

**CONTRIBUCIONS A L'OPTIMITZACIÓ DELS
SISTEMES DE TEST I CARACTERITZACIÓ DE DRIVERS
ELECTRONICS PER A DIODES LASER**

**MÈTODE DE MODELATGE DE LA RESPOSTA ÒPTICA EN
TEMPERATURA DELS DIODES LÀSER I PROGRAMACIÓ EN
ENTORN PSPICE**

RAMON BORRÀS CRISTÒFOL

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

DIRECTOR: JOAQUIN DEL RIO FERNÀNDEZ

PROGRAMA DE DOCTORAT D'ENGINYERIA ELECTRÒNICA

DEPARTAMENT D'ELECTRÒNICA DE LA UPC

VILANOVA I LA GELTRÚ, OCTUBRE 2018

**TESI PRESENTADA PER OBTENIR EL TÍTOL DE DOCTOR PER LA UNIVERSITAT
POLITÈCNICA DE CATALUNYA**

AGRAÏMENTS

La recerca realitzada en aquesta tesi s'emmarca dins del Pla de Doctorats Industrials de la Generalitat de Catalunya, gestionat amb el suport de l'Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca (AGAUR) i ha estat realitzada en col·laboració amb l'empresa Monocrom S.L.

RESUM

La recerca duta a terme en aquesta tesi doctoral ha tingut com a principal objectiu millorar els sistemes de test i de caracterització de la resposta òptica dels díodes làser. La recerca s'ha orientat en l'estudi de la dependència de la resposta òptica dels díodes làser amb la temperatura i l'obtenció d'un sistema de caracterització adequat. Com a resultat es proposa un mètode per al modelatge de la resposta de la potència òptica dels díodes làser i l'obtenció dels models programats en un entorn de simulació a l'ordinador. L'entorn de simulació en el que s'ha treballat és Pspice.

La proposta del mètode de modelatge inclou :

- el model de la potència òptica vers el corrent injectat que permet incloure la dependència amb la temperatura,
- l'estudi de com és la dependència en funció de la temperatura dels paràmetres que defineixen el model,
- la formulació dels models matemàtics corresponents,
- el modelatge i la programació en l'entorn de simulació Pspice,
- i finalment la proposta d'un mètode de caracterització de la resposta òptica del díode làser.

El mètode de caracterització es proposa de forma que la mesura dels paràmetres que defineixen el model en temperatura no es vegi afectada per l'escalfament degut a la injecció del corrent necessària per al seu funcionament.

Aquest ha estat la major dificultat de la recerca, fer que la mesura dels paràmetres que defineixen la resposta en temperatura no es veïés afectada per l'escalfament del díode al funcionar, ja que si així fos invalidaria la seva mesura i el model que se'n deriva. Aquest mètode l'anomenem mètode de mesura en fred.

En la proposta del model de la resposta òptica dels díodes làser i de la seva dependència amb la temperatura s'assumeixen una sèrie d'hipòtesis pel que fa al model utilitzat i als seus paràmetres. Les hipòtesis es fan en relació a la validesa del model als diferents rangs de potència dels díodes làser. Aquestes hipòtesis es van confirmant al llarg de la recerca i de les mesures en díodes de diferents potències.

Altres contribucions derivades de la recerca són la proposta comentada d'un sistema de caracterització de la resposta òptica dels díodes làser a una certa temperatura independent de l'escalfament del díode, o mesura en fred, i de l'entorn de mesura i supervisió de la temperatura utilitzat. Addicionalment, la proposta d'automatització del sistema per caracteritzar la resposta i obtenir el model en temperatura de la potència òptica del díodes làser.

ABSTRACT

The main objective of the research carried out in this doctoral thesis has been to improve the testing procedures and the characterization systems for laser diodes optical response. The research has been focused in the study of the laser diodes response dependency on temperature and its proper characterization system. The result is a proposal of a modelling method for the optical output power response of the laser diodes and the related programmed models in computer simulation environment. This simulation environment has been Pspice.

The proposal of the modelling method includes:

- the model of the optical output power characteristic versus the injected current, that allows to include its temperature dependency,
- the study of how is the dependence on temperature of the parameters that define the model,
- the formulation of the corresponding mathematical models,
- modelling and programming in the Pspice simulation environment,
- and finally, the proposal of a characterization method to measure the optical response of the laser diode.

The characterization method is proposed so that the measurement of the parameters that define the temperature model is not affected by the heating due to the current injection, which is necessary for its operation.

This has been the biggest difficulty of this research, to propose a method where the measurements of the parameters that define the temperature response were not affected by the warming of the diode when operating, since it would invalidate its measurement and the obtained temperature model. It is called cold measurement method.

In the model proposal of the optical response of laser diodes and their dependence on temperature, some hypotheses are assumed regarding the model and its parameters. The hypotheses are made in relation to model's validity in the different ranges of power of the laser diodes. These hypotheses are confirmed throughout the research and with the measurements in diodes of different power.

Other contributions derived from the research are the commented proposal of a system for characterization of the optical response of the laser diodes at a certain temperature, independent of the heating of the diode or cold measure, and the used setup for the temperature measurement and supervision. Additionally, the proposal of an automatic characterization system of the laser diodes response and the related temperature model of their optical output power.

PUBLICACIONS EN REVISTES

- Elsevier Measurement Journal

Ramon Borràs, Joaquin del Rio, Carles Oriach, Jordi Juliachs, " Laser diodes optical output power model ", ELSEVIER Measurement Journal. Vol 133, pp 56-67, February 2019

Acceptat : 2 Octubre 2018. Disponible online des del 4 d'octubre 2018 a :

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224118309230>

PUBLICACIONS EN CONGRESSOS

- I2MTC 2017 IEEE. International Instrumentation and Measurement Technology Conference.

Ramon Borràs, Joaquin del Rio, Carles Oriach, Jordi Juliachs, "Optical power model for low power laser diodes. Pspice modelling of optical power variation with temperature" Proc. 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference, pp. 1439-1444, I2MTC 2017, May 22-25, 2017, Politecnico di Torino, Torino, Italy

- SPIE. Photonics Europe. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers

Ramon Borràs, Joaquin del Rio, Carles Oriach, Jordi Juliachs, "Study of a single emitter laser diode. Pspice model and characterization system" Proc. SPIE 10682, Semiconductors Lasers and laser Dynamics VIII, 106821K (9 May 2018); doi:10.1117/12.2304747. SPIE Photonics Europe, 2018, Strasbourg, France

- IMEKO 2018 XXII World Congress. International Measurement Confederation.

Ramon Borràs, Joaquin del Rio, Carles Oriach, Jordi Juliachs, "Optical power model of a laser bar diode", Proc. IMEKO 2018, TC2 IMEKO18-PO-030, IMEKO XXII World Congress, 4 September 2018, Belfast Waterfront, Belfast, UK.

Llistat de figures

Figura 1: Model del díode.....	18
Figura 2: Corba de resposta elèctrica del díode [20].....	19
Figura 3: Model de la potència òptica del díode làser	21
Figura 4: Resposta de la potència òptica dels díodes làser de baixa i mitja potència	22
Figura 5: Resposta òptica d'un díode làser de potència mitja alta.....	22
Figura 6: Resposta òptica d'una barra de díodes làser d'alta potència	23
Figura 7: Variació del corrent de threshold amb la temperatura del díode làser SLD323V de potència mitja [19]	24
Figura 8: Variació d' I_{th} amb la temperatura en el díode làser de potència mitja alta WSLX808008.....	25
Figura 9: Variació de SE amb la temperatura en díodes làser de baixa i mitja potència.....	26
Figura 10: Variació de SE amb la temperatura en el díode làser de potència mitja alta WSLX808008.....	27
Figura 11: Disminució de SE amb la temperatura en díodes de baixa potència	27
Figura 12: Model Pspice d'un díode làser.....	29
Figura 13: Programa Pspice genèric del model de potència òptica d'un díode làser	32
Figura 14: Formes d'ona de Popt i Id als díodes làser utilitzades per la mesura en fred	34
Figura 15: Sistema de mesura i caracterització de la resposta òptica (esquema i imatge).....	35
Figura 16: Mesures del coeficient de longitud d'ona en els díodes de 808 nm i de 8 W i 40 W	36
Figura 17: Control de la temperatura amb el paràmetre FWHM de l'espectre de llum	37
Figura 18: Adquisició de dades del díode WSLX808008 amb la targeta NI USB6009.....	38
Figura 19: Espectre del díode WSLX808008 amb un pols de 5 ms de durada.....	39
Figura 20: Característica de la resposta del díode WSLX808008 obtinguda amb el DAE-20050	39
Figura 21: Panell de control LabVIEW del sistema de caracterització automàtic de la resposta Popt/Ild i mesura del guany del circuit adaptador d'Ild	41
Figura 22: Sistema de caracterització automàtic de la resposta Popt/Ild amb la temperatura .	42
Figura 23: Variació dels paràmetres Ith i SE amb la temperatura en el díode WSLX808008	43
Figura 24: Circuit de control LAD15X75 utilitzat per al díode SLD1121VS.....	45
Figura 25: Resposta òptica i espectre de llum del díode SLD1121VS a diferents temperatures	46
Figura 26: Model programat Pspice del dispositiu SLD1121VS	47
Figura 27: Resultat de simulació del model programat del SLD1121VS.....	47
Figura 28: Característica de resposta del termistor amb la temperatura i circuit de mesura....	49
Figura 29: Corba de resposta I/V del díode làser WSLX808008 a 25 °C	50
Figura 30: Obtenció del valor del paràmetre EG a partir de gràfiques.....	51
Figura 31: Model de circuit de simulació Pspice del díode WSLX808008.....	52
Figura 32: Model programat Pspice del díode làser WSLX808008.....	53
Figura 33: Circuit de test per simulació de la resposta del díode WSLX808008.....	53
Figura 34: Resultats de la simulació del díode WSLX808008 a T (°C) = 5,10,15,20, 25 i 30.....	54
Figura 35: Corba i taula de valors de la resposta I/V de la barra de díodes de 40 W	55
Figura 36: Relació entre la potència al mesurador de potència tèrmic i la tensió al fotodíode.	56
Figura 37: Panell de control LabVIEW del l'adquisició de la resposta òptica del díode de 40 W	57
Figura 38: Característica de la resposta òptica a 15 °C i 25 °C del díode de 40 W	57
Figura 39: Simulació Pspice de la resposta I/V del díode de 40 W per validar el model elèctric	58

Figura 40: Model de circuit de simulació Pspice del díode làser de 40 W.....	59
Figura 41: Model programat en Pspice del díode làser de 40 W.....	59
Figura 42: Circuit de test per simulació de la resposta òptica del díode laser de 40 W	60
Figura 43: Resultats de la simulació del díode de 40 W a T (°C) = 10,15,20,25,30,35 i 40	61
Figura 44: Panell de control del programa LabVIEW	71
Figura 45: Diagrama de blocs del programa LabVIEW	72
Figura 46: Espectre obtingut amb Avantes AvaSpec 2048 SPU2 i càlcul del centroid.....	73
Figura 47: Espectres obtinguts del WSLX808008 a diferents temperatures	74
Figura 48: Coeficient de λ amb la T del díode WSLX808008 amb l'espectròmetre Avantes	74
Figura 49: Espectre del díode WSLX808008 amb l'espectròmetre Blue-Wave de StellarNet ...	75
Figura 50: Coeficient de λ amb la T del díode WSLX808008 amb l'espectròmetre Blue-Wave .	76
Figura 51: Coeficient de λ amb la T del WSLX808008 amb Blue-Wave i polsos de 200 μ s	76
Figura 52: Espectre al díode WSLX808008 amb pols de 200 μ s i l'espectròmetre Blue-Wave ..	77
Figura 53: Espectres de la barra de díodes de 40 W amb l'espectròmetre HighFinesse.....	77
Figura 54: Coeficient de la longitud d'ona amb la temperatura del díode de 40 W	78
Figura 55: Espectres del díode de 40 W a diferents potències amb HighFinesse	79

Llistat de taules

Taula 1: Paràmetres del model òptic del díode SLD1121VS.....	45
Taula 2: Paràmetres del model òptic del díode SLD1121VS.....	52
Taula 3: Comparativa del valors mesurats, simulats i especificats al díode WSLX808008.....	54
Taula 4: Paràmetres del model òptic de la barra de díodes de 40 W.....	58
Taula 5: Comparativa del valors mesurats, simulats i especificats al díode de 40 W.....	61

ÍNDIX

1	Introducció	11
1.1	Motivació.	11
1.2	Estat de l'art	12
1.2.1	Modelat de la potència òptica dels díodes làser segons les equacions de relació... ..	12
1.2.2	Modelat de la potència òptica a partir de les corbes de resposta	14
1.2.3	Models existents de simulació de la potència òptica amb variació de la temperatura a partir de les corbes de resposta òptica.....	14
1.3	Objectius de la tesi. Contribucions.....	15
1.3.1	Mètode de modelat de la potència òptica dels díodes làser amb variació de la temperatura	15
1.3.2	Mètode de programació en Pspice del model generat. Proposta de circuit Pspice de simulació i programació del model.....	15
1.3.3	Mètode de mesura de la resposta de la potència òptica del díode làser independent de l'escalfament i definició del sistema de mesura.....	16
1.4	Continguts de la tesi.....	16
2	Mètode de modelat de la potència òptica dels díodes làser a partir de les corbes de resposta	18
2.1	Model elèctric del díode	18
2.1.1	Model elèctric del díode a temperatura constant.....	18
2.1.2	Model elèctric del díode amb variacions de la temperatura.....	20
2.2	Model de la potència òptica del díode làser	20
2.2.1	Modelat de la resposta de la potència òptica a temperatura constant.	21
2.2.2	Variació del corrent de threshold amb la temperatura.....	23
2.2.3	Variació de l'eficiència diferencial amb la temperatura.....	25
2.2.4	Proposta de model de la potència òptica del díode làser amb variació de la temperatura	28
3	Model Pspice	29
3.1	Circuit Pspice per al modelat de la potència òptica	29
3.2	Inclusió de les variacions de temperatura de la potència òptica en el model Pspice	31
3.3	Programa del model en Pspice.....	31
4	Mètode de caracterització de la resposta de la potència òptica als díodes làser	33
4.1	Mètode de mesura en fred	33
4.2	Entorn de mesura.....	34
4.2.1	Driver o controlador de corrent	35

4.2.2	Fotodíode	35
4.2.3	Esfera integradora i calibració del sistema	35
4.2.4	Control de la temperatura del díode a partir de la longitud d'ona emesa	36
4.2.5	Targeta d'adquisició de dades	37
4.3	Sistema automàtic de caracterització de la variació de la resposta de la potència òptica amb la temperatura del díode làser	39
4.3.1	Aplicació de control amb LabView	40
4.3.2	Esquema del sistema de caracterització automàtic	41
4.3.3	Mesures obtingudes a la càmera climàtica. Confirmació de la teoria i de les hipòtesis de treball	42
5	Aplicació del mètode de modelat en diferents díodes làser	44
5.1	Procediment: Mesura, obtenció del paràmetres, modelat Pspice, simulació i validació.	44
5.2	Díode làser de 5 mW	44
5.2.1	Càlcul dels paràmetres	45
5.2.2	Model Pspice	46
5.2.3	Resultats de la simulació.	47
5.2.4	Validació del model	48
5.3	Díode làser de 8 W	48
5.3.1	Termistor NTC al WSLX808008	48
5.3.2	Mesures	49
5.3.3	Càlcul dels paràmetres	51
5.3.4	Model Pspice	52
5.3.5	Resultats de la simulació	53
5.3.6	Validació del model	54
5.4	Díode làser de 40 W	55
5.4.1	Mesures	55
5.4.2	Càlcul dels paràmetres	58
5.4.3	Model Pspice	59
5.4.4	Resultats de la simulació	60
5.4.5	Validació del model	61
6	Conclusions i futures investigacions.....	62
6.1	Revisió dels objectius assolits.....	62
6.2	Revisió de les aportacions i contribucions de la tesi	63
6.3	Noves línies de recerca.....	64

7	Referències:.....	66
8	Annex A: Control amb LabVIEW	70
9	Annex B: Coeficient de la longitud d'ona amb la temperatura. Espectròmetres utilitzats.....	73

1 Introducció

1.1 Motivació.

La recerca realitzada en aquesta tesi s'emmarca dins del Pla de Doctorats Industrials de la Generalitat de Catalunya, gestionat amb el suport de l'Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca (AGAUR) i ha estat realitzada en col·laboració amb l'empresa Monocrom S.L. L'empresa Monocrom S.L. es dedica a la fabricació i comercialització de díodes làser i dels seus circuits de control o drivers. Les aplicacions dels díodes làser que fabrica l'empresa Monocrom S.L. cobreixen camps tant diversos com són la dermatologia i en concret la fotodepilació, on s'utilitzen díodes làser d'alta potència de fins a 6000 W, la impressió gràfica d'alta qualitat, el processat de materials com la soldadura, tall i marcatge de plàstic i metall, l'oftalmologia i en concret la cirurgia oftàlmica, la teràpia fotodinàmica per a l'extirpació de tumors, aplicacions en la indústria aeroespacial i de defensa i d'altres aplicacions industrials com la utilització en processos de control de qualitat, reprografia o construcció [1].

La utilització dels díodes làser en aquestes aplicacions és normalment en mode continu (CW - continuous wave) o en mode quasi continu (QCW - quasi continuous wave) i serà a aquestes condicions a les que s'orientarà la recerca. En la majoria d'aquestes aplicacions cal una potència òptica constant. El propi funcionament dels díodes làser tendeix a augmentar la temperatura del dispositiu. Almenys la meitat de l'energia elèctrica que s'injecta en un díode làser es converteix en calor i en provoca l'augment de la temperatura. Com es podrà veure en les especificacions dels díodes que s'esmenten en aquesta tesi, l'eficiència òptica, és a dir la relació entre la potència òptica emesa i la potència elèctrica injectada és en el millor dels casos del 50 %, que és el cas de la barra de díodes de 40 W. L'eficiència òptica en el cas del díode de 8 W és del 36 %, i disminueix amb la potència del díode, fins a tant sols un 3% en el cas del díode de 5 mW. Amb l'augment de la temperatura l'eficiència òptica del díode làser disminueix i per tant disminueix la potència de la llum emesa. Aquest efecte es veu clarament en la disminució del pendent de les corbes de resposta òptica en funció de la temperatura proporcionades per les especificacions dels fabricants, i en el que es basarà el modelatge de la resposta òptica amb la temperatura com es veurà més endavant. Per obtenir potències de llum emesa constants com requereixen la majoria de les aplicacions s'ha de, o bé mantenir constant la temperatura del dispositiu amb la utilització de sistemes d'acondicionament de la temperatura, o bé la utilització de circuits amb realimentació que compensin les pèrdues de potència òptica degudes a l'augment de la temperatura i de la disminució de l'eficiència òptica amb un augment del corrent elèctric injectat al díode làser [2]. Respecte al primers dels casos, hi ha bàsicament dues maneres de mantenir constant la temperatura del dispositiu làser en aplicacions industrials. Un primer sistema està basat en la utilització de cel·les Peltier amb combinació amb termistors i l'electrònica corresponent de control, i amb dissipació del calor generat a la cel·la Peltier a través generalment d'un circuit de refrigeració amb un refrigerador o chiller. L'ajust amb precisió de la temperatura al dispositiu es realitza amb l'electrònica de control de la cel·la Peltier i el termistor. Aquest sistema es coneix com a sistema actiu de refrigeració. L'altra manera de mantenir la temperatura constant al díode làser és directament amb un circuit refrigerador ajustable de precisió i controlant la temperatura del dispositiu amb termòmetres, també de precisió. Aquesta manera es coneix com a sistema passiu de condicionament de la temperatura. Per altra banda, les càmeres climàtiques són una altra

manera d'aconseguir una temperatura constant i ajustable, i sobretot uniforme i estable en el dispositiu, molt útil en entorns d'investigació i que ha estat utilitzada durant la recerca realitzada en aquesta tesi. Pel que fa al segon dels casos de sistemes per mantenir constant la potència òptica, els circuits realimentats són circuits basats en la monitorització de la potència òptica mitjançant fotodíodes i realimentació del corrent controlada respecte a una referència ajustable, per exemple utilitzant díodes shunt reguladors Zener. En aquest cas, el corrent injectat en el díode làser tendirà a incrementar-se a per compensar la pèrdua de potència òptica per efecte de l'augment de la temperatura. Això provocarà que la temperatura del dispositiu augmenti encara més, fins arribar a un estat d'equilibri entre l'augment de la temperatura i la capacitat de dissipació de calor del dispositiu o del sistema en el que es trobi muntat.

Tot i disposar de sistemes d'acondicionament de la temperatura, pot haver-hi diferències de temperatura entre les diferents parts del dispositiu i en concret entre la unió p-n del semiconductor on es genera l'emissió de la llum i els punt o parts del dispositiu o el sistema on es mesura la temperatura, com pot ser el termistor o el punt del circuit de refrigeració on es controla la temperatura amb termòmetres. Cal en ambdós casos, tant en sistemes amb condicionament de la temperatura i amb sistemes realimentats, poder predir i limitar els marges d'operació en temperatura, i conseqüentment en tensió i corrent, en els que ha de treballar el díode làser. Si bé els díodes làser són els dispositius làser més robustos i resistents, cal respectar-ne els seus marges funcionals d'operació, especialment pel que fa a la temperatura. És per tot això que poder simular en un ordinador la seva funcionalitat en diferents condicions de temperatura pot evitar sobrepassar-ne el marges d'operació en funcionament real i malmetre el dispositiu.

Per poder simular el funcionament dels díodes làser i la seva variació amb la temperatura cal disposar de models d'aquest funcionament amb la temperatura i programar-los en un entorn de simulació de circuits electrònics. És en aquest aspecte en el que es centra la recerca que s'ha realitzat en aquesta tesi, és a dir, en la millora del processos de test i caracterització de drivers per a díodes làser i en l'obtenció d'un mètode de modelatge de la potència òptica emesa considerant la seva variació amb la temperatura, així com la seva programació en un entorn de simulació de circuits electrònics, en aquest cas en Pspice.

1.2 Estat de l'art

En referència a l'existència de models de la potència òptica dels díodes làser i en especial de la variació del seu comportament en funció de la temperatura s'han trobat bàsicament dues maneres de modelar la resposta òptica dels díodes làser, el modelatge en base a les conegudes com a equacions de relació i el modelatge en base a les corbes de la resposta òptica del díodes làser.

1.2.1 Modelat de la potència òptica dels díodes làser segons les equacions de relació

En primer lloc trobem bibliografia on es proposen circuits equivalents per a modelar el comportament de díodes làser obtinguts a partir del les equacions de relació (Rate Equations). Aquestes equacions de relació descriuen la variació de la densitat de portadors i de fotons en el semiconductor. A partir dels corrents i tensions que es generen es formulen els circuits equivalents i que es poden simular en Pspice. Les equacions de relació depenen per tant de les característiques físiques del díode, com poden ser el volum de la cavitat làser, la topologia del

díode, per exemple si és de pou quàntic (QW) o de multi pou quàntic (MQW), i d'altres paràmetres com poder ser els dopatges del semiconductor. És per això que en alguns dels articles i tesis relacionats, el model obtingut a partir de les equacions de relació s'anomena "Physic-Based model". Se n'obtenen consegüentment diferents models de circuit equivalent dels díodes en funció d'aquests paràmetres, si bé el procés de formulació de les equacions de relació és similar. Cal dir que per a poder modelar segons les equacions de relació s'ha de tenir un coneixement molt detallat dels paràmetres físics del díode làser, cosa que no sempre és possible en el cas de díodes làsers comercials, on la informació que proporciona el fabricant no és sempre, o millor dit quasi bé mai, tan extensa. El modelatge a partir de les equacions de relació és un mètode molt útil en el cas d'estudi de noves tipologies de díode làser, però no és el mètode més adequat per a la modelització de díodes làsers comercials com és el cas que ens ocupa.

Alguns exemples de modelatge basats en les Rate Equations de díodes làser de pou quàntic o multi pou quàntic són els articles "Dong Wook Lim, 2009, A PSPICE Circuit Modelling of Strained AlGaInN Laser Diode Based on the Multilevel Rate Equations", i "Dan Alexandru Anghel, 2012, Modelling Quantum Well Lasers" [\[4\]](#), i també la tesi doctoral "Jae Hong Kim, 2005, Wide-Band and Scalable Equivalent Circuit Model for Multiple Quantum Well Laser Diodes" [\[5\]](#). En tots aquests exemples s'obtenen els circuits elèctrics equivalents a partir de les Rate Equations o equacions de relació, i en tots ells s'indica la llista de paràmetres necessaris del díode i del semiconductor per obtenir els valors dels components dels circuits elèctrics. Altres exemples del mateix mètode de les equacions de relació aplicats en aquest cas a díodes làser DHLD (Double Heterojunction Laser Diodes) són l'article "Houssam Kanj, 2003, Double Heterojunction Laser Diode (Tucker Model) DHLD" [\[6\]](#) i la tesi doctoral "Houssam Kanj, 2003, Circuit-Level Modeling of Laser Diodes" [\[7\]](#), ambdós del mateix autor, on les equacions de relació i les característiques V/I dels díodes làser s'utilitzen per obtenir els circuits elèctrics equivalents per programar-ne les simulacions. I també a l'article "M. S. Ozyazici, 2004, The complete electrical equivalent circuit of a double heterojunction laser diode using scattering parameters" [\[8\]](#), on les anomenades single-mode rate equations s'utilitzen per obtenir els circuits elèctrics equivalents del circuit intrínsec del díode i del circuit complet que inclou els efectes paràsits de l'encapsulat i dels contactes elèctrics. En tots ells un llistat exhaustiu dels paràmetres del díode és necessari. Altres exemples del mètode de les equacions de relació aplicats a altres topologies de díodes són els articles "M.Lomer, 1997, Modelización y Simulación de dispositivos optoelectrónicos utilizando el programa SPICE" [\[9\]](#) aplicat a un díode làser Fabry-Perot, l'article "Vítězslav JEŘÁBEK, 2011, Theoretical Model of bistable Semiconductor Laser Diode Based on the Rate Equations" [\[10\]](#), la tesi doctoral "Pablo Valente Mena, 1998, Circuit-Level Modeling and Simulation of Semiconductor Lasers" [\[11\]](#), l'article "Christoph Harder, 1982, Noise Equivalent Circuit of a Semiconductor Laser Diode" [\[12\]](#) que utilitza el mètode de les equacions de relació per estudiar la contribució del soroll degut a les fluctuacions de les poblacions de fotons i electrons en els pous quàntics i treure'n el circuit elèctric equivalent que els modela, i l'article "Cliff L. Ma, 1997, Modelling of Power Diodes with the Lumped-Charge Modeling Technique" [\[13\]](#) que utilitza també les equacions de relació per modelar un díode d'alta potència. Com a últim exemple mencionarem l'article "A. Sonne, 2009, A New SPICE Method of Modeling of optoelectronic components for Optical fiber Link Transmission" [\[14\]](#) on es modelen dispositius LED i làser en SPICE a partir dels paràmetres físics

i elèctrics dels dispositius. Per tant ens trobem en un cas similar al de les equacions de relació en quant a la necessitat de conèixer el valors de tots aquests paràmetres.

1.2.2 Modelat de la potència òptica a partir de les corbes de resposta

Una altra manera de modelar els díodes làser en Pspice o en qualsevol altre sistema, és a partir de les seves corbes de resposta, de la potència de la llum emesa en funció del corrent injectat al díode làser, incorporant-les com a part del model i del programa de simulació del díode làser. Aquest mètode presenta avantatges en el nostre cas que està orientat a l'ús industrial. Per implementar aquests models cal però disposar dels circuits electrònics o drivers adequats en cada cas per poder obtenir les corbes de resposta òptica. Per altra banda, es mesura el díode làser com a caixa negra, integrant-ne en aquesta mesura tots els efectes que es puguin generar deguts a les eficiències d'emissió del làser, de l'eficiència òptica, resistències o capacitats paràsites i dels components de les connexions elèctriques, etc.. que quedaran inclosos en els valors dels paràmetres globals del model. No cal tenir un coneixement excessivament detallat de les característiques físiques del díode i del material, com en el mètode de les equacions de relació, cosa que en facilita molt la implementació en el cas de díodes làser comercials i representa un clar avantatge a l'hora de voler-ne obtenir un mètode pràctic d'ús per a la indústria. Cal però com a mínim conèixer quin tipus de semiconductor i quina composició o aliatge utilitza, o sinó la longitud d'ona de la llum emesa per l'obtenció d'algun dels paràmetres necessaris per al model de temperatura com s'explicarà més endavant. Un exemple d'ús del mètode de modelatge basat en les corbes de resposta es l'article "Lukasz Sliwczynski, 1998, Simple Spice model simulates laser díode" [\[15\]](#). En aquest article la relació entre la potència òptica i el corrent injectat al díode làser, i la relació entre la potència òptica i el corrent generat en un fotodíode detector, s'utilitzen per definir els circuits elèctrics equivalents a ser simulats en Spice, incloent-hi també el programa en Spibe o netlist del parell de díodes làser i fotodetector. Un altre exemple d'aquesta metodologia és l'article de l'empresa Intosoft "Intosoft, 1989, Modelling Lasers with IsSpice and PreSpice" [\[16\]](#). En aquest article es modela el díode làser HL7801E de Hitachi com a exemple de modelat de díodes làser de GaAlAs. El model es genera a partir de les corbes de resposta proporcionades per l'especificació del fabricant i el model es programa finalment en Spice.

Existeixen exemples d'implementació en Pspice de díodes làser, alguns disponibles directament a les llibreries del programa, si bé en cap cas inclouen les variacions de la resposta òptica en funció de la temperatura. Alguns exemples són els díodes SLD1121VS [\[17\]](#), SLD1132VS [\[18\]](#) i el SLD323V [\[19\]](#) de SONY. Tots aquests díodes làser són dispositius que també incorporen un fotodetector i els models disponibles en les llibreries Pspice també els inclou.

1.2.3 Models existents de simulació de la potència òptica amb variació de la temperatura a partir de les corbes de resposta òptica.

No s'han trobat models de simulació de la potència òptica dels díodes làser que incloguin les variacions de la temperatura. S'ha comentat que el mateix programa Pspice, així com d'altres programes de simulació de circuits electrònics disposen de llibreries on s'inclouen alguns components que són díodes làser amb fotodetector i on està modelada la resposta òptica, però sense considerar les seves variacions amb la temperatura. Per altra banda, s'ha trobat teoria respecte la dependència de la resposta òptica dels díodes làser amb la temperatura. La

combinació d'aquests dos aspectes són el punt d'inici de la recerca que permetrà la generació dels models de resposta òptica dels díodes làser amb la temperatura, si bé caldrà ampliar la informació obtinguda a partir de la teoria i formular i demostrar algunes hipòtesis sobre el funcionament necessàries per a completar els models, així com ampliar i completar els esquemes de simulació en Pspice i la seva utilització en el entorn de simulació per incloure'n el tractament de la variació de la temperatura. També s'haurà de definir un mètode de mesura adequat a l'obtenció del paràmetres necessaris per al model de temperatura. Tot això compondrà el mètode de caracterització i modelatge, cos de la tesi que es presenta.

1.3 Objectius de la tesi. Contribucions

L'objectiu que es proposa es l'obtenció d'un mètode de modelatge de la resposta òptica dels díodes làser que inclogui la variació del seu comportament amb la temperatura, i també la seva implementació i programació en l'entorn de simulació Pspice que permeti poder executar en aquest entorn simulacions del funcionament i de la resposta òptica dels díodes làser a diferents temperatures i poder comprovar-ne les condicions d'operació. Això permetrà poder caracteritzar els drivers electrònics dels díodes làser incloent la seva dependència amb la temperatura. Per tant es poden identificar tres objectius concrets i que representen noves contribucions que són el modelatge o model matemàtic, la implementació del model en Pspice i la definició del mètode de caracterització per mesurar els paràmetres necessaris per l'obtenció del model. Aquest nou mètode de caracterització de la resposta òptica del díodes làser amb la temperatura representa una millora del procés de test del dispositius en producció.

1.3.1 Mètode de modelat de la potència òptica dels díodes làser amb variació de la temperatura

Un primer objectiu concret és l'obtenció del model matemàtic que incorpora la resposta òptica dels díodes làser i la seva variació amb la temperatura. Aquest model matemàtic es basa amb la teoria existent sobre la resposta òptica del díodes làser, i com a principal contribució, es formula una hipòtesi sobre la variació de l'eficiència diferencial amb la temperatura, o com varia la relació entre els augments de la potència òptica i del corrent injectat al díode làser amb la temperatura, informació necessària per a la formulació del model matemàtic. Una altra hipòtesi en aquest punt és que el tipus de resposta òptica és comú per a tot el rang de potències de díodes làser, tant en la forma de la resposta com en la variació del paràmetres que la defineixen amb la temperatura. Aquestes hipòtesis es validen amb mesures realitzades en un díode làser i en una càmera climàtica per que fa a la primera i amb mesures fetes en diversos díodes de diferents potències pel que fa a la segona.

1.3.2 Mètode de programació en Pspice del model generat. Proposta de circuit Pspice de simulació i programació del model.

Un segon objectiu concret és la proposta d'un model de circuit en Pspice en el que es pugui simular la resposta òptica del díode làser i la seva dependència de la temperatura. Aquest circuit pren com a punt de partida models de circuits de simulació Pspice ja existents. En aquest punt la contribució que es fa en aquesta tesi és la selecció del mode d'especificació dels components del model permetent-ne la incorporació de la resposta òptica i de les seves variacions amb la temperatura en les funcions de transferència, seguint el model matemàtic

format, així com del programa del model Pspice relacionat per a poder simular les variacions de temperatura.

1.3.3 Mètode de mesura de la resposta de la potència òptica del díode làser independent de l'escalfament i definició del sistema de mesura.

Un tercer objectiu i contribució de la tesi és la definició del mètode de mesura per obtenir els valors dels paràmetres necessaris per a la formulació del model matemàtic de la resposta de la potència òptica en funció de la temperatura, i del sistema o entorn utilitzat per poder obtenir els valors d'aquests paràmetres evitant els errors que l'increment de la temperatura inherent al propi funcionament del díode làser pugui provocar en la seva mesura. Es tracta doncs de definir un mètode de mesura que faci que en l'obtenció dels paràmetres que defineixen el model de temperatura de la potència òptica es minimitzi l'error degut a l'escalfament que es provoca en el funcionament del díode làser, i que denominem mesura en fred. També es proposarà un entorn de mesura automatitzat, basat en el mètode anterior, que calculi de forma automàtica els valors dels paràmetres necessaris i que permeti la seva utilització juntament amb sistemes programats d'acondicionament de temperatura, com per exemple les càmeres climàtiques, i amb el que es puguin realitzar mesures dels paràmetres durant cicles de llarga durada temporal, amb l'objectiu d'estabilitzar la temperatura dins del dispositiu làser i obtenir-ne mesures fiables. D'aquesta manera es disposarà d'un sistema de caracterització automàtic de la resposta òptica dels díodes làser amb la temperatura, que ens permetrà la mesura dels valors dels paràmetres necessaris per a l'obtenció del model de forma correcta.

1.4 Continguts de la tesi

El contingut de la tesi respon doncs als objectius i les contribucions que es proposen, de manera que incloent aquest primer capítol d'introducció, l'estructura del contingut és la següent:

- El primer capítol d'introducció on s'han comentat la motivació, l'estat de la qüestió, els principals objectius de la tesi i les contribucions que es fan, i finalment l'estructura i continguts de la tesi.
- En el segon capítol es descriu el mètode de modelat matemàtic de la resposta òptica dels díodes làser i la seva dependència amb la temperatura, les teories utilitzades, les hipòtesis que es formulen, el model elèctric i el model de la potència òptica dels díodes, quin són els paràmetres a ser utilitzats en els models i com varien amb la temperatura.
- Un tercer capítol dedicat exclusivament al modelatge en Pspice, on es comenta el model de circuit de simulació que es proposa, com s'hi introdueix el model matemàtic, com s'introdueix la variació de la temperatura en el model, i finalment el model programat resultant.
- El quart capítol està dedicat al mètode de caracterització de la resposta òptica en temperatura dels díodes làser. En aquest capítol es descriu el mètode proposat de mesura dels paràmetres del model de forma que sigui independent de l'escalfament del díode làser o mesura en fred, l'entorn de mesura que es proposa per a obtenir els paràmetres de forma correcta i l'automatització del sistema de mesura i la seva utilització en sistemes programats d'acondicionament de temperatura.

- En el cinquè capítol es mostren els resultats de l'aplicació del mètode de modelatge i programació en Pspice, així com els resultats de la simulació i validació del model per comparació amb mesures reals en diversos díodes làser de diferent rang de potència òptica.
- Finalment un sisè capítol on es fa un resum dels resultats obtinguts en la recerca, se n'obtenen conclusions i es proposen noves línies de recerca relacionades.
- En els annexes s'inclou informació relacionada amb la recerca portada a terme i que fa referència a:
 - Annex A: Controls del sistema d'adquisició i del sistema automàtic de caracterització amb programació LabVIEW.
 - Annex B: Càlcul del coeficient de variació de la longitud d'ona amb la temperatura, com a sistema de mesura de la temperatura en funció de la longitud d'ona emesa i espectròmetres utilitzats.

2 Mètode de modelat de la potència òptica dels díodes làser a partir de les corbes de resposta

El mètode de modelat es basa en la mesura de les corbes de resposta òptica del díode làser d'on es calculen els paràmetres necessaris. El model ha d'incloure la resposta elèctrica del díode làser similar a la d'un díode semiconductor d'unió p-n. S'utilitzen per tant els models de resposta elèctrica del díode ja existents tant a nivell teòric com finalment, en el entorn de simulació, el models existents en les llibreries del programa. No es fa cap aportació en la part de resposta elèctrica del díode làser. Es fa en aquesta tesi i en aquest apartat un breu resum de la part de la resposta elèctrica del díode a ser considerada en el model del díode làser, dels paràmetres que en calen, de com obtenir-los i quins valors prenen.

2.1 Model elèctric del díode

En el díode làser, l'efecte laser i l'emissió de llum té lloc en polarització directa. Com s'ha comentat en el capítol anterior, el modelat de la potència òptica està orientat a díodes làser en funcionament en mode continu i serà per tant el model elèctric en aquestes condicions l'objecte a estudi. En el model elèctric del díode, la resposta del díode o relació corrent a voltatge (I_D/V_D) en aquesta zona està modelada segons una corba exponencial coneguda com l'equació de Shockley [20][21][22]. En el mètode proposat de modelat de la resposta òptica només considerarem doncs l'obtenció del valors dels paràmetres necessaris per poder modelar la resposta del díode en polarització directa i segons l'esmentada equació.

2.1.1 Model elèctric del díode a temperatura constant.

No es fa cap aportació ni contribució en aquesta recerca respecte al modelat de la resposta elèctrica del díode en corrent continua, sinó un breu repàs als models que ja existeixen i que es fan servir en els programes de simulació, amb l'únic objectiu de definir quins són els paràmetres necessaris per a poder utilitzar aquests models i en quines condicions s'han de mesurar. El model elèctric del díode segueix el següent esquema de primer ordre [23]:

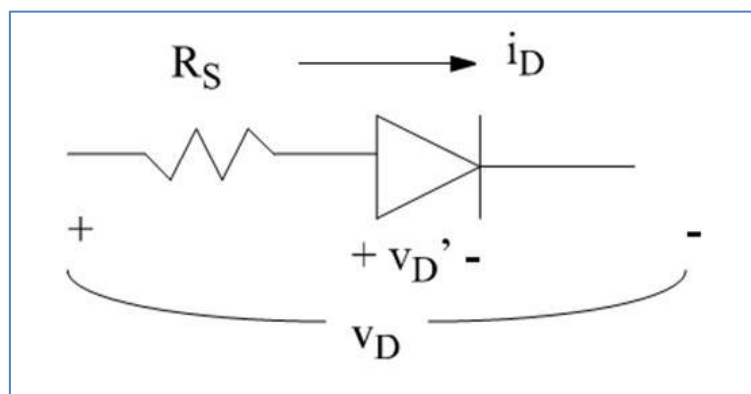


Figura 1: Model del díode

En aquest model la tensió aplicada al dispositiu V_D és igual a la caiguda de tensió al propi díode V_D' més la caiguda a la resistència R_S deguda al corrent I_D que passa a través del dispositiu. R_S simula les resistències paràsites dels contactes, soldadures, connexions i del propi semiconductor. La tensió al díode és doncs:

$$Vd' = Vd - Id \cdot Rs \quad (1)$$

A la Figura 2: Corba de resposta elèctrica del díode [20] [20] es mostra la corba de la resposta elèctrica del díode, indicant la zona de polarització directa, zona 1, on la resposta es modela segons l'equació de Shockley. La zona 2 és la de polarització inversa amb tensions superiors a la de ruptura, i la zona 3 la de funcionament del díode en tensions de ruptura. Les tensions límit entre zones són $Vd=-5Nvt$ i $Vd=-BV$ on Vt és la tensió tèrmica, N el factor de qualitat del díode i BV la tensió inversa de ruptura.

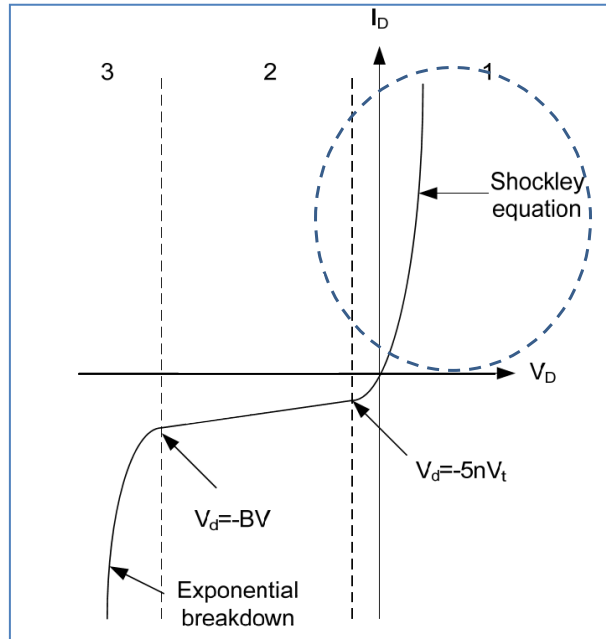


Figura 2: Corba de resposta elèctrica del díode [20]

L'equació exponencial o equació de Shockley de la resposta del díode en polarització directa és:

$$Id = Is \left(e^{\frac{Vd'}{N \cdot Vt}} - 1 \right) \approx Is \cdot e^{\frac{Vd'}{N \cdot Vt}}; \text{ si } Vd' \geq -5 N \cdot Vt \quad (2)$$

on Is és el corrent invers de saturació i on recordem que Id és el corrent a través del díode i Vd' la caiguda de tensió al propi díode. Vt és la temperatura tèrmica, (Vt a $25^\circ\text{C} \approx 25 \text{ mV}$) :

$$Vt = \frac{k \cdot T}{q} \quad (3)$$

on $k=1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ (constant de Boltzmann), $q=1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (càrrega de l'electró), T és la temperatura en K , i N és el coeficient d'emissió o factor d'idealitat o qualitat. Substituint (1) en (2), tenim que:

$$Id = Is \cdot e^{\left(\frac{Vd - Id \cdot Rs}{N \cdot Vt} \right)} \quad (4)$$

on recordem que Vd és la tensió aplicada al dispositiu. L'expressió equivalent és:

$$Vd = \ln \left(\frac{Id}{Is} \right) N \cdot Vt + Id \cdot Rs \quad (5)$$

I_d i V_d són els ja indicats valors del corrent i la tensió al dispositiu. Els valors del paràmetres I_s , R_s i N definiran el model de la resposta elèctrica del díode en polarització directa. El valor de N és 1 en polarització directa i també en un bon díode també segons [20]. Pel que fa als valors d' I_s i R_s es poden obtenir a partir de parells (almenys dos) de valors I_d/V_d mesurats de la resposta del díode.

2.1.2 Model elèctric del díode amb variacions de la temperatura.

Pel que fa a la resposta elèctrica del díode amb la temperatura en polarització directa, cal considerar principalment les variacions del corrent invers de saturació segons l'expressió [24]:

$$I_S(T) = I_S \cdot e^{\left[\left(\frac{T}{T_{nom}} - 1\right) \frac{EG}{N \cdot V_T}\right]} \cdot \left(\frac{T}{T_{nom}}\right)^{\frac{XTI}{N}} \quad (6)$$

En aquesta expressió, I_s és el valor del corrent invers de saturació mesurat a la temperatura nominal T_{nom} . EG (Energy Gap en eV) depèn del material semiconductor del díode i de les proporcions de l'aliatge dels seus components, i també té relació amb la longitud d'ona de la llum emesa pel díode làser. El seu valor es pot obtenir de taules o gràfiques definides en funció precisament de la composició del semiconductor o de la longitud d'ona d'emissió, com per exemple la utilitzada pels díodes de 808 nm de AlGaAs que trobem a [25]. XTI és l'exponent de temperatura del corrent invers de saturació del díode que depèn bàsicament de la seva estructura, de manera que XTI és igual a 3 per díodes d'unió p-n semiconductor - semiconductor i igual a 2 en díodes d'unió metall - semiconductor com el díode Schottky [26].

En díodes de silici, germani i concretament en els material utilitzats en els díodes làser com són l'arsenur de gal·li (GaAS) i les seves combinacions amb fòsfor, indi,..., el valor de XTI és sempre igual a 3 ja que es tracta sempre d'unions p-n. Aquest és també el valor que per defecte utilitza el programa de simulació Pspice per a qualsevol díode d'unió p-n. El valor d'aquests dos paràmetres es pot obtenir a partir de mesures de la corba de resposta I_d/V_d a diferents temperatures i de l'obtenció dels valors d' I_s a aquestes temperatures. Seria un mode alternatiu, especialment per l'obtenció del valor de EG en el cas de no conèixer exactament el material semiconductor i dels percentatges de l'aliatge dels seus components i de no poder mesurar la longitud d'ona que s'emet amb prou precisió.

2.2 Model de la potència òptica del díode làser

El model de la potència òptica del díode làser que ens plantegem, com ja s'ha considerat anteriorment en el modelat elèctric del díode, està orientat especialment al funcionament dels díodes làser de mitja i alta potència òptica i en mode continu o quasi continu. No es considerarà en aquesta recerca la resposta en petit senyal, aplicacions sobre la que no estan orientats en principi els díodes làser d'alta potència de l'empresa Monocrom S.L. on es desenvolupa la tesi. Per altra banda, la dependència de la resposta òptica dels díodes làser d'alta potència amb la temperatura té especial importància en funcionament continu. L'objectiu principal en el modelat de la potència òptica del díode làser és obtenir-ne una expressió matemàtica on poder incloure-hi la dependència amb la temperatura. Respecte al modelat d'aquesta dependència es parteix de la teoria existent sobre aquest aspecte i que podem trobar a [27], on s'explica com és la resposta òptica del díode i on hi podem trobar també algunes consideracions sobre alguns aspectes en referència a quin tipus de variació se

n'espera amb la temperatura, i de forma més concreta d'alguns dels paràmetres. Aquesta informació ens serveix per poder formular part de l'expressió matemàtica que necessitem. Però per poder formular una expressió matemàtica completa i que es pugui incloure en el model programat del díode làser caldrà fer algunes hipòtesis addicionals. Aquestes hipòtesis caldrà però confirmar-les amb mesures reals.

2.2.1 Modelat de la resposta de la potència òptica a temperatura constant.

El model que es planteja es compon bàsicament per dues zones de funcionament depenent de si el corrent injectat en el díode és suficient per iniciar l'efecte làser o no. Per a corrents inferiors a aquest nivell de corrent, que es coneix per corrent de threshold (I_{th}), es considera que la potència òptica és nul·la. El corrent de threshold és doncs, i com el seu nom indica, el valor del corrent a partir del qual s'inicia l'efecte làser en el díode. Per a corrents superiors al corrent de threshold, o zona d'emissió, la potència òptica s'incrementa linealment amb l'increment del corrent. La relació entre els increments de potència òptica (P_{opt}) i el corrent injectat al díode làser (I_d), o pendent de la resposta òptica en emissió, es coneix com a Slope Efficiency SE o η_s ($SE = \frac{\Delta P_{opt}}{\Delta I_d}$) (W/A) o Differential Efficiency η_D .

La formulació matemàtica d'aquest model és :

$$\left. \begin{aligned} P_{opt} &= 0, \text{ per a } I_d \leq I_{th}; \\ P_{opt} &= SE \cdot (I_d - I_{th}), \text{ per a } I_d \geq I_{th} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Gràficament, el model és mostrat a la **Figura 3**, on s'indiquen la zona on no hi ha emissió de llum, la zona d'emissió de llum o d'efecte làser, el valor del corrent a la separació entre les zones on s'inicia l'efecte làser o corrent de threshold (I_{th}), i la relació entre els increments de la potència òptica i el corrent o Slope Efficiency (SE), que és l'esmentat pendent de la resposta de la potència òptica enfront el corrent que s'injecta al díode. Es tracta d'un model que ens permetrà incorporar-hi les expressions matemàtiques de les variacions de la resposta òptica en funció de la temperatura.

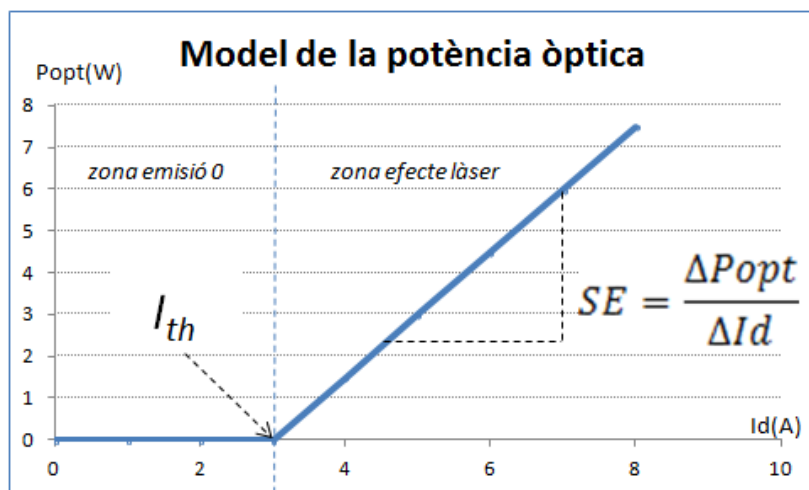


Figura 3: Model de la potència òptica del díode làser

La hipòtesi de treball respecte al model de la resposta òptica dels díodes làser és que el model proposat es pot aplicar a tot el rang de potències de díodes làser. En les especificacions de

díodes làser de potències mitja i baixa, de 5 mW fins a 4 W s'observen formes de resposta òptica que es corresponen amb el model. Com a exemple es mostren a la Figura 4: Resposta de la potència òptica dels díodes làser de baixa i mitja potència les especificacions de dos d'aquest díodes de baixa potència, el ja mencionat SLD1132VS de SONY [17] i el HL6722G de HITACHI [28], ambdós de 5 mW. La forma de la resposta de la potència òptica amb la temperatura en díodes de potència d'1 a 4 W també segueix la proposada en el model. La Figura 4: Resposta de la potència òptica dels díodes làser de baixa i mitja potència en mostra també les corbes segons les especificacions del díode làser de 2 W SPLCG81-2S d'OSRAM [29] i el SLD326YT de SONY de 4 W [30].

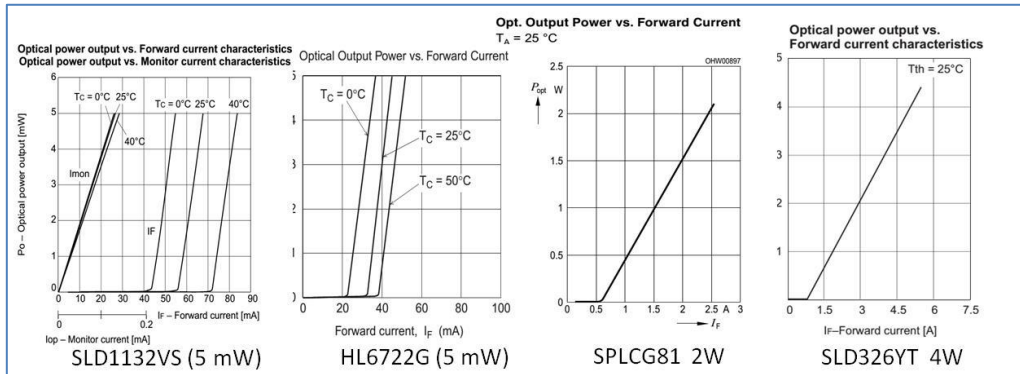


Figura 4: Resposta de la potència òptica dels díodes làser de baixa i mitja potència

Per comprovar la validesa de la hipòtesi en díodes làser de potències superiors, s'han realitzat mesures en un díode làser de 8 W i 808 nm d'emissor únic (single emitter), el WSLX808008 de Wavespectrum [31], que es mostren a la Figura 5: Resposta òptica d'un díode làser de potència mitja alta, on es pot efectivament comprovar com la resposta òptica d'un díode làser de potència mitja alta es correspon amb el model proposat.

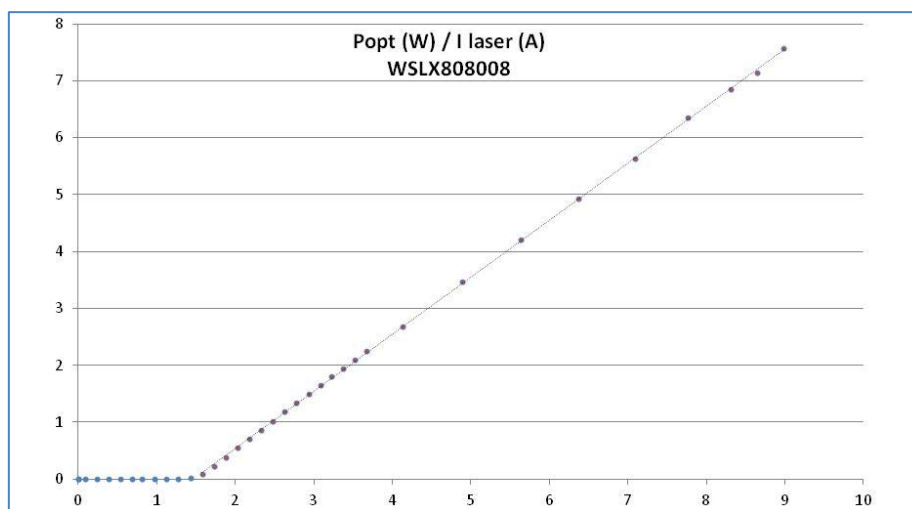


Figura 5: Resposta òptica d'un díode làser de potència mitja alta

Pel que fa als díodes d'alta potència, els díodes de l'empresa Monocrom S.L. es componen de barres de díodes en paral·lel o matrius de díodes formats per aquestes barres de díodes làser muntades en sèrie. Els díodes components d'aquestes barres i matrius són de les mateixes característiques que el díode de potència mitja alta del que es mostra la resposta a la Figura 5,

i s'espera per tant que la resposta de la potència òptica de la barra o de la matriu de díodes també es correspongui amb el model proposat. A la Figura 6: Resposta òptica d'una barra de díodes làser d'alta potència es mostra la resposta òptica mesurada en una barra de díodes làser de 40 W de potència i 808 nm de longitud d'ona, formada per 19 díodes emissors connectats en paral·lel del mateix tipus que del que es mostra la resposta en la gràfica anterior, i on es confirma que realment la forma de la corba de resposta de la potència òptica respecte al corrent injectat en díodes d'alta potència també es correspon amb el model que es proposa.

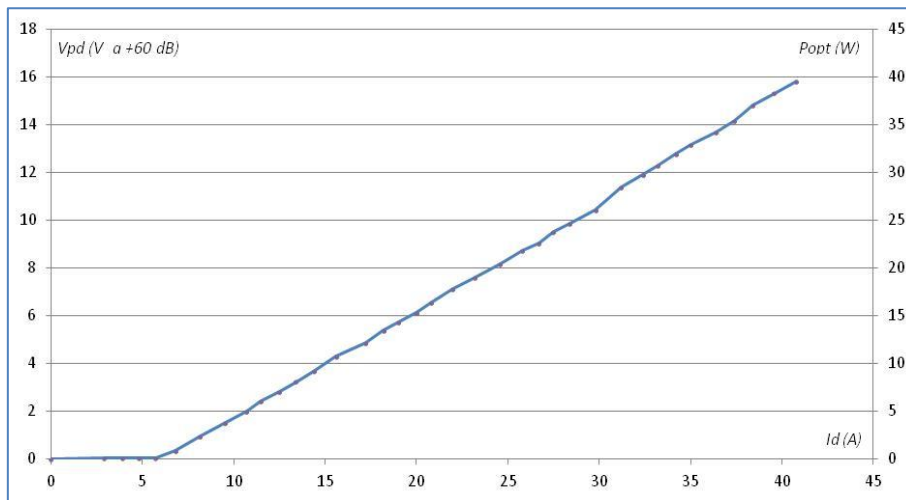


Figura 6: Resposta òptica d'una barra de díodes làser d'alta potència

Per tant, l'increment lineal de la potència òptica amb l'increment de corrent és una característica que s'observa a totes les especificacions disponibles de díodes làser de qualsevol potència i que s'observa també en mesures realitzades en díodes de mitja alta i d'alta potència. Per altra banda, en tot el rang de potències, es pot considerar que la potència òptica per corrents inferiors al de threshold és pràcticament nul·la com també es proposa en el model. Per tot això es pot considerar que el model de resposta proposat serà adequat per cobrir tot el rang de potències del díode làser i en conseqüència per poder modelar-ne la potència òptica de forma genèrica.

2.2.2 Variació del corrent de threshold amb la temperatura.

El corrent de threshold augmenta a l'augmentar la temperatura. Aquesta característica es pot observar clarament en totes les especificacions disponibles de díodes comercials. El fet bàsic és que els díodes làser emeten menys llum a l'augmentar la temperatura. Dit d'altra manera, l'eficiència òptica disminueix amb l'augment de temperatura i de forma paral·lela, la quantitat de corrent injectada al díode necessària per a que s'iniciï l'efecte làser i es comenci a emetre llum també és major a l'augmentar la temperatura. La forma com augmenta el valor d'aquest corrent de threshold amb la temperatura és coneguda, s'ha obtingut de forma empírica, i informació al respecte està disponible, com per exemple a [27]. Aquesta expressió de com augmenta el corrent de threshold amb la temperatura també la trobem utilitzada en la tesi doctoral "Thomas James Slight, 2006, Integration of a Resonant Tunnelling Díode and an Optical Communications Laser" [32]. La variació del corrent de threshold amb la temperatura, segons la teoria empírica segueix l'expressió següent:

$$I_{th}(T) = I_{th1} \cdot e^{\left(\frac{T-T_1}{T_0}\right)} \quad (8)$$

on I_{th1} és el corrent de threshold a la temperatura T_1 . T_0 (K) és un paràmetre que depèn del tipus de semiconductor. De l'expressió (8) obtenim que:

$$T_0 = \frac{T_1 - T_2}{\ln I_{th1} - \ln I_{th2}} \quad (9)$$

on per poder obtenir el valor de T_0 caldrà doncs mesurar el valors dels corrents de threshold I_{th1} i I_{th2} a dues temperatures diferents T_1 i T_2 . Segons aquesta informació, el corrent de threshold creix de forma exponencial amb l'augment de la temperatura. El detall de com varia el corrent de threshold amb la temperatura no és una informació disponible en totes les especificacions dels díodes làser, però en aquelles especificacions en les que sí que es pot trobar, la variació del corrent de threshold augmenta efectivament de forma exponencial tal i com indica la informació de la teoria empírica. L'augment exponencial del corrent de threshold amb la temperatura es pot observar en les especificacions de diversos díodes làser de potència mitja i baixa de diferents fabricants com els ja mencionats SLD1121VS, SLD1132VS, SLD323V i HL6722G, i també als HL7801E [33], ML9xx6 [34] DL-3149-057 [35]. Com a exemple, podem observar aquest augment exponencial del corrent de threshold amb la temperatura en les gràfiques de l'especificació del díode làser de potència mitja, el SLD323V de 1W de Popt, que es mostren a la Figura 7: Variació del corrent de threshold amb la temperatura del díode làser SLD323V de potència mitja [19]. En la gràfica de l'esquerra es mostren les corbes de resposta de la potència òptica respecte al corrent injectat al díode a les temperatures de -10 °C, 0 °C, 25 °C i 30 °C, que d'altra banda també es corresponen amb la forma del model que es proposa, és a dir, Popt nul·la fins al corrent de threshold i a partir d'aquest corrent, increment lineal. El valor del corrent de threshold, punt on comença la recta pendent de la resposta, augmenta amb la temperatura. En la gràfica de la dreta es pot veure l'increment exponencial del valor del corrent de threshold amb la temperatura, tal i com s'indica a la teoria empírica que utilitzarem per al model.

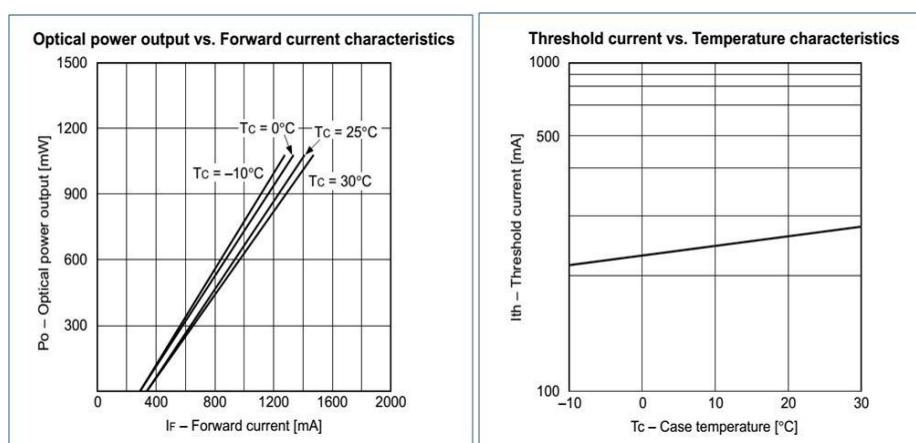


Figura 7: Variació del corrent de threshold amb la temperatura del díode làser SLD323V de potència mitja [19]

Pel que fa a díodes de més alta potència, les especificacions no acostumen a donar aquest tipus de detall, i es concentren a donar informació de les condicions del punt de treball o punt d'operació (corrent i potència òptica, longitud d'ona, espectre de llum, característiques del feix

de llum, tensió, etc...) i a una temperatura donada, normalment a 25 °C, informacions més relacionades amb les necessitats de les aplicacions a les que estan orientades. Per això es fa una nova hipòtesi de treball, basada en la informació anterior, que és que en els díodes d'alta potència la variació del corrent de threshold amb la temperatura també respon a un increment exponencial. Per confirmar aquesta hipòtesi s'han realitzat mesures amb el díode de 8 W i 808 nm d'emissor únic WSLX808008 en una càmera climàtica i amb un sistema de caracterització automàtic de la resposta que es detallarà en capítols posteriors, en el punt 4.3. Se n'ha obtingut la corba de variació del paràmetre de corrent de threshold en el seu rang de temperatura d'operació, $I_{th}(T)$. A la Figura 8: Variació d' I_{th} amb la temperatura en el díode làser de potència mitja alta WSLX808008 es mostra la corba de les mesures obtingudes. La corba de variació del paràmetre del corrent de threshold respon a una exponencial on el denominador de l'exponent és $T_0 = 140.845$ K. Aquest valor és similar als obtinguts en díodes de les mateixes característiques de material semiconductor i longitud d'ona de llum emesa com es mostrarà en capítols posteriors i per tant el podem considerar correcte. Aquestes mesures confirmen que la teoria sobre l'augment exponencial del corrent de threshold també és vàlida per a díodes làser d'alta potència.

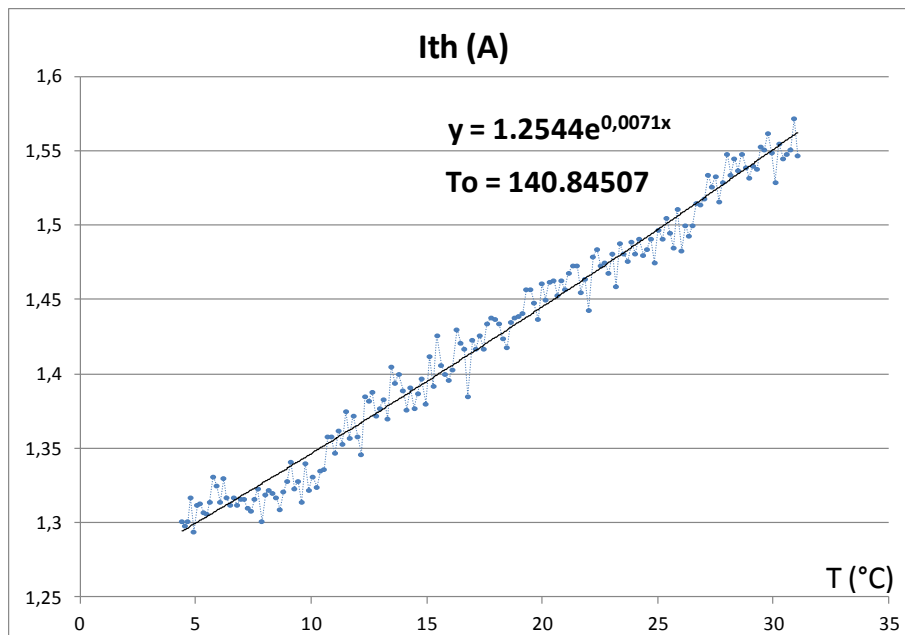


Figura 8: Variació d' I_{th} amb la temperatura en el díode làser de potència mitja alta WSLX808008

2.2.3 Variació de l'eficiència diferencial amb la temperatura.

Respecte a la variació de la corba de resposta òptica del díode làser en front del corrent injectat al díode amb la temperatura, la teoria que s'ha trobat fa referència a que el valor de l'eficiència diferencial (SE) disminueix amb la temperatura, si bé no quantifica com és aquesta disminució. No s'ha trobat en l'estat de l'art informació que ens digui com varia de forma concreta aquest paràmetre SE amb la temperatura. Per poder modelar la resposta ens cal definir exactament com és aquesta variació. En aquest punt s'adopten dues noves hipòtesis de treball, que són que la variació de SE amb la temperatura disminueix de forma lineal i que aquesta disminució lineal de SE es dona en els díodes de tots els rang de potència. Aquestes

hipòtesis es basen en l'observació de les especificacions de díodes làser de baixa i mitja potència, on ja hem comentat que les especificacions són en alguns casos molt detallades, i confirmades amb mesures realitzades en díodes de mitja alta potència. Pel que fa al díodes de baixa i mitja potència, a la Figura 9: Variació de SE amb la temperatura en díodes làser de baixa i mitja potència es mostren les especificacions sobre la variació de SE en el díode de baixa potència HL6722G de 5 mW amb corrent d'operació de 42 mA de HITACHI [28] i en el díode de potència mitja SLD323V de 1 W a 1.4 A, de SONY [19]. En els dos casos veiem que la disminució del paràmetre SE (η_s o η_D - Slope Efficiency o Differential efficiency) és lineal amb l'augment de la temperatura.

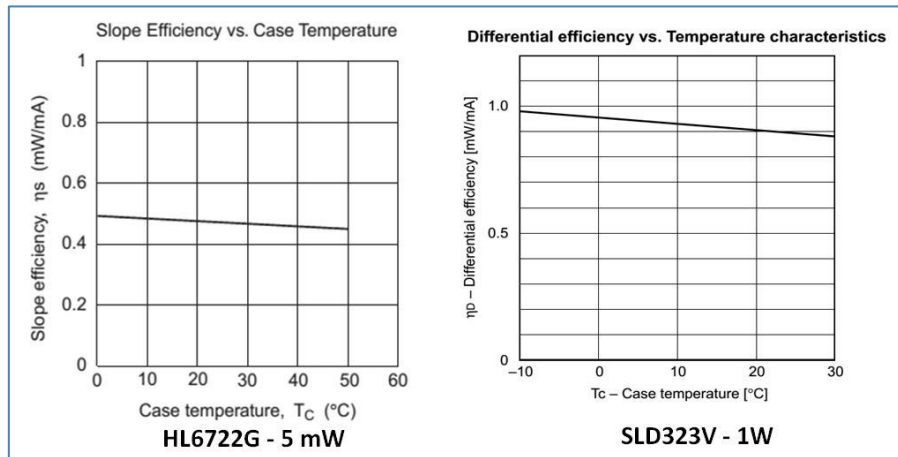


Figura 9: Variació de SE amb la temperatura en díodes làser de baixa i mitja potència

En el cas dels díodes làser de potència alta, com ja s'ha comentat, les especificacions no són prou detallades com per aportar informació sobre la variació del paràmetre SE amb la temperatura, ja que aquest paràmetre fa referència a tota l'excursió de la resposta òptica respecte als valors del corrent al díode i les especificacions dels díodes d'alta potència es centren en la informació del punt d'operació. S'han obtingut doncs els valors de la variació de SE amb la temperatura en el díode de potència mitja alta de 8 W i 808 nm en les mateixes condicions de mesura que en el cas del corrent de threshold. De fet, ambdues mesures s'han obtingut al mateix temps en la càmera climàtica amb el sistema de caracterització automàtica a ser descrit posteriorment. La resposta obtinguda és una disminució lineal del valor del paràmetre amb la temperatura com en el cas dels díodes de potències mitja i baixa, com es mostra a la Figura 10: Variació de SE amb la temperatura en el díode làser de potència mitja alta.

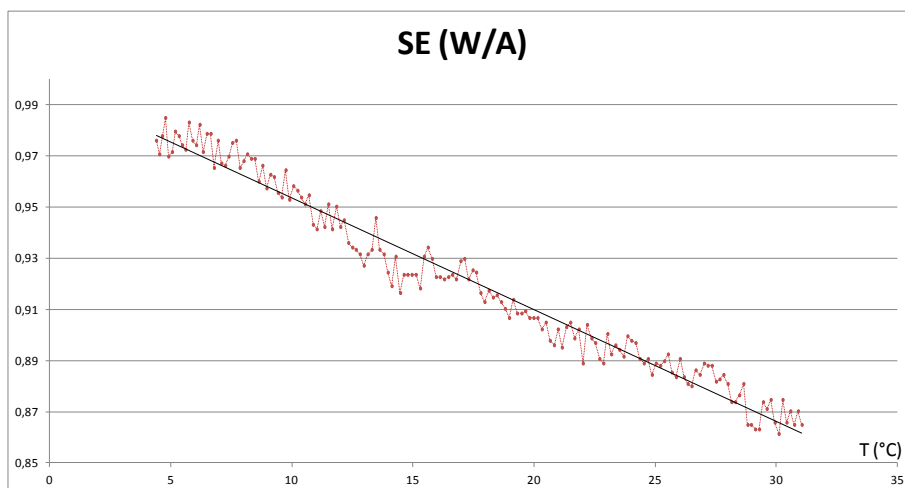


Figura 10: Variació de SE amb la temperatura en el díode làser de potència mitja alta WSLX808008

Amb aquest resultat podem proposar una expressió lineal per a la variació del paràmetre SE amb la temperatura que seria:

$$SE(T) = SE_1 + (T - T_1) \cdot \left(\frac{SE_2 - SE_1}{T_2 - T_1} \right) \quad (10)$$

on SE_1 i SE_2 són els valors del paràmetre mesurats a les temperatures T_1 i T_2 . SE_1 és el valor inicial de la recta de variació, $(T - T_1)$ l'increment de temperatura i $\left(\frac{SE_2 - SE_1}{T_2 - T_1} \right)$ el pendent de la recta, que és negatiu corresponent a la disminució del valor observat ($T_2 > T_1 \Rightarrow SE_2 < SE_1$). Gràficament, aquesta disminució del pendent s'observa clarament en especificacions dels díodes de mitja i baixa potència com la mostrada en la primera gràfica de la Figura 7: Variació del corrent de threshold amb la temperatura del díode làser SLD323V de potència mitja [19] per al díode SLD323V de 1 W, i també en les mostrades a la Figura 11: Disminució de SE amb la temperatura en díodes de baixa potència dels díodes làser HL7801E de 5 mW de HITACHI [33] i el ML9xx6 de 10 mW de MITSUBISHI [34], on es veu com la pendent de la recta que representa la resposta òptica del díode làser en la zona d'emissió disminueix i la recta s'inclina progressivament cap a la dreta a mesura que la temperatura augmenta.

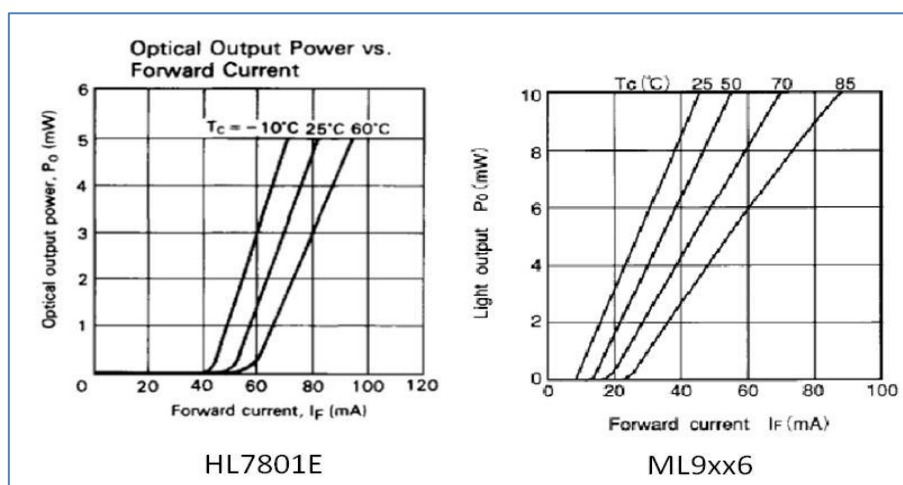


Figura 11: Disminució de SE amb la temperatura en díodes de baixa potència

A l'igual que en al cas de l'expressió del corrent de threshold amb la temperatura, per obtenir l'expressió de la variació de SE amb la temperatura també ens cal mesurar aquest paràmetre a dues temperatures diferents.

2.2.4 Proposta de model de la potència òptica del díode làser amb variació de la temperatura

Introduint les expressions de les variacions d' $I_{th}(T)$ i de SE (T) amb la temperatura a l'expressió del model de resposta òptica del díode làser a temperatura constant obtenim el model matemàtic de la variació de la resposta òptica del díode làser amb la seva dependència de la temperatura $P_{opt}(T)$. Introduint doncs aquesta dependència de la temperatura a (7) obtenim :

$$\begin{aligned} P_{opt}(T) &= 0; && \text{per a } Id \leq I_{th}(T) \\ P_{opt}(T) &= SE(T) \cdot (Id - I_{th}(T)); && \text{per a } Id \geq I_{th}(T) \end{aligned} \quad (11)$$

I substituint-hi les expressions de les variacions dels paràmetres $I_{th}(T)$, (8) i SE(T), (10) formulades en els apartats anteriors, obtenim l'expressió completa del model de temperatura de la resposta de la potència òptica en els díodes làser, que és :

$$\begin{aligned} P_{opt}(T) &= 0; && Id \leq I_{th}(T) \\ P_{opt}(T) &= \left(SE1 + (T - T1) \left(\frac{SE2 - SE1}{T2 - T1} \right) \right) \left(Id - I_{th1} \cdot e^{\left(\frac{T - T1}{T0} \right)} \right); && Id \geq I_{th}(T) \end{aligned} \quad (12)$$

on el valor de T_0 s'obté amb l'expressió (9).

Per tant, per poder formular el model de la potència òptica incloent-hi la variació amb la temperatura $P_{opt}(T)$ ens caldrà mesurar els valors dels paràmetres I_{th} (corrent de threshold) i de SE (Slope Efficiency) al menys a dues temperatures diferents. Si bé no caldria que les temperatures a les que es mesuressin els dos paràmetres fossin les mateixes, és convenient que aquestes temperatures corresponguin a valors el més diferents possible i dins del marge funcional d'operació del díode per a minimitzar la relació entre el possible error en la mesura i el valor de l'increment de temperatura, i per tant l'efecte que en pugui tenir en el càlcul. A efectes pràctics, les mesures es realitzaran amb el sistema de caracterització automàtic descrit posteriorment en el punt [4.3](#) que n'obté els dos valors del corrent de threshold i de l'eficiència diferencial alhora i a les mateixes temperatures per al dos paràmetres.

3 Model Pspice

El model de simulació Pspice que es proposa per a díodes làser es basa en models de dispositius ja existents i que es poden trobar en les llibreries del programa. La no existència de models matemàtics de la resposta de la potència òptica de díodes làser que incloguin les dependències amb la temperatura implica que tampoc no les incloguin els models de díodes làser disponibles en aquestes llibreries. És aquesta la contribució que es fa en aquest, la inclusió del model matemàtic de la potència òptica proposat en el capítol anterior en l'esquema de simulació dels dispositius de díode làser en Pspice i en el seu model programat. Per poder fer això s'haurà d'escollir la forma d'especificar la resposta dels elements que en componen el model del circuit de simulació en combinació amb les capacitats de que disposa la programació en Pspice per poder incloure-hi les variacions de la temperatura i el model matemàtic que en defineix la seva dependència. Els models en Pspice existents dels dispositius de díodes làser inclouen a més del propi díode làser un díode fotodetector o fotodíode per poder convertir la potència òptica emesa pel díode làser a valors de corrent elèctric i poder per tant incloure'n la resposta en la simulació del programa com a elements d'un circuit electrònic. El model de circuit Pspice inclou, a més del díode làser i del díode fotodetector, fonts de corrent i tensió que s'utilitzen per convertir el corrent del díode làser en valors de potència òptica representats per tensions, i aquestes tensions en corrent al fotodetector. És doncs en les funcions de transferència d'aquestes fonts on s'hauran d'incloure les expressions matemàtiques del model proposat.

3.1 Circuit Pspice per al modelat de la potència òptica

L'esquema del model Pspice per a un dispositiu de díode làser que s'utilitza, detallant-ne el components que en formen part, es mostra a la Figura 12: Model Pspice d'un díode làser a continuació.

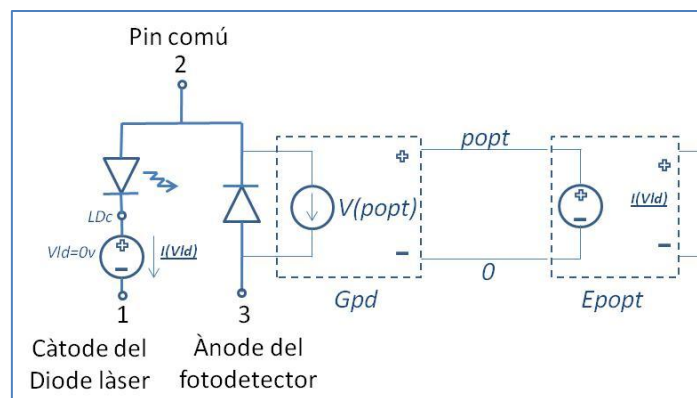


Figura 12: Model Pspice d'un díode làser

Es tracta d'un dispositiu de tres terminals, un pin (2) comú al dos díodes connectat a l'ànode del díode làser i al càtode del fotodíode, un altre pin (1) que és el càtode del díode làser i un tercer pin (3) que és l'ànode del fotodíode, formant una configuració que es coneix com a ànode comú. El valor del corrent a través del díode làser és el valor que ens definirà la resposta de la potència òptica segons els models formulats en el capítol anterior. Per poder disposar del valor numèric d'aquest corrent s'utilitza una font de tensió en sèrie al díode, amb tensió nul·la

($V_{ld}=0$), entre els nodes LDC (càtode del component Laser Diode) i el pin terminal 2, de forma que el corrent que hi passa $I(V_{ld})$ és el que passa pel díode làser. La relació entre el corrent al díode i la potència òptica es modela amb una font de tensió controlada per tensió (E_{popt}). El valor de la tensió de control és el del corrent al díode làser $I(V_{ld})$. El valor de la tensió a la sortida d'aquesta font, al node popt, és el corresponent a la potència òptica $V(popt)$. Per tant, a la funció de transferència d'aquesta font de tensió E_{popt} és on s'hauran d'incloure les expressions del model matemàtic de la potència òptica. Per convertir la potència òptica representada per $V(popt)$ al corrent que passa pel fotodetector, s'utilitza una altra font, en aquest cas de corrent controlada per tensió (G_{pd}). La tensió de control és $V(popt)$ i el corrent de sortida de la font, connectada en paral·lel al fotodíode, polaritzat inversament, en simula el corrent que hi passa. El corrent a través del díode fotodetector del model, modelat per un díode en polarització inversa, és per tant nul·la en polarització directa i conseqüentment tot el corrent entre els terminals càtode i ànode del fotodetector és el que força la font controlada de corrent. El díode fotodetector és pot obviar en polarització directa, que és com es modela la potència òptica, i així es pot fer en el model programat, si bé es manté en el circuit per ajudar a il·lustrar-ne el funcionament. La funció de transferència d'aquesta font és la corresponent a la resposta en corrent del fotodíode a la potència òptica detectada, o sensibilitat del fotodíode. Aquesta resposta és lineal i pràcticament invariable amb la temperatura. De tota manera, l'objectiu d'incloure el fotodíode, o millor la font de corrent, en el circuit de simulació és el de poder mesurar amb un paràmetre elèctric de corrent la potència òptica emesa. Les variacions de la potència òptica amb la temperatura, que és el que es pretén modelar, no n'estan relacionades. El díode làser, i el fotodíode si s'inclou en el programa, utilitzen la llibreria existent de model del díode en Pspice.

Es podria haver optat per altres solucions per modelar el funcionament descrit, com per exemple altres configuracions de connexió entre els díodes, o díodes separats, o bé una sola font de corrent controlada per tensió amb una funció de transferència que fos el producte de les de E_{popt} i G_{pd} exposades. També es podria haver optat per obtenir una tensió en el fotodíode com a resultat de la conversió de la potència òptica utilitzant una altra font de tensió controlada per tensió, situació més adequada per a configuracions on el fotodíode és extern i del que se'n mesura la tensió. Com que el que realment es pretén és modelar la potència òptica, aquesta solució és vàlida per tots els casos, si bé, és clarament indicada per a dispositius on el díode làser i el fotodíode estan muntats en el mateix encapsulat. Aquest és el cas de la majoria de díodes làser d'emissor únic, és a dir, des de díodes de baixa potència fins a potències de 8 W com el WSLX808008 esmentat anteriorment. La conversió a corrent de la potència òptica és la solució més indicada també per a circuits realimentats on s'utilitza el corrent al fotodetector per controlar aquesta realimentació. Respecte a utilitzar dues fonts, els avantatges de fer-ho de la forma descrita és per una banda que s'independitza la resposta en potència òptica del díode làser de la sensibilitat del fotodetector, i sobretot que la funció de transferència de la font E_{popt} és directament la resposta de la potència òptica mesurada o proporcionada per les especificacions dels dispositius. De cara a la inclusió de les expressions del model matemàtic de la resposta en potència òptica i la seva dependència amb la temperatura, estarà limitada doncs a la funció de transferència de la font E_{popt}.

3.2 Inclusió de les variacions de temperatura de la potència òptica en el model Pspice

Per poder incloure la variació de la temperatura en el model definim un paràmetre, Tvar, que es controla durant l'execució del programa Pspice assignant-li els valors de temperatura a les que es vol fer la simulació. Aquest paràmetre es correspon amb la variable temporal (T) del model matemàtic. Se suposa que l'únic element del circuit electrònic que augmenta de temperatura per l'efecte làser és el propi dispositiu. Per a que els valor de temperatura que va adquirint la variable Tvar s'assignin exclusivament al díode làser independentment de la resta de components del circuit en el que es simula s'utilitza el paràmetre de temperatura del programa Pspice T_ABS en el model del díode làser, igualant-lo a la variable Tvar. L'expressió de la variació de la potència òptica amb la temperatura en els díodes làser és la formulada en (11) i (12). Aquesta expressió ha d'estar inclosa en la funció de transferència de la font Epopt, la font que modela la relació entre el corrent al díode làser i la potència emesa de llum. La funció de transferència d'una font controlada es pot especificar de diferents maneres en Pspice. L'escollida per poder incloure-hi l'expressió (12) és la que utilitza la forma VALUE limit {{Popt(T),0,max}}, que el que indica és que els valors a la sortida són els de la funció Popt(T) acotats entre 0 i un màxim. Referint-nos al model de la Figura 12: Model Pspice d'un díode làser i introduint (11) ens queda que la funció de transferència de la font Epopt, amb tensió de control I(Vld) i tensió de sortida entre els nodes popt i 0 és:

$$\text{Epopt popt 0 VALUE \{limit (SE(Tvar)\cdot(I(Vld) - I_{th}(Tvar)), 0,max)\}} \quad (13)$$

i utilitzant l'expressió ja amb els valors concrets dels paràmetres del model (12) :

$$\text{Epopt popt 0 VALUE\{limit((SE1 + (Tvar - T1) \left(\frac{SE2-SE1}{T2-T1}\right))(I(Vld) - (I_{th1} \cdot e^{\frac{Tvar-T1}{T_0}}))),0,max)\}} \quad (14)$$

Pel que fa al díode fotodetector, la conversió de la potència òptica en corrent a través de la font de corrent Gpd controlada per la tensió V(popt), atenent a que la relació potència òptica corrent al fotodetector és lineal, és suficient per a fer-la amb un punt de la recta de resposta, que en defineix la seva sensibilitat. El díode fotodetector en polarització inversa no condueix i per tant es pot realment eliminar del programa. Qualsevol variació depenent de la temperatura en la conversió potència a corrent s'hauria d'incloure en la funció de la font Gopt. De tota manera, la resposta del fotodíode és pràcticament independent de la temperatura i no cal considerar-ne cap variació. Aquesta conversió Popt/Ipd lineal independent de la temperatura es fa amb la forma de definició de la funció de transferència TABLE, de manera que la expressió de Gpd entre el nodes terminals 2 i 3 és:

$$\text{Gpd 2 3 TABLE \{V(popt)\}(0,0)(Popt_1, Ipd_1)} \quad (15)$$

on Ipd₁ és el corrent generat en el fotodetector quan s'emet la potència òptica Popt₁, 2 és el càtode del fotodíode, pin comú en el model del circuit, i 3 n'és l'ànode.

3.3 Programa del model en Pspice.

Els valors dels paràmetres corresponents al model elèctric Is, Rs, N, EG i XTI s'obtenen de la manera indicada en el capítol anterior. Igualment que els valors del model de potència òptica I_{th1}, I_{th2}, SE₁, SE₂, i T₀ a les temperatures T₁ i T₂. En el model Pspice del díode, el valor de N=1 i el

de $XTI=3$ són per defecte, i per tant no cal especificar-los. Cal indicar que en Pspice la temperatura nominal és de 27 °C, tot i que pot canviar-se utilitzant les opcions del programa Pspice. El valor d'Is depèn de la temperatura segons l'expressió (6). Per tant, el valor del paràmetre Is a ser introduït en el model, si no es canvia la temperatura nominal TNOM, ha d'haver estat mesurat a 27 °C, o si s'ha mesurat a una altra temperatura, obtenir-ne el valor a 27 °C aplicant l'expressió (6). Per a la resta de paràmetres s'utilitzen els valors per defecte que s'inclouen en el model del díode de la llibreria de Pspice. Tot i que no afecta a la resposta en potència òptica que estan definides per la funció de transferència abans indicada en polarització directa, algunes especificacions indiquen el valor del paràmetre BV, tensió inversa de ruptura, que es pot incloure en el programa. El seu valor per defecte és infinit, és a dir, que no hi ha tensió de ruptura en polarització inversa i mai no condueix en aquesta situació. Com s'ha dit, no afecta al model de la potència òptica que es produeix en polarització directa. El programa genèric del model Pspice és el que s'indica a la Figura 13: Programa Pspice genèric del model de potència òptica d'un díode làser, generat tal i com s'ha mostrat en l'apartat anterior i respecte al model de circuit Pspice indicat.

```

• Model Pspice d'un díode làser
.param Tvar 25
.SUBCKT dispositiulàser 1 2 3
Dlaserdíode 2 LDc laserdíode
Vld LDc 1
Epopt popt 0 VALUE {limit(((SE1+(Tvar-T1))*((SE2-SE1)/(T2-T1)))*(I(Vld)-(Ith1*exp((Tvar-T1)/To))),0,max)}
Gpd 2 3 TABLE {V(popt)}{0,0}{Popt1,Ipd1}
.model laserdíode D (T_ABS={Tvar}) IS= RS= EG= ; N=1 XTI=3 per defecte; BV= valor especificació
.ends

```

Figura 13: Programa Pspice genèric del model de potència òptica d'un díode làser

En primer lloc, en el programa del model es defineix la variable Tvar, amb un valor per defecte de 25 °C, però els valors que prendrà són els que es definiran en l'execució de la simulació. S'inicia la definició dels paràmetres del component o subcircuit "dispositiulàser" entre les comandes del programa .SUBCKT i .ends, començant pels pins terminals del component 1, 2 i 3, segons el model del circuit de l'apartat anterior. A continuació s'especifica el nom del component díode làser "Dlaserdíode" amb els nodes terminals i el nom del model que utilitzarà, "2 , LDc, laserdíode", és a dir, pin 2 que és el pin comú del dispositiu i ànode del díode làser, LDc que és el node càtode del component díode, i laserdíode que és el nom que s'utilitzarà del model del díode on s'inclouran els valors dels seus paràmetres. De la mateixa manera es defineix la font connectada en sèrie al díode làser "Vld LDc, 1", on Vld és el nom de la font de tensió, LDc el node positiu de la font, i 1 el node negatiu de la font i pin terminal càtode del díode làser en el dispositiu. S'inclouen les funcions de transferència de les fonts de tensió i corrent descrites en l'apartat anterior, i finalment es relaciona al nom del model assignat al díode "laserdíode" el model del díode D de la llibreria Pspice, especificant els valors dels seus paràmetres. En aquest punt és on s'assigna el valor de la temperatura del díode làser T_ABS igual a la variable Tvar, de forma que el díode làser va prenent els valors de temperatura de Tvar, amb lo qual la resposta elèctrica del díode làser s'adequa a aquesta temperatura. Els valors obtinguts dels paràmetres de la resposta elèctrica del díode Is, Rs i EG s'introdueixen en aquest punt en el model del díode.

4 Mètode de caracterització de la resposta de la potència òptica als díodes làser

El problema principal en la mesura de la resposta òptica dels díodes làser i la seva dependència amb la temperatura és que la injecció de corrent al díode varia la temperatura del dispositiu durant la mesura. Davant d'aquest fet es poden utilitzar sistemes de condicionament de la temperatura com els ja esmentats de les cel·les Peltier, circuits refrigeradors, càmeres climàtiques, etc. Però en qualsevol cas, si el temps d'emissió de llum és prou llarg, la unió p-n del semiconductor tendeix a escalfar-se i la temperatura real del semiconductor i la que es mesura en l'element que en controla la temperatura és diferent. És per això que per mesurar la potència òptica a una temperatura donada de la forma més correcta possible es proposa minimitzar els temps de funcionament del dispositiu durant la mesura i confirmar que no hi ha variació de la temperatura amb la supervisió de la variació de la longitud d'ona de la llum emesa.

4.1 Mètode de mesura en fred

Per mesurar correctament és important que el temps des de que s'ha iniciat el pas de corrent pel díode làser i durant el que es fa la mesura no sigui prou llarg com per a que la unió semiconductor s'hagi escalfat significativament. Per altra banda, durant aquest temps curt, s'ha d'haver assolits nivells de potència òptica suficients com per a poder caracteritzar la seva relació respecte al corrent que passa en tot o en gran part el seu marge de funcionament. El mètode que es proposa és obtenir les dades de mesura necessàries utilitzant un únic pols de corrent, amb prou amplitud com per assolir la potència òptica d'operació del díode, i només en el seu flanc de pujada, desestimant-ne les dades posteriors, corresponents a la part alta del pols i al flanc de baixada. El flanc de pujada ha de ser el més curt possible. D'aquesta manera es pretén que les condicions de temperatura en les que s'han adquirit les dades de la mesura no hagin variat. Per il·lustrar aquest mètode es mostra en la Figura 14: Formes d'ona de P_{opt} i I_d als díodes làser utilitzades per la mesura en fred els polsos de corrent utilitzats en el cas dels dos díodes de 8 W i 40 W. En la figura es mostren els senyals corresponents a P_{opt} , la potència òptica o voltatge mesurat en el fotodíode, a I_d o corrent que passa pel díode làser, i el senyal de sincronisme o trigger que s'utilitzarà per a l'adquisició de les dades. Els temps del flanc de pujada del pols de corrent I_d són de 40 μs en el cas del díode de 8 W i de 20 μs en el cas del díode de 40 W. És durant aquests temps que es mesurarà la relació entre els valors del corrent i de la potència òptica emesa P_{opt} . El pols de la P_{opt} s'inicia posteriorment al del corrent I_d . Això és degut a que per a valors de corrent inferiors al del de threshold no hi ha emissió de llum. El senyal de trigger s'utilitzarà per a limitar el nombre de mostres de l'adquisició a les corresponents al flanc de pujada, i desestimar així les dades de la resta del pols. D'aquesta manera les dades utilitzades per a fer la mesura són les corresponents a l'inici de l'emissió de llum i per tant en les que l'escalfament degut a l'efecte làser és menor. D'aquesta manera s'optimitza l'adquisició de les dades respecte a l'augment de la temperatura i l'anomenem per tant mesura en fred.

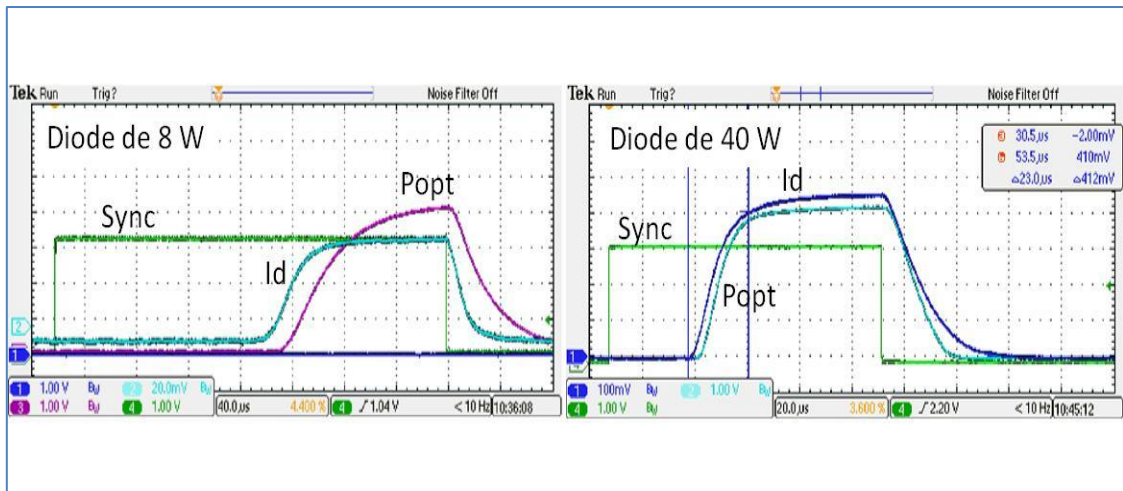


Figura 14: Formes d'ona de Popt i Id als díodes làser utilitzades per la mesura en fred

4.2 Entorn de mesura

L'entorn de mesura estarà format per:

- el díode que es vol caracteritzar
- un driver o controlador de corrent que n'injectarà el corrent de la forma adequada per a fer-ne la caracterització segons el mètode de mesura en fred comentat. Per mesurar el corrent que passa pel díode s'ha utilitzat una sonda magnètica, o bé s'ha mesurat el corrent a partir d'una referència proporcionada pel driver, com és la tensió en una resistència shunt en sèrie amb el díode làser
- un fotodíode per mesurar la potència de llum emesa durant el flanc de pujada del pols.
- una targeta d'adquisició de dades que obtingui els valors del corrent i la potència òptica durant el flanc de pujada del pols
- una esfera integradora que permetrà treballar amb díodes d'alta potència
- un espectròmetre per supervisar la temperatura de la unió p-n durant la mesura
- i finalment per un ordinador des d'on es controlarà la targeta d'adquisició de dades, se n'obtidran les mesures i es realitzaran els càlculs necessaris per a la caracterització de la resposta. També s'utilitzarà per controlar el driver segons els casos i per obtenir la mesura de l'espectròmetre.

Segons el tipus de driver també s'haurà d'incloure un generador de funcions per obtenir el pols i el flanc de pujada desitjats, si el propi driver no n'és capaç de generar-lo. També s'ha d'utilitzar almenys un cop mesuradors de la potència òptica per poder mesurar l'atenuació de l'esfera integradora i poder calibrar el sistema de mesura. S'han utilitzat també oscil·loscopis a efectes de supervisió del senyals a mesurar. La Figura 15: Sistema de mesura i caracterització de la resposta òptica (esquema i imatge) mostra l'esquema de l'entorn de mesura per a la caracterització de la potència òptica dels díodes làser segons el mètode de la mesura en fred i una imatge dels diferents elements que el componen.

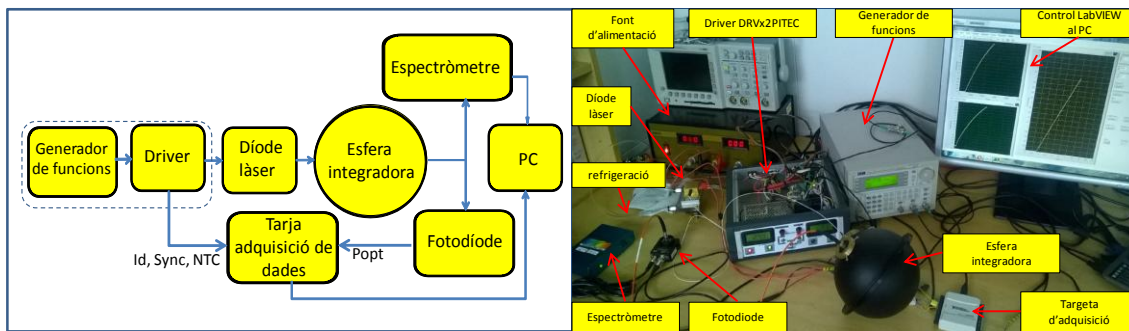


Figura 15: Sistema de mesura i caracterització de la resposta òptica (esquema i imatge)

4.2.1 Driver o controlador de corrent

Cal un controlador de corrent o driver que pugui proporcionar polsos amb un temps de pujada el menor possible, que per altra banda també dependrà del propi díode i de la seva resistència. També ha de poder proporcionar l'amplitud necessària per recórrer tot el marge d'operació funcional de díode que es vol caracteritzar. En el cas del polsos mostrats a la Figura 14: Formes d'ona de Popt i Id als díodes làser utilitzades per la mesura en fred s'ha utilitzat el driver DAE-20050 [36] i se n'obtenen polsos amb temps de pujada del voltant dels 40 μ s en el díode de 8 W d'emissor únic WSLX808008 i de 20 μ s en una barra de díodes de 40 W de potència òptica. Aquest driver és capaç de proporcionar polsos de durada a partir de 100 μ s i flancs de pujada de fins tant sols 20 μ s. En el cas d'utilitzar drivers que no generin polsos internament, com és el cas del DRVx2PITEC [37][38] també utilitzat en aquesta recerca, cal afegir un generador de funcions que els generi connectat a la seva entrada de control.

En la Figura 14: Formes d'ona de Popt i Id als díodes làser utilitzades per la mesura en fred el corrent a través dels díodes Id s'ha mesurat amb una sonda magnètica, 6 A (60 mV a 10 mV/A) en el cas del díode de 8 W i 45 A (450 mV a 10 mV/A) en el del díode de 40 W. Aquest valor de voltatge mostrat en l'oscil·loscopi es pot mesurar a la targeta d'adquisició de dades.

4.2.2 Fotodíode

El fotodíode mesura el valor de la potència de la llum emesa pel díode làser. Aquest valor és en forma de voltatge i es pot mesurar directament a la targeta d'adquisició de dades. Per obtenir el valor de la potència òptica corresponent als valors de voltatge mesurat cal tenir-ne una referència o relació entre el corrent al díode Id i la potència de llum emesa Popt, que s'haurà obtingut a partir de mesures fetes amb un mesurador de potència i que permet calibrar la mesura. El fotodíode que s'utilitza en el nostre cas és el PDA-100A-EC [39] que inclou un amplificador de fins a +70 dB per ajustar el nivell de senyal a ser mesurat pel fotodíode.

4.2.3 Esfera integradora i calibració del sistema

L'esfera integradora s'utilitza principalment per poder treballar amb díodes d'alta potència, la sortida dels quals no es podria connectar directament a un fotodíode ja que en superaria el seu límit de sensibilitat. L'alternativa a l'esfera integradora seria, i és en el cas de no disposar-ne, col·locar el fotodíode a una certa distància en visió directa o reflectida de forma que el fotodíode només rep part del feix de llum emès. Aquest sistema implica problemes derivats de la direccionalitat del feix de llum i sobretot, d'inestabilitat del sistema a nivell mecànic ja que

una lleugera variació en la posició o direcció del fotodíode o del díode làser implica una important variació en la potència detectada. Per altra banda, l'esfera integradora és molt adequada per treballar amb díodes i barres de díodes d'alta potència que no disposen d'una sortida ja implementada adaptada a fibra òptica que es pugui connectar directament al fotodíode. L'esfera integradora introdueix per tant atenuació i depenent de la potència de llum del díode amb el que es treballi caldrà adaptar-ne el nivell de potència de llum a la sortida i abans del fotodíode com s'ha comentat.

Per calibrar el sistema cal mesurar el nivell de potència òptica que emet el díode làser a un cert nivell de corrent directament a la sortida del díode amb un mesurador de potència òptica, i mesurar el voltatge detectat al fotodíode amb el mateix nivell de corrent un cop muntada l'esfera integradora, les fibres òptiques de connexió i adaptat el nivell de l'amplificador del fotodíode. Així se n'obté el factor de correcció o calibrat del voltatge detectat al fotodíode respecte a la potència òptica emesa P_{opt} . En el nostre cas s'han utilitzat sensors tèrmics de potència òptica de fins a 10 W i 50 W segons el díode làser [40][41] amb el corresponent mesurador d'energia [42].

La sortida de l'esfera integradora es bifurca amb fibra òptica per poder mesurar-ne l'espectre de llum també amb un espectròmetre a efectes de supervisió de la temperatura.

4.2.4 Control de la temperatura del díode a partir de la longitud d'ona emesa

Es controla que no hi ha hagut derives de la temperatura del semiconductor amb la supervisió de l'espectre de la longitud d'ona emesa pel làser, mitjançant espectròmetres. Pel que fa a la supervisió de l'espectre, és conegut que la longitud d'ona que emet un díode làser varia amb la temperatura amb el també conegut com a coeficient de longitud d'ona amb la temperatura $\Delta\lambda/\Delta T$ (nm/°C) que ens dóna la variació del valor de la longitud d'ona per °C. Per exemple, per al díode de 8 W i de 808 nm aquest valor és de 0.3 nm/°C segons l'especificació del fabricant i confirmat amb mesures reals. El valor mesurat en la barra de díodes de 40 W és de 0.28 nm/°C. En la Figura 16: Mesures del coeficient de longitud d'ona en els díodes de 808 nm i de 8 W i 40 W es mostra el valor mesurat del coeficient de la longitud d'ona en el díode de 8 W i 808 nm amb dos espectròmetres diferents, el Blue-Wave de StellarNet [43] i el Avantes AvaSpec-2048-SPU2 [44]. En ambdós casos el valor mesurat és 0.3 nm/°C i coincideix amb l'especificació del fabricant. També es mostra el valor del coeficient de la longitud d'ona mesurat en la barra de díodes de 40 W amb l'espectròmetre HighFinesse Angstrom [45]. En aquest cas el valor obtingut és de 0.28 nm/°C.

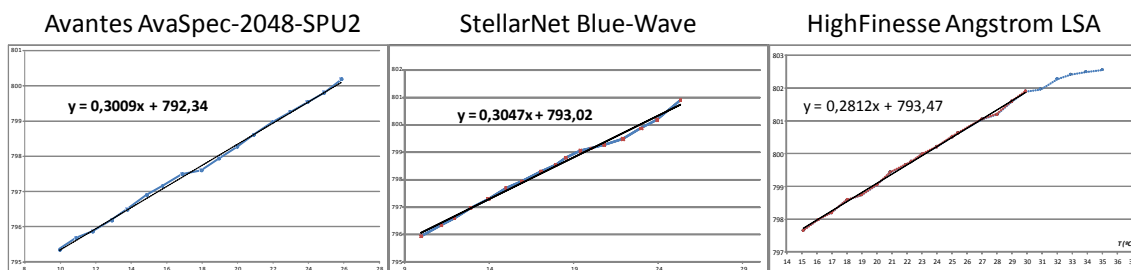


Figura 16: Mesures del coeficient de longitud d'ona en els díodes de 808 nm i de 8 W i 40 W

L'altre paràmetre important en aquest sistema de control de temperatura és el FWHM (Full Width at Half Maximum) que ens dona una mesura de l'ample de l'espectre. Aquest valor en

nm també és normalment especificat pel fabricant. Per exemple en el cas del díode de 8 W és de 3 nm segons especificació. En la barra de díodes làser de 40 W és també de 3 nm segons mesures. Coneixent l'ample de l'espectre especificat i sabent que la longitud d'ona canvia amb la temperatura, si es comprova que l'espectre de la llum emesa durant la mesura es manté constant i no supera l'ample especificat del paràmetre FWHM ens assurem que no hi ha hagut deriva de la longitud d'ona degut a una variació de la temperatura. A la Figura 17: Control de la temperatura amb el paràmetre FWHM de l'espectre de llum es mostren els espectres mesurats del díode de 8 W a l'esquerra i la barra de díodes de 40 W a la dreta amb l'espectròmetre Blue-Wave de StellarNet, que ja ens proporciona directament el valor del paràmetre FWHM, que és de 2.99 nm, i que coincideix doncs amb l'especificació del fabricant del díode de 8 W. Al no superar el valor de FWHM els 3 nm de l'especificació implica que durant el pols de corrent que s'ha utilitzat per obtenir aquest espectre no hi ha hagut un increment de la temperatura en la unió p-n del semiconductor, i que per tant la mesura realitzada es pot considerar feta a temperatura constant, que és l'objectiu. Els polsos utilitzats en l'obtenció d'aquest espectre són els mostrats a la Figura 14, de durada 100 μ s. La nostra mesura es farà realment només durant el flanc de pujada com s'ha indicat anteriorment, flancs d'uns 20 o 40 μ s en aquest casos, el que significa que la deriva de temperatura seria en tot cas encara menor que la que poguéis provocar tot el pols de corrent que es mesura en l'espectròmetre, tot i que com veiem en l'espectre, no hi ha deriva alguna en aquestos casos.

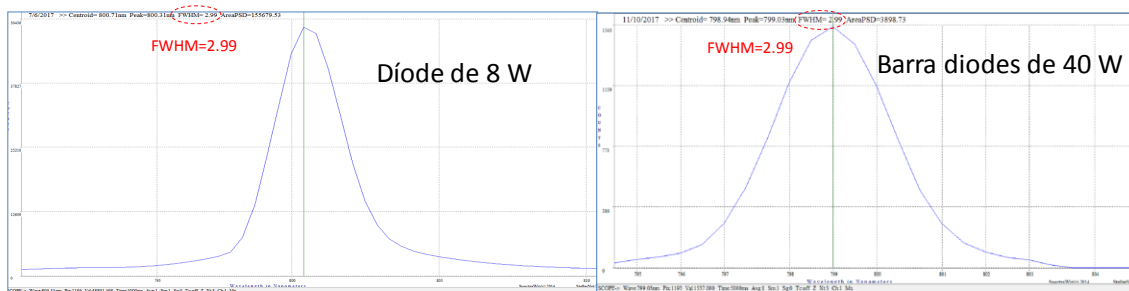


Figura 17: Control de la temperatura amb el paràmetre FWHM de l'espectre de llum

4.2.5 Targeta d'adquisició de dades

Per a poder adquirir suficient nombre de dades durant un període tant curt de temps s'ha utilitzat targetes d'adquisició de dades d'alta velocitat de mostreig per la mesura ha estat necessari utilitzar targetes amb canals d'adquisició de dades simultània (síncrona), per evitar retards en l'adquisició entre els canals en el cas que no ho siguin. És necessari sincronitzar l'inici de l'adquisició o trigger i el nombre de dades obtingudes per processar només les dades corresponents al flanc de pujada. La velocitat d'adquisició de dades o de mostreig és tal que permeti obtenir un nombre suficient de dades durant els fins a tant sols 20 μ s del temps de durada del flanc de pujada. S'han utilitzat dues targetes d'adquisició de dades durant aquesta recerca, la NI USB6009 [46] i la NI PCI-6115 [47].

La primera de les targetes s'ha utilitzat en díodes de poca potència i fins als 8 W del WSLX808008, amb polsos de durada relativament llarga de fins a 5 ms, generats pel generador de funcions i connectats al díode a través d'un driver com és el cas de l'esmentat DRVx2PITEC. Aquesta targeta d'adquisició no disposa de canals independents, el mostreig és seqüencial quan s'adquireixen varis canals. La velocitat màxima de mostreig de 48 ks/s es divideix entre el dos canals de mesura, el de la potència òptica (Popt) o voltatge al fotodíode (Vpd) i un segon

canal per la mesura del corrent injectat al díode làser (Ild) mesurat en el voltatge d'una resistència shunt interna al driver (Vshunt). Això implica que la velocitat de mostreig per canal és de 24 ks/s. En polsos de flanc de pujada de 5 ms representa unes 120 mostres per canal. També implica que hi ha un retard entre les mesures dels dos canals d'uns 42 μ s que cal considerar en el processament de les dades obtingudes. A la Figura 18 es mostra la mesura obtinguda amb aquesta targeta en el panell de control de LabVIEW, programa que s'utilitza per al seu control, i la característica de la resposta de la potència òptica respecte al corrent injectat al díode làser (Popt/Ild). Amb el mateix programa desenvolupat en LabVIEW es processen les dades per obtenir-ne els valors dels paràmetres Ith i SE i aplicar els factors de correcció corresponents. Aquest factors de correcció són deguts al calibratge de la tensió al fotodíode respecte a la potència òptica mesurada amb el mesurador de potència tèrmic i el valors corresponents a la relació entre el valor mesurat de la tensió a la resistència shunt amplificada i filtrada i el valor corresponent del corrent al díode làser. El programa calcula el pendent de la relació entre la potència òptica i el corrent injectat SE i el valor del corrent de threshold Ith. També s'hi inclou el valor de la temperatura a partir de la mesura realitzada amb un termistor NTC, en aquest cas inclòs en el mateix dispositiu WSLX808008 i controlat a través del driver. L'adquisició de les dades i el càlcul dels paràmetres de la resposta Popt/Ild es realitzen periòdicament i en el flanc de pujada d'un únic pols de durada 5 ms com es pot observar en la gràfica de la Figura 18. Aquest és un sistema periòdic d'adquisició de dades que permetrà ser programat i ser utilitzat amb sistemes de caracterització automàtics de la resposta del díode en funció de la temperatura, com s'explicarà més endavant.

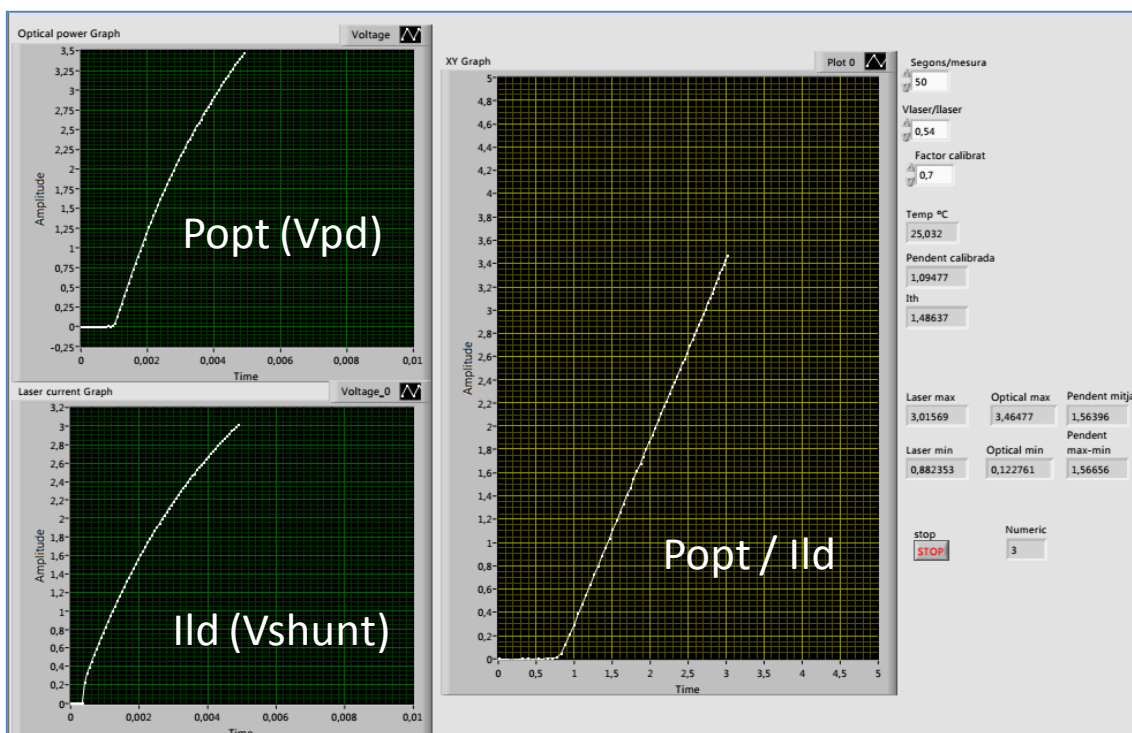


Figura 18: Adquisició de dades del díode WSLX808008 amb la targeta NI USB6009

Es comprova també que l'espectre de la llum emesa durant el pols de 5 ms no presenti deriva de la longitud d'ona i per tant de la temperatura de la forma indicada anteriorment, a partir de la supervisió del valor del paràmetre FWHM. La Figura 19 mostra l'espectre obtingut amb

l'espectròmetre Avantes AvaSpec-2048-SPU2, a dues temperatures diferents on es comprova que aquest paràmetre pren valors inferiors als 3 nm.

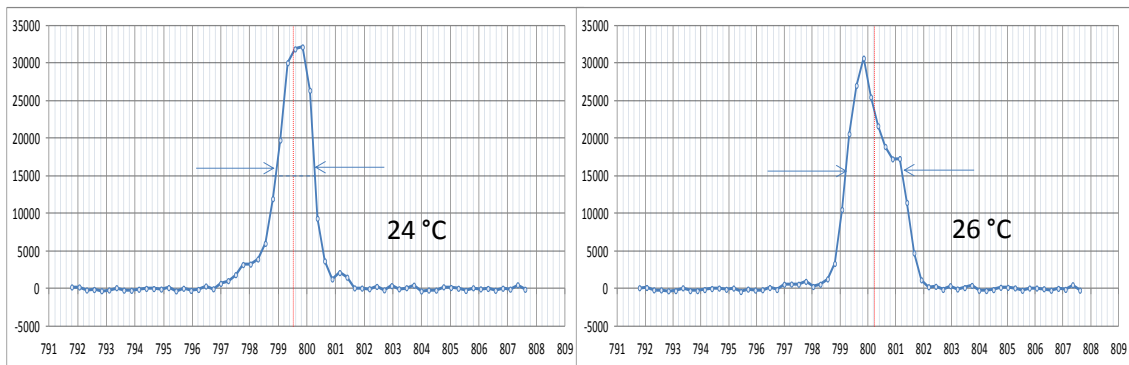


Figura 19: Espectre del díode WSLX808008 amb un pols de 5 ms de durada

En el cas d'utilitzar polsos de 100 μ s i flancs de pocs μ s cal utilitzar targetes de més alta velocitat de mostreig. La targeta NI PCI-6115 proporciona una velocitat de mostreig de fins a 10 Ms/s per canal. A més els canals són totalment independents (mostreig síncron), el que vol dir que l'adquisició a cada canal és simultània, no hi ha retard en l'adquisició de les dades dels dos canals, i no en cal un processament posterior. La targeta disposa, com en el cas de la targeta anterior, d'un trigger per sincronitzar l'inici d'adquisició i ajustar-lo al flanc de pujada. La targeta es controla amb LabVIEW. Per poder obtenir polsos i flancs de tan curta durada s'utilitza el driver DAE-20050 com ja s'ha comentat. El flanc de pujada que s'obté amb el díode WSLX808008 i el driver DAE-20050 és d'uns 40 μ s. La forma d'ona es mostra a la Figura 14. La característica de la resposta Popt/Ild obtinguda de la mateixa manera que en el cas anterior es mostra a la Figura 20.

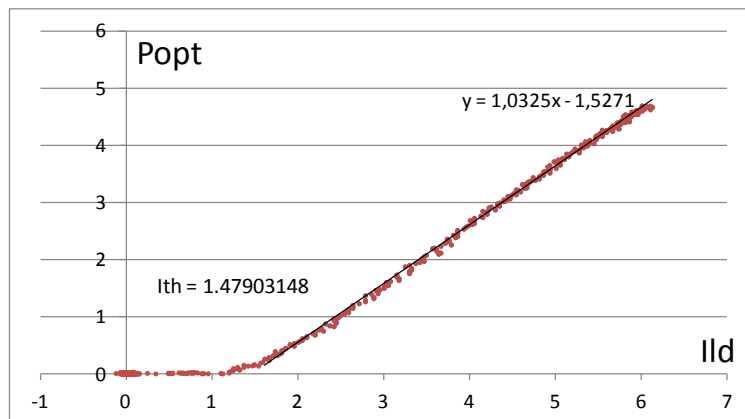


Figura 20: Característica de la resposta del díode WSLX808008 obtinguda amb el DAE-20050

4.3 Sistema automàtic de caracterització de la variació de la resposta de la potència òptica amb la temperatura del díode làser

L'entorn de mesura descrit s'utilitza de forma que es generen polsos periòdics i se n'adquireixen les dades per obtenir la característica de la resposta de la potència òptica respecte al corrent injectat al díode laser en el flanc de pujada de cada pols. La temperatura del díode làser es va canviant i es mesura a cada flanc de pujada. D'aquesta manera s'obté la

característica de la resposta a diferents temperatures. Aquest sistema automàtic de caracterització de la variació de la resposta de la potència òptica amb la temperatura s'ha implementat utilitzant el díode WSLX808008, el driver DRVx2PITEC i la targeta d'adquisició NI USB6009. El díode WSLX808008 té un termistor NTC inclòs en el dispositiu que s'utilitza per mesurar la temperatura a través de propi driver que n'obté el voltatge. Els polsos que s'han utilitzat en aquest cas són periòdics amb un període de 50 s i amb una durada de 5 ms com el mostrat a la Figura 18. Això representa un duty cycle de 0.01% que evita l'escalfament del díode. Per canviar la temperatura s'ha introduït el dispositiu del díode làser que inclou el termistor NTC en un càmera climàtica i se n'ha programat un cicle de canvi de temperatura prou lent per a que la temperatura dins del dispositiu i en tots els seus components tingui temps d'estabilitzar-se i que la temperatura mesurada en el termistor sigui igual a la de la unió p-n del semiconductor. Aquest dispositiu WSLX808008 també inclou un fotodíode. En aquest cas no s'ha utilitzat el fotodíode intern del dispositiu ja que està sotmès als canvis de temperatura i aquests podrien afectar en certa mesura a la resposta del fotodíode. És sabut que els fotodíodes tenen una resposta pràcticament constant amb la temperatura. De tota manera, utilitzant un fotodíode extern i ubicat fora de la càmera climàtica a temperatura constant fem que la resposta del fotodíode sigui totalment independent dels canvis de temperatura a que es sotmet el díode làser.

El voltatge mesurat al fotodíode s'ha calibrat respecte a un mesurador de potència tèrmic com ja s'ha comentat. La resposta mesurada en el fotodíode respecte al corrent injectat al díode mesurat com el voltatge a la resistència shunt del díode làser es mesura a la targeta d'adquisició de dades i es controla amb LabVIEW de la forma abans comentada, amb els factors de correcció corresponents al calibrat respecte a la potència òptica i al guany del circuit adaptador de la tensió al shunt, i tal com s'indica a la Figura 18.

4.3.1 Aplicació de control amb LabView

S'utilitza la targeta d'adquisició NI USB6009 per mesurar el voltatge al fotodíode, el voltatge a la resistència shunt i al termistor NTC, utilitzant-ne tres canals. En el programa LabVIEW es calculen els valors corresponents de la potència òptica, del corrent al díode làser i de la temperatura aplicant-ne els factors de conversió en cada cas. Aquests són els factors ja comentats de la potència òptica i el corrent al díode làser, i a més en el del termistor NTC amb la corba de resposta voltatge/temperatura proporcionada per l'especificació del component.

L'adquisició es sincronitza a partir del senyal de sincronisme que indica l'inici del pols d'alimentació i que proporciona el mateix driver, limitant el nombre de dades adquirides de manera que només se n'adquireixen les corresponents al flanc de pujada. D'aquesta manera es desestimen mostres posteriors, teòricament més susceptibles de ser afectades per un possible augment de la temperatura del semiconductor, en l'obtenció de la característica de la resposta del díode làser o relació P_{opt}/I_{ld} . A la Figura 21 es mostra el panell de control del programa LabVIEW del sistema de caracterització automàtic de la resposta P_{opt}/I_{ld} amb les gràfiques obtingudes dels senyals de P_{opt} (V fotodíode), de I_{ld} (Vshunt) i de la temperatura (Vntc), la gràfica de la relació P_{opt}/I_{ld} un cop aplicats els factors de correcció comentats, el valor de la temperatura, i també els valors dels paràmetres que es volen obtenir per al model que són els $d'I_{th}$ i de SE o del pendent. El guany del circuit adaptador de la tensió de la resistència shunt s'ha mesurat amb la mateixa targeta d'adquisició i amb aquest valor, el del voltatge mesurat a

la sortida del circuit, i el de la resistència shunt que és de 0.01Ω es calcula el valor del corrent al díode làser.

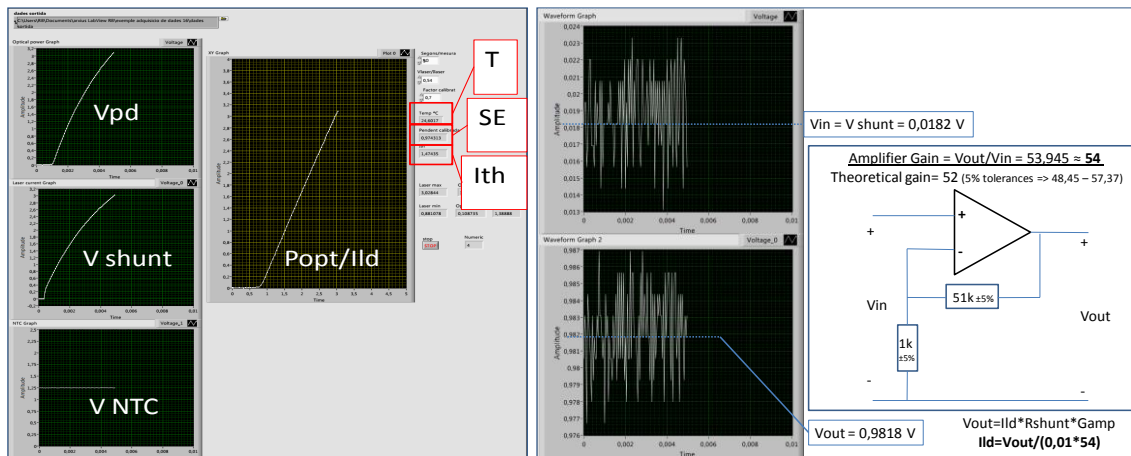


Figura 21: Panell de control LabVIEW del sistema de caracterització automàtic de la resposta Popt/Ild i mesura del guany del circuit adaptador d'Ild

Aquest sistema automàtic d'adquisició de la resposta Popt/Ild amb la temperatura es pot utilitzar en combinació amb un sistema de variació controlada de la temperatura i obtenir-ne la resposta a les diferents temperatures que es vagin produint.

4.3.2 Esquema del sistema de caracterització automàtic

A la Figura 22 es mostra l'esquema i una imatge del sistema de mesura i caracterització de la resposta Popt/Ild al díode làser indicat anteriorment per al dispositiu WSLX808008 utilitzant el driver DRVx2PITEC, on s'han introduït la generació periòdica dels polsos amb duty cycle de 0.01% ($5 \text{ ms}/50 \text{ s}$), la mesura de la temperatura a partir del termistor del dispositiu, el control de la temperatura amb la càmera climàtica on s'ha introduït el dispositiu, i on també s'ha inclòs un oscil·loscopi simplement a efectes de supervisió dels senyals. La càmera climàtica permet programar un cicle prou llarg en el temps de variació de la temperatura per a que es pugui considerar que la temperatura dins del dispositiu està estabilitzada i no n'existeixen gaps entre el termistor i el semiconductor. No s'ha inclòs l'esfera integradora per simplificar el muntatge a la càmera climàtica i perquè la potència del díode no supera la sensibilitat del fotodíode, i per tant la sortida s'hi pot connectar directament. Les mesures dels paràmetres Ith, SE i la temperatura s'emmagatzemen automàticament amb el programa LabVIEW per al seu posterior estudi i obtenció de gràfiques. Durant les mesures es supervisa que el valor del paràmetre FWHM de l'espectre de la llum emesa no superi el que ens dóna l'especificació. De tota manera, un cop comprovat a una certa temperatura que l'espectre no mostra deriva de temperatura durant el pols, no s'espera que canviï durant el procés de caracterització.

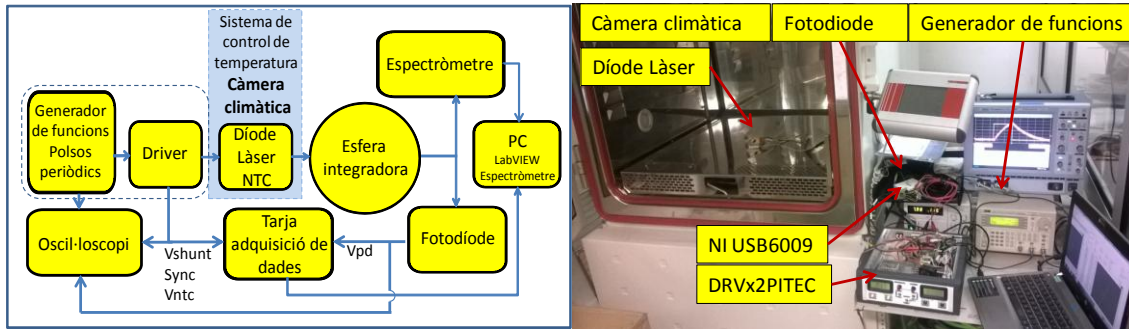


Figura 22: Sistema de caracterització automàtica de la resposta Popt/Ild amb la temperatura

4.3.3 Mesures obtingudes a la càmera climàtica. Confirmació de la teoria i de les hipòtesis de treball

Les mesures en la càmera climàtica amb el sistema automàtic de caracterització de la resposta òptica del díode làser ens permeten obtenir els valors dels paràmetres I_{th} i SE en funció de la temperatura, i amb aquests valors definir el model matemàtic i el programat en Pspice.

A la Figura 23 es mostren aquestes mesures i les corbes de variació d'aquests paràmetres amb la temperatura, $I_{th}(T)$ i $SE(T)$ del díode làser WSLX808008 en el marge de temperatures d'operació. Si bé el marge de temperatures d'operació segons l'especificació és de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ que es suposa donat per a un funcionament en mode continu, s'ha comprovat el correcte funcionament del dispositiu en el marge de temperatures de $4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $31\text{ }^{\circ}\text{C}$ pel que fa a la resposta al flanc de pujada de 5 ms utilitzat per a la caracterització de la corba de resposta de la potència òptica respecte al corrent al díode làser.

El comportament del paràmetre $I_{th}(T)$ responia a una exponencial segons la teoria empírica disponible i descrita a l'expressió (8) amb un valor del dividend de l'exponent T_0 segons l'expressió (9). La forma de la corba de $I_{th}(T)$ correspon a una exponencial amb un valor de $T_0=140.845\text{ K}$ i, com s'ha comentat en el capítol 2, aquest resultat ens permet confirmar que la teoria empírica es compleix i també la hipòtesis de treball que el comportament exponencial de la variació d' $I_{th}(T)$ també es compleix per a díodes d'alta potència.

Pel que fa al paràmetre SE i com també s'ha comentat en el capítol 2, les hipòtesis de treball eren que aquest paràmetre disminuiria linealment amb l'increment de la temperatura i que aquesta disminució lineal es donaria en díodes làser de qualsevol potència. La hipòtesis es basava en les especificacions de díodes làser de fins a 1 W de potència. Els resultats obtinguts amb aquest díode de 8 W ens permetent confirmar que la hipòtesis de la disminució lineal de $SE(T)$ és vàlida, i confirmar també que és així per a díodes de més alta potència. Recordem també que el díodes de més alta potència basats en barres i arrays de díodes làser estan formats per unitats similars al díode estudiat de 8 W i que per tant els comportament d'aquests paràmetres amb la temperatura en aquest díodes de barres i arrays seran el mateix.

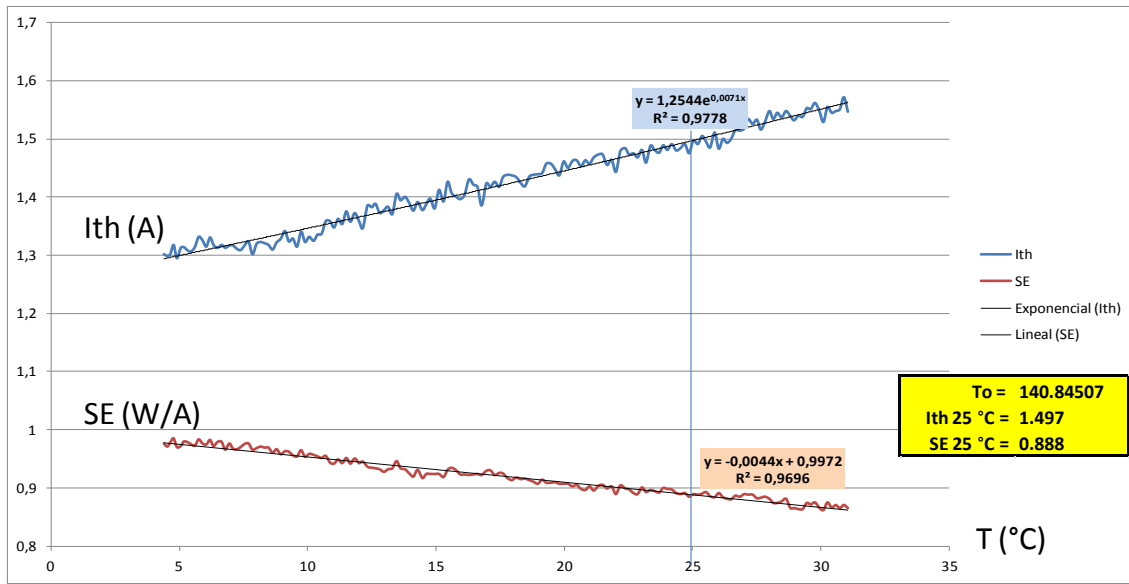


Figura 23: Variació dels paràmetres I_{th} i SE amb la temperatura en el díode WSLX808008

5 Aplicació del mètode de modelat en diferents díodes làser

El mètode de modelat de la resposta òptica s'ha aplicat a díodes làser de diferents potències d'emissió de llum. En aquest capítol es mostraran les mesures i els resultats obtinguts en alguns d'ells a mode d'exemple i de confirmació que el mètode és vàlid per a tots els rangs de potència dels díodes làser. Les mesures i la recerca del mètode es varen iniciar amb díodes de baixa potència i es va progressar en la recerca augmentant la potència dels díodes làser utilitzats. És per això que en les mesures realitzades en els díodes làser de més baixa potència, els primers utilitzats, el mètode de mesura no és tant depurat, especialment pel que fa a la utilització de les targetes d'adquisició de dades i en concret a la utilització d'entrades de sincronisme per capturar només el flanc de pujada del pols d'alimentació. Aquest punt, el de la sincronització de l'adquisició per només adquirir el flanc de pujada i minimitzar l'efecte d'un possible escalfament del díode, es va decidir implementar a la vista dels resultats obtinguts amb els primers díodes de baixa potència. Les mesures en aquests díodes de baixa potència no estan doncs obtingudes amb un sol flanc de pujada sinó amb una constel·lació de punts de la resposta.

Els díodes dels que es mostraran els resultats obtinguts són el SLD1121VS de 5 mW de potència, el WSLX808008 de 8 W i finalment una barra de díodes de 40 W de potència de llum emesa.

5.1 Procediment: Mesura, obtenció del paràmetres, modelat Pspice, simulació i validació.

El procediment aplicat és en tots els casos el de la realització de les mesures i els càlculs necessaris per obtenir els paràmetres dels models, l'obtenció del model elèctric i l'òptic, la formulació del model matemàtic de la variació del model òptic amb la temperatura, el model programat en Pspice, l'obtenció dels resultats de les simulacions, i finalment una comparativa entre les mesures obtingudes i els resultats de la simulació a efectes de validació del model.

5.2 Díode làser de 5 mW

El díode làser utilitzat és el SLD1121VS de SONY. És un díode de longitud d'ona d'emissió de 670 nm, és per tant de llum vermella. La utilització més usual d'aquest díode és per a lectors de barres. La potència recomanada d'utilització és de 3 mW tot i que es pot utilitzar fins a una potència màxima de 5 mW. A 3 mW de potència el valor típic del corrent al díode és de 50 mA i el voltatge de 2.2 V. El marge de temperatures d'operació va des dels -10 °C fins al 50 °C. El díode làser va muntat en un encapsulat en el que també s'inclou un díode fotodetector que utilitzarem per mesurar la potència de llum emesa. El dispositiu SLD1121VS és doncs un parell de díodes, díode làser i fotodíode, connectats en configuració d'ànode comú, és a dir, l'ànode del díode làser connectar al càtode del fotodíode. El díode es munta en un circuit de control o driver de l'empresa Monocrom S.L., el LAD15X75. Aquest circuit utilitza el corrent detectat al fotodíode per reajustar el corrent que passa pel díode làser, mantenint la potència d'emissió de llum constant. El valor de la potència a la que es vol que el díode làser emeti es fixa a través del voltatge proporcionat per un díode shunt i les seves resistències de configuració. El diagrama de blocs del díode i del circuit de control o driver LAD15X75 utilitzat es mostra a la

Figura 24, obtingut de l'esquemàtic utilitzat en el simulador Pspice, on la resistència variable s'utilitza per obtenir tot el marge de la resposta del díode làser. El model Pspice d'aquest díode està disponible en les llibreries del programa i per això es va decidir utilitzar-lo com a base de partida per a la definició del mètode d'obtenció del model de les variacions amb la temperatura.

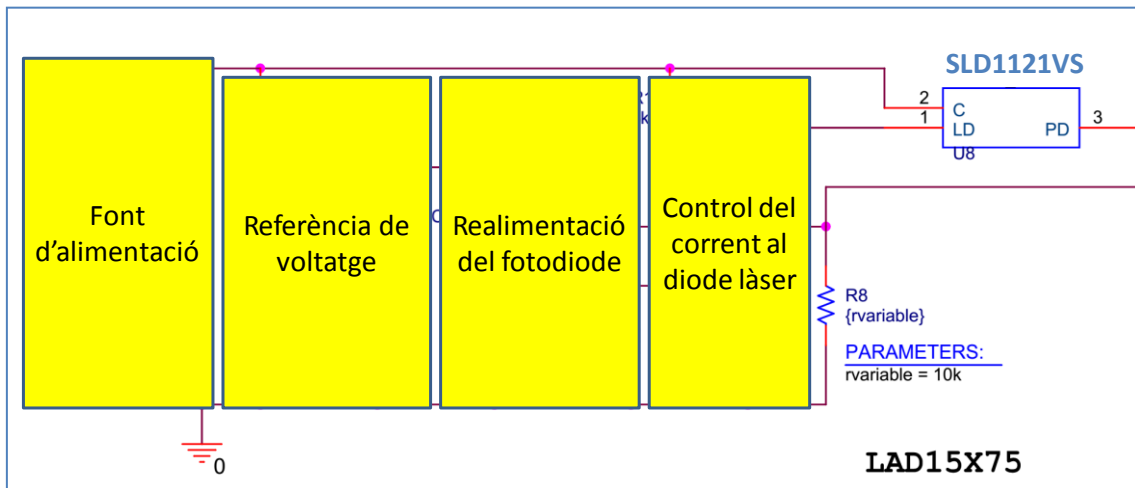


Figura 24: Circuit de control LAD15X75 utilitzat per al díode SLD1121VS

5.2.1 Càlcul dels paràmetres

Tal i com s'ha comentat en el capítol 2, cal obtenir els valors dels paràmetres I_s , R_s i N per al model elèctric del díode i les del paràmetres E_G i X_{TI} per a les seves variacions amb la temperatura. En aquest cas, el SLD1121VS és un dels díodes làser dels quals el model Pspice ja existeix en les llibreries del programa. Per això i pel que fa al paràmetres elèctrics del díode no cal calcular-los ja que ja ens venen donats pel model Pspice existent. Els valors proporcionats pel models són: $R_s=2 \Omega$, $I_s=5E-37 A$, $E_G=2.8 eV$. I $N=1$, $X_{TI}=3$ que a més són els valors per defecte en Pspice per al díodes. Pel que fa al model òptic, s'obtenen les gràfiques de la resposta òptica a diferents temperatures. Les temperatures a les que es realitzen les mesures són de $25.27 \text{ }^\circ\text{C}$, de $37.91 \text{ }^\circ\text{C}$ i de $50.55 \text{ }^\circ\text{C}$. Els valors obtinguts del paràmetres I_{th} i SE a les diferent temperatures són els que s'adjunten a la taula a continuació.

VALORS MESURATS		
T ($^\circ\text{C}$)	SE (W/A)	I_{th} (mA)
25.27 (T_1)	0.5296 (SE_1)	37.76 (I_{th1})
37.91	0.4904	42.61
50.55 (T_2)	0.48 (SE_2)	48.12 (I_{th2})

Taula 1: Paràmetres del model òptic del díode SLD1121VS

L'obtenció del valor de la temperatura es confirma amb del valor de la longitud d'ona mesurada en l'espectròmetre segons s'ha explicat en el capítol 4. A la Figura 25 es mostren les gràfiques de les mesures obtingudes amb la targeta d'adquisició, la NI USB6009 i amb l'espectròmetre Avantes AvaSpec 2048. Com s'ha dit anteriorment, en aquest cas no es sincronitza l'adquisició i el que s'obté és una constel·lació de punts dels que se n'obtenen els paràmetres del corrent de threshold I_{th} i de la Slope Efficiency SE. De les expressions de la

recta del pendent de la resposta a cada temperatura segons la longitud d'ona, ambdós marcats en quadre vermell, s'obtenen els valors de SE i de I_{th} indicats en la taula anterior. Les dades del fabricant dels paràmetres de I_{th} són de 40 mA típic, 60 mA màxim. I de la SE de 0.45 mW/mA típic, amb un valor mínim de 0.15 mW/mA i màxim de 0.7 mW/mA. Les dispersions dels valors són grans però els valors mesurats són molt propers als valors típics.

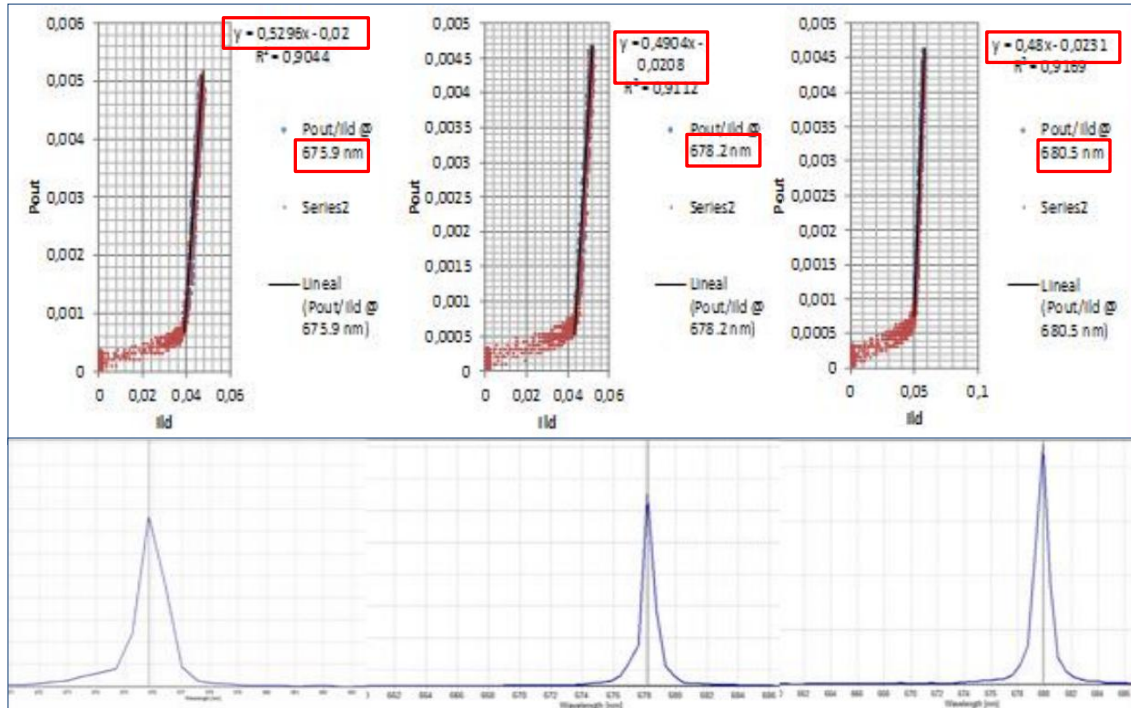


Figura 25: Resposta òptica i espectre de llum del díode SLD1121VS a diferents temperatures

Amb aquests valors de SE i de I_{th} es pot formular el model matemàtic de la potència òptica emesa incloent la variació en funció de la temperatura tal i com s'indica al capítol 2. El valor del divisor de l'exponent de la funció exponencial de la variació del corrent de threshold amb la temperatura segons l'expressió (9) és $T_0 = \frac{T_1 - T_2}{\ln I_{th1} - \ln I_{th2}}$. Amb els valors $T_2 = 50.55$ °C (326.5 K) i $T_1 = 25.27$ °C (298.42 K), $I_{th2} = 48.12$ mA i $I_{th1} = 37.74$ mA, el valor de $T_0 = 104.27$ K. Els valors de SE són : $SE_1 = 0.5296$ W/A i $SE_2 = 0.48$ W/A. L'expressió (12) queda doncs:

$$P_{opt}(T) = (0.5296 + (T - 25.27)(-0.00196)(I_d - 0.03776 \exp[(T-25.27)/104.27]))$$

on els valors de T s'introdueixen en °C que és com s'indica la temperatura en el simulador Pspice.

5.2.2 Model Pspice

El model programat Pspice del dispositiu SLD1121VS incloent les variacions de la resposta òptica en funció de la temperatura és l'indicat a la Figura 26 i segons el que s'ha comentat en el capítol 3. En aquest cas el dispositiu incorpora un fotodíode i per tant aquest també s'inclou en el model i el programa Pspice, si bé no està afectat de les variacions de la temperatura com s'ha comentat. La sensibilitat del fotodíode que segons l'especificació del fabricant és lineal i de 20 mW/mA (a la potència màxima d'emissió de 5 mW en el fotodíode es genera un corrent de 0.25 mA) està introduït en el model amb l'expressió de la font de corrent controlada per tensió $G_{opd} \{V(op)\}TABLE(0,0)(30m,1.5m)$ on s'indica aquesta relació. El fotodíode utilitza el

model disponible del díode en les llibreries Pspice a l'igual que el díode làser amb la instrucció: .model pdetec D. En aquest cas el model que es presenta és directament el proporcionat per les llibreries en el que s'ha introduït les expressions per modelar la variació de la potència òptica amb la temperatura. Les modificacions introduïdes en el model original s'indiquen en negreta. L'esquema del model és el que s'indica a la Figura 12, on s'inclou l'expressió de la potència òptica amb dependència de la temperatura en la funció de transferència de la font Eop. Tal i com està en el model original de les llibreries s'inclou la sensibilitat del fotodetector en la funció de transferència Gopd, i també una resistència supèrflua "Rdummy" de 1 kΩ en paral·lel entre les fonts.

```
* PART NUMBER: SLD1121VS
* MANUFACTURER: SONY
* LD = Laser diode cathode
* C = Common pin
* PD = Photodiode anode
.param Tvar 25
.SUBCKT MODEL_TEMP LD C PD
Eop op 0 VALUE {limit(((0.5296+(Tvar-25.27)*(-0.00196))*(I(Vid)-(0.03776*exp((Tvar-25.27)/104.278))))),0,40m)}
Rdummy op 0 1k
Gopd C PD TABLE {V(op)}{0,0}(30m,1.5m)
Dld C I dlaser
Vid I LD
.model dlaser D (T_ABS={Tvar}) IS=5E-37 N=1 RS=2 BV=2 IBV=10u EG=2.8 XTI=3
Dpd PD C pdetec
.model pdetec D CJO=5p BV=15 IBV=10u
.ends
```

Figura 26: Model programat Pspice del dispositiu SLD1121VS

5.2.3 Resultats de la simulació.

Amb aquest model programat obtenim el resultats de la simulació segons l'esquema indicat a la Figura 24, que són els que es mostren a la Figura 27 a continuació.

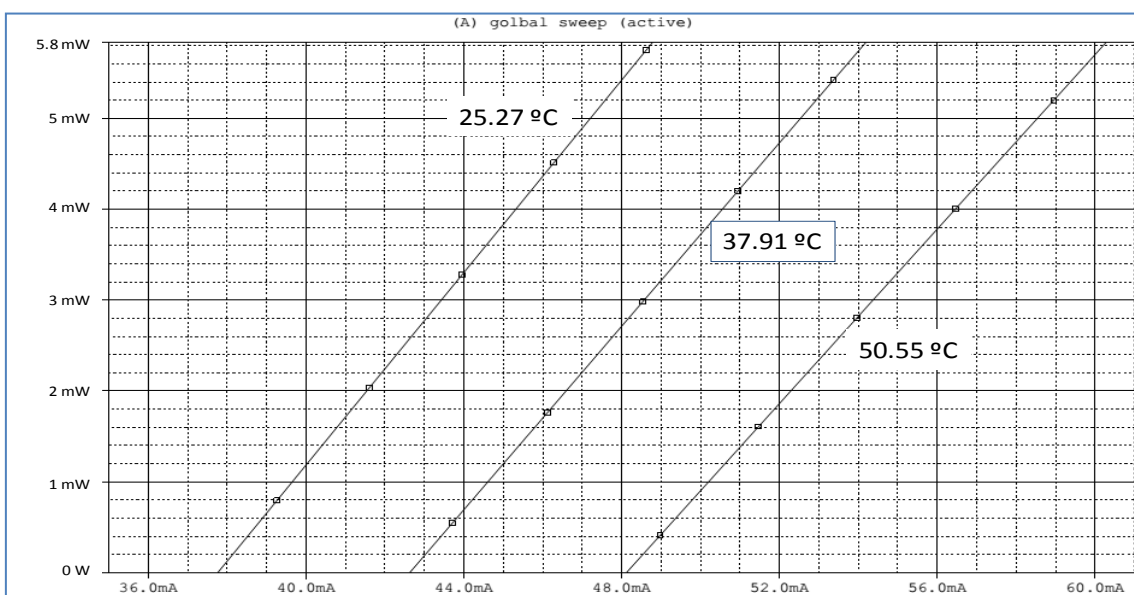


Figura 27: Resultat de simulació del model programat del SLD1121VS

5.2.4 Validació del model

Per a la temperatura de 25.27 °C el Ith té el valor de 37.76 mA i una SE de 0.529 W/A (5.4 mW/10.2 mA a la gràfica) i per a la temperatura de 50.55 °C el Ith és de 48.12 mA i la SE de 0.48 W/A (5.8 mW/12.1 mA a la gràfica). Aquests valors són els utilitzats per generar el model i per tant han de coincidir si la simulació és correcta. Per validar el model ens fixem en el valor a la temperatura de 37.91 °C. El Ith és de 42.6 mA i la SE de 0.49 W/A (5.8 mW/11.6 mA) que coincideixen amb els valors mesurats a aquesta temperatura segons la Taula 1 i que ens validen el model programat Pspice i la seva simulació.

5.3 Díode làser de 8 W

El díode làser utilitzat és el WSLX808008 en la versió de dispositiu que inclou un fotodíode, un termistor NTC i una cel·la Peltier (TEC), i encapsulat en muntura HHL (High Heat Load). És un díode de 808 nm de longitud d'ona, per tant a la banda de l'infraroig. La potència d'emissió de llum és de 8 W. Aquesta potència es proporciona segons el full de test del fabricant a un corrent al díode de 10.5 A, a una tensió de 2.4 V i a la temperatura de 25 °C. El corrent de threshold a aquesta temperatura és de 1.5 A. Això implica una SE a 25 °C de 0.889 W/A, corresponents als 8 W que s'assoleixen amb un increment de corrent de 9 A, que és la diferència entre el corrent d'operació a 8 W i el de threshold a 0 W. El marge de temperatura d'operació és segons especificació també de 10 °C a 30 °C. La sortida de llum està adaptada a fibra òptica i en porta ja una incorporada de 200 µm de diàmetre i 80 cm de llarg. Aquest tipus de díode es coneix com a emissor únic o single emitter, ja que aquests tipus d'emissors són els que es munten en paral·lel a les barres de díodes, i als stacks o piles de díodes on es munten barres en sèrie.

Per a controlar el díode s'utilitza el driver de l'empresa DRVx2PITEC ja comentat anteriorment. Aquest driver incorpora un circuit de control de la cel·la Peltier a partir de la lectura del termistor NTC, ambdós al dispositiu. Aquesta cel·la Peltier es pot utilitzar juntament amb un circuit refrigerador o chiller per controlar la temperatura del dispositiu, mètode utilitzat per a mesurar la resposta I/V del díode a 25 °C. L'altra manera de controlar-ne la temperatura, i que serà la dels resultats que es presenten en l'apartat del model en temperatura, és amb una càmera climàtica i llegint en valor de la temperatura del dispositiu amb el termistor NTC.

El dispositiu WSLX808008-H-T-PD també incorpora un fotodíode com indiquen les lletres PD de photodetector del seu nom. No s'ha utilitzat aquest fotodíode intern per a fer les mesures de la potència emesa per evitar que els canvis de temperatura del dispositiu que òbviament també afectaran al fotodíode puguin variar-ne la sensibilitat. És per això que s'ha utilitzat un fotodíode extern com ja s'ha comentat en l'apartat on es descriu el sistema de caracterització automàtic, que s'ha implementat precisament utilitzant el WSLX808008. L'altra raó per la que s'ha utilitzat el fotodíode extern és que el sistema de caracterització que s'ha desenvolupat fent servir aquest díode es pretén ser utilitzat també amb altres díodes, i especialment amb barres de díodes de major potència, que no incorporen un fotodíode i on s'haurà d'utilitzar un fotodíode extern de tota manera.

5.3.1 Termistor NTC al WSLX808008

La temperatura del díode es pot controlar doncs amb el termistor NTC incorporat al dispositiu i s'ajusta amb la cel·la Peltier que també incorpora controlada pel driver i un circuit refrigerador.

El termistor NTC té com a paràmetres que el caracteritzen el valor de la resistència a 25 °C $R_{25^{\circ}\text{C}}=10\text{ k}\Omega$ i el valor de la constant $\beta=3435$ o paràmetre de l'equació del termistor. L'equació de la relació entre la temperatura i la resistència que es mesura en el termistor és la següent:

$$T = \frac{T_0 \cdot \beta}{\beta + T_0 \cdot \ln\left(\frac{R}{R_0}\right)} \quad (16)$$

El termistor es connecta al driver, és a dir a un divisor de tensió amb una resistència sèrie de 10 kΩ i una tensió de referència mesurada de 2.48 V. En el marge d'operació de temperatura del díode que és de 10 °C a 30 °C, la relació entre la tensió que es mesura en el divisor i la temperatura es pot aproximar per una recta. A la Figura 28 es mostren les gràfiques del valor de la resistència, de la tensió al divisor, de l'aproximació que se'n fa al marge de temperatures esmentat, i del circuit divisor que implementa el driver.

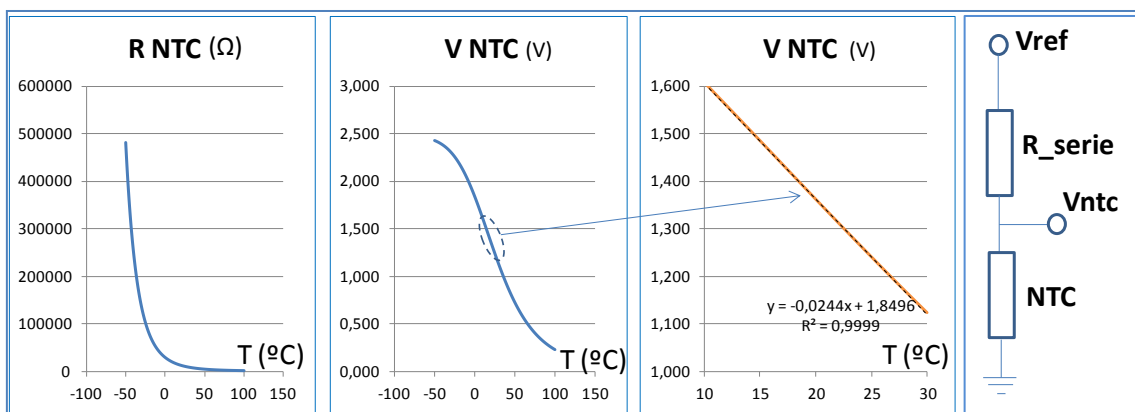


Figura 28: Característica de resposta del termistor amb la temperatura i circuit de mesura

Aquesta relació lineal $V_{ntc} = -0.0244 T + 1.8496$ al marge de temperatures d'operació de 10 °C fins a 30 °C és la que s'implementa en el control del programa LabVIEW per a obtenir la mesura de la temperatura, i que s'utilitzarà en la càmera climàtica.

5.3.2 Mesures

Les mesures realitzades per a calcular els paràmetres del model elèctric són les de la corba de resposta I/V i poder aplicar l'equació de Shockley segons les expressions (4) i (5) a la temperatura de 25 °C. La mesura es fa en continua i anant variant el nivell de tensió del pols que s'utilitza a l'entrada de control del driver. Aquesta amplitud en tensió del pols de control varia el nivell del corrent al díode làser. El valor del corrent al díode làser s'obté a partir de la tensió a la resistència shunt en sèrie que implementa el driver, que és de 0.01 Ω, mesurada a la targeta d'adquisició controlada per LabVIEW. Hi arriba a través d'un circuit adaptador que n'amplifica el nivell, ja que el valor de la tensió a la resistència shunt és molt petit, i que a més en millora la relació senyal a soroll per a facilitar-ne la lectura. L'esquema del circuit adaptador i la lectura del valor de tensió amb la targeta d'adquisició i LabVIEW són els que es mostren a la Figura 21. El valor de la tensió al díode làser es mesura directament als pins corresponents de l'encapsulat amb un oscil·loscopi.

Els valors mesurats de la relació I/V en el díode làser WSLX808008 són els mostrats a la Figura 29 on es mostren la taula de valors, i on podem comprovar que el punt d'operació a 8 W de 10.5 A a 2.4 V proporcionat pel fabricant a aquesta temperatura en forma part.

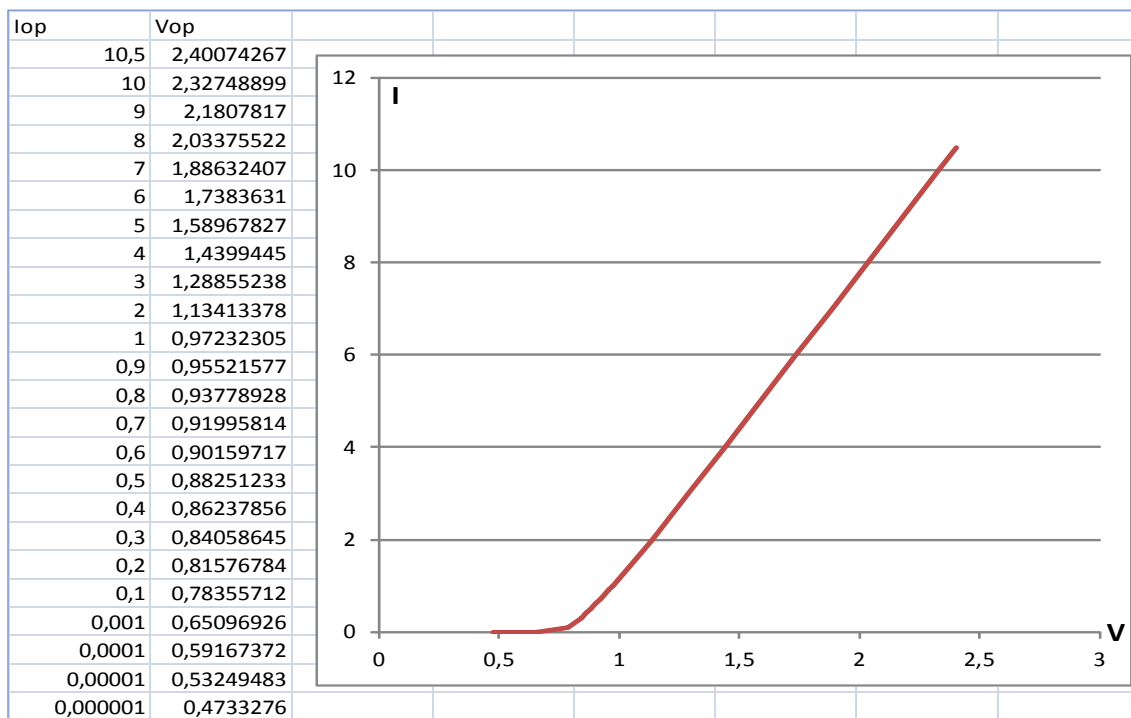


Figura 29: Corba de resposta I/V del díode làser WSLX808008 a 25 °C

Les mesures per obtenir els valors dels paràmetres I_{th} i SE es realitzen amb el sistema de caracterització de la resposta òptica dels díodes làsers comentat en el capítol 4, en l'apartat 4.3. Es tracta d'un sistema automàtic que genera polsos periòdics de 5 ms cada 50 s adaptats al driver utilitzat, el DRVx2PITEC, amb un duty cycle de 0.01%. En combinació amb la càmera climàtica que en varia la temperatura lentament, va mesurant a cada pols amb la targeta d'adquisició la resposta òptica detectada pel fotodíode i la forma del corrent al díode làser. La targeta es controla amb LabVIEW que a més en calcula els valors de SE i I_{th} a cada temperatura. El valor de SE està referit a la potència de llum emesa que es mesura amb el fotodíode, i que s'ha calibrat amb la utilització d'un mesurador de potència tèrmic com també s'explica en el capítol anterior. A la Figura 23 es mostren les corbes de la variació dels valors dels paràmetres I_{th} i SE en el marge de temperatura d'operació del díode. De fet, segons especificació es recomana un marge d'operació entre 10 °C i 30 °C en funcionament en mode continu CW. En la càmera climàtica es comprova que en mode polsat que és el que utilitza el sistema de caracterització automàtic, el funcionament del díode és correcte en el marge de 4.4 °C fins als 31 °C. Com s'ha comentat en el capítol anterior, la representació gràfica de la variació dels paràmetres I_{th} i SE que s'obté amb les mesures realitzades a la càmera climàtica ens permet confirmar la teoria i les hipòtesis utilitzades per la definició del model. Per una part que la variació del paràmetre I_{th} que segons la literatura existent obtinguda empíricament és exponencial, es compleix amb un valor del dividend de l'exponent $T_0 = 140.845$ K, valor similar als obtinguts amb altres díodes làser. Per altra banda, la hipòtesi del decreixement lineal del paràmetre SE amb la temperatura també es compleix. Recordem que en aquest cas la temperatura es mesura amb el termistor NTC que incorpora el dispositiu i a través de la tensió

en el divisor del driver, que es mesura en la targeta d'adquisició. No s'ha utilitzat l'espectròmetre per supervisar la deriva de temperatura durant la mesura a la càmera climàtica per simplificar-ne el set-up a la càmera climàtica, si bé, com s'explica en el capítol anterior, s'ha comprovat anteriorment amb l'espectròmetre que no hi ha deriva de temperatura en la mesura que es fa utilitzant el pols de 5 ms que es fa servir en el sistema de caracterització automàtic.

5.3.3 Càlcul dels paràmetres

Els valors de R_s (resistència paràsita) i I_s (corrent invers de saturació) s'obtenen de l'equació de Shockley substituint-hi parells de valors dels obtinguts en la mesura de la corba de resposta I/V del díode. Com s'ha comentat en el capítol 2, $N=1$ en un bon díode i en polarització directa. Els valors que en resulten a la temperatura de 25 °C són $R_s=0.144 \Omega$ i $I_s=1E-14$ A. En Pspice la temperatura nominal és de 27 °C. Per tant cal calcular el valor de I_s a 27 °C utilitzant l'expressió (6). Per poder utilitzar aquesta expressió ens calen els paràmetres EG i XTI. V_t (tensió tèrmica) es calcula segons l'expressió (3), XTI, exponent de temperatura del corrent de saturació és igual a 3 com s'ha comentat. EG es pot obtenir de taules o gràfiques que en donen el valor. En aquest cas, es tracta d'un díode de AlGaAs de 808 nm de longitud d'ona. Segons la gràfica que es mostra a la Figura 30 [25], el valor d'aquest paràmetre EG=1.55 eV. La gràfica també ens permet veure el valor dels percentatges de l'aliatge utilitzat en aquest díode per obtenir la longitud d'ona de 808 nm, que és de $Al_xGa_{1-x}As$ on $x = 10\%$. Amb el valors de tots aquests paràmetres es pot calcular el de la I_s a 27 °C que és $I_s(27 \text{ °C}) = 1.525E-14$ A. És aquest valor de I_s a 27 °C el que s'ha d'introduir en el programa Pspice com s'ha dit. El valor de I_s a 27 °C es podria haver calculat mesurant la corba de resposta I/V a 27 °C i directament amb l'equació de Shockley com s'ha fet a 25 °C. I el valor d'EG també es podia haver calculat obtenint els valors de I_s amb mesures de la corba I/V a diferents temperatures i substituint-los en l'equació (6). Aquest seria una manera alternativa de calcular EG si no es disposa de les taules o gràfiques corresponents, o si no es coneix amb precisió la longitud d'ona o els percentatges de l'aliatge utilitzat en el semiconductor del díode.

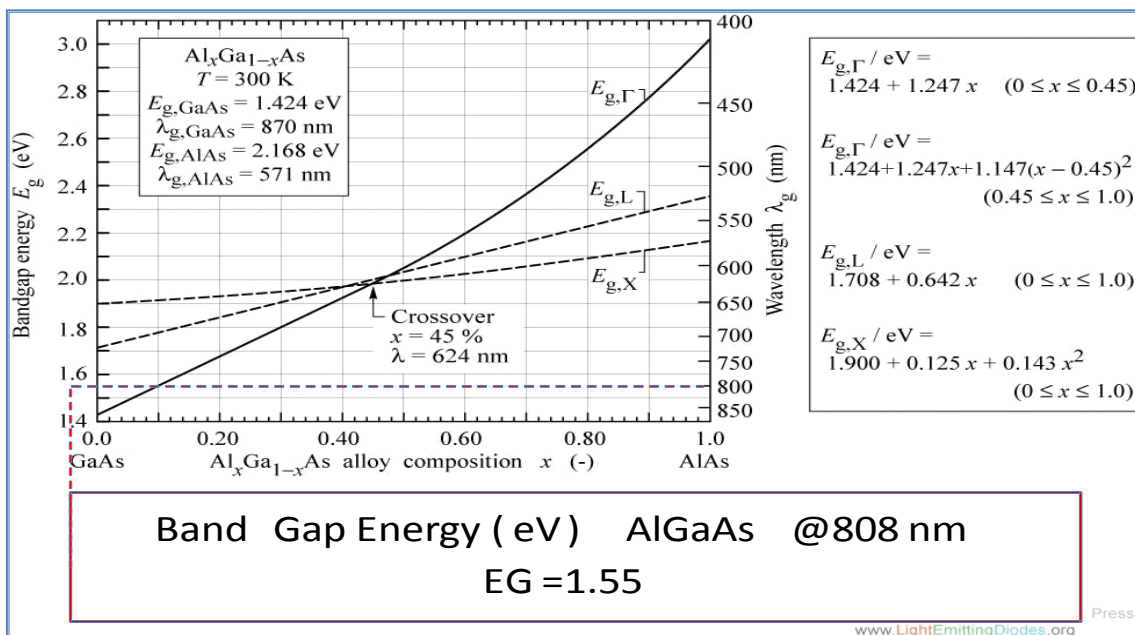


Figura 30: Obtenció del valor del paràmetre EG a partir de gràfiques

Els valors utilitzats per a l'obtenció del model òptic són els valors dels paràmetres I_{th} i SE mesurats a les temperatures de 5 °C i 30 °C, obtinguts de la Figura 23 i que són els indicats en la Taula 2. A la taula també s'indica el valor dels paràmetres a la temperatura de 25 °C que ens proporciona el fabricant. Aquests valors coincideixen també amb els mesurats a la càmera climàtica amb el sistema automàtic de caracterització a 25 °C tal i com s'indica a la Figura 23, i s'utilitzaran com en el cas del díodes anterior per a la validació del model.

VALORS MESURATS		
T (°C)	SE (W/A)	I_{th} (A)
5 (T_1)	0.975 (SE_1)	1.3 (I_{th1})
25	0.889	1.5
30 (T_2)	0.865 (SE_2)	1.55 (I_{th2})

Taula 2: Paràmetres del model òptic del díode SLD1121VS

L'expressió de la potència òptica (12) incloent les variacions amb la temperatura del díode WSLX808008 i utilitzant el valors de T_1 , T_2 , SE_1 , SE_2 i el valor de T_0 abans calculat és:

$$P_{opt}(T) = (0.975 + (T - 5)(-0.0044))(I_d - 1.3 \exp[(T - 5)/140.845])$$

5.3.4 Model Pspice

El model de circuit Pspice és el comentat anteriorment en el capítol 3, és a dir, l'esquema mostrat en la Figura 12 on s'ha suprimit el díode fotodetector que es mantenia en el circuit per temes de claredat del funcionament. Per tant, l'esquema del model del díode utilitzat per modelar el WSLX808008 i en general per a modelar qualsevol díode làser que no incorpori un fotodetector és el mostrat a la Figura 31 a continuació

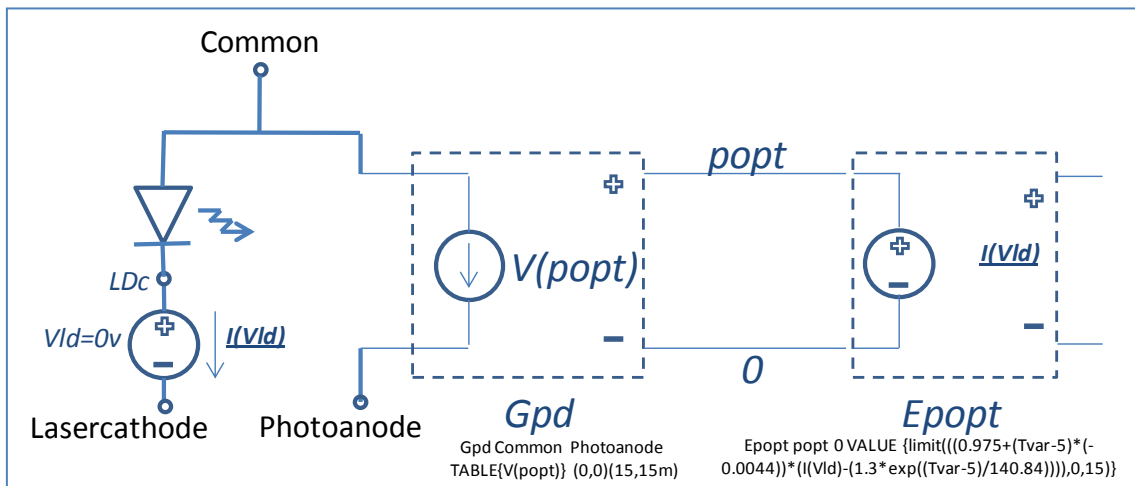


Figura 31: Model de circuit de simulació Pspice del díode WSLX808008

Tot el corrent entre els terminals comú i fotodetector equival al corrent que es detectaria en el fotodíode, extern en aquest cas, i que de tota manera s'haurà d'ajustar a la sensibilitat del fotodíode que s'utilitzi si es vol incloure en el model. En aquest cas es suposa una sensibilitat de 1 mA per W de potència de llum, limitat al valor de 15 W, superior als 8 W de l'especificació. Aquesta sensibilitat és la que s'indica en la funció de transferència de la font de

corrent controlada per tensió Gpd. En la funció de transferència de la font de tensió controlada per tensió Epopt s'inclou l'expressió de la potència òptica amb la dependència de la temperatura Popt(T) limitada a 15 W també. El model programat Pspice del díode WSLX808008 és el que es mostra a la Figura 32, seguint els comentaris fets en el capítol 3 apartat 3.3, i obviant com allí s'explica tots els paràmetres que ja tinguin el valor adequat per defecte en Pspice. S'indica en negreta i com a comentari els valors del paràmetres utilitzats i els càlculs intermedis per a la definició de l'expressió de la potència òptica amb variació de la temperatura.

```

* Pspice model of the WSLX808008 laser diode from Wavespectrum. Measured parameters:
* T1=5, T2=30, Ith_T1 =1.3, Ith_T2 =1.55, To=140.845, SE_T1=0.975, SE_T2=0.865
* ΔSE=(SE_T2-SE_T1)/(T2-T1)=-0.0044
* SE(T)=SE_T1+((T-T1)· ΔSE)=0.975+(T-5)·(-0.0044)
* VALUE{limit((SE(T)·I(Vld)-(Ith_T1·exp((T-T1)/To))),0,15)}
.param Tvar 25
.SUBCKT WSLX808008 Lasercathode Common Photoanode; pins terminals
Dlaserdiode Common LDc laserdiode ; laser diode
Vld LDc Lasercathode;
Epopt popt 0 VALUE {limit(((0.975+(Tvar-5)*(-0.0044))*I(Vld)-(1.3*exp((Tvar-5)/140.845))),0,15)}
Gpd Common Photoanode TABLE {V(popt)} (0,0)(15,15m)
.model laserdiode D (T_ABS={Tvar}) IS=1.525E-14 RS=0.144 EG=1.55
.ends

```

Figura 32: Model programat Pspice del díode làser WSLX808008

5.3.5 Resultats de la simulació

El model programat Pspice es simula utilitzant el programa en un circuit simple de test que faci variar el corrent que passa a través del díode làser amb una resistència variable i obtenint els resultats simulats del valor del corrent que es genera en la sortida del terminal del fotodetector segons la Figura 33 a continuació.

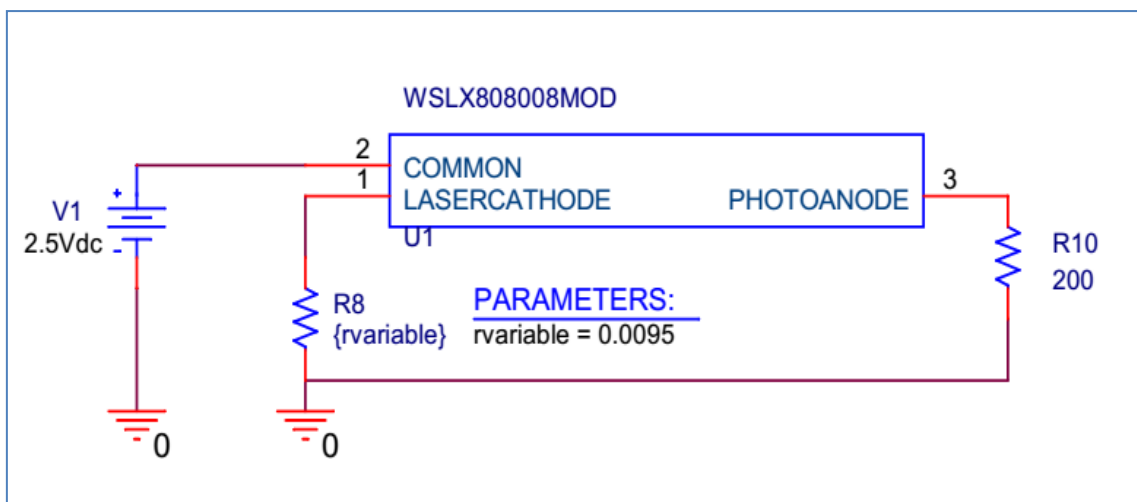


Figura 33: Circuit de test per simulació de la resposta del díode WSLX808008

Els resultats obtinguts en la simulació en el marge de temperatures entre els 5 °C i els 30 °C, corresponent a l'utilitzat en la càmera climàtica, es mostren a la Figura 34. La resposta del díode làser s'ha obtingut cada 5 °C. Es mostra també el punt d'operació indicat pel fabricant de 8W, 10.5 A a 25 °C i s'utilitza per calcular-hi el valor de SE a 25 °C per a la posterior validació del model. També es mostra el detall ampliati dels corrent de threshold a les diferent temperatures, i en concret a 25 °C pel mateix motiu.

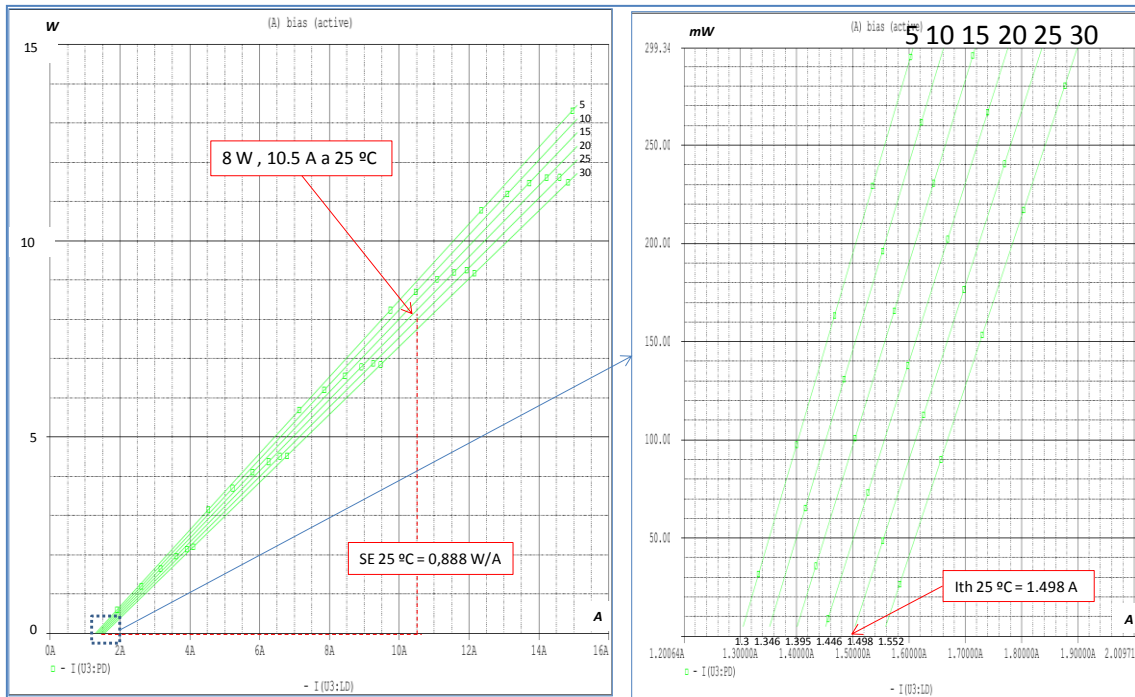


Figura 34: Resultats de la simulació del díode WSLX808008 a T (°C) = 5,10,15,20, 25 i 30

5.3.6 Validació del model

Per a validar el model, a l'igual que en al cas del díode anterior, ens fixem en els valors que pren la simulació en un punt de temperatura intermedi i el comparem amb el valor mesurat. En aquest cas el valor de temperatura que prenem per la validació és el de 25 °C on disposem tant del valor mesurat a la càmera climàtica com el que ens proporciona el fabricant al seu full de test. Els valors de la comparativa es mostren a la Taula 3:

T (°C)	Mesures càmera climàtica		Resultat simulació		Full de test del fabricant	
	Ith (A)	SE (W/A)	Ith (A)	SE (W/A)	Ith (A)	SE (W/A)
5	1.3	0.975	1.3	0.978		
25	1.497	0.8889	1.498	0.8887	1.5	0.8889
30	1.55	0.865	1.552	0.866		

Taula 3: Comparativa del valors mesurats, simulats i especificats al díode WSLX808008

Els valors mesurats, simulats i els que ens proporciona el fabricant en el seu full de test, tots ells a la temperatura de 25 °C coincideixen amb una variació del valor simulat respecte als mesurats o proporcionats pel fabricant dins d'un rang del 0.1 % en el cas de la Ith i de l'ordre del 0.02 % en el cas de la SE, valors suficientment petits com per a confirmar que el model proposat és vàlid.

5.4 Díode làser de 40 W

El díode utilitzat de 40 W és una barra de díodes que es compon de 19 emissors en paral·lel. Cada un dels emissors és del tipus de l'emissor single emitter exposat en l'apartat anterior, el díode WSLX808008. Per tant es tracta d'un díode làser de 808nm de longitud d'ona. La potència d'emissió típica segons l'especificació de la barra és de 40 W, a 40 A i a 25 °C. Aquesta barra de díodes està muntada segons el mètode patentat de l'empresa consistent en un pinçat o clamping. La barra de díodes que es munta té un rang de temperatures d'operació entre 15 °C i 30 °C. El corrent de threshold típic esperat segons especificació de la barra és de 7 A a 25 °C.

El driver o controlador de corrent que s'utilitza és el DAE-20050 que permet obtenir un flanc de pujada amb aquesta barra de díodes de 20 μ s, tal i com es mostra a la Figura 14 al capítol 4, apartat 4.1. en la descripció del mètode de mesura en fred.

5.4.1 Mesures

A l'igual que en els díodes anteriors, s'obté la corba de resposta I/V a 25 °C per al càlcul dels paràmetres del model elèctric del díode, que és la que es mostra a la Figura 35. També s'hi inclou la taula de valors de la relació I/V mesurada. La mesura s'ha obtingut en mode de corrent continu (CW) controlant el nivell de corrent que s'injecta en el dispositiu làser a través de la font d'alimentació, directament en aquest cas i sense la utilització de cap driver. Els valors del corrent al díode làser de 10 A i de 20 A, i de les tensions corresponents al díode de 1.88 V i 2.2 V segons s'indica en el gràfic i la taula, són els utilitzats per al càlcul dels paràmetres elèctrics.

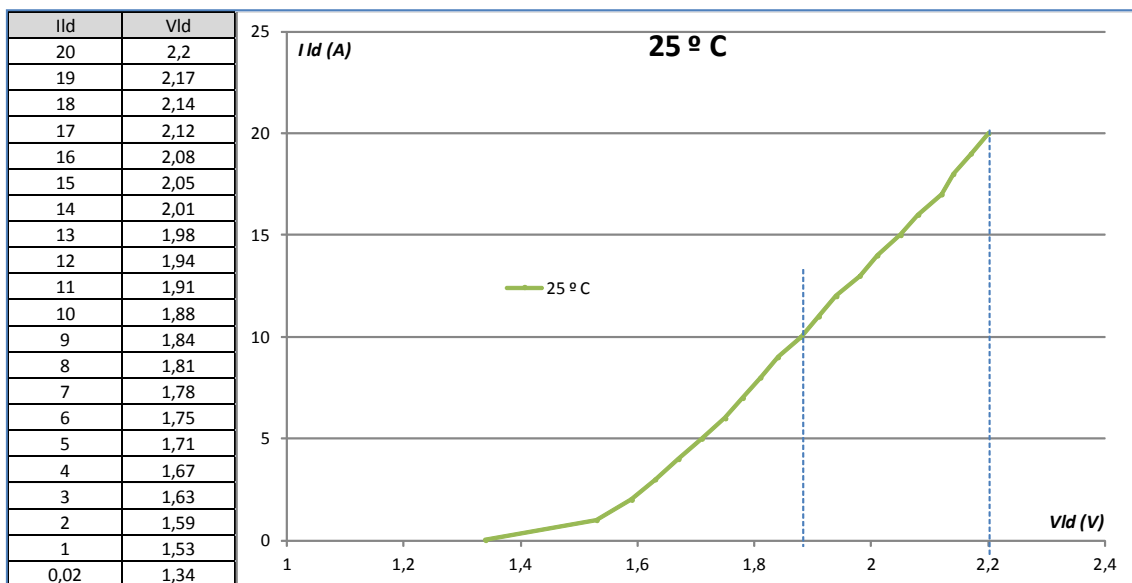


Figura 35: Corba i taula de valors de la resposta I/V de la barra de díodes de 40 W

Per obtenir la resposta de la potència òptica, a l'igual que en cas del díode anterior, s'utilitza un fotodíode que incorpora en aquest cas un circuit amplificador de tensió de fins a 70 dB per poder adaptar-ne els nivells mesurats. En aquest cas, i degut a la major potència de llum de la barra de díodes i que fa que no es pugui connectar directament al fotodíode per superar-ne el nivell màxim de potència que pot admetre, s'utilitza una esfera integradora que n'atenua la potència, a més de proporcionar un sistema estable de mesura, ja que la barra de díodes no

incorpora una sortida adaptada a fibra òptica com en el cas anterior. La connexió és doncs la descrita a la Figura 22. La potència de llum es calibra igualment utilitzant un mesurador de potència tèrmic. A la Figura 36 es mostra la relació entre la potència de llum al mesurador de potència tèrmic (MPT) i el valor de tensió detectat al fotodíode, mesurada amb l'oscil·loscopi. Quan el mesurador de potència tèrmic detecta una potència de 10 W, el fotodíode, connectat a través de l'esfera integradora i amb una amplificació de 60 dB detecta una tensió de 2.32 V, el que ens dóna un factor de calibració de 4.31. Les mesures amb el mesurador de potència tèrmic s'han fet evidentment en mode continu i per tant també en mode continu al fotodíode.

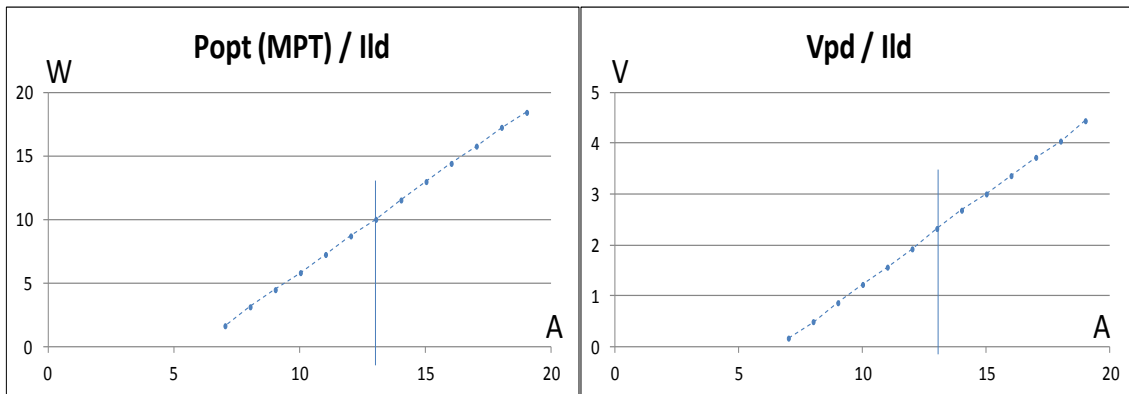


Figura 36: Relació entre la potència al mesurador de potència tèrmic i la tensió al fotodíode

Per a l'obtenció del paràmetres del model de la potència òptica, I_{th} i SE a diferents temperatures es realitza la mesura de la corba de resposta de la potència òptica segons l'esquema de connexió utilitzat per a la calibració i descrit a la Figura 22. La mesura s'ha realitzat amb el driver DAE20050, amb un flanc de pujada de 20 μ s i amb un pols d'amplitud de corrent de fins 40 A. La temperatura es mesura amb un termòmetre de precisió col·locat en el circuit refrigerador o chiller utilitzat per condicionar la temperatura i ubicat a tocar del díode làser. El corrent al díode làser es mesura amb una sonda magnètica connectada al cable de connexió d'entrada a l'ànode del díode. La potència de llum es mesura amb el fotodíode com ja s'ha descrit. Les tensions detectades per la sonda i pel fotodíode es connecten a la targeta d'adquisició NI PCI-6115 ja comentada en el capítol 4, de 10 Ms/s per canal. El trigger o sincronització d'inici de l'adquisició es connecta al senyal que a tal efecte proporciona el mateix driver. El control de la targeta i la lectura de les tensions es realitzen amb LabVIEW. A la Figura 37 es mostra el panell de control del programa en LabVIEW i les formes de la resposta obtingudes en el flanc de pujada de 20 μ s al fotodíode, a la sonda de corrent i la relació entre ambdues, que és la característica de la potència òptica respecte al corrent injectat.

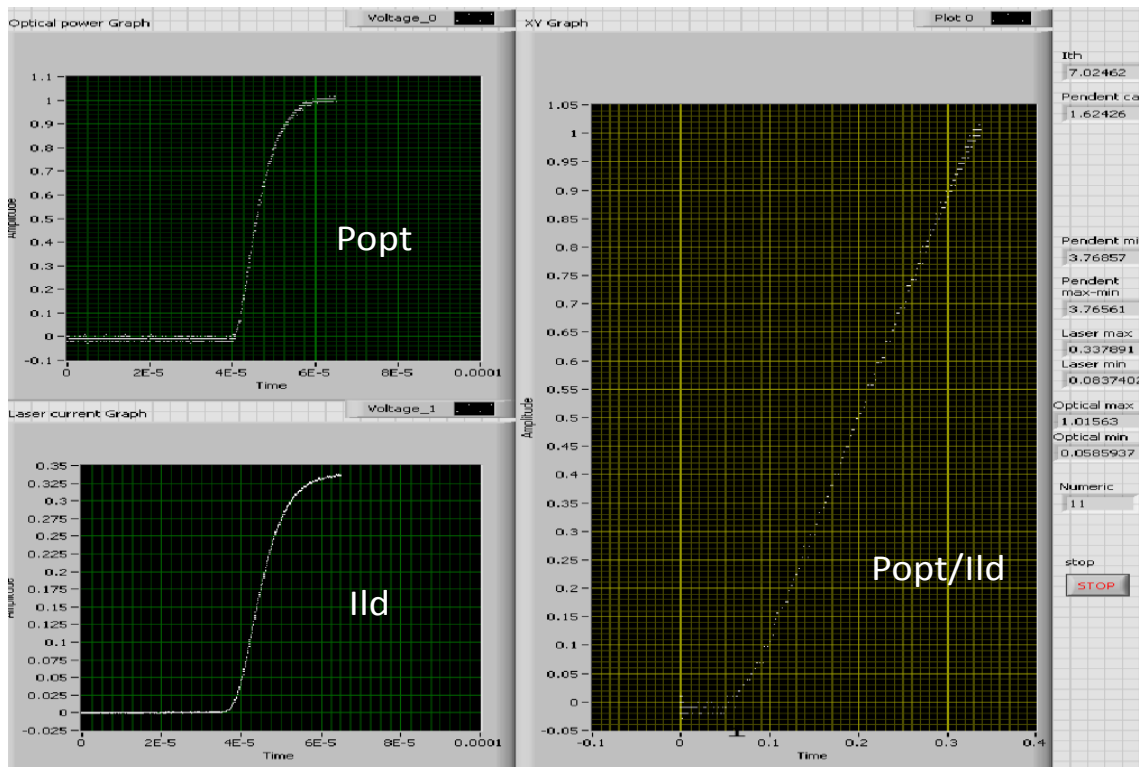


Figura 37: Panell de control LabVIEW del l'adquisició de la resposta òptica del díode de 40 W

El mateix programa calcula el valor del corrent de threshold I_{th} i del pendent SE. Les dades s'exporten a un full de càlcul Excel per a poder fer-ne la comparativa entre les diferent temperatures. Els resultats obtinguts a les temperatures de 15 °C i de 25 °C són els mostrats a la Figura 38, on també s'hi indiquen els valors dels paràmetres de I_{th} i de SE mesurats pel programa LabVIEW a aquestes dues temperatures. També s'hi indiquen els valors mesurats a la temperatura de 20 °C que s'utilitzaran posteriorment per a la validació del model com s'ha fet en els casos dels anteriors díodes.

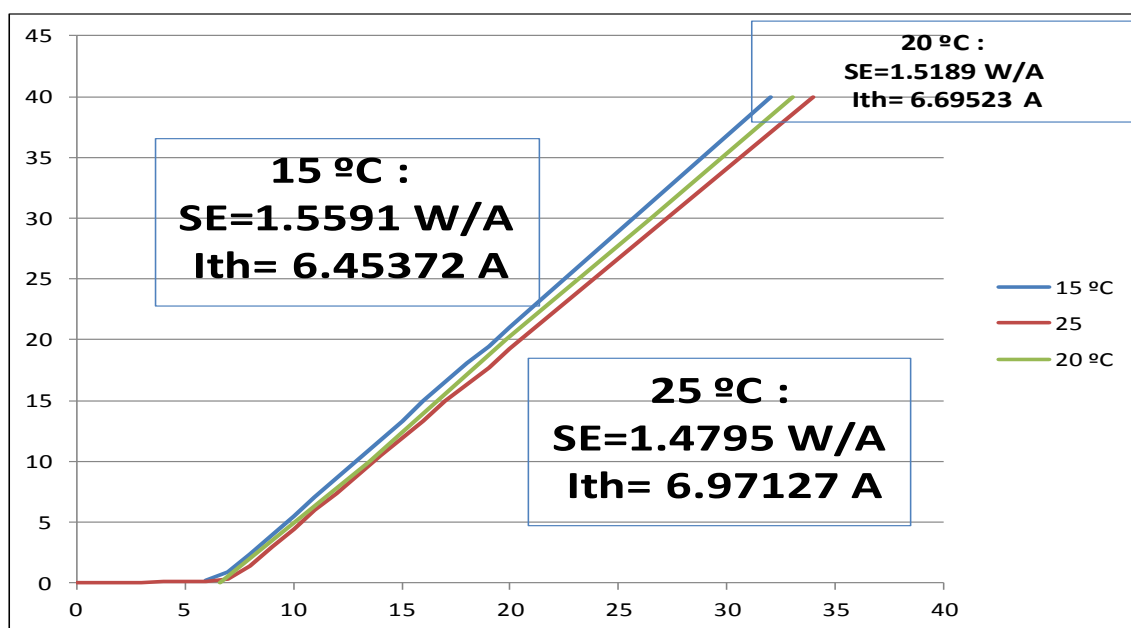


Figura 38: Característica de la resposta òptica a 15 °C i 25 °C del díode de 40 W

5.4.2 Càlcul dels paràmetres

Per a calcular els paràmetres elèctrics s'utilitza l'equació de Shockley com en els casos anteriors. Els valors utilitzats, 10 A/1.88 V, i 20 A/2.2 V. Amb aquest valors $R_s=3E-2 \Omega$ i $I_s(25^\circ C)$ és $2E-26$ A. $E_G=1.55$, valor que s'obté igual que en el cas del díode WSLX808008 de la gràfica de la Figura 30. XTI és 3 en un díode semiconductor. Amb aquest valors d' E_G i XTI calculem $I_s(27^\circ C)=2.93857E-26$ A aplicant l'equació de l'expressió (6). Amb aquest valors de R_s i I_s simulem el resultat en el programa Pspice i obtenim la corba indicada a la Figura 39 a continuació, on confirmem que els valors dels punts de 10 A/1.88 V i 20 A/2.2 V pertanyen a la corba i que el model elèctric és doncs correcte.

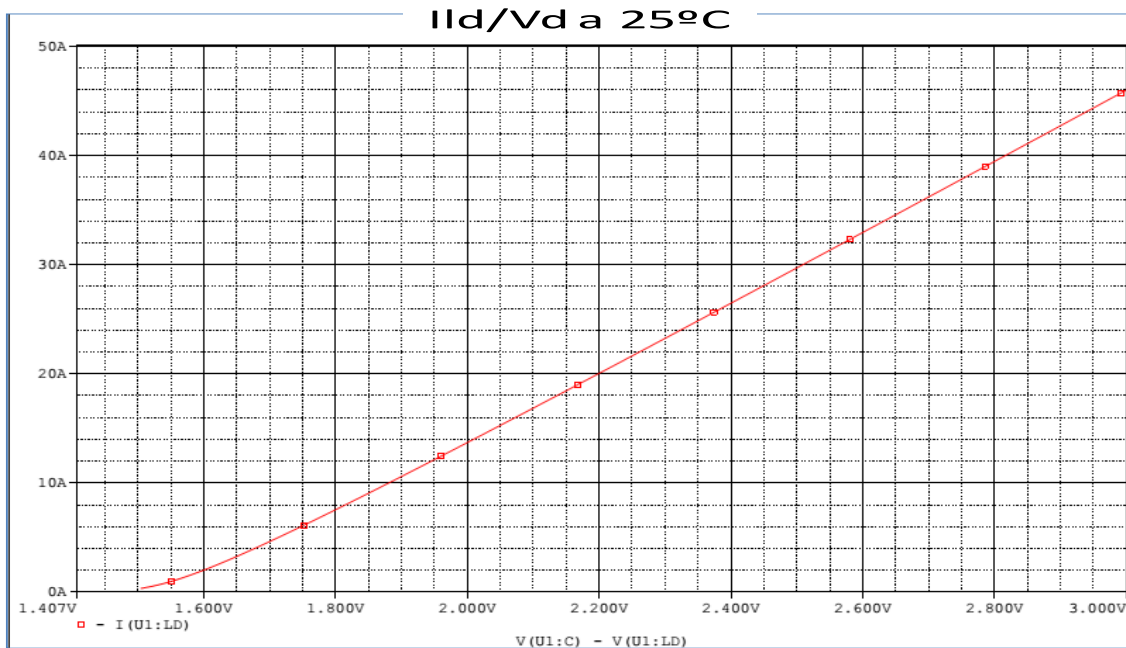


Figura 39: Simulació Pspice de la resposta I/V del díode de 40 W per validar el model elèctric

Pel que fa al model de la resposta òptica, el paràmetres a utilitzar són els indicats a la Figura 38, és a dir $T_1= 15^\circ C$, $T_2= 25^\circ C$, $I_{th1}=6.45372$ A, $I_{th2}=6.97127$ A, $SE_1=1.5591$ W/A, $SE_2=1.4795$ W/A. Amb aquests valors es calcula $T_o=129.63$ K aplicant l'expressió (9). Els valors a aplicar en el model Pspice són per tant els que s'indiquen en la Taula 4. Els valors mesurats a $20^\circ C$ s'utilitzaran per validar el model.

T (°C)	I _{th} (A)	SE (W/A)
15 (T ₁)	6.45372 (I _{th1})	1.5591 (SE ₁)
20	6.69523	1.5189
25 (T ₂)	6.97129 (I _{th2})	1.4795 (SE ₂)

Taula 4: Paràmetres del model òptic de la barra de díodes de 40 W

L'expressió de la potència òptica (12) del díode de 40 W en funció de la temperatura, substituint-hi els valors del paràmetres calculats és:

$$P_{opt}(T) = (1.5591 + (T - 15)(-0.00796)(I_d - 6.45372 * \exp[(T - 15)/129.63]))$$

5.4.3 Model Pspice

L'esquema del model Pspice que s'utilitza és el mateix que en el cas del díode anterior, ja que en els dos casos el fotodíode és extern i no s'hi inclou. Cal variar òbviament les funcions de transferència de les fonts del model. En la font Epopt s'inclou l'expressió de la potència òptica abans indicada limitada a 50 W per donar prou marge a la simulació, i en la de la font Gpd s'amplia la potència de llum emesa fins als 50 mA i 50 W, també amb una sensibilitat de 1mA/W per poder simular la resposta en Pspice. L'esquema del model Pspice havent modificat els valors de les funcions de transferència de les fonts segons els comentat es mostra a la Figura 40 a continuació.

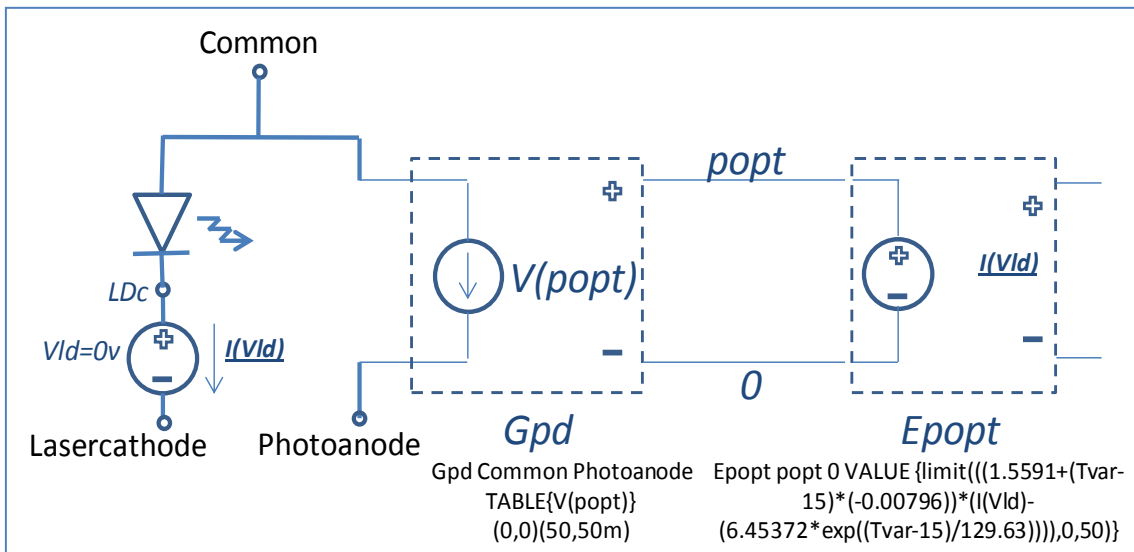


Figura 40: Model de circuit de simulació Pspice del díode làser de 40 W

El model programat en Pspice segueix també el mateix patró que el que s'ha utilitzat per al díode WSLX808008 i descrit en el capítol 3, i on també s'han obviat els paràmetres que per defecte en Pspice ja tenen els valors adequats. S'elimina també el díode fotodetector i s'hi inclouen les funcions de transferència de les fonts tal i com s'ha indicat. El model programat en Pspice és el que es mostra a la Figura 41 on tampoc s'han inclòs els càlculs intermedis de la expressió de la potència òptica en funció de la temperatura ja que segueixen el mateix procediment que el mostrat pel díode WSLX808008.

```
* PART NUMBER: unixips
* MANUFACTURER: monocrom
.param Tvar 25
.SUBCKT unixips Lasercathode Common Photoanode
Dlaserdiode Common LDc laserdiode
Vld LDc Lasercathode
Epopt popt 0 VALUE {limit(((1.5591+(Tvar-15)*(-0.00796))*(I(Vld)-(6.45372*exp((Tvar-15)/129.63))))),0,50)}
Gpd Common Photoanode TABLE {V(popt)}(0,0)(50,50m)
.model laserdiode D (T_ABS={Tvar}) IS=2.93857E-26 RS=0.03 EG=1.55
.ends
```

Figura 41: Model programat en Pspice del díode làser de 40 W

5.4.4 Resultats de la simulació

A l'igual que en el cas del díode anterior, el model programat Pspice ha estat simulat utilitzant el un circuit de test que faci variar el corrent que passa a través del díode làser amb una resistència variable i obtenint els resultats simulats del valor del corrent que es genera en la sortida del terminal del fotodetector que corresponen a la potència òptica, segons la Figura 42 a continuació.

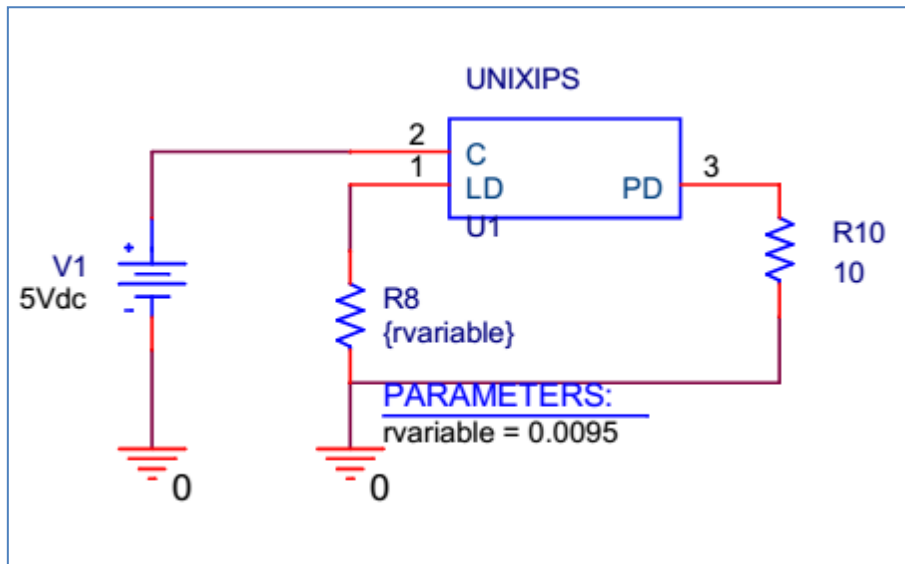


Figura 42: Circuit de test per simulació de la resposta òptica del díode laser de 40 W

Els resultats obtinguts en la simulació en el marge de temperatures entre 10 °C i els 40 °C, corresponen a un marge de temperatures superior al real recomanat de funcionament de díode en mode continu que és entre 15 °C i 30 °C. Per altra banda la potència d'emissió de llum del díode també s'ha obtingut fins al valor dels 50 W en el cas de la temperatura de 10 °C i fins als 48 A, ambdós valors superiors als límits recomanats d'operació de la barra de díodes. La simulació permet extralimitar-ne el marge de funcionament. La resposta simulada del díode làser s'ha obtingut cada 5 °C i es mostra a la Figura 43. Es mostra també una ampliació del punt on comença l'emissió de llum a cada temperatura per a poder comprovar el valor del corrent de threshold en cada cas. Es comprova que a 25 °C el valor del corrent de threshold és els 7 A, en concret els 6.97 A del valor utilitzat per a la definició del model i que concorda amb l'especificació del fabricant que donava un corrent de threshold típic de 7 A.

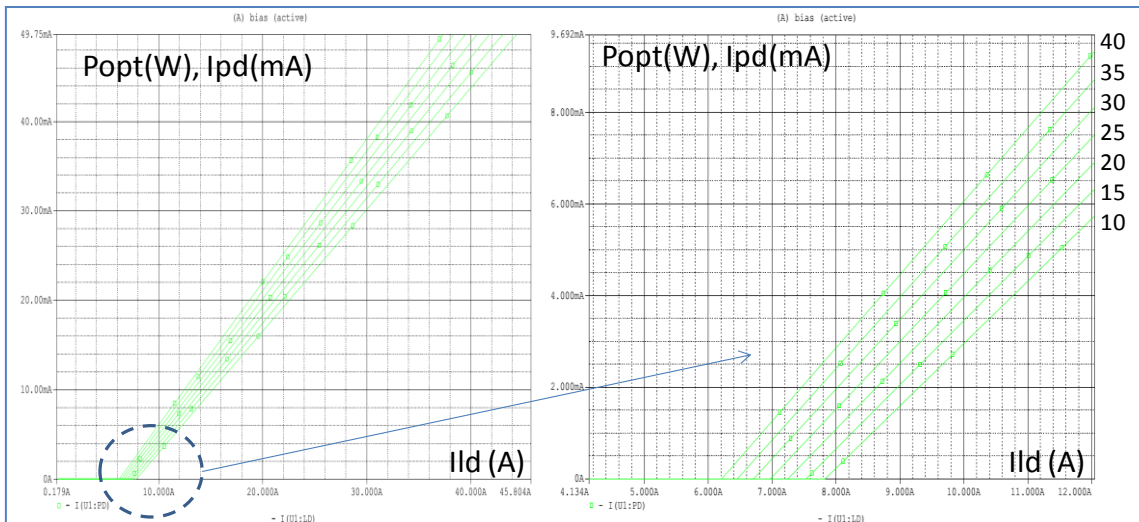


Figura 43: Resultats de la simulació del díode de 40 W a $T (^{\circ}\text{C}) = 10,15,20,25,30,35$ i 40

5.4.5 Validació del model

Per a validar el model, a l'igual que en el cas dels díodes anteriors, ens fixem en els valors que pren la simulació en un punt de temperatura intermedi i el comparem amb el valor mesurat. En aquest cas el valor de temperatura que prenem per la validació és el de 20°C . Els valors de la comparativa es mostren a la Taula 5.

T ($^{\circ}\text{C}$)	Mesures realitzades		Resultat simulació	
	Ith (A)	SE (W/A)	Ith (A)	SE (W/A)
15	6.45372	1.5591	6.45	1.559
20	6.69523	1.5189	6.72	1.523
25	6.97129	1.4795	6.97	1.479

Taula 5: Comparativa del valors mesurats, simulats i especificats al díode de 40 W

Els valors mesurats i simulats a la temperatura de 20°C coincideixen amb una variació del valor simulat respecte als mesurats de l'ordre del 0.3 % en el cas de la Ith i de l'ordre del 0.2 % en el cas de la SE, valors suficientment petits com per a considerar que el model és correcte i per a validar-lo. A les temperatures de 15°C i 25°C la variació és nul·la ja que són els valors que s'han utilitzat per generar el model programat.

6 Conclusions i futures investigacions

Com a resum repassem els objectius que es proposaven a l'inici de la recerca, com s'han assolit, i les principals contribucions que se n'han obtingut com a resultat de la recerca relacionada en cada cas per a extreure'n les conclusions.

6.1 Revisió dels objectius assolits

El primer objectiu que es proposava assolir era l'obtenció d'un mètode de modelat de la potència òptica dels díodes làser que inclogués la seva variació amb la temperatura. La recerca relacionada amb aquest primer objectiu es descriu al [capítol 2](#). L'objectiu s'ha assolit i s'ha aplicat com s'ha mostrat en el [capítol 5](#) a tres díodes làser de diferent rang de potència per a demostrar que el mètode és vàlid per a qualsevol díode làser independentment de la potència d'emissió de llum. Amb aquest mètode s'han obtingut els model matemàtics del la potència òptica de llum emesa, incloent-hi la variació en funció de la temperatura per a tots ells. El mètode inclou la proposta del model de la resposta òptica en dues zones, que són les d'emissió nul·la fins al corrent de threshold i la d'increment lineal de la potència de llum emesa amb l'increment del corrent injectat amb una relació o pendent de eficiència constant a partir d'aquest corrent de threshold, com s'explica al [punt 2.2.1](#). El model es defineix doncs en funció d'aquest dos paràmetres i permet incloure en la seva formulació matemàtica de forma relativament simple les variacions esperades en funció de la temperatura a partir de les d'aquests dos paràmetres. Aquestes són per una banda la variació de forma creixent exponencial amb l'increment de la temperatura del corrent de threshold I_{th} , explicat al [punt 2.2.2](#), i per l'altra la variació del pendent d'eficiència SE, explicat a [punt 2.2.3](#). Per a la variació del paràmetre SE en funció de la temperatura es formula la hipòtesi que aquesta variació és decreixent i lineal amb l'increment de la temperatura. Aquesta hipòtesi es valida amb mesures realitzades en una càmera climàtica on també es confirma la teoria empírica utilitzada sobre la variació amb la temperatura del paràmetre I_{th} . Ha estat convenient poder modelar la resposta òptica en funció d'uns paràmetres com són la I_{th} i la SE i poder-ne definir el seu comportament amb la temperatura per a poder formular-ne l'expressió matemàtica del model en funció de la temperatura.

El segon objectiu que es proposava era obtenir un mètode de programació en Pspice del model generat, i en concret la proposta de l'esquema de simulació i la programació en el programa Pspice del model matemàtic obtingut anteriorment. La recerca relacionada amb aquest objectiu es descriu al [capítol 3](#). L'esquema Pspice d'un díode làser amb un fotodíode associat ja existia en les llibreries disponibles del programa Pspice com s'ha comentat. L'objectiu i contribució d'aquesta tesis ha estat l'ampliació del model matemàtic per a poder incloure-hi les variacions de la temperatura. En aquest sentit, el model disponible es simplifica eliminant-hi els elements no necessaris com el fotodíode i resistències supèrflues i s'escull la forma de definició de la funció de transferència de la font de tensió que modela la potència òptica per a poder-hi incloure les variacions en funció de la temperatura, com s'explica al [punt 3.1](#). Al [punt 3.2](#) s'explica com introduir la variable de la temperatura en el model Pspice i com s'associa a la temperatura del component de forma que permeti incloure la expressió matemàtica de la variació de la potència òptica en funció de la temperatura en la funció de transferència de la font de tensió. Finalment al [punt 3.3](#) es mostra el model programat en Pspice.

El tercer objectiu proposat era definir un mètode de mesura de la resposta de la potència òptica del díode làser que fos independent de la temperatura, i definir basat en ell un sistema de caracterització o setup de mesura de la característica de la resposta òptica per als díodes làser. La recerca corresponent a aquest objectiu es descriu en el [capítol 4](#). La proposta de mètode de mesura independent de la temperatura o mesura en fred, explicat en el [punt 4.1](#), pretén mesurar la potència d'emissió de llum a diferents temperatures de manera que la temperatura a la que es mesura en cada cas no es vegi afectada pels efectes d'escalfament que el propi efecte làser provoca, que podrien variar el valor de la temperatura a la que es pretén caracteritzar la resposta. En el [punt 4.2](#) s'explica l'entorn de mesura necessari per implementar aquesta mesura en fred, considerant temes com l'adaptació de la potència d'emissió a la sensibilitat dels fotodíodes amb la que es mesura amb esferes integradores, el calibratge del sistema de mesura amb mesuradors de potència tèrmics, els drivers o controladors que s'utilitzen o la supervisió de l'estabilitat de la temperatura durant la mesura basant-se amb la no deriva de la longitud d'ona emesa controlada amb espectròmetres. A més, la utilització de targetes d'adquisició de dades d'alta velocitat i canals independents per poder mostrejar els senyals en intervals de temps prou curts com els necessaris per implementar el mètode de mesura en fred. Pel control de les targetes d'adquisició s'han realitzat aplicacions programades en LabVIEW per automatitzar les mesures i els càlculs necessaris per obtenir els valors dels paràmetres Ith i SE. Com s'explica en el [punt 4.3](#) aquest setup de mesura es pot automatitzar per treballar amb combinació amb un sistema de condicionament de la temperatura i poder obtenir els valors d'aquests paràmetres a diferents temperatures, com cal per definir el model matemàtic en funció de la temperatura. És en aquest punt, i en concret al [punt 4.3.3](#) on s'explica com s'obtenen les mesures en càmera climàtica que permeten validar les hipòtesis formulades en el capítol 2 sobre el paràmetre SE i confirmar la teoria empírica sobre el paràmetre Ith.

6.2 Revisió de les aportacions i contribucions de la tesi

Pel que fa a les aportacions que se'n deriven de la recerca realitzada en aquest treball de tesi, en primer lloc i com a contribució més important en l'àmbit teòric sobre el comportament de la resposta òptica dels díodes làser amb la temperatura, la hipòtesi que la variació del pendent de la resposta de potència òptica amb l'increment del corrent, paràmetre SE (Slope Efficiency o també Differential Efficiency) varia de forma lineal i decreixent amb l'increment de la temperatura. Això permet formular una expressió matemàtica del comportament de la resposta òptica amb la temperatura, utilitzant també la teoria empírica ja existent sobre la variació del corrent de threshold i el model de la potència òptica comentat.

Una segona contribució seria la proposta del model simple de la resposta òptica en dues rectes que permet la inclusió de l'expressió matemàtica de la variació amb la temperatura i la hipòtesi que el model proposat és vàlid per a díodes làser de qualsevol rang de potència. Aquesta hipòtesi n'inclou de fet dues més. Una primera, que el creixement exponencial del paràmetre Ith segons la teoria empírica formulat sobre díodes de baixa potència era vàlida per a díodes d'alta potència. I una segona que la hipòtesi formulada sobre SE, també basada en especificacions de díodes de potència mitja baixa, era també vàlida per a díodes de qualsevol potència. Les mesures realitzades i les validacions dels models als díodes de diferents potències descrits en el [capítol 5](#) permeten confirmar que el model proposat de resposta òptica i la seva variació en funció de la temperatura és vàlid per a totes les potències. També

ho són per tant les hipòtesis derivades respecte als paràmetres I_{th} i SE i les seves variacions amb la temperatura en díodes de diferents potències.

Com a resultat de la formulació i validació d'aquestes hipòtesis podem doncs fer una proposta d'expressió matemàtica del model de la resposta òptica dels díodes làser incloent la variació amb la temperatura, com es descriu en el [punt 2.2.4](#), que ens permet generar els models programats en Pspice

En l'àmbit de la mesura i la caracterització de la resposta, la contribució que aporta aquesta recerca és la definició d'un mètode de caracterització de la resposta òptica del díode de forma que sigui independent de l'escalfament del díode pel propi efecte làser. Aquest mètode de mesura en fred s'implementa amb un sol flanc de pujada del corrent injectat de fins a tant sols $20 \mu s$ per a cada temperatura, i necessita de la utilització de targetes d'adquisició d'alta velocitat de mostreig. El mètode es descriu com s'ha dit en el [punt 4.1](#). El control amb LabVIEW en permet calcular els paràmetres per a cada temperatura i automatitzar el sistema conjuntament amb sistemes programats de condicionament de la temperatura com són les càmeres climàtiques, com es descriu en el [punt 4.3](#). ja comentat.

Finalment en el capítol de les contribucions, la recerca realitza aportacions en l'àmbit de la programació en Pspice comentades en el [capítol 3](#). Aquestes aportacions es basen en la modificació dels models existents de model Pspice en les llibreries. Per una banda per poder incloure les expressions del model matemàtic de la resposta òptica en el model Pspice, i en concret en la font controlada de tensió que en modela la resposta. I per una altra, la modificació del model Pspice per poder modificar-ne la temperatura de forma que aquestes modificacions es vegin reflectides en l'expressió matemàtica inclosa en la funció de transferència de la font que en modela resposta òptica.

6.3 Noves línies de recerca

Futures investigacions es podrien centrar en l'àmbit del sistema de mesura i les condicions dels seus components. S'ha vist que petites modificacions de les condicions de mesura com poden ser el tipus de cables utilitzats per connectar el díode al driver, és a dir la longitud i la secció del cable, o inclús la ubicació de la sonda de corrent en el cable, més a prop del driver o del díode, afecten a la resposta mesurada. Caldria per tant avaluar aquests factors i definir-ne un entorn de mesura estable on estiguin controlats. En la recerca realitzada, els cables s'han adaptat al tipus de connexió disponible en els díodes, especialment en les barres de díodes. Aquesta connexió entre el díode i el driver s'havia de fer en alguns casos amb els cables connectats als bisos de subjecció de l'ànode del díode a la plataforma de refrigeració del sistema de condicionament de temperatura, i amb un altre bis de connexió al càtode. En els díodes que disposaven de connexions habilitades per connectar-hi els cables de tipus espàrrec a l'ànode i al càtode, s'han utilitzat cables amb d'aquest tipus de connexió. Per evitar qualsevol tipus d'efecte dels diferents tipus de cables de connexió, de les pròpies connexions, de les sondes de corrent utilitzades i la seva ubicació en els cables, o de qualsevol altre efecte en la mesura i la caracterització dels díodes, s'hauria de definir un sistema de mesura considerant tots aquests aspectes que pugui ser utilitzat per a tot tipus de díodes a ser caracteritzats. Aquest sistema de mesura hauria d'estar parametrizat i en el millor dels casos estandardizat, per poder referenciar-hi els valors mesurats de la característica de la resposta òptica dels díodes. És per tant una línia de recerca dels díodes làser en l'àmbit de la mesura.

Un altra possible línia de recerca estaria relacionada amb l'expressió matemàtica del model de la potència òptica emesa. El model que s'ha utilitzat es basa en dues rectes, una de valor 0 per nivells del corrent inferiors al threshold, i una altra recta de pendent SE per nivells del corrent a partir d'aquest valor. Aquest model és prou adequat per a poder caracteritzar la resposta òptica del díode làser i saber-ne el seu comportament en valors d'operació que s'ubiquen en punts de la recta de pendent relativament allunyats del corrent de threshold i que són els que s'utilitzen normalment en mode continu o quasi continu. El comportament real de la resposta òptica en valors propers al threshold s'allunya lleugerament del model proposat de dues rectes, formant una petita corba en aquesta zona i per sobre de les rectes del model. Des del punt de vista matemàtic es podria modelar aquesta zona de la resposta òptica de forma més fidel. Si bé la utilització dels díodes làser en aquesta zona de la resposta no és l'habitual i no té una aplicació pràctica evident, des del punt de vista del model matemàtic, aquesta seria una millora a fer ja que realment en zones de corrent properes al threshold la resposta òptica real i la modelada presenten una certa diferència. S'hauria doncs d'estudiar quina és la forma de la corba que descriu la resposta òptica en aquests punts, si és comú al díodes de totes les potències, obtenir-ne una expressió matemàtica, i veure com es pot introduir en aquesta expressió la dependència en funció de la temperatura, de la mateixa forma que s'ha fet en el model proposat. Un cop es disposi de l'expressió matemàtica, i pel que fa al model en Pspice, s'hauria d'estudiar quina és la millor manera d'implementar aquesta nova expressió del model matemàtic de la resposta òptica en el model de circuit de simulació i la programació en Pspice. Si la corba de resposta òptica incloent el colze a prop del threshold no es pot definir amb una única equació matemàtica, una possible solució seria utilitzar diferents fonts, cadascuna amb una equació matemàtica que en defineixi la resposta, i un circuit i el model esquemàtic corresponent que seleccioni cada font en cada tram. Una altra possibilitat seria definir de la resposta òptica en base a una taula de punts i investigar si es pot expressar la variació de la resposta òptica en funció de la temperatura amb expressions per cada punt de la taula també en funció de la temperatura.

7 Referències:

- [1] <https://www.monocrom.com/en/applications>
- [2] Zhu H, Ruset IC, Hersman FW (2005) Spectrally narrowed external-cavity high-power stack of laser diode arrays. *Opt Lett* 30:1342–1344
- [3] Dong Wook Lim, Hyung Uk Cho, Hyuk Kee Sung, and Jong Chang Yi, " A PSPICE Circuit Modeling of Strained AlGaInN Laser Diode Based on the Multilevel Rate Equations" *Journal of the Optical Society of Korea* Vol. 13, No. 3, September 2009, pp. 386-391 Hongik University, Seoul 121-791, Korea. Young Min Jhon Korea Institute of Science and Technology (KIST), Seongbuk, Seoul 136-791, Korea.
- [4] Dan Alexandru Anghel, Andreea Rodica Sterian and Paul E. Sterian, "Modeling Quantum Well Lasers". Hindawi Publishing Corporation *Mathematical Problems in Engineering* Volume 2012, Article ID 736529, doi:10.1155/2012/736529 Academic Center for Optical Engineering and Photonics, Faculty of Applied Sciences, University "Politehnica" of Bucharest, 060042 Bucharest, Romania
- [5] Jae Hong Kim, "Wide-Band and Scalable Equivalent Circuit Model for Multiple Quantum Well Laser Diodes". Georgia Institute of Technology, August 2005
- [6] Houssam Kanj, " Double Heterojunction Laser Diode (Tucker Model) DHLD " NC State University, 2003
- [7] Houssam Kanj, " Circuit-Level Modeling of Laser Diodes" Graduate Faculty of North Carolina State University. *Electrical Engineering* Raleigh. May 2003.
- [8] M. S. Ozyazici, "The complete electrical equivalent circuit of a double heterojunction laser diode using scattering parameters" *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials* Vol. 6, No. 4, December 2004, pp. 1243 - 1253. University of Gaziantep, Electrical and Electronics Eng. Dept., 27310 Gaziantep, Turkey
- [9] M.Lomer, Francisco J. Ruiz García. J.Echevarria, J.L.Arce, M.Morante. J.M. López-Higuera "Modelización y Simulación de dispositivos optoelectrónicos utilizando el programa SPICE" *URSI 97. II* 453-456. ETSI Telecomunicación, Universidad de Cantabria. Departamento de Tecnología Electrónica - Grupo de Ingeniería Fotónica.
- [10] Vítězslav JEŘÁBEK , Ivan HÜTTEL, "Theoretical Model of the Bistable Semiconductor Laser Diode Based on the Rate Equations". *RADIOENGINEERING*, Vol. 20, NO. 2, June 2011. Department of Microelectronics, CTU FEE, Technicka 2, 166 27, Prague 6, Czech Republic 2. Institute of Chemical Technology, Technicka 5, 166 28, Prague 6, Czech Republic
- [11] Pablo Valente Mena, "CIRCUIT-LEVEL MODELING AND SIMULATION OF SEMICONDUCTOR LASERS". Department of Electrical and Computer Engineering University of Illinois at Urbana- Champaign, 1998

- [12] Christoph Harder, Joseph Katz, S. Margalit, J. Shacham, and Amnon Yariv, Fellow IEEE, "Noise Equivalent Circuit of a Semiconductor Laser Diode" IEEE JOURNAL OF QUANTUM ELECTRONICS, VOL. QE-18, NO. 3, MARCH 1982
- [13] Cliff L. Ma, Member IEEE, Peter O. Lauritzen, Senior Member IEEE, Jakob Sigg, "Modelling of Power Diodes with the Lumped-Charge Modeling Technique" IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 12. NO. 3. May 1997
- [14] A. Sonne, A. Ouchar and A.Ghazel A, " A New SPICE Method of Modeling of optoelectronic components for Optical fiber Link Transmission ", Proc. 8th WSEAS International Conference on Microelectronics, Nanoelectronics, Optoelectronics, Istanbul, Turkey, May-June 2009, pp-124-128. Electrical engineering department University of Laghouat BP 37 G route de Ghardaïa, Laghouat ALGERIA,
- [15] Lukasz Sliwczynski, " Simple Spice model simulates laser diode" University of Mining and Metallurgy, Krakow, Poland EDN JULY 16, 1998
- [16] Intusoft, " Modeling Lasers With IsSpice and PreSpice " Intusoft Newsletter. Personal Computer CircuitDesign Tools. July 1989
- [17] SONY, SLD1121VS specification, E93821C1X-PS, Sony Corporation.
- [18] SONY, SLD1132VS specification, E94Y01D18-PS, Sony Corporation
- [19] SONY, SLD323V specification, E93207C19-PS, Sony Corporation
- [20] Paul D. Mitcheson. EE2.3: Semiconductors Modelling in Spice/PDm-v1.0. Spice Diode and BJT models. pp. 4-11. Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College, London. <http://www.imperial.ac.uk/people/paul.mitcheson/teaching>
- [21] J.S.Smith. Lecture 20: PN diodes (forward bias) small signal model, BJTs. pp.10-11 (University of California, Berkeley) Department of EECS. Spring 2004.
- [22] Computer Aided Engineering for Integrated Circuits. Session 4 pp.2-4. <http://www2.engr.arizona.edu/~ece570/session1.pdf>
- [23] Diode Spice model. <http://rincon-mora.gatech.edu/classes/ece3040/handouts/spice.pdf>, pp.1-2.
- [24] Pspice Reference Guide, Cadence Design Systems, Inc. Cadence PCB systems Division. May 2000, p.133
- [25] E. F. Schubert, Light-Emitting Diodes, 2nd ed. p. 207. (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2006)
- [26] Spice Diode Model Parameters. http://www.acsu.buffalo.edu/~wie/applet/spice_pndiode/spice_diode_table.html
- [27] Gerd Keiser, Semiconductors Laser Diodes. Lecture 13 pp. 34-38. <http://studylib.net/doc/18066820/lecture-13--semiconductor-laser-diodes>

- [28] HITACHI, HL6722G specification ADE-208-220C(Z) 4th Edition, p-4. Dec.2000, Hitachi Ltd.
- [29] Laser Diode on Submount 2.0 W (C.Mount) v 1.2 SPL CG81-2S OSRAM Opto Semiconductors GmbH Leibnizstraße 4, D-3055,Regensburg, www.osram-os.com, 2016-01-26
- [30] SONY, SLD326YT specification, E95Z12B01-PS,Sony Corporation
- [31] WSLX-808-008-H-T Product Specification Wavespectrum Laser Inc. www.wavespectrum-laser.com
- [32] Thomas James Slight," Integration of a Resonant Tunnelling Diode and an Optical Communications Laser ". Department of Electronics and Electrical Engineering University of Glasgow, November 2006
- [33] HITACHI HL7801E GAAIAs LD Hitachi America Ltd. San Francisco Center 2000 Sierra Point Pkwy. Brisbane CA 94005-1819
- [34] Mitsubishi Laser Diodes ML9XX56 SERIES InGaAsP-MQW-FP LASER DIODES ML976H6F, ML920B6S Nov'97 Mitsubishi Electric Semiconductor
- [35] SANYO, DL-3149-057 specification, Ver.1, p-1-Jun. 2000. Tottori SANYO Electric Co., Ltd. Electronic Device Business Headquarters LED Division 5-318, Tachikawa, Tottori 680-8634 Japan
- [36] DAE-20050 Driver for High Power Laser Diodes. Monocrom electronics. www.monocrom.com
- [37] Datasheet_DRVx2PITEC 15A Laser diode driver. Monocrom Electronics. www.monocrom.com
- [38] User Guide_DRVx2PITEC. Monocrom Electronics, www.monocrom.com
- [39] Thorlabs PDA100A-EC Manual and product datsheet. Thorlabs Inc. US, www.thorlabs.com
- [40] 10A-PPS Laser Thermal Power Sensors. Low Power Thermal Sensors, www.ophiropt.com
- [41] 50A-PF-DIF-18 Laser Thermal Power Sensors. Low Power Thermal Sensors, www.ophiropt.com
- [42] Nova II Laser Power and Energy Meters, www.ophiropt.com
- [43] Blue-Wave Miniture Spectrometer Analytical Instrumentation SNI-PressRel.doc www.StellarNet-Inc.com
- [44] AvaSpec-ULS2048 Datasheet. Avantes enlightening stpectroscopy. www.avantes.com
- [45] HighFinesse LSA Laser Spectrum Analyser, www.highfinesse.com

[46] NI USB-6009 Multifunction I/O device. Datasheet & Specification. www.ni.com

[47] NI PCI-6115 Multifunction I/O device. Datasheet & Specification. www.ni.com

8 Annex A: Control amb LabVIEW

Els programes desenvolupats en LabVIEW s'han utilitzat per controlar les targetes d'adquisició de dades i per processar-ne els resultats i obtenir-ne els valors dels paràmetres del corrent de threshold i del pendent d'eficiència òptica SE. Aquesta implementació forma part del sistema de caracterització de la resposta òptica dels díodes làser que s'utilitza en combinació amb sistemes de condicionament de la temperatura.

Les targetes d'adquisició de dades utilitzades han estat la NI USB-6009 i la NI PCI-6115 com s'ha comentat en el [capítol 4, punt 4.2.5](#). El sistema de caracterització es basa principalment en obtenir la relació entre el valor del corrent injectat al díode làser i la potència òptica que n'emet a diferents temperatures. El programa en LabVIEW controla les targetes, on s'hi connecten els senyals a mesurar de la tensió proporcional al corrent injectat al díode, el voltatge mesurat al fotodíode i el voltatge mesurat al termistor. Els valors mesurats els representa en gràfiques, n'aplica els factors de conversió corresponents, n'obté la relació de la característica de la resposta òptica, en calcula els paràmetres I_{th} i SE, i finalment n'enregistra els valors calculats a cada temperatura en un fitxer per al seu posterior anàlisi i obtenció del model del díode làser.

Per obtenir els valors de la I_{th} i del SE el programa analitza les dades de la relació corrent a potència òptica identificant-ne els punts de la recta de la resposta que s'utilitzen pel càlcul de la recta pendent i eliminant-ne els punts inferiors a un cert valor de potència òptica i que correspondrien al colze de la resposta que es produeix a l'inici de l'efecte làser, a prop del corrent de threshold. Calcula el valor del pendent o eficiència òptica SE i el seu tall a l'eix horitzontal o corrent de threshold I_{th} de la recta que formen els valors restants. Per fer això es basa en la mitja d'un cert nombre configurable de punts dels extrems de la recta i no només en un de sol per evitar que l'efecte del soroll en una mostra concreta pugui afectar al càlcul dels paràmetres.

El sistema automatitzat d'obtenció de la característica guarda en un fitxer els valors de la I_{th} , de la SE i de la temperatura per a l'obtenció del model. Addicionalment, també de l'instant de temps en el que s'ha realitzat la mesura per controlar si hi ha mesures perdudes i que la variació temporal de la temperatura és l'adequada. L'interval en el que es realitza la mesura es programable i es fa en combinació amb l'interval programat de generació del pols de corrent. En el cas del driver DRVx2PITEC és el generador de funcions que controla el driver el que dóna el temps entre els polsos. En el cas del driver DAE20050 és el controlador del driver al PC.

La durada temporal de les mesures es controla manualment per adaptar-la a la programació del sistema de condicionament de la temperatura. En el cas de la utilització de càmera climàtica, s'adapta al temps del cicle de funcionament programant en la càmera. En el cas d'utilitzar un chiller o circuit refrigerador, cada cop que s'ha assolit la temperatura desitjada i se'n vol obtenir mesures.

El valor del corrent es mesura amb una tensió resultant de la proporcionada per un circuit conversor que es pot tractar d'una sonda de corrent com la utilitzada en les barres de díodes de 40 W, o també d'un circuit adaptador a base d'un amplificador com l'utilitzat en el díode single emitter de 8 W i amb el driver DRVx2PITEC, d'on s'extreu el valor del corrent de la tensió de la resistència shunt en sèrie amb el díode làser. El programa aplica els factors de conversió corresponents per a obtenir el valor real del corrent al díode.

En el cas del fotodíode, la relació entre la potència òptica i la tensió mesurada ve donada pel factor de calibrat que s'ha obtingut referenciat a la potència òptica mesurada amb un mesurador de potència tèrmic. El programa aplica aquest factor de calibrat en el càlcul corresponent.

Es mostra en la Figura 44 el panell de control del programa LabVIEW en el cas del díode 8 W WSLX808008 utilitzat amb el driver DRVx2PITEC. S'hi inclou la representació de la tensió al fotodíode proporcional a la potència òptica, la tensió a la sortida del circuit adaptador de la tensió al shunt, proporcional al corrent al díode, i la tensió al termistor, proporcional a la temperatura, juntament amb la corba de la característica de la resposta resultant. També s'hi indiquen els valors dels paràmetres calculats del corrent de threshold I_{th} , de l'eficiència òptica SE i de la temperatura T. Els resultats de les mesures es guarden un fitxer a tal efecte especificat en el requadre "dades de sortida". En aquest panell de control s'especificuen com a paràmetres d'entrada els valors de l'interval entre mesures en segons, del factor de conversió corresponent entre la tensió mesurada al circuit adaptador i el corrent al díode, i el factor de calibrat o relació entre la tensió al fotodíode i la potència òptica real mesurada al mesurador de potència tèrmic. Altres indicadors marquen els valors de càlculs intermedis per a control com són els valors màxims i mínims del corrent al díode i de la potència òptica utilitzats per al càlcul de la recta, i els valors del pendent amb valors mitjos sense calibrar i del pendent utilitzant el valors màxim i mínim per a poder comparar-los i avaluar l'efecte del promig dels punts que es fa en el càlcul.

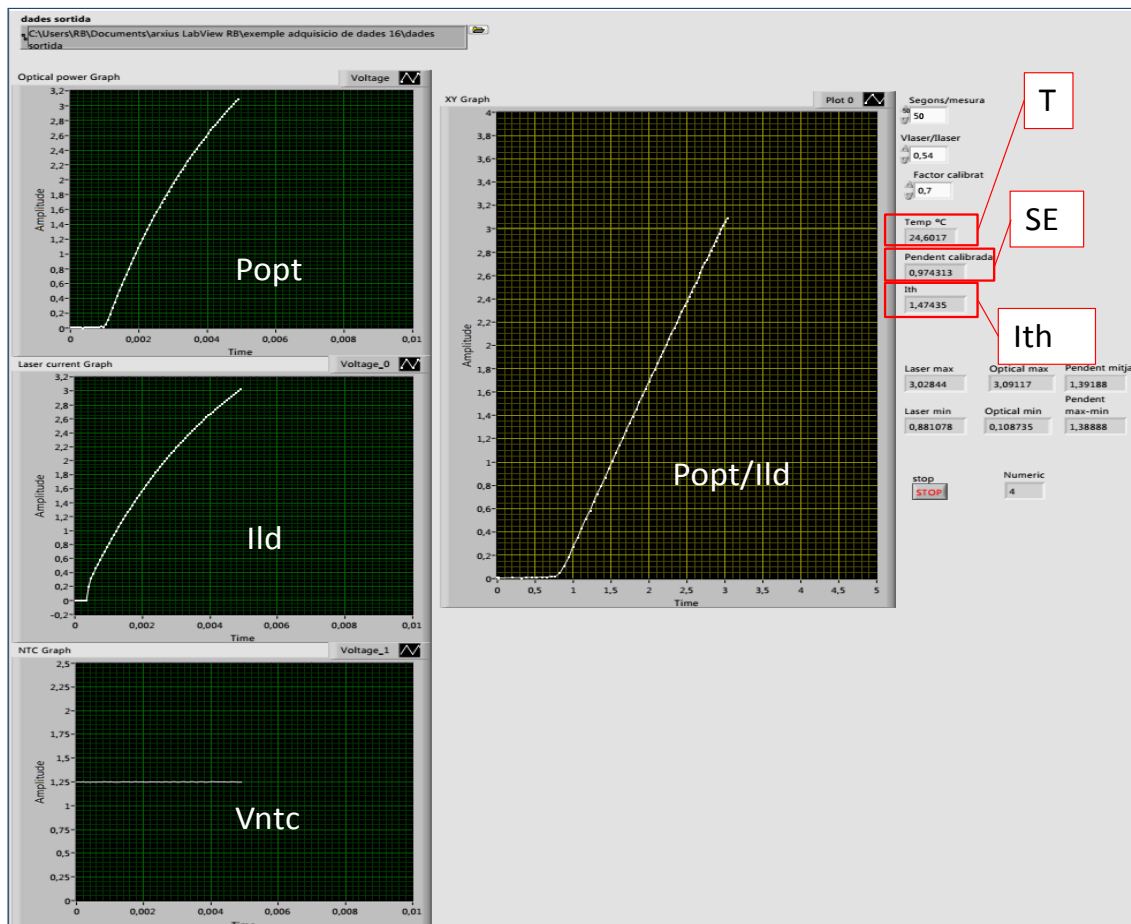


Figura 44: Panell de control del programa LabVIEW

A la propera Figura 45 es mostra el diagrama de blocs corresponent del programa LabVIEW. S'hi inclouen comentaris per als diferents blocs. Mencionem especialment l'ús del DAQ assistant, proporcionat per la llibreria de drivers del DAQmx del programa, que ens permet substituir fàcilment el control corresponent a la targeta d'adquisició utilitzada. En aquest cas és la NI USB-6009. En referència a la mesura del valor del termistor, es realitzen tantes mesures com punts s'adquireixen de la corba i se'n fa la mitja. Per al càlcul de la temperatura, el programa aplica la conversió de tensió a temperatura de la recta de l'aproximació de la resposta del termistor amb la temperatura comentada en el cas del díode WSLX808008 en el [capítol 5, punt 5.3.1](#). Pel que fa als valors seleccionats pel càlcul de la recta, en aquest cas se n'eliminen els valors de Vpd inferiors a 0.05 V. En el càlcul de la mitja de les mostres restants, es realitza sobre les 15 mostres de major i menor valor, com a extrems de la recta.

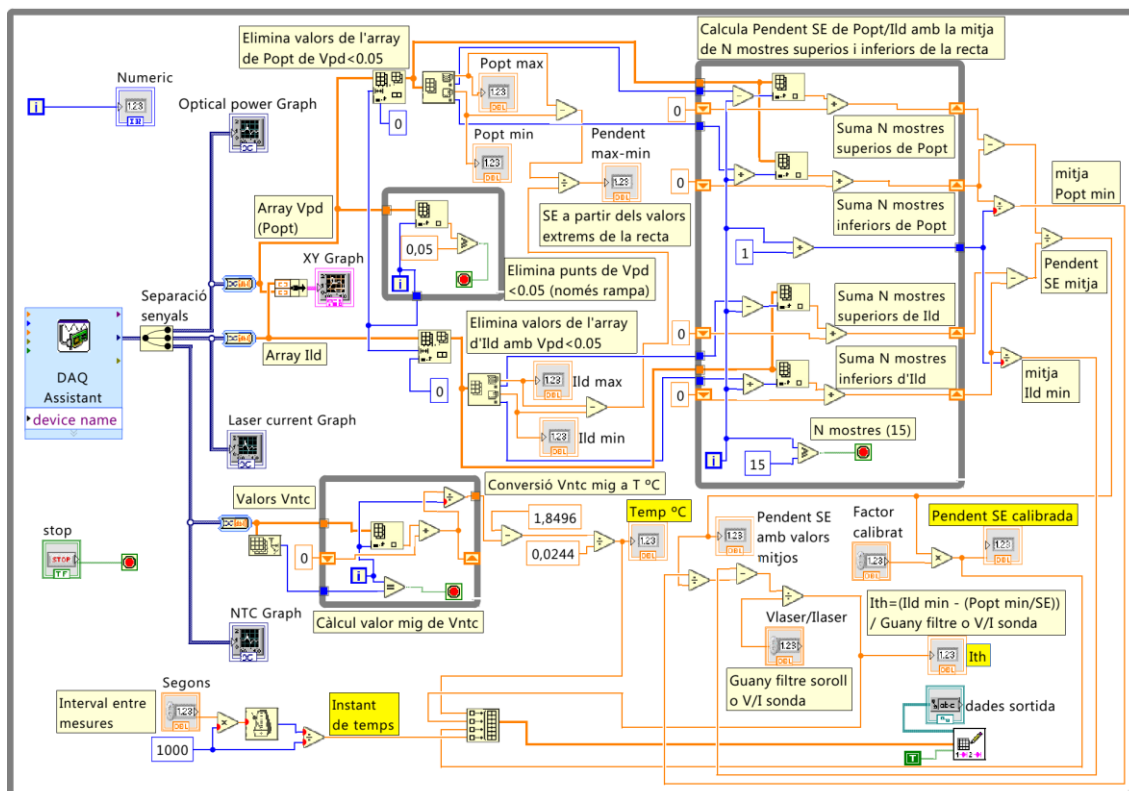


Figura 45: Diagrama de blocs del programa LabVIEW

S'ha utilitzat altres versions o modificacions d'aquest programa LabVIEW en les diferents mesures, com en el cas de la barra de díodes de 40 W, que no incloïa un termistor NTC i per tant se n'ha eliminat la part corresponent, a part de substituir-hi el mòdul del DAQ assistant pel de la targeta NI PCI-6115. L'exemple mostrat és el més complet i representatiu dels desenvolupats i el que s'ha utilitzat en combinació amb la càmera climàtica. Les diferents versions que s'han utilitzat en són modificacions o simplement subconjunts.

9 Annex B: Coeficient de la longitud d'ona amb la temperatura. Espectròmetres utilitzats.

Com s'ha comentat en el [capítol 4, punt 4.2.4](#), utilitzem el fet que la longitud d'ona de la llum que emet el díode làser varia amb la temperatura. El factor d'aquesta variació es coneix com a coeficient de longitud d'ona amb la temperatura $\Delta\lambda/\Delta T$ (nm/°C). Cal conèixer quin és el valor d'aquest coeficient per poder mesurar l'increment de la temperatura a partir de la variació de la longitud d'ona, i a més, ens cal tenir una referència del valor de la longitud d'ona a una certa temperatura, si el que es vol es obtenir el valor absolut de la temperatura en funció de la longitud d'ona emesa. En el mètode proposat de caracterització de la resposta òptica dels díodes làser, el que realment ens interessa és comprovar que no hi ha deriva de la temperatura degut al possible escalfament del díode làser pel fet d'estar-hi injectant corrent. Del que es tracta és realment de comprovar que l'ample de l'espectre de llum emesa, que és mesura amb el paràmetre FWHM (Full Width at Half Maximum), no excedeix el valor esperat. Si hi hagués deriva de la temperatura durant la mesura, donat que la longitud d'ona variaria, l'espectre es desplaçaria durant la mesura. Per tant, l'ample de l'espectre s'eixamplaria i el valor del paràmetre FWHM augmentaria. Per altra banda, es pot utilitzar realment la mesura de la longitud d'ona com a mesura real de la temperatura a la unió p-n si és aquest l'objectiu. D'aquesta manera s' evita qualsevol gap de temperatura existent entre la unió semiconductora i l'element que mesuraria la temperatura, sigui un termistor en el dispositiu o un termòmetre extern, especialment en funcionament en mode continu.

S'ha mesurat el coeficient de longitud d'ona amb la temperatura en el díodes de 8 W WSLX808008 i en la barra de díodes de 40 W. S'ha utilitzat tres espectròmetres diferents, l'Avantes AvaSpec-2048-SPU2, el Blue-Wave de StellarNet i el HighFinesse Angstrom.

En la mesura del valor del coeficient de la longitud d'ona amb la temperatura utilitzant l'espectròmetre Avantes AvaSpec-2048-SPU2 s'obtenen gràfiques que cal processar per obtenir tant el valor de la longitud d'ona mitja com de l'ample de l'espectre, o paràmetre FWHM. Pel que fa al càlcul de la longitud d'ona mitja o també coneguda com a "Centroid", el que fem és calcular la mitja ponderada de la longitud d'ona de l'espectre respecte a la potència. El càlcul a fer és doncs com es mostra en la expressió i la Figura 46 a continuació.

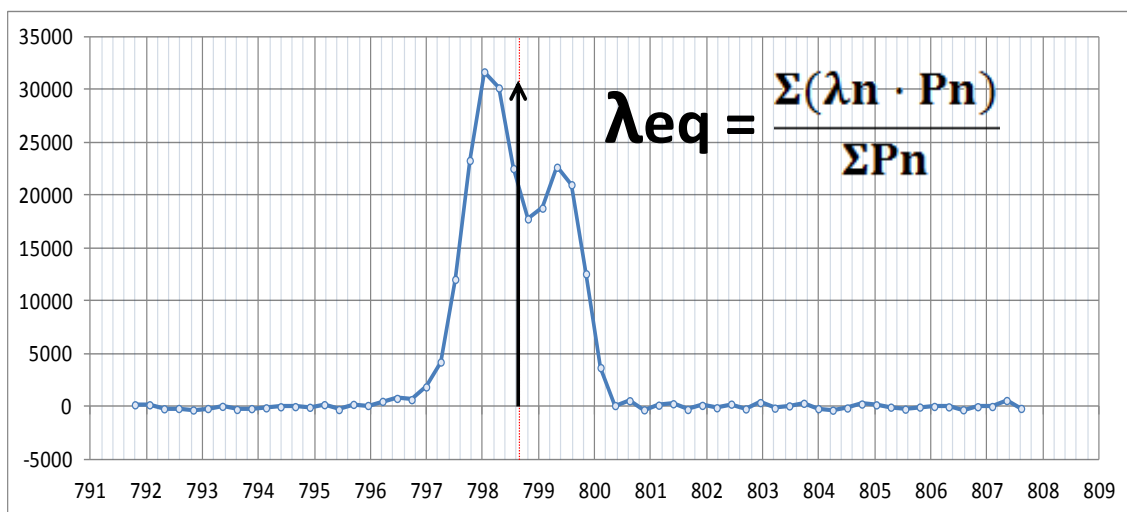


Figura 46: Espectre obtingut amb Avantes AvaSpec 2048 SPU2 i càlcul del centroid

Per mesurar el coeficient la longitud d'ona amb la temperatura en el cas del díode làser WSLX808008 utilitzem el fet que aquest dispositiu disposa d'una cel·la Peltier incorporada que controlam amb el driver DRVx2PITEC i el termistor NTC també inclòs al dispositiu com s'ha comentat, i els utilitzem amb combinació amb un circuit refrigerador a 18 °C per controlar la temperatura a la que es realitza la mesura de l'espectre en el marge entre 10 °C i 26 °C. El corrent que s'injecta és de 7 A. Els resultats obtinguts es mostren a la Figura 47 a continuació.

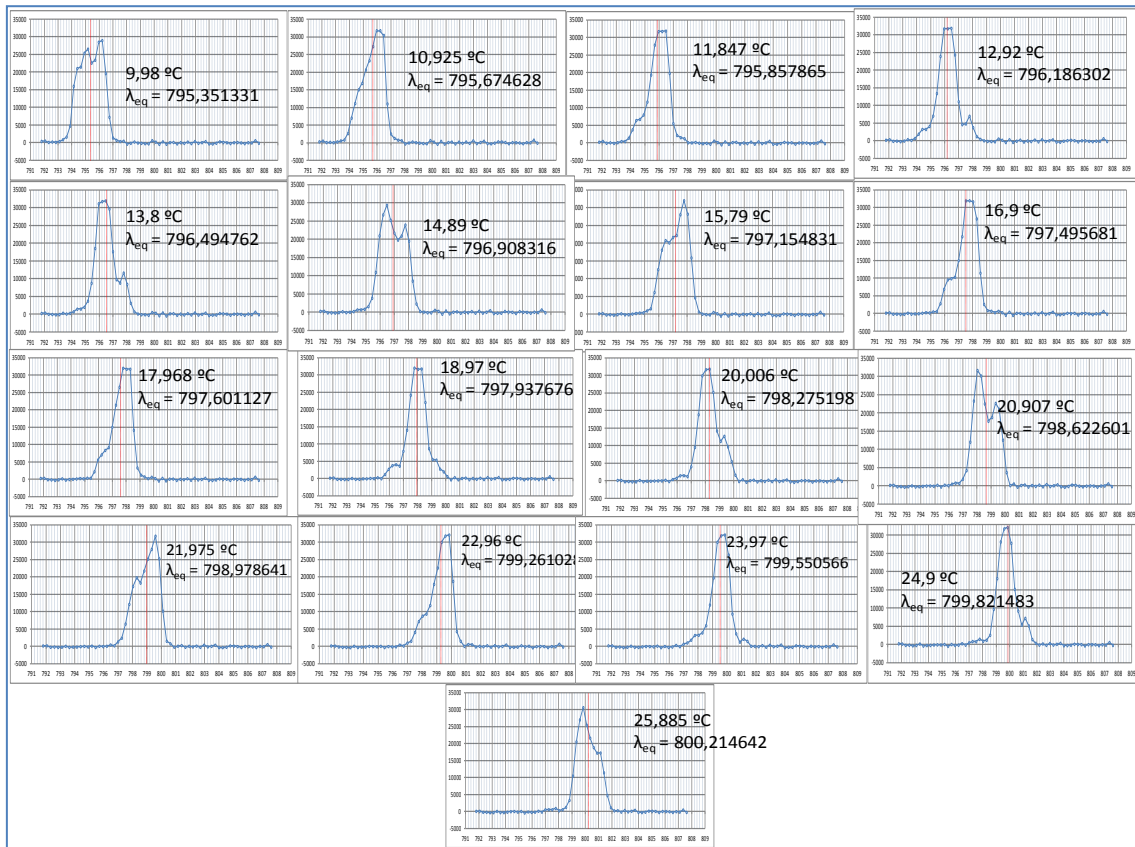


Figura 47: Espectres obtinguts del WSLX808008 a diferents temperatures

Amb aquests valors obtenim la gràfica de variació de la longitud d'ona amb la temperatura, pendent de la qual és precisament el valor del coeficient de la longitud d'ona amb la temperatura que volem calcular. El valor obtingut és de 0.3 nm/°C que coincideix amb el proporcionat pel fabricant. La gràfica i la taula de valors es mostren a la propera Figura 48.

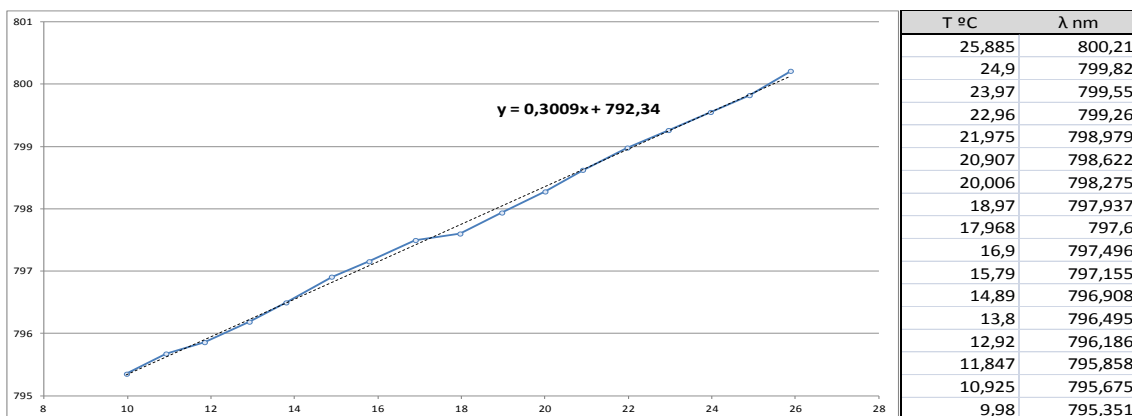


Figura 48: Coeficient de λ amb la T del díode WSLX808008 amb l'espectròmetre Avantes

També es pot comprovar en els espectres obtinguts a les diferent temperatures que el paràmetre FWHM en cap cas supera el valor de 3 nm que ens especifica el fabricant. Amb això es pot confirmar que amb el pols que s'utilitza per a fer aquesta mesura i que ens proporciona el driver DRVx2PITEC, que com també s'ha comentat en el [capítol 4, punt 4.2.5](#), és de 5 ms, no hi ha deriva de la temperatura. S'observa un comportament no lineal de la gràfica al voltant del punt de temperatura del circuit refrigerador, que se suposa té a veure amb les oscil·lacions relacionades del funcionament intermitents de la cel·la Peltier al voltant d'aquest punt. La cel·la Peltier en aquest setup només pot refredar. Per temperatures superiors es desconnecta la cel·la i també el circuit refrigerador i s'espera que la temperatura augmenti degut a la temperatura ambient.

La mateixa mesura del coeficient de la longitud d'ona amb la temperatura del díode WSLX808008 es realitza utilitzant l'espectròmetre Blue-Wave de StellarNet. Aquest espectròmetre ens proporciona directament el valor del centroid i del paràmetre FWHM pel qual no ens cal fer el càlcul com en el cas de l'espectròmetre Avantès. Una gràfica d'exemple del resultat de l'espectròmetre Blue-Wave es mostra a la següent Figura 49 on s'indiquen els valors del centroid i del paràmetre FWHM que ens venen ja calculats.

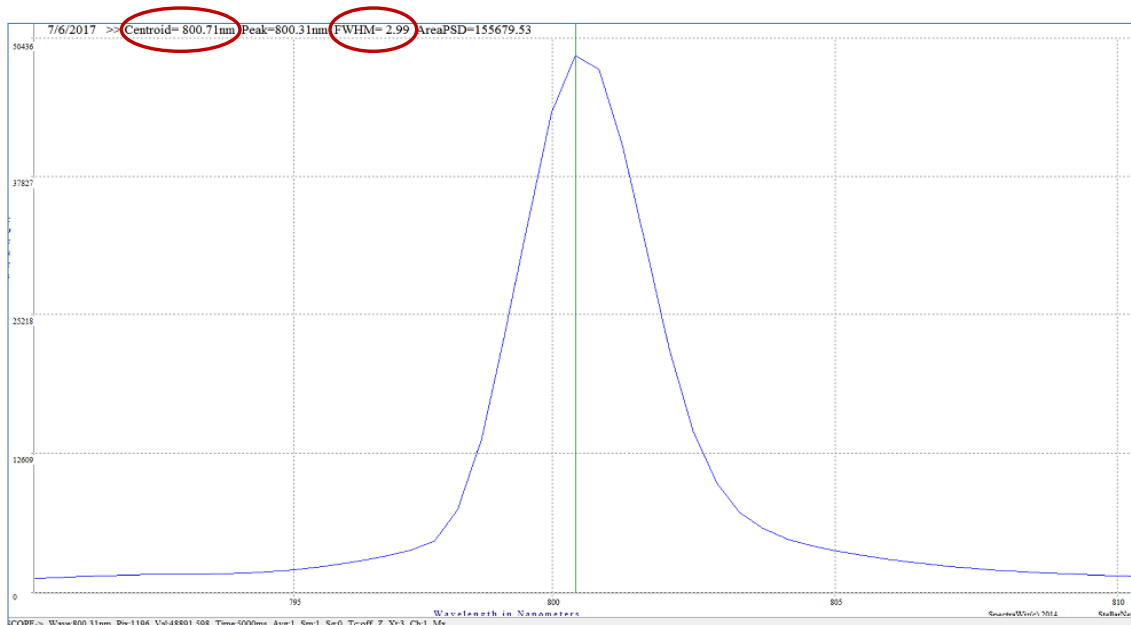


Figura 49: Espectre del díode WSLX808008 amb l'espectròmetre Blue-Wave de StellarNet

Obtenim directament doncs els valors de la gràfica a diferents temperatures. El sistema de control de la temperatura utilitzat és exactament el mateix que en el cas de l'espectròmetre anterior, amb la cel·la Peltier, el termistor NTC, el control a través del driver DRVx2PITEC i amb un circuit de refrigeració, en aquest cas a 20 °C. Es comprova igualment que en totes les mesures realitzades les temperatures del marge entre els 10 °C i els 26 °C el valor del paràmetre FWHM no supera els 3 nm de l'especificació i com en el cas anterior que en cap cas hi ha deriva de la temperatura durant la mesura. La gràfica obtinguda i el valor del coeficient es mostren en la següent Figura 50. El valor obtingut del coeficient de temperatura és de 0.3 nm/°C també com en el cas anterior, i també com en el cas anterior s'observa un comportament no lineal al voltant de la temperatura del circuit refrigerador que ens confirma la hipòtesi anterior. Es detecta però una diferència de l'ordre de 0.6 nm en els valors dels

centroid obtinguts a cada temperatura amb els dos diferents espectròmetres. Això pot ser degut a una manca de calibració dels espectròmetres. En qualsevol cas i per als nostres objectius, un cop tenim la longitud d'ona a una temperatura donada i el valor del coeficient de la longitud d'ona amb la temperatura calculat, podem mesurar la temperatura igualment en els dos casos independentment de la manca de calibració.

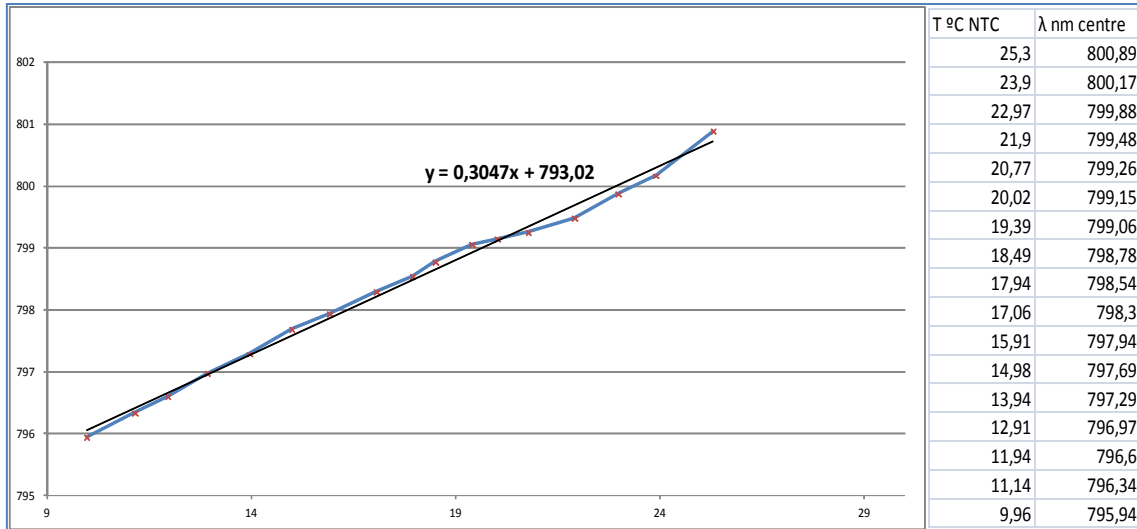


Figura 50: Coeficient de λ amb la T del díode WSLX808008 amb l'espectròmetre Blue-Wave

Utilitzem també l'espectròmetre Blue-Wave per mesurar el coeficient de la longitud d'ona amb la temperatura però en aquest cas utilitzant el driver DAE-20050 i amb un pols de 200 μs i un corrent de 10 A. En aquest cas, la temperatura del dispositiu es controla a través del circuit de refrigeració, ajustant la temperatura del líquid refrigerant en el chiller, i mesurant la temperatura amb un termòmetre de precisió ubicat a prop del dispositiu. El coeficient de la longitud d'ona amb la temperatura mesurat és també de 0.3 nm/°C. El resultats obtinguts es mostren a la Figura 51. No s'observa en a aquest cas la no linealitat deguda al funcionament intermitent de la cel·la Peltier.

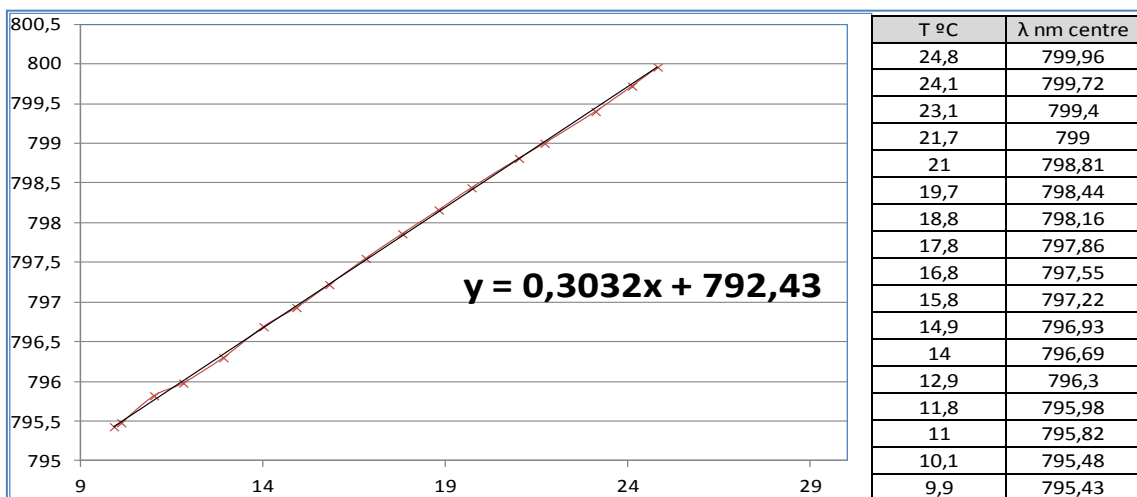


Figura 51: Coeficient de λ amb la T del WSLX808008 amb Blue-Wave i polsos de 200 μs

A la propera Figura 52 es mostra la forma de l'espectre resultant del pols de 200 μs. Veiem que continua mostrant un valor del paràmetre FWHM de 3 nm. De fet l'espectre obtingut

comparat amb l'obtingut amb el pols de 5 ms no varia excepte pel que fa al valor a l'eix vertical, i que té relació amb la potència de la llum rebuda per l'espectròmetre, que és molt menor al ser el pols molt més curt. La relació de aproximadament 25 (50000 a 2000) entre els valors mostrats a l'eix vertical en els dos casos té relació amb la relació de 25 també entre les durades dels polsos (5ms a 200 μ s).

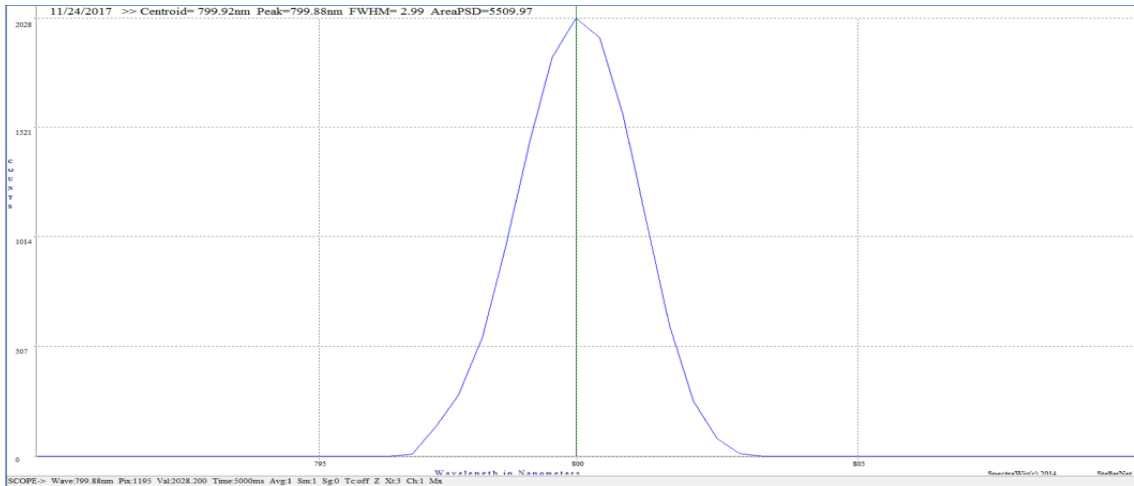


Figura 52: Espectre al díode WSLX808008 amb pols de 200 μ s i l'espectròmetre Blue-Wave

Pel que fa a la barra de díodes de 40 W, el coeficient de la longitud d'ona amb la temperatura s'ha mesurat utilitzant el setup del cas anterior, és a dir controlant la temperatura del líquid del circuit refrigerador i mesurant la temperatura amb un termòmetre a prop del dispositiu. En aquest cas s'ha utilitzat l'espectròmetre HighFinesse Angstrom que té una resolució molt major. La forma dels espectres obtinguts amb aquest espectròmetre es mostren a la Figura 53 per a temperatures en el marge d'operació entre els 15 °C i els 30 °C, que és el marge de temperatures d'operació recomanat per al díode. Degut a la sensibilitat de l'espectròmetre, el pols utilitzat és periòdic de 100 ms amb un duty cycle del 1%, és a dir amb un Ton de 1 ms i un pols corresponent a un corrent injectat de 12.9 A.

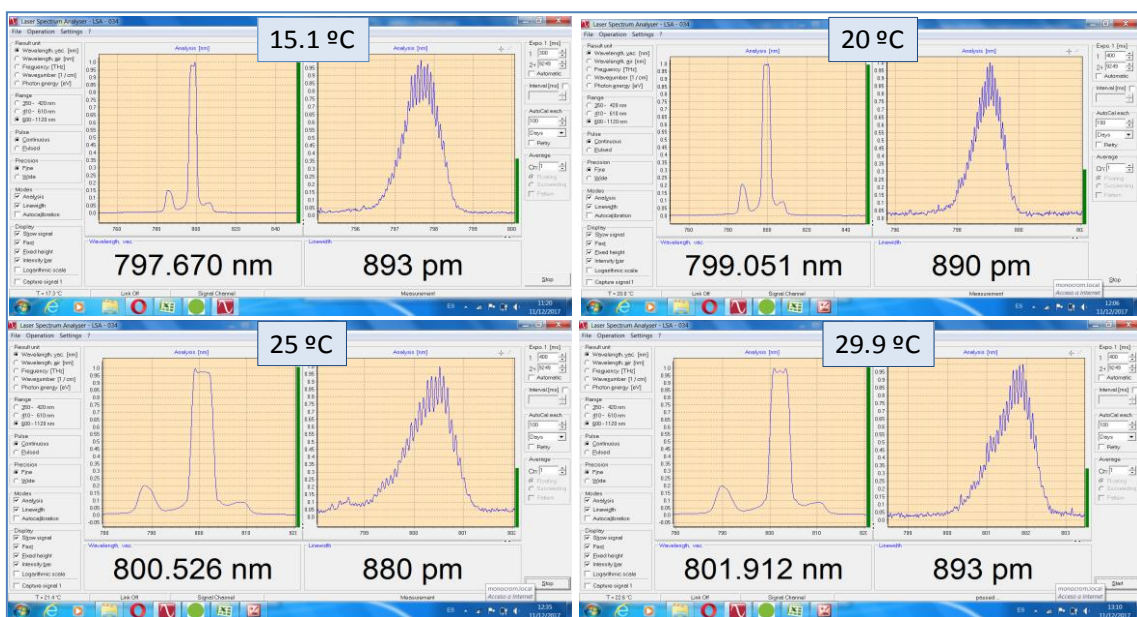


Figura 53: Espectres de la barra de díodes de 40 W amb l'espectròmetre HighFinesse

Amb les mesures obtingudes d'aquesta manera generem la gràfica del coeficient de la longitud d'ona amb la temperatura per a la barra de díodes de 40 W i en el marge de temperatures entre els 15 °C i els 35 °C. El resultat és el que es mostra a la propera Figura 54 juntament amb la taula de valors mesurats a cada temperatura. El valor del coeficient de la longitud d'ona amb la temperatura és de 0.28 nm/ °C en el marge de temperatures entre els 15 °C i els 30 °C, marge d'operació recomanant. A partir d'aquesta temperatura, el valor del coeficient disminueix sensiblement, és a dir, la longitud d'ona emesa no s'incrementa tant amb la temperatura i tendeix a un valor constant.

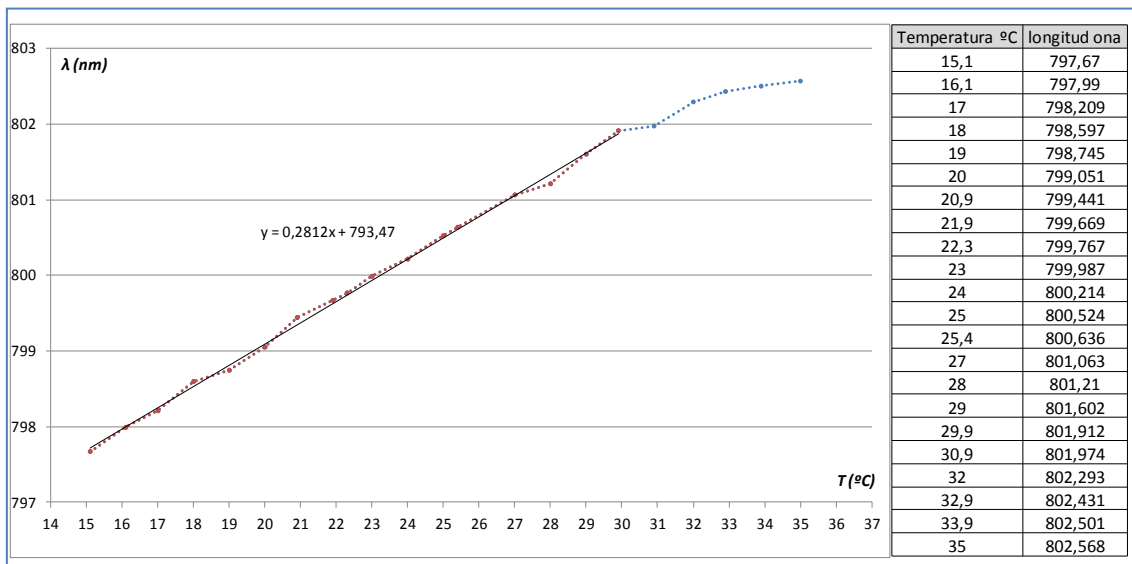


Figura 54: Coeficient de la longitud d'ona amb la temperatura del díode de 40 W

L'espectròmetre ens proporciona el valor de la longitud d'ona del pic més alt de l'espectre, i del paràmetre FWHM, que pren valors al voltant de 1 nm. L'especificació ens diu que el valor del FWHM és de 3 nm a 40 A en mode continu, corrent al que es genera una potència òptica de 40 W. Obtenim els espectres en mode continu del díode a diferents nivells de corrent i per tant de potència, i veiem com el valor del paràmetre FWHM augmenta amb l'increment del corrent del pols injectat tendint al valor de l'especificació. Per una banda, l'augment de la potència genera un espectre de llum més ample. Per altra banda, el valor que ens proporciona l'espectròmetre del paràmetre FWHM es pot veure afectat pel "rissat" que apareix degut als diferents modes o freqüències ressonants que es generen a la cavitat làser. Aquest valor del FWHM que ens dóna l'espectròmetre és realment fiable per a nivells de corrent elevats, a partir dels 20 A en aquest cas i com es pot veure a Figura 55, on el rissat mencionat es troba per sobre del valor mig. Si el rissat es superposa al valor mig del màxim on es mesura el paràmetre FWHM (Full Width at Half Maximum) el valor d'aquest paràmetre proporcionat per l'espectròmetre no és el correcte.

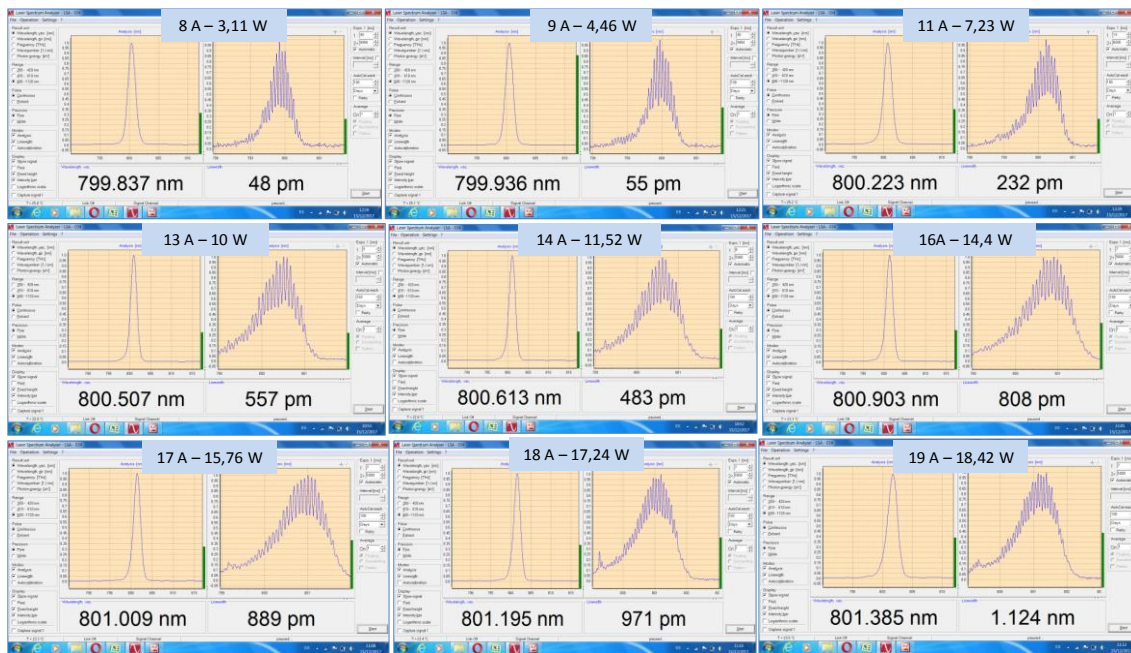


Figura 55: Espectres del díode de 40 W a diferents potències amb HighFinesse