

**BIESTABILIDAD OPTICA EN GaSe COMBINANDO LOS EFECTOS FOTOTERMICO,  
DE FOTOCONDUCTIVIDAD Y JOULE.**

**OPTICAL BISTABILITY IN GaSe COMBINING PHOTOTHERMAL,  
PHOTOCONDUCTIVITY AND JOULE EFFECTS.**

M.A.Hernández, J.F.Sánchez, M.V.Andrés, A.Segura y V.Muñoz.

Departamento de Física Aplicada, Universidad de Valencia, 46100 Burjasot, Valencia.

**RESUMEN**

La dependencia con la temperatura del coeficiente de absorción del GaSe a 633 nm convierte a este material en idóneo para el diseño de dispositivos biestables a temperatura ambiente. Al aplicar un campo eléctrico, la combinación de los efectos de fotoconductividad y Joule da lugar a un efecto térmico que se superpone al efecto fototérmico. De este modo el campo eléctrico resulta ser un parámetro suplementario para controlar las características no lineales de los dispositivos.

**ABSTRACT**

The temperature dependence of the GaSe absorption coefficient at 633 nm makes this material suitable to design bistable devices at room temperature. When an electric field is applied, the combination of photoconductivity and Joule effects gives rise to a thermal effect to be superposed on the photothermal effect. Thus, the applied electric field can be regarded as an extra parameter to control de nonlinear characteristics of the devices.

## 1. INTRODUCCION

El GaSe es un semiconductor que presenta un frente de absorción directo de unos 2eV a temperatura ambiente (1), con un pico excitónico observable a esta temperatura. Por tanto, la banda prohibida de este material es ligeramente superior a la energía de la radiación de los láseres de HeNe (633 nm). Ello permite proponer al GaSe como un material idóneo para el diseño de dispositivos ópticos no lineales que trabajen a temperatura ambiente con esta longitud de onda ( $\lambda = 633$  nm).

Entre los mecanismos físicos, que se pueden explotar para la obtención de características ópticas no lineales en el GaSe, hemos de mencionar la saturación de la absorción del pico excitónico (2) y el corrimiento del frente de absorción por calentamiento. Las experiencias que se describen en este trabajo se fundamentan en este segundo mecanismo, que en esencia supone un incremento importante de la absorción por efectos fototérmicos y, en el caso de aplicar un campo eléctrico, un efecto Joule suplementario controlado por la fotoconductividad.

Las muestras de GaSe han sido obtenidas por exfoliación directa de lingotes monocristalinos crecidos por el método de Bridgman-Stockbarger, partiendo del material previamente obtenido de la síntesis de los elementos constituyentes.

## 2. MONTAJE EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

La figura 1 muestra el esquema del montaje experimental empleado para estudiar las características de los diversos dispositivos de GaSe aquí considerados, tanto de transmisión como de reflexión y a temperatura ambiente. El modulador acusto-óptico realiza la función de atenuador controlado por tensión o propiamente de modulador según los casos. El laser utilizado tiene una potencia nominal de 35 mW.

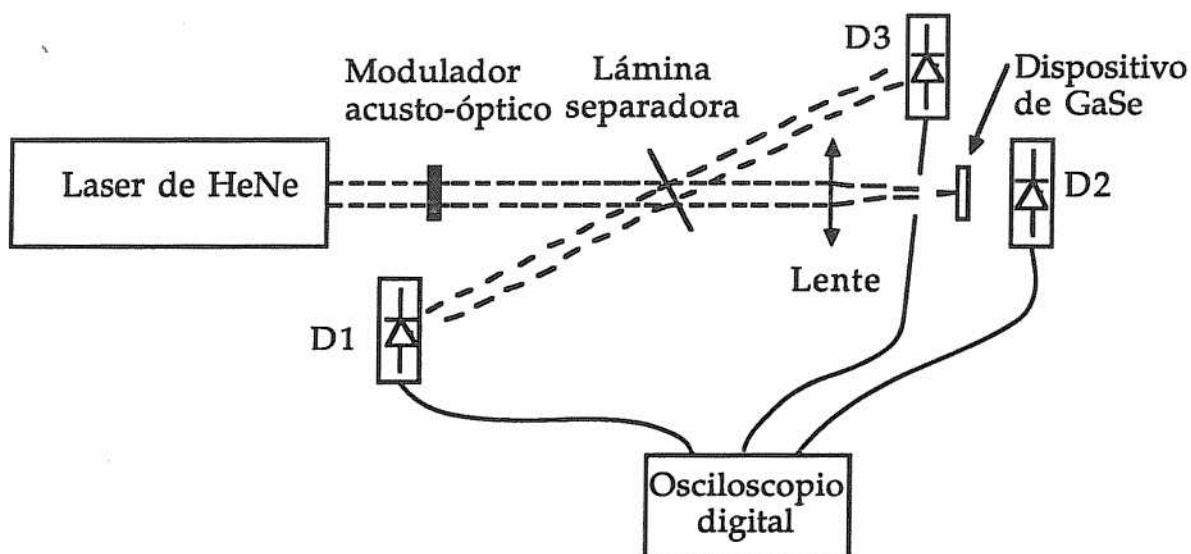


Figura 1. Esquema del montaje experimental. Los fotodiodos D1, D2 y D3 permiten medir las potencias incidente, transmitida y reflejada.

La potencia transmitida ( $P_t$ ) en función de la potencia incidente ( $P_i$ ) tiene una característica biestable para muestras de aproximadamente  $1 \text{ mm}^2$  de superficie y entre  $10$  y  $30 \text{ }\mu\text{m}$  de grosor. Las muestras de grosor mayor suelen presentar una característica no lineal, pero sin mostrar biestabilidad, y las muestras más delgadas tienen una característica lineal, que pone de manifiesto la necesidad, en estos casos, de utilizar una potencia incidente mayor para poder generar efectos no lineales. Las figuras 2 y 3 ilustran lo anterior, en concreto para dos muestras de  $12$  y  $37 \text{ }\mu\text{m}$  de grosor, respectivamente.

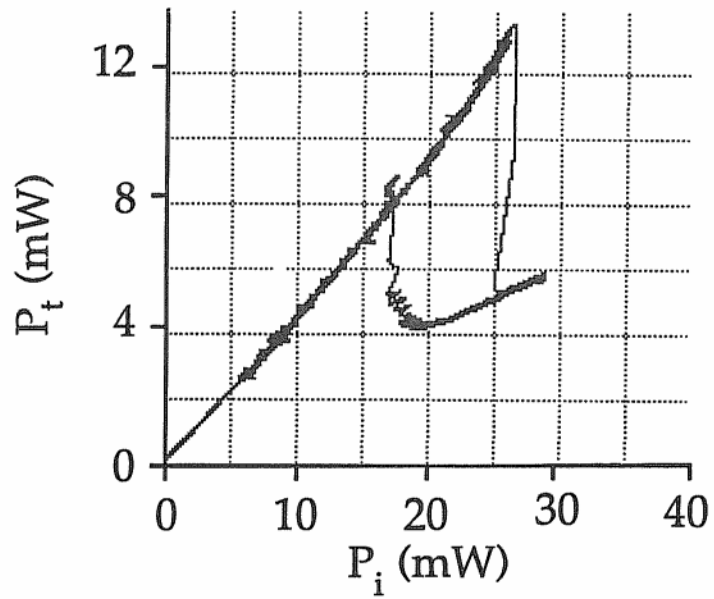


Figura 2. Potencia transmitida en función de la potencia incidente para una muestra de GaSe de 12  $\mu\text{m}$  de grosor.

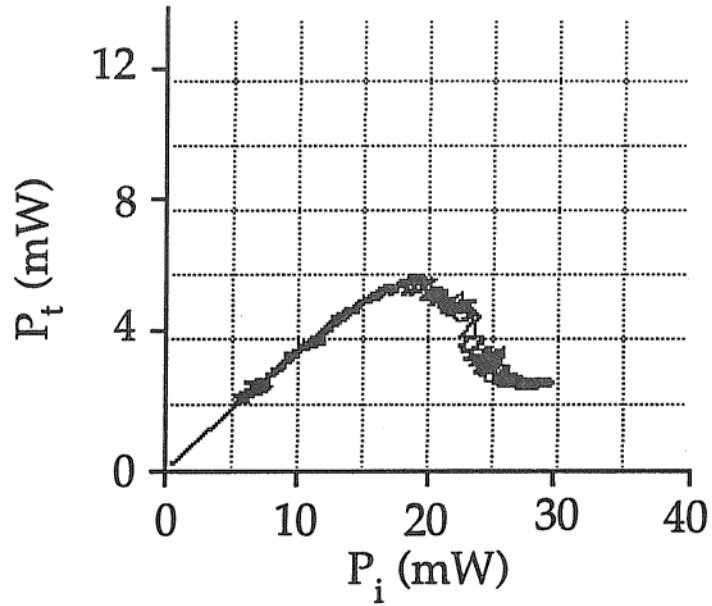


Figura 3. Potencia transmitida en función de la potencia incidente para una muestra de GaSe de 37  $\mu\text{m}$  de grosor.

La figura 4 muestra la respuesta temporal de un dispositivo de  $12\ \mu\text{m}$  de grosor, para una potencia incidente tipo escalón. El tiempo de respuesta es del orden de segundos, tal como se puede observar en dicha figura.

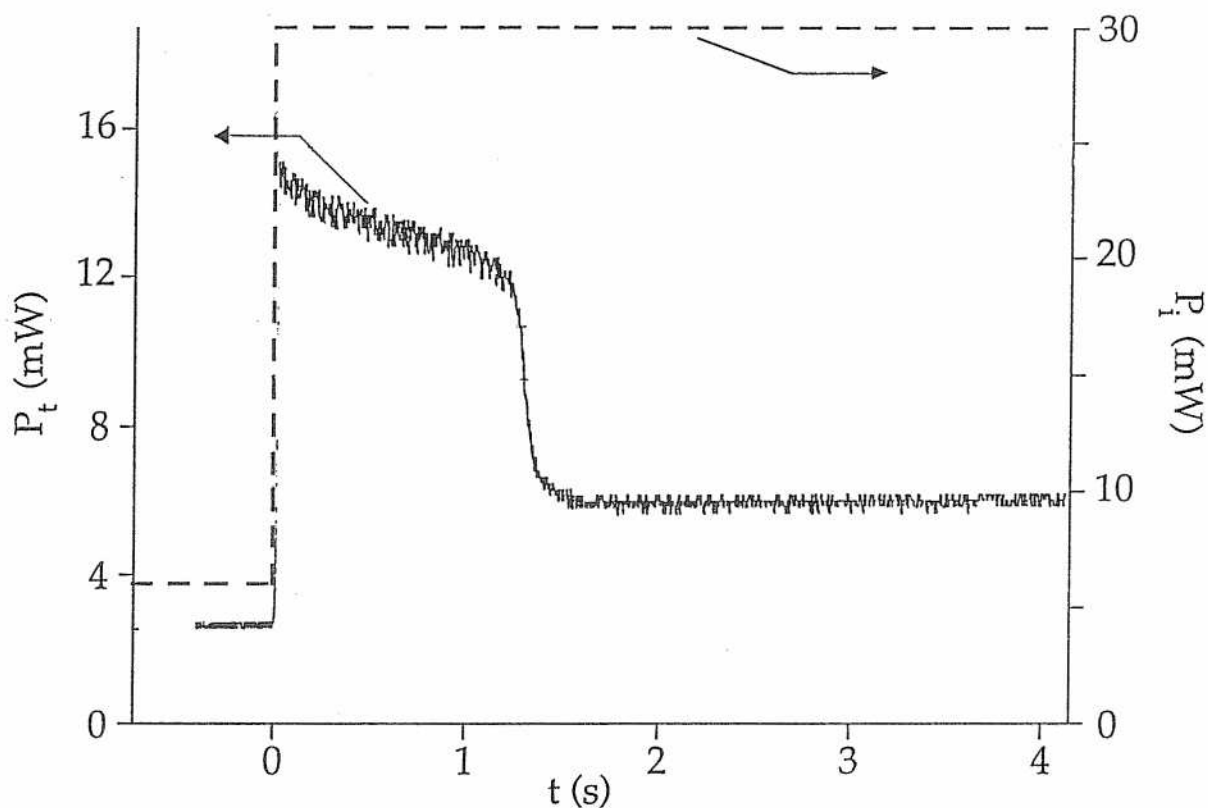


Figura 4. Respuesta temporal de una muestra de GaSe de  $12\ \mu\text{m}$  de grosor, para una potencia incidente de 30 mW tipo escalón.

El análisis teórico de estos dispositivos, que se detalla en el apartado 3, motivó la preparación de láminas de GaSe con una cara metalizada con Au ( $\sim 400\ \text{Å}$ ), con el fin de ensanchar la histéresis del dispositivo. En este caso la característica a medir es la potencia reflejada en función de la incidente. La figura 5 muestra la potencia reflejada ( $P_r$ ) en función de la incidente ( $P_i$ ) para un dispositivo formado por una lámina de GaSe de  $17\ \mu\text{m}$  de grosor, metalizada con Au en su cara posterior. La comparación con la figura 2 muestra un ensanchamiento de la histéresis. El hecho de que el grosor de la

muestra metalizada sea mayor que la de la figura 2 permite realzar aún más el efecto que mencionamos, ya que el aumento del grosor de la muestra justo contribuye en sentido contrario al ensanchamiento.

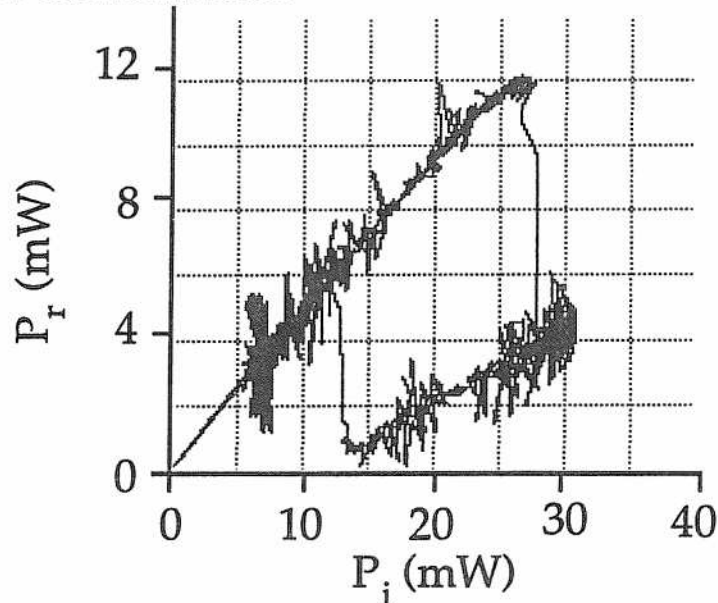


Figura 5. Potencia reflejada en función de la potencia incidente para una muestra de GaSe de 17  $\mu\text{m}$  de grosor metalizada con Au ( $\sim 400 \text{ \AA}$ ) en la cara posterior.

La resistividad intrínseca, o sea en oscuridad, del GaSe es mayor que  $10^4 \Omega\text{cm}$ . Este valor puede reducirse de forma substancial por los efectos de fotoconductividad asociados con la absorción de luz. Si se aplica un campo eléctrico, en el momento que la resistividad se reduzca, se incrementará el efecto Joule y se calentará localmente el material. Por ello, se prepararon dispositivos Au/GaSe/Au que permitiesen investigar la inducción de efectos no lineales por este mecanismo. Estos dispositivos están formados por una muestra de GaSe con ambas caras metalizadas con una capa de Au de unos  $100 \text{ \AA}$ , lo que permite generar un campo eléctrico uniforme en el GaSe aplicando una diferencia de potencial entre las caras metalizadas.

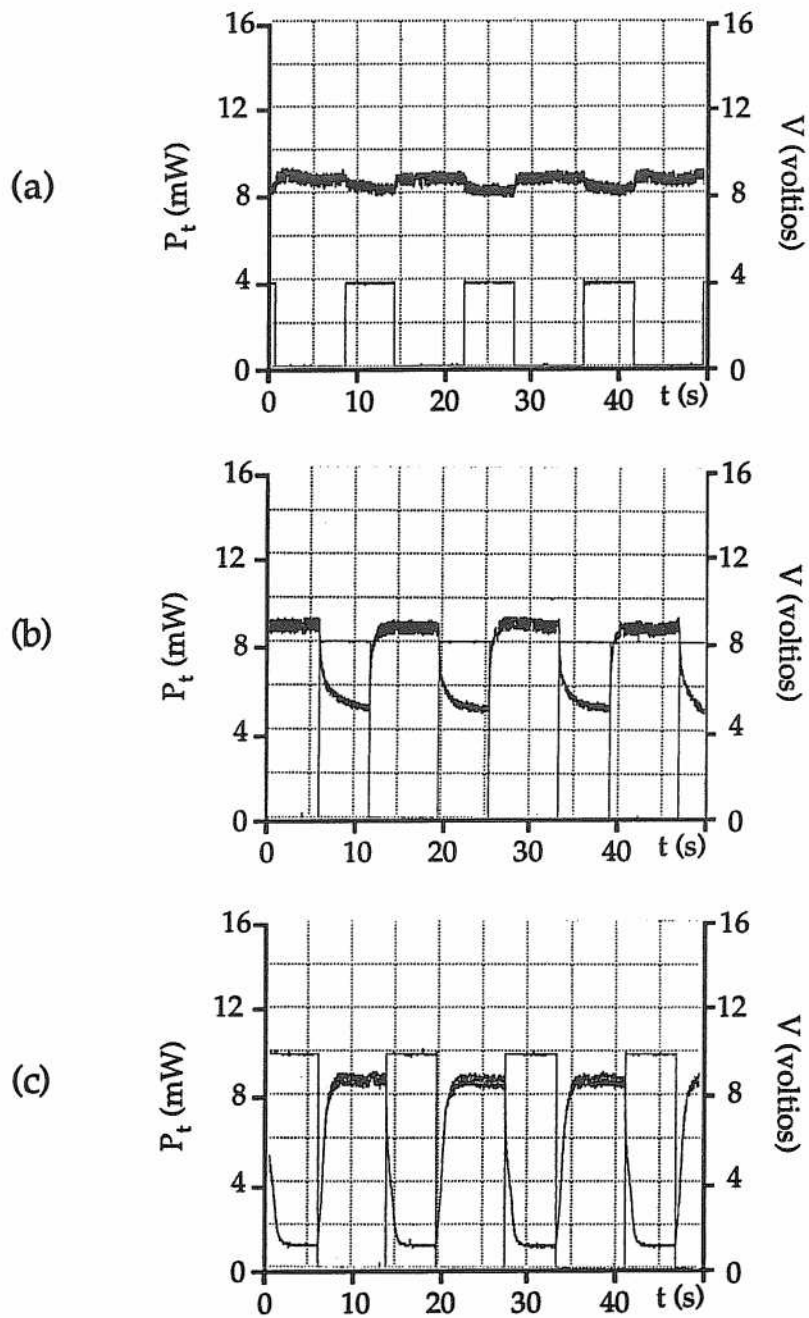


Figura 6. Modulación de la potencia transmitida al aplicar una onda cuadrada de diferencia de potencial  $V$ , para una muestra de  $11 \mu\text{m}$  de grosor metalizada en ambas caras. Amplitud del voltaje: (a)  $4\text{V}$ , (b)  $8\text{V}$  y (c)  $10\text{V}$ .

La figura 6 muestra la modulación que sufre la transmitancia de una muestra de  $11\ \mu\text{m}$  de grosor al aplicar una onda cuadrada de diferencia de potencial  $V$  de diferentes amplitudes, para una potencia de luz incidente de 28 mW.

Dado el origen térmico de las propiedades ópticas no lineales observadas, cualquier modelo teórico requerirá medir con precisión la absorción y el índice de refracción del GaSe en función de la temperatura, para  $\lambda = 633\ \text{nm}$ . Las figuras 7 y 8 son el resultado de dichas medidas, para incidencia perpendicular al plano de exfoliación del material es decir con polarización perpendicular al eje cristalográfico  $c$  del GaSe.

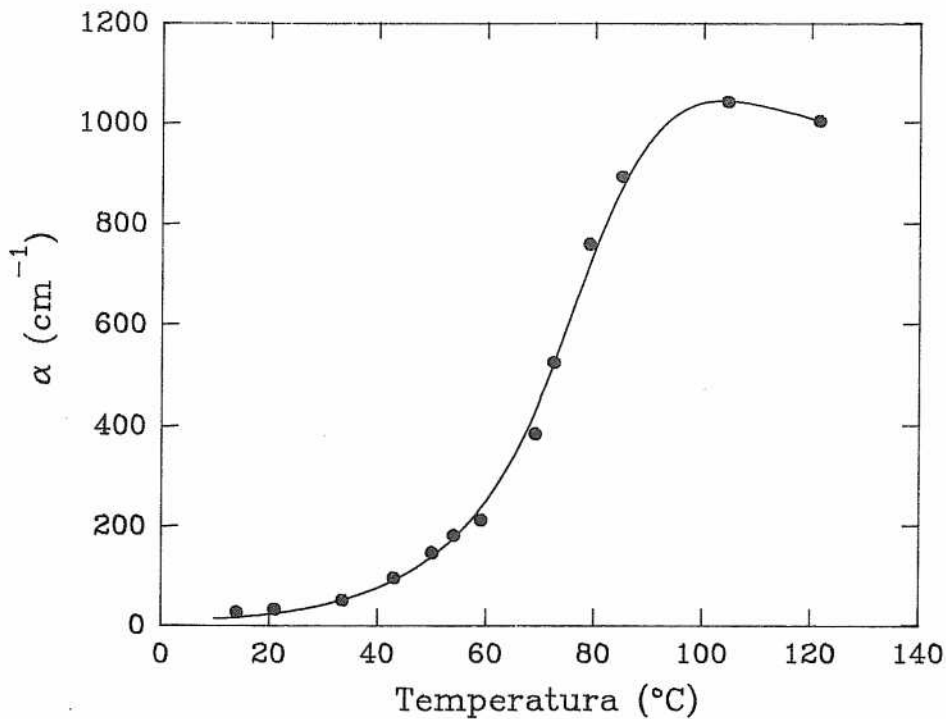


Figura 7. Coeficiente de absorción  $\alpha$  del GaSe en función de la temperatura, para  $\lambda=633\ \text{nm}$ .



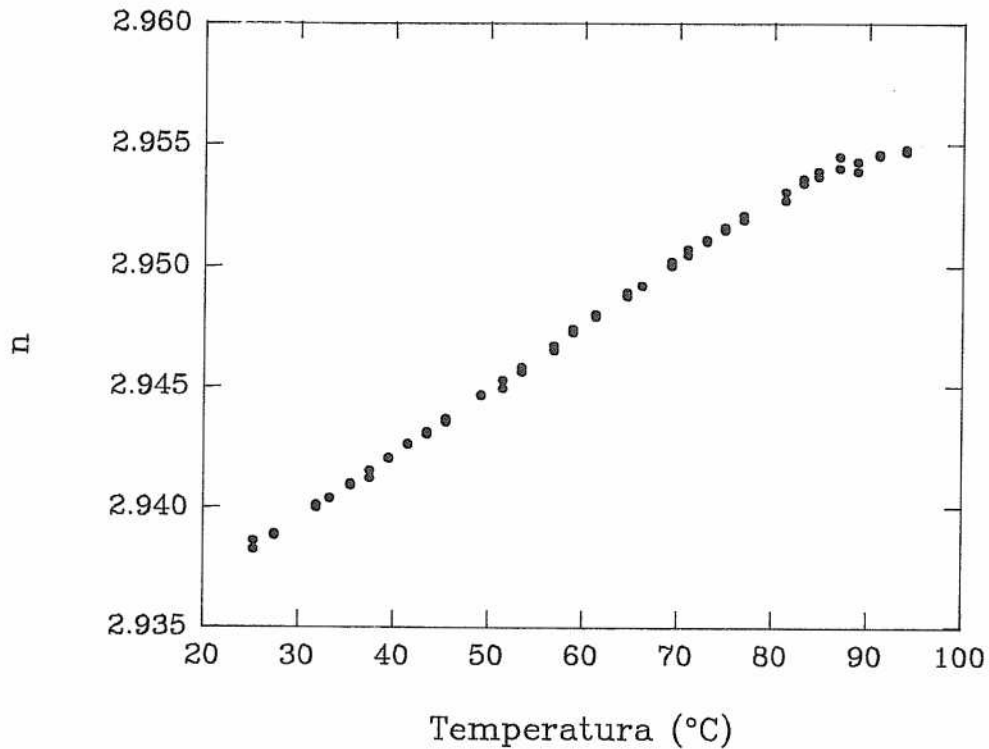


Figura 8. Índice de refracción n del GaSe en función de la temperatura, para  $\lambda=633$  nm.

### 3. DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Los resultados de las experiencias descritas en el apartado anterior pueden interpretarse como consecuencia de fenómenos no lineales inducidos por efectos térmicos. El fenómeno dominante es la dependencia de la absorción del material con la temperatura (figura 7), si bien los efectos dispersivos (figura 8) resultan no ser despreciables si se desea dar una descripción cuantitativa.

En esencia, la respuesta estacionaria de los dispositivos puramente ópticos cuyas características son las de las figuras 2 a 5 pueden describirse mediante el sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned}
 \theta &= \theta_0 + M A(\theta) P_i \\
 P_t &= F_t(\theta) P_i \\
 P_r &= F_r(\theta) P_i
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

donde  $\theta$  es la temperatura del dispositivo en el punto de focalización,  $\theta_0$  es la temperatura ambiente,  $M$  es el coeficiente que determina el calentamiento del dispositivo por unidad de potencia absorbida,  $A(\theta)$  es la absorbancia del dispositivo y  $P_i$  es la potencia incidente. Por otra parte,  $P_t$  y  $P_r$  son las potencias transmitida y reflejada, respectivamente, y  $F_t(\theta)$  y  $F_r(\theta)$  son las funciones del Fabry-Perot definido por el dispositivo que determinan  $P_t$  y  $P_r$  en función de  $P_i$ . Tanto  $A(\theta)$  como  $F_t$  y  $F_r$  dependen de la temperatura a través del coeficiente de absorción y del índice de refracción, y son funciones bien conocidas. El coeficiente  $M$  será mayor cuanto menor sea la disipación del calor en el dispositivo.  $M$  puede calcularse de forma explícita si se hacen algunas hipótesis respecto a la geometría del dispositivo y del haz incidente, así como respecto a los mecanismos de disipación del calor absorbido.

En la figura 9 representamos un cálculo teórico de  $P_t$  en función de  $P_i$  que reproduce el tipo de característica experimental de la figura 2. El cálculo se ha realizado a partir de las ecuaciones 1, tomando  $\theta_0 = 30^\circ\text{C}$ ,  $M = 6^\circ\text{C}/\text{mW}$  y un grosor de  $12.021 \mu\text{m}$ . El ajuste de las milésimas del grosor de la muestra es necesario para determinar el desfase en la cavidad Fabry-Perot incluido en el cálculo. La función  $A(\theta)$  viene definida en este caso por la absorción de luz en el GaSe.

La figura 10 es un cálculo de  $P_r$  en función de  $P_i$  para el dispositivo cuya característica experimental es la de la figura 5. En este caso, se han resuelto las ecuaciones 1 tomando  $\theta_0 = 30^\circ\text{C}$ ,  $M = 4^\circ\text{C}/\text{mW}$  y un grosor de  $17.051 \mu\text{m}$ . Ahora, la función  $A(\theta)$  incluye las contribuciones debidas a la absorción en el GaSe y en el Au. Cabe comentar que en este caso se observa una diferencia del orden de un factor 2 entre los valores de la potencia reflejada calculados y los valores experimentales. Esta diferencia la atribuimos a las imperfecciones de las superficies reflectoras del dispositivo que degradan la reflexión especular que hemos considerado en el cálculo teórico.

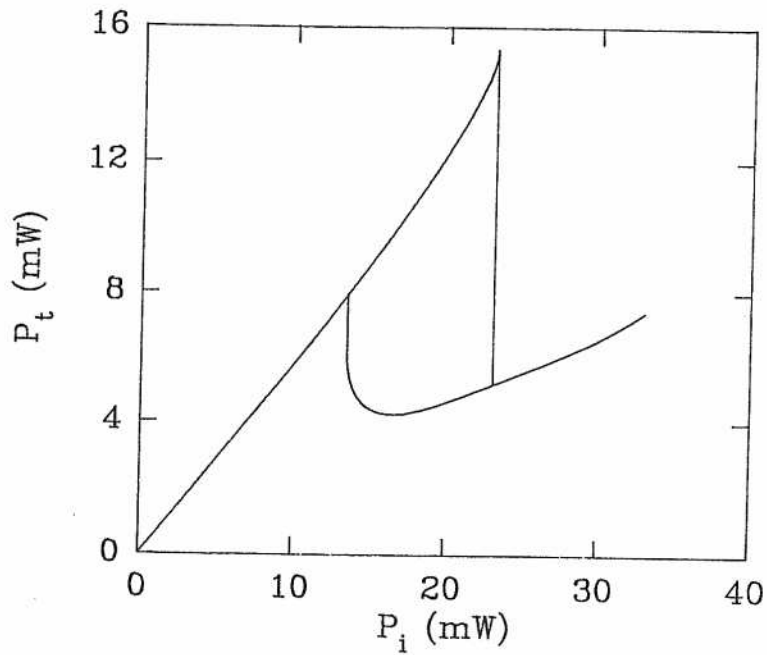


Figura 9. Representación del cálculo teórico de la potencia transmitida en función de la incidente, para un grosor de  $12.021 \mu\text{m}$ ,  $M=6 \text{ }^\circ\text{C/mW}$  y  $\theta_0=30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

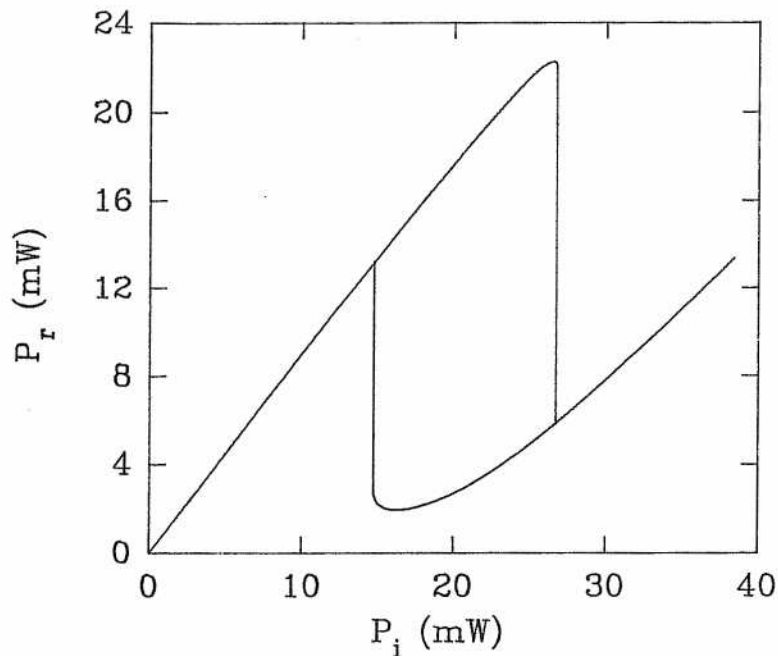


Figura 10. Representación del cálculo teórico de la potencia reflejada en función de la incidente, para una muestra de  $17.051 \mu\text{m}$  de grosor metalizada en su cara posterior, tomando  $M=4 \text{ }^\circ\text{C/mW}$  y  $\theta_0=30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Por último, en el caso de los dispositivos Au/GaSe/Au se combina el efecto térmico de la absorción de luz global del dispositivo con el efecto Joule. Este último está asociado a los cambios de conductividad del GaSe y, por tanto, determinado por la absorción de luz en el mismo. Ello significa que la primera ecuación del sistema 1 debe modificarse y queda de la forma:

$$\theta = \theta_0 + (M A(\theta) + M_J A_{\text{GaSe}}(\theta)) P_i \quad (2)$$

donde  $M_J$  es el coeficiente que determina la contribución por efecto Joule al calentamiento del dispositivo por unidad de potencia absorbida en el GaSe, y  $A_{\text{GaSe}}(\theta)$  es la contribución del GaSe a la absorbancia total del dispositivo  $A(\theta)$ . El mismo tipo de hipótesis que previamente hemos comentado, que permite un cálculo explícito de  $M$ , ahora conduciría a una evaluación teórica de  $M_J$ . En cualquier caso  $M_J$  resulta ser siempre proporcional a  $V^2$ , siendo  $V$  el voltaje aplicado al dispositivo. Esta dependencia no lineal con  $V$  es fácilmente observable en las gráficas a, b y c de la figura 6.

#### 4. CONCLUSION

Los efectos fototérmicos y su combinación con los efectos de fotoconductividad y Joule dan lugar a una serie de propiedades ópticas no lineales en el GaSe, observables a temperatura ambiente para  $\lambda=633$  nm. Estas propiedades permiten el diseño de dispositivos biestables y no lineales puramente ópticos, así como dispositivos de transmitancia controlada por tensión.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación está financiado por la DGICYT, proyectos PB88-0346 y MAT90-0242.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) N.Piccioli, "Constantes Optiques du Seleniure de Gallium: variation avec la temperature et bistabilité optique induite par effect thermique", Tesis Doctoral (Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1987).
  
- (2) A.M.Bakiev, Y.V.Vandyshev y G.S.Volkov, "Screening of excitons in semiconductor GaSe", Sov. Phys. Solid State, Vol. 28, pp. 579-583, (1986).

★ ★ ★