- GEL-7041 : Ce travail vaut pour 5% de la note finale

Identification

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

```
In [ ]: """
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 guide_1d_analytique
```

Question 1 - Semiconducteurs (20%)

1.A (5%)

Démontrez que la concentration de porteurs dans un matériau semiconducteur est donnée par:

$$n \approx 2 \left[\frac{2\pi m_e^* k T}{h^2} \right]^{3/2} \exp\left(\frac{E_F - E_c}{kT} \right)$$

Puis démontrez que l'énergie de Fermi d'un matériau intrinsèque est donnée par:

$$E_F = E_c - \frac{1}{2}E_g + \frac{3kT}{4} \ln\left(\frac{m_v^*}{m_c^*}\right).$$

Kasap Section: 3.1, 3.2 & 3.3

In []: # - Réponse

1.B (5%)

Considérez un cristal de germanium. Tracez le produit entre la fonction Fermi-Dirac ($f(E)$) et la densité d'états (DOS) pour $T = -10^\circ, 10^\circ$ et 30° et calculez les concentrations correspondantes. Faites attention aux unités.

Kasap Section: 3.1, 3.2 & 3.3

In []: # - Réponse

1.C (5%)

Un cristal de silicium (Si) est dopé en type n avec $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ de donneurs de phosphore (P). La vitesse de dérive des électrons μ_e dépend de la concentration totale des dopants ionisés N_{dopant} .

Concentration (cm^{-3})	0	10^{14}	10^{15}	10^{16}	10^{17}	10^{18}
GaAs, μ_e ($\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	8500		8000	7000	5000	2400
GaAs, μ_h ($\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	400		380	310	250	160
Si, μ_e ($\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	1450	1420	1370	1200	730	280
Si, μ_h ($\text{cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)	490	485	478	444	328	157

Tableau 1 : Les impuretés dopantes ionisées dispersent les porteurs de charge et réduisent la vitesse de dérive. Il y a une dépendance de μ_e pour les électrons et de μ_h pour les trous en fonction de la concentration totale d'impuretés dopantes ionisées.

Quelle est la conductivité de l'échantillon ? Où se situe le niveau de Fermi par rapport au cristal intrinsèque?

In []: # - Réponse

1.D (5%)

Question 3.20 de Kasap

In []: # - Réponse

Question 2 - DEL et jonction PN (35%)

Considérez une super diode électroluminescente (S-DEL) formée par une jonction PN dans un guide d'onde plan (voir figure 3) dont les paramètres sont les suivants:

- Taux de recombinaisons non-radiatives : $\tau_{nr} = \tau_r$
- Permittivité relative : $\epsilon_r = 13$
- Concentration de porteurs intrinsèque : $n_i = 2 \times 10^{12} \text{ m}^{-3}$
- Largeur de la bande interdite : $E_g = 1.4 \text{ eV}$
- Constante de recombinaison : $B = 2 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{s}$
- Surface : $S = 100 \mu \text{m}^2$
- Indice de l'isolant : $n_{SiO_2} = 1.44$
- Dopage symétrique : $N_a = N_d = 1 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$
- Épaisseur du cœur : $l_{PN} = 400 \text{ nm}$
- Température d'opération nominale : $T = 293 \text{ K}$
- Mobilité des porteurs de charges : $\mu_e = 1200 \text{ cm}^2/\text{V/s}$ et $\mu_h = 600 \text{ cm}^2/\text{V/s}$

Le cœur du guide a un indice de réfraction constant et uniforme. La jonction PN est symétrique. La DEL est opérée en polarisation directe.

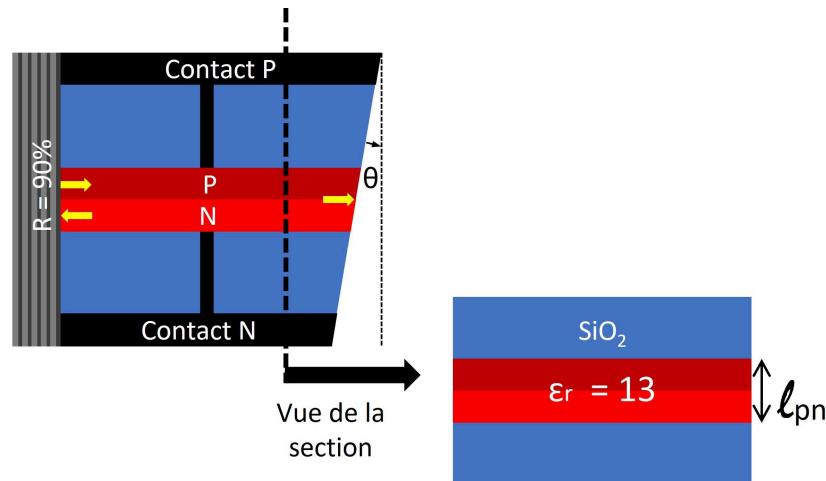


Figure 1: Schéma de la DEL.

2.A (5%) Calculez le potentiel intégré de la jonction V_0 .

Kasap Section: 3.5 A

In []: # - Réponse

2.B (5%)

Calculez la largeur de déplétion totale W_0 et de chaque côté (W_{N0} et W_{P0}) sans tension appliquée, puis tracer la largeur de la zone de déplétion totale en fonction du voltage appliqué (injection directe).

Kasap Section: 3.5 A & 3.7 A

In []: # - Réponse

2.C (5%)

Calculer la longueur de diffusion des porteur minoritaires. Assumez un régime d'injection faible. S'agit-il d'une jonction courte ou longue.

Kasap Section: 3.5 B

In []: # - Réponse

2.D (5%)

Quelle est la longueur d'onde centrale d'émission de cette DEL ?

Kasap Section: 3.11

In []: # - Réponse

2.E (5%)

Tracer la courbe I-V de la DEL pour des tensions entre 0 V et V_0 . Modéliser un chemin parasitaire pour le courant (I_{shunt}) ne provenant pas des recombinaisons électrons-trous par une résistance de 500Ω .

Quelle composante de courant (I_{recomb} , I_{diff} , I_{shunt}) domine et dans quelle plage de tension appliquée?

Kasap Section: 3.5 B

In []: # - Réponse

2.F (5%)

Calculer l'efficacité d'extraction η_{EE} de la DEL en tenant compte des facteurs suivants:

- Pour être extraits, les photons émis dans la jonction doivent être couplés dans le mode fondamental de **polarisation TM** du guide d'onde formée par la jonction. Le ratio des photons couplés correspond au facteur de confinement du guide. Pour un mode bien confiner, approximez $\Gamma \approx n_{eff}/n_{coeur}$.
- 50% des photons couplés dans le mode se propagent vers la gauche et 50% vers la droite. Pour augmenter l'efficacité, vous placez un miroir à la sortie gauche de la DEL dont la réflectance est $R = 90\%$.
- Les photons émis vers la droite rencontrent l'interface jonction-air. Cette facette peut être clivée à angle afin d'augmenter l'efficacité d'extraction. Vous devez choisir cet angle afin de maximiser l'efficacité d'extraction.

Kasap Section: 3.14

In []: # - Réponse

2.G (5%)

Tracer la courbe puissance optique de sortie vs courant (P-I) de la DEL. Sur le même graphique, tracer la puissance électrique consommée.

Kasap Section: 3.14

In []: # - Réponse

Question 3 - DELs (15%)

3.A (5%)

Question 3.22 de Kasap

In []: # - Réponse

3.B (5%)

Question 3.28 de Kasap

In []: # - Réponse

3.C (5%)

Question 3.29 de Kasap

In []: # - Réponse

Question 4 - Réseau de Bragg (30%)

Vous devez concevoir un réseau de Bragg basé sur un guide d'onde d'indice effectif $n_{eff} = 2.4$ en utilisant la méthode des matrices de transfert.

4.A (10%)

Écrivez une fonction qui simule un réseau de Bragg en utilisant la méthode des matrices de transfert. Votre fonction doit prendre comme argument d'entrée: une longueur d'onde λ , la longueur (l_1 et l_2) et l'indice effectif ($n_{eff,1}$ et $n_{eff,2}$) de chacune des sections. Considérez que le réseau est uniforme (toutes les périodes sont identiques) et que le milieu d'incidence est l'air.

Les prochaines questions consistent à utiliser et vérifier votre fonction.

In []: # - Réponse

4.B (5%)

Vous devez concevoir votre réseau afin que sa longueur d'onde centrale soit 1550 nm. Considérez une corrugation telle que $\Delta n_{eff} = 0.05$. Quelle est la période si $l_1 = l_2$? Tracez la réponse $|S_{21}|^2$ et $|S_{11}|^2$ pour une longueur totale (nombre de périodes) de votre choix.

In []: # - Réponse

4.C (5%)

Combien de périodes sont nécessaires afin d'obtenir une réflectance $R > 0.9$. Quel est l'effet du nombre de périodes (longueur du réseau) sur ses propriétés (réflectance max., largeur spectrale FWHM, longueur d'onde centrale). Justifiez avec des figures en utilisant votre modèle.

In []: # - Réponse

2.D (5%)

Quel serait l'effet d'un écart dans l'uniformité de chaque période ($l_1 \neq l_2$) sur les propriétés du réseau (réflectance max., largeur spectrale FWHM, longueur d'onde centrale). Justifiez avec des figures en utilisant votre modèle.

In []: # - Réponse

2.E (5%)

Quel est l'effet d'un changement de la corrugation Δn_{eff} sur les propriétés du réseau (réflectance max., largeur spectrale FWHM, longueur d'onde centrale). Justifiez avec des figures en utilisant votre modèle.

In []: # - Réponse