

Transistores Emisores de Luz

Jaime Sotelo Ortíz

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

RESUMEN: El presente artículo describe los eventos más importantes en la investigación en el campo del Transistor Bipolar de Heterounión (HBT) y del transistor láser.

ABSTRACT: This paper describes the more important events in the investigation at the field of Heterounión Bipolar Transistor (HBT) and of the transistor laser.

futuro remoto de ciencia ficción, esto será posible en las próximas décadas.

En la actualidad un equipo de ingenieros de la universidad de Illinois en los Estados Unidos ha creado un prototipo de transistor utilizando capas de indio-fósforo y de indio-galio-arsénico, el que conmuta entre corte y saturación a más de 700 billones de veces por segundo, lo que lo hace el transistor más rápido del mundo.[1]

I. INTRODUCCIÓN

En 1947, con el advenimiento del transistor se posibilitó un nuevo estilo de convivencia, una vida digitalizada a través de sistemas de procesamiento de la información, telefonía celular, fotografía y cámaras digitales, juegos de video, MP3, Internet, tele conferencia, y muchas más aplicaciones.

Por tanto, se cuenta con el transistor hace más de 60 años, con los diodos emisores de luz y diodos láser hace más de 40 años y actualmente se tiene un transistor con capacidad de tomar una señal eléctrica en su entrada y presentar simultáneamente una salida de señal eléctrica y otra luminosa.

Con el desarrollo del transistor emisor de luz se está abriendo una etapa con posibilidades ilimitadas en la opto electrónica. En un futuro las computadoras procesaran señales luminosas en lugar de señales eléctricas; se abrirá una nueva etapa, con capacidades ilimitadas para la computación al disponerse de un ancho de banda que hoy día resulta una utopía.

Para contar con un procesador íntegramente óptico, se deberá tener los equivalentes luminosos de los elementos fundamentales que forman los esquemas de la computación empezando por el transistor. El transistor emisor de luz nos proporciona energía luminosa, lo que posibilitará que las comunicaciones de banda ancha sean más veloces. No se trata de un

La detección de luz en la base de estos transistores incentivó y estimuló el espíritu de la investigación. Es así que se llegó a obtener uno mejor y de mayor potencia: el transistor láser.

Con este transistor se tiene en la salida una señal eléctrica y un rayo láser, la que puede modularse directamente posibilitando el envío de señales de luz a la velocidad de 10 billones de bits por segundo y con ciertas modificaciones adicionales se puede enviar hasta 100 billones de bits por segundo.

II. FUNCIONAMIENTO DEL TRANSISTOR LÁSER

En un cristal semiconductor, los átomos se disponen en bandas de energía muy cercanas unas a otras; éstas determinan los estados de energía de los electrones del cristal, hay dos bandas: la banda de valencia y la banda de conducción. La primera contiene los niveles de energía ocupada por los electrones. Los electrones con suficiente energía alcanzan la banda de conducción y se liberan bajo la influencia de un campo eléctrico, constituyendo de tal modo la corriente eléctrica. [6]

La diferencia de energía entre la parte inferior de la banda de conducción y la parte superior de la banda de valencia es conocida como brecha de banda (vacío de banda), con rangos de energía para longitudes de onda en el infrarrojo.

Los electrones que ocupan la banda de valencia, se encuentran chocando entre sí generando calor, luz ó tensión, y pueden saltar a la banda de conducción, dejando un hueco, que es la ausencia de un electrón en el cristal. Este par electrón-hueco es efímero, tarde o temprano el electrón regresará a la capa de valencia y se recombinará con un hueco. Por la conservación de la energía, la recombinación de un electrón con un hueco viene acompañada de liberación de energía luminosa. [5]

En un LED o un diodo láser ILD cuando un fotón es liberado, su energía es la diferencia de energías entre la banda de conducción y la banda de valencia, llamada energía de brecha de banda. [4]

Además, de energía los electrones tienen una cantidad de movimiento, debido a esto, un electrón de la banda de conducción puede recombinarse con un hueco de la banda de valencia para producir un fotón, sólo si una fuente con suficiente cantidad de movimiento tal como una vibración en el arreglo del cristal es generado contribuyendo a conservar la cantidad de movimiento del proceso. Este efecto es de poca probabilidad de ocurrencia, los fotones generan energía térmica durante su labor y producen poca luz. [3]

Por el contrario, los materiales de semiconductor usados en el transistor láser, arseniuro de galio e indio-galio-fósforo, producen fotones con facilidad. En estos materiales, que ocupan las columnas III-V de la tabla periódica, la máxima energía en la banda valencia y la mínima energía en la banda de conducción tiene lugar para electrones con una misma cantidad de movimiento. Los materiales de las columnas III-V son conocidos también como materiales con brecha de banda directa debido a que un electrón en la banda de conducción al ser excitado desciende con facilidad a la banda de valencia provocando la creación de un fotón (con poca cantidad de movimiento) cuya energía se adapta a la energía de la brecha de banda.[2],[6]

La emisión de un fotón es el corazón de los diodos emisores de luz. El más sencillo de los dispositivos semiconductores, el diodo, consiste de dos terminales y una unión llamada unión pn. La unión pn separa una región rica de electrones en la banda de conducción (material tipo n) de otra rica de huecos en la banda de valencia (material tipo p). Al aplicarse un voltaje negativo al material tipo n se empuja a los electrones a través de la unión hacia el interior de la región poblada de huecos, éstos se recombinan y emiten luz.[2]

Se puede decir que la estructura básica del transistor láser está conformado por dos diodos láser conectados “espalda a espalda” y separados por una capa delgada conectora llamada base.

III. ESTRUCTURA DEL TRANSISTOR LASER

El transistor láser está conformado por capas de materiales que ocupan las columnas III-V de la tabla periódica, básicamente es un transistor con una capa super delgada en la base llamada pozo de quantum. Un voltaje en el emisor inyecta electrones en la base. En el pozo, al interior de la base, el resto de electrones que son muchos se recombinan con los huecos provocando emisión de luz. La luz da saltos al interior del pozo formando una cavidad resonante. Así, cada vez más luz es estimulada hasta constituirse un rayo láser que escapa hacia afuera. [1]

Los electrones que no se recombinan con los huecos en el pozo van al interior del colector acompañados de una ganancia de corriente.

Este dispositivo puede conmutar a billones de veces en un segundo, teniéndose de esta manera dos tipos de señales simultáneas en la salida: señales luminosas y eléctricas. En la figura 1, se observa la estructura de un transistor láser.

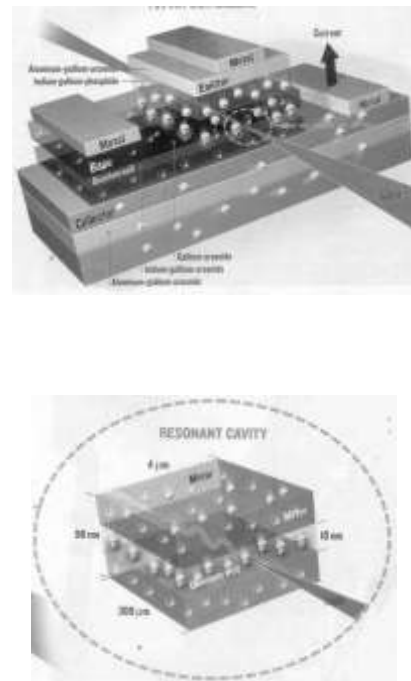


Figura 1. Anatomía del transistor láser.

IV. COMO APARECE LA LUZ

El BJT es un descendiente directo del transistor de germanio que en 1947 obtuvieron Barden y Brattain. En éste la conducción en la unión usa los electrones y los huecos para el flujo de la corriente eléctrica. Los terminales

de contacto del transistor son llamados: emisor, base y colector. Dos uniones PN se encuentran en el interior del BJT; la unión colector-base y la unión base-emisor. Cuando se aplica un voltaje a la unión base-emisor, se inyectan electrones del emisor a la base. La base es una capa bastante delgada de tal manera que la mayor cantidad de electrones puedan pasar directamente al colector antes de recombinarse con los huecos en la base tipo p. La unión colector-base se polariza en inverso para admitir electrones y bloquear a los huecos. La polarización consiste en un voltaje dc aplicado entre dos terminales para controlar un circuito. La polarización a favor o directa tiene lugar cuando el material tipo p es positivo respecto del material tipo n y la unión conduce; en polarización inversa el material tipo p es negativo respecto al material tipo n y la unión no conduce. Debido a que la unión base-colector está inversamente polarizada se constituye en esencia en un diodo inversamente polarizado y la impedancia entre colector y base es muy elevada. Los electrones inyectados por el emisor atraviesan la estrecha región de la base, cruzan la unión base-colector y van directamente al colector verificándose una ganancia de unas 100 veces la corriente de base. Un reducido porcentaje de estos electrones (alrededor del 1 por 100) son capturados por la base. Los huecos de la base van hacia el emisor. En la figura 2, se muestra un transistor de unión npn.

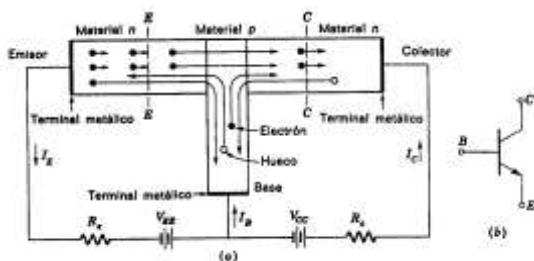


Figura 2. El transistor de unión npn.

Hace varios años se desarrolló un BJT superrápido consistente de dos diodos con dos semiconductores diferentes, fosforo de indio e indio-galio-arsénico y están colocados “espalda a espalda”. Se le ha llamado Transistor Bipolar de Heterounión (HBT), conmuta entre corte y saturación a una velocidad de 710 billones de veces por segundo (710 THz), con un voltaje de ruptura superior a 1.70 voltios. [1]

Este transistor está constituido de materiales con brecha de banda directa que se encuentran en las columnas III-V de la tabla periódica, tolera un alto voltaje de ruptura, con una corriente alta, por lo que se tiene un dispositivo de ultra alta potencia: una densidad de corriente de alrededor de 10,000 amperios por centímetro cuadrado ingresa a la base,

mientras que el colector lleva a la salida una densidad de corriente de 1 millón de amperios por centímetro cuadrado. Se observó que el HBT generaba luz en lugar de calor renovándose las energías perdidas por la recombinación sin generar calor excesivo. Esto estimuló las investigaciones.

En el 2003, se observó que la luz infrarroja salía en todas direcciones. El HBT se constituyó en una fuente dual generadora de señal eléctrica y señal óptica excitada con corriente de base. Se le llamó dispositivo de tres puertas: el emisor a tierra con una entrada en la base, el colector con polarización inversa y con señal eléctrica amplificada a la salida, y a la salida de la misma base aparece una señal óptica al recombinarse los electrones con los huecos.

La luz se constituyó en el objetivo principal para el desarrollo de un dispositivo. En lugar del fosforo de indio e indio-galio-arsénico, se usaron indio-galio-fósforo y galio-arsénico ya que el trabajo con estos materiales se hacía más ventajoso en cuanto a facilidad, costo y rapidez. Para crear un rayo láser que module señales portadoras, se tuvo que modificar la estructura del transistor para favorecer la emisión de luz e intensificar interiormente un rayo láser. [4]

El funcionamiento de un diodo láser se basa esencialmente en los mismos principios de un diodo emisor de luz (LED) con ciertas características adicionales. Los extremos opuestos de la región de recombinación deben hacerse reflexivos con tal de crearse una cavidad resonante que ayude a la estimulación de la recombinación y a la emisión de fotones, los que en última instancia forman el rayo láser. La zona activa alrededor de la unión donde los electrones se recombinan con los huecos es pequeña para concentrar y mejorar la recombinación. Para esto, en 1997 se introdujo por primera vez el área de un pozo de quantum dentro de un diodo láser. Los pozos de quantum son regiones planas casi de dos dimensiones.

Los electrones y huecos se confinan mecánicamente en una de estas capas delgadas: sus niveles de energía toman valores discretos (valores cuantizados). En estos niveles los electrones y los huecos tienen mayor probabilidad de combinarse y emitir fotones en un espectro angosto. Debido a que nuestro HBT tiene ganancia remanente, parte de la ganancia se intercambiaba para generar más cantidad de energía luminosa durante la recombinación en la región de la base debido a los electrones capturados en el pozo de quantum. En este dispositivo el pozo de quantum es una capa de indio-galio-arsénico no mayor de 10 nanómetros de espesor. En el interior de la región de base del HBT, el pozo de quantum se comporta como el centro de la

recombinación gobernando el flujo de carga del emisor al colector. Este desvía algunos electrones hacia la base, disminuyendo la ganancia alrededor del 90 por 100, pero incrementando la recombinación de electrones y huecos en la base. [1]

Por este proceso de recombinación, se verifica una fuerte señal luminosa saliendo de la base y, una señal eléctrica saliendo del colector. Para que la luz se convierta en un rayo láser, se debe modificar los perfiles del transistor. Similar a lo que se acostumbra en un trabajo de joyería, se corta el cristal en rebanadas haciendo que los extremos opuestos se constituyan en regiones reflexivas de recombinación creándose de esta manera una cavidad resonante. Los fotones dan saltos entre los extremos reflexivos, estimulando la emisión adicional de fotones, los que se hayan en fase con los otros generados en la región.

Cuando el transistor emite luz opera como un diodo láser con una longitud de onda en el infrarrojo de 1006 nanómetros, la dispersión espontánea de la señal cambia a una señal intensa con la directividad de un rayo láser coherente e intermitente entre encendido y apagado a una velocidad de 10 billones de veces por segundo o lo que es igual a una frecuencia de 10 GHz.

El instante en que comienza el comportamiento de láser ha sido llamado umbral de láser y depende de varios factores como la corriente y la temperatura del ambiente. El más reciente experimento, se han operado con transistores emisores de luz entre 20 a 28°C (temperatura de salón) descubriéndose que en el umbral de láser se registraron corrientes de 36 a 44 miliamperios, respectivamente.

Ya que es posible intensidad luminosa con diferentes longitudes de onda, recientemente se ha obtenido luz visible con un prototipo de transistor hecho con materiales de semiconductor de las mismas columnas, III-V de la tabla periódica usando LEDs amarillo y rojo de la misma clase a los encontrados en el mercado, esto es de aluminio-indio-galio-fósforo.

Para cuando los transistores láser ingresen al mercado dentro de unos años, los fabricantes en lugar de particionar los cristales para crear una cavidad resonante, optaron por las llamadas técnicas de plasma-esquina, una tecnología más avanzada en actual desarrollo y mediante la cual se tendrán espejos multifacéticos llamados reflectores internos y externos de Bragg los que posibilitarán el reforzamiento del efecto láser al interior del dispositivo.

En la actualidad, se perciben muchas posibilidades de desarrollo de este producto que mantiene ocupados a

los investigadores. La Agencia de Proyectos de Investigación para la Defensa de los Estados Unidos ha consolidado en la Universidad de Illinois la investigación del transistor láser, el que agrupa un equipo principalmente constituido por la Universidad de Columbia, el Instituto Tecnológico de Georgia y la Universidad de Harvard. Se tiene la seguridad que la investigación de los transistores emisores de luz se está dando en otros grupos de investigación en el mundo.

V. CONCLUSIONES

Con el desarrollo del transistor láser las computadoras contarán con mayor capacidad a las que actualmente se comercializan en el mercado. Este dispositivo operando en el infrarrojo del espectro electromagnético fácilmente conmuta a decenas de giga hertzios. Las computadoras reducirán considerablemente sus dimensiones una vez que se masifique la producción del transistor láser como parte de un circuito integrado (CI). Se espera según los fabricantes integrar en una oblea alrededor de 100 de estos dispositivos.

En el campo de las comunicaciones digitales por fibra óptica será notorio el avance traducido en la explotación de mayores velocidades de transmisión binaria y, por supuesto obedeciendo un nuevo marco por parte del creador del estándar ECSA (Exchange Carriers Standard Association) con relación a compatibilidades síncronas que se deberá establecer entre los equipos de transmisión óptica normado en la actualidad por el estándar SONET (Synchronous Optical Network).

REFERENCIAS

- [1] *Magazine IEEE SPECTRUM*; The Transistor Laser, Vol. 43, N° 2, FEB 2006.
- [2] N. HOLONYAK Jr.; *IEEE Journal of Select in Quantum Electronics*, From Transistors to Light Emitters, Vol. 6, N°6, NOV 2000.
- [3] E. Mc CUMBRE; *Theory of Phonon-Terminated Optical Masers*, Phys. Rev. 134, A299-A307, 1964.
- [4] J.T. VERDEYEN; "Laser Electronics", Prentice-Hall, Tercera Edic.
- [5] H.B. KILLEN; *Fiber Optic Communication*, Prentice-Hall, 1991.
- [6] D. SCHILLING, CH. BELOVE; *Circuitos Electrónicos Discretos e Integrados*, Mc Graw-Hill, 1993.
- [7] R. HOSS; *Fiber Optic Communications*, Practice-Hall, 1990