

## Distribución del campo eléctrico en una estructura p-i-n a base de GaAs

A.V. ILINSKII\*, F. CHÁVEZ,

T.A. PRUTSKIY Y F. SILVA-ANDRADE

*Centro de Investigaciones en Dispositivos Semiconductores*

*Universidad Autónoma de Puebla*

*Apartado postal 1651, 72000 Puebla, Pue., México*

Recibido el 21 de septiembre de 1993; aceptado el 24 de marzo de 1994

**RESUMEN.** Para determinar la distribución espacial del campo eléctrico en una estructura p-i-n a base de GaAs, se utilizó un método óptico. El método se basa en el efecto Franz-Keldysh. La estructura p-i-n se polarizó inversamente y se iluminó en la dirección perpendicular al campo. Se evaluaron los tiempos característicos de apantallamiento del campo y se determinaron adicionalmente otros parámetros de la estructura.

**ABSTRACT.** The spacial electric field distribution of an inverse biased GaAs p-i-n diode structure was optically studied. The measurement method is based on the Franz Keldysh effect. The light incides on the diode structure in the perpendicular direction to the electric field. We estimated the screening time of the electric field, and other structure parameters as well.

PACS: 42.70.N; 78.20.J

### 1. INTRODUCCIÓN

La estructura p-i-n se ha estudiado ampliamente desde hace tiempo y los dispositivos basados en esta estructura tienen muchas aplicaciones: diodos p-i-n, tiristores, rectificadores de alto voltaje, entre otros [1]. La estructura p-i-n a base de GaAs tiene un interés especial, tanto por sus propiedades físicas como por las actuales posibilidades tecnológicas de obtener estructuras de alta calidad. Nuestro interés por el GaAs se debe a que presenta una importante propiedad [2,3] consistente en que cuando el GaAs se pone bajo la influencia de un campo eléctrico, cambia sus propiedades ópticas como consecuencia del efecto Franz Keldysh [4], esto es: en la cercanía del borde de absorción fundamental, cambia notablemente el coeficiente de absorción debido a la aparición de transiciones indirectas con energía de los fotones menores que la energía de la banda prohibida. En una estructura p-i-n a base de GaAs no es difícil crear en la región de alta resistencia una elevada intensidad del campo eléctrico. Esto se consigue aplicando un voltaje de polarización inverso relativamente pequeño ( $\sim 100$  V) consiguiéndose, de esta manera, cambios apreciables en el coeficiente de absorción de la región.

---

\*Dirección permanente en el Instituto Físico Técnico IOFFE, San Petesburgo, Rusia 194021 Polytechnicheskaya str. 26, St. Petesburg, Russia. FAX (282) 247-1017, (812) 274-93-94, Telex 121453 FTIANSU, Tel. (812) 247-93-94.

Esta propiedad de la estructura p-i-n a base de GaAs puede aplicarse en equipos prácticos, por ejemplo, moduladores de luz de alta eficiencia y alta velocidad de respuesta para el intervalo infrarrojo [5], intervalo de interés actual para las comunicaciones ópticas. Por otro lado, esta propiedad se utiliza para el estudio de procesos físicos y con base en estos conocimientos se crean nuevos dispositivos, por ejemplo, moduladores de luz en espacio tiempo con alta velocidad de respuesta y nuevos medios para fijar hologramas [6].

El presente trabajo está dedicado al estudio de la distribución de la intensidad del campo eléctrico en las estructuras p-i-n a base de GaAs y a la determinación de algunos parámetros de la estructura como son: la localización de las fronteras de las diferentes regiones y la determinación de sus espesores, la concentración de donadores y aceptores en los alrededores de la capa i. Las mediciones fueron hechas por un método óptico basado en el efecto Franz Keldysh.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Estructura p-i-n

Como objeto de investigación tenemos a la estructura p-i-n elaborada por epitaxia en fase líquida. Se parte de un sustrato tipo p con una concentración de aceptores de  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$ . El proceso se inició creciendo en el sustrato una capa p con concentración baja de aceptores y a medida que el espesor aumentaba se disminuía la concentración de aceptores y, al mismo tiempo, se aumentaba la concentración de donadores. Esto se conseguía favoreciendo la incorporación de impurezas residuales de carbón u oxígeno en el crecimiento; de esta manera, en una capa muy ancha aparece una región compensada que llamaremos i y después una región n como consecuencia del aumento de la concentración de donadores, terminándose con esta región el proceso.

### 2.2. Método electro-óptico

Para el estudio de la distribución del campo en la estructura p-i-n se utilizó un método espectral basado en el efecto Franz Keldysh. La muestra se sondeaba por un haz de luz en dirección paralela a las fronteras de sus distintas regiones. Después se estudió la distribución espacial de la intensidad de la luz que atraviesa a la estructura. La energía del haz de sondeo se seleccionó en el intervalo de transparencia de GaAs, pero cercano al borde de absorción fundamental. En ausencia del campo eléctrico este borde es abrupto; sin embargo, en presencia del campo el borde se desplaza hacia las longitudes de onda grandes y el borde es menos abrupto, haciendo posible, de este modo, la absorción de los fotones con energía menor que la de la banda prohibida, y mientras mayor sea la intensidad del campo eléctrico mayor es este efecto y por lo tanto el material se vuelve menos transparente. Por esta razón, la distribución de la intensidad de la luz de sondeo nos da información de la distribución del campo eléctrico  $E(z, t)$  en distintos puntos ( $z$ ) y para distintos tiempos ( $t$ ).

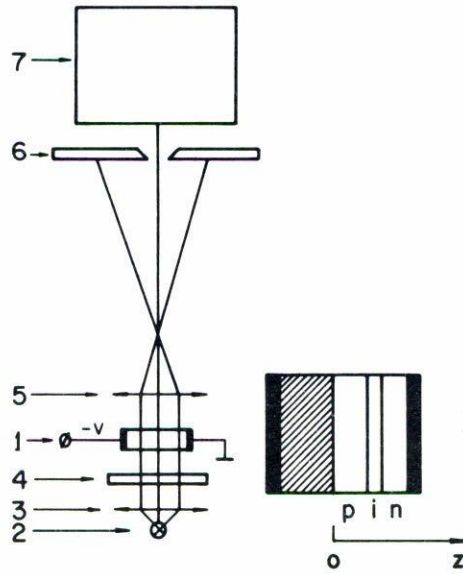


FIGURA 1. Esquema de la instalación experimental. 1. estructura p-i-n; 2. lámpara de filamento; 3. colimador; 4. filtro para  $\lambda > 0.86 \mu\text{m}$ , 5. objetivo del microscopio; 6. Rendija óptica situada en el plano de la imagen real del borde de la estructura; 7. convertidor electro-óptico o fotomultiplicador.

2.3. Instalación experimental

En la Fig. 1 se representa la instalación experimental. La estructura p-i-n se sondeó con luz infrarroja, utilizándose como fuente una lámpara de filamento y un filtro con  $\lambda > 0.86 \mu\text{m}$ . La imagen del borde de la estructura se amplificaba con ayuda de un microscopio. Para convertir la imagen al intervalo visible se utilizó un convertidor electro-óptico de la luz infrarroja. El convertidor utilizado presenta una buena sensibilidad para  $\lambda < 0.95 \mu\text{m}$  y después decae rápidamente. Así, el efecto estudiado se analizó en el intervalo  $0.86 < \lambda < 0.95 \mu\text{m}$ . Para la medición de la distribución espacial de la intensidad de la luz que atravesó a la estructura, parte de la imagen aumentada se separaba con ayuda de una rendija orientada paralelamente a las regiones de la estructura. La luz seleccionada de esta forma se proyectaba al fotocátodo de un fotomultiplicador y la señal de éste se amplificaba y se registraba. Durante el proceso de medición a la estructura se le aplicaba un voltaje inverso  $V = 125 \text{ v}$ .

La cinética del campo se estudió de la manera siguiente: la luz que atravesó a la región i se separa con una rendija óptica y se proyecta al fotocátodo del fotomultiplicador. El ancho de la rendija se seleccionaba igual al espesor de la región i y su posición se determinaba buscando el mínimo de la intensidad de la luz que atravesaba a la estructura. La señal del fotomultiplicador se registró en un osciloscopio. Todas las mediciones fueron hechas a temperatura ambiente.

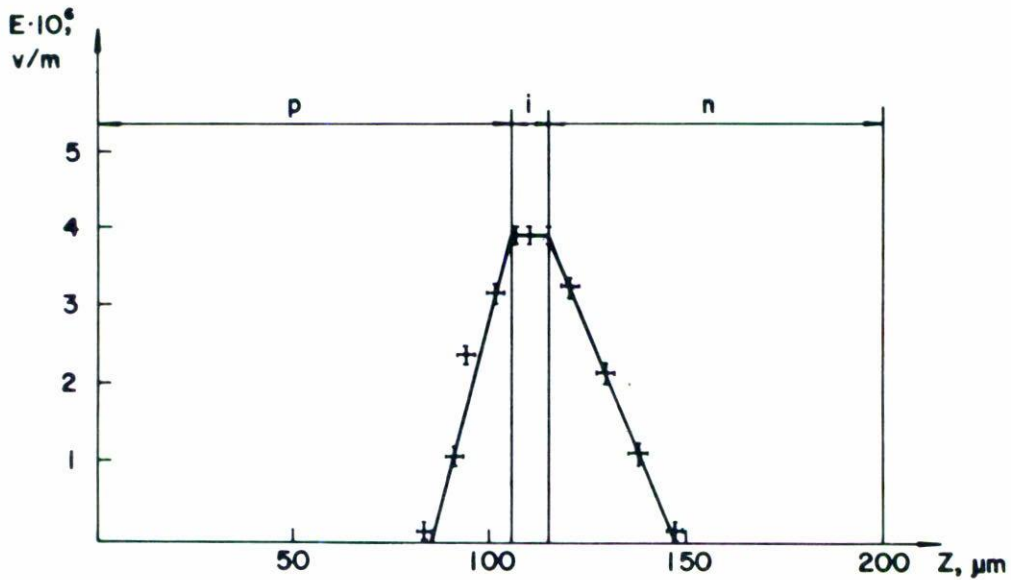


FIGURA 2. Distribución estacionaria de la intensidad del campo eléctrico en la estructura p-i-n cuando se le aplica un voltaje inverso de  $V = 125$  v.

### 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIÓN

Cuando a la estructura p-i-n se sondeaba con un haz de luz y no se le aplicaba voltaje externo, se observaba en la pantalla del convertidor que el subestrato no era transparente para el haz de sondeo infrarrojo. Sin embargo, todas las diferentes regiones sobre el subestrato se observaban como una sola región ancha, transparente y uniforme.

Al aplicar a la estructura un escalón de voltaje de polarización inverso de 125 v, prácticamente de forma instantánea (+4 ms) aparece a una distancia aproximada de 100  $\mu m$  del subestrato una franja oscura y ancha de la luz que atraviesa a la estructura. Cuando el tiempo es del orden de 1 s la franja sufre modificaciones, estrechándose y oscureciéndose en su centro, para  $t > 1$  s esta distribución se estabiliza. Esta distribución estacionaria de la intensidad de la luz se midió con ayuda de un fotomultiplicador cuando la rendija óptica se desplazaba lentamente en la dirección perpendicular a las regiones de la estructura. En la Fig. 2, se representa la distribución de la intensidad del campo eléctrico, en estado estacionario  $E(z)$  en la estructura. Para la obtención de  $E(z)$  es necesario utilizar un gráfico que relacione la intensidad luminosa con la intensidad del campo eléctrico. Este gráfico fue obtenido para distintos voltajes en el intervalo  $140 \geq V \geq 60V$ , considerando que el área bajo la curva  $E(z)$  representa al voltaje externo aplicado a la estructura.

En la Fig. 2 se distinguen distintas regiones de distribución del campo: donde comienza el subestrato el campo es igual a cero y cuando  $z$  aumenta el campo también aumenta, así para  $z = 105 \mu m$  el valor de la intensidad del campo llega a ser  $3.6 \times 10^6$  v/m. En la región  $115 \geq z \geq 105 \mu m$  el campo es uniforme y para  $z > 115 \mu m$  el campo empieza a disminuir. La distribución del campo nos muestra que el voltaje externo aplicado cae en una región estrecha, del orden de 60  $\mu m$  (la estructura crecida mide 200  $\mu m$ ). Es

lógico suponer que prácticamente todo el voltaje aparezca en la región compensada *i*, de alta resistencia, y sólo una pequeña parte en las regiones *p* y *n* que rodean a *i*, las cuales tienen una cierta concentración de aceptores y donadores respectivamente. La distribución experimental del campo  $E(z)$  se puede representar con bastante exactitud por tres líneas rectas (Fig. 2). Las pendientes (y los signos) de cada una de estas rectas, de acuerdo con la ecuación de Poisson, nos da el valor y el signo de la carga volumétrica en la estructura. Así, se determina que en la región *p* a una profundidad de  $20 \mu\text{m}$  a la izquierda del extremo de la capa *i* se sitúa una densidad de carga negativa  $\rho = \epsilon\epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial z} = 21 \text{ coul/m}^3$  ( $N_A = 1.3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ). En la región *i* el campo es uniforme y por tanto  $\rho = 0$  y en la región *n*, a una distancia de  $35 \mu\text{m}$  del extremo derecho de la capa *i* aparece una  $\rho = 14 \text{ coul/m}^3$ . ( $N_D = 0.9 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ ).

La distribución estacionaria del campo eléctrico es posible explicarla de la manera siguiente: en el momento de aplicar un escalón de voltaje de polarización inverso, surge una distribución uniforme del campo. Sin embargo, instantáneamente este campo se apantalla no sólo por los huecos libres del sustrato sino también por los huecos y electrones libres de las regiones *p* y *n* respectivamente. Debido a que en estas regiones por las condiciones de obtención de la estructura las concentraciones de donadores y aceptores libres no son grandes, aparecen partes del voltaje externo a distancias dadas por el largo de Schottky para los huecos y los electrones, respectivamente, es decir,

$$L_p \cong \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 V_p}{eN_A}} \cong 20 \times 10^{-6} \text{ m} \quad (1)$$

$$L_n \cong \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_n V_n}{\epsilon N_D}} \cong 30 \times 10^{-6} \text{ m} \quad (2)$$

Por lo que respecta a la parte central de la estructura, la región compensada *i* no tiene carga volumétrica, con una precisión de  $1 \text{ coulomb/m}^3$ , y en esta región aparece la mayor parte del voltaje externo. El espesor de esta región fue de  $10 \mu\text{m}$ .

La curva de la Fig. 3 muestra el cambio que sufrió la intensidad de la luz al atravesar la región *i*, como función del tiempo, después de aplicar a la estructura un escalón de voltaje de polarización inversa de  $V = 125 \text{ v}$ . Se observó que la cinética de la intensidad de la luz presenta dos estados. El primero, para  $t < 1 \text{ ms}$ , la intensidad alcanza un valor de  $I_0$ . En el segundo se presenta un descenso lento de la intensidad de la luz y para  $t \approx 1 \text{ s}$ , la intensidad llega a su valor estacionario. Estos resultados se explican de la manera siguiente: Cuando a la estructura se la aplica el escalón de voltaje, para tiempos pequeños aparece un campo eléctrico débil  $E = V/w$ , donde  $w$  es el espesor total de la estructura, incluyendo el sustrato. Este campo se apantalla instantáneamente en las regiones de baja resistencia debido al traslado de carga de los portadores libres; en primer lugar del sustrato por arrastre de huecos. Así el campo rápidamente queda concentrado en las regiones de alta resistencia, alcanzando el valor de  $E_0$  en la región *i* (correspondiente al valor  $I_0$ ). Con esto se termina la primera parte de la cinética del campo. Posteriormente, para tiempos de aproximadamente un segundo, el campo se distribuye sólo en la región de alta resistencia, es decir, en la región *i* y en las regiones *n* y *p* que rodean a la *i*. En estado estacionario la

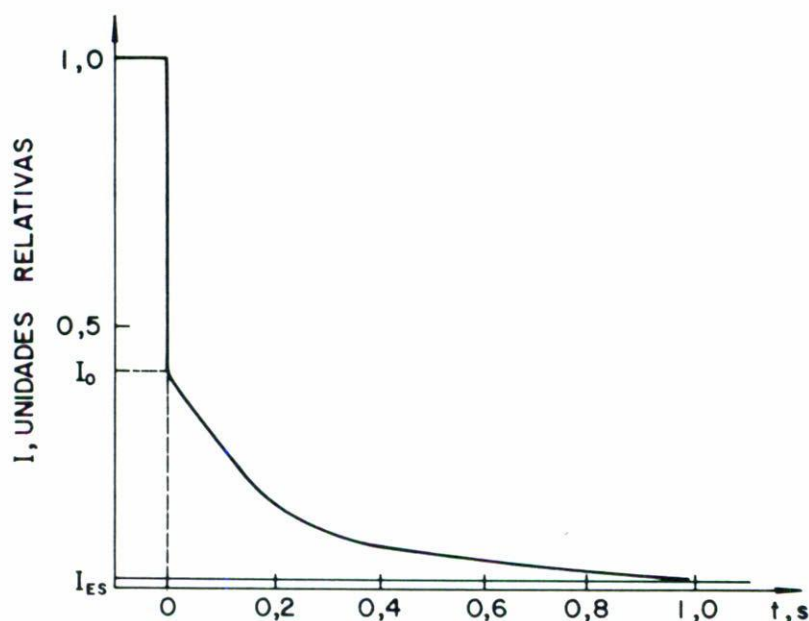


FIGURA 3. Cinética de la intensidad de la luz de sondeo en la región  $i$ , cuando a la estructura  $p-i-n$  se le aplica un escalón de voltaje inverso de  $V = 125$  v.

mayor parte del voltaje aparece en la región con más alta resistencia, región  $i$ , y el resto del campo en las regiones  $n$  y  $p$ , de acuerdo con las Ecs. (1) y (2).

#### 4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se estudió la estructura  $p-i-n$  a base de GaAs obtenida por el método de LPE. El estudio se realizó por medio de una metodología óptica basada en el efecto Franz Keldysh, la cual nos permite obtener información de la distribución espacial de la intensidad del campo eléctrico que aparece cuando a la estructura se le aplica un voltaje de polarización inversa.

Se midió la distribución estacionaria del campo en la estructura y con base en el análisis realizado se determinaron la posición de las fronteras de la región  $i$ , se midieron los largos de Schottky y las concentraciones de donadores y aceptores en las regiones  $n$  y  $p$ , respectivamente. Se observaron dos estados de apantallamiento del campo eléctrico y se les dio una explicación cualitativa.

#### REFERENCIAS

1. S.M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York (1981).
2. V.I. Korolkov, V.N. Krasavin, S.I. Ponomarev and G.I. Tsvilev, *Sov. Phys. Semic.* **19** (1985) 204.
3. A.V. Ilinskii, A.V. Kutsenko and M.N. Stepanova, *Fiz. Tekh. Poluprovodn.* **26** (1992) 707.

4. J.I. Pankove, *Optical Processes in Semiconductors*, Dover Publications Inc., New York, (1971) Inc.
5. J. Wilson and J.F.B. Hawkes, *Optoelectronics*, 2nd ed., Prentice Hall, New York, (1989).
6. M.P. Petrov, S.I. Stepanov and A.V. Khomenko, *Photorefractive crystals in coherent optical systems*, Springer Series in Optical Science, Berlin (1991).