

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉPÔT DE MONO-COUCHES ANTI-REFLET POUR LES AMPLIFICATEURS
OPTIQUES À SEMI-CONDUCTEURS

NAWWAF ABU-AGIL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE PHYSIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE PHYSIQUE)

AVRIL 2004



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 0-612-97918-0

Our file Notre référence

ISBN: 0-612-97918-0

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DÉPÔT DE MONO-COUCHES ANTI-REFLET POUR LES AMPLIFICATEURS
OPTIQUES À SEMI-CONDUCTEURS

Présenté par : ABU-AGIL Nawwaf

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. FAUCHER Guy, D.Sc, président

Mme. LACROIX Suzanne, D.Sc, membre

M. MACIEJKO Romain, Ph.D, membre et directeur de recherche

Dédicace

Il me tient à cœur de dédier ce mémoire à mes parents qui ont su m'élever et me soutenir tout au long de ma vie. Ce mémoire est dédié aussi à ma femme Nür pour son soutien moral, et à mon fils Soheïl né le 4 mars 2003.

Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, le professeur Romain Maciejko pour ces conseils précieux et sa disponibilité tout au long de la durée de ce travail. Je voudrais aussi remercier mes collègues du laboratoire d'optoélectronique, Lucien Bojor, Rodica Matei, Kareem Sekki, Soulymane Bah, Zhigiang Xu et Michel Lestrade, pour les discussions fructueuses que nous avons entretenues lorsqu'un problème se présentait et pour leur aide et soutien permanents.

Finalement, je remercie tous les techniciens du département de génie physique pour la rapidité avec laquelle le travail que nous leur demandions était fait et pour leurs conseils au sujet du système d'évaporation.

Résumé

Dans ce travail nous développons une technique simple de dépôt d'une mono-couche anti-reflet à l'aide d'un monitoring *in-situ*. Le travail effectué consistait en deux parties; d'abord, la mise en marche du système d'évaporation thermique ainsi que l'installation et l'étalonnage de tous les appareils de mesures et de contrôle nécessaires au dépôt de couches anti-reflet, et ensuite, utiliser ce système pour revêtir les facettes des diodes laser d'une mono-couche anti-reflet de monoxyde de silicium, les transformant ainsi en amplificateurs optiques à semi-conducteurs. Cette technique aurait l'avantage de la simplicité.

Les conditions nécessaires à une telle opération comportent: l'obtention d'un vide poussé dans la cloche (10^{-6} mbar), une source d'alimentation pouvant fournir un courant électrique de l'ordre de 300 A pour sublimer le monoxyde de silicium et un contrôle précis du courant d'injection et de la température du laser. Les diodes laser étudiées sont des lasers Fabry-Perot.

Nous avons pu obtenir des résultats acceptables et comparables à ceux obtenus par différents auteurs pour les réflectivités des facettes des lasers étudiés. La meilleure réflectivité obtenue étant de $6 \cdot 10^{-4}$. Nous pensons que notre système d'évaporation fonctionne parfaitement et que nous maîtrisons les différents paramètres de dépôt de couches anti-reflet. Les facettes des lasers auraient, probablement, subi des dégradations par oxydation, rendant ainsi difficile l'obtention de meilleures réflectivités.

Abstract

We wish to develop a simple technique of deposition of single layer antireflective coating using an *in-situ* monitoring. This work entailed two major tasks, first, to set-up a thermal evaporator system and the different measurement and control equipment, and second, to use this system to AR-coat 1550 nm diode lasers with one Silicon Mono-Oxide (SiO) layer, transforming them into semiconductor optical amplifiers (SOA). This technique would appeal by its simplicity.

In order to do so, some working conditions have to be met : a high vacuum in the jar bell (10^{-6} mbar), a current source able to deliver about 300 A in order to evaporate the SiO, and a good control over the laser injection current and temperature.

We demonstrated one facet reflectivities of about $10^{-3} - 6 \cdot 10^{-4}$. We think that lasers' facets were altered by oxidation, which did not allow us to obtain better results. This assumption was confirmed by the lasers manufacturer and by the fact that, a number of these AR-coated lasers showed no reduction in reflectivity, nevertheless, reflectivities of $6 \cdot 10^{-4}$ are comparable with the best ones achieved by different authors, using single layer AR-coating.

We think that our system is perfectly operational, and that we have good control over the different coating parameters and that the problem could be the alteration of the lasers facets.

Table des matières

Dédicace.....	iv
Remerciements.....	v
Résumé.....	vi
Abstract.....	vii
Table des matières.....	viii
Liste des annexes	x
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures	xii
Liste des sigles et abréviations.....	xvi
Liste des photographies.....	xviii
Introduction.....	1
Chapitre 1. Description du sujet et adaptation du système à l'évaporation du mono-oxyde de silicium SiO.....	4
1-1- Objectif.....	4
1-2- Principe de la méthode.....	5
1-3- Description du système d'évaporation existant.....	7
1-4- Adaptation du système à l'évaporation du SiO	8
Chapitre 2. Instrumentation, appareillage de contrôle et acquisition des données	10
2-1- Circuits d'asservissement du courant et de la température de la diode laser par LabView	10

2-2- Instrumentation analogique d'asservissement	11
2-2-1- Circuit d'asservissement du courant d'injection de la diode laser.....	11
2-2-2- Modulation du courant d'injection.....	12
2-2-3- Asservissement en température de la diode laser.....	15
2-2-3-1-Etalonnage de la thermistance	18
2-2-4- Caractérisation de la diode laser : courbe L-I	19
2-2-5- Caractérisation du spectre de la diode laser	21
Chapitre 3. Dépôt des couches anti-reflet sur les facettes de la diode laser	24
3-1- Dispositif expérimental.....	24
3-1-1- Support et connections de la diode laser.....	24
3-1-2- Refroidissement et asservissement en température de la diode laser	27
3-1-3- Détection de la puissance émise par la diode laser	28
3-2- Procédure expérimentale	30
Chapitre 4. Calcul de la réflectivité et résultats obtenus.....	33
4-1- Méthodes de calcul de la réflectivité des facettes de la diode laser.....	33
4-1-1- Méthode du rapport des puissances émises	33
4-1-2- Méthode du rendement différentiel externe ^[16]	34
4-1-3- Méthode du spectre de gain	36
4-2- Résultats obtenus	38
Discussion	59
Conclusion et perspectives.....	69
Bibliographie.....	90

Liste des annexes

Annexe 1	Interférence destructive.....	72
Annexe 2	Algorithme d'asservissement par Labview en courant d'injection et en température de la diode laser	76
Annexe 3	Algorithme LabView de caractérisation de la diode laser- Courbe L-I....	78
Annexe 4	Procédure du vide pour l'évaporateur thermique.....	82
Annexe 5	Simulation par le logiciel de simulation 'Simulation Cavity'	88

Liste des tableaux

Tableau 4-1	Valeurs des paramètres pour le dépôt des couches anti-reflet	39
Tableau 4-2	Valeurs des paramètres du dépôt pour le laser 003A6.....	43
Tableau 4-3	Valeurs des paramètres du dépôt pour le laser 003F5	45
Tableau 4-4	Valeurs des paramètres du dépôt pour le laser 001F3	47
Tableau 4-5	Valeurs des paramètres du dépôt pour le laser 003F6	49
Tableau 4-6	Valeurs des paramètres du dépôt pour le laser 003A5.....	51
Tableau 4-7	Valeurs des paramètres du dépôt pour le laser 004C4.....	53
Tableau 4-8	Valeurs des paramètres du dépôt pour le laser 003B6.....	56
Tableau 4-9	Valeurs des paramètres du calcul de la réflectivité.....	58
Tableau D-1	Comparaison entre l'épaisseur quart d'onde de couche anti-reflet et l'épaisseur mesurée.	61

Liste des figures

Figure 1-1	Représentation schématique d'un amplificateur à semi-conducteurs	5
Figure 1-2	Évolution de la puissance émise par la diode laser en fonction du temps d'évaporation de la couche anti-reflet	6
Figure 2-1	Circuit d'asservissement de la diode laser	13
Figure 2-2	Modulation du courant de la diode laser	14
Figure 2-3	Circuit de modulation et d'asservissement du courant de la diode laser .	14
Figure 2-4	Montage de caractérisation de la diode laser, courbe L-I	16
Figure 2-5	Courbe L-I de la diode laser 002C	17
Figure 2-6	Courbe d'étalonnage de la thermistance	19
Figure 2-7	Spectre d'une diode laser mesuré par l'analyseur de spectres optiques ..	23
Figure 3-1	Schéma du montage de la diode laser sur le support de cuivre refroidi à l'aide du bain thermostaté	26
Figure 3-2	Schéma du montage expérimental pour l'évaporation de SiO.....	31
Figure 4-1	Rendement différentiel externe.....	35
Figure 4-2	Courbes L-I du laser 003A6, sans traitement et avec facette avant traitée	43
Figure 4-3	Spectre du laser 003A6 : $I_{\text{injection}}=17\text{mA}$, $I_{\text{Seuil}}=15\text{mA}$, Résolution=0,2nm	44
Figure 4-4	Spectre du laser 003A6 après traitement antireflet : $I=60\text{mA}$, Résolution=5nm, Largeur de bande=60nm.....	44

Figure 4-5	Courbes L-I du laser 003F5, sans traitement et avec facette avant traitée....	45
Figure 4-6	Spectre du laser 003F5, $I_{\text{Injection}}=24\text{mA}$, $I_{\text{Seuil}}=15\text{mA}$	46
Figure 4-7	Spectre du laser 003F5 après traitement anti-reflet : $I=80\text{mA}$, Résolution= 2nm , largeur de bande= 50nm	46
Figure 4-8	Courbes L-I du laser 001F3 sans et avec traitement anti-reflet de la facette avant.....	47
Figure 4-9	Spectre du laser 001F3, $I_S=16\text{mA}$, $I_{\text{Injection}}=25\text{mA}$	48
Figure 4-10	Spectre du laser 001F3 après traitement anti-reflet de la facette avant, $I=70\text{mA}$, Résolution= 1nm , Largeur de bande= 31nm	48
Figure 4-11	Courbes L-I du laser 003F6 avant et après traitement anti-reflet de la facette avant	49
Figure 4-12	Spectre du laser 003F6, $I_S=18\text{mA}$, $I_{\text{Injection}}=25\text{mA}$	50
Figure 4-13	Spectre du laser 003F6 après traitement anti-reflet de la facette avant, $I=60\text{mA}$, Résolution = 1nm , Largeur de bande = 22nm	50
Figure 4-14	Courbes L-I du laser 003A5 avant et après traitement anti-reflet de la facette avant	51
Figure 4-15	Spectre du laser 003A5, $I_S=18\text{mA}$, $I_{\text{Injection}}=25\text{mA}$	52
Figure 4-16	Spectre du laser 003A5 après traitement anti-reflet de la facette avant, $I=50\text{mA}$, Résolution = 1nm , Largeur de bande = 13nm	52
Figure 4-17	Courbes L-I du laser 004C4 avant et après traitement anti-reflet.....	53
Figure 4-18	Spectre du laser 004C4, $I_S=18\text{mA}$, $I_{\text{Injection}}=25\text{mA}$	55

Figure 4-19	Spectre du laser 004C4 après traitement anti-reflet la facette avant, I=45mA, Résolution = 1nm, Largeur de bande = 6,4 nm	55
Figure 4-20	Courbes L-I du laser 003B6 avant et après traitement anti-reflet	56
Figure 4-21	Spectre du laser 003B6, $I_s=16\text{mA}$, $I_{\text{Injection}}=24\text{mA}$	57
Figure 4-22	Spectre du laser 003B6 après traitement anti-reflet de la facette avant, I= 30mA, Résolution= 1nm, Largeur de bande=1,8nm	57
Figure D-1	Courbe L-I du laser A69	65
Figure D-2	Spectre du laser A69, $I_s = 110\text{mA}$, $I_{\text{Injection}} = 115\text{mA}$	66
Figure D-3	Spectre du laser A69 après traitement anti-reflet, I=205mA, Résolution=1 nm, Largeur de bande = 4,55 nm.....	66
Figure D-4	Courbe L-I du laser A81 sans et après traitement anti-reflet	67
Figure D-5	Spectre du laser A81, $I_s = 110\text{mA}$, $I_{\text{Injection}} = 145\text{mA}$	68
Figure D-6	Spectre du laser A81 après traitement anti-reflet, $I_{\text{Injection}}=200\text{mA}$, Résolution = 1nm, Largeur de bande = 2,67nm	68
Figure P-1	Contours d'isoreflectivité pour une couche simple de (SiO_2 , TiO_2).....	71
Figure A1-1	Réflexions multiples aux interfaces d'une couche mince.....	73
Figure A2-1	Algorithme LabView de l'asservissement du courant d'injection et de la température de la diode laser.....	77
Figure A3-1-a	Algorithme LabView pour tracer les courbes L-I des diodes laser	79
Figure A3-1-b	Suite de l'algorithme LabView pour tracer les courbes L-I des diodes laser	80

Figure A3-1-c Suite de l'algorithme LabView pour tracer les courbes L-I des diodes laser	81
Figure A4-1 Schéma du système de vide	83
Figure A4-2 Panneau de contrôle	84
Figure A4-3 Valve d'admission d'air de la pompe mécanique	84
Figure A5-1 Aperçu d'une simulation par 'Simulation Cavity'	89

Liste des sigles et abréviations

Notations

α	coefficient de pertes par absorption
$\Delta\lambda$	espacement inter-mode (des modes Fabry-Perot)
$G(\lambda)$	spectre de gain d'un amplificateur optique
I_C	courant de la diode laser (courant du collecteur du transistor)
I_{ph}	photocourant du détecteur
I_S	courant de seuil de la diode laser
λ	la longueur d'onde d'émission de la diode laser
L	longueur de la cavité de la diode laser
η_{ext}	rendement différentiel externe d'une diode électroluminescente
η_i	rendement différentiel interne d'une diode électroluminescente
n	indice de réfraction de la couche déposée
P	puissance lumineuse détectée de la diode laser
P_A	puissance à la facette arrière de la diode laser
P_{TR}	puissance à la facette traitée de la diode laser
Q	facteur de qualité de la cavité
$\mathfrak{R}$	responsivité de la photodiode
R_A	réflectivité de la facette avant de la diode laser
R_{TR}	réflectivité de la facette traitée

Abréviations

AOS	Amplificateurs Optiques à Semi-conducteurs
DL	Diode Laser
DSL	Diode Supra Luminescente
OSA	Optical Spectrum Analyzer. En français : ASO (Analyseur de Spectres Optiques)
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (Déposition chimique en phase vapeur assistée par plasma)

Liste des photographies

Photo 1.1	Vue d'ensemble de l'évaporateur thermique et des différents appareils de mesure et d'asservissement.....	9
Photo 2.1	Montage de caractérisation du spectre de la diode laser. L'ensemble (laser + céramique) est monté sur un support en aluminium. La fibre optique, alignée avec la facette émettrice de la diode laser est montée sur le support d'en face	21
Photo 2.2	L'analyseur des spectres optiques (Montage de caractérisation des spectres des diodes laser).....	22
Photo 3.1	La cloche ouverte de l'évaporateur thermique. Le papier d'aluminium enroulé autour des conduites d'eau a pour but de minimiser le réchauffement d'eau qui y circule pendant l'évaporation	28
Photo 3.2	Le support de cuivre de la diode laser et la photodiode ainsi que les conduites d'eau servant à refroidir la diode laser	29

Introduction

Les lasers à semi-conducteurs peuvent être transformés en amplificateurs optiques, en déposant des couches anti-reflet sur leur deux facettes. Le fait de réduire les réflectivités des facettes, transforme la cavité oscillante en un milieu de gain ^[1].

Les Amplificateurs Optiques à Semi-conducteurs (AOS) constituent un élément potentiellement important dans les télécommunications par fibres optiques d'aujourd'hui. Ils présentent un gain élevé, une faible consommation en énergie et ont des applications aussi bien dans les modes linéaires que dans les modes non-linéaires. Comme exemples d'application dans les modes linéaires, ils sont utilisés en tant que préamplificateurs et répéteurs linéaires. Alors qu'ils peuvent servir d'éléments bistables pour donner une forme rectangulaire à un signal optique dispersé, par exemple, dans les modes non-linéaires ^[4]. La plupart de ces AOS sont fabriqués à partir de InGaAsP et opèrent dans la région de 1300 – 1550 nm, où les fibres optiques ont leur minimum de perte à 1550 nm et leur minimum de dispersion^[2] à 1300 nm.

Pour réduire la réflectivité de la facette d'une diode laser (DL), on procède souvent par dépôt d'une ou de plusieurs couches diélectriques et/ou en inclinant la direction du guide d'onde par rapport à la facette de la DL. Parmi les matériaux diélectriques largement utilisés comme couches anti-reflet sur des substrats du système III-V, nous trouvons l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), les mono et dioxyde de silicium (SiO et SiO_2) et le nitrure

de silicium (Si_3N_4). Ces matériaux ont l'avantage d'être relativement faciles à déposer et leurs indices de réfraction peuvent être contrôlés en ajustant les conditions de dépôt.

La pulvérisation cathodique, l'évaporation par faisceau d'électrons et l'évaporation thermique sont les techniques les plus employées pour le dépôt de couches anti-reflet.

La première de ces techniques, la pulvérisation cathodique, pose le problème d'incorporation d'un système de contrôle *in situ*, vu que le plasma est facilement perturbable. Un autre désavantage de cette technique est que les sources diélectriques tendent à être non uniformes, ce qui rend difficile la reproductibilité de l'indice de réfraction des couches à déposer ^[1]. Par contre, le dépôt par évaporation thermique ou par faisceau d'électrons, est une alternative valable pour remédier à ces problèmes. En effet, le taux d'évaporation peut être contrôlé et un système de contrôle *in situ* est facilement incorporé pour le dépôt de couches anti-reflet sur les facettes de la diode laser. C'est cette dernière technique que nous allons investiguer.

Les réflectivités obtenues par différents auteurs, utilisant différentes techniques, sont de l'ordre de 3×10^{-4} , pour un dépôt d'une seule couche anti-reflet. Ces résultats peuvent être améliorés, en déposant des multi-couches, doubles ou même triples. Des réflectivités de l'ordre de 5×10^{-5} sont alors obtenues pour des diodes laser InGaAsP émettant à 1550nm. D'un point de vue pratique, il est préférable de limiter le nombre de couches, à cause de la difficulté que présente le contrôle précis de l'indice de réfraction et de l'épaisseur des

couches à déposer ^[3]. Il est à noter qu'une réflectivité inférieure à 10^{-4} est exigée pour supprimer le mode d'oscillation Fabry-Perot.

Dans le cadre de notre étude, nous avons déposé des couches anti-reflet de monoxyde de silicium (SiO), par évaporation thermique, sur les facettes de diodes laser InGaAsP/InP, à puits quantiques contraints et avec des longueurs d'onde d'émission de 1470 à 1550 nm.

Nous avons déposé des couches anti-reflet sur les facettes de plusieurs diodes laser et selon la diode laser traitée, nous avons obtenu des réflectivités de l'ordre de 6×10^{-4} , dans les meilleurs cas. Dans d'autres cas, aucune réduction de réflectivité n'a été observée, et nous présumons qu'une dégradation des facettes des diodes, par oxydation à l'air libre, est à l'origine de cet effet. Nous n'avons pas d'information complète sur les puces laser disponibles.

Dans les chapitres suivants, nous allons détailler la procédure et l'instrumentation employées pour déposer les couches anti-reflet de SiO, sur les facettes de nos diodes laser, ainsi que les résultats obtenus pour la réflectivité.

Chapitre 1

Description du sujet et adaptation du système à l'évaporation du mono-oxyde de silicium SiO

Dans ce chapitre, nous introduisons l'objectif de ce travail, la méthode employée pour y parvenir et décrivons le système d'évaporation disponible, qui n'était pas initialement adapté à l'évaporation du SiO, et comment nous l'avons transformé pour mener à bien nos expériences.

1-1- Objectif

Le but de ce travail est de parvenir à déposer, par évaporation thermique, des couches anti-reflet de SiO, sur les facettes d'une diode laser InGaAsP/InP, à puits quantiques contraints et émettant à une longueur d'onde de 1550 nm. Le fait de réduire les réflectivités des facettes, élimine le mode d'oscillation Fabry-Perot, et transforme ainsi la diode laser en un milieu avec gain donc en amplificateur optique.

La figure 1-1 montre une représentation schématique d'un tel amplificateur optique.

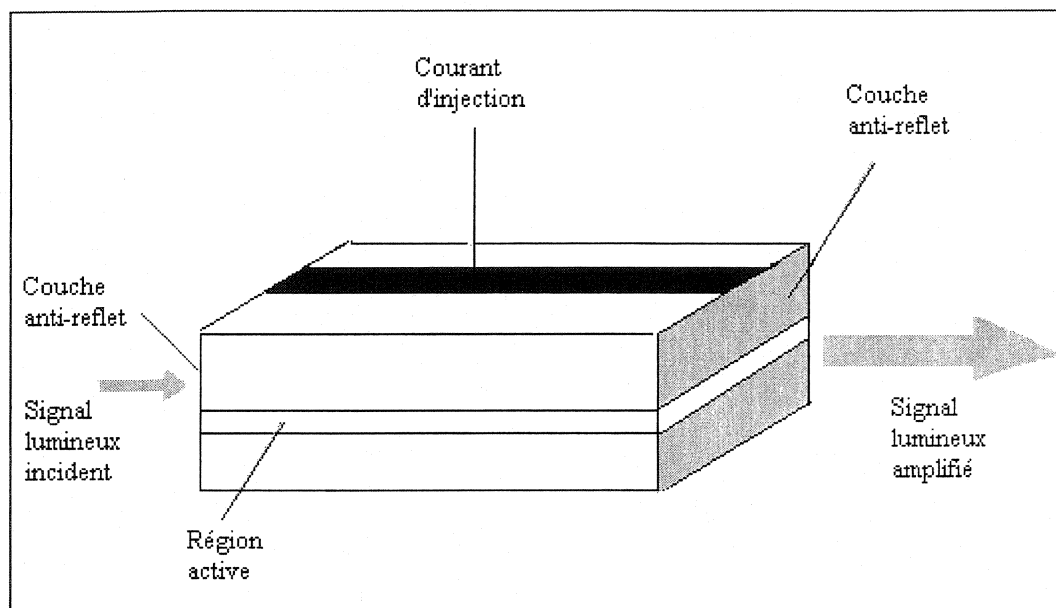


Figure 1-1 : Représentation schématique d'un amplificateur à semi-conducteurs

1-2- Principe de la méthode

La méthode de travail consiste à observer la puissance émise par la facette de la diode laser en cours de traitement anti-reflet, opéré au-dessus de son seuil, et d'arrêter l'évaporation lorsque cette puissance est minimale. En effet, lorsque la couche anti-reflet commence à se déposer sur la facette de la diode laser, le facteur de qualité Q de la cavité diminue et par conséquent, la puissance émise diminue jusqu'à un minimum, correspondant théoriquement à une épaisseur de couche quart d'onde ($\lambda/4n$), où λ est la longueur d'émission de la diode laser et, n , est l'indice de réfraction de la couche déposée. Le fondement théorique de cette méthode est basé sur des considérations d'interférence destructive détaillées dans

l'annexe 1. L'évolution typique de la puissance émise par la diode laser pendant le revêtement anti-reflet est rapportée sur la figure 1-2.

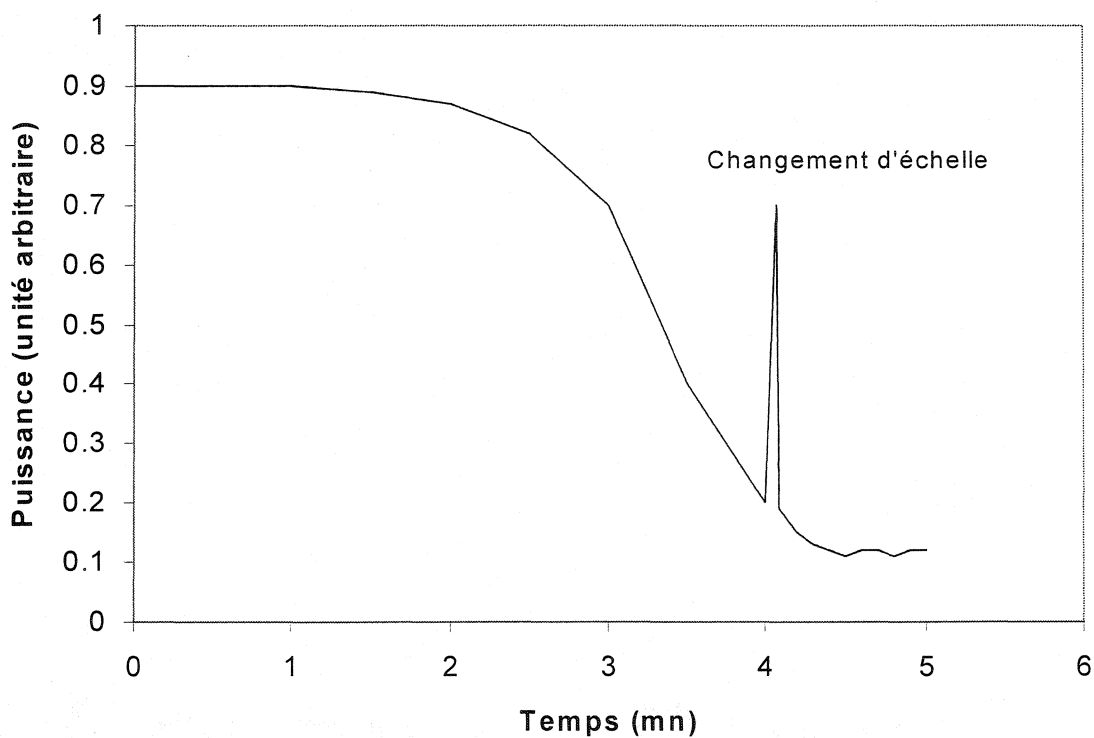


Figure 1-2 : Enregistrement expérimental de l'évolution de la puissance émise par la diode laser en fonction du temps d'évaporation de la couche anti-reflet.

Une autre méthode consiste à observer la puissance optique détectée en utilisant le spectre d'émission spontanée comme signal optique, mais cette fois-ci le laser est opéré au-dessous de son seuil. Lorsque le signal atteint une valeur maximale, nous

arrêtons le dépôt. La faiblesse de cette méthode réside dans le fait que le rapport signal/bruit est faible n'offrant pas un bon contrôle sur l'épaisseur de la couche déposée^[15]. Cette méthode ne sera donc pas utilisée dans nos expériences.

Lorsque nous déposons une couche anti-reflet sur la facette arrière de la diode laser, une fois que la facette avant a subi un traitement anti-reflet, nous observons une légère augmentation de la puissance émise par cette facette, indiquant la fin du traitement anti-reflet.

Durant le traitement anti-reflet, il faut veiller à garder constants, le courant d'injection de la diode, qui correspond généralement à 1,2 ou 1,3 fois le courant de seuil du laser, et la température de ce dernier, puisqu'un échauffement de la jonction du laser aurait pour effet d'augmenter son courant de seuil et, en conséquence, de fausser les résultats obtenus.

1-3- Description du système d'évaporation existant

Notre évaporateur thermique, Edwards, était conçu pour l'évaporation de métaux tels que l'or et l'aluminium, qui n'exigent qu'une alimentation modérée en courant, de l'ordre de 80 – 100 ampères.

Le mono-oxyde de silicium (SiO) sublime, dans le vide, à une température de l'ordre de 1100 °C, mais pour des couches de haute qualité, le taux de dépôt

recommandé est atteint à une température entre 1200 et 1250 °C ^[5]. Atteindre de telles températures demande des courants électriques élevés, de l'ordre de 290 ampères. Les connexions ou tiges de passage du courant électrique pour chauffer le creuset, étaient conçues pour supporter des courants modérés et ne pouvaient être remplacées par des tiges de diamètre plus grand, en raison de contraintes imposées par la géométrie de l'évaporateur.

1-4- Adaptation du système à l'évaporation du SiO

Nous avons commencé par l'installation d'un transformateur de courant capable de fournir le courant électrique voulu. Le transport de ce courant a été assuré par quatre câbles électriques, montés en parallèle, pour éviter l'échauffement de ces derniers.

Sur le plateau de l'évaporateur, il y avait encore des tiges métalliques ou contacts non utilisés. Nous les avons reliés, moyennant des blocs de cuivre, pour ainsi pouvoir injecter le courant en toute sécurité et sans craindre leur rupture. En résumé, au lieu d'injecter le courant dans un seul contact, notre montage en parallèle, en a permis l'injection dans deux, limitant ainsi la puissance dissipée.

A ce point, l'évaporateur est opérationnel en ce qui concerne les exigences d'alimentation électrique pour pouvoir évaporer le SiO.

La photo 1.1 représente une vue d'ensemble de l'évaporateur thermique ainsi que des appareils de mesure et d'asservissement.

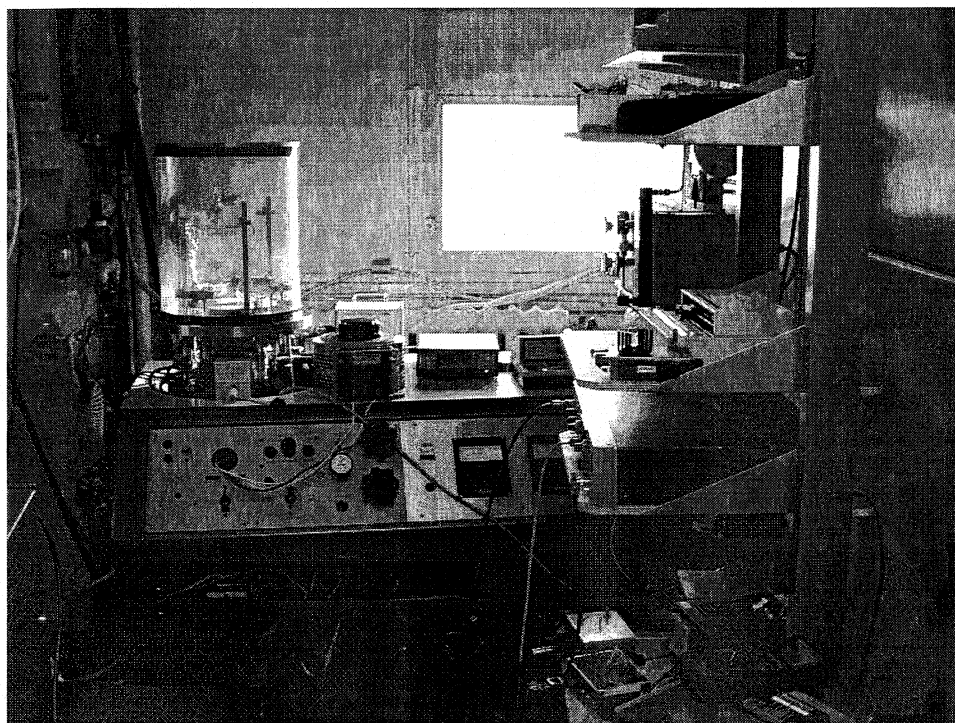


Photo 1.1 : Vue d'ensemble de l'évaporateur thermique et des différents appareils de mesure et d'asservissement.

Chapitre 2

Instrumentation, appareillage de contrôle et acquisition des données

Le système d'asservissement et de mesure a dû être changé, après constatation de fluctuations élevées du courant d'injection et de la température de la diode laser, mesurées par LabView. Dans ce chapitre, nous décrivons les changements réalisés au système d'instrumentation, pour mieux maîtriser le contrôle des différents paramètres nécessaires à un dépôt réussi.

2-1- Circuits d'asservissement du courant et de la température de la diode laser par LabView

Au début, lorsque nous avons commencé cette recherche, tout le système d'asservissement, aussi bien celui en température que celui en courant d'injection se faisait par un programme LabView, conçu par un associé de recherche du laboratoire. L'algorithme de ce programme est en annexe 2.

Il s'est avéré que les fluctuations du courant d'injection de la diode laser, utilisant ce programme, sont trop importantes, de l'ordre de 10% pour un courant injecté de 30 mA. L'asservissement en température, lui, n'était pas fiable non plus. Le programme n'indiquait pas la température réelle de la diode ou de son environnement.

Il était, donc, nécessaire de se procurer d'autres moyens fiables, et remédier à ces problèmes.

2-2- Instrumentation analogique d'asservissement

2-2-1- Circuit d'asservissement du courant d'injection de la diode laser

A défaut d'utiliser LabView, nous avons conçu un circuit d'asservissement pour la diode laser, dont un schéma est donné sur la figure 2-1.

Ce circuit a permis un excellent contrôle sur le courant d'injection, donnant une fluctuation qui ne dépassait pas 0,5%, quel que soit le courant d'injection utilisé.

L'amplificateur opérationnel (Figure 2 – 1) est utilisé en contre-réaction négative. La résistance R_2 et le potentiomètre XX1 déterminent le courant de base du transistor Q_1 et donc le courant I_C de la diode laser. La résistance R_3 est une résistance de protection pour la diode laser. Le diviseur de courant, au bout de l'émetteur du transistor Q_1 , renvoie une partie du courant à l'entrée négative de l'amplificateur opérationnel. Le courant de la diode laser est tout simplement lu à l'aide d'un ampèremètre branché en série avec cette dernière.

2-2-2- Modulation du courant d'injection

Le courant d'injection de la diode laser était sensiblement au-dessus de son seuil, I_S , nous avons choisi une valeur, pour le courant injecté, égale à $1,3 I_S$. Par la suite, nous lui avons appliqué une modulation sinusoïdale, de 1kHz, fournie par un générateur de fonctions HP, et dont l'amplitude moyenne était de 15mA, selon le courant de seuil de la diode utilisée.

La figure 2-2, montre la modulation du courant d'injection de la diode laser, alors que la figure 2-3 montre le circuit de modulation et d'asservissement.

La puissance détectée, par une photodiode au germanium, était envoyée, ensuite, dans un appareil de détection synchrone (Lock-In Amplifier), afin de maximiser le rapport signal/bruit, et la sortie de cet appareil était branchée à une table traçante.

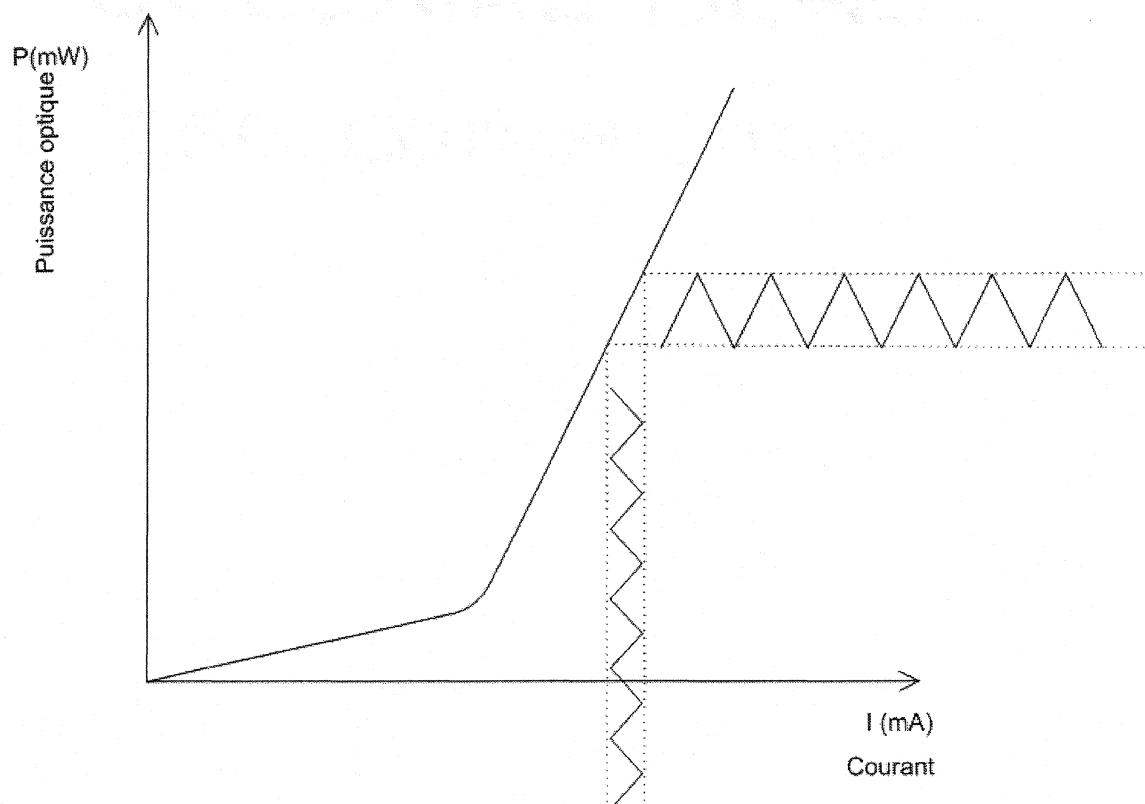


Figure 2-2: Modulation du courant de la diode laser

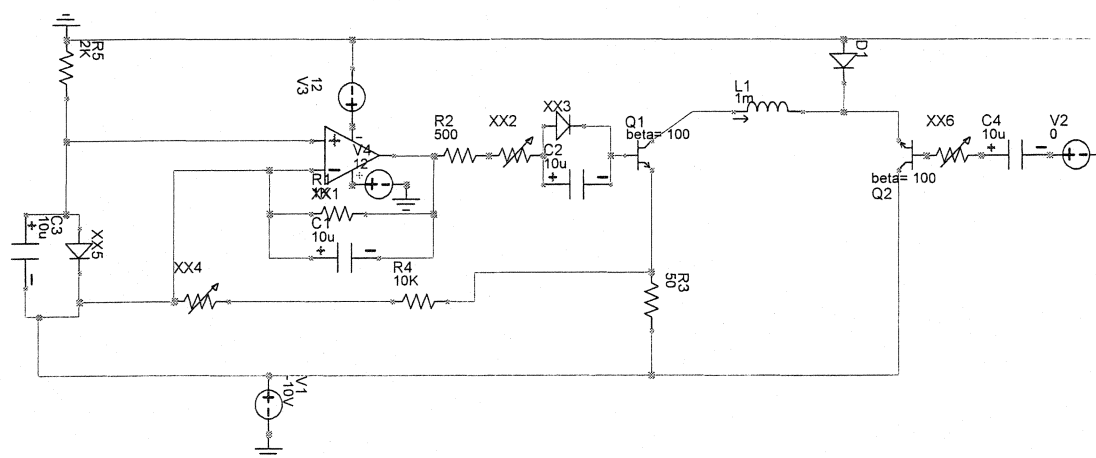


Figure 2-3 : Circuit de modulation et d'asservissement en courant de la diode laser

2-2-3- Asservissement en température de la diode laser

L'asservissement en température se faisait en utilisant un élément refroidisseur Peltier, deux transistors Q_1 et Q_2 montés en cascade et une thermistance R_t . Lorsque la température d'opération de la diode laser est choisie, la tension aux bornes de R_t est connue. Pendant l'évaporation, la température à l'intérieur de la cloche augmente. Pour maintenir une température constante, le programme LabView se charge d'ajuster le courant de base du transistor Q_3 et donc le courant du Peltier (Figure 2 -4).

Les problèmes que nous avons rencontrés en utilisant LabView pour réguler le courant d'injection du laser sont dus à un temps d'exécution assez long puisqu'il dépend de l'exécution de toutes les autres parties du programme. De plus les niveaux quantifiés de LabView ne nous ont pas permis une résolution suffisante pour nos mesures, ce qui nous a amené à concevoir et à utiliser le circuit analogique d'asservissement en courant de la diode laser présenté sur la figure 2-1. La figure 2-5 représente un graphique de caractérisation, courbe L-I, de la diode laser 002C2.

La température de la diode laser est maintenue à 25°C pour un temps de fonctionnement de quelques secondes.

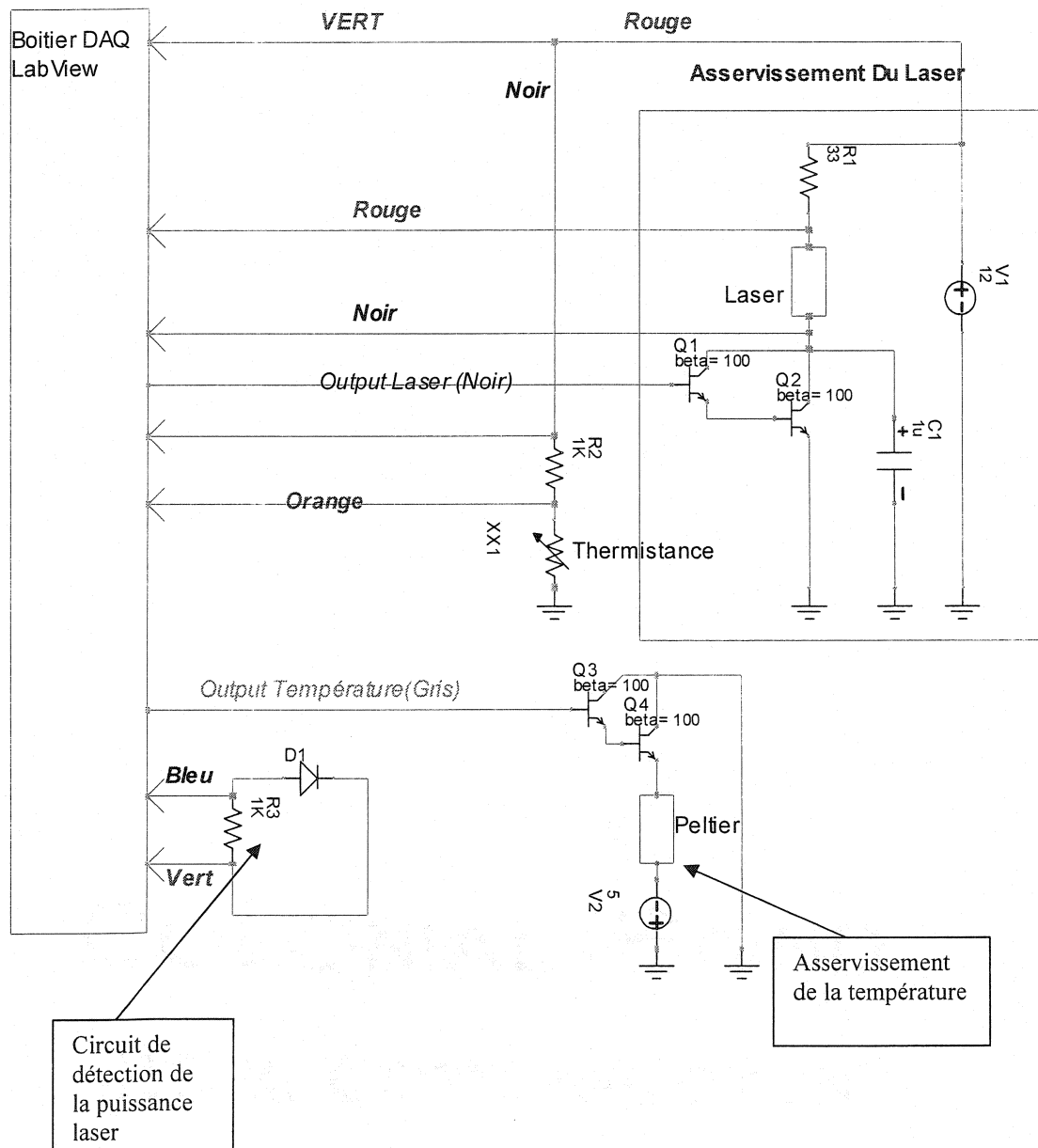


Figure 2-4 : Montage de caractérisation de la diode laser (Courbe L-I)

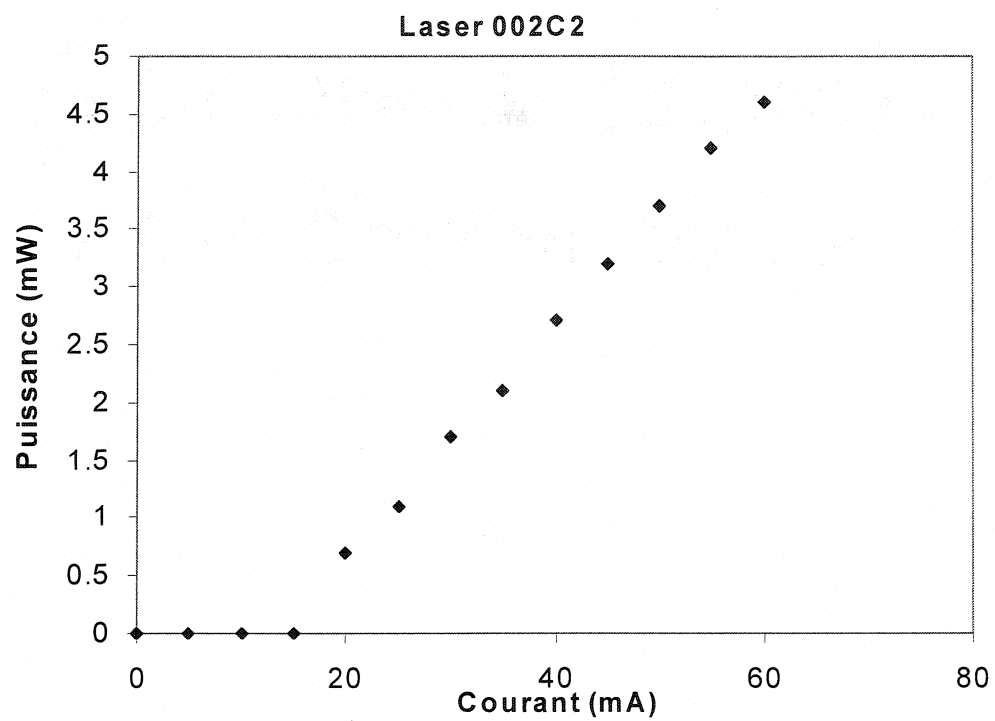


Figure 2-5 : Courbe de caractérisation, courbe L-I, de la diode laser 002C2.

2-2-3-1-Etalonnage de la thermistance

Afin de contrôler la température, nous avons introduit une thermistance de $12\text{ K}\Omega$, dans le support de cuivre qui porte la diode laser.

L'étalonnage de la thermistance a été réalisée en la plongeant dans de l'eau portée à différentes températures. A chaque température relevée à l'aide d'un thermocouple, nous avons mesuré la résistance correspondante de la thermistance. La courbe d'étalonnage, en échelle semi-logarithmique, est donnée sur la figure 2-6.

En effet, le comportement de cette thermistance suit une fonction exponentielle, dont nous avons déterminé les coefficients :

$$T(R) = A e^{BR}, \text{ avec } A = 151,23 \text{ et } B = -0,163.$$

Dans cette formule, R est en kilohms et T est en degrés Celsius.

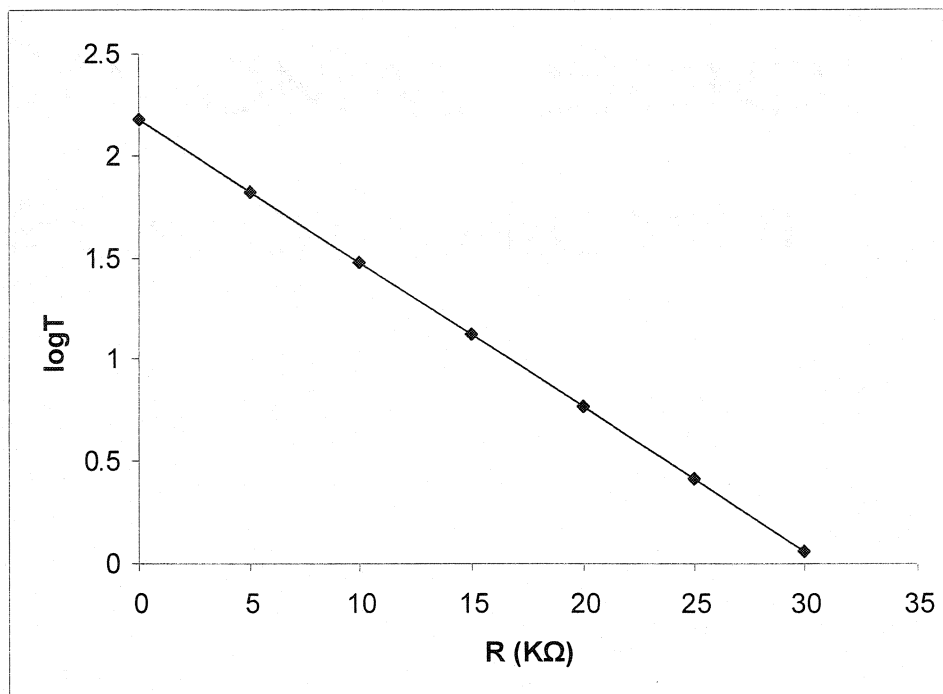


Figure 2-6 : Courbe semi-logarithmique d'étalonnage de la thermistance

2-2-4- Caractérisation de la diode laser : courbe L-I

Avant de placer la diode laser à l'intérieur de la cloche de l'évaporateur, il faut en connaître le courant de seuil et la variation de la puissance émise en fonction du courant d'injection. Nous disposons de deux montages, contrôlés par programmes LabView, pour tracer les courbes L-I de nos diodes laser.

La figure 2-4, montre le circuit que nous avons utilisé à cette fin. Son contrôle est assuré par un programme LabView, dont l'algorithme se trouve en annexe 3.

La tension aux bornes du laser, figure 2-4, est mesurée par le logiciel LabView. La résistance R_1 de $33\ \Omega$ est montée en série avec la diode laser ce qui permet de déduire, en prenant la tension à ces bornes, le courant d'injection de la diode laser. LabView ajuste le courant de base du transistor Q1 et donc le courant qui traverse la diode laser.

Dans le programme LabView, nous imposons un courant d'injection maximal de la diode laser. Lorsque le programme s'exécute, le courant d'injection croît d'une valeur nulle à sa valeur maximale imposée et à chaque courant entre 0 et I_{Max} la puissance laser émise est détectée. Cette détection se fait par un circuit simple comportant une photodiode au germanium dont la responsivité est de $0,8\ A/W$ montée en série avec une résistance de charge de $1\ K\Omega$.

La tension mesurée aux bornes de cette résistance permet de déduire le photocourant I_{ph} .

La puissance détectée est alors déterminée par la relation :

$$P = \frac{I_{ph}}{\mathfrak{R}}$$

où $\mathfrak{R}$ est la responsivité de la photodiode.

Le programme LabView se charge ensuite de tracer la courbe $L - I$ du laser.

2-2-5- Caractérisation du spectre de la diode laser

Pour déterminer le spectre de la diode laser et savoir à quelle longueur d'onde elle émet, nous avons utilisé un Analyseur de Spectres Optiques (OSA) de marque Agilent 86142 B. La diode est montée sur un bloc de déplacement permettant trois degrés de liberté de translation (photo 2.1 et 2.2).

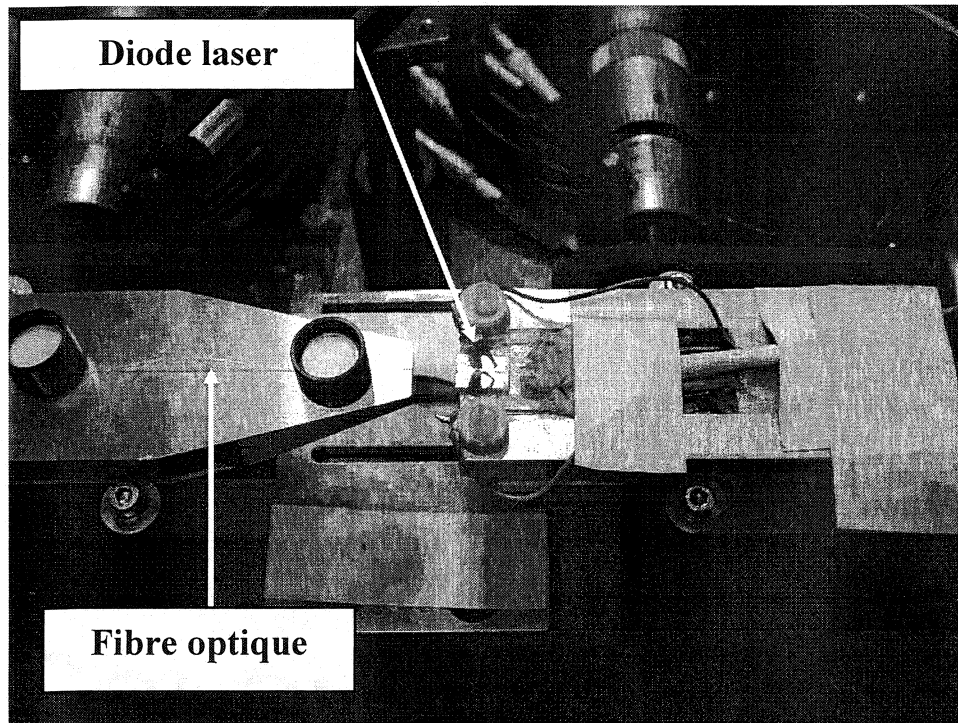


Photo 2.1 : Montage de caractérisation du spectre de la diode laser. L'ensemble (laser + céramique) est monté sur un support en aluminium. La fibre optique, alignée avec la facette émettrice de la diode laser est montée sur le support d'en face.

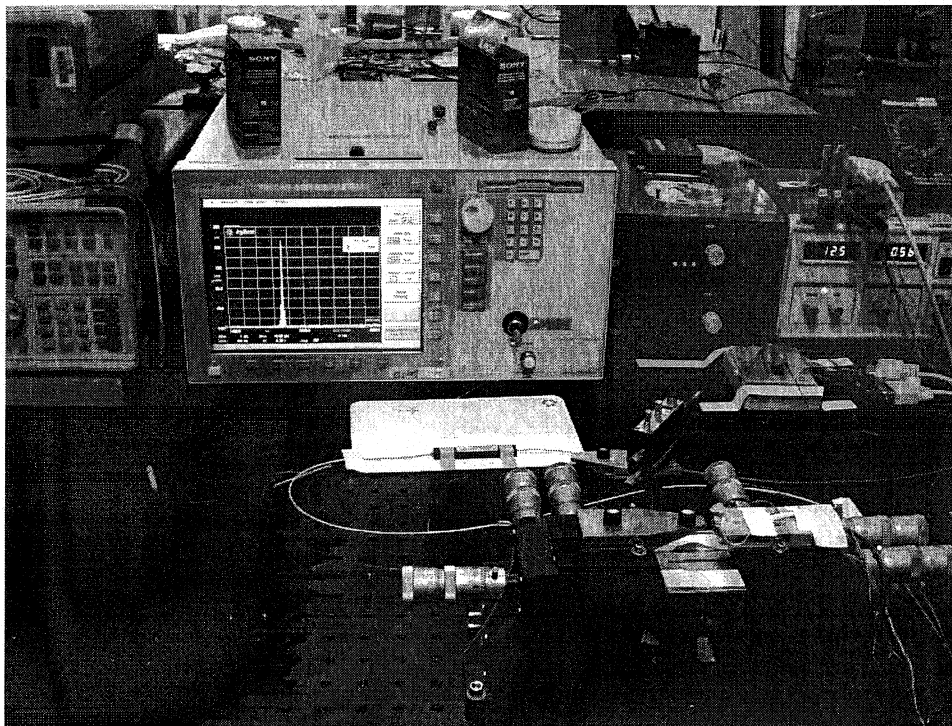


Photo 2.2 : L'analyseur de spectres optiques (Montage de caractérisation des spectres des diodes laser).

Afin de caractériser les spectres des diodes laser, celles-ci étaient asservies en courant et en température par deux contrôleurs de ThorLabs. Une fibre optique, unimodale, est placée sur un autre bloc de déplacement, identique au premier, juste en face de la facette de la diode laser. L'autre bout de la fibre est connecté à l'analyseur de spectres optiques. Une fois l'alignement terminé, nous obtenons le spectre de la diode. Un exemple d'un tel spectre est montré à la figure 2-7.

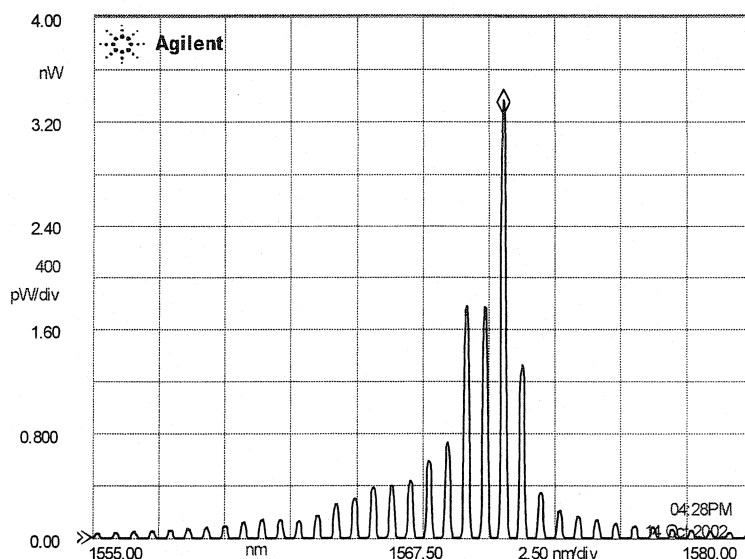


Figure 2-7 : Spectre d'une diode laser mesuré par l'analyseur de spectres optiques

Il est recommandé de calculer d'abord l'espacement des modes Fabry – Perot de la diode laser afin d'ajuster la résolution de l'analyseur de spectres optiques en conséquence. L'analyseur de spectres que nous avons possède une résolution maximale de 0,07 nm. Si l'espacement des modes est inférieur à cette valeur, les modes ne seront plus distingués.

Le calcul de l'espacement inter-mode, $\Delta\lambda$, est détaillé dans la partie discussion à la page 62. Lorsque le spectre de la diode laser est déterminé, il est sauvegardé sur une disquette pouvant s'insérer dans l'analyseur de spectres et ensuite ouvert comme une image dans le logiciel Word.

Enfin, il faut s'assurer de la propreté du connecteur de fibre optique qui est inséré dans l'analyseur pour ne pas l'endommager.

Chapitre 3

Dépôt des couches anti-reflet sur les facettes de la diode laser

Dans ce chapitre, nous explicitons le montage complet, avec tout l'appareillage utilisé, ainsi que le contrôle des différents paramètres, pour avoir un dépôt de couches anti-reflet réussi.

3-1- Dispositif expérimental

3-1-1- Support et connections de la diode laser

Les diodes laser, InGaAsP/InP à puits quantiques contraints, que nous avons utilisées, ayant des petites dimensions, sont montées sur une céramique dont les dimensions sont de $1,2 \times 0,6 \times 0,2 \text{ cm}^3$. Sur les coins de la céramique, des couches d'or sont déposées, et reliées à la diode laser par des fils d'or afin d'en faciliter la polarisation.

La diode laser est ensuite imbriquée dans un support de cuivre, pour la polariser, et pour évacuer la chaleur produite lors de l'évaporation.

Cette façon de faire, a le grand avantage de pouvoir exposer la facette arrière de la diode laser à la source d'évaporation, juste en tournant la diode avec son support et sans devoir souder et dessouder les contacts.

La figure 3 – 1 montre la diode laser montée sur son support de cuivre, l'emplacement de la photodiode dans le montage ainsi que le refroidissement du laser à l'aide d'un bain thermostaté.

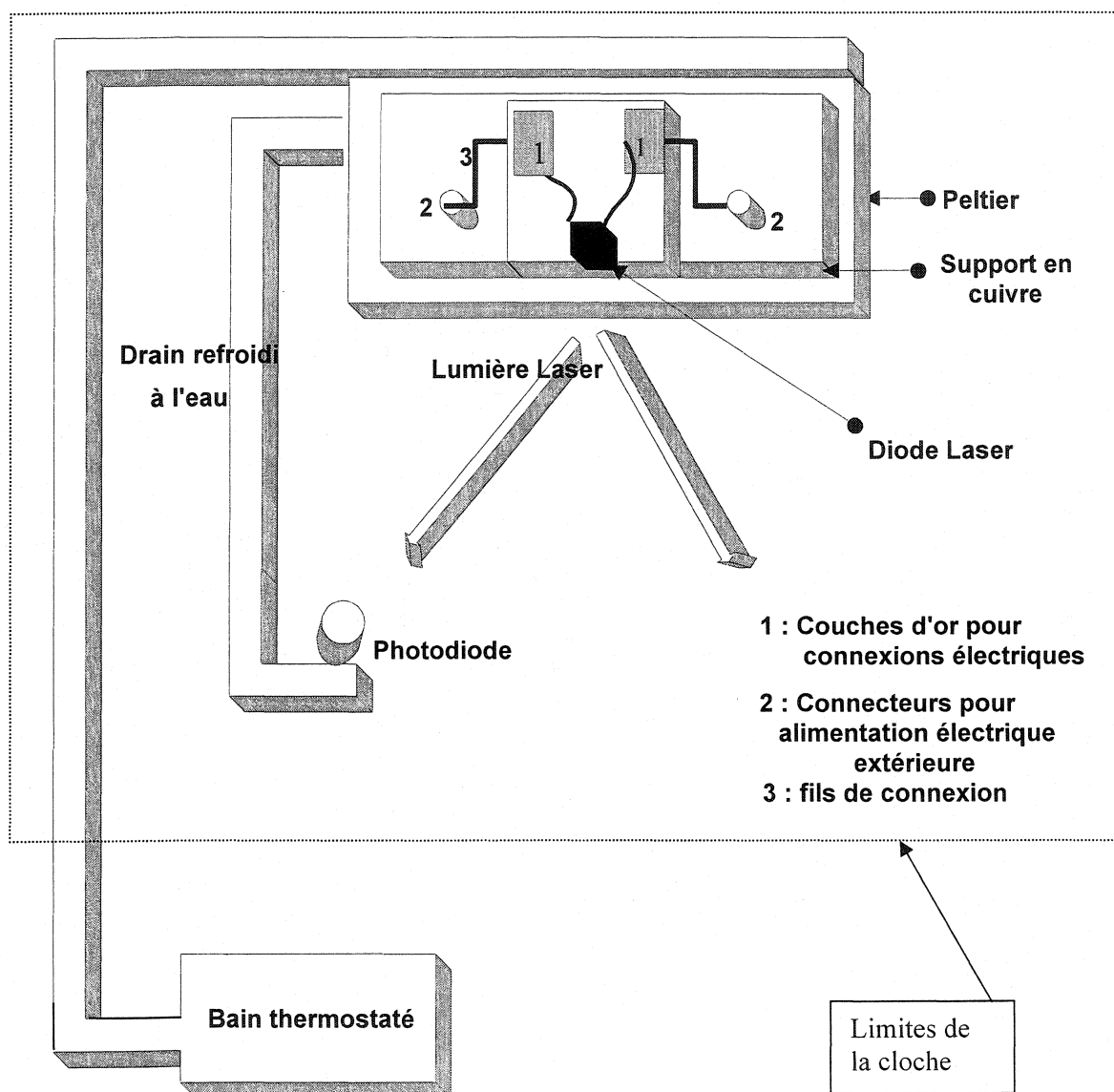


Figure 3 – 1 : Schéma du montage, dans la cloche à vide, de la diode laser sur le support de cuivre refroidi à l'aide du bain thermostaté

3-1-2- Refroidissement et asservissement en température de la diode laser

Lors de l'évaporation du SiO, la température dans la cloche croît rapidement, et si la diode laser n'est pas refroidie adéquatement, l'échauffement de sa jonction, provoque un déplacement de son courant de seuil vers des valeurs plus élevées, et par conséquent, la puissance émise tombe pouvant laisser croire que cette diminution en puissance est due au traitement anti-reflet.

Nous avons placé un élément Peltier contre le support de cuivre de la diode laser pour la refroidir. L'autre côté du Peltier est en contact avec un drain thermique refroidi à de l'eau portée à 10 °C, dans un bain thermostaté (photo 3.1).

La température, elle, est contrôlée moyennant une thermistance de 12k Ω , insérée dans le support de cuivre de la diode laser, et est connectée à un contrôleur de température de Wave Electronics à défaut d'utiliser le programme de LabView. .

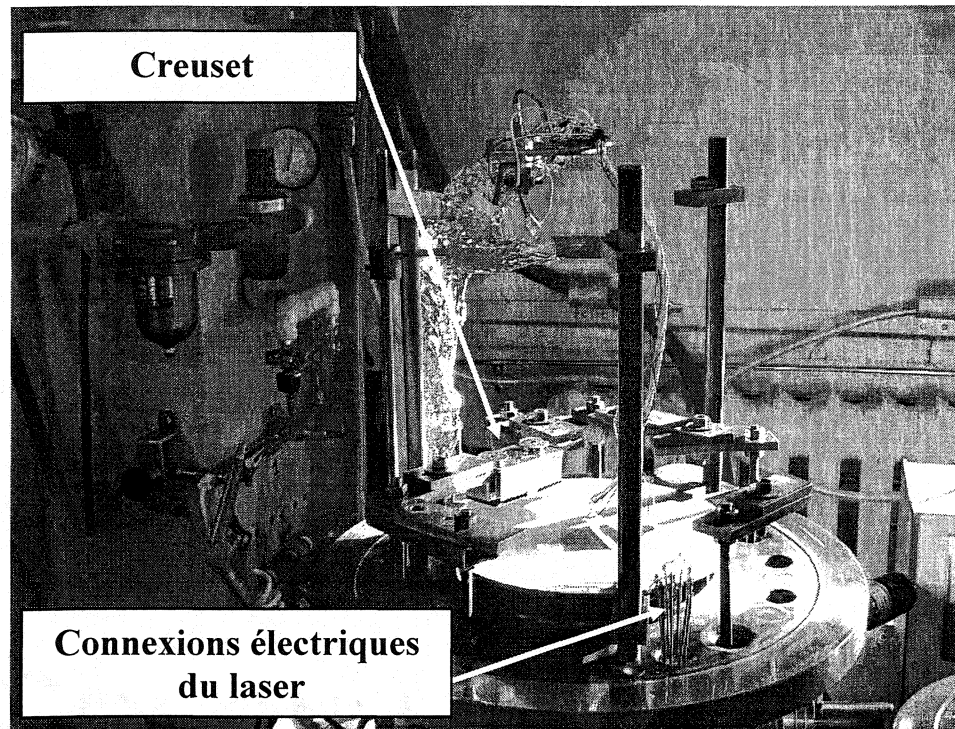


Photo 3.1 : La cloche ouverte de l'évaporateur thermique. Le papier d'aluminium enroulé autour des conduites d'eau a pour but de minimiser le réchauffement d'eau qui y circule pendant l'évaporation.

3-1-3- Détection de la puissance émise par la diode laser

Une photodiode au germanium est placée, au-dessous de la diode laser, de façon à recevoir le maximum de puissance lumineuse, sans obturer la facette du laser (photo 3.2) lors du traitement anti-reflet.

Elle est montée sur un support de cuivre en "L", solidaire de celui du laser, flexible pour faciliter la recherche de maximum de puissance reçue. La photodiode, ainsi que toute la tuyauterie à l'intérieur de la cloche, sont enveloppées de papier en aluminium, pour minimiser leur échauffement.

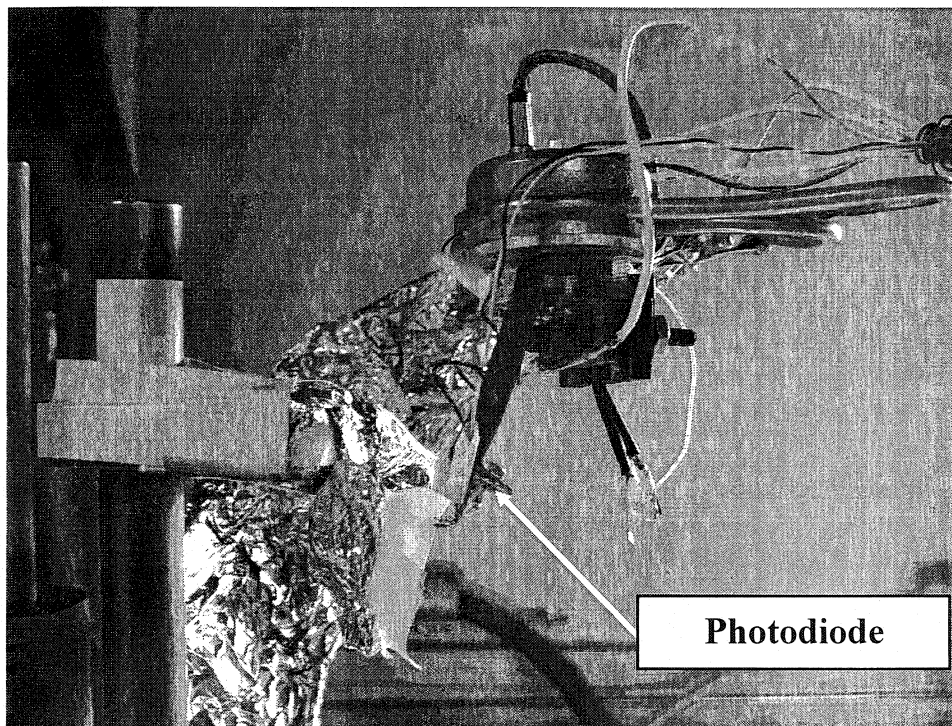


Photo 3.2 : Le support de cuivre de la diode laser et la photodiode ainsi que les conduites d'eau servant à refroidir la diode laser.

3-2- Procédure expérimentale

Une fois que la courbe L-I et le spectre de la diode laser sont déterminés, comme expliqué dans les sections précédentes, elle est placée à l'intérieur de la cloche, à 20 cm et à la verticale de la source d'évaporation. Elle est, ensuite, polarisée, au-dessus de son seuil, généralement, à un courant d'injection valant $1,3 I_S$, pour rester dans la partie linéaire de la courbe L-I et pouvoir appliquer la modulation.

La photodiode est montée à 4 cm au-dessous de la diode laser, mais de manière à ne pas obturer cette dernière lorsque l'évaporation débute. Elle est, ensuite, manipulée de façon à recevoir le maximum de puissance de la diode laser. Cette puissance reçue est observée sur l'appareil de détection synchrone, un oscilloscope et une table traçante reliée à cet appareil.

La température indiquée par la thermistance est relevée et le contrôleur de température est ajusté de façon à la garder constante, à l'aide de l'élément Peltier et du bain thermostaté.

Lorsque ces réglages sont réalisés, nous plaçons la cloche et lançons la pompe mécanique pour faire le vide primaire. Il faut un vide poussé de l'ordre de 10^{-6} mbar pour pouvoir procéder à l'évaporation. Ce vide est assuré par une pompe à diffusion à piège d'azote. L'annexe 4 en explique la procédure à suivre. Dans toutes les expériences que nous avons menées,

nous avons un vide de l'ordre de 2×10^{-7} mbar. Un schéma du montage complet est donné sur la figure 3-2.

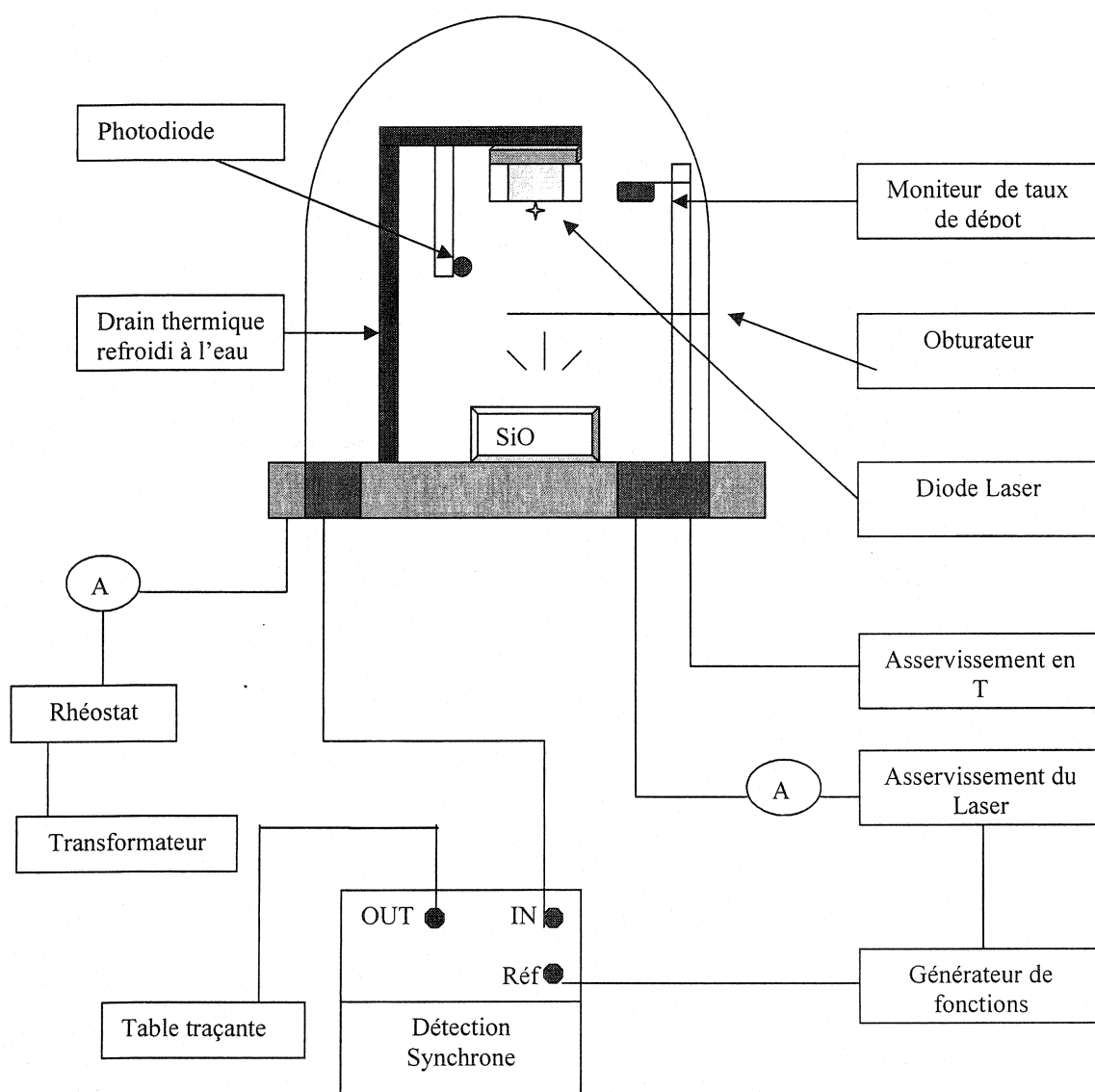


Figure 3-2 : Schéma du montage expérimental pour l'évaporation de SiO

La source d'évaporation est maintenant mise sous tension. Le courant d'alimentation du creuset est augmenté graduellement à l'aide d'un rhéostat, jusqu'à arriver au taux de dépôt désiré, observé sur un moniteur de taux de dépôt. Nous opérons, généralement, à un taux de dépôt assez lent, de l'ordre de $8 - 10 \text{ \AA/s}$. Une fois ce taux atteint, nous ouvrons l'obturateur, et la diode laser est exposée à la source d'évaporation. L'évolution de la puissance reçue est alors enregistrée, en temps réel, sur la table traçante. Lorsque la puissance atteint un minimum, observé sur l'enregistrement de la table traçante, nous refermons l'obturateur, et arrêtons le dépôt. Après avoir laissé le temps au système de refroidir, la diode laser est, ensuite, démontée, pour en caractériser le spectre. Pour la facette arrière de la diode, nous procédons exactement de la même manière, mais en la tournant bien sûr, pour avoir cette facette exposée à la source d'évaporation. La puissance détectée devrait augmenter légèrement, pendant l'évaporation ce qui correspond au critère d'arrêt du dépôt sur la facette arrière.

Chapitre 4

Calcul de la réflectivité et résultats obtenus

L'efficacité d'un dépôt anti-reflet est caractérisée en déterminant le pourcentage de réflectivité résiduelle à la facette émettrice. Parmi les méthodes utilisées, nous exposons celle par détermination du rapport des puissances émises, celle du rendement différentiel externe et, finalement, celle du spectre de gain.

Une fois que le revêtement anti-reflet est réalisé sur l'une des facettes de la diode laser, celle-ci se comporte comme une diode supra-luminescente où la faible puissance provient, essentiellement, de l'émission spontanée amplifiée.

4-1- Méthodes de calcul de la réflectivité des facettes de la diode laser

4-1-1- Méthode du rapport des puissances émises

Dans cette méthode, nous mesurons la puissance laser émise, au-dessus de seuil, à la facette avant et arrière de la diode laser, en

supposant que le nouveau courant de seuil puisse être atteint.

L'émission spontanée est supposée négligeable. Le rapport des puissances émises est donné par ^[6] :

$$\frac{P_{TR}}{P_A} = \left(\frac{R_A}{R_{TR}} \right)^{1/2} \left(\frac{1 - R_{TR}}{1 - R_A} \right) \quad (4-1-1)$$

P_{TR} : Puissance à la facette traitée

P_A : Puissance à la facette arrière

R_{TR} et R_A : Réflectivités des facettes traitée et arrière respectivement.

4-1-2- Méthode du rendement différentiel externe^[16]

Le rendement différentiel externe η_{ext} d'une source électroluminescente est le rapport du nombre de photons émis pour un accroissement donné d'électrons:

$$\eta_{ext} = \frac{e}{h\nu} \left[\frac{\Delta P}{\Delta I} \right] \quad (4-1-2-a)$$

Où $\Delta P / \Delta I$ est la pente de la partie droite montante de la courbe L-I du laser.

Pour un laser Fabry-Perot, le rendement différentiel externe est relié au rendement différentiel interne η_i par :

$$\eta_i = \eta_{ext} \left[1 - \frac{2\alpha L}{\ln(R_1 R_2)} \right] \quad (4-1-2-b)$$

α étant la perte par absorption. Si nous traçons $1/\eta_{ext}$ en fonction de L (longueur de la cavité) ou du logarithme des réflectivités des miroirs, alors nous aurons $1/\eta_i$ comme ordonnée à l'origine et α comme pente, comme le montre la figure 4-1.

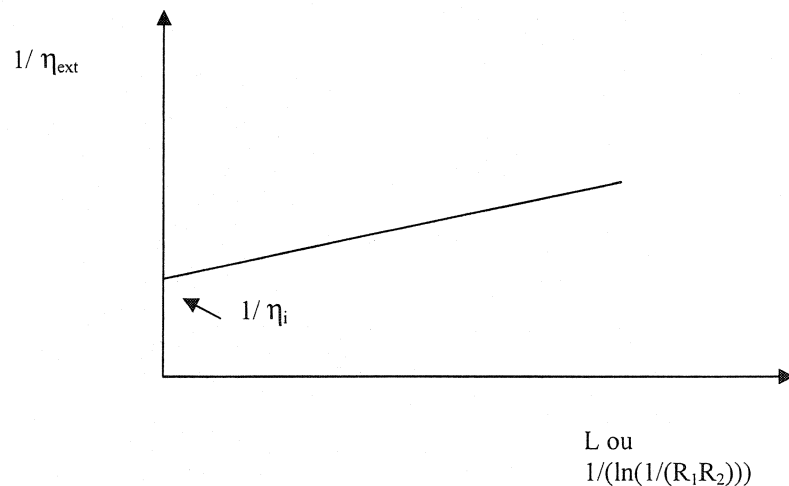


Figure 4-1: Rendement différentiel externe

L'équation de cette droite étant :

$$\frac{1}{\eta_{ext}} = \frac{1}{\eta_i} \left[1 - \frac{2\alpha L}{\ln(R_1 R_2)} \right] \quad (4-1-2-c)$$

Dans cette méthode pour chaque courbe L-I correspondant à une certaine réflectivité, il existe un rendement externe. Cette méthode n'a pas été utilisée dans nos calculs, puisqu'il aurait fallu alors démonter la diode laser plusieurs fois au cours du traitement anti-reflet pour pouvoir obtenir différentes réflectivités et donc différents rendements externes.

4-1-3- Méthode du spectre de gain

Lorsque les deux facettes de la diode laser ont subi un traitement anti-reflet, il devient très difficile de déterminer la réflectivité de la facette arrière par les méthodes citées plus-haut. Le rapport signal/bruit, mesuré au courant de seuil, I_s , de la diode non traitée, est tellement faible que nous ne pouvons distinguer le signal du bruit, ce qui pourrait sous-estimer la vraie réflectivité de cette facette ^[1].

Pour une meilleure mesure de la réflectivité, il faut injecter de la lumière dans l'amplificateur ^[10]. Avec cette méthode, il faut connaître avec une bonne précision, le couplage à l'entrée et à la sortie de l'amplificateur. Pour ce faire, nous pouvons déterminer le gain net en utilisant une fibre à l'entrée de l'amplificateur et une photodiode, à surface large, à la sortie, ensuite nous mesurons le gain avec deux fibres, à l'entrée et à la sortie de l'amplificateur. Le taux de couplage fibre-amplificateur est alors déduit, si nous supposons que le taux de couplage des deux fibres avec l'amplificateur est le même.

Le spectre de gain, $G(\lambda)$, d'un amplificateur optique dont les facettes ont des réflectivités R_1 et R_2 , un gain de simple passage g et un taux de couplage k , est donné par l'équation Fabry-Perot ^[11] :

$$G(\lambda) = \frac{gk(1-R)^2}{(1-gR)^2 + 4gR \sin^2(2\pi L / \lambda)} \quad (4-1-3)$$

où

λ est la longueur d'onde dans le vide

$$R = (R_1 R_2)^{1/2}$$

n est l'indice de réfraction effectif de l'amplificateur (de son guide d'onde)

L est la longueur de l'amplificateur

Le spectre de gain étant connu, nous pouvons calculer R_2 sachant que R_1 est donnée et vaut 0,30.

4-2- Résultats obtenus

Dans cette section, nous détaillons les résultats expérimentaux, courbes $L-I$ et spectres avant et après traitement anti-reflet, ainsi que les valeurs des réflectivités obtenues, de toutes les diodes lasers utilisées.

La notation adoptée pour numéroté les lasers est la suivante :

00XYZ, où

$X = 1, 2, 3$ ou 4 , le numéro de la boîte où le laser est pris,

$Y = A, B, C, D, E$ ou F , indique la ligne (rangée horizontale) où le laser est situé dans la boîte,

$Z = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$ ou 8 , indique la colonne où le laser est situé dans la boîte,

Ainsi, le laser 003A5 est un laser de la boîte 3, se trouvant dans la case à l'intersection de la ligne A et la colonne 5.

Les conditions expérimentales et les valeurs des différents paramètres, résumées dans le tableau 4-1, sont quasi similaires pour toutes les diodes laser utilisées au cours de nos expériences.

Tableau 4-1 : Valeurs des paramètres pour le dépôt des couches anti-reflets.

P_i (mbar)	P_t (mbar)	I_{creuset} (A)	Taux de dépôt ($\text{\AA}/\text{s}$)	Épaisseur de la couche ($\text{\AA}$)	Temps (mn)
$2 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-7}$	278	8- 10	2000 - 2290	4 -7

où P_i et P_t sont les pressions initiale et de travail dans la cloche, respectivement, et Temps est le temps de dépôt écoulé pour atteindre le minimum de puissance détectée. L'épaisseur de la couche déposée varie, évidemment, selon le taux et le temps de dépôt.

Sur la figure 4-2, nous avons tracé les courbes L-I de la diode laser 003A6, sans traitement anti-reflet et avec la facette avant traitée. Nous y voyons clairement l'effet du revêtement anti-reflet, avec un courant de seuil, initialement à 17 mA, qui passe après traitement à 60 mA. La réflectivité, calculée par la méthode du rapport des puissances émises, expliquée au 4-1-1, s'exprime comme suit:

$$R_{TR} = \frac{-\alpha + \sqrt{\Delta}}{\beta} \quad (4-2-a)$$

Avec :

$$\alpha = \left(P_{TR}^2 - 2P_{TR}^2 R_A + P_{TR}^2 R_A^2 + 2P_A^2 R_A \right) \quad (4-2-b)$$

$$\Delta = \alpha^2 - \beta^2 \quad (4-2-c)$$

$$\beta = 2P_A^2 R_A \quad (4-2-d)$$

où :

P_A : La puissance émise à la facette arrière du laser,

P_{TR} : La puissance émise à la facette avec revêtement anti-reflet du laser,

R_A et R_{TR} : Les réflectivités des facettes arrière et avec revêtement anti-reflet du laser, respectivement. (R_A est donnée et vaut 0,30)

La réflectivité obtenue pour ce laser est de l'ordre de $5,99 \cdot 10^{-4}$. Il s'agit de la meilleure valeur que nous avons pu obtenir.

Les spectres de ce laser, avant et après traitement anti-reflet, sont reportés sur les figures 4-3 et 4-4. Nous constatons qu'après revêtement anti-reflet, les modes d'oscillation Fabry-Perot sont réduits et par conséquent la réflectivité de la facette traitée est diminuée. La longueur d'onde d'émission du laser est d'environ 1570 nm. La largeur de bande spectrale, après traitement anti-reflet, est de l'ordre de 60 nm, permettant ainsi l'amplification d'une assez bonne plage de longueurs d'onde. L'indice de réfraction de SiO est de l'ordre de 1,86. Pour chaque laser traité, nous avons donné un tableau contenant les valeurs des paramètres

expérimentaux de dépôt.. Pour le laser 003A6, ces valeurs sont dans le tableau 4-2.

Sur les figures 4-5, 4-6 et 4-7, nous avons reporté les courbes L-I du laser 003F5 avant et après traitement anti-reflet de la facette avant, le spectre du laser avant traitement et son spectre après traitement anti-reflet, respectivement. Ce laser, devenu une Diode Supra Luminescente (DSL), après traitement anti-reflet, est utilisé au laboratoire d'optoélectronique comme source de lumière infrarouge incohérente pour des applications en tomographie optique cohérente.

Les courbes L-I du laser 001F3 avant et après traitement anti-reflet sont reportées sur la figure 4-8. Le laser avec un courant de seuil de 16 mA, a été opéré à 25mA durant le traitement anti-reflet. Le nouveau courant de seuil atteint était de l'ordre de 40mA. Les spectres du laser avant et après traitement anti-reflet sont reportés sur les figures 4-9 et 4-10. Malgré la présence d'oscillations prononcées à la longueur d'onde d'émission du laser, 1460 nm, nous obtenons une réflectivité de $5,34 \cdot 10^{-3}$ sur une bande de 31 nm, pour la facette avant.

La réflectivité de la facette avant du laser 003F6 est sensiblement inférieure à la précédente, elle est d'environ $6,58 \cdot 10^{-3}$ sur une plage de 22nm. Le laser avait un courant de seuil de 18mA et a été opéré à 25mA.

Les courbes L-I ainsi que les spectres du laser 003F6 avant et après traitement anti-reflet sont donnés sur les figures 4-11, 4-12 et 4-13 respectivement.

À partir du laser 003A5, les réflectivités obtenues pour les facettes avant sont, quelque peu, moins intéressantes. Pour la facette avant de la diode laser 003A5 nous obtenons $7,94 \cdot 10^{-3}$, sur 13 nm. Le seuil du laser original est de 18mA et a été opéré à 25 mA. Les courbes L-I et les spectres de ce laser, avant et après traitement anti-reflet sont reportés sur les figures 4-14, 4-15 et 4-16 respectivement.

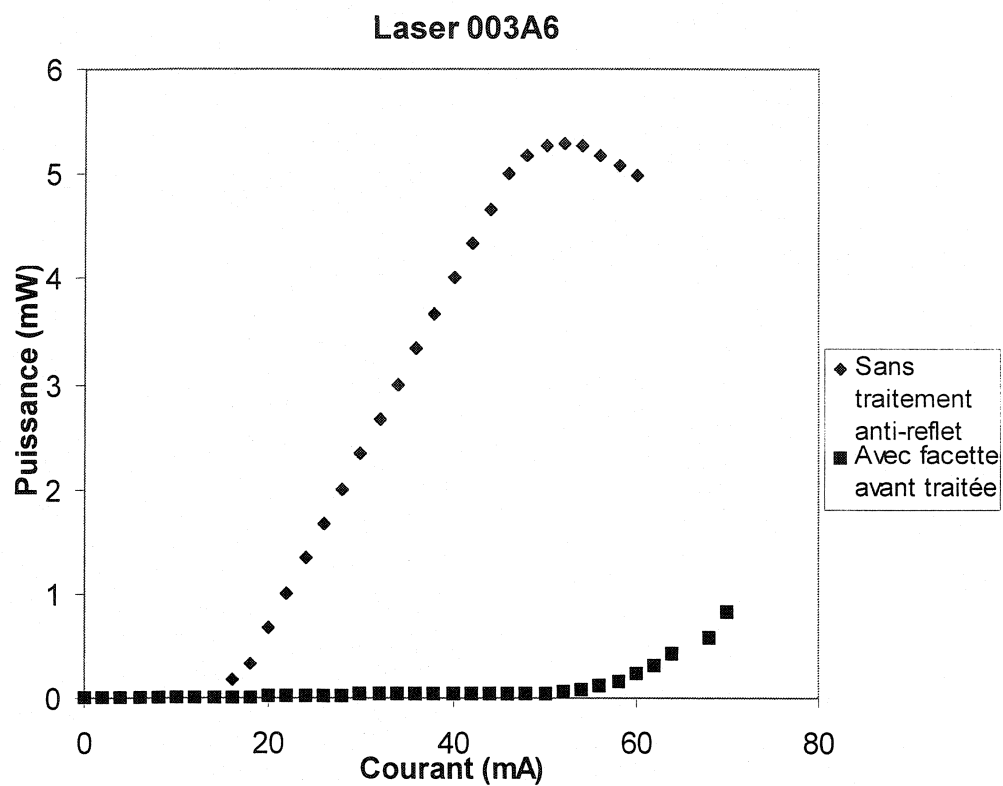


Figure 4-2 : Courbes L-I du laser 003A6, sans traitement et avec facette avant traitée.

Tableau 4-2 : Valeurs des paramètres du dépôt pour le laser 003A6

$I_{\text{Creuset}}(\text{A})$	Taux de dépôt ($\text{\AA}/\text{s}$)	Épaisseur(nm)	Temps(mn)
280	9	220	5

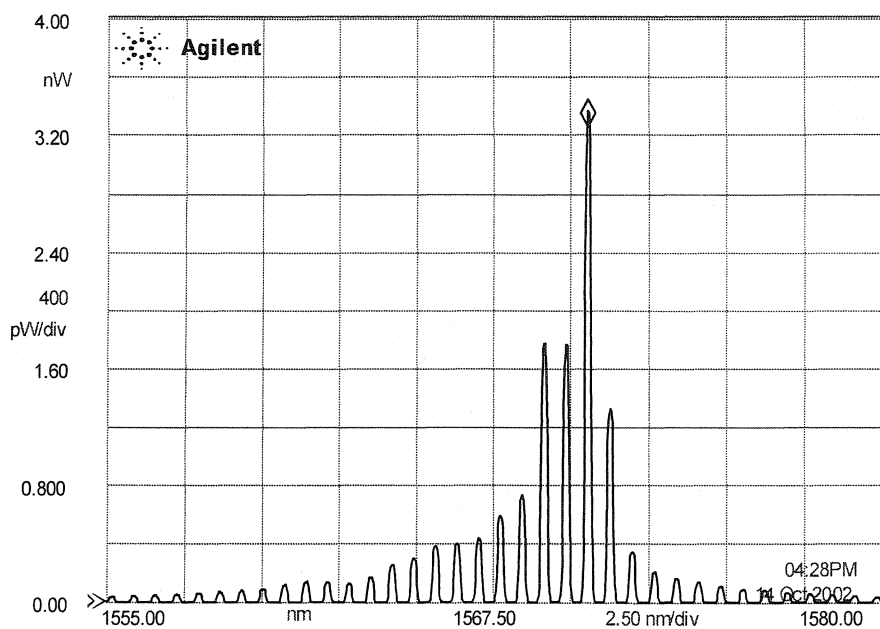


Figure 4-3 : Spectre du laser 003A6 : $I_{\text{injection}} = 17\text{mA}$
 $I_{\text{Seuil}} = 15\text{mA}$

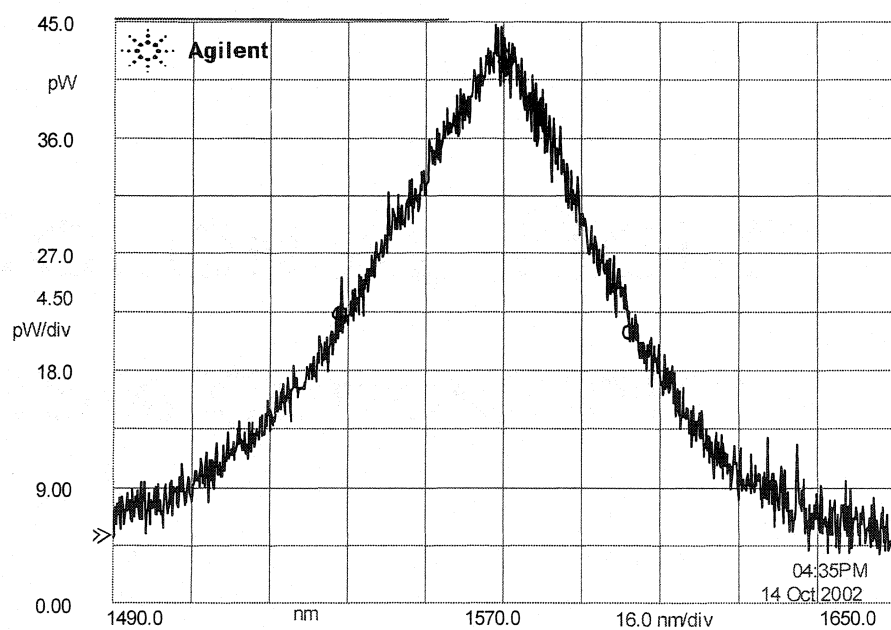


Figure 4-4 : Spectre du laser 003A6 après traitement anti-reflet sur la
 facette avant : $I=60\text{mA}$, Résolution=1 nm, Largeur spectrale à mi-
 hauteur = 60nm

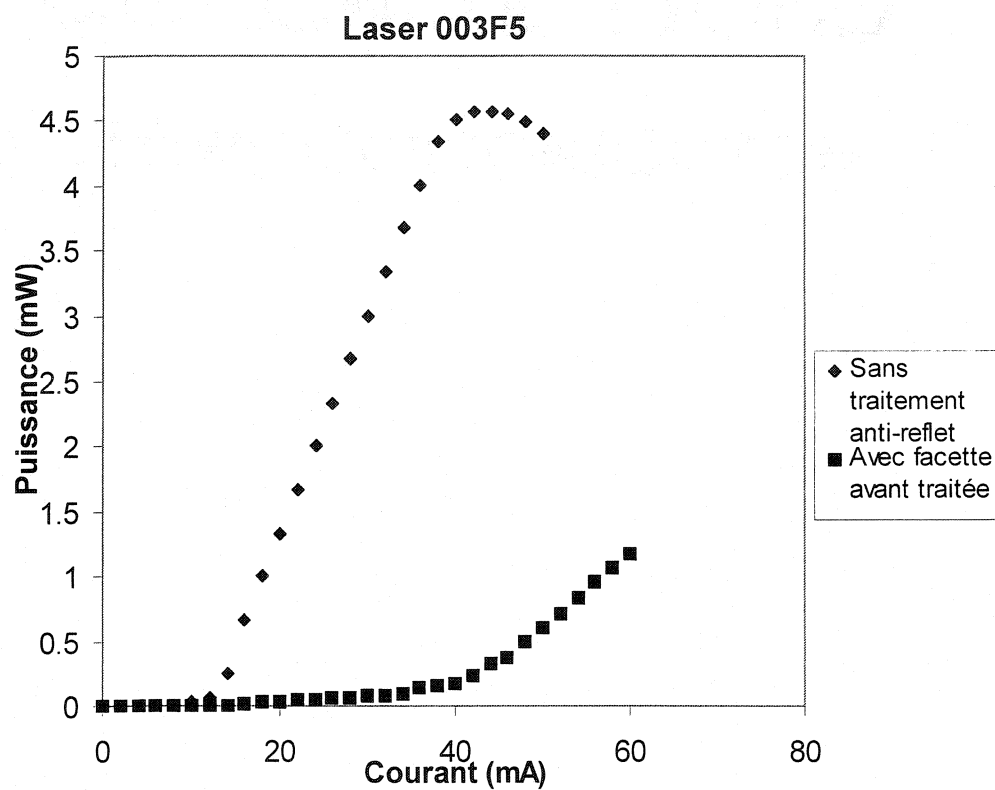


Figure 4-5 : Courbes L-I du laser 003F5, sans traitement et avec facette avant traitée.

Tableau 4-3 : Valeurs des paramètres du dépôt pour le laser 003F5

$I_{\text{Creuset}}(\text{A})$	Taux de dépôt ($\text{\AA}/\text{s}$)	Épaisseur(nm)	Temps(mn)
279	10	209	5

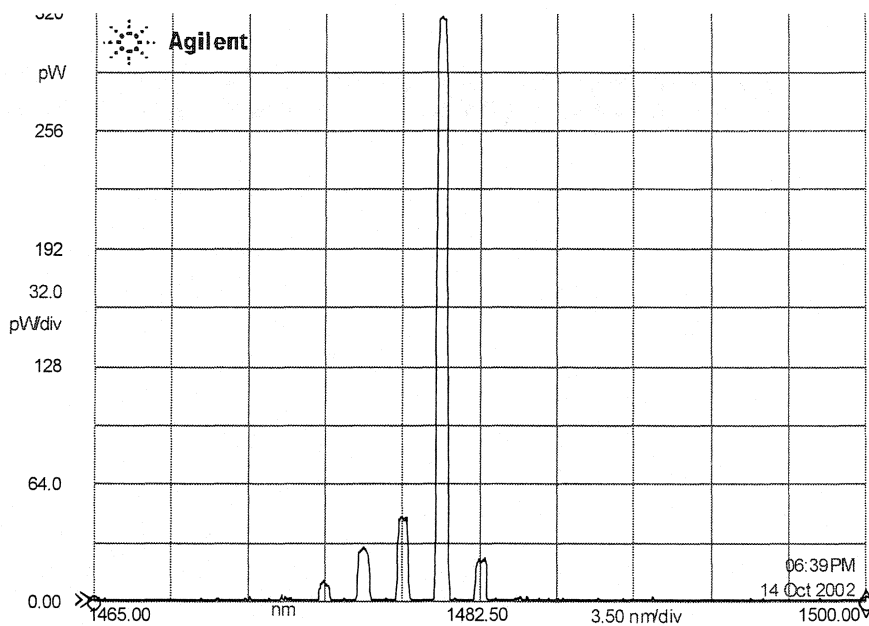


Figure 4-6 : Spectre du laser 003F5: $I_{\text{Injection}} = 24\text{mA}$, $I_{\text{Seuil}} = 15\text{mA}$

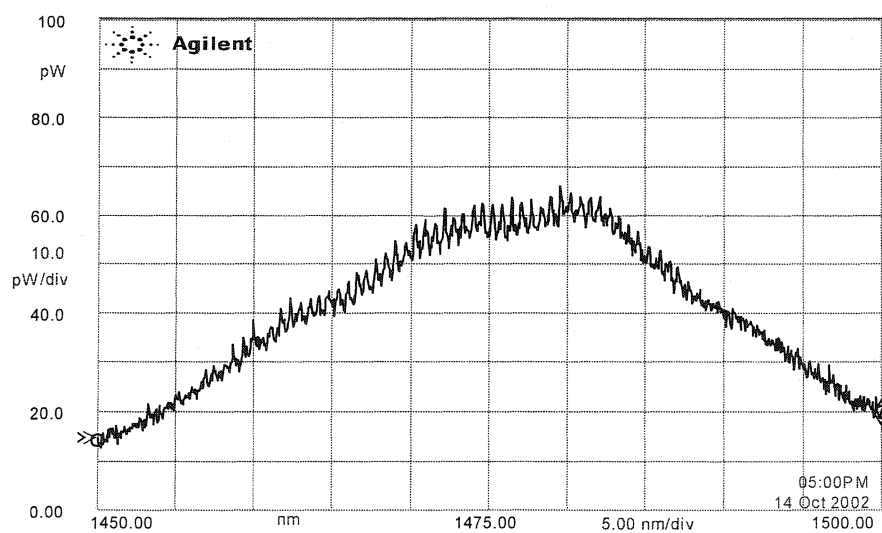


Figure 4-7 : Spectre du laser 003F5 après traitement anti-reflet sur la facette avant : $I = 80\text{mA}$, résolution = 2nm, largeur spectrale à mi-hauteur = 50nm

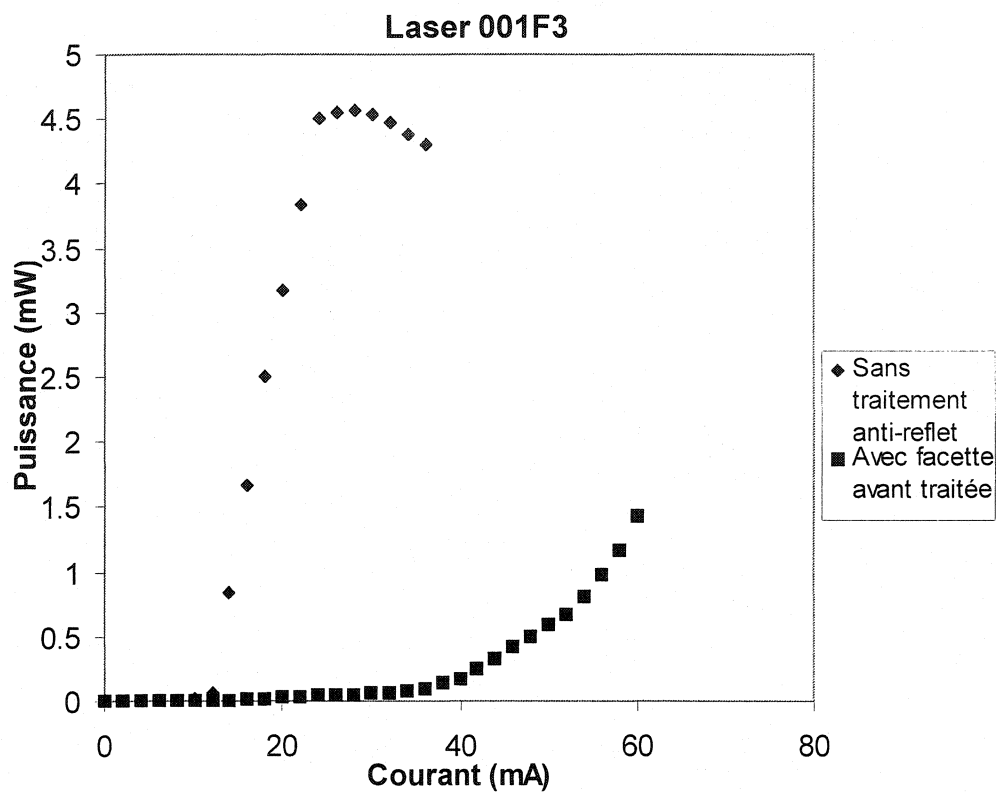


Figure 4-8 : Courbes L-I du laser 001F3 sans et avec traitement anti-reflet de la facette avant

Tableau 4-4 : Valeurs des paramètres du dépôt pour le laser 001F3

$I_{\text{Creuset}}(\text{A})$	Taux de dépôt ($\text{\AA}/\text{s}$)	Épaisseur(nm)	Temps(mn)
280	8	221	5

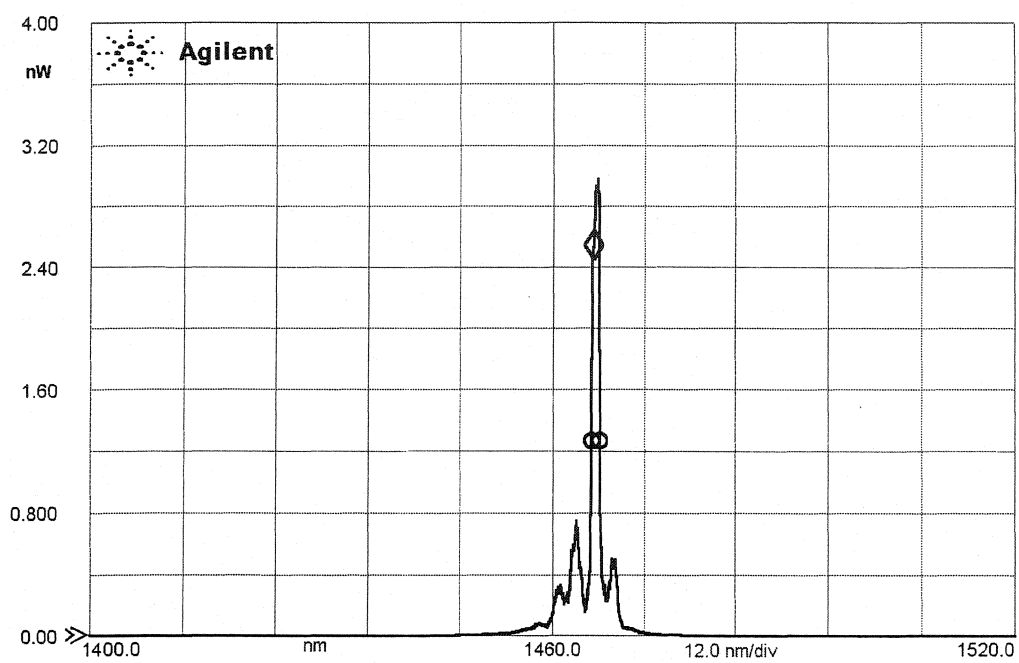


Figure 4-9 : Spectre du laser 001F3, $I_S=16\text{mA}$, $I_{\text{Injection}}=25\text{mA}$

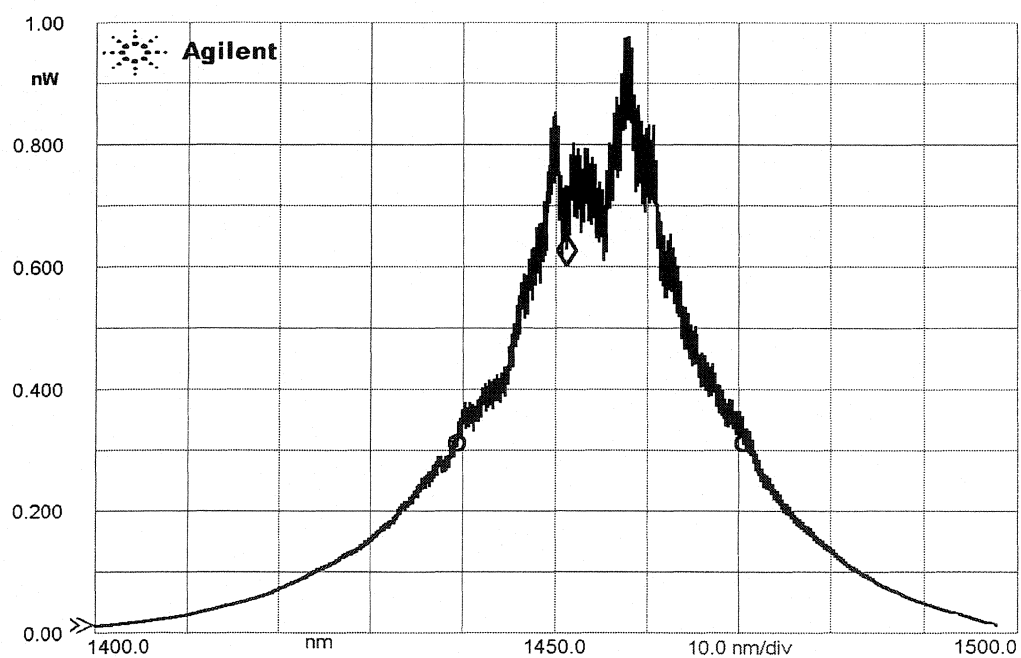


Figure 4-10 : Spectre du laser 001F3 après traitement anti-reflet de la facette
avant, $I=70\text{mA}$, Résolution= 1nm, Largeur spectrale à mi-hauteur de bande=31 nm.

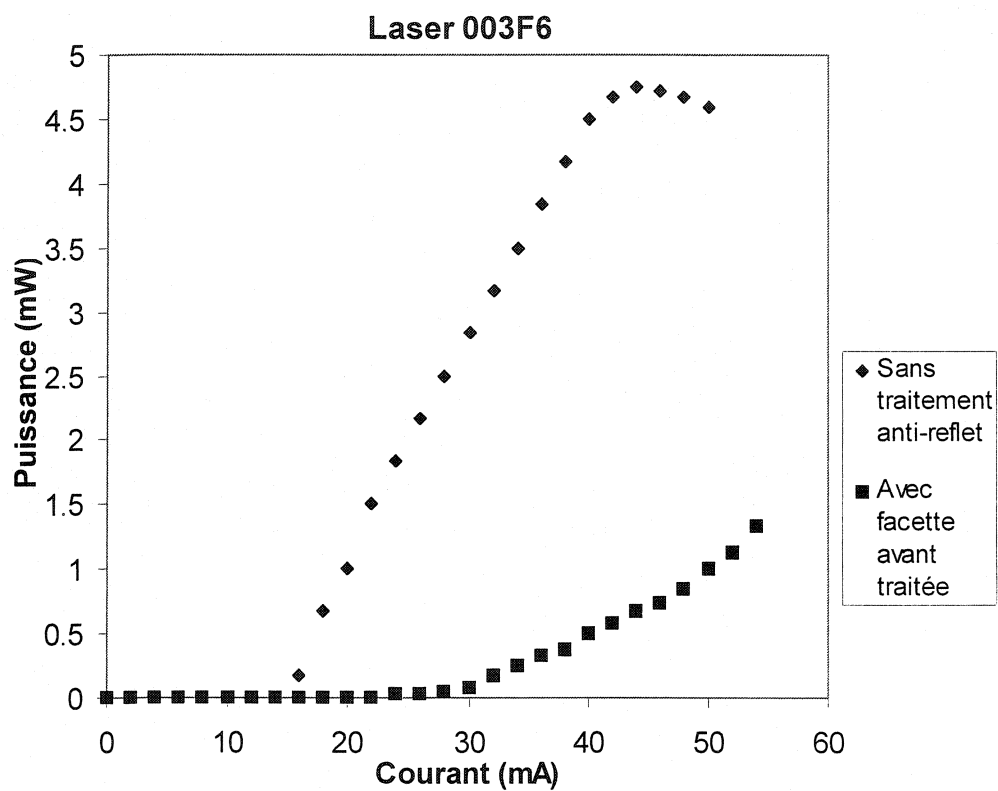


Figure 4-11 : Courbes L-I du laser 003F6 avant et après traitement anti-reflet de la facette avant

Tableau 4-5 : Valeurs des paramètres du dépôt pour le laser 003F6

$I_{\text{Creuset}}(\text{A})$	Taux de dépôt ($\text{\AA}/\text{s}$)	Épaisseur(nm)	Temps(mn)
279	10	219	4

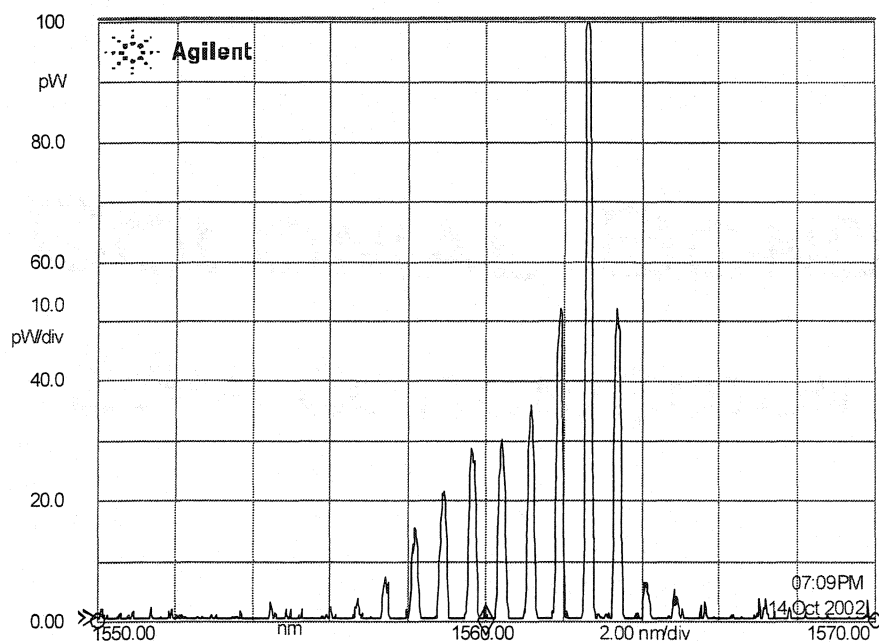


Figure 4-12 : Spectre du laser 003F6, $I_s=18\text{mA}$, $I_{\text{Injection}}=25\text{mA}$

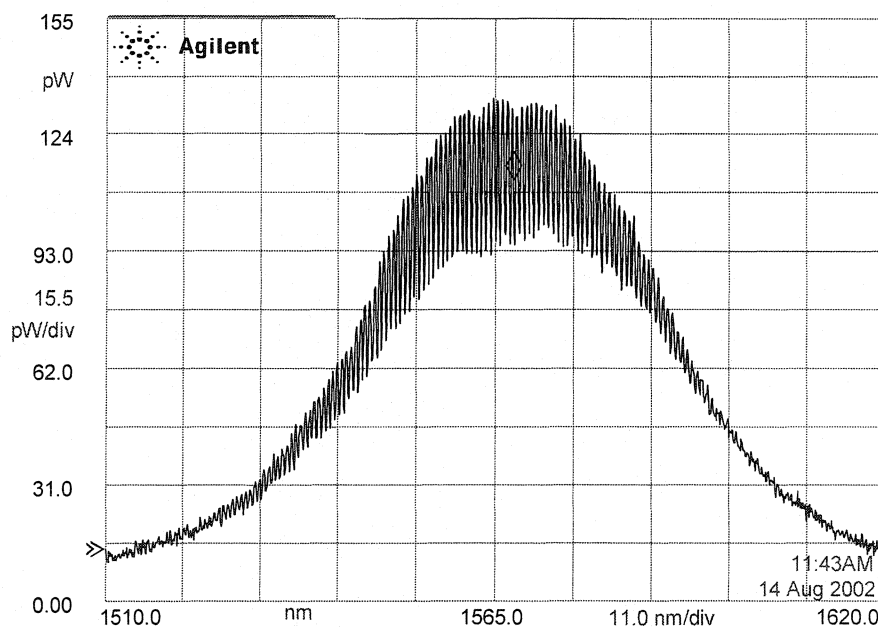


Figure 4-13 : Spectre du laser 003F6 après traitement anti-reflet de la facette

avant, $I=60\text{mA}$, Résolution = 1 nm, Largeur spectrale à mi-hauteur = 55nm

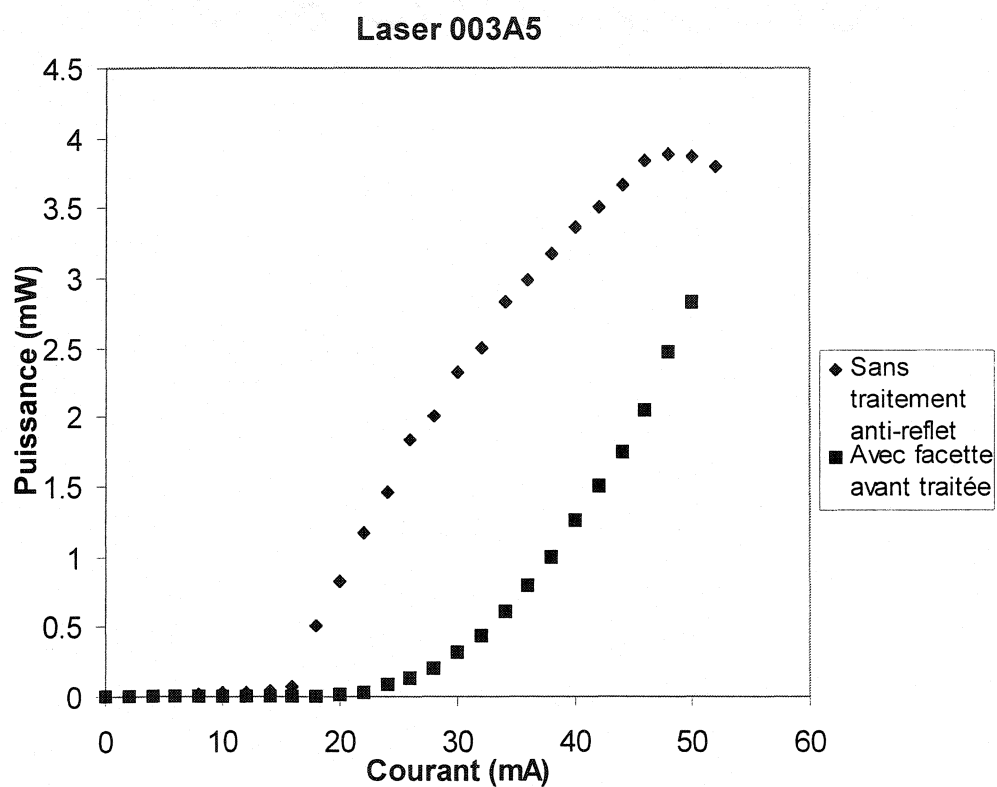


Figure 4-14 : Courbes L-I du laser 003A5 avant et après traitement anti-reflet de la facette avant.

Tableau 4-6 : Valeurs des paramètres du dépôt pour le laser 003A5

$I_{\text{Creuset}}(\text{A})$	Taux de dépôt ($\text{\AA}/\text{s}$)	Épaisseur(nm)	Temps(mn)
280	9	214	4

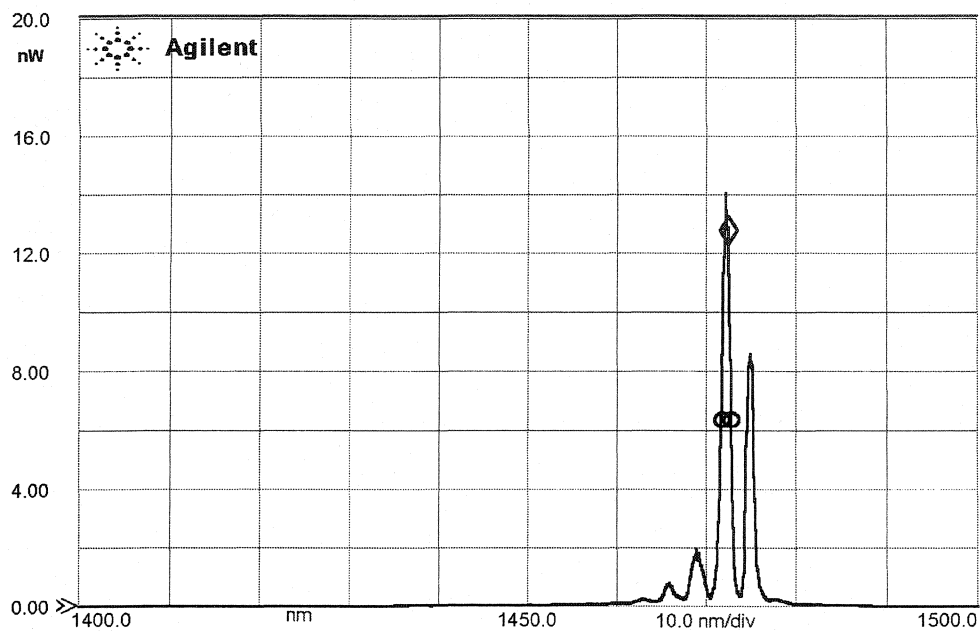


Figure 4-15 : Spectre du laser 003A5, $I_S = 18\text{mA}$, $I_{\text{Injection}} = 25\text{mA}$

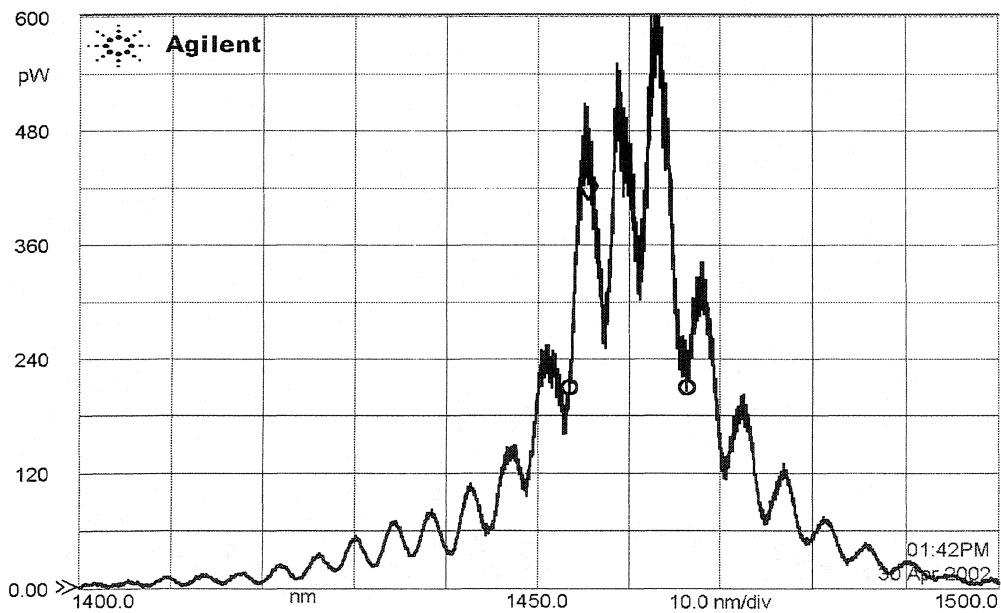


Figure 4-16 : Spectre du laser 003A5 après traitement anti-reflet de la facette avant, $I = 50\text{mA}$, Résolution = 1nm, Largeur spectrale à mi-hauteur = 13nm

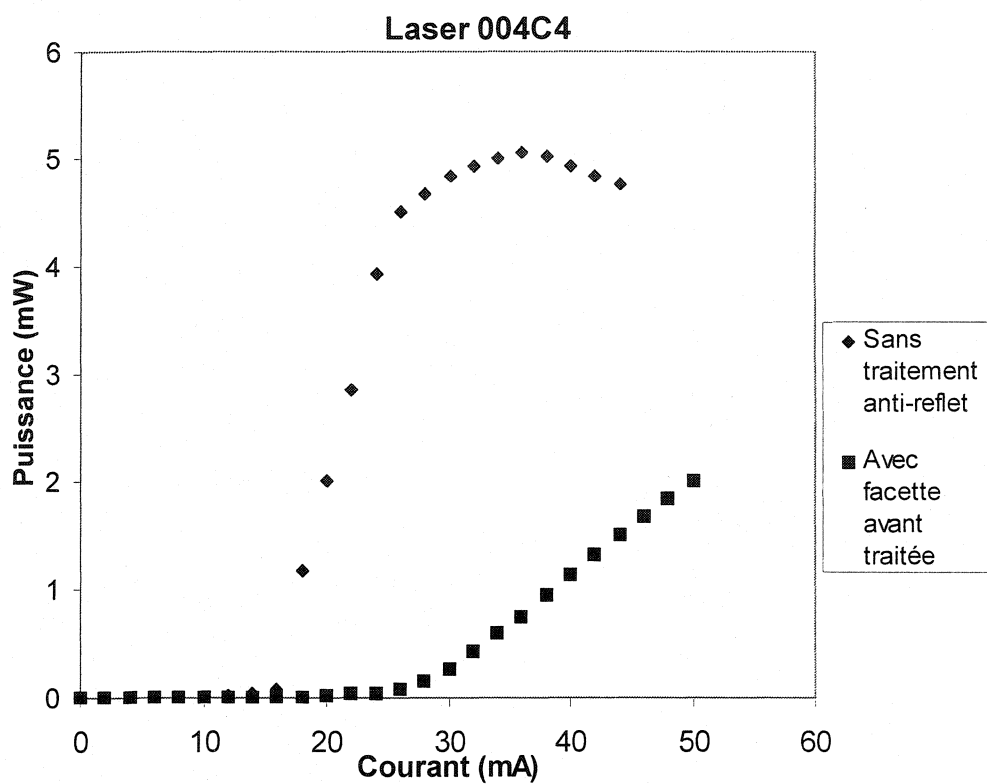


Figure 4-17 : Courbes L-I du laser 004C4 avant et après traitement anti-reflet

Tableau 4-7 : Valeurs des paramètres du dépôt pour le laser 004C4

$I_{\text{Creuset}}(\text{A})$	Taux de dépôt ($\text{\AA}/\text{s}$)	Épaisseur(nm)	Temps(mn)
276	10	216	5

Nous avons reporté sur les figures 4-17, 4-18 et 4-19 les courbes L-I et les spectres du laser 004C4 avant et après traitement anti-reflet de sa facette avant. Le dépôt de couche anti-reflet a permis d'obtenir une réflectivité de l'ordre de $1,19 \cdot 10^{-2}$ pour la facette traitée, sur 6,4 nm de plage de longueurs d'onde.

Finalement, nous n'avons pu obtenir mieux que $9,04 \cdot 10^{-2}$ comme réflectivité de la facette avant du laser 003B6, sur 1,8 nm et dont les courbes L-I et les spectres avant et après traitement anti-reflet sont donnés sur les figures 4-20, 4-21 et 4-22, respectivement.

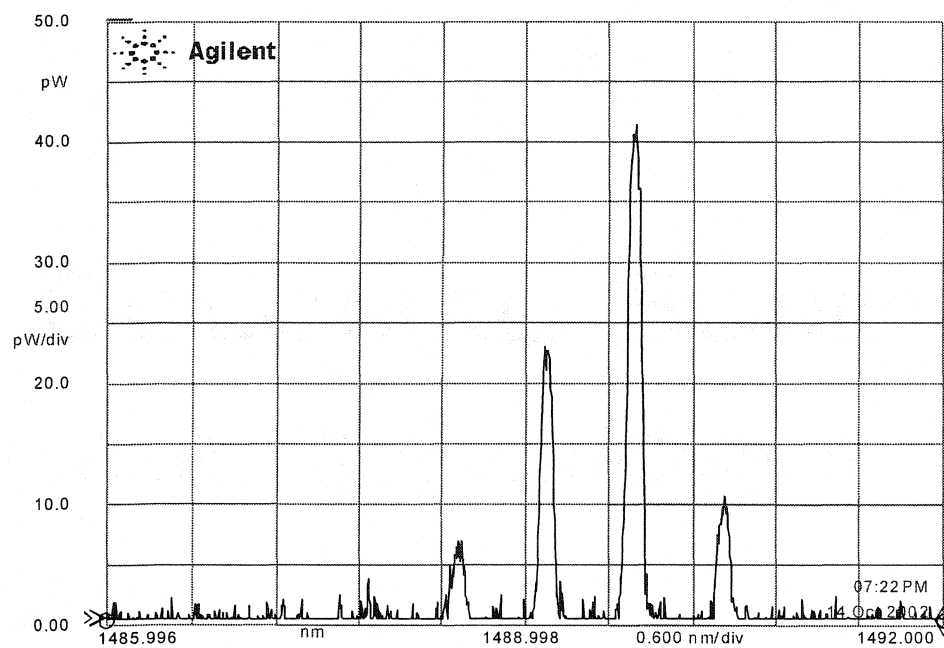


Figure 4-18 : Spectre du laser 004C4, $I_s = 18\text{mA}$, $I_{\text{Injection}} = 25\text{mA}$

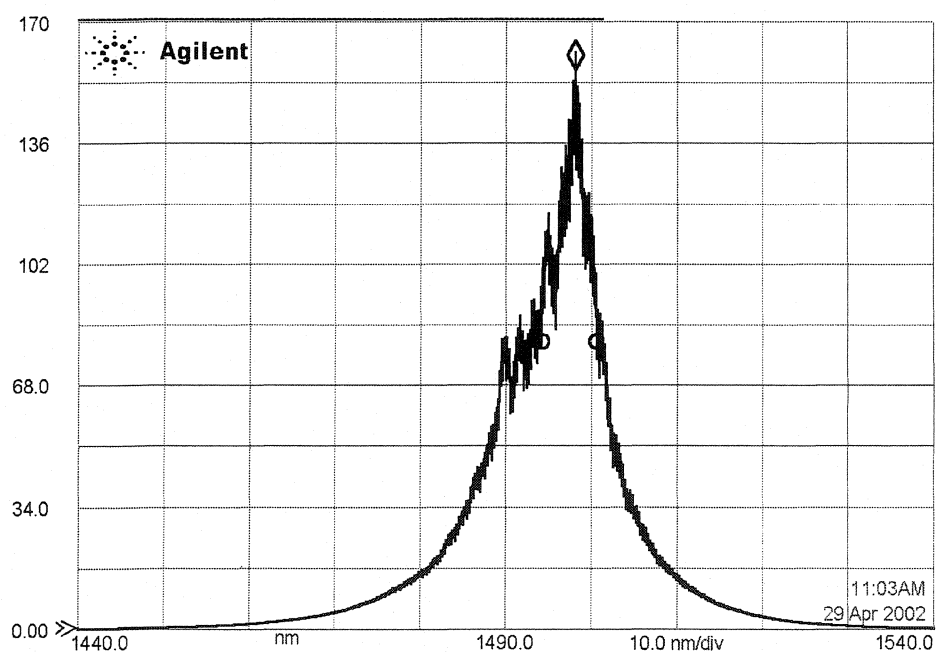


Figure 4-19 : Spectre du laser 004C4 après traitement anti-reflet de

la facette avant, $I = 45\text{mA}$, Résolution = 1nm, Largeur spectrale à mi-hauteur = 6.4 nm

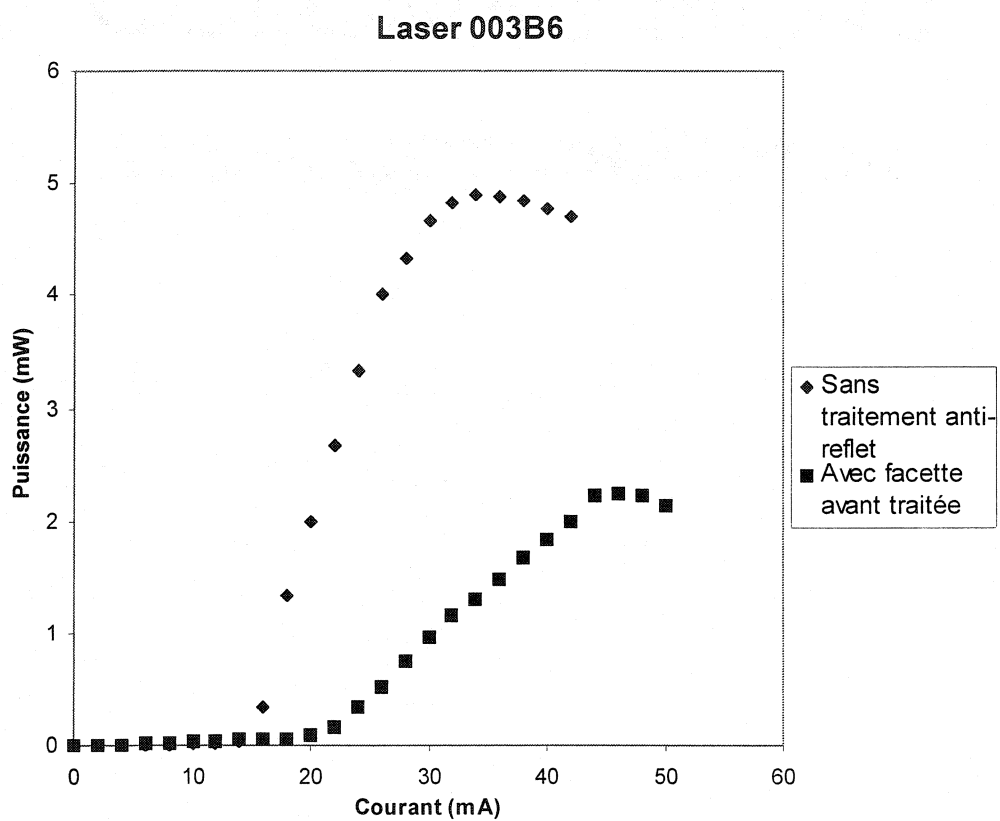


Figure 4-20 : Courbes L-I du laser 003B6 avant et après traitement anti-reflet

Tableau 4-8: Valeurs des paramètres du dépôt pour le laser 003B6

$I_{\text{Creuset}}(\text{A})$	Taux de dépôt ($\text{\AA}/\text{s}$)	Épaisseur(nm)	Temps(mn)
278	9	228	4

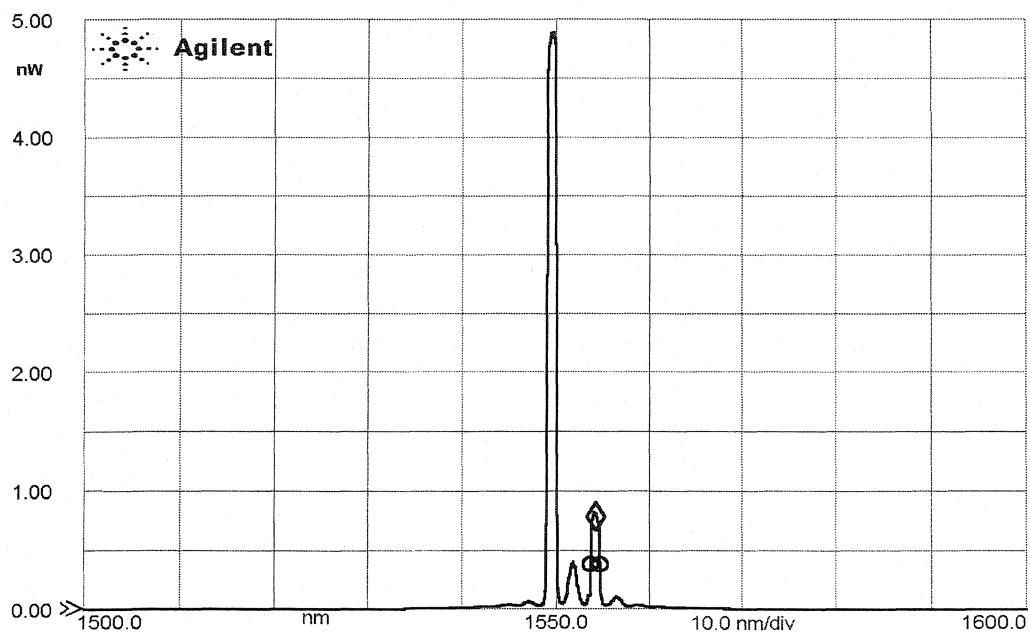


Figure 4-21 : Spectre du laser 003B6, $I_S=16\text{mA}$, $I_{\text{Injection}}=24\text{mA}$

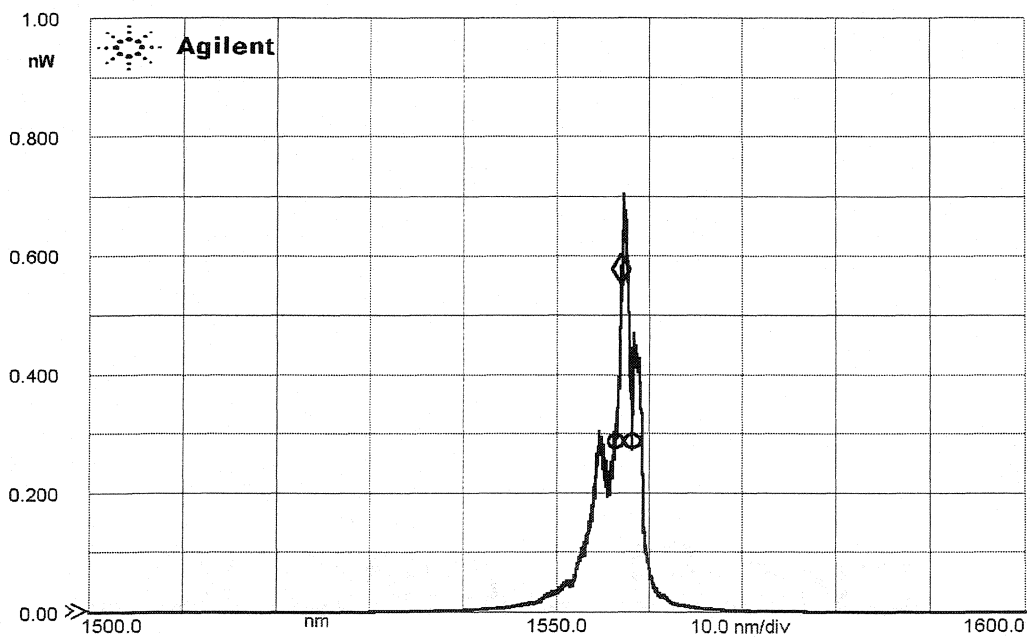


Figure 4-22 : Spectre du laser 003B6 après traitement anti-reflet de la
facette avant, $I=30\text{mA}$, Résolution= 1nm, Largeur spectrale à mi-hauteur
=1.8nm

Le tableau 4-9 résume les valeurs des paramètres servant à calculer la réflectivité des facettes avant des diodes laser.

Tableau 4-9: Valeurs des paramètres du calcul de la réflectivité

Laser	$\lambda_{\text{émission}} \text{ (nm)}$	α	β	Δ	R_{AR}
003A6	1570	116,78	0,14	13637,55	$5,99 \cdot 10^{-4}$
003F5	1480	74,79	0,14	5593,46	$9,36 \cdot 10^{-4}$
001F3	1466	471,60	5,04	222381,20	$5,34 \cdot 10^{-3}$
003F6	1565	170,20	2,24	28963,57	$6,58 \cdot 10^{-3}$
003A5	1472	42,67	0,67	1820,10	$7,94 \cdot 10^{-3}$
004C4	1490	53,10	1,26	2818,02	$1,19 \cdot 10^{-2}$
003B6	1500	76,44	13,72	5655,98	$9,04 \cdot 10^{-2}$

Discussion

Les réflectivités obtenues pour les différentes diodes laser utilisées lors de nos expériences sont comparables à ce que nous trouvons dans la littérature^[1] pour la meilleure valeur que nous avons obtenue, $R = 6 \cdot 10^{-4}$, et relativement acceptables pour le reste des résultats obtenus si nous prenons en considération le fait que les facettes des lasers pouvaient avoir été oxydées ce qui a pour effet d'ajouter une couche intermédiaire entre la couche active de la diode laser et la couche anti-reflet à déposer. Dans ce cas, nous ne pouvons pas nous attendre à de bien meilleures réflectivités que celles qui ont été obtenues.

En ce qui concerne les facettes arrières des lasers, nous n'avons obtenu aucune réduction de la réflectivité. Encore une fois, il se peut bien qu'elles soient dégradées à cause d'une longue exposition à l'air libre ou lors de l'évaporation de la facette avant. Une autre raison aussi probable est la géométrie du montage d'évaporation. En effet, lorsque nous retournons la diode laser, sa facette arrière n'est pas directement exposée à la source d'évaporation et la céramique, supportant le laser, cache partiellement sa facette exposée et disperse les molécules de SiO évaporées par des effets de bords.

Six autres diodes laser ont été utilisées afin de valider la première partie d'expériences, sans obtenir de réduction de réflectivité, ni sur les facettes avant ni les facettes arrières, ce qui pourrait confirmer l'hypothèse de dégradation des facettes par oxydation.

La théorie, comme expliquée en annexe 1, prévoit une épaisseur de couche anti-reflet de l'ordre du quart d'onde. Ceci est vrai lorsque le front d'onde incident à la face de sortie de la couche anti-reflet est une onde plane. Mais dans la réalité, il s'agit d'un mode guidé d'allure presque gaussienne et composé d'une série d'ondes planes. Clarke et Eisenstein^[7], puis, Hellmich^[13] ont démontré que, dans tous les cas, l'indice optimal et l'épaisseur du dépôt sont de 4 à 10% supérieurs aux valeurs obtenues pour une onde plane. Cinq de nos sept lasers traités répondent à cette condition, nous les avons regroupés dans le tableau D-1, ci-dessous. L'épaisseur a été mesurée à partir d'une lame de verre témoin, placée près du laser à l'intérieur de la cloche, à chaque traitement anti-reflet réalisé.

Tableau D-1: Comparaison entre l'épaisseur quart d'onde de couche anti-reflet et l'épaisseur mesurée.

<i>Laser</i>	<i>$\lambda_{\text{émission}} \text{ (nm)}$</i>	<i>Épaisseur 1/4 d'onde (Å)</i>	<i>Épaisseur mesurée (Å)</i>	<i>% d'écart de l'épaisseur 1/4 d'onde</i>
<i>003A6</i>	1570	2094	2200	5
<i>003A5</i>	1472	1964	2140	8,9
<i>003F5</i>	1480	1974	2090	5,9
<i>003F6</i>	1565	2088	2190	4,9
<i>004C4</i>	1490	1988	2160	8,6
<i>001F3</i>	1466	1956	2210	13
<i>003B6</i>	1500	2001	2282	14

Nous avons également traité d'autres diodes laser de Nortel Networks. Ces lasers sont très puissants, une puissance qui peut atteindre 500mW. Nous en avons caractérisé et traité deux : A69 et A81 .

La courbe L-I du laser A69 est reportée sur la figure D-1. Les spectres du laser avant et après traitement anti-reflet sont reportés sur les figures D-2 et D-3 respectivement.

Le spectre de ce laser ne présente pas de modes secondaires visibles, ceci est causé par le fait que le spectre a été relevé avec une résolution de 1nm de l'analyseur optique de spectres, alors que l'espacement des modes pour un tel laser est plus faible. En effet ces lasers ont une cavité longue d'environ 2,4 mm et les modes sont très rapprochés.

La condition de phase pour qu'il y ait interférence constructive ou onde stationnaire est^[16] :

$$4\pi n \frac{L}{\lambda} = 2m\pi \quad (D-1)$$

Soit:

$$m \frac{\lambda}{2} = nL \quad (D-2)$$

Où n est l'indice de réfraction du milieu actif, L la longueur de la cavité et $m = 1, 2, 3, \dots$

Cette relation permet de déduire la séparation entre les modes permis:

$$\lambda dm + m d\lambda = 2Ldn \quad (D-3)$$

$$-\lambda + \frac{2nL}{\lambda} d\lambda = 2Ldn \quad (D-4)$$

Avec $dm = -1$ pour les modes adjacents, nous éliminons m par $m(\lambda/n) = 2L$ et nous obtenons:

$$\frac{-\lambda}{d\lambda} + \frac{2nL}{\lambda} = 2L \frac{dn}{d\lambda} \quad (D-5)$$

Soit :

$$d\lambda = \frac{\lambda^2}{2L} \left[n - \lambda \frac{dn}{d\lambda} \right] \quad (D-6)$$

Soit, dans l'approximation de dispersion négligeable $dn/d\lambda \sim 0$, la séparation inter-mode est:

$$\Delta\lambda \cong \frac{\lambda^2}{2nL} \quad (D-7)$$

Le laser A69 émet à $\lambda = 1473$ nm, la longueur de la cavité étant 2,4 mm et $n = 3,6$ nous obtenons une séparation inter-mode de l'ordre de 0,125 nm. Le spectre est enregistré avec une résolution de 1 nm, ce qui explique le pic unique que nous voyons sur la figure D-2. Il a, toutefois, été difficile de garder une température constante durant le traitement anti-reflet, les courants d'injection utilisés étant élevés. La figure D-5 montre le spectre du laser A81, la séparation inter-mode dans ce cas est aussi de 0,125 nm, tandis que le spectre du laser est relevé avec une résolution de 1 nm. Le courant de seuil du A81 est de 110mA et le spectre est mesuré à un courant d'injection de 145 mA. Les courbes L-I de ce laser sont reportées sur la figure D-4.

Le spectre de ce laser après traitement anti-reflet est reporté sur la figure D-6. Un décalage vers une longueur d'onde plus grande dû à un courant d'injection plus grand est observé. La réflectivité calculée est de 15%. Nous avons une épaisseur de 2180 Å pour la couche déposée, en 4 minutes, soit 10% supérieure à l'épaisseur quart d'onde.

Les lasers étaient, fort probablement, munis de facettes pré-traitées et le but était de voir l'effet de notre technique d'évaporation. Une facette était hautement réfléchissante et l'autre à faible réflectivité.

Pour ces deux derniers lasers, A69 et A81, nous avons rencontré des problèmes d'asservissement en température. En effet, ces lasers possèdent des courants de seuil très élevés, et les courants d'injection sont naturellement encore plus élevés. Malgré l'utilisation d'un bain thermostaté que nous pouvions opérer à 5 °C, nous pensons que la surface refroidie par cette eau et qui est en contact avec le support de cuivre du laser, devrait être augmentée. Ce qui veut dire refaire entièrement le circuit du refroidissement et agrandir la surface du support laser pour permettre un refroidissement efficace du laser et de son environnement. Une autre modification serait d'élever encore plus le système (laser + Peltier + Thermistance) pour l'éloigner le plus possible de la source d'évaporation, dans la cloche. Cette étape devrait être effectuée, conjointement, avec celle d'avant, à savoir, la modification des surfaces refroidies qui sont en contact avec le laser, puisque les conduits d'eau font partie du système du laser. Ces modifications n'ont pas été jugées nécessaires pour le moment parce que nous travaillons avec des puissances modérées.

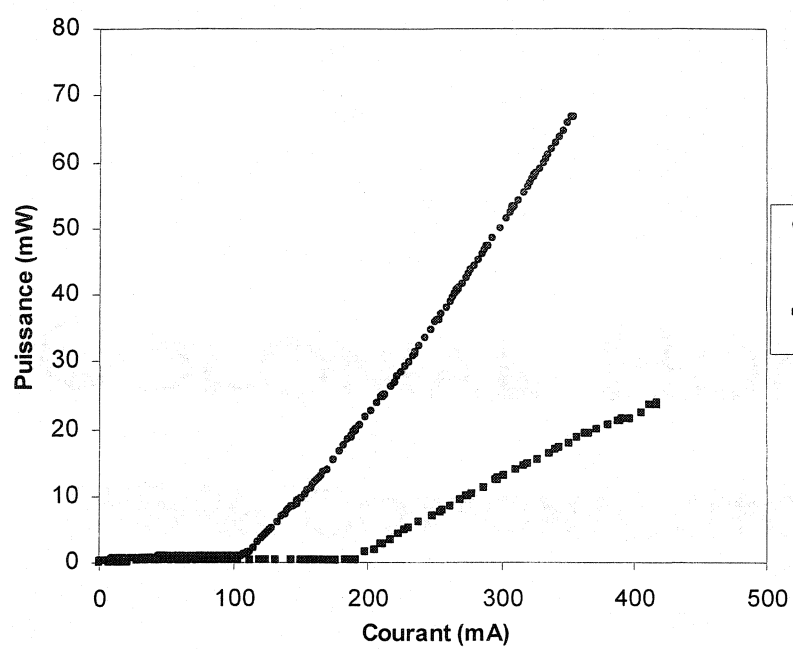


Figure D-1 : Courbes L-I du laser A69

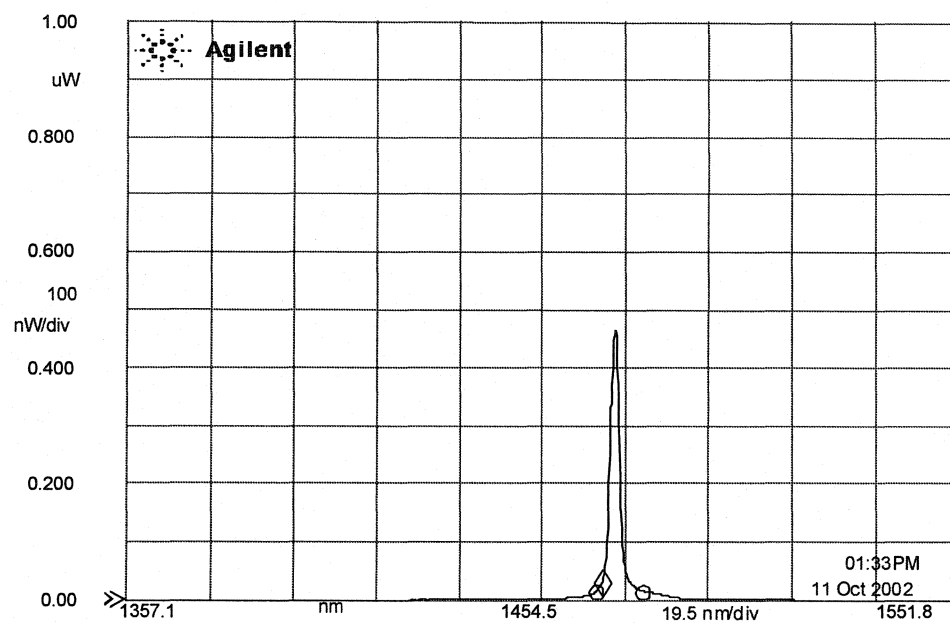


Figure D-2 : Spectre du laser A69, $I_s = 110\text{mA}$, $I_{\text{Injection}} = 115\text{mA}$

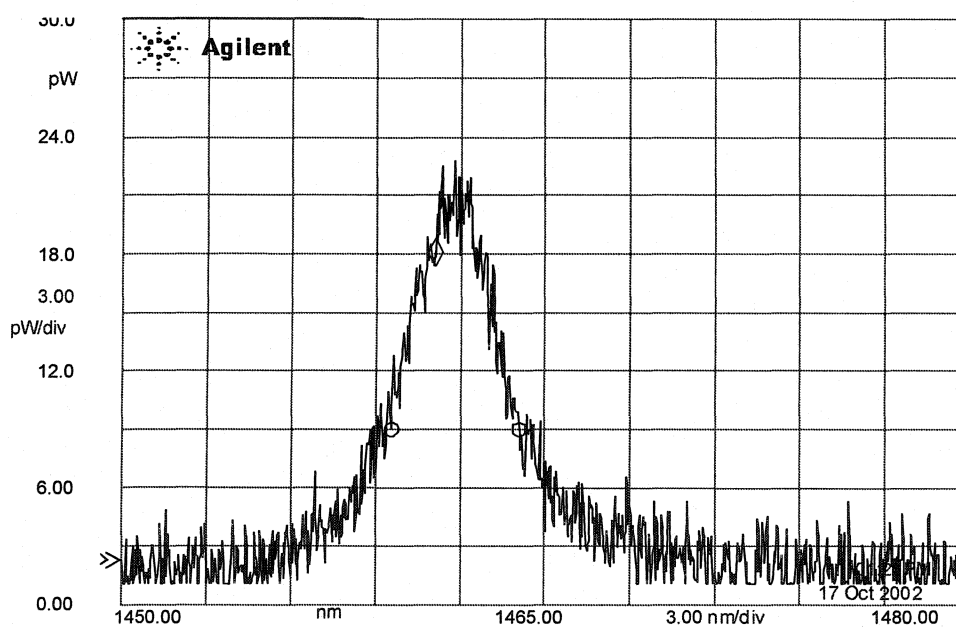


Figure D-3 : Spectre du laser A69 après traitement anti-reflet, $I=205\text{mA}$,
Résolution=1 nm, Largeur spectrale à mi-hauteur = 4,55 nm

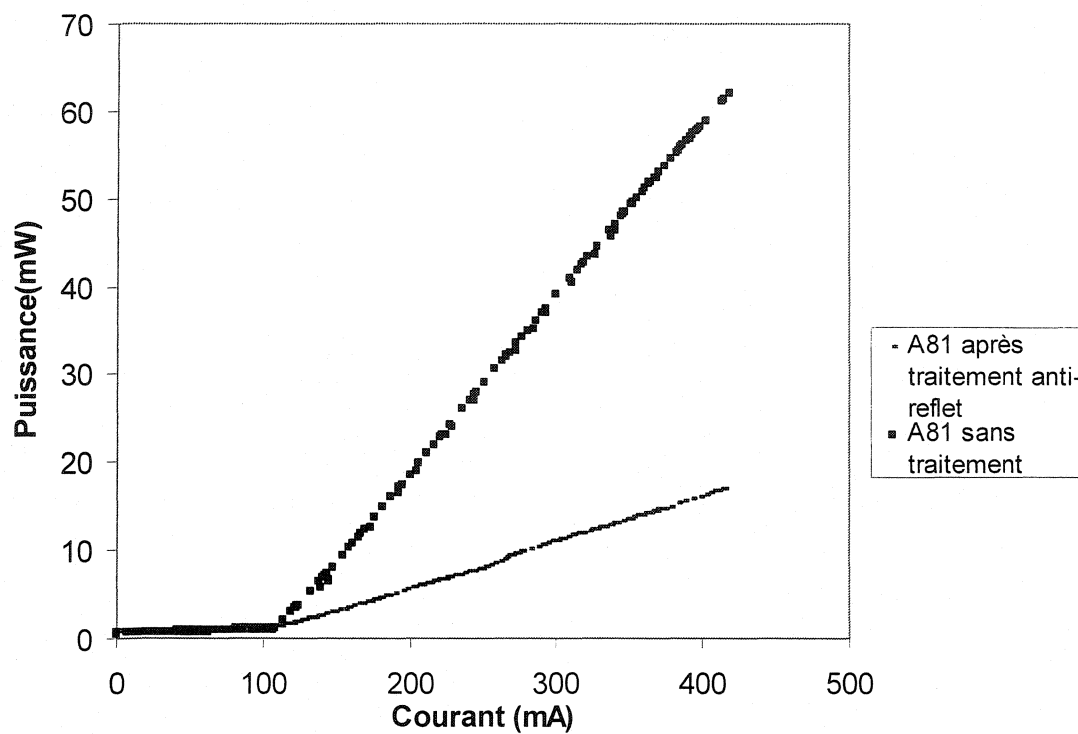


Figure D-4 : Courbes L-I du laser A81 sans et après traitement anti-reflet

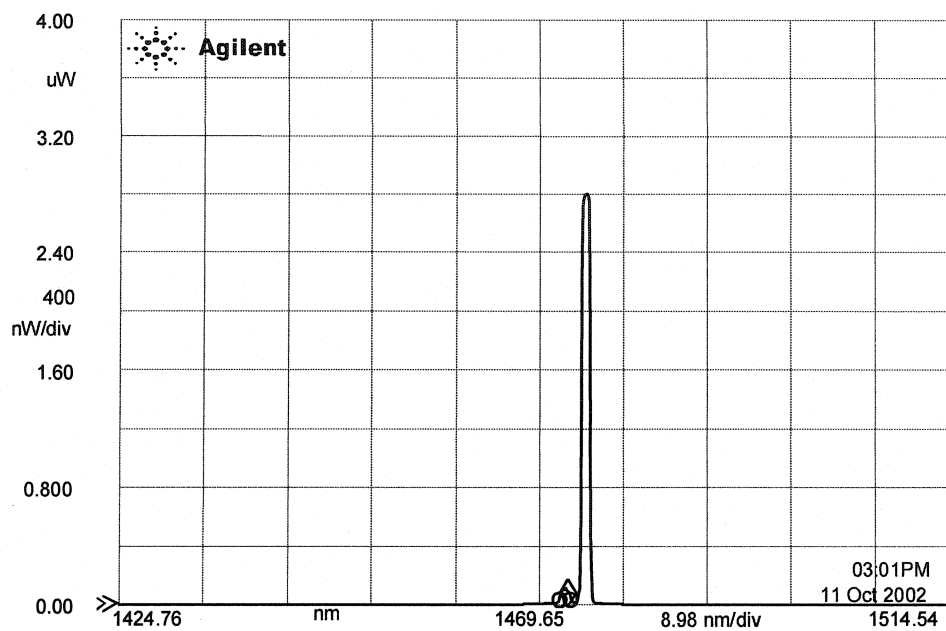


Figure D-5 : Spectre du laser A81, $I_S = 110\text{mA}$, $I_{\text{Injection}} = 145\text{mA}$

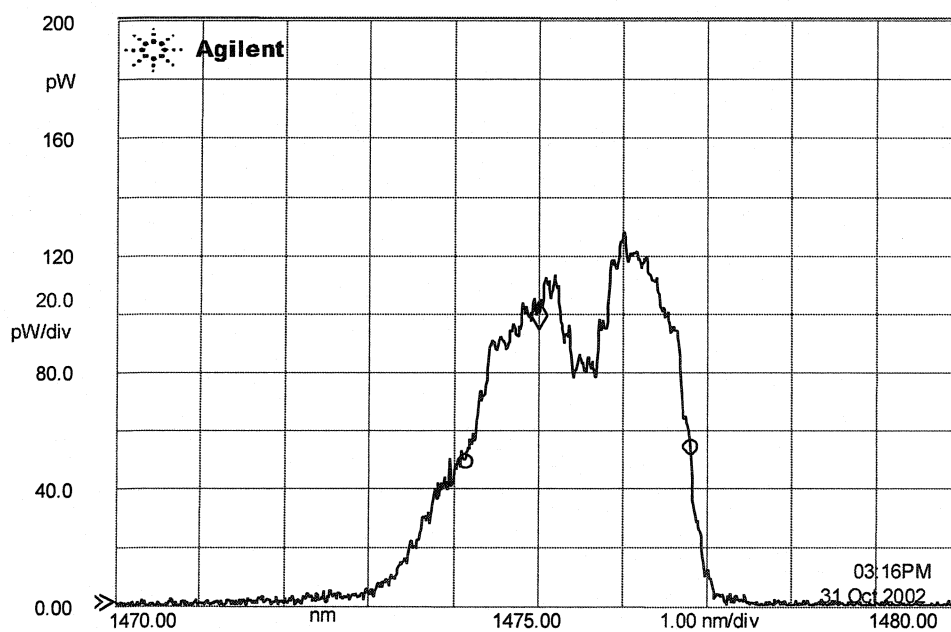


Figure D-6 : Spectre du laser A81 après traitement anti-reflet,
 $I_{\text{Injection}} = 200\text{mA}$, Résolution = 1nm, Largeur spectrale à mi-hauteur = 2,67nm

Conclusion et perspectives

Le travail que nous devions réaliser au départ consistait en deux parties, la première étant l'adaptation, la calibration et la mise en marche de l'évaporateur thermique en vue d'obtenir une méthode simple pour le dépôt de couches anti-reflet, la seconde est de transformer des diodes laser en amplificateurs optiques en déposant à leurs facettes des couches anti-reflets de SiO. Quant à la première partie, l'évaporateur est parfaitement fonctionnel. En ce qui concerne la seconde partie, tout l'appareillage et l'instrumentation d'asservissement permettant le dépôt de couches anti-reflet sont en place, calibrés et opérationnels. Nous pensons que l'ensemble de notre système d'évaporation est bien contrôlé et que tous les paramètres de dépôt de couches anti-reflets (courant d'injection, température,...), sont maîtrisés sauf pour les lasers que nous avons reçus dernièrement et qui demandent des courants d'injection élevés. Pour raffiner la procédure, il faudrait avoir des diodes laser Fabry-Perot, dont nous serions capables de cliver les facettes, évitant ainsi un contact trop prolongé de leurs facettes avec l'air.

Malgré tout, l'obtention de réflectivités de l'ordre de $6 \cdot 10^{-4}$ dans les conditions utilisées, est assez acceptable, sans oublier que l'essentiel du travail est réalisé, à savoir, la mise en marche et le contrôle du système du dépôt de couches anti-reflets.

D'autres techniques de dépôt de couches anti-reflet pourraient être étudiées, en particulier la pulvérisation cathodique et par faisceau d'électrons. Nous avons tenté d'explorer

l'utilisation de la technique PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) en collaboration avec le professeur Martinu et un de ses étudiants, Stéphane Larouche. Les simulations faites sur TFCalc (logiciel de simulation) montraient qu'il était très difficile d'obtenir une réflectivité inférieure à 10^{-4} avec une seule couche anti-reflet. La figure P-1 montre les contours d'isoréflectivité pour une couche simple de (SiO_2 , TiO_2). Un contour d'isoréflectivité délimite, par projection sur l'axe des abscisses, la tolérance sur l'indice de réfraction, et par projection sur l'axe des ordonnées, la tolérance sur l'épaisseur de la couche. Le contrôle de l'épaisseur par la technique PECVD se limite, au mieux, à 2 nm, ce qui correspondrait dans les meilleurs cas, à une réflectivité de 10^{-4} d'après la figure P-1.

De plus, cette technique présente des difficultés expérimentales majeures, surtout le contrôle *in situ* de la puissance du laser détectée et le fait que nos laser sont de très petite dimensions, ce qui rend difficile le contrôle de l'épaisseur de la couche déposée.

Une autre technique pour réduire les réflectivités des facettes d'une diode laser, pour réaliser des amplificateurs optiques, est d'incliner, lors des étapes de microfabrication des diodes, la couche active de 7 à 10° par rapport à la facette émettrice de la diode laser. Des réflectivités de 10^{-4} sont obtenues en utilisant cette technique^[14]. Le problème posé par cette technique est qu'elle exige des procédés de fabrication assez complexes et coûteux*. Toutefois, elle peut être combinée au traitement anti-reflet pour donner de meilleurs résultats^[7].

* De tels amplificateurs ont été réalisés au Laboratoire d'Optoélectronique depuis

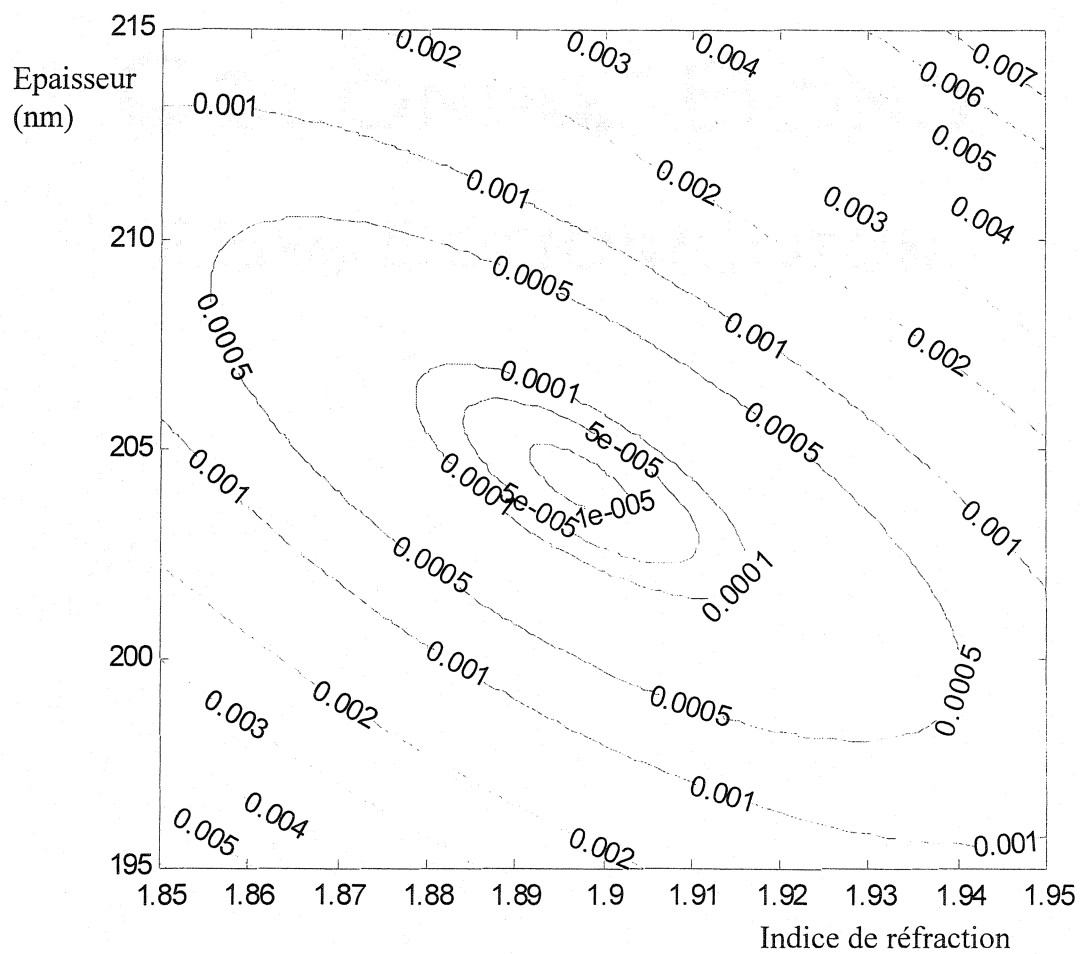


Figure P-1 : Contours d'isoreflexivité pour une couche simple de (SiO_2 , TiO_2)

Annexe 1 : Interférence destructive

Lorsqu'une onde lumineuse passe d'un milieu d'indice de réfraction n_1 à un milieu d'indice n_2 , sous incidence normale, alors les coefficients de réflexion et de transmission de Fresnel sont donnés par :

$$r = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}, \quad (A1 - a)$$

$$t = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} \quad (A1 - b)$$

$$R = |r|^2 \quad (A1 - c)$$

L'intensité de l'onde réfléchie est :

Si l'on ajoute une troisième couche à l'interface, des réflexions multiples se produisent, les réflexions en amplitude, sont données alors par :

$$r_{1 \rightarrow 2} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} = -r_{2 \rightarrow 1} \quad (A1 - d)$$

$$r_{2 \rightarrow 3} = \frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3} \quad (A1 - e)$$

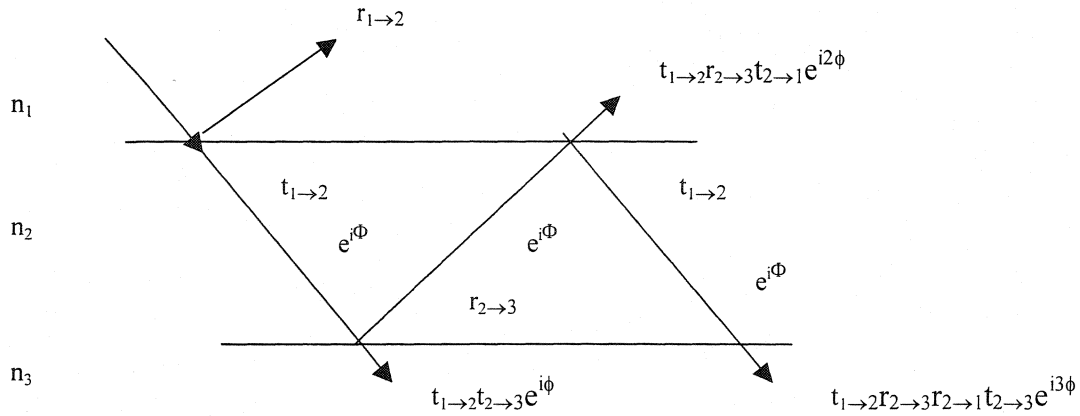


Figure A1-1 : Réflexions multiples aux interfaces d'une couche mince

Il y a un déphasage Φ à chaque fois que l'onde traverse la couche d'épaisseur physique d . L'épaisseur optique, $n_2 d$, est l'épaisseur que parcourrait la lumière dans le vide, en mettant le même temps pour traverser la couche. Lorsque la lumière retrouve son état initial de phase, à une certaine distance dans la couche, on dit qu'elle a subi un déphasage de 2π . Donc:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} n_2 d \quad (A1 - f)$$

λ étant la longueur d'onde dans le vide.

La réflexion totale, en amplitude, est donnée par :

$$r = r_{1 \rightarrow 2} + t_{1 \rightarrow 2} r_{2 \rightarrow 3} t_{2 \rightarrow 1} e^{i2\Phi} + t_{1 \rightarrow 2} r_{2 \rightarrow 3}^2 r_{2 \rightarrow 1} t_{2 \rightarrow 1} e^{i4\Phi} + \dots \quad (A1 - g)$$

Mis à part le premier terme, la somme restante est une série géométrique, ce qui permet d'écrire :

$$r = \frac{r_{1 \rightarrow 2} + r_{2 \rightarrow 3} e^{i2\Phi}}{1 + r_{1 \rightarrow 2} r_{2 \rightarrow 3} e^{i2\Phi}} \quad (A1 - h)$$

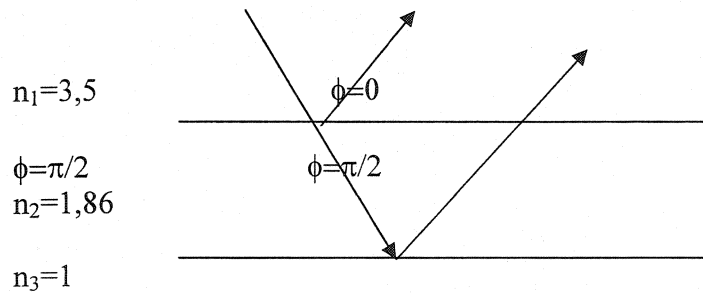
Lorsque l'épaisseur optique de la couche, $n_2 d$, est un quart d'onde ($\lambda/4$), le déphasage est de $\pi/2$ et le terme $e^{i2\Phi}$ dans l'expression de r , devient égal à -1 . En portant les expressions de $r_{1 \rightarrow 2}$ et $r_{2 \rightarrow 3}$ dans l'expression de r et avec un peu d'algèbre, on constate que r s'annule lorsque

$$n_2 = \sqrt{n_1 n_3} \quad (A1 - i)$$

Comme $n_3 = 1$, nous obtenons un minimum de réflectivité lorsque l'indice de la couche à déposer est égal à la racine carrée de l'indice du substrat .

Dans notre cas, l'indice du substrat est d'environ 3,5 et l'indice du SiO (couche à déposer) est de 1,86, en élevant cette valeur au carré, on obtient 3,46.

Exemple: L'indice d'une couche est de 1,86 déposée sur un substrat d'indice 3,5. La longueur d'onde de la lumière incidente est de 1550nm et l'épaisseur de la couche déposée est de 208,3nm. Les ondes réfléchies vont elles interférer de façon constructive ou destructive?



L'épaisseur optique $n_2d = 1,86 \cdot 208,3 = 387,4\text{nm}$, et $(nd/\lambda) = 1/4$ d'onde. Donc nous avons un déphasage de $\pi/2$ à chaque fois que l'onde traverse l'épaisseur d . Le déphasage total est donc de π par rapport à la première onde réfléchie et l'interférence est destructive.

Annexe 2 : Algorithme d'asservissement par Labview en courant d'injection et en température de la diode laser

Le programme LabView servant à contrôler le courant d'injection et la température du laser est présenté dans cette annexe.

L'algorithme, codé en LabView, est présenté sur la figure A2-1. Dans la partie haute du programme, nous avons la boucle de stabilisation du courant d'injection, alors que dans le milieu, la puissance de la diode laser est enregistrée et en fin, dans la partie du bas, nous avons l'asservissement en température de la diode laser.

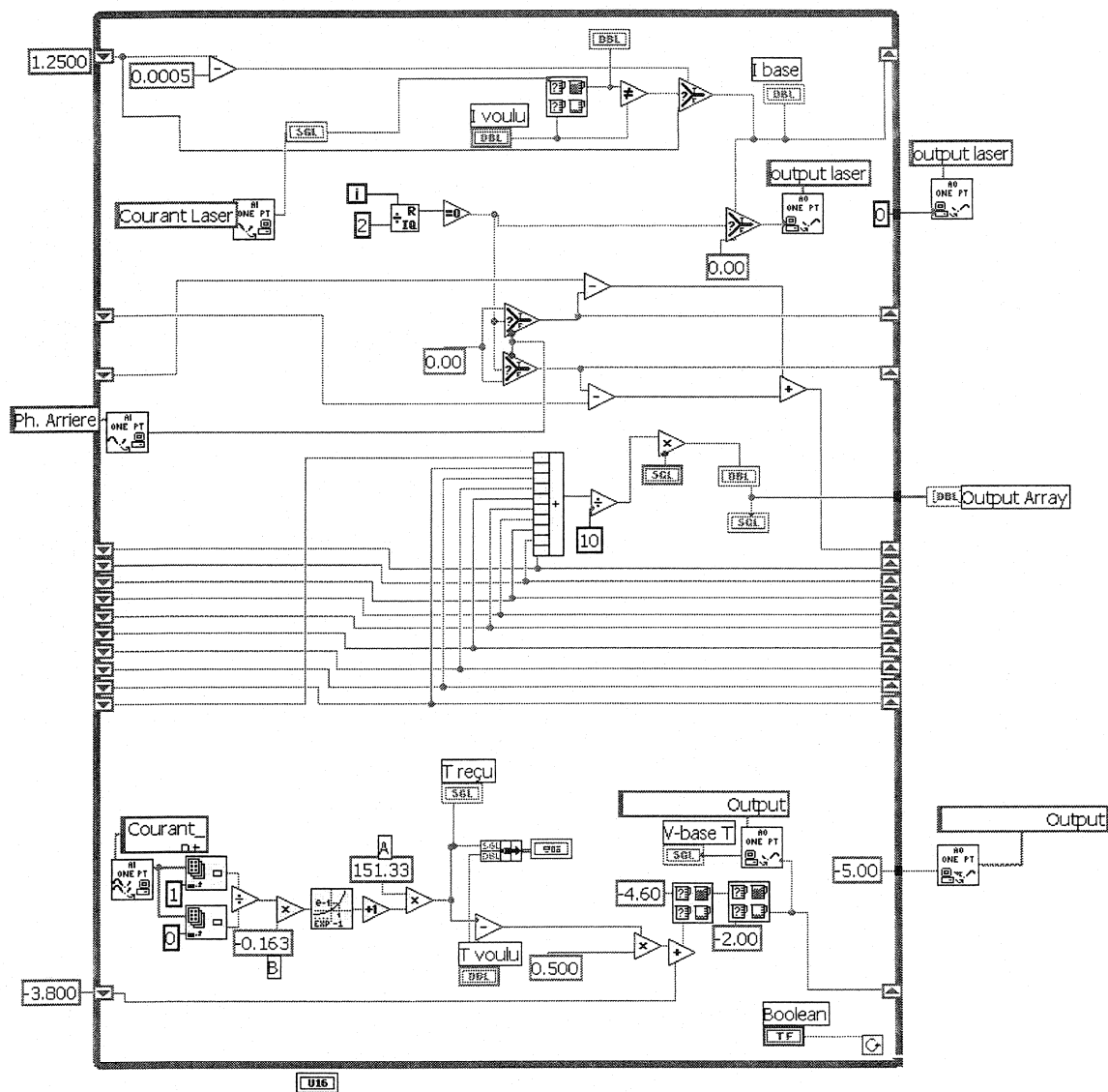


Figure A2-1 : Algorithme LabView de l'asservissement du courant d'injection et de la température de la diode laser

Annexe 3 : Algorithme LabView de caractérisation de la diode laser- Courbe L-I

Cette annexe concerne la façon dont LabView a servi pour tracer les courbes L-I de nos diodes laser. L'algorithme de ce programme est composé de trois parties présentées sur les figures A3-1-a, A3-1-b et A3-1-1c.

Figure A3-1-a : Algorithme LabView pour tracer les courbes L-I des diodes lasers

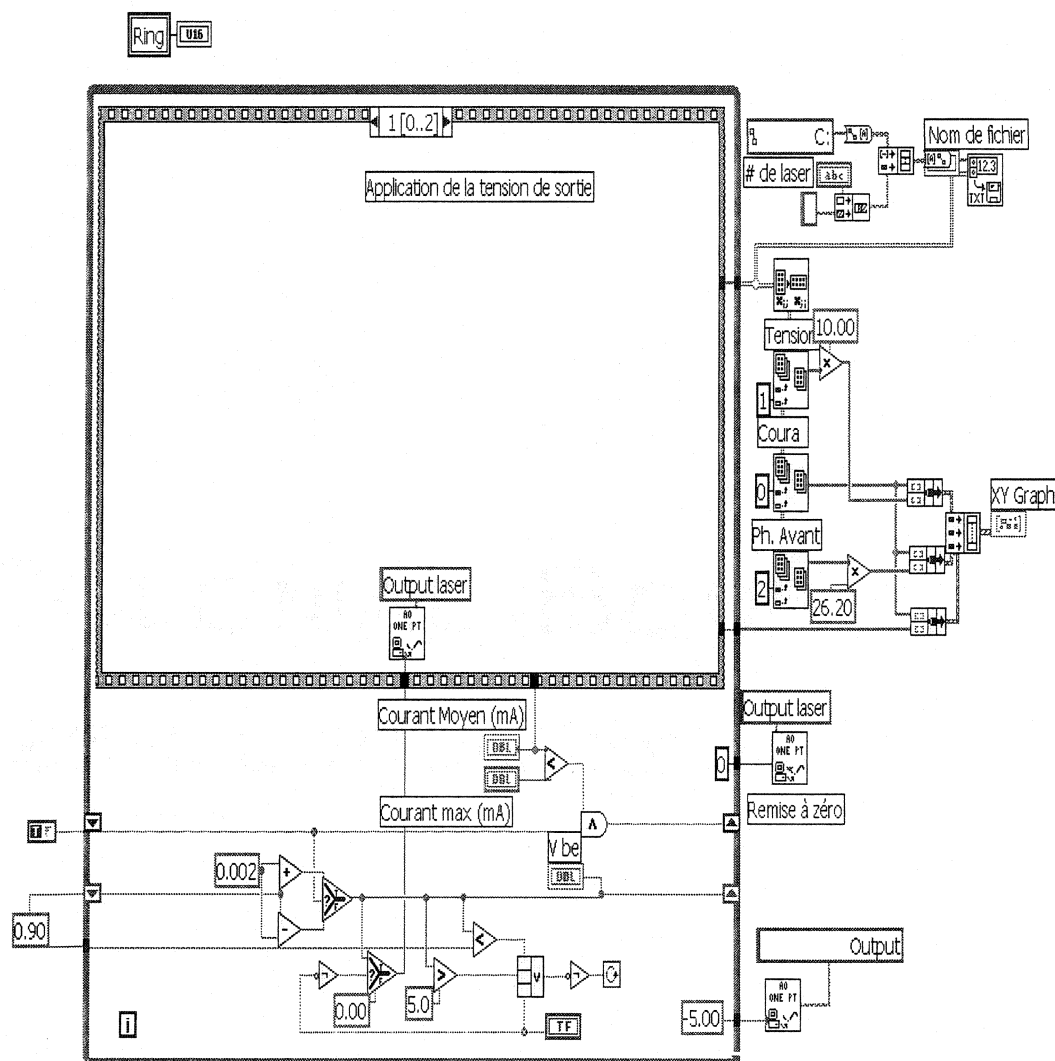


Figure A3-1-b : Suite de l'algorithme LabView pour tracer les courbes L-I des diodes lasers

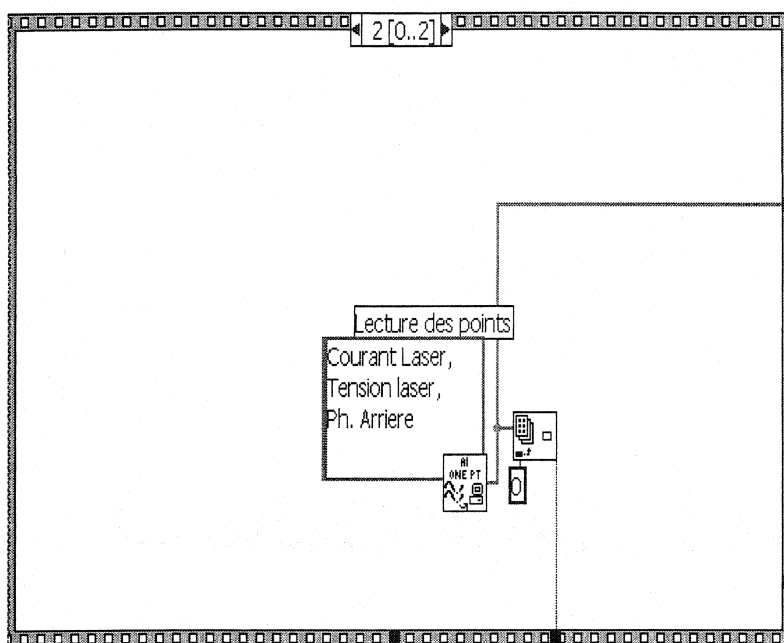


Figure A3-1-c : Suite de l'algorithme LabView pour tracer les courbes L-I des diodes laser

Annexe 4 : Procédure du vide pour l'évaporateur thermique

Avant de procéder à une évaporation thermique, il faut s'assurer du niveau de pression voulu dans la cloche.

L'évaporation du monoxyde de silicium (SiO) exige une pression résiduelle très basse, de l'ordre de 10^{-6} mbar, les étapes pour réaliser un tel vide ainsi que le schéma du système à vide sont présentés dans cette annexe.

1- Le système à vide

Le système comporte une pompe mécanique servant à atteindre un vide primaire "rough" dans la cloche avant de mettre en marche la pompe à diffusion, qui elle, permet de réaliser le vide secondaire ou (high vacuum). L'action de ces pompes est régulée par un système de valves.

Figure A4-1 représente le schéma du système du vide, alors que figure A4-2 représente le panneau de contrôle : valves, commutateurs, jauges de pression....

Figure A4-3 montre la valve d'admission d'air (A) de la pompe mécanique.

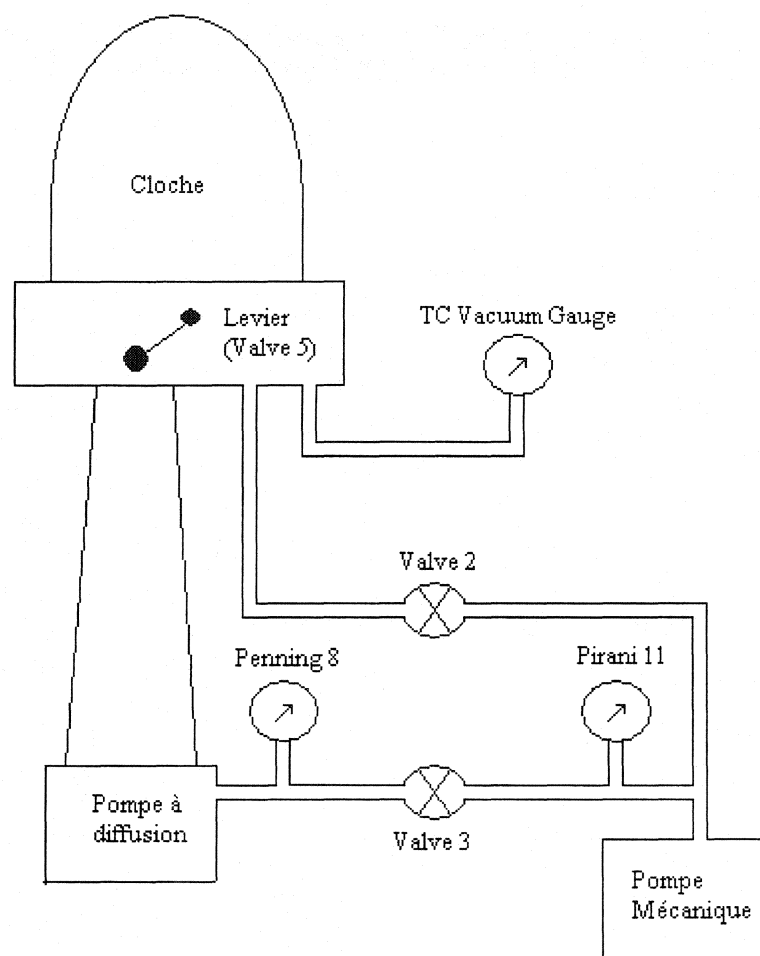


Figure 1 (Schéma du Système du vide)

Figure A4-1 : Schéma du système du vide

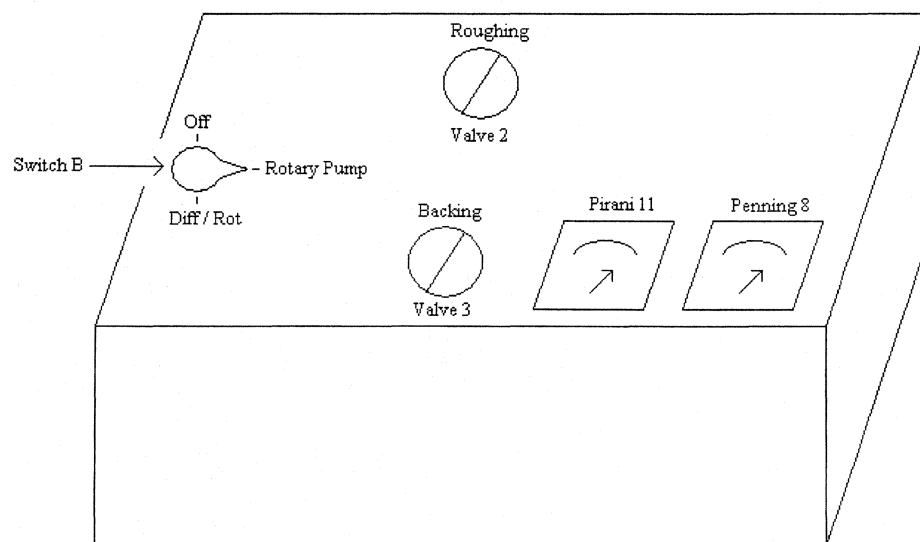


Figure A4-2 : Panneau de contrôle

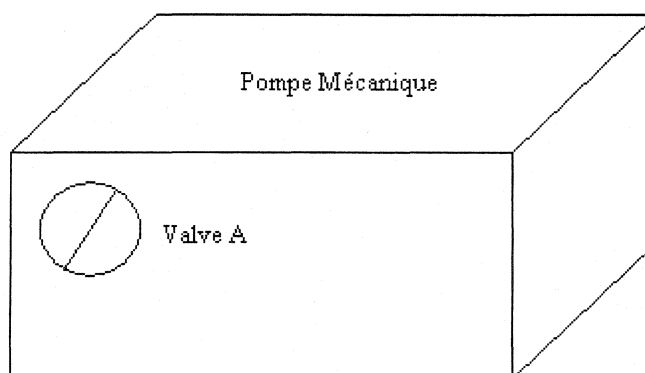


Figure A4-3 : Valve d'admission d'air de la pompe mécanique

2- Procédure

A. Mise en marche :

- 1- Ouvrir les robinets d'eau servant à refroidir la pompe à diffusion et le porte-échantillon. (Robinetts étiquetés derrière et à droite de l'évaporateur).
- 2- Vérifier l'état du cristal (servant à mesurer le taux de dépôt), le creuset et le produit à évaporer.
- 3- Appliquer de la graisse à Haut Vide (High Vacuum grease) sur les joints supérieur et inférieur de la cloche à fin d'éviter les fuites. Placer la cloche et la garde de sécurité.

VIDE PRIMAIRE :

- 4- S'assurer que la valve (A) de la pompe mécanique est fermée. (Voir fig.A4-3).
- 5- Tourner le commutateur (B) à la position « rotary pump » pour mettre en marche la pompe mécanique. S'assurer que toutes les valves sont fermées sauf la valve 2 de la pompe mécanique. Sur la jauge (tc Vacuum Gauge), attendre que l'aiguille indique 100 ou moins (mTorr) ou attendre environ 15 minutes.

HAUT VIDE :

- 6- Fermer la valve 2 et ouvrir la valve 3 (Backing) pour faire le vide dans la pompe à diffusion. Mettre sur la position ON la jauge PIRANI 11 (Head 2), l'aiguille devrait indiquer une pression entre $6 \text{ et } 8 \times 10^{-2}$ mbar. Mettre le switch (B) à la position diff/rot pump pour chauffer l'huile de la pompe à diffusion.
 - 7- Attendre environ 30 - 40 minutes.
 - 8- Commencer à basculer lentement le levier de la valve 5, qui doit être au départ à la position CLOSED, vers la position OPEN. L'aiguille de la jauge PIRANI 11 tombe pour indiquer une pression supérieure, à ce moment là, arrêter d'ouvrir la valve 5 et attendre que la pression retrouve sa valeur initiale, ensuite continuer d'ouvrir (valve 5). La pompe à diffusion pompe maintenant dans la chambre (la cloche).
 - 9- Mettre le PIRANI 11 à la position OFF et la jauge PENNING 8 à la position ON (Head 2).
 - 10- Cette jauge comporte 3 échelles de pression. Selon le vide voulu, il faut changer d'échelle, le minimum étant de 10^{-7} mbar.
- Cette dernière opération est très lente, vu le niveau très haut de vide à obtenir, elle pourrait durer 6-8 heures, il est donc recommandé de faire le vide en fin de journée, pour qu'il se fasse durant la nuit.

B. OUVERTURE DE LA CLOCHE :

- 1- Fermer la valve 5 (Basculer vers position CLOSED)
- 2- Ouvrir la bouteille d'azote, envoyer l'azote dans la cloche jusqu'à ce que celle-ci s'ouvre.
- 3- Arrêter l'azote et enlever la garde de sécurité et la cloche.

C. ARRÊT COMPLET DU SYSTÈME :

- 1- S'assurer que : les valves 5 (du haut vide) et 2 (roughing) sont fermées et que la valve 3 (backing) est ouverte.
- 2- Mettre le commutateur B à la position « rotary pump ».
- 3- Attendre environ 30 mn puis fermer la valve 3 (backing).
- 4- Mettre le commutateur B sur la position OFF (éteindre la pompe mécanique) et presque simultanément, ouvrir la valve d'admission d'air A de la pompe mécanique.
- 5- Fermer l'arrivée d'eau.

Annexe 5 : Simulation par le logiciel de simulation 'Simulation Cavity'

Un programme de simulation (Simulation Cavity) a été développé au Laboratoire d'Optoélectronique par Philippe Mercure. Ce programme modélise une cavité optique constituée d'un nombre de segments ou de tranches possédant chacune une épaisseur, un indice de réfraction et un gain. En paramètres d'entrée, le programme prend la longueur d'onde d'émission et la puissance du signal optique ainsi que les réflectivités des deux milieux extérieurs de chaque côté de la cavité ou leurs indices de réfraction. Ensuite, il est possible d'entrer les épaisseurs et indices de réfraction des couches voulues. Le programme offre en sortie, l'évolution des puissances réfléchie et transmise en fonction de l'épaisseur. Un aperçu du programme compilé est donné sur la figure A5-1. Il serait intéressant, à l'avenir, d'utiliser les prédictions de Simulation Cavity dans le cadre du travail sur le traitement anti-reflet.

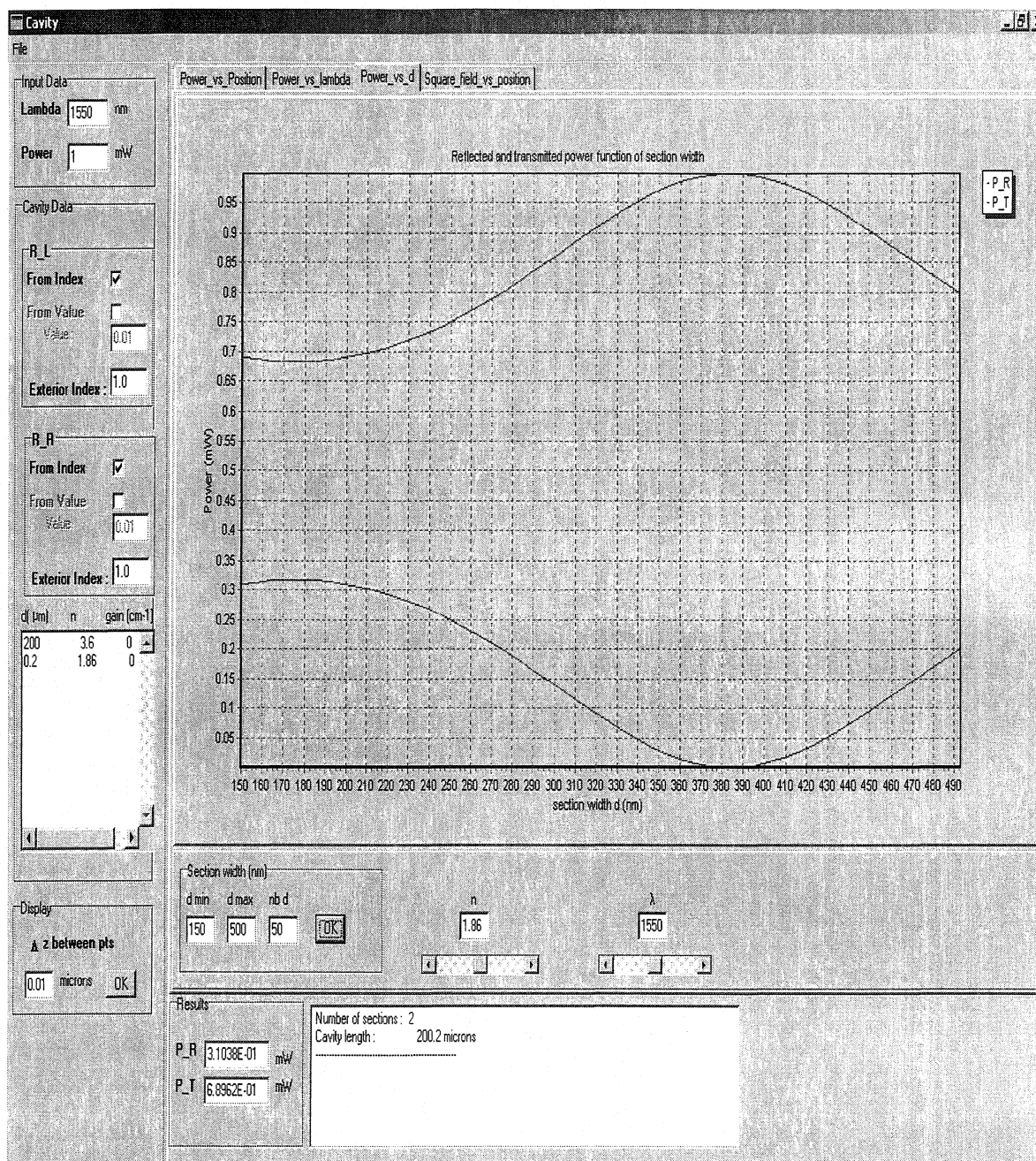


Figure A5-1 : Aperçu d'une simulation par 'Simulation Cavity'

Bibliographie

- [1] G. Eisenstein, G. Raybon, and L. W. Stulz, '*Deposition and Measurements of Electro-Beam-Evaporated SiO_x Antireflection Coatings on InGaAsP Injection Laser Facets*', *J. Lightwave Tech.*, vol. 6, NO. 1, p.12, (1988).
- [2] G. Eisenstein, '*Semiconductor Optical Amplifiers*', *IEEE Circuits and Devices magazine*, July (1989).
- [3] J. Lee, T. Tanaka, S. Sasaki, S. Uchiyama, M. Tsuchiya, and T. Kamiya, '*Novel Design Procedure of Broad-Band Multilayer Antireflection Coatings for Optical and Optoelectronic Devices*', *J. Lightwave Tech.*, vol. 16, NO. 5, p.884, (1998).
- [4] M. J. O'Mahony, '*Semiconductor Laser Optical Amplifiers for Use in Future Fiber Systems*', *J. Lightwave Tech.*, vol. 6, NO. 4, p.531, (1988).
- [5] Earl H. Blevis and R. D. Mathis, '*Silicon Monoxide – Properties and Evaporation Techniques*', *The R. D. Mathis Company*.
- [6] G. H. B. Thompson, '*Physics of Semiconductor Laser Devices*', *Great Britain, Wiley*, (1980).
- [7] S. Mailhot, '*Contribution à l'Étude des Propriétés Spectrales et Spatiales des Lasers à Semi-Conducteurs en Cavité Externe*', *Thèse de doctorat, Université de Laval, Québec*, (1996).
- [8] B. W. Hakki and T. L. Paoli, '*Gain Spectra in GaAs Double-Heterostructure Injection Lasers*', *J. Appl. Phys.*, vol. 46, pp. 1299-1306, (1975).

- [9] I. P. Kaminow, G. Eisenstein, and L. W. Stulz, 'Measurement of The Modal Reflectivity of An Antireflection Coating on a Superluminescent Diode', *IEEE J. Quantum Electron*, vol. QE-19, pp.493-495, (1983).
- [10] G. Eisenstein, R. M. Jopson, R. A. Linke, C. A. Burrus, U. Koren, M. S. Whalen, and K. L. Hall, 'Gain Measurements of InGaAsP 1.5- μ m Optical Amplifiers', *Electron lett.*, vol. 21, p. 1076, (1985).
- [11] G. Eisenstein and R. M. Jopson, 'Measurements of The Gain Spectrum of Near Traveling-Wave and Fabry-Perot Semiconductor Optical Amplifiers at 1.5 μ m', *Int. J. Electron*, vol. 60, p. 113, (1986).
- [12] Laboratoire de Physique Appliquée, 'Dépôt de filtre optique par plasma', École Polytechnique de Montréal.
- [13] W. Hellmich and P.P. Demiel, 'Optimal AR-coating for optical waveguide devices', *J.Lightwave Technol.*, vol. 10, pp. 469-476, (1992).
- [14] W. Rideout, R. Holmstrom, J. Lacourse, E. Meland, and W. Powazinik, 'Ultra-low-reflectivity semiconductor optical amplifiers without antireflection coatings', *Electron.Lett.*, vol. 26, pp. 36-37, (1990).
- [15] M. Serenyi and H.-U. Habermeier, 'Directly controlled deposition of antireflection coatings for semiconductor lasers', *Appl. Opt.*, vol.26, pp. 845-849, (1987).
- [16] Romain Maciejko, 'Optoélectronique', Ecole Polytechnique de Montréal, (1999).