

Circuitos y Sistemas VLSI Ultra-rápidos

Juan Manuel Saa A.

RESUMEN: El avance tecnológico del cual hemos sido testigos en esta generación en las diversas áreas de la electrónica, han obligado a que los circuitos y sistemas electrónicos tengan cada vez mejores desempeños, mayores rendimientos y velocidades. Hoy no es nada descabellado pensar en tener la capacidad de procesamiento de un CRAY 1 en nuestros bolsillos, dados los agigantados pasos que ha demostrado tener el desarrollo de tecnologías para la fabricación de circuitos integrados. En el siguiente artículo se discuten algunas características de operación y funcionamiento de una tecnología que ya demuestra su liderazgo en la fabricación de dispositivos de muy alta velocidad: la tecnología VLSI de arseniuro de galio. Sus propiedades eléctricas y ópticas le han abierto un amplio camino en el vasto mundo de las comunicaciones, mereciendo que se le invierta mucho dinero en investigación y desarrollo para el mejoramiento de su estructura cristalina durante el crecimiento. Ya son diversas las fundidoras que ofrecen comercialmente esta tecnología, pero aún continúan los esfuerzos hacia el perfeccionamiento de los procesos de fabricación. La pregunta que hoy afrontamos es, *Qué sigue ahora? Qué otras combinaciones entre átomos están esperando en el laboratorio para ser estudiadas y cuál de ellas establecerá un precedente en la historia tecnológica del planeta?*

1. SISTEMAS ULTRA-RAPIDOS

Es indudable que la fabricación de dispositivos semiconductores a base de Silicio mantiene hoy en día un índice bastante importante, aunque el surgimiento de nuevas exigencias en la velocidad de sistemas ha obligado al nacimiento y a la investigación de nuevas tecnologías que permitan el desarrollo de aplicaciones operando a muy altas velocidades. La alternativa que hoy se perfila para esto es el arseniuro de galio (GaAs).

1.1. Porqué otra tecnología ?

La velocidad y el pequeño dimensionamiento de un dispositivo son parámetros estrechamente relacionados. Se ha podido prever que el límite de escalización en la longitud L del canal de un transistor MOS está cerca de los $0,14 \mu\text{m}$; una integración mayor resultaría en geometrías de transistor completamente inmanejables.

En dispositivos CMOS, los transistores tipo p presentan un desempeño más lento que los dispositivos n . La razón de esto reside en la movilidad inherente de los huecos comparada con la movilidad de los electrones. Típicamente,

$$(1) \mu_p = 240 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{sec}$$

$$(2) \mu_n = 650 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{sec}$$

En dispositivos de canal largo esto significa una diferencia en los tiempos de transición del manejo de corriente de 2.5:1 aproximadamente. Sin embargo, a medida que se reduce la longitud del canal, la influencia de la movilidad de los portadores es menos predominante a medida que la velocidad de saturación empieza a ser notoria. La

relación corriente-voltaje para un MOS de canal largo operando por debajo de región resistiva o saturación puede aproximarse a

$$(3) I_{ds} = \frac{W \mu C_{ox}}{L} \left[(V_{gs} - V_t) V_{ds} - 0.5 V_{ds}^2 \right]$$

donde C_{ox} es capacitancia por unidad de área entre compuerta y canal. Lo anterior quiere decir que el manejo de corriente es proporcional a la movilidad de los portadores e inversamente proporcional a la longitud del canal. Cuando la velocidad de saturación ocurre a lo largo de todo el canal, la relación de corriente-voltaje queda determinada por

$$(4) I_{dsat} = W C_{ox} v_{sat} (V_{gs} - V_t)$$

donde v_{sat} es la velocidad de saturación. La corriente en estas circunstancias es ahora independiente tanto de la movilidad como de la longitud del canal, pero dependiente de la velocidad de saturación. La transconductancia del transistor es constante y por lo tanto independiente del largo del canal.

Es importante resaltar que la velocidad de saturación ocurre con menores intensidades de campo eléctrico en dispositivos n que en dispositivos p, por sus diferencias en la movilidad de sus portadores. Por lo tanto, a medida que las dimensiones se hacen más pequeñas, el manejo de corriente de un transistor n tiende a un valor constante independiente de la longitud de su canal, mientras que el manejo de corriente de un transistor p no tiende a un valor constante, hasta que, a una longitud de canal más corta, los huecos alcanzan la velocidad de saturación. Se debe mirar por lo tanto otra tecnología distinta a MOS-Silicio para producir dispositivos más rápidos que logren responder a las exigencias de sistemas más sofisticados y especializados.

1.2. Tecnología VLSI de Arseniuro de Galio

La tecnología MOS-Silicio ha sido y seguirá siendo en el inmediato futuro, el medio principal para el desarrollo de computadoras y sistemas electrónicos básicos de diversa aplicación. Se han ido manifestando a pesar de todo limitaciones de velocidad en la lógica de silicio que empiezan a entorpecer la culminación de sistemas digitales de gran velocidad. Efectuando desarrollos paralelos de sistemas en ambas tecnologías, se han observado resultados bien interesantes con la tecnología de arseniuro de galio. El arseniuro de galio no desplazará al silicio, pero sí se está utilizando en conjunto con el silicio para satisfacer la necesidad de una tecnología integrada de muy alta velocidad (VHSI) en sistemas de nueva sofisticación.

El compuesto arseniuro de galio se descubrió en 1926, aunque los descubrimientos de su capacidad como semiconductor de alta velocidad se dieron en los años 60. Durante esta época se descubrió que el arseniuro de galio posee mayor velocidad de movilidad electrónica con respecto al silicio y un factor de mejoramiento en la velocidad de saturación de portadores de 1.4. La condición de un substrato semi-aislado en el compuesto disminuye los efectos parásitos que suelen aumentar los tiempos de conmutación. Sus propiedades opto-electrónicas y su significativa mejora en disipación de potencia y firmeza de radiación, han igualmente contribuido a

marcar una diferencia relevante en la concepción misma de los sistemas, desde el punto de vista de desempeño y múltiples aplicaciones.

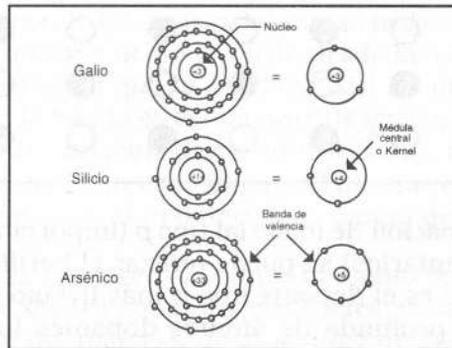
Posteriormente en los años 70, los desarrollos de tecnología en la fabricación de circuitos integrados permitió la fabricación de los primeros circuitos SSI con arseniuro de galio. Como resultado de los avances logrados en los procesos de implantación iónica en los 80, la tecnología VLSI en GaAs es una realidad comercial a partir de los años 90.

2. CARACTERISTICAS DE LA TECNOLOGIA

2.1. Estructura Cristalina

El galio (Ga-grupo III) es un material tóxico que se obtiene a partir del proceso de producción del zinc y el aluminio. De la misma manera, el Arsénico (As-grupo V), que es también muy tóxico, se obtiene de minerales como el As_2S_3 ó As_2S_4 . El proceso está primeramente liderado por oxidación de los minerales para formar As_2O_3 y seguidamente, por medio de reducción con carbono, se produce el arsénico. En la Figura 1 se puede visualizar la estructura atómica del galio y el arsénico, comparada con la de un átomo de silicio. El galio posee 3 electrones de valencia en su banda de valencia, el silicio 4 y el arsénico 5. Cuando entre átomos se comparten los electrones de valencia, se forman los enlaces químicos que estructuran el cristal semiconductor.

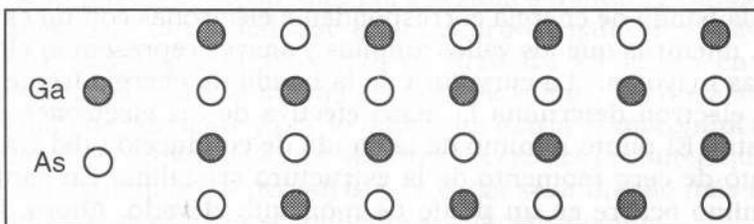
Figura 1. Modelo atómico de Bohr para los átomos de galio, silicio y arsénico.



2.2. Compuesto Semiconductor

En la Figura 2 se ilustra cuál sería la distribución atómica de un sustrato de arseniuro de galio, al permitir que el galio y el arsénico compartan sus electrones más fuertes -o de valencia-, para formar así el compuesto GaAs a base de semiconductores del III y V grupo de la tabla periódica.

Figura 2. Distribución atómica en un sustrato de arseniuro de galio.

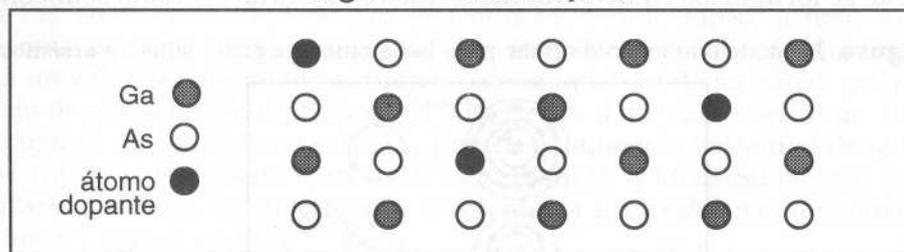


El posicionamiento alternado de los átomos de galio y arsénico forma ubicaciones cristalográficas exactas. Debido a que este compuesto es un semiconductor binario, debe tenerse especial cuidado durante el procesamiento para evitar que las altas temperaturas produzcan disociaciones de la superficie, siendo esta una de las dificultades predominantes durante el crecimiento de material de sustrato de GaAs.

2.3. Proceso de Dopaje

Igual que con una estructura cristalina de Silicio, es necesario introducir impurezas al material semiaislante GaAs para facilitar la creación de dispositivos de conmutación. La selección del tipo de impureza y su densidad de concentración afectan en forma directa el desempeño y las características del elemento de conmutación. Elementos del grupo IV como el silicio (4 electrones de valencia) pueden usarse como donantes (región del galio) o aceptores (región del arsénico). Debido a que el arsénico -grupo V- es más pequeño que el silicio y el galio -grupo III- (el radio covalente para el Ga es 1.26 y 1.18 para el As), las impurezas del grupo IV tienden a ocupar la región del galio. Por lo tanto, el silicio se utiliza como dopante para formar material tipo n , según se ilustra en la Figura 3.

Figura 3. Material tipo n .



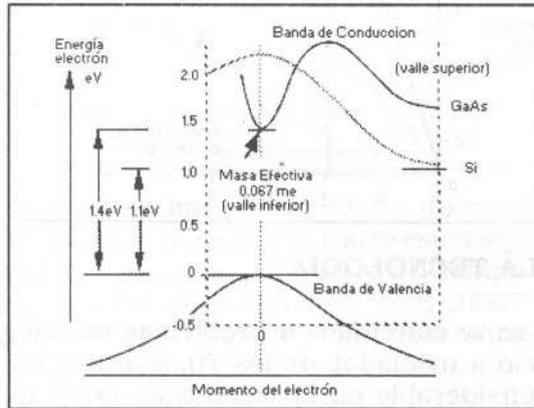
Por otro lado, para la formación de material tipo p (importante para la construcción de transistores complementarios) se puede utilizar el berilio o el magnesio (grupo II). Debido a que el berilio es el dopante tipo p más liviano para el GaAs, se puede lograr una implantación profunda de átomos dopantes logrando un daño en la estructura relativamente menor. El magnesio de todas maneras se está abriendo camino como un dopante apropiado en diversos procesos.

2.4. Estructura de las Bandas de Energía

Una de las características más importantes que se le atribuyen al arseniuro de galio es la superior movilidad de sus electrones, como resultado de la estructura de su banda de energía mostrada en la Figura 4. Los valles angostos y estrechos en la estructura de la banda de energía corresponden a electrones con un estado bajo de masa efectiva, mientras que los valles amplios y suaves representan electrones con masas efectivas mayores. La curvatura de la banda de energía frente al perfil del momento del electrón determina la masa efectiva de los electrones que viajan a través del cristal. El punto mínimo de la banda de conducción del GaAs está muy cerca del punto de cero momento de la estructura cristalina. En cambio, para el silicio, su mínimo ocurre en un punto de momento elevado. Ahora, la movilidad

depende de la concentración de impurezas n , la temperatura T y se relaciona en forma inversa con la masa de un electrón libre en reposo m_e . Para el GaAs, la masa efectiva de estos electrones es 0.067 veces la masa de un electrón libre m_e . Los electrones en los valles superiores tienen una masa mayor y por lo tanto poseen una movilidad bastante baja, que es muy similar a la de los electrones de silicio en la banda de conducción.

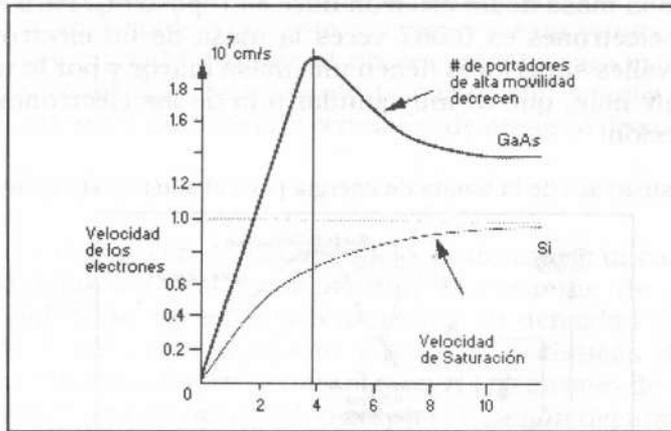
Figura 4. Estructura de la banda de energía para el silicio y el arseniuro de galio.



Adicionalmente, el arseniuro de galio es un semiconductor de *brecha directa*; la separación mínima de energía entre la banda de conducción y la banda de valencia ocurre en ese mismo momento. En otras palabras, se necesita un cambio de momento muy pequeño para la transición de un electrón desde la banda de conducción hacia la banda de valencia. Debido a que la probabilidad de una emisión de fotones es alta cuando la energía de la banda es cercanamente igual a la de la banda prohibida, el GaAs se constituye en un excelente diodo emisor de luz. El silicio por otra parte es un semiconductor de brecha indirecta dado que el mínimo en la banda de conducción está separado en momento con el máximo de la banda de valencia.

Esta estructura de bandas da origen al comportamiento velocidad-campo mostrado en la Figura 5, donde se ilustra cómo los electrones ganan energía al aplicarse un campo eléctrico a través del material de arseniuro de galio. Al mismo tiempo sin embargo, ocurren colisiones con el enrejado cristalino que hacen perder pequeñas cantidades de energía. Mientras el balance de esta situación sea positivo, la energía y la velocidad de arrastre de los electrones aumentan con el aumento del campo aplicado. Cuando la energía ganada es igual a la energía perdida a causa de las colisiones, la velocidad de arrastre se aproxima a su valor límite denominado velocidad de saturación v_e .

De la Figura 5 se puede observar que para regiones donde el campo es bajo, el silicio posee más baja movilidad que el arseniuro de galio. Esta situación crece monótonamente hasta que la velocidad de arrastre se satura en 1×10^7 cm/s aproximadamente. Así, para la misma entrada de voltaje, un dispositivo de GaAs tiene mayor salida de corriente y por lo tanto una mayor transconductancia, que el correspondiente dispositivo de silicio. Mayores corrientes permiten que las cargas y descargas de las capacitancias parásitas y de carga sean mucho más rápidas y por tanto la velocidad de operación se aumenta significativamente.

Figura 5. Comportamiento velocidad-campo para el silicio y el arseniuro de galio.

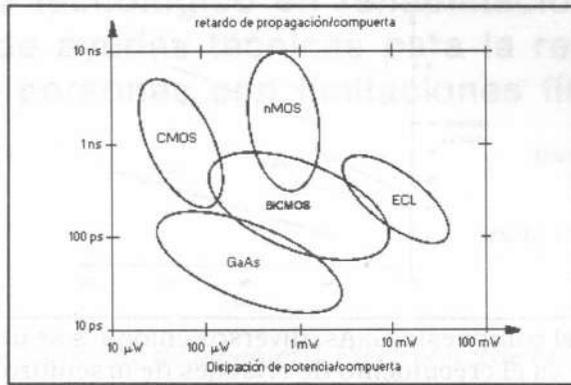
3. DESARROLLO DE LA TECNOLOGIA

Aunque esta tecnología se ve enfrentada a problemas tecnológicos similares a los que experimentó el silicio a mediados de los 70, durante los últimos años se ha logrado un progreso considerable en la tecnología, tanto que existen ya varias fundidoras que proveen fabricación con GaAs de circuitos bastante especializados. Sus ofrecimientos típicos incluyen geometrías de compuerta por debajo de una micra, hasta 4 capas de metal, dispositivos de encendido-apagado, obleas de 4 pulgadas de diámetro, compatibilidad para relojes entre 1 a 2 Ghz. Las características más sobresalientes incluyen movilidad electrónica de seis a siete veces mayor que el silicio, mayores intervalos de temperatura de operación (-200 hasta +200° C), eficiente integración electrónica y óptica, hasta un 70% de reducción en la disipación de potencia comparada con la tecnología de silicio más rápida, la ECL. En la Tabla 1 se detallan las diferencias fundamentales entre el Si y el GaAs.

Tabla No. 1 Diferencias principales entre el Silicio y el Arseniuro de Galio.

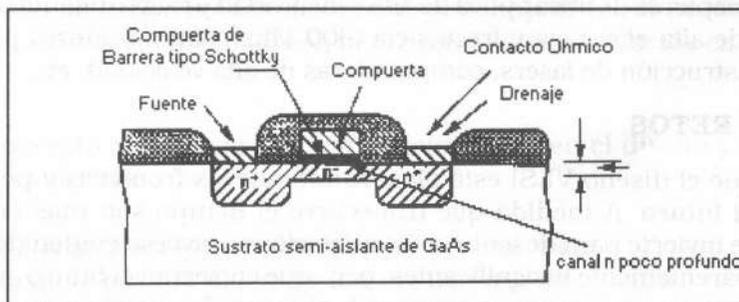
Propiedades	Silicio	Arseniuro de Galio	Unidades
Movilidad Int. e	1300	8000	$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{seg}$
Movilidad Int. p	500	400	$\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{seg}$
Resistividad Int.	2.2×10^5	1×10^8	ohm.cm
Constante Dieléctrica	11.9	13.1	
Densidad	2.33	5.32	gm/cm^3
Gap de energía	1.12	1.43	eV
Conductividad Térmica	1.5	0.46	W/cmK
Masa efectiva e	$0.97m_e$	$0.067m_e$	
Coefficiente exp. térmica	2.6×10^{-6}	5.9×10^{-6}	/C
Presión de vapor (900C)	7.5×10^{-19}	7.5×10^{-3}	mmHg
Campo de ruptura	3×10^5	4×10^5	V/cm
Altura barrera Schottky B	0.4-0.6	0.7-0.8	V

En la Figura 6 se muestran los avances logrados en cuanto a la proyección velocidad-potencia del GaAs frente a otras tecnologías de silicio bastante utilizadas comercialmente.

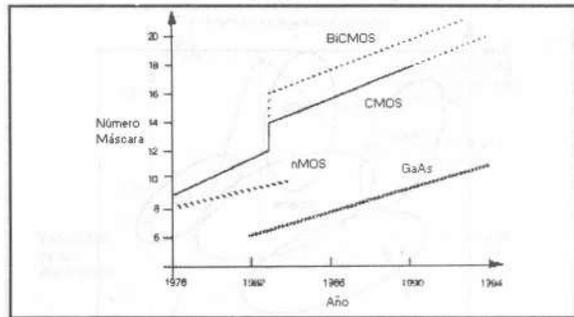
Figura 6. Proyección del desempeño Velocidad-Consumo por compuerta.

Durante los últimos años se han desarrollado diversos dispositivos de GaAs, reconocidos como de *primera generación*. Entre estos se encuentran el D-MESFET (Transistor Semiconductor Metálico por Efecto de Campo tipo Disminución), el E-MESFET (MESFET tipo Ensanchamiento), el E-JFET (FET de Juntura tipo Ensanchamiento), y el CE-JFET (JFET Complementario tipo Ensanchamiento). Estos dispositivos han presentado tiempos de retardo durante el encendido de 70 a 80 ps para una disipación de potencia de 1.5 mW a 150 W. Existen dispositivos más especializados de *segunda generación* como el HEMT (Transistor de Alta Movilidad Electrónica) y el HBT (Transistor Bipolar de Heterojuntura). La movilidad electrónica de los dispositivos de segunda generación es hasta cinco veces mayor que en la primera generación.

Los MESFETs han alcanzado una etapa de desarrollo que les permite ser incorporados en sistemas VLSI de muy alta velocidad. En la Figura 7 se aprecia el diagrama de un MESFET básico.

Figura 7. Vista de lado para un MESFET básico.

Su estructura es muy sencilla. Consiste de un fina capa activa tipo *n* uniendo dos contactos óhmicos con una delgada compuerta de barrera de metal tipo Schottky que separa el drenaje y la fuente, mayormente dopados. La diferencia con un MOSFET de silicio es el diodo Schottky del MESFET en la región de compuerta que separa dos delgadas regiones activas tipo *n*. El proceso de fabricación es relativamente sencillo, donde no se requieren más de seis a ocho máscaras. En la Figura 8 se ilustra la evolución de la complejidad del proceso en términos del número de máscaras en función del tiempo, para tecnologías de silicio y arseniuro de galio.

Figura 8. Evolución de complejidad del proceso para Si y GaAs.

Para la fabricación del compuesto GaAs, diversos enfoques se utilizan hoy en día. El método más popular es el crecimiento de cristales de arseniuro de galio a partir de líquido encapsulado de Czochralski (LEC) a muy alta presión, a partir de crisoles de nitrato de boro pirolítico (PBN) puros. Algunas compañías ofrecen procesos propios como por ejemplo el proceso horizontal Bridgman, proceso vertical Bridgman, proceso de congelamiento por gradiente horizontal, entre otros. Algunas universidades como la universidad de Glasgow en Escocia, han logrado el crecimiento del más puro GaAs jamás realizado, por medio de dos máquinas de Rayo Molecular Epitaxial (MBE) construidas por Intevac. Este grupo en particular ha logrado fabricar durante los últimos 12 meses el interruptor óptico más rápido del mundo. La NASA igualmente hace esfuerzos junto con el laboratorio de materiales de la Fuerza aérea y laboratorios GTE para investigar el comportamiento del crecimiento del GaAs en condiciones de microgravedad, en la órbita espacial.

4. APLICACIONES

Diversas compañías a nivel mundial desarrollan productos a base de GaAs que permiten alcanzar excelentes rendimientos en diversos campos de la electrónica. Se encuentran productos para comunicaciones inalámbricas en el intervalo de los 900 Mhz hasta los 2000 Mhz (teléfonos y bases celulares, radio), aplicaciones multimedia, televisión de alta definición, receptores de fibra óptica de alta sensibilidad y rango dinámico, amplificadores de potencia de alta eficiencia y frecuencia (900 Mhz), sintonizadores para aplicaciones digitales, construcción de lasers, computadoras de alta velocidad, etc.

5. NUEVOS RETOS

Parece ser que el diseño VLSI está alcanzando nuevas fronteras y perfilando nuevos retos para el futuro. A medida que transcurre el tiempo son más las personas y el dinero que se invierte para descubrir ese misterioso universo contenido en minúsculas partículas aparentemente insignificantes, pero que encierran el futuro aún desconocido, aquello que está por conocerse y que revolucionará el mundo en sus próximos años. El entusiasmo ha contagiado a los diseñadores e investigadores y esto les garantiza logros significativos que marcarán la historia tecnológica del planeta.

REFERENCIAS

- [1] Chang S., "Fundamentals Handbook of Electrical and Computer Engineering". Vol.1 John Wiley and sons, 1992.
- [2] Pucknell & Eshraghian, "Basic VLSI Design", Tercera Ed. Prentice-Hall, 1994.
- [3] Streetman B.G., "Solid State Electronic Devices", Tercera Ed. Prentice-Hall, 1995.
- [4] Motor de Búsqueda Alta Vista en el WWW.