



---

**Universidad de Valladolid**

***"Estudio mediante catodoluminiscencia de los procesos de degradación en diodos láser"***

***Miguel Rodríguez Torres***

***Tutora: Pilar Iñiguez de La Torre.***

***Cotutor: Juan Jiménez López.***

*Dedicado a todos los que me apoyaron. A los que no:  
“Se perderán en el tiempo como lágrimas en la lluvia”  
<https://www.youtube.com/watch?v=5BIakRTq25E>  
Blade Runner, 1982.*

## ***Índice:***

- 1 Motivaciones y agradecimientos***
- 2 Introducción***
- 3 Descripción del equipo de catodoluminiscencia***
- 4 Simulación Montecarlo de las trayectorias electrónicas***
- 5 Resultados experimentales***
  - 5.1 Estudio de un diodo sin degradación en la faceta***
    - 5.1.1 Imagen pancromática en rango visible a 5 kV***
    - 5.1.2 Imagen pancromática en rango infrarrojo a 30 kV***
    - 5.1.3 Imagen pancromática en rango visible a 30 kV***
    - 5.1.4 Observaciones relativas a las imágenes pancromáticas***
    - 5.1.5 Estudio espectral***
  - 5.2 Estudio de un diodo con degradación en la faceta***
    - 5.2.1 Imagen pancromática en rango visible a 5 kV***
    - 5.2.2 Imagen pancromática en rango infrarrojo a 30 kV***
    - 5.2.3 Imagen pancromática en rango visible a 30 kV***
    - 5.2.4 Observaciones relativas a las imágenes pancromáticas***
    - 5.2.5 Estudio espectral***
- 6 Conclusiones***
- 7 Bibliografía***

## *1 Motivaciones y agradecimientos*

La realización de un Master de Instrumentación en Física me llevó a buscar un campo en el cual fuesen necesarias tanto la generación de hipótesis y teorías como su corroboración experimental en un laboratorio.

El trabajo que he realizado en el GdS-Optronlab me ha proporcionado el conocimiento y aplicación en ambas vías (teórica y experimental) pues, además de haber reforzado mis conocimientos en lo que a materiales semiconductores y optoelectrónicos se refiere, me ha permitido el aprendizaje y manejo del método de caracterización por catodoluminiscencia y el conocimiento en otros posibles medios de análisis.

Para la realización de esta empresa, tuve que comenzar a utilizar un microscopio SEM (como explicaré más adelante), hecho que ya me produjo un profundo interés por el campo de los nanomateriales y nanociencia en general. Partiendo del hecho de que el objetivo del manejo de este equipo se basaba en poder obtener información a partir del fenómeno de la catodoluminiscencia, esta motivación rápidamente se convirtió en pasión, interés y ganas de aprender cada día algo nuevo.

Empleando estas técnicas, obtuve un mayor entendimiento de los fenómenos y modelos (véase bibliografía) aplicados a la caracterización de defectos en diodos láser y pude comprender y entender las diferentes conexiones que se dan entre una observación realizada y un modelo teórico.

En definitiva, considero que mi comprensión del método científico se ha visto incrementada después de esta agradable experiencia vital.

Cualquier trabajo de este tipo necesita una serie de apoyos o soportes, alguien que te guíe en las tareas a desempeñar, que te haga aprender de tus errores y se alegre sinceramente de tus éxitos. En este sentido, mi tarea a realizar ha resultado sumamente sencilla, pues he contado en todo momento con la ayuda de grandes profesionales que, siendo mis educadores, me han proporcionado uno de los valores más apreciados por el género humano: el conocimiento.

En este sentido, he de señalar a Oscar Martínez, Alfredo Torres, Jorge Souto, Carmelo Prieto, Miguel Angel González y Manuel Avella, que no solo se han convertido en ejemplos a seguir, sino en lo más parecido a unos buenos compañeros de trabajo que alguien pueda tener, creando un ambiente en el que ha resultado muy agradable mi desarrollo laboral.

De la misma manera agradezco todo el apoyo que me ha brindado mi cotutor Juan Jiménez y mi tutora Pilar Íñiguez.

Igual de importante ha resultado el apoyo diario de mi amigo Alberto Díez de la Varga, del que me consta que, aun siendo excelente en su faceta profesional, lo es más en su vida personal.

Estos agradecimientos son muy pequeños si los comparo con los que debo emitir hacia mi hermana Marta Rodríguez y mi madre Josefina Torres. Ellas son las verdaderas artífices de este trabajo.

Para terminar, un recuerdo a mis abuelos paternos, fallecidos durante el presente año académico, sin cuyo esfuerzo y trabajo en una época actualmente inconcebible, ni yo ni muchos otros hubiésemos podido realizar este tipo de proyectos.

## 2 Introducción

Los láseres de diodo son utilizados actualmente en una amplia variedad de aplicaciones, que van desde la electrónica de consumo hasta su uso en el campo de las telecomunicaciones. Actualmente, se estima que representan el 99% de la producción mundial de láseres. Sorprende el hecho de que la primera emisión estimulada [1] a partir de una unión P-N se produjese en 1962 [2], prácticamente con la aparición del primer láser convencional.

En este caso, nos centraremos en el estudio de láseres de diodo de alta potencia cuya estructura se basa en la existencia de un pozo cuántico confinado en doble heteroestructura (como observaremos en la Fig.1 y en el modelo descrito para simulación computacional más adelante) de AlGaAs/GaAs, o InGaAs/AlGaAs, emisores a 808nm y 980 nm respectivamente [10]. La naturaleza de estos dispositivos nos ofrece una ganancia óptica superior a la de los láseres convencionales. [3].

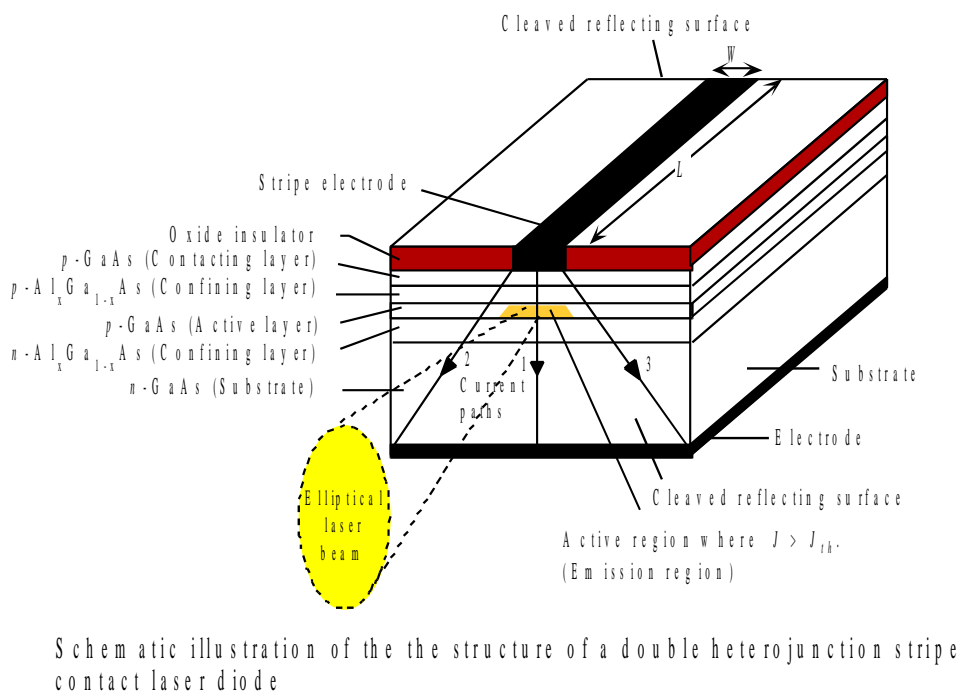


Fig.1 Estructura de un láser tipo AlGaAs/GaAs

La función de la heteroestructura se basa en el hecho de que alrededor de las capas de confinamiento existen otras capas con menor índice de refracción, de manera que la luz queda guiada por las capas activas de mayor índice de refracción [4], como puede observarse en la figura Fig.1 y Fig.2, en la que se representa la estructura multicapa para un dispositivo del tipo AlGaAs/GaAs.

Las aplicaciones de este tipo de láseres exige a los fabricantes la realización de estrictas pruebas de calidad en lo que a tiempo de funcionamiento continuo se refiere, teniéndose en cuenta que la potencia de salida óptica para este tipo de dispositivos es del orden de 1 vatio, lo que se traduce en densidades de potencia óptica de alrededor de 50 MW/cm<sup>2</sup> [5].

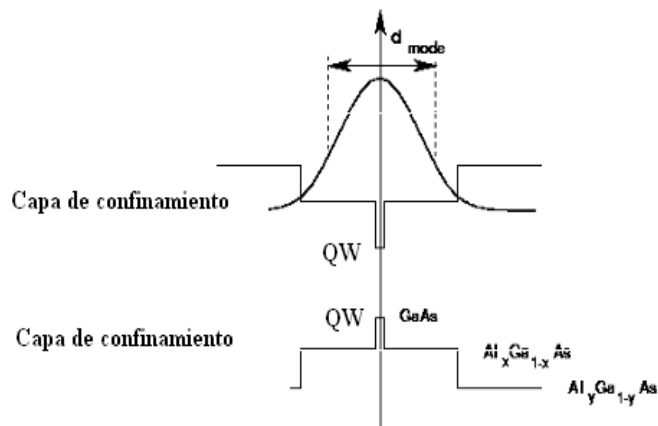


Fig.2 En esta figura, podemos observar el pozo cuántico (GaAs) las guías ópticas de AlGaAs (Al al 30%) y las capas de confinamiento (Al al 60%), donde se aprecia la distribución del campo óptico

La limitación en rendimiento y durabilidad de estos dispositivos viene dada por los diferentes modos de degradación de la estructura láser [3][7]. Debido a este factor, los diodos se ven sometidos a pruebas en régimen de funcionamiento controlando la potencia óptica de salida y la intensidad de corriente aplicada sobre el dispositivo. Estos se deben en gran parte a la generación de zonas en las que se producen recombinaciones no radiativas [3]. Además, la absorción de radiación producida en los defectos ocasiona no en pocas ocasiones la degradación en las facetas que constituyen el resonador Fabry-Perot provocando nuevos defectos que producen el mismo efecto que los producidos anteriormente [4][5], (a este fenómeno se lo conoce como COD o “*Catastrophic optical Damage*”). Estos defectos se extienden, como veremos en una de nuestras muestras evaluadas, a lo largo de la cavidad resonante fundamentalmente afectando al pozo cuántico (ocasionalmente también las guías de ondas se ven afectadas).

En el grupo GdS-Optronlab de la Universidad de Valladolid, se dispone del equipo necesario para el estudio de este tipo de muestras, ya que la catodoluminiscencia resulta una herramienta muy potente en lo referente a la detección y caracterización de los defectos y degradaciones producidos en la zona activa del láser, además de permitirnos la caracterización microscópica (resolución de SEM) de cada una de las capas que conforman la muestra.

De manera paralela, el grupo también desarrolla modelos termomecánicos a partir del programa de elementos finitos COMSOL con el fin de simular y comprender mejor los mecanismos de degradación [5][8][9][11] en diferentes zonas de la estructura del diodo.

### 3 Descripción del equipo de catodoluminiscencia

La técnica de catodoluminiscencia (CL) se basa en la recolección de la luz emitida por un material cuando este se excita mediante un haz de electrones (en nuestro caso, producido en el microscopio electrónico de barrido con un potencial de aceleración de hasta 30 kV) [4]. Inicialmente, estas

experiencias se realizaban a partir de un cátodo convencional. El acoplamiento del sistema óptico al microscopio electrónico ha permitido combinar la emisión luminescente con el barrido del haz de electrones, permitiendo la adquisición de imágenes CL con elevada resolución espacial.

El equipo que hemos utilizado para este estudio aparece en la Fig.3. Se basa en un sistema Gatan MonoCL2 (con tres tipos diferentes de detectores para la realización de diferentes análisis), acoplado a un microscopio electrónico de barrido (SEM) LEO 1530.



*Fig.3 Microscopio electrónico de barrido (MEB) LEO 1530 con el sistema Gatan Mono CL2 acoplado.*

Para la recolección y registro de los fotones emitidos dispone de un espejo parabólico situado en la cámara de vacío del microscopio, y acoplado a su vez al sistema óptico que nos permitirá elegir el camino óptico hasta los detectores (tubo fotomultiplicador, detector de InGaAs o CCD de Si [4]) con los que efectuaremos los análisis pertinentes.



*Fig.4 Interior de la cámara de vacío del microscopio, con el espejo recolector*

Podemos seleccionar el camino óptico que resulte más adecuado para el tipo de análisis que

queramos llevar a cabo (imagen monocromática, pancromática o análisis espectral), tal y como indicamos en el esquema de la Fig.5. Para la obtención de imágenes pancromáticas, hemos empleado un tubo fotomultiplicador en el caso del rango visible (aunque responde hasta los 900 nm) y un detector de InGaAs para las muestras cuya emisión se produce en la zona del infrarrojo (rango espectral de 800 a 1800 nm) [5].

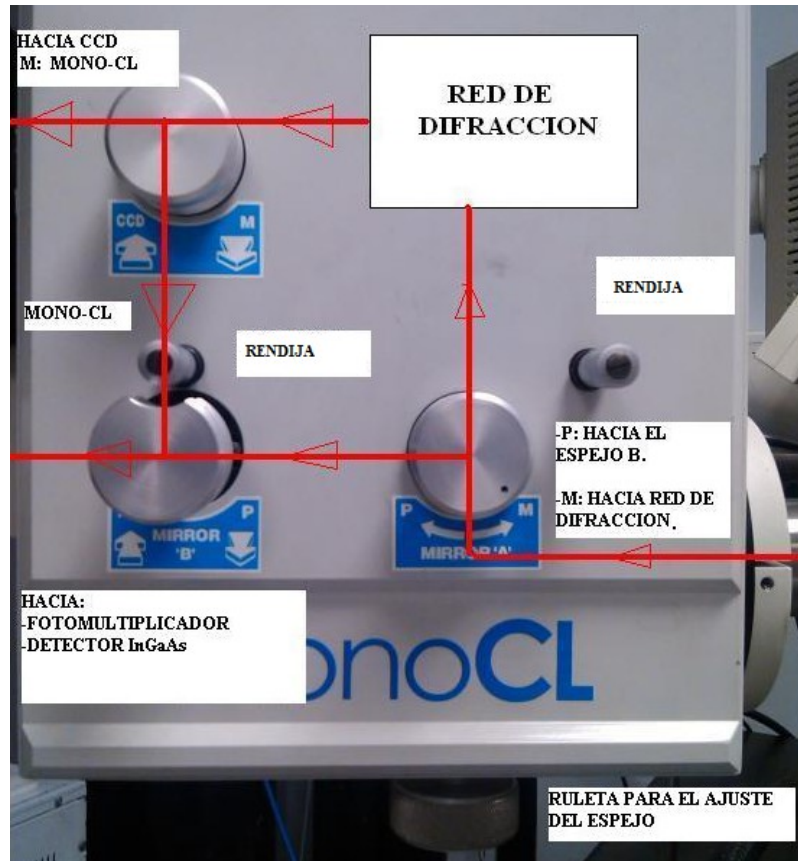


Fig.5 Posibles caminos ópticos de la luz emitida .



Fig.6 Detector InGaAs



Fig.7 Tubo fotomultiplicador

Para la caracterización y análisis espectral de las muestras mediante esta técnica, hemos recurrido a un detector CCD de silicio (con un rango espectral de 200 a 1100 nm) con refrigeración por efecto Peltier [5]. El calibrado del dispositivo se lleva a cabo con una lámpara. La resolución espacial para este tipo de medidas es del orden de centenares de nanómetros.





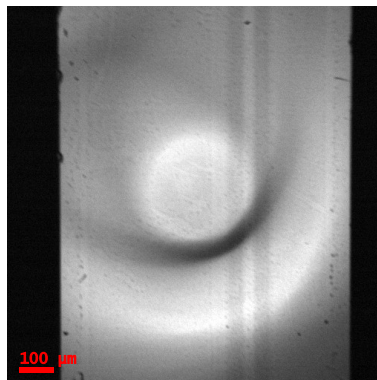
*Fig.8 Dispositivo CCD acoplado a Gatan MonoCL2*

Para el control de estos dispositivos, contamos con un equipo informático dotado de un software específico para tal efecto. En nuestro caso, hemos trabajado con el programa *Gatan DigitalMicrograph 3.11.1* ©, que además nos permite el tratamiento de las imágenes y espectros obtenidos.

Otra de las ventajas que esta técnica nos ofrece es la posibilidad de hacer un análisis a diferentes profundidades de la muestra. Esto se consigue variando la energía del haz de electrones, y con ella su penetración en el material que queremos caracterizar. Esta propiedad resulta idónea para el estudio de estructuras multicapa como los láseres de diodo.

En las siguientes imágenes, podemos apreciar un ejemplo de caracterización en profundidad de una zona concreta a lo largo del eje cristalográfico  $\langle 100 \rangle$  con el objeto de observar el estado de la guía superior o correspondiente a la zona P. El haz de electrones es perpendicular a los planos de las multicapas que conforman el laser.

En la Fig.9, que corresponde a un voltaje de 5kV, podemos observar la guía de ondas superior (obsérvesen las dos líneas paralelas). La guía inferior se observa en la Fig.10 (línea blanca) para el voltaje de 30 kV. En cuanto al halo o círculo vislumbrado, se debe al agujero del espejo (Fig.4) por el que se produce el paso de los electrones hacia la muestra. Su nitidez indica la correcta focalización de la imagen pancromática.



*Fig. 9 Imagen pancromática en la zona activa de un láser de diodo, tomada a partir de un tubo fotomultiplicador. La temperatura de la muestra es de 80K*

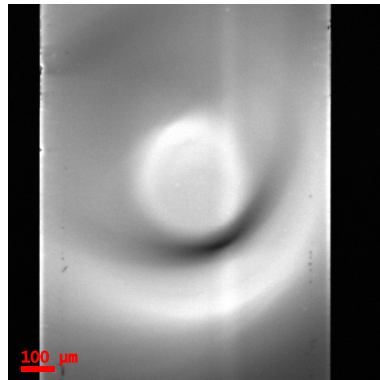


Fig.10 Imagen pancromática tomada a partir de un tubo fotomultiplicador. La temperatura de la muestra es de 80K

La orientación de las imágenes anteriores es tal que los dos espejos del láser se situarían arriba y abajo como se verá más claro en la presentación de resultados.

#### 4 Simulación Montecarlo de las trayectorias electrónicas

El programa *CASINO*, monte Carlo Simulation of electron trajectory in solids, V. 2.48 (2.4.8.1), 2011, ©) dibuja las trayectorias de un número de electrones del haz del microscopio. Estos electrones cuando atraviesan la materia sufren diferentes colisiones elásticas e inelásticas con los electrones de la materia atravesada, perdiendo progresivamente su energía hasta que se frenan totalmente. Las colisiones en las que se produce la excitación electrónica son las responsables de la emisión de la luz CL. Bajo la excitación con el haz de electrones se generan pares e-h, que al recombinarse emiten luz. Al variar la penetración del haz de electrones los pares e-h son generados a distintas profundidades, por consiguiente la emisión se produce en distintas capas para distintos kVs.

En nuestro caso la materia atravesada es la heteroestructura del láser que modelizamos según se dibuja en la Fig. 11.

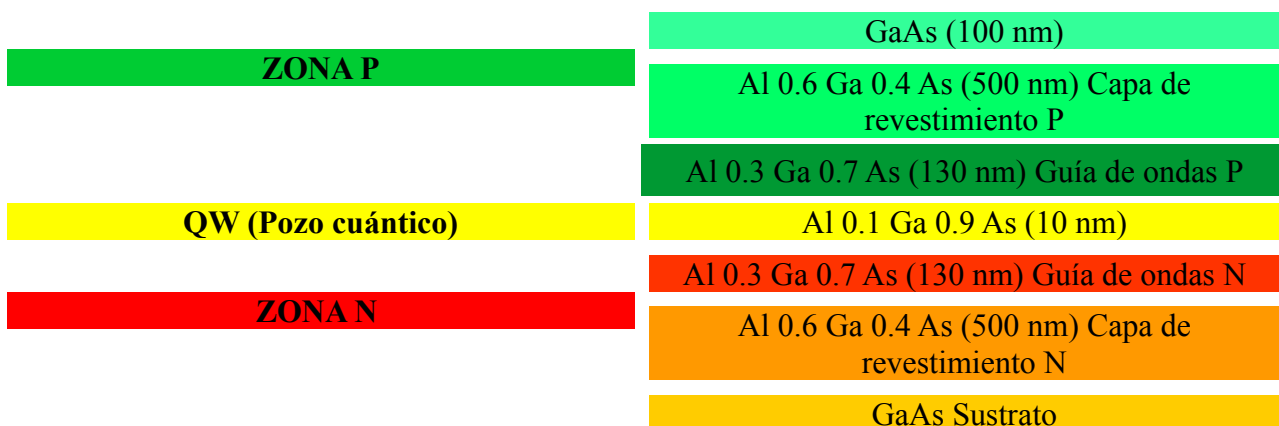


Fig.11 Modelo estructural aplicado en cálculos computacionales para el tipo de láseres objeto de nuestro estudio

Dado que el microscopio electrónico de barrido posee un potencial de aceleración de electrones de 0 a 30 kV, hemos realizado las simulaciones variando la energía de los electrones del haz entre 5 y 30 keV, habiéndose usado para todos los casos un total de 100000 historias de electrones.

Se presentan a continuación una serie de representaciones a escala del poder de penetración del haz de electrones a 10 keV y 15 keV.

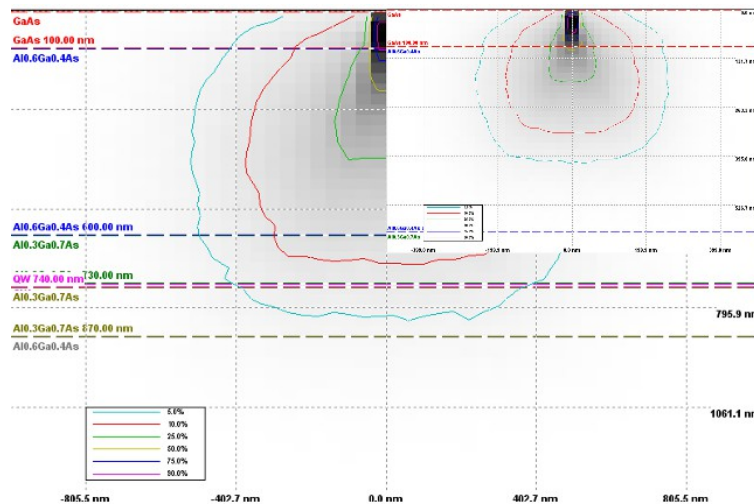


Fig.12 La imagen pequeña se corresponde con la simulación para una energía de 10 keV y la grande para 15 keV. Las multicapas se encuentran representadas a la misma escala.

De este modo, presentamos, en la Fig.13, los resultados por intervalos de 5 kV de la pérdida de energía de los electrones respecto de la profundidad sobre la muestra conceptualizada en el modelo:

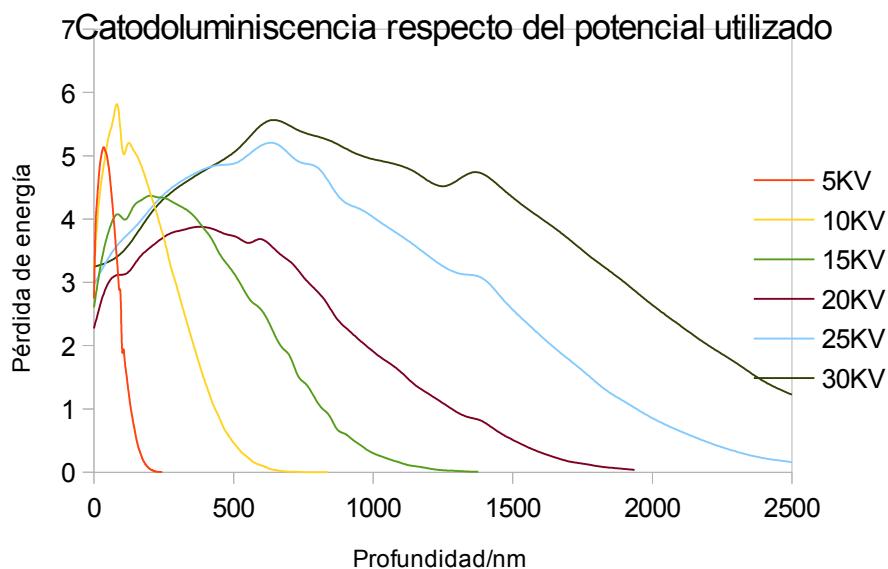


Fig.13 Pérdida de energía de los electrones respecto de la profundidad de la muestra

A partir de estos resultados, podemos analizar las distintas capas que constituyen la estructura láser.

## 5 Resultados experimentales.

Para la realización de este trabajo, se han tomado una serie de láseres de 980 nm para bombeo de

amplificadores ópticos de fibra [6][14], con el propósito de analizar la degradación producida en su zona activa. En concreto, hemos estudiado los defectos generados durante la operación del dispositivo [3],[10].

Se ha procedido a la adquisición de imágenes pancromáticas en rangos espectrales correspondientes al visible y al infrarrojo. Para la visualización de las guías de ondas que emiten en el visible se utiliza el tubo fotomultiplicador, y para la emisión del QW el detector de InGaAs.

Además se han realizado los análisis espectrales a partir de la CCD de Si, lo que nos revela información espectral de las áreas visualizadas en las imágenes pancromáticas.

Para ello, se ha procedido a la realización de una serie de tomografías a lo largo de toda la superficie de la zona activa, con un potencial de aceleración de 5 kV con el objetivo de percibir las posibles degradaciones existentes en la guía de ondas de la zona P. Para este caso se ha utilizado el tubo multiplicador.

Para un potencial de 30 kV (el máximo que nos permite nuestro dispositivo SEM), se ha procedido a realizar el mismo proceso con el fin de estudiar el estado de la guía de ondas correspondiente a la zona N. Al hacer uso también en este caso del tubo fotomultiplicador para la obtención de la imagen pancromática, no percibimos el espectro correspondiente a la emisión producida por el pozo cuántico, pues está fuera del rango espectral del detector.

Para el estudio de este último a lo largo de la muestra, hemos empleado también una tensión de 30 kV, lo que nos permite la carga y consecuente emisión en el pozo. La imagen pancromática en este caso ha sido tomada con el detector de InGaAs.

## 5.1 Estudio de un diodo sin degradación en la faceta

### 5.1.1 Imagen pancromática en rango visible a 5 kV

Con un voltaje de 5 kV, podremos observar el estado de la guía de ondas en la zona P a lo largo de toda la zona activa del láser. Las fotos de la Fig.14 corresponden a una magnificación 180X, tensión 5 kV y temperatura de la muestra de 80K. La luz se ha recolectado con el tubo fotomultiplicador.

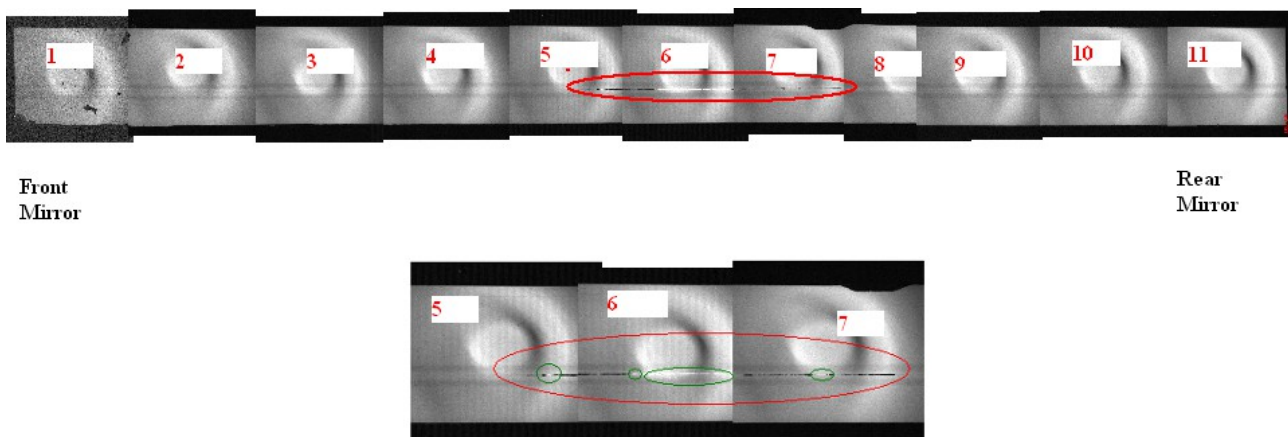


Fig.14 Composición de imágenes pancromáticas a lo largo de toda la zona activa a 5kV

Observamos degradación o pérdida de emisión de la guía por las zonas oscuras en las imágenes 5 y 6.

### 5.1.2 Imagen pancromática en rango infrarrojo a 30 kV

Comprobaremos ahora el estado del pozo cuántico a partir del detector de InGaAs, con una tensión de aceleración para el haz de electrones de 30 kV. Podríamos visualizar la emisión del pozo a un voltaje menor. La emisión producida por otros elementos del dispositivo, como pueden ser las guías de ondas, no afecta a la imagen pancromática que deseamos obtener debido a que la emisión del pozo se produce en un rango espectral diferente (no detectable por el tubo fotomultiplicador pero sí por el detector de InGaAs).

En la Fig.15 la magnificación y la temperatura son las mismas que en el caso de la Fig.14. Lo que varía es la tensión que vale 30kV y también el sensor siendo en este caso el detector de InGaAs

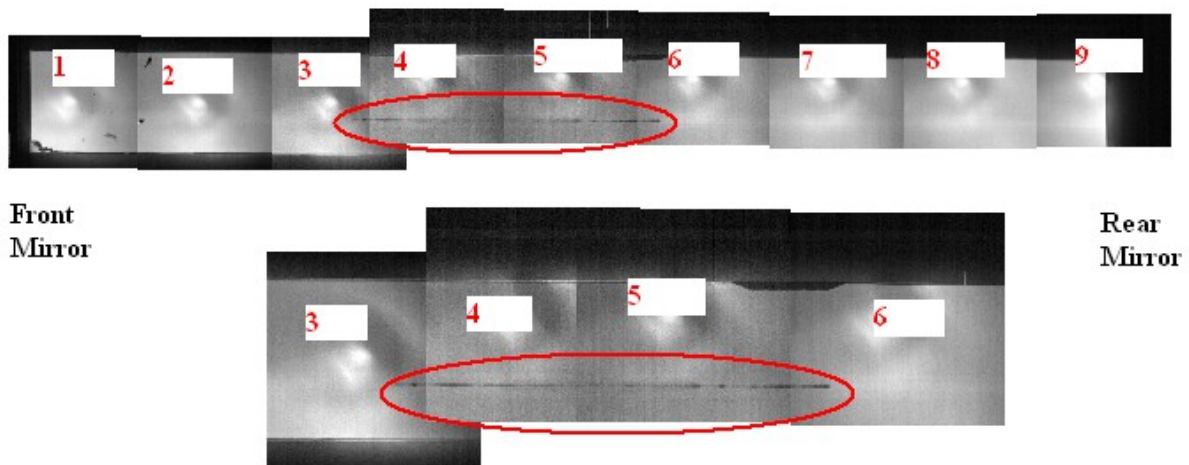
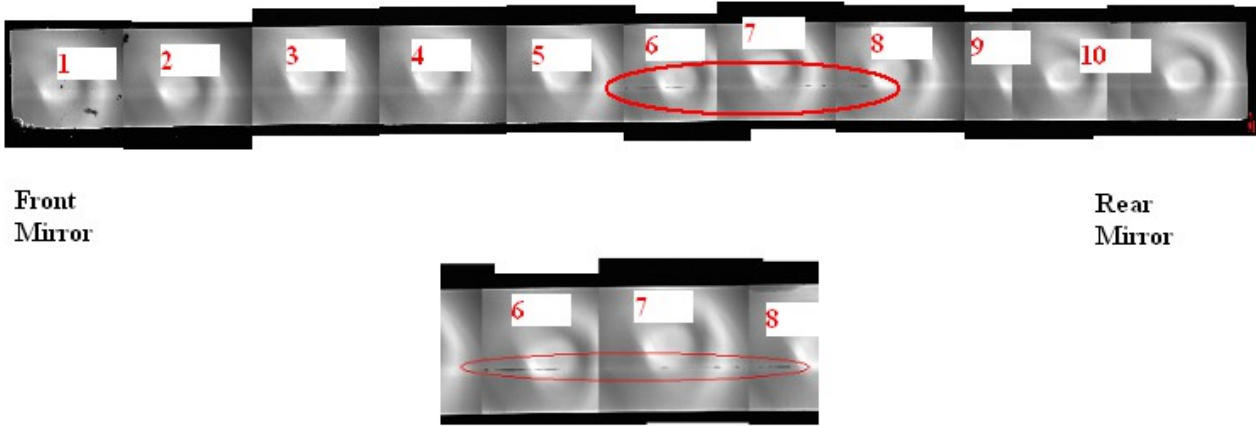


Fig.15 Composición de imágenes pancromáticas a lo largo de toda la zona activa a 30 kV

Se observa la degradación o pérdida de emisión del pozo cuántico a través de las zonas oscuras hacia la mitad de la estructura (imágenes 3 a 6).

### 5.1.3 Imagen pancromática en rango visible a 30 kV

Para la observación de la guía inferior de tipo n, hemos usado un voltaje de 30 kV y hemos tomado la imagen, nuevamente, con el tubo fotomultiplicador.



*Fig.16 Imagen pancromática realizada mediante tubo fotomultiplicador a lo largo de toda la zona activa usando una tensión de 30 kV, con una magnificación de 180X y a una temperatura de 80K.*

#### *5.1.4 Observaciones relativas a las imágenes pancromáticas*

Tal y como observamos en las imágenes del pozo cuántico, señaladas en rojo, la degradación se ha producido solamente en una parte de la cavidad resonante. Las guías de ondas en esa región también se han visto afectadas. En este caso, la degradación no se ha producido en las facetas, en donde comúnmente comienza el daño óptico catastrófico en este tipo de dispositivos, sino en el interior de la cavidad.

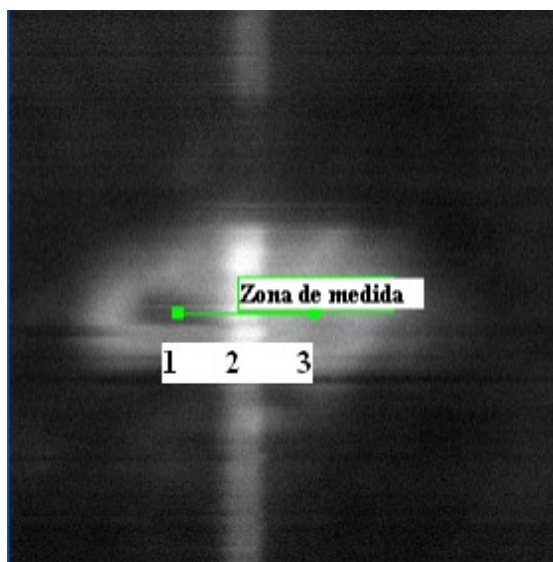
#### *5.1.5 Estudio espectral*

Observemos ahora el análisis espectral en ciertas zonas de la muestra. Debido a la naturaleza de la degradación de este dispositivo, se han realizado una serie de análisis espectrales, indicados en Fig.17 en verde, con el objetivo de que la experiencia nos permita estudiar la degradación visualizada en las imágenes pancromáticas. Para este estudio hemos empleado el detector CCD de Si.

Para el primer láser, el análisis espectrométrico ha sido realizado sobre una misma zona a diferentes voltajes de aceleración.

Diferenciando pues entre zonas radiativas y no radiativas, comprobaremos el comportamiento espectral en torno a la cavidad modificando el voltaje de aceleración del haz de electrones. Para la observación, hemos seleccionado una serie de zonas con voltajes de aceleración de 5, 15, 25 y 30 kV.

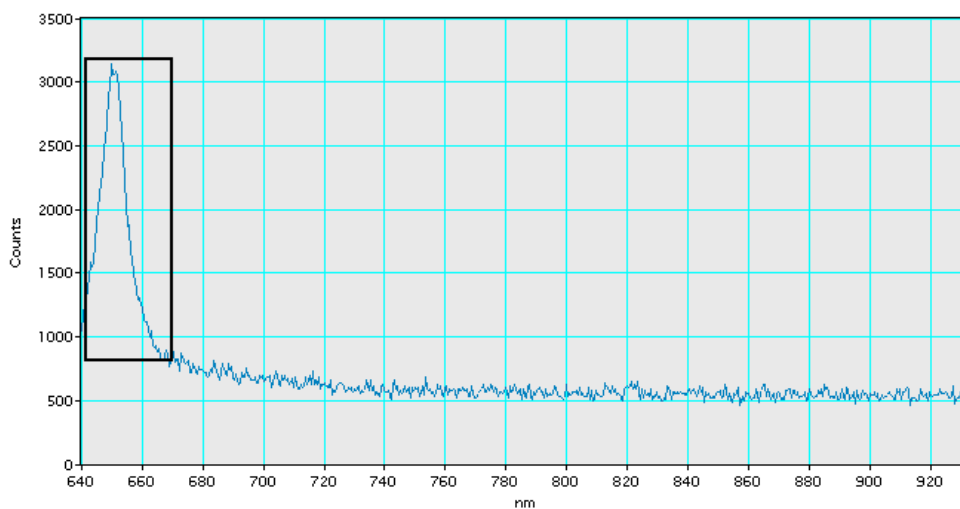
Comencemos a estudiar las zonas brillantes de la guía de ondas superior:



*Fig. 17 Imagen pancromática realizada mediante tubo fotomultiplicador usando una tensión de 5 kV, con una magnificación de 1500X y a una temperatura de 80K. La línea verde indica la zona de medida espectral. Los espectros correspondientes a los puntos 1, 2 y 3 se mostrarán a continuación*

La zona de medida espectral ha resultado la misma para todos los voltajes de aceleración en este diodo láser. Es decir, los puntos 1, 2 y 3 señalados en Fig.17.

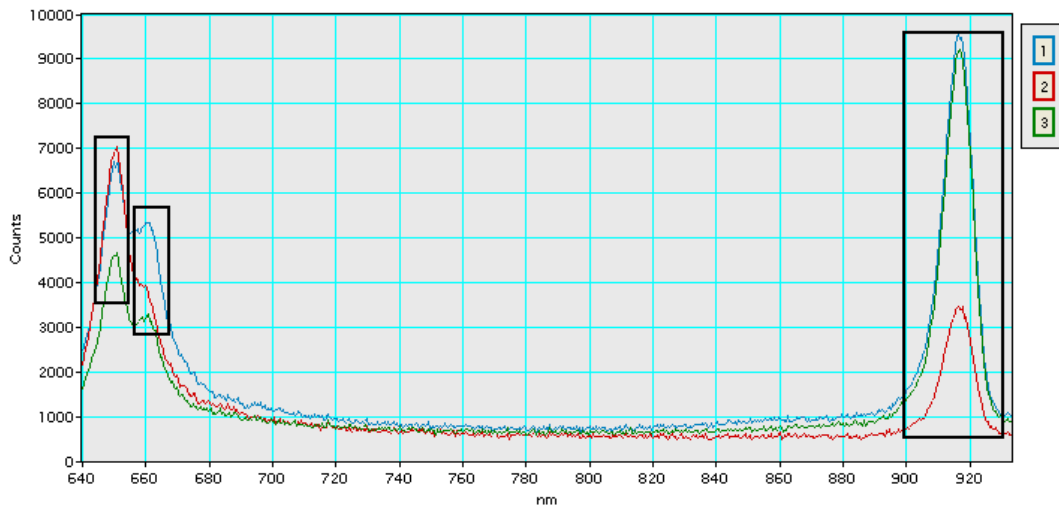
A 5 kV, se han tomado los siguientes espectros de los puntos señalados en Fig.17:



*Fig.18 Espectro correspondiente a la zona seleccionada 2 en la que solo se observa la guía de tipo p*

En este caso hemos tomado la medida en la zona más brillante, corroborando que se trata de la guía de ondas superior (véase zona seleccionada) que por su composición emite a una longitud de onda de 650 nm.

A 15 kV, se han tomado los espectros de los puntos señalados en la Fig.17, (ver Fig.19) :

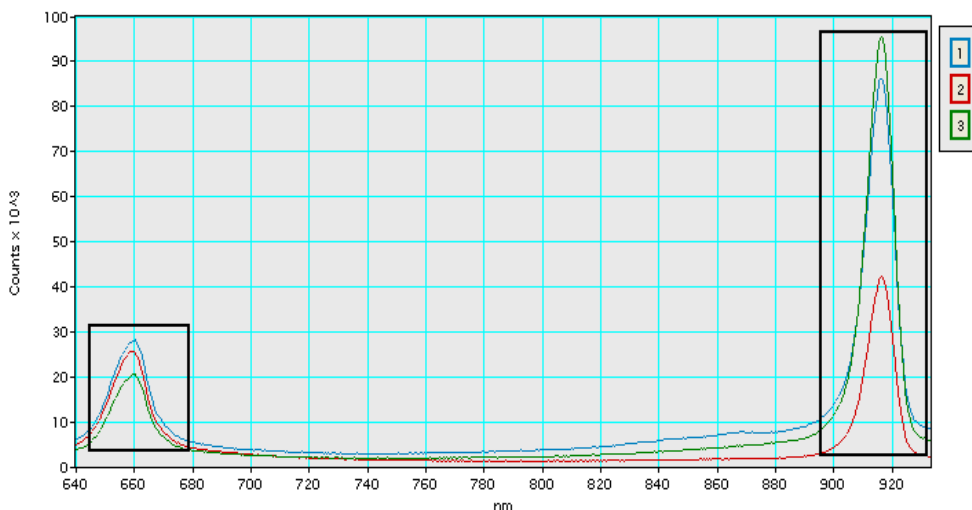


*Fig.19 Espectros correspondientes en a las zonas seleccionadas*

En este caso, podemos comprobar cómo para las zonas 1 y 3, la emisión del pozo cuántico resulta mucho más intensa que para la 2, esto es debido a a que este último espectro ha sido tomado en la zona de el defecto lineal oscuro (Dark Line Defect DLD) [3][4], en donde la emisión del pozo cuántico es muy baja ó inexistente, debido a la degradación.

En los tres casos, pero con diferentes intensidades, podemos observar la emisión de la guía de ondas superior ( tipo p) (650 nm) e inferior (tipo n) (660 nm). La intensidad para la guía superior en el caso del espectro 2 resulta mayor que en los otros casos, por lo que las zonas brillantes señaladas en 12 se corresponden con la emisión producida por este elemento.

A 25 kV, se han tomado los siguientes espectros de los puntos señalados en la Fig.17 ( ver Fig.20):



*Fig.20 Espectro correspondiente a las zonas seleccionadas*

En este caso, en lo que a emisión del pozo cuántico se refiere, ocurre lo mismo que en el caso de las muestras tomadas a 15 kV, pues la intensidad de este resulta mucho menor en el defecto DLD [3] [4] que en las zonas 1 y 3. A este voltaje de aceleración, ya no observamos la guía superior; sino que



solo detectamos la emisión de la guía inferior y del pozo cuántico.

A 30 kV, se han tomado los siguientes espectros de los puntos señalados en Fig.17 (ver Fig. 21) :

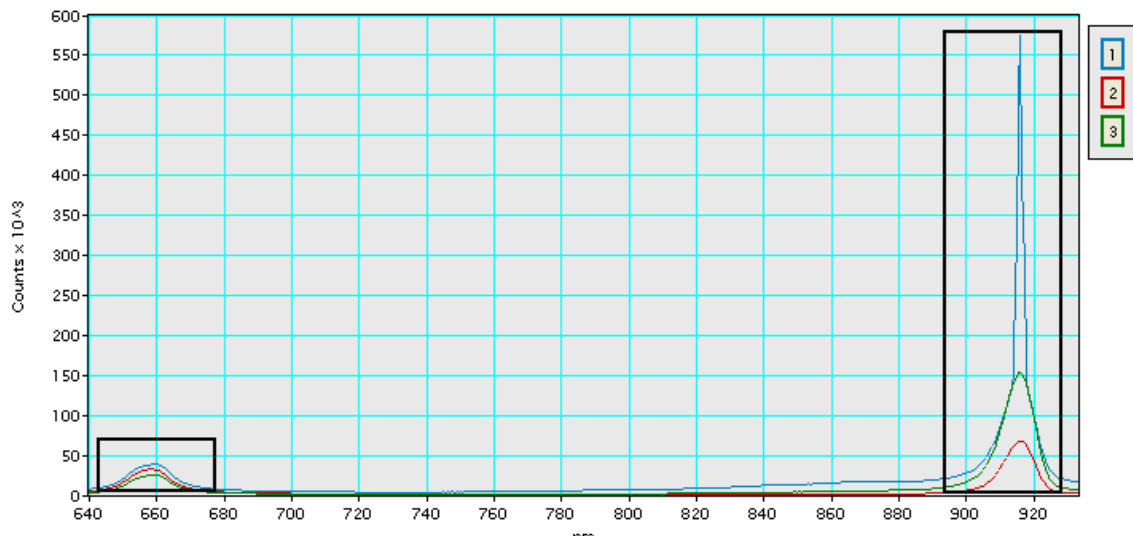


Fig.21 Espectro correspondiente en a la zona seleccionada 3

En este caso, tenemos un comportamiento parecido al de 25 kV. Sin embargo, se expone debido a la singularidad que representa el espectro 1 en lo que a la emisión del pozo cuántico se refiere. Se observa un abrupto aumento de la emisión y los distintos modos de emisión de un láser, por consiguiente está en régimen de emisión estimulada bajo el haz de electrones [1].

Se observan los modos de emisión láser junto con la emisión espontánea:

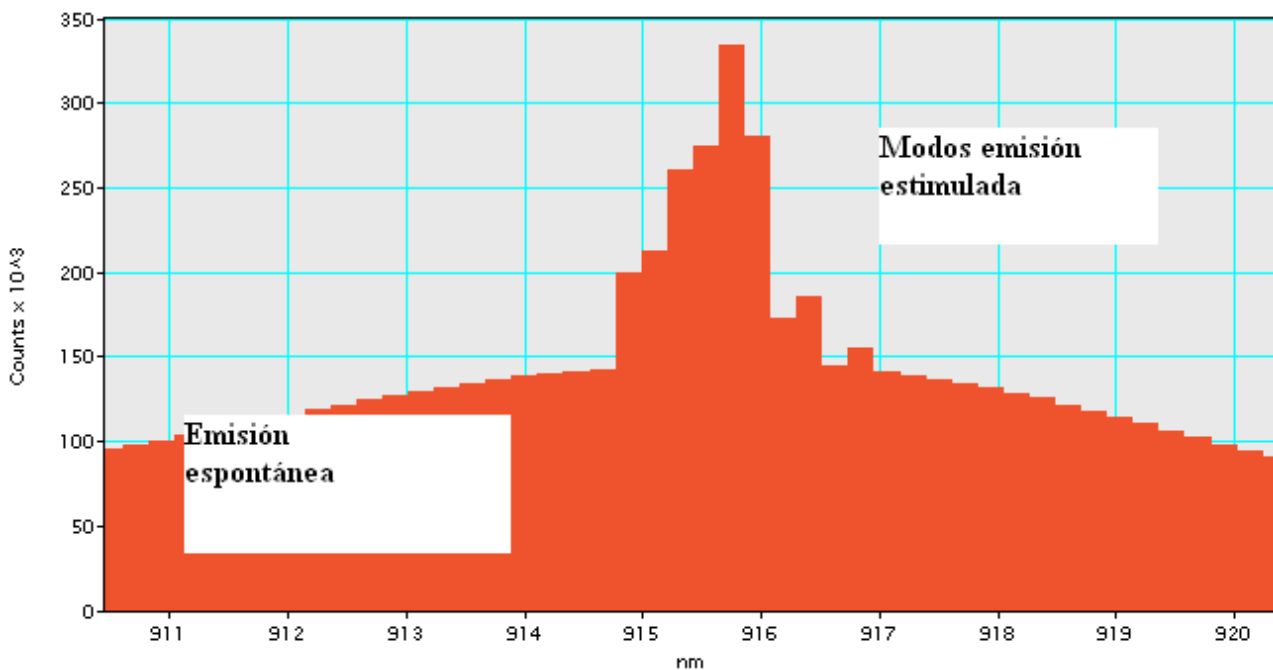


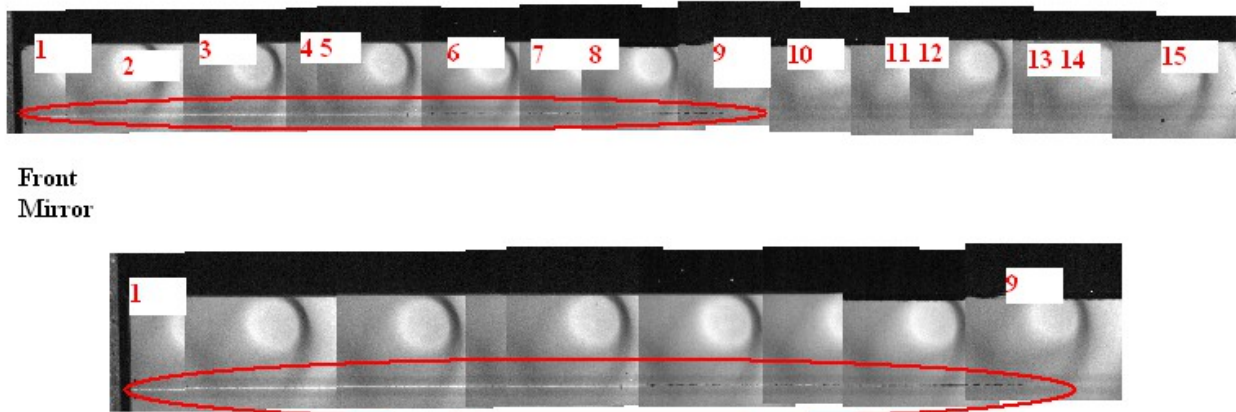
Fig.22 Emisión estimulada por el haz de electrones.

## 5.2 Estudio de un diodo con degradación en la faceta

A continuación presentamos las imágenes obtenidas en un diodo degradado en la faceta, donde se puede apreciar la DLD partiendo del espejo delantero y propagándose a lo largo de la cavidad

### 5.2.1 Imagen pancromática en rango visible a 5 kV

Fig.23 Imagen pancromática realizada mediante tubo fotomultiplicador a lo largo de toda la zona



activa usando una tensión de 5 kV, con una magnificación de 210X y a una temperatura de 80K

### 5.2.2 Imagen pancromática en rango infrarrojo a 30 kV

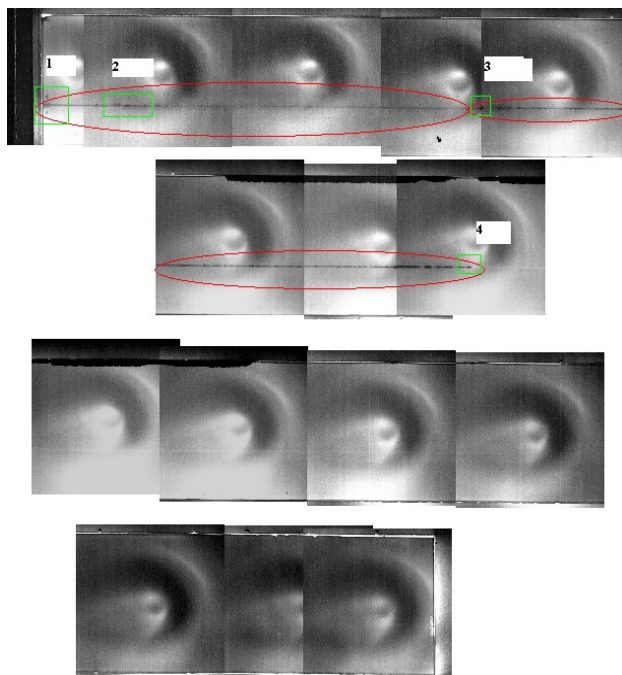


Fig.24 Imagen pancromática realizada mediante un detector de InGaAs a lo largo de toda la zona activa usando una tensión de 30 kV, con una magnificación de 210X y a una temperatura de 80K.

Las zonas señaladas en verde indican aquellas áreas en las que se han realizado análisis espectrales.

### 5.2.3 Imagen Pancromática en rango visible a 30 kV

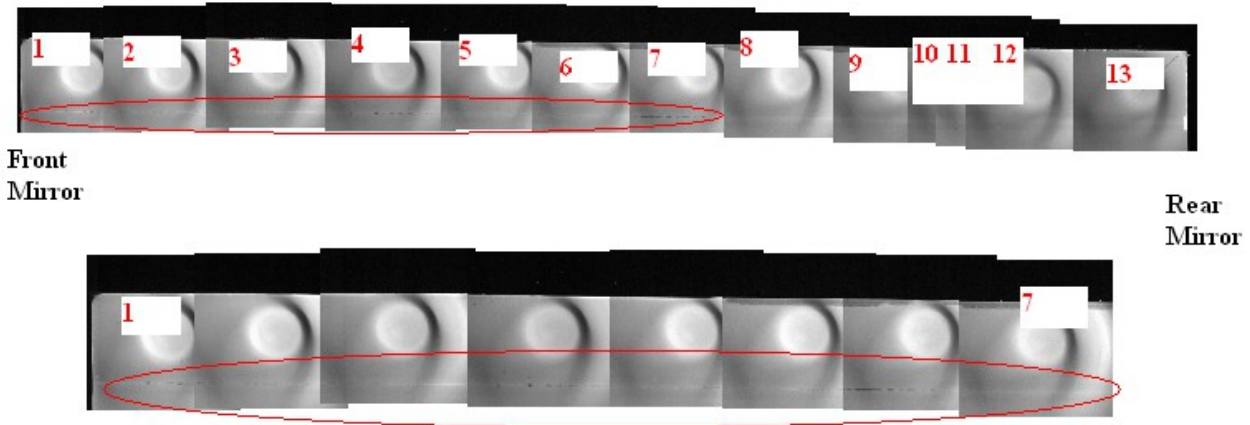


Fig.25 Imagen pancromática realizada mediante tubo fotomultiplicador a lo largo de toda la zona activa usando una tensión de 30 kV, con una magnificación de 210X y a una temperatura de 80K

### 5.2.4 Observaciones relativas a las imágenes pancromáticas

A diferencia del caso anterior, en este diodo sí que observamos una faceta degradada y cómo se ha extendido el defecto DLD a lo largo de la cavidad resonante Fig.31. En ambos láseres, pero en este en particular, se observa un cierto brillo en las zonas de la guía superior aledañas a la DLD producida en el pozo cuántico, lo que sugiere que la degradación ha afectado a varios niveles del dispositivo. También han sido analizados espectralmente algunos de los puntos negros que destacan en la DLD.

### 5.2.5 Estudio espectral

En el caso de este diodo láser, el estudio espectral ha sido llevado a cabo a partir de las imágenes pancromáticas obtenidas a partir del detector de InGaAs. En este caso, solamente hemos utilizado un voltaje de aceleración de 20 kV (lo que permite a los electrones llegar a la profundidad del pozo cuántico). Además, hemos efectuado el estudio espectrométrico en planos o superficies (a diferencia del caso anterior, para el cual solo estudiamos la espectrometría de una serie de líneas). En la figura Fig.24 se indica el lugar en el cual se encuentran las áreas que han sido objeto de nuestro estudio.

Para la superficie 1 indicada en Fig.24 :

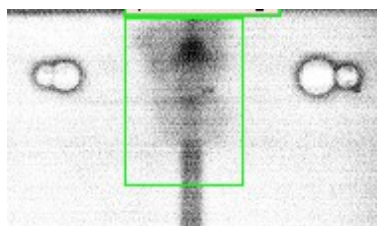
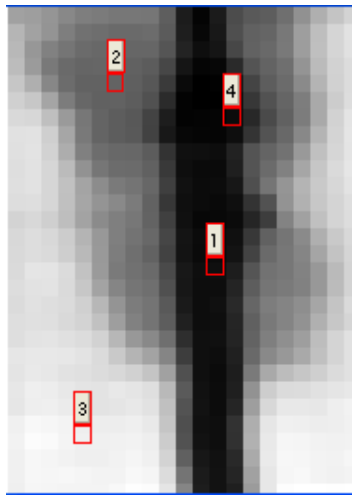
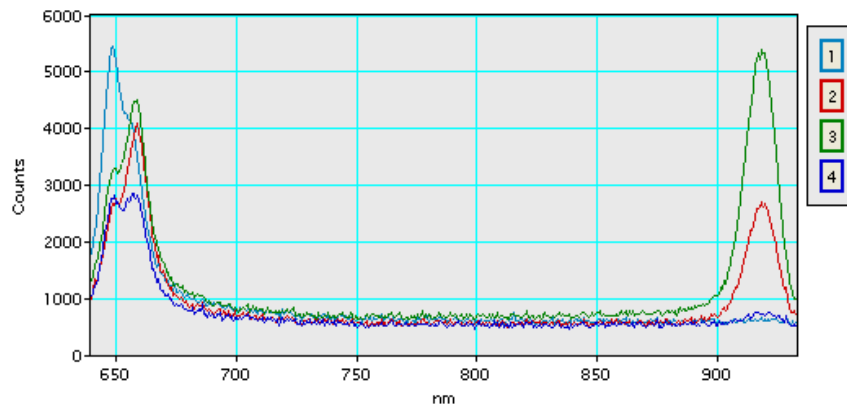


Fig.26 Imagen pancromática realizada mediante un detector de InGaAs a lo largo de toda la zona activa usando una tensión de 20 kV, con una magnificación de 1000X y a una temperatura de 80K.

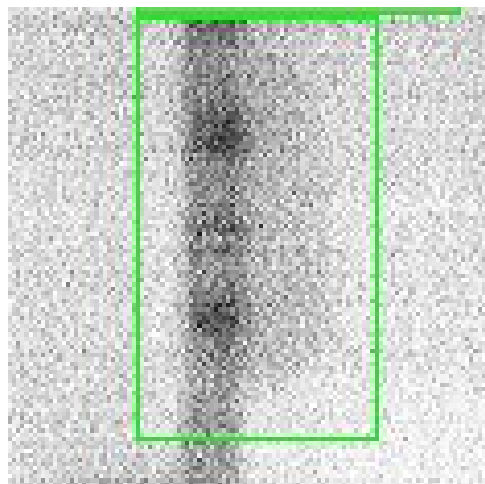


*Fig.27 Imagen espectral (863nm-932nm) con los puntos estudiados señalados*

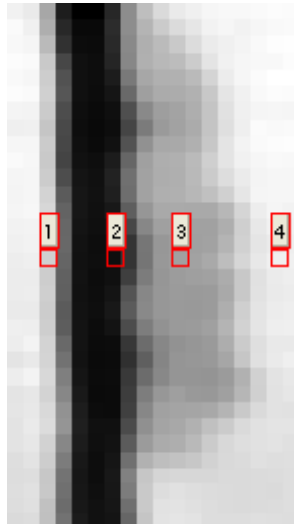


*Fig.28 Espectros obtenidos en los puntos señalados con los punto estudiados*

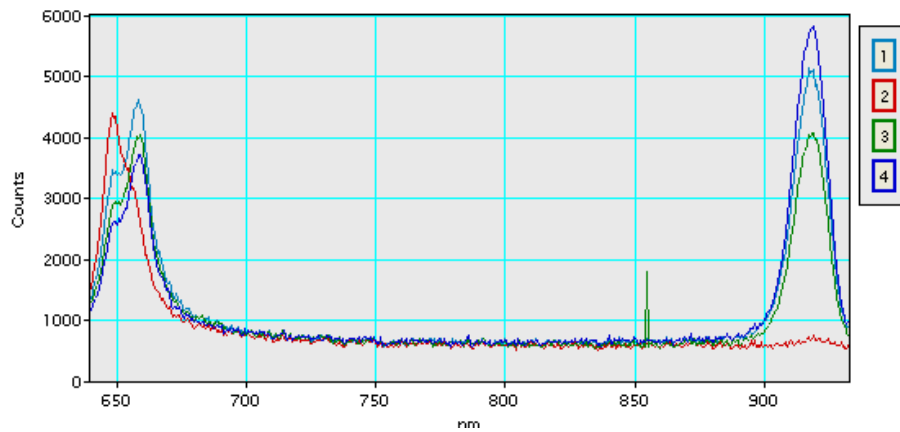
Para la superficie 2 indicada en Fig.24 :



*Fig.29 Imagen pancromática realizada mediante un detector de a lo largo de toda la zona activa usando una tensión de 20 kV, con una magnificación de 1000X y a una temperatura de 80K*

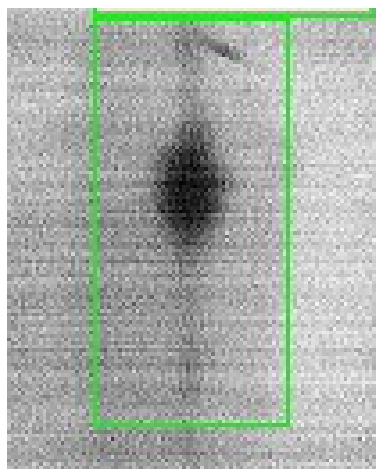


*Fig.30 Imagen espectral(892nm-932nm) con los punto estudiados señalados*

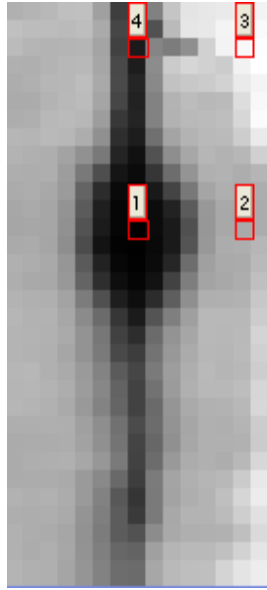


*Fig.31 Espectros obtenidos en los puntos señalados*

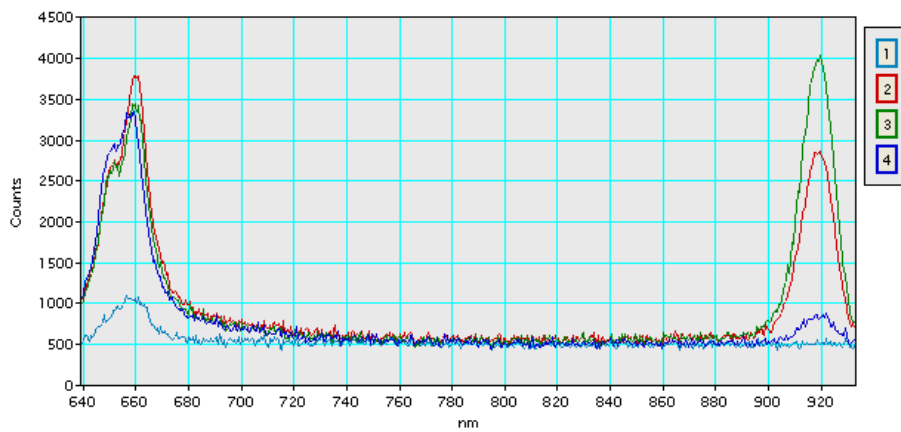
Para la superficie 3 indicada en Fig.24 :



*Fig.32 Imagen pancromática realizada mediante un detector de InGaAs a lo largo de toda la zona activa usando una tensión de 20 kV, con una magnificación de 1000X y a una temperatura de 80K*

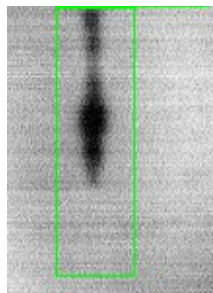


*Fig.33 Imagen espectral(878nm-932nm) con los punto estudiados señalados*

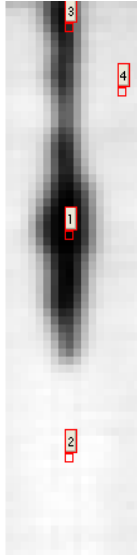


*Fig.34 Espectros obtenidos en los puntos señalados*

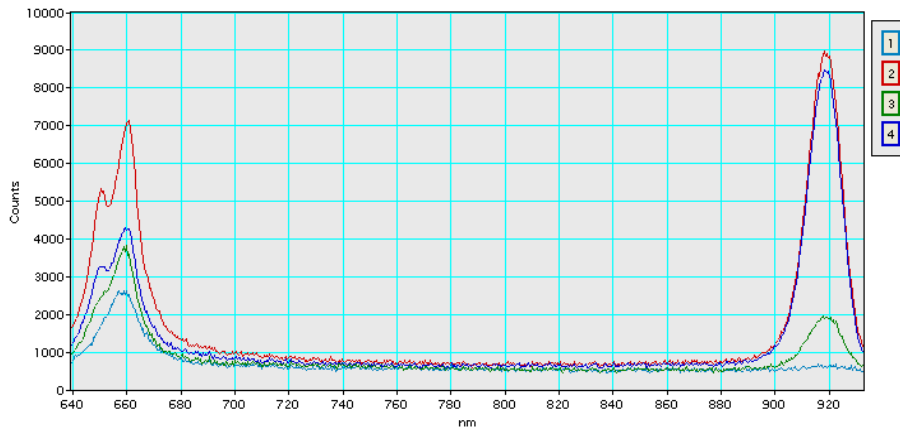
Para la superficie 4 indicada en Fig.24 :



*Fig.35 Imagen pancromática realizada mediante un detector de InGaAs a lo largo de toda la zona activa usando una tensión de 20 kV, con una magnificación de 1000X y a una temperatura de 80K*



*Fig.36 Imagen espectral (809nm-932nm) con los puntos estudiados señalados*



*Fig.37 Espectros obtenidos en los puntos señalados*

Tanto en la superficie 1 como en la 2, observamos las diferencias de intensidad en lo que a emisión del pozo cuántico en zonas dañadas (prácticamente no hay emisión) y no dañadas se refiere. Como podemos observar en las Figs.27 y 30, la ventana espectral utilizada solamente coincide, en estos casos, con la emisión de dicho elemento, lo que indica que el halo visualizado alrededor de la DLD solamente es observable a longitudes de onda correspondientes a la emisión del QW.

En el caso de la tipología de defecto asociada a 3 y 4, observamos una mayor correlación entre la intensidad de emisión del pozo cuántico y las guías para cada uno de los puntos señalados. Esto implica que las guías han resultado perjudicadas, junto al pozo cuántico, al producirse la generación del defecto.

## *6 Conclusiones:*

En este trabajo hemos utilizado, primeramente, la simulación para un modelo simplificado de la estructura de capas en el diodo láser Fig.11 con el objetivo de conocer el poder de penetración Fig.12 y la emisión en catodoluminiscencia Fig.13 respecto de la profundidad en la muestra de las zonas que han sido objeto de nuestro estudio. Esto resulta de vital importancia a la hora de planificar los estudios que vamos a realizar en el laboratorio, constituyendo una importante herramienta de previsión y comparación.

Hemos podido comprobar cómo, usando un mayor voltaje de aceleración para el haz de electrones, el máximo de energía perdida en el proceso se ha visto desplazado hacia zonas más profundas de la muestra, permitiendo hacer un análisis en profundidad de la estructura multicapa que forma el diodo.

Posteriormente, mediante los detectores de los que disponemos, hemos realizado las tomografías de toda la zona activa de dos láseres degradados de diferente modo, caracterizando para cada uno de ellos la guía de ondas superior o situada en la zona P a 5 kV con un tubo fotomultiplicador, la inferior a 30 kV también con el tubo fotomultiplicador y el pozo cuántico (emisor en el infrarrojo) a 30 kV a partir del detector de InGaAs.

De la misma manera, la captura de espectros en zonas concretas del laser ha contribuido a una mejor comprensión de los fenómenos acaecidos en el dispositivo.

Las experiencias realizadas sobre estas muestras han resultado muy inesperadas debido a la emisión estimulada [1] que se ha logrado en el diodo sin degradación en la faceta con una tensión de 30 kV. Este fenómeno no ha sido observado anteriormente en nuestro laboratorio.

Como hemos podido observar, la técnica CL constituye una herramienta muy importante a la hora de caracterizar los modos de degradación producidos en este tipo de estructuras, permitiéndonos diferentes tipos de análisis y pudiéndose caracterizar todos los elementos que conforman el diodo.

Por otra parte quiero señalar que este trabajo me ha permitido adquirir destreza en el manejo de la microscopía electrónica y de diversos sistemas ópticos incluyendo monocromadores, y detectores de alta sensibilidad, que me han permitido adquirir conocimientos de espectroscopia óptica.



## 7 Bibliografía:

- [1] *A.Einstein, Phys.Z, Vol 18, 121, 1917.*
- [2] *R.N.Hall, G.E.Fenner, J.D.Kingsley, T.J.Soltys, and R.O.Carlson, Coherent light emission from GaAs junctions, Physical Review Letters, Volume 9, Number 9, November 1, 1962.*
- [3] *J.Jiménez, Laser diode reliability: crystal defects and degradation modes, C. R. Physique 4, 663–673, 2003.*
- [4] *J.W.Tomm, J.Jiménez, Quantum-Well Laser Array Packaging, 9-11, 43-50, 189-206 The McGraw-Hill Companies, INC, 2007.*
- [5] *V.Hortelano, J.Anaya, J.Souto, J.Jiménez, J.Perinet, F.LAurette, Defect signatures in degraded high power laser diodes, Microelectronics Reliability 53, 1501-1505, 2013.*
- [6] *B.Monemar, Degradation Processes in Semiconductor Lasers, Physica Scripta, Vol 24, 367-374, 1981.*
- [7] *Y.L.Khait, J.Salzman, R.Beserman, Kinetic model for gradual degradation in semiconductor lasers and light emitting diodes, Applied Physics Letters 53, 2135, 1988.*
- [8] *A physical model for the rapid degradation of semiconductor laser diodes, A. Martín-Martín, M. Avella, M. P. Iñiguez, J. Jiménez,, M. Oudart and J. Nagle, Applied Physics Letters 93,171106, 2008.*
- [9] *About the critical temperature for catastrophic optical damage in high power laser diodes. J.Souto, M.Rodríguez, J.Anaya, A.Torres, J.Jiménez. ISROS 2014 (International Symposium on Reliability of Optoelectronics for Systems). Toulouse, France. 16 - 20 June 2014.*
- [10] *Cathodoluminescence spectral imaging as a technique for the study of cavity degradation of high-power QW lasers, M.Avella, M.Pommiés, J.Jiménez, M.BEttiati, G.Hallais, V.Lemonon, 204-209, Material Science in Semiconductor Processing 9, 2006.*
- [11] *Role of the thermal boundary resistance of the quantum well interfaces on the degradation of high power laser diodes, A. Martín-Martín, M. P. Iñiguez, J.Jiménez, M. Oudart, and J. Nagle, Journal of Applied Physics 110, 033113, 2011.*
- [12] *S.O.Kasap, Optoelectronics, Prentice Hall, 1999.*