

LASER A SEMI-CONDUCTEUR (DIODE LASER).

I-THEORIE

I - 1 Spécificité du laser à semi-conducteur.

La faisabilité d'une émission laser au sein d'un semi-conducteur fut démontrée expérimentalement dans l'arséniure de gallium (GaAs) en 1962 par R.N. Hall et al.

Malgré l'existence d'un fil conducteur commun, l'émission stimulée, les reliant à tous les autres lasers, les lasers à semi-conducteurs diffèrent profondément de ceux-ci dans leurs principes. La caractéristique essentielle qui les distingue vient de ce que les électrons qui participent à l'émission stimulée peuvent se déplacer librement dans une vaste zone du semi-conducteur et sont par conséquent dépendant du potentiel périodique spatial du réseau cristallin du matériau semi-conducteur.

Contrastant avec les lois de l'équilibre thermodynamique des atomes et des molécules pour lesquels la population, dans différents états d'énergie, est exprimée dans la relation de Boltzmann, les différents états d'énergie d'un semi-conducteur ne peuvent être occupés que par deux électrons en raison du principe d'exclusion de Pauli. Les populations sont alors gouvernées par la statistique de Fermi-Dirac. A la température du zéro absolu, tous les niveaux électroniques sont remplis jusqu'à une certaine valeur E_f , appelée énergie de Fermi, les niveaux supérieurs ($E > E_f$) étant vides.

I -2 Pompage dans le laser à semi-conducteur.

Pour établir une inversion de population, comme dans tout laser, le rapport des populations des états occupés à celles des états inoccupés proches du minimum de la bande de conduction doit être plus grand que celui du rapport similaire des populations des états supérieurs de la bande de valence. Cette situation ne peut exister que sous des conditions de déséquilibre thermodynamique et caractérise un semi-conducteur doublement dégénéré (voir figure I-1-e).

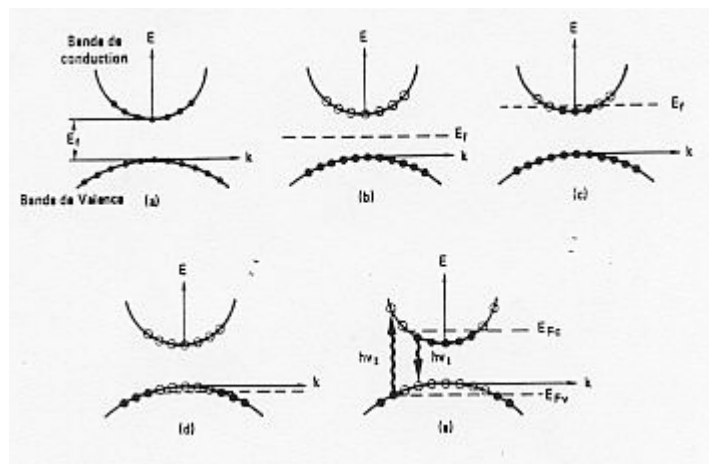


Figure I-1

Lorsqu'une onde électromagnétique de fréquence ν se propage dans un semi-conducteur, elle ne peut induire des transitions que vers les états inoccupés (figure I-1 b, c et d), ces états étant situés au-dessus des états occupés, il y a absorption. Ce n'est pas le cas du système doublement dégénéré (I-1-e) : les fréquences ν telles que

$$E_{F_C} - E_{F_V} > h\nu > E_g \quad (1)$$

(où E_g est la différence entre l'énergie du sommet de la bande de valence et celle du bas de la bande de conduction ("band-gap")) peuvent induire des transitions d'états occupés de la bande de conduction vers les états inoccupés

de la bande de valence. C'est le cas de la fréquence ν_1 de la figure I-1-e, alors que la fréquence ν_2 est absorbée.

La condition (1) est donc la condition nécessaire et suffisante pour que l'émission stimulée se produise au sein d'un semi-conducteur.

Il existe d'une manière générale trois méthodes de pompage pour créer cette inversion de population :

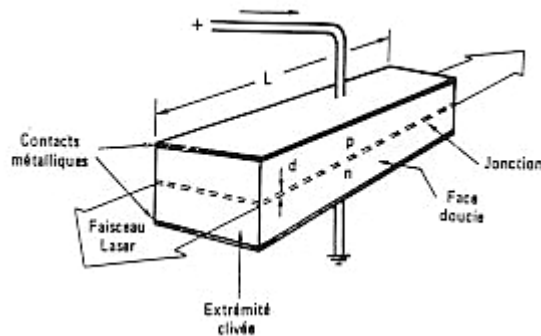
- bombardement du matériau par un faisceau d'électrons qui pénètrent et créent des paires électron-trou ;
- irradiation du matériau, avec un rayonnement d'énergie légèrement supérieure à E_g ;
- injection des porteurs minoritaires dans les régions de type **n** et **p** d'une jonction **p-n** en passant un courant électrique dans la diode.

Cette dernière méthode de pompage effectuée sur une diode sera utilisée dans ce TP pour créer une diode laser.

I - 3 - Diode Laser.

Sur la figure **I.2**, nous présentons le schéma d'une diode dont la largeur est d'un demi-millimètre environ.

La jonction **p-n** possède des faces clivées de façon à former des surfaces réfléchissantes créant ainsi une cavité diélectrique pour les radiations émises. Les contacts électriques sur les autres faces constituent les



électrodes.

Figure I-2

A l'équilibre, lorsque la jonction n'est pas polarisée, le niveau de Fermi E_f possède une valeur constante dans toute la diode et tous les états d'énergie inférieure à E_f sont remplis du côté **p** comme du côté **n** (voir figure I.3 a). Lorsqu'une polarisation directe est établie (une tension positive du côté **p** et une tension négative du côté **n**), un courant d'électrons s'établit dans le sens **n** vers **p**. Les électrons attirés par l'électrode positive pénètrent dans la région de la jonction où ils se recombinent avec les trous attirés par l'électrode négative : cet échange d'énergie apparaît sous la forme d'une émission électromagnétique.

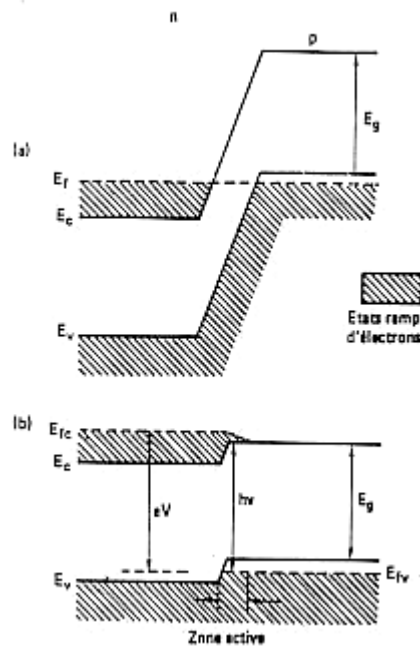


Figure I-3

Il faut des courants assez élevés pour maintenir le déséquilibre entre émission stimulée d'une part et les pertes par absorption ou par couplage vers l'extérieur d'autre part.

La première caractéristique des diodes laser est de présenter une très grande divergence et une asymétrie, dues principalement aux dimensions très petites de la zone active d'émission. Le faisceau émis par une diode laser peut être considéré comme gaussien, la zone active rectangulaire formant un beam waist. L'angle de divergence varie en général de 20 à 40°. La divergence est plus grande dans le sens de la largeur que dans celui de la longueur de la zone active. Une optique correctrice sera donc nécessaire pour collimater ou focaliser le faisceau laser.

Une propriété remarquable des diodes lasers est donc que la puissance émise suit instantanément toute variation de courant d'alimentation.

Les diodes lasers n'ont pas une longueur d'onde d'émission bien définie parce qu'il n'y a pas deux niveaux d'énergie discrets responsables du processus comme dans les lasers traditionnels mais plutôt une distribution d'énergie électronique en bandes. La longueur d'onde émise pourra être ajustée dans une certaine gamme par les moyens que nous indiquerons plus loin. La diode laser utilisée en TP peut émettre dans la gamme de longueur d'onde 795 à 825 nm centrée sur 810 nm. La dispersion des caractéristiques varie cependant beaucoup d'une diode à une autre.

La production et le guidage du faisceau laser s'effectue dans un espace très réduit (couche **p-n**) ; en contraste avec le laser conventionnel, les dimensions du résonateur sont à peu près du même ordre de grandeur que la longueur d'onde du faisceau laser. La distribution spatiale du faisceau laser est elle aussi définie par le guide d'onde que forme l'hétéro-structure.

Une autre caractéristique importante des diodes laser est la suivante: la longueur d'onde d'émission dépend fortement de la température du semi-conducteur et du courant d'injection. Ainsi, sur un plan technique pour maintenir l'émission à une longueur d'onde centrale fixe l'on devra maintenir la température et le courant d'injection constants aux valeurs requises.

I - 4 Variation de la longueur d'onde avec la température et le courant.

I -4-1 Variation de la longueur d'onde avec la température.

La longueur d'onde d'émission d'une diode laser augmente avec la température du semi-conducteur. Cela est dû au fait qu'en augmentant la température l'indice de réfraction et la longueur de la zone active (et donc celle du résonateur) augmentent à leur tour. Au-dessus d'une certaine température il devient difficile à un mode donné d'osciller dans le résonateur. Pourra osciller un mode différent pour lequel les conditions sont plus favorables. Parce que l'intervalle de mode du très court résonateur ($300 \mu\text{m}$) est très grand, le saut de mode est d'environ $0,3 \text{ nm}$. Si on réduit ensuite la température, le laser tend à retourner vers sa longueur d'onde initiale. Le saut de retour ne se fait pas selon le mode initial (c'est l'analogie d'un phénomène d'hystérésis). Les applications qui nécessitent une variation parfaite de longueur d'onde de la diode laser devront être menées dans les régions des courbes (voir figure I-4) qui sont en dehors des sauts.

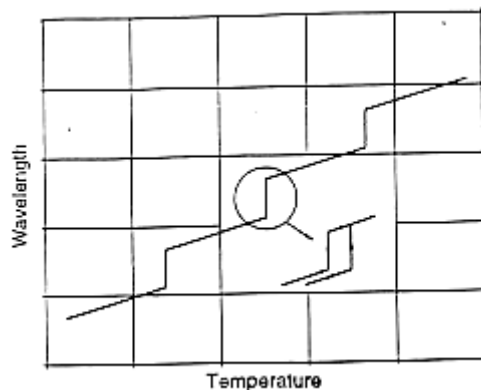


Figure I-4

I-4-2 Variation de la longueur d'onde avec le courant d'injection.

Un comportement similaire à celui que nous venons de décrire est aussi observé lorsque le courant d'injection (donc l'intensité du laser) est modifié.

Cette fois-ci, l'accroissement de la longueur d'onde provient principalement de l'augmentation de l'indice de réfraction, qui lui, est dû à l'accroissement de la densité de charge des porteurs dans la zone active. De plus en augmentant l'intensité du laser, la température croît à cause des pertes sous forme de chaleur dans la zone active.

Globalement, la longueur d'onde émise par la diode laser peut être exprimée en fonction de deux variables (la température et le courant) selon l'équation polynomiale suivante :

$$\lambda(T, I) = \lambda(T_0, I_0) + \alpha_T(T - T_0) + \alpha_I(I - I_0) + \alpha_T^2(T - T_0)^2 + \alpha_I^2(I - I_0)^2 + \dots \\ + \alpha_T^n(T - T_0)^n + \alpha_I^n(I - I_0)^n$$

Pour une opération à longueur d'onde constante $\lambda(T, I) = \lambda_c$, l'équation ci-dessus se réduit à :

$$I = (\lambda_c - \lambda_0) / \alpha_I + I_0 - \alpha_T / \alpha_I (T - T_0)$$

I-5 Utilisation des diodes laser.

Les diodes laser sont utilisées dans de nombreuses applications, d'une part comme substitut des lasers à gaz car elles présentent sous un volume réduit sans haute tension et à moindre prix une puissance équivalente, d'autre part comme laser pompe pour le laser à cristaux (cf le TP sur le laser Nd:YAG). Mais leur utilisation principale concerne les télécommunications où elles permettent grâce à leurs fréquences de modulation élevées d'alimenter les réseaux de transmission à fibres optiques. Les imprimantes laser en font également usage.

II-MATERIEL.

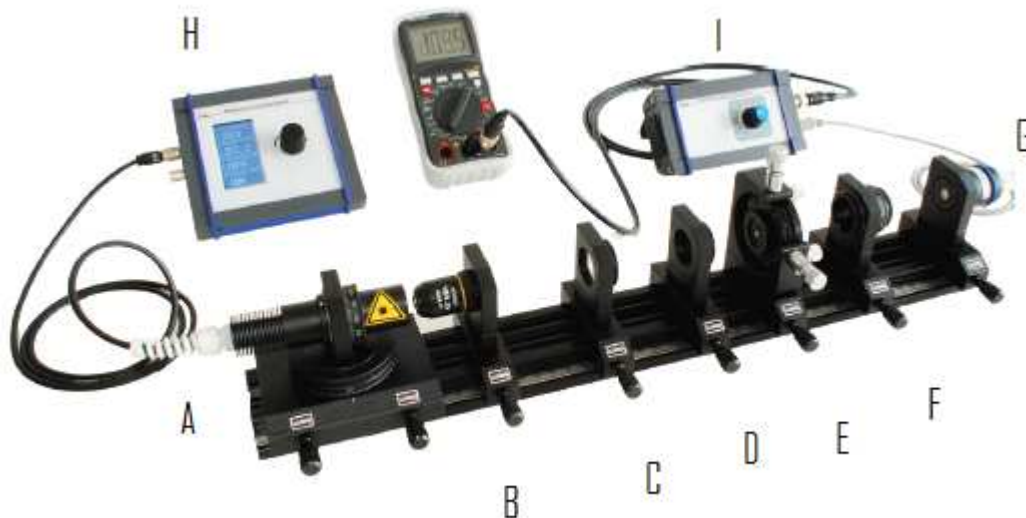


Figure II-1

- Module A** Diode laser (caractéristiques données en annexe).
Monture orientable dans le plan horizontal (avec vernier).
Rotation de la diode dans un plan vertical autour de son axe optique (avec vernier).
- Module B** Optique de collimation ou de focalisation (achromat de courte focale :20 mm).
- Module C et D** Ces deux modules constitués chacun d'une lentille cylindrique (**C** : $f = 25,4$ mm et **D** : $f = 80$ mm) forment un système anamorphoseur (identique à celui utilisé dans les objectifs de cinémascope). En gros une lentille cylindrique donne d'un objet une image dont l'échelle est modifiée dans une seule direction. La combinaison de lentilles cylindrique d'axes longitudinaux perpendiculaires permet de donner d'un objet elliptique une image quasiment

circulaire . L'homogénéité du flux dans la tache est améliorée.

- Module E** Support de cristal **Nd-YAG** (cylindre ϕ 5 mm, longueur 5 mm) . Monture ajustable en X Y pour centrer le cristal et 2 réglages d'inclinaison pour orienter les faces d'entrée et de sortie perpendiculaires à l'axe optique.
Le cristal de **Nd-YAG** est utilisé ici pour déterminer la longueur d'onde d'émission de la diode laser par référence aux bandes d'absorption du cristal (cf TP Nd:YAG). On pourra aussi utiliser pour cela un monochromateur à la place du cristal de Nd:YAG.
- Module F** Analyseur de polarisation rotatif (avec vernier). Outre son utilisation pour l'observation de la polarisation du rayonnement émis par la diode laser, le polariseur peut être employé pour réduire l'intensité lumineuse incidente sur la photodiode de mesure afin d'éviter de la saturer.
- Module.G** Photodiode rapide (caractéristiques en annexe)
- Module H** Boîtier de Contrôle de la diode laser
- Module I** Amplificateur de tension.
- Ecran IR** Un écran convertisseur d'infrarouge est également disponible pour aider à visualiser le faisceau.
Ne pas utiliser trop longtemps la même partie de l'écran qui est par ailleurs régénéré par exposition à la lumière du jour.

III- MANIPULATION

Règles de sécurité

Ne pas interposer son oeil sur le faisceau laser.

Règles de propreté

On ne mettra jamais les doigts sur les surfaces optiques actives

En cas de souillure accidentelle, demander l'aide d'un enseignant pour utiliser les moyens appropriés. Ne pas essayer de nettoyer avec n'importe quel produit!

Evitez de toucher les surfaces optiques avec la feuille de papier qui sert au réglage.

Nous allons dans cette partie étudier les principales caractéristiques des diodes laser en particulier la distribution spatiale du faisceau, sa polarisation, sa mise en forme pour corriger la divergence ainsi que la longueur d'onde d'émission en fonction des différents paramètres T et I.

III- 1 Distribution spatiale du faisceau de lumière de la diode laser.

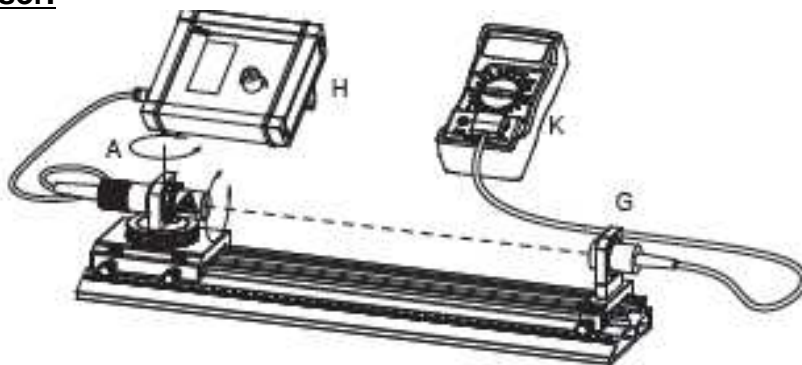


Figure III-1

- Réaliser le montage ci-dessus. La sortie du signal amplifié de la photodiode est envoyée sur un multimètre (gamme V=) pour mesurer la puissance

lumineuse. On peut aussi envoyer le signal de sortie modulé (modulator sur INT) sur une voie d'un oscilloscope.

- Vérifier que le photo-détecteur n'est pas saturé. Un diaphragme à petit trou doit être placé devant la face d'entrée du photo-détecteur dans le but d'obtenir une bonne résolution angulaire d'une part et d'éviter la saturation de la photodiode d'autre part.

- Tourner la diode laser autour de son axe de façon à avoir la longueur de la zone active d'émission horizontale (s'aider du carton IR).

- Faire varier l'orientation de la diode laser dans le plan horizontal par rapport à l'axe optique et mesurer la puissance. Choisir des pas angulaires faibles aux environs de l'axe optique.

- Faire la même mesure après avoir tourné la diode laser de 90° par rapport à l'axe optique (faisceau vertical).

- Faire la même mesure à 45°

- Tracer la courbe donnant la puissance délivrée par la diode laser en fonction de la direction par rapport à l'axe optique. Comparer aux spécifications données en annexe.

- Commenter la distribution spatiale du faisceau de la diode laser.

III-2 Puissance laser émise en fonction du courant d'injection et en fonction de la température.

-Réaligner l'axe de la diode laser sur l'axe optique du montage.

-Mesurer la puissance laser émise en fonction du courant d'injection, pour différentes températures (on prendra soin d'attendre le temps nécessaire à la stabilisation en température à chaque modification).

Remarque: la puissance mesurée est intégrée sur toute la bande spectrale d'émission.

- Tracer sur un seul graphe le réseau de courbes correspondant aux mesures effectuées.
- Commenter.
- Comment varie le courant de seuil en fonction de la température?

III-3 Polarisation du faisceau de la diode laser.

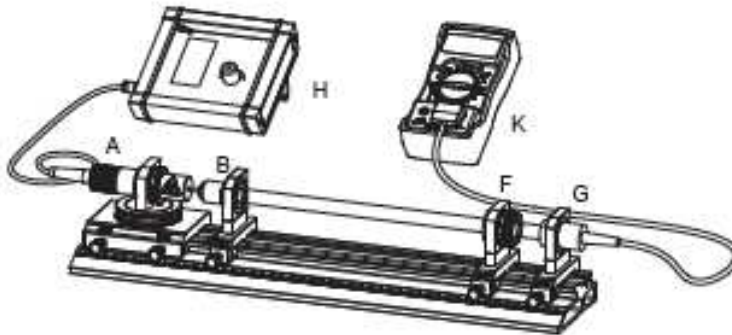


Figure III-2

Sur la figure ci-dessus, la lumière du laser est collimatée à l'aide d'une lentille achromatique de 20 mm de distance focale (module B) pour obtenir des états de polarisation sans ambiguïté. Une lame polarisante montée sur support rotatif (module F) permet d'analyser la lumière de la diode laser.

- Réaliser le montage ci-dessus.
- Placer le module B de façon que le faisceau en sortie soit parallèle. Le vérifier à l'aide de l'écran infra-rouge.

- Tourner l'analyseur de manière à avoir le signal maximum, mais non saturé (utiliser éventuellement le diaphragme).
- Faire varier le courant d'injection et mesurer l'intensité derrière l'analyseur selon deux directions perpendiculaires.
- Tracer les courbes donnant la puissance mesurée par la photodiode en fonction du courant d'injection selon ces deux directions (balayer toute la gamme du courant d'injection).
- Commenter l'allure de ces deux courbes en particulier dans la région autour du seuil laser, où la diode passe de l'état de LED à celui de laser.
- Préciser la direction de polarisation par rapport aux directions de la zone active rectangulaire.

III-4 Mise en forme du faisceau de la diode laser.

Nous avons observé que la diode laser présentait un faisceau de plus ou moins forte divergence. Elle possède de plus un astigmatisme considérable (la localisation du point d'émission selon l'axe parallèle à la jonction est située plus en retrait que le point d'émission selon l'axe perpendiculaire).

L'ensemble de ces défauts peut être corrigé par des dispositifs optiques anamorphiques..

Dans cette expérience, nous allons utiliser des lentilles pour corriger la forme du faisceau. Pour cela 3 différents éléments optiques sont à votre disposition :

B : lentille achromatique ; $f=20\text{mm}$

C : lentille cylindrique ; $f=25,4\text{ mm}$

D : lentille cylindrique ; $f=80\text{ mm}$.

- A l'aide de ces éléments, réaliser le montage de la figure ci-après.

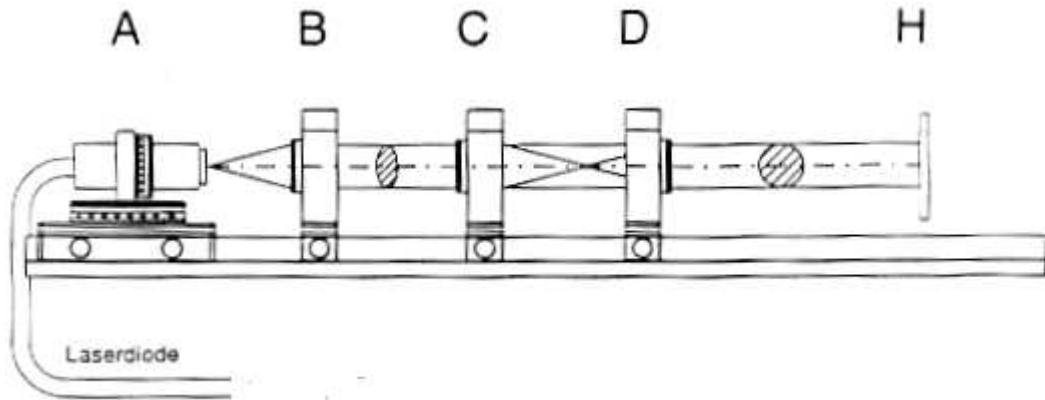


Figure III-3

- Corriger la forme du faisceau à l'aide des lentilles cylindriques croisées; compte tenu de ce qui a été observé sur la divergence du faisceau, expliquer le choix de l'ordre CD plutôt que l'inverse.
- Quel effet peut on obtenir avec le collimateur et deux lentilles cylindriques formant télescope. ;
- Essayer d'obtenir un faisceau de taille la plus faible possible avec la lentille cylindrique C, la lentille achromatique et la lentille cylindrique D.
Commentaires.

III- 5 Etude de la longueur d'onde de la diode laser.

Comme on l'a dit plus haut, la longueur d'onde de la diode laser est déterminée par le gain maximum et la longueur optique de son résonateur, qui à son tour dépend de la température et de la densité optique dans le résonateur découlant du courant d'injection.

Le but de cette expérience est de mesurer ces dépendances (comme dans le T.P. sur le laser Nd:YAG et à défaut de pouvoir le faire avec un spectrographe).

La figure suivante montre les transitions après absorption du barreau de Nd:YAG.

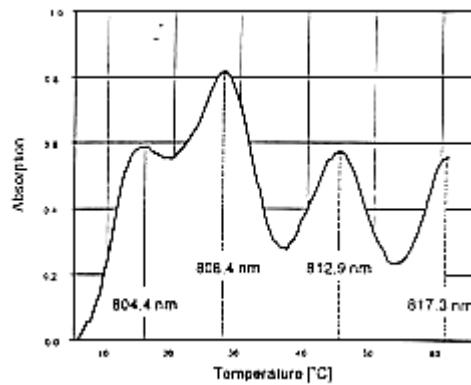


Figure III-4

On utilisera ces transitions connues pour déterminer la longueur d'onde.

- Réaliser le schéma de la figure suivante.

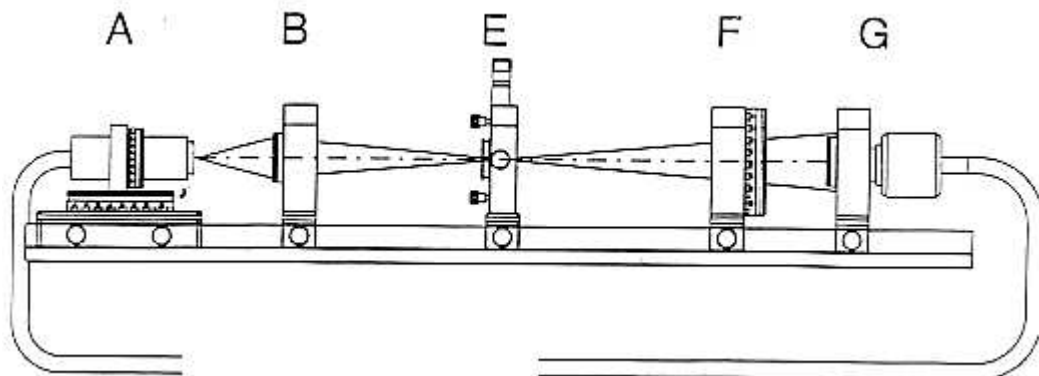


Figure III-5

- Connecter la sortie amplifiée du signal de la photodiode à la voie 1 de l'oscilloscope.

- Placer le barreau Nd:YAG au point de focalisation du faisceau provenant de B.

- Vérifier sur l'oscilloscope en faisant varier le courant que la photodiode n'est à aucun moment saturée. Sinon on utilisera le polarisateur pour atténuer le faisceau.

-Mesurer la puissance initiale P_0 (sans barreau Nd:YAG).

-Remettre le barreau à sa place.

-Tracer la courbe donnant la Puissance absorbée P_a en fonction de la température T .

$P_a = P_0 - P_t$; P_t étant la puissance transmise mesurée.

- Déterminer le maximum d'absorption (minimum de transmission) pour différentes températures. La longueur d'onde correspondant à chaque maximum d'absorption est déduite des transitions connues en comparant votre courbe à celle de la figure III-4.

- Faire varier le courant d'injection. Pour chaque valeur, ajuster la température de manière à revenir sur le même pic d'absorption.

- Tracer la courbe $I = f(T)$ à longueur d'onde constante. Déterminer les coefficients α_l et α_r (voir théorie).

NB : Les pas de variation de la température doivent être assez faibles de façon à retrouver facilement la transition choisie.

-Conclusions

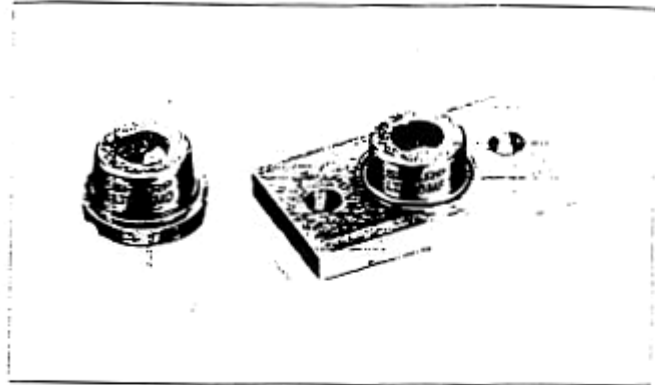
LT016MD/MF

Features

- High power (maximum optical power output: 40mW)
- Wavelength: 810nm
- Single transverse mode

Applications

- YAG laser pumping
- Measurement instruments
- Analysis instruments



Absolute Maximum Ratings

(Tc = 25°C)

Parameter	Symbol	Rating	Units
Optical power output	Po	40	mW
Reverse voltage — Laser	Va	2	V
Reverse voltage — PIN	Va	30	V
Operating temperature *1	Toor	-10 ~ +50	°C
Storage temperature *1	Tstg	-40 ~ +85	°C
Soldering temperature *2	Tsol	260 (less than 5 seconds)	°C

*1 Case temperature *2 At point 1.6 mm from lead base

Electro-optical Characteristics *1

(Tc = 25°C)

Parameter	Symbol	Condition	Ratings			Units	
			MIN	TYP	MAX		
Threshold current	Ith	—	—	60	80	mA	
Operating current	Iop	Po = 30mW	—	95	130	mA	
Operating voltage	Vop	Po = 30mW	—	1.75	2.2	V	
Wavelength *2	λo	Po = 30mW	795	810	825	nm	
Monitor current	Im	Po = 30mW Va = 15V	75	250	750	μA	
Radiation characteristics	Angle *3: Parallel to junction	θ∥	Po = 30mW	8	9.5	14	deg
	Perpendicular to junction	θ⊥	Po = 30mW	20	27	38	deg
Ripple	—	Po = 30mW	—	—	±20	%	
Emission point accuracy	Angle	Δθ	Po = 30mW	—	—	±2	deg
	Position	Δx, Δy, Δz	Po = 30mW	—	—	±3	deg
Differential efficiency	η	20mW (I(30mW) - I(10mW))	0.5	0.6	1.1	mW/mA	

*1 Initial value

*3 Angle at 50% peak intensity (rut width at half maximum)

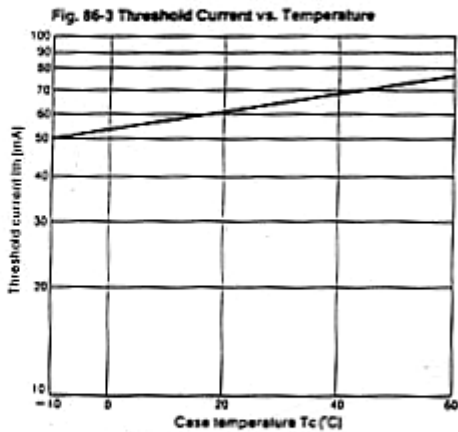
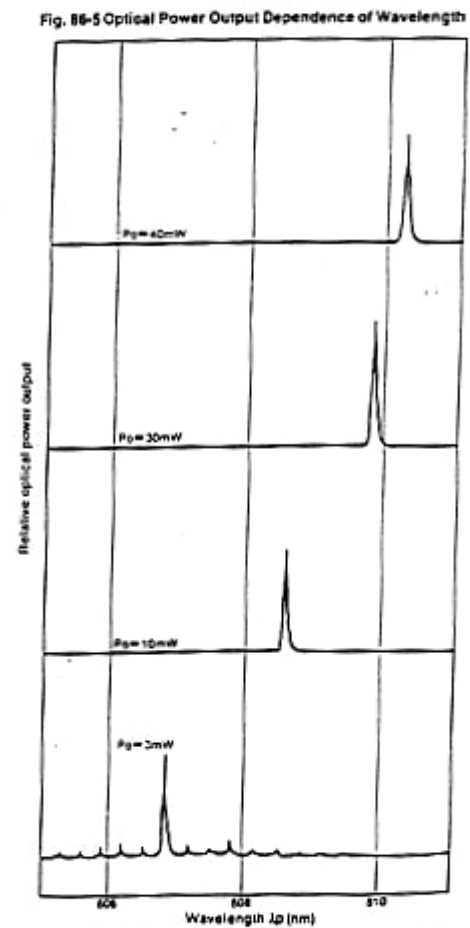
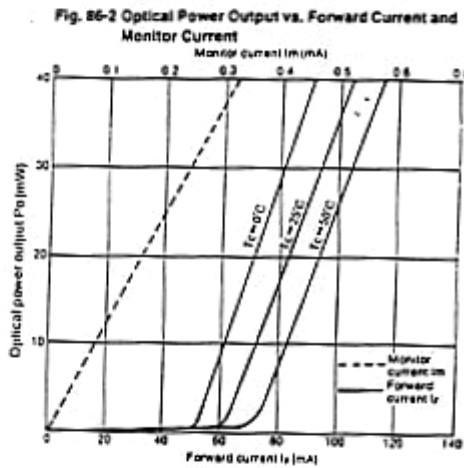
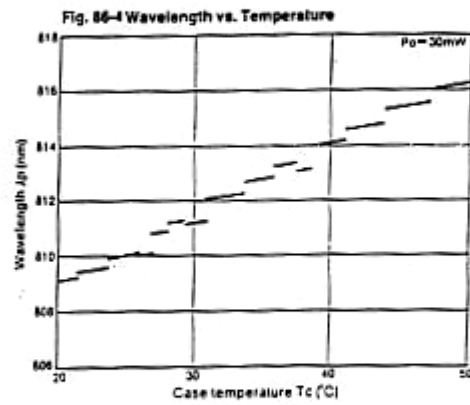
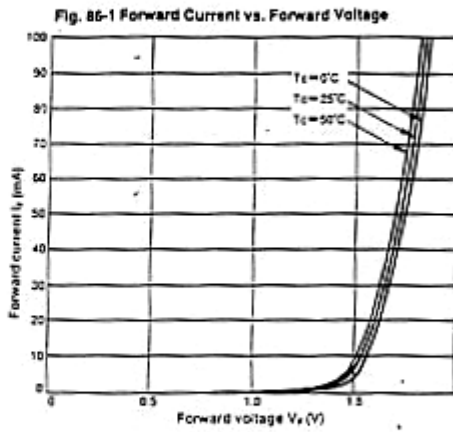
*2 Single transverse mode

Electrical Characteristics of Photodiode

(Tc = 25°C)

Parameter	Symbol	Condition	Ratings			Units
			MIN	TYP	MAX	
Sensitivity	S	Va = 15V	—	8.3	—	mA/mW
Dark current	Io	Va = 15V	—	—	150	nA
Terminal capacitance	Ci	Va = 15V	—	8	20	pF

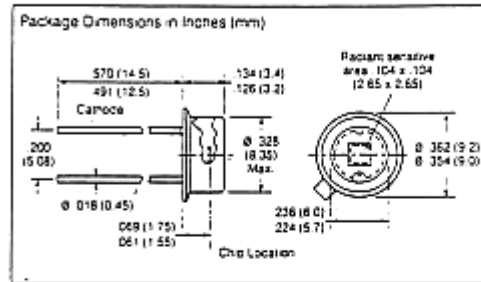
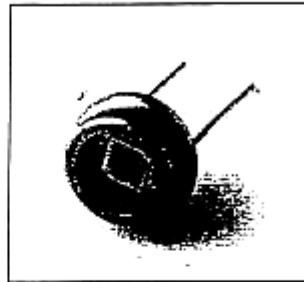
LT016 Series Characteristics Diagrams



Note: All data on this page is typical only, and is not intended as a specification. The shapes of these curves can be used as a general reference, but the actual characteristics will vary from device to device.

SIEMENS

BPX 61
SILICON PIN PHOTODIODE



FEATURES

- Silicon Planar PIN Photodiode
- Premium, High-Reliability Device
- Modified TO-5 Hermetic Case
- Flat Glass Lens
- Large Photosensitive Area
- Usage: Visible and IR Ranges
- Low Dark Current
- Short Switching Time

DESCRIPTION

The BPX 61 is a silicon planar PIN photodiode with low reverse current. Its low capacitance permits use up to 10 MHz. The hermetically sealed package—a TO-5 modification with a flat glass window—allows use at extreme operating conditions. The signal/noise ratio is favorable, even at low light levels. The open circuit voltage at low light levels is higher than with comparable mesa photovoltaic cells. The PIN photodiode provides outstanding low junction capacitance, high cut-off frequency, and short switching times.

Maximum Ratings

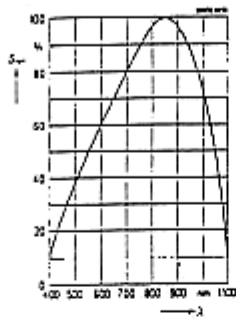
Operating and Storage Temperature Range (T_{OP} , T_{STG}) -40° to $+50^{\circ}$ C
Soldering Temperature (at 2 mm from case bottom) (T_S) t63 s 230° C
Reverse Voltage (V_R) 32 V
Power Dissipation (P_{TOT}) $T_A=25^{\circ}$ C 250 mW

Characteristics ($T_A=25^{\circ}$ C)

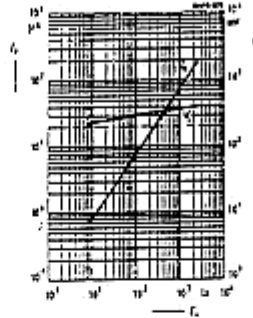
Parameter	Symbol	Value	Unit
Photosensitivity ($V_R=5$ V) ¹⁾	S	70(±50)	nA/lx
Maximum Photosensitivity Wavelength	λ_{Smax}	850	nm
Photosensitivity Spectral Range (S = 10% of S_{max})	λ	400 to 1100	nm
Radiant Sensitive Area	A	7.00	mm ²
Radiant Sensitive Area Dimensions	L x W	2.65 x 2.65	mm
Distance, Chip Surface to Case Surface	H	1.9 to 2.3	mm
Half Angle	θ	±5.5	Deg.
Dark Current ($V_R=10$ V)	I_D	2(±30)	nA
Spectral Photosensitivity ($\lambda=850$ nm)	S_{λ}	0.62	A/W
Quantum Efficiency ($\lambda=850$ nm)	η	0.90	electron
Open Circuit Voltage ($E_c=1000$ lx) ¹⁾	V_0	375(±120)	mV
Short Circuit Current ($E_c=1000$ lx) ¹⁾	I_{sc}	70	μ A
Rise and Fall Time of Photocurrent ($R_L=50$ Ω , $V_R=5$ V, $\lambda=850$ nm, $I_p=800$ μ A)	t_r , t_f	20	ns
Forward Voltage ($I_p=100$ mA, $E_c=0$)	V_F	1.3	V
Capacitance ($V_R=0$ V, $I_a=1$ MHz, $E_c=0$ lx)	C_D	72	pF
Temperature Coefficient V_0	TC_{V_0}	+2.6	mV/K
Temperature Coefficient I_{sc}	TC	0.18	%/K
Noise Equivalent Power ($V_R=10$ V, $\lambda=850$ nm)	NEP	4.1×10^{-14}	W/Hz
Detection Limit ($V_R=10$ V, $\lambda=850$ nm)	D^*	6.6×10^{12}	cm ² Hz/W

Note
1) Illuminance shown refers to unfiltered radiation of tungsten filament lamp at color temperature of 2855 K. Standard light A per DIN 5033 and IEC publication 306-11

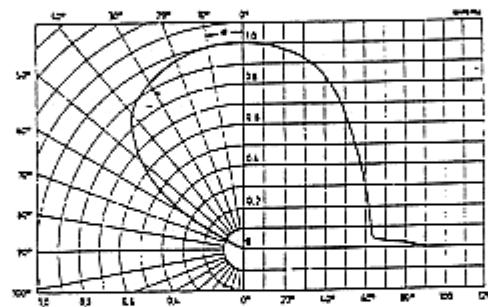
Relative spectral sensitivity $S_{REL}(\lambda)$



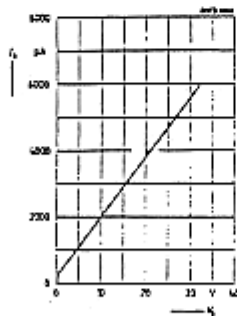
Photocurrent $I_p = f(E_d)$, $V_R = 5 V$
Open circuit voltage $V_{OC} = f(E_d)$



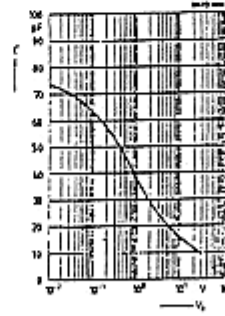
Directional characteristic $S_{REL}(\theta)$



Dark current $I_D = f(V_R)$, $E = 0$



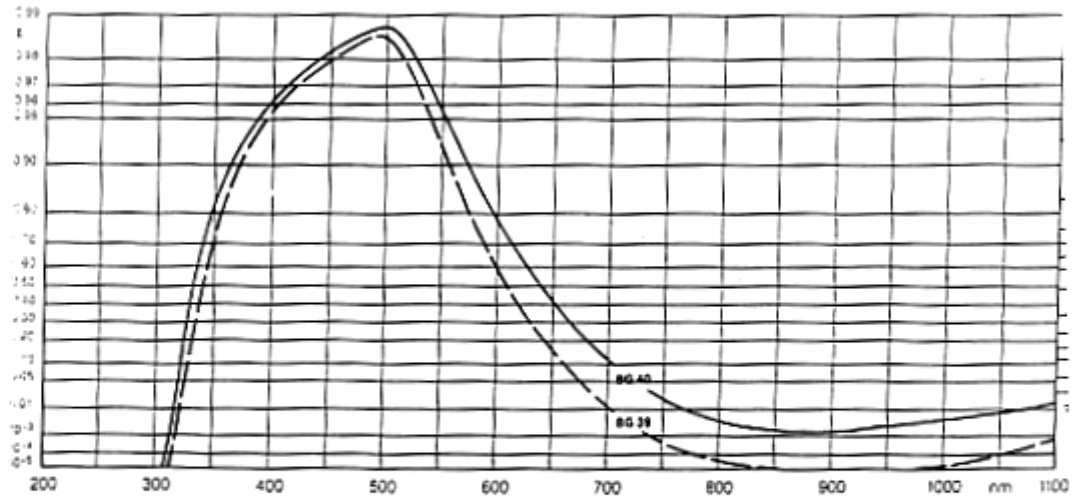
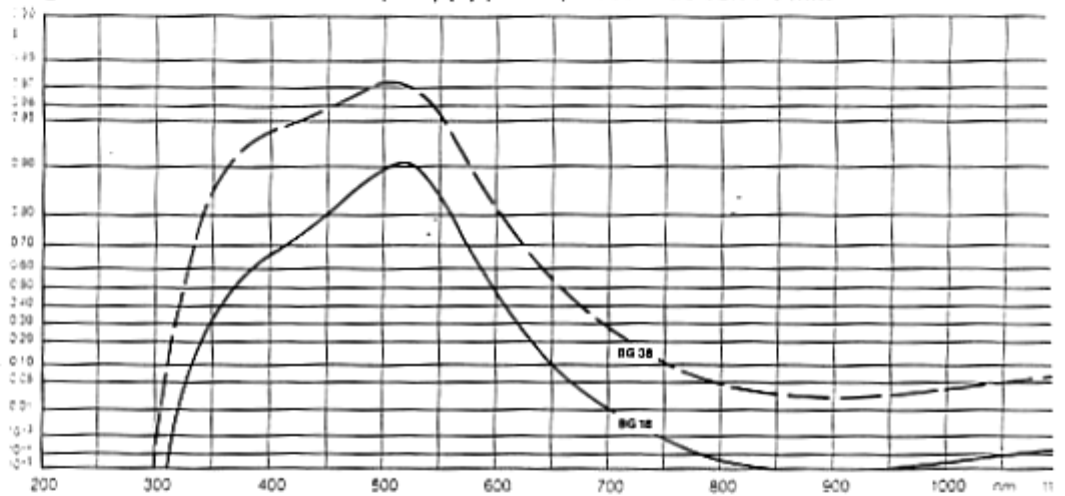
Capacitance $C = f(V_R)$, $f = 1 MHz$, $E = 0$



Filtres passe-bande (Suite 2)

Type de verre	Désignation DIN	Classe de verre de couleur	P_c	d [mm]	T_g [°C]	Y (Å)	λ_D (Å)	P_r (Å)
BG 18	BP 482/231	I	0.91	1	482	58	501	0.21
BG 38	BP 492/339	I	0.92	1	482	80	501	0.07
BG 39	BP 473/270	I	0.91	1	322	66	500	0.19
BG 40	BP 485/309	I	0.92	1	313	77	501	0.10

Degré de transmission intrinsèque τ_i (λ) pour épaisseur de verre 1 mm



CHOFF - Verre tétra