

## **CAPÍTULO 4. INVESTIGACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES DE RESONADORES EN ANILLO CON ACOPLADORES SOBRE-ACOPLADOS**

El uso de fibras ópticas láser en las comunicaciones y en sistemas de medición basados en sensores de fibra óptica ha permitido desarrollar dispositivos compactos que presentan características únicas. El desarrollo de sistemas láser se basa en el empleo de materiales que emitan luz a través de procesos luminiscentes. Para generar y amplificar luz mediante estos procesos se requiere, además del material láser, un resonador óptico que permita el ajuste fino de las frecuencias de operación del sistema láser y una fuente de energía externa.

Con el desarrollo de dispositivos láser de fibra óptica es posible ahora diseñar sistemas láser utilizando únicamente dispositivos de fibra óptica, lo cual ha sido de gran importancia para disminuir el tamaño e incrementar la eficiencia de estos sistemas [3]. En este capítulo veremos las características de sistemas láser de fibra utilizando resonadores de anillo contruidos con los acopladores fabricados en el laboratorio.

### **4.1 Arreglo experimental.**

Para estudiar la influencia de los acopladores contruidos en las propiedades espectrales de un sistema láser de fibra, se construyó un resonador en configuración de anillo, cuyos elementos se muestran esquemáticamente en la figura 4.1. En esta configuración, el acoplador determina las longitudes de onda que circularán dentro del anillo para ser amplificadas y generar emisión láser. Dado que no se utilizan aisladores dentro del anillo, el resonador opera en modo bi-direccional, pues la luz generada puede circular simultáneamente en dos direcciones. Ésta es la configuración más simple para un láser de fibra en anillo y

es útil para determinar la influencia del acoplador en las características espectrales de la emisión láser.

El láser de fibra en configuración de anillo de la figura 4.1 consta de un diodo láser (LD), un acoplador tipo WDM, un aislador óptico (ISO), 40 cm de fibra de Erblio ( $\text{Er}^{3+}$ ), un controlador de polarización (PC), y el acoplador sobre-acoplado (HOCC). El diodo láser se opera de manera controlada con una fuente de corriente regulada y proporciona la energía de bombeo para la fibra de erbio. Ésta se suministra a través del WDM, que se encarga de separar la luz que circula en el anillo en función de la longitud de onda. El controlador de polarización se utiliza para ajustar la polarización del haz generado en el arreglo, y permite mantener un estado de polarización fijo dentro del anillo. El aislador a la salida del anillo evita perturbaciones en el láser bloqueando la luz que pueda reflejarse hacia el resonador. El acoplador sobre-acoplado cierra el anillo y se encarga de seleccionar las componentes espectrales de la luz láser emitida por la fibra de erbio.

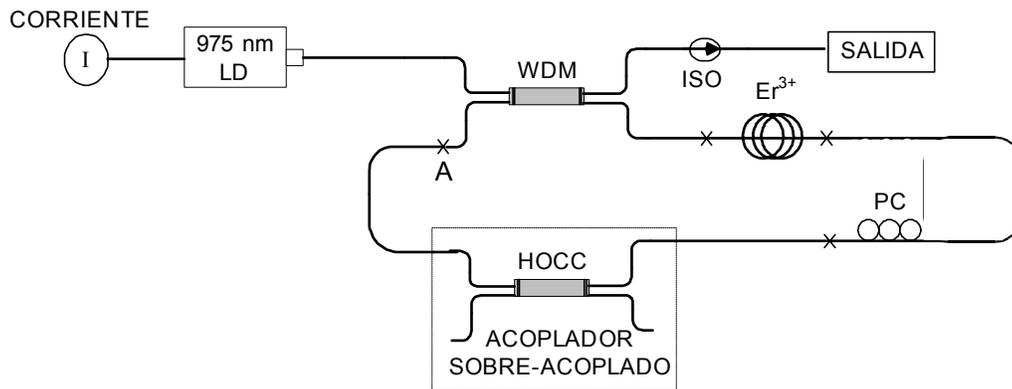


Figura 4.1. Sistema láser de fibra en configuración de anillo utilizando un acoplador sobre-acoplado.

Con los amplificadores de fibra óptica, fabricados al incorporar elementos de tierras raras en el núcleo de la fibra, las características espectrales de la luz láser estarán dadas por el tipo de tierra rara utilizado en el núcleo de la fibra. Para este trabajo se utilizó una fibra de  $\text{Er}^{3+}$ , que presenta una banda espectral de

emisión que va de 1530 nm a 1565 nm, teniendo máxima luminiscencia alrededor de los 1535 nm (ver figura 4.2). En la configuración de anillo, el WDM deja pasar todas las longitudes de onda dentro del rango espectral de emisión de la fibra de erbio. De esta manera, las longitudes de onda que serán amplificadas son aquellas que el acoplador sobre-acoplado seleccione; esto a su vez, depende de las características de fabricación del acoplador (número de ciclos, coeficiente de acoplamiento, etc.).

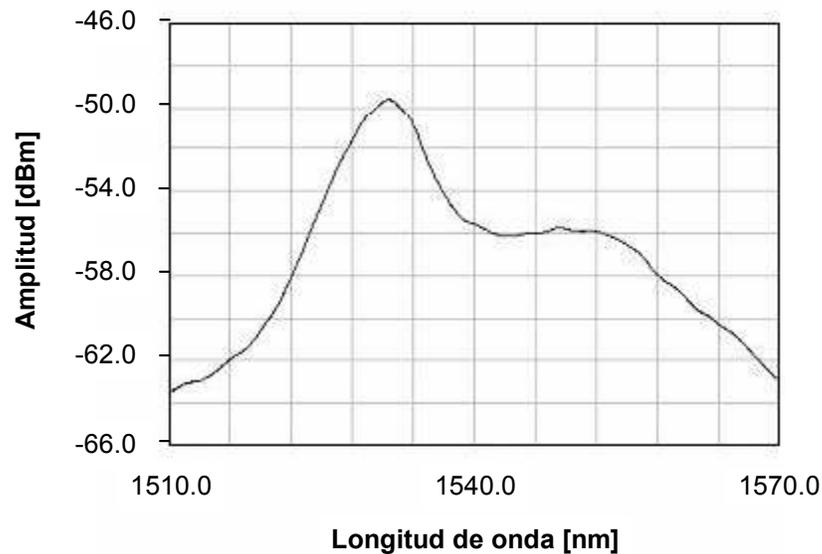


Figura 4.2. Espectro de emisión de la fibra de erbio.

Los experimentos realizados para observar los espectros de transmisión de los acopladores sobre-acoplados fueron de dos tipos: el primero en configuración anillo abierto (para dos y tres lóbulos) y el segundo en configuración anillo cerrado (para acopladores con uno, dos y tres lóbulos). El punto A en la figura 4.1 muestra la sección en la cual el anillo se abrió y se colocó el analizador de espectros ópticos (OSA) para observar los cambios espectrales. Para los espectros en anillo cerrado el OSA fue colocado a la salida del aislador óptico. El espectro de transmisión se registró para variaciones en el medio externo usando nuevamente alcohol etílico.

## 4.2 Espectros de transmisión de los acopladores (anillo abierto).

Los espectros de transmisión más representativos obtenidos en la configuración anillo abierto durante el proceso de evaporación de la gota de alcohol etílico se muestran en la figura 4.3. La secuencia de los espectros registrados es similar a la que se mostró cuando se utilizó un LED como fuente de luz; por simplicidad y dado que este tipo de experimento se mostró con más detalle en el capítulo anterior, en la figura se muestran únicamente tres espectros para cada acoplador (acoplador de dos lóbulos (a) y de tres lóbulos (b)). En ambos casos, la gráfica en color negro es el espectro antes de colocar alcohol etílico, la gráfica en color azul es el espectro obtenido con el alcohol y en color rojo se presenta el espectro registrado al finalizar el proceso de evaporación. A pesar de utilizarse otros acopladores distintos a los usados para los experimentos del capítulo anterior, los resultados son muy similares indicando que el proceso de fabricación de los dispositivos es bastante repetible. Para el acoplador de dos lóbulos (figura 4.3a) se logra observar el mismo comportamiento registrado al utilizar la fuente de espectro amplio, ya que al final del proceso de evaporación se logra obtener casi en su totalidad el espectro original. En el caso del acoplador de tres lóbulos, (figura 4.3b), de igual forma que al utilizar la fuente de espectro amplio, no se logra obtener el espectro original: hay pérdidas en amplitud y el espectro final se recorre hacia longitudes de onda mayores. Como se mencionó antes, estos cambios en ambos casos indican que la región de acoplamiento retiene residuos de alcohol que contaminan la guía de onda.

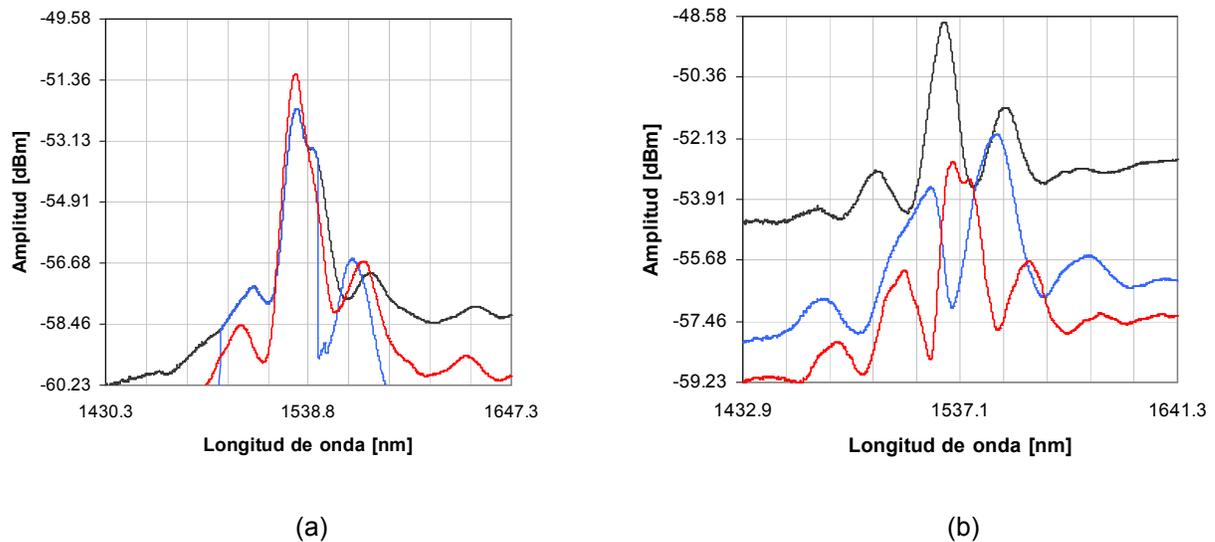


Figura 4.3. Espectros registrados durante el proceso de evaporación del medio externo: (a) acoplador sobre-acoplado de dos lóbulos, (b) acoplador sobre-acoplado de tres lóbulos.

En los espectros para ambos tipos de acopladores podemos ver que estos dispositivos realizan efectivamente la selección espectral de la luz que circulará dentro del anillo. Como veremos más adelante, el rango espectral de operación del láser en anillo estará entonces determinado por los acopladores y siempre estará dentro del rango espectral de emisión de la fibra de erbio.

En la figura 4.4 se ilustra el cambio en la potencia con respecto al tiempo normalizado a la salida de la fibra 1 utilizando los acopladores de dos y tres lóbulos para un mismo cambio en índice de refracción (de 1 a 1.36). Al igual que en los experimentos del capítulo anterior, los valores de potencia fueron registrados en el tiempo especificado en la gráfica. La potencia a la salida de la fibra sufre mayores cambios en el acoplador de tres lóbulos (de 1 a 0.04). Durante todo el proceso de evaporación la potencia a la salida del acoplador de tres lóbulos presenta menores cambios después del tiempo 1 y al tiempo 2 no se acerca a la potencia de salida original (sin alcohol). En cambio, en el acoplador de dos lóbulos, la potencia a la salida de la fibra sufre menores cambios (de 1 a 0.848). Al finalizar el proceso de evaporación (tiempo 2) la potencia a la salida de este acoplador se aproxima a la potencia de salida original (sin alcohol).

Nuevamente estas observaciones indican que el acoplador de tres lóbulos es más sensible a los cambios en el medio externo que el de dos lóbulos, pues no se logra obtener la potencia original. Después del tiempo 2 no se registró ningún cambio en el espectro de transmisión.

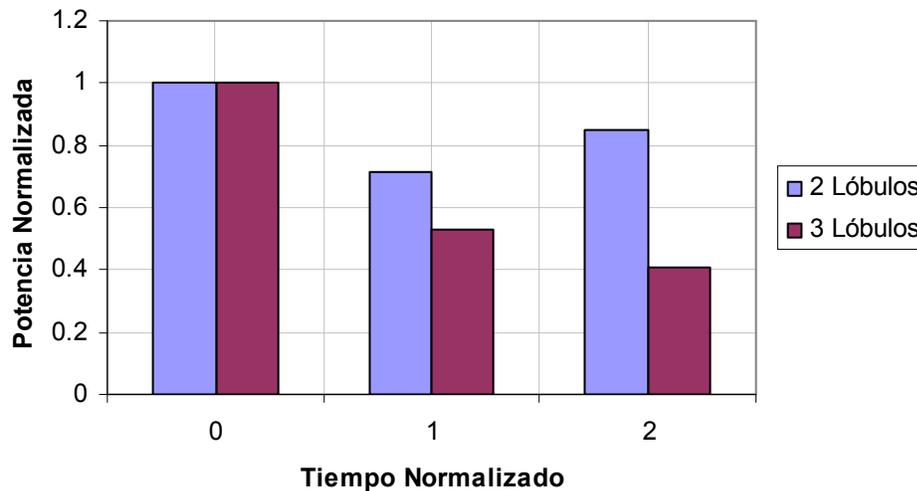


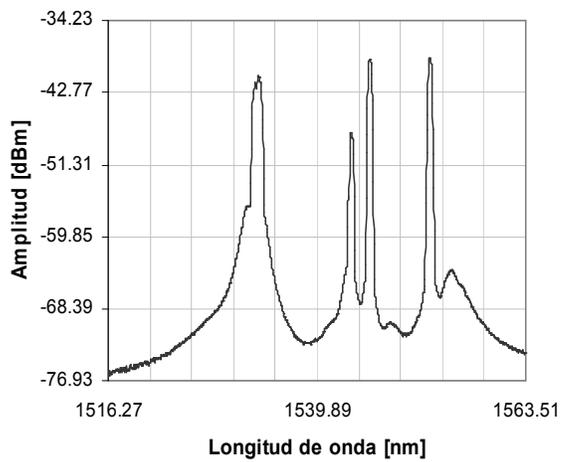
Figura 4.4. Potencia normalizada a la salida de una de las fibras de dos acopladores con diferente número de lóbulos, durante el proceso de evaporación del alcohol.

### 4.3 Características de la emisión láser con distintos acopladores (anillo cerrado).

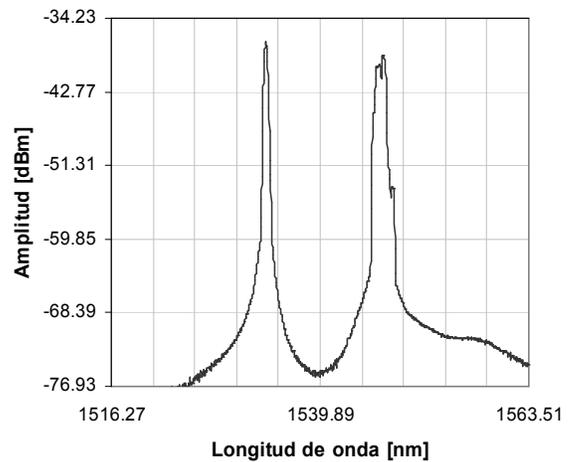
Al cerrar el anillo en el arreglo experimental, se obtiene un resonador láser en el que la emisión láser se genera a las longitudes de onda que puedan circular con menores pérdidas. Como se observó en la sección anterior, el acoplador dentro del anillo realiza la selección espectral que determinará las longitudes de onda que circularán con menores pérdidas dentro del anillo. Estas longitudes de onda son en las que el acoplador tiene bandas de transmisión, y serán las que circulan dentro del anillo para ser amplificadas. En este caso, los cambios en el índice de refracción en la región de acoplamiento generarán cambios en la longitud de onda de emisión del láser en anillo.

El procedimiento experimental fue el mismo utilizado para las configuraciones anteriores. Para tener un punto adicional de comparación, en estos experimentos se utilizó también un acoplador sobre-acoplado de un lóbulo. Los espectros de transmisión más representativos obtenidos con este acoplador durante el proceso de evaporación de la gota de alcohol etílico se muestran en la figura 4.5. La gráfica original antes de colocar una gota de alcohol etílico es la gráfica (a) en la cual se observa que el láser opera en longitudes de onda. Al colocar la gota de alcohol (gráfica b) se observan las variaciones de potencia en las distintas bandas espectrales en las que opera el láser; puede observarse que durante el proceso de evaporación hay disminución de potencia de algunas longitudes de onda (gráfica c, d). Al finalizar el proceso de evaporización, puede observarse que las bandas de transmisión a las longitudes de onda iniciales reaparecen (gráfica e), sin embargo, las líneas de emisión láser en la región central del espectro no se recuperan. No obstante, al realizar ajustes en el controlador de polarización dentro del anillo, es posible obtener nuevamente las longitudes de onda originales (figura f).

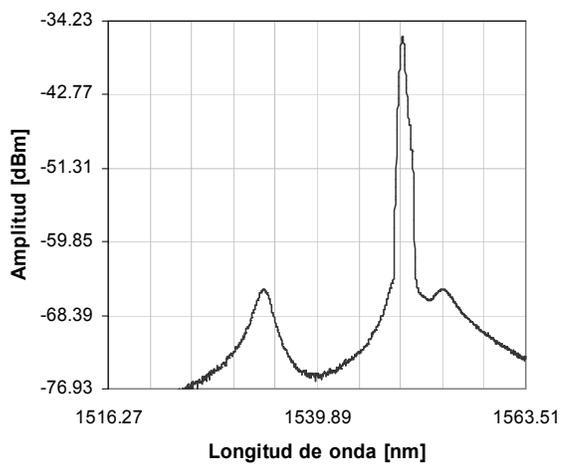
Los cambios espectrales observados con esta configuración indican que las pérdidas que se generan durante el proceso de evaporación dependen de la polarización. Es por esto que el espectro puede ajustarse mediante el controlador de polarización, pues los residuos de alcohol sobre la región de acoplamiento no tienen una distribución uniforme. De esta manera, cuando la luz pasa por esta región sufre pérdidas que dependen de la polarización, y los ajustes en el controlador de polarización permiten seleccionar orientaciones en las que las pérdidas son mínimas.



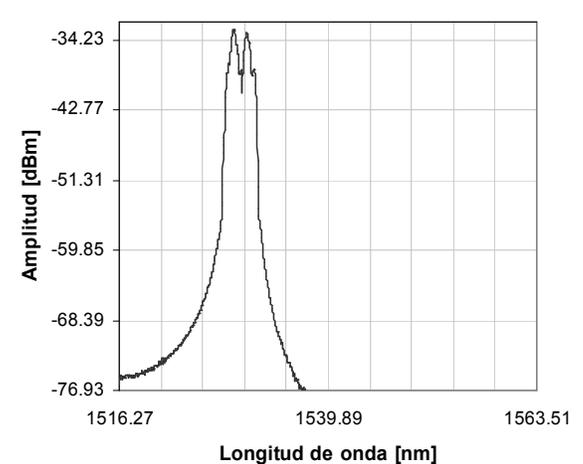
(a)



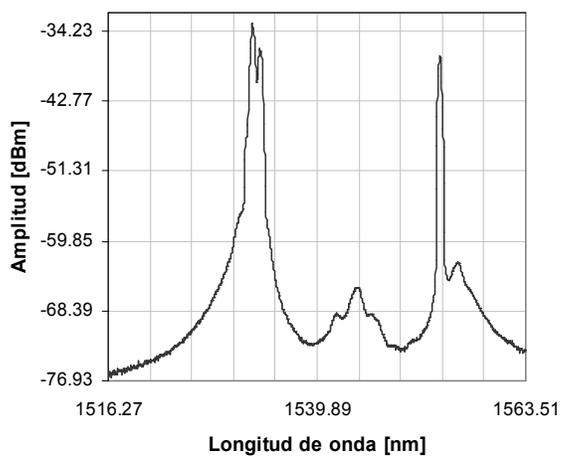
(b)



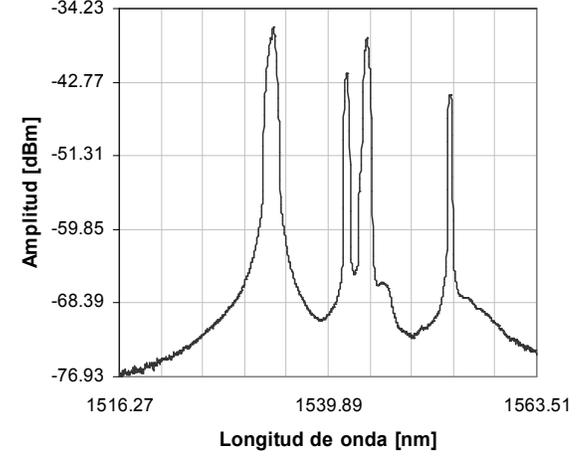
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.5. Espectros obtenidos para un acoplador sobre-acoplado de un lóbulo, durante el proceso de evaporación del medio externo (alcohol etílico).

En la figura 4.6 se muestran los espectros de transmisión más representativos obtenidos con el láser en anillo utilizando acopladores sobre-acoplados de dos (a) y tres lóbulos (b). La gráfica en color negro representa el espectro original, en color azul se muestra el espectro obtenido al colocar alcohol etílico y en color rojo se muestra el espectro al final del proceso de evaporación. Comparando los espectros sin alcohol, podemos notar que el rango espectral de operación del láser se va reduciendo en función del número de lóbulos del acoplador. Podemos ver que mientras mayor sea el número de lóbulos del acoplador sobre-acoplado, la región espectral de operación será más angosta (ver figuras 4.5a y 4.6). Esto influye también en las características de las líneas de emisión láser que pueden generarse dentro de cada banda de transmisión. Nótese, por ejemplo, que para el acoplador de tres lóbulos pueden observarse más de dos líneas de emisión láser tratando de operar dentro de la banda de transmisión (figura 4.6b), mientras que para el acoplador de un lóbulo se generan únicamente hasta dos líneas láser por banda (figura 4.5a). Esto se debe a que la energía proporcionada por la fibra de erbio se concentra en una región espectral más estrecha para un acoplador más selectivo, y esto permite generar múltiples longitudes de onda en una región espectral más angosta. Sin embargo, las líneas de emisión son menos estables mientras más cercanas sean estas longitudes de onda, pues el erbio no puede operar de manera estable bajo estas condiciones. Estas características se resaltarán con más detalle en las conclusiones.

Durante el proceso de evaporación se generan variaciones de potencia y desplazamiento de las regiones espectrales de operación para ambos tipos de acopladores. Podemos notar que el desplazamiento espectral no es el mismo en ambos casos: mientras que para el acoplador de dos lóbulos el espectro se recorre hacia la izquierda (figura 4.6a), el acoplador de tres lóbulos muestra desplazamiento espectral hacia la derecha (figura 4.6b). Esta característica indica que en ambos casos el láser trata de operar en la región de mayor ganancia, esta región está a longitudes de onda menores para el acoplador de dos lóbulos, mientras que para el acoplador de tres lóbulos la región de desplazamiento es

hacia longitudes de onda mayores. En general, las pérdidas inducidas por el cambio en el índice de refracción generarán cambios en la longitud de onda de operación del láser hacia regiones espectrales en donde la ganancia supere a las pérdidas.

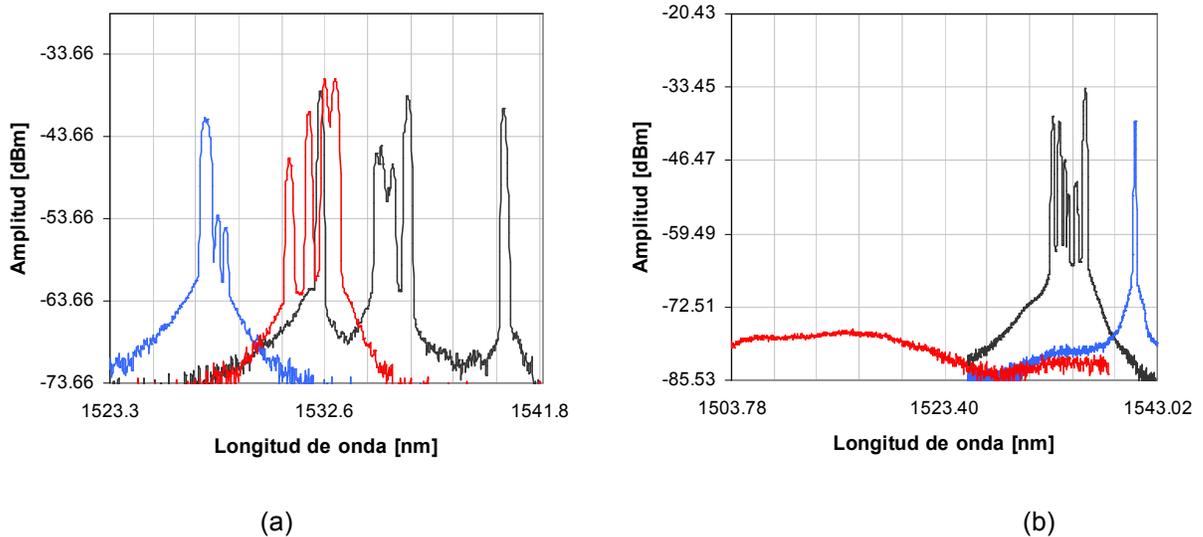


Figura 4.6. Espectros registrados durante el proceso de evaporación del medio externo: (a) acoplador sobre-acoplado de dos lóbulos, (b) acoplador sobre-acoplado de tres lóbulos.

Si comparamos los cambios espectrales observados para anillo abierto con los obtenidos con el anillo cerrado (figuras 4.3, 4.5 y 4.6), podemos observar que las variaciones en el espectro son más evidentes cuando el anillo se encuentra cerrado. En general, los sistemas láser son muy sensibles a las pérdidas dentro del resonador, y este tipo de comportamiento concuerda con esta característica. Por ejemplo, los ajustes en el controlador de polarización del láser en anillo con acopladores de dos y tres lóbulos no permiten recuperar el espectro original al final del proceso de evaporación. Nótese que para el acoplador de tres lóbulos, ni siquiera es posible volver a generar emisión láser después de que el proceso de evaporación ha concluido. Esto indica que si se utiliza esta configuración, los cambios en el índice de refracción en la región de acoplamiento pueden detectarse con mayor facilidad debido a que el láser es más sensible a las pérdidas. Esto puede verse como un incremento en la sensibilidad a los cambios en el medio externo.

En la figura 4.7 se ilustra el cambio en la potencia con respecto al tiempo normalizado a la salida de la fibra 1. Se puede observar que la potencia a la salida de la fibra sufre mayores cambios en el acoplador de tres lóbulos, y en ningún caso se logra obtener la potencia original de salida (sin alcohol). Comparando los cambios de potencia de estas configuraciones con los registrados para anillo abierto (figura 4.4) podemos ver que en ambos casos, los acopladores con mayor número de lóbulos presentan más sensibilidad a los cambios en el índice de refracción. Al finalizar el proceso de evaporación, para la configuración en anillo abierto es posible obtener valores de potencia a la salida similares a los registrados originalmente; sin embargo, esto no se logra con el anillo cerrado. Puede notarse también que los cambios en la potencia de salida son más marcados en este último caso, resaltando de nuevo la sensibilidad de los sistemas láser a las pérdidas dentro del resonador. Dentro de las conclusiones se presentarán sugerencias de como pueden utilizarse estos resultados en el desarrollo de sensores.

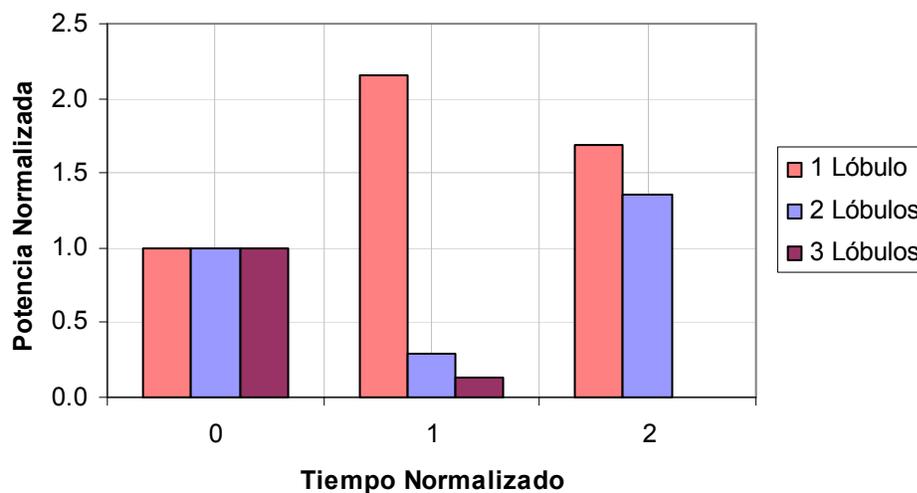


Figura 4.7. Potencia normalizada a la salida de una de las fibras de tres acopladores con diferente número de lóbulos, durante el proceso de evaporación del alcohol.