

La física de transistores de película delgada con silicio amorfo

1stMARTIN J. POWELL

dept (of Aff.)

name of organization (of Aff.)

City, Country

email address or ORCID

Abstract—Los transistores de película delgada de silicio amorfo son importantes dispositivos electrónicos que son usados en un amplio rango de aplicaciones en el área de electrónica. La física básica subyacente a su funcionamiento y los problemas clave de rendimiento se analizan aquí. Las características estáticas de los transistores son determinadas por la localización de estados electrónicos que ocurren en el bandgap de silicio amorfo. Los estados profundos, consisten principalmente en enlaces sueltos de Si, esto sirve para determinar el voltaje de umbral y determinar los estados de cola del bandgap en la banda de conducción y determinar la movilidad de efecto de campo. Los tiempos finitos de captura y emisión de los estados localizados profundos conducen a una característica dinámica del transistor que puede describirse mediante un voltaje de umbral dependiente del tiempo.

Los transistores también muestran cambios de voltaje de umbral con respecto a tiempo más largos debido a otros dos mecanismos distintos; a saber, la captura de carga en el aislante de compuerta de nitruro de silicio y la creación de estados de enlaces colgantes metaestables en el silicio amorfo. Estos dos mecanismos muestran características diferentes por polarización, temperatura, y las dependencia del cambio de voltaje de umbral. La iluminación de los TFT's causa una generación de pares electron-hueco, en la región de carga espacial lo que lleva a un flujo igual de estados estacionarios de electrones, huecos y una reducción en la flexión de la banda. En la mayoría de aplicaciones, la foto-sensibilidad podría ser minimizada.

Esto se puede hacer disminuyendo el grosor de la capa-*i*, que es más eficaz en los TFT's que utilizan un aislante superior de nitruro de silicio adicional. La interfaz superior tiene una alta densidad de centros de recombinación, los cuales matan la foto-sensibilidad con una degradación mínima de las características de transferencia. Las capas de pasivación depositadas sobre los TFT's pueden afectar las características del transistor, si la capa de pasivación esta en contacto directo con la capa de silicio amorfo. El efecto consecuente sobre las características de transistores depende sobre el grosor de las capas. La uniformidad de arreglos grandes de transistores para aplicaciones de pantalla es excelente, con variaciones en el voltaje de umbral de 0.5 to 1.0V. El rendimiento de los dispositivos también es bueno, pero se necesitan más mejoras para la reducción de costes y las aplicaciones de mayor tamaño.

Index Terms—component, formatting, style, styling, insert

I. INTRODUCCIÓN

Transistores de película delgada de silicio amorfo fueron propuestos como dispositivos aplicables por LeComber et al. [1] en 1979. Desde entonces, ha habido una enorme actividad, en todo el mundo, que ha dado lugar a la utilización de estos dispositivos en una variedad de aplicaciones. Quizás

el mejor ejemplo es la matriz activa dirigido a pantallas de cristal líquido, El cual ha sido propuesto por mas de 20 compañías y ha liderado, en algunos casos, productos comerciales (para un resumen de estas actividades se pueden ver [2]). Otras aplicaciones importantes incluidas de arreglos lineales de sensores de imagen para lectores de caras y arreglos lineales para el manejo nuevas impresoras de pagina amplia [4]. En todas estas aplicaciones, un minucioso entendimiento de la física básica subyacente la operación y el desempeño de los transistores de película delgada es esencial, y esto es el objetivo de este artículo. En artículos previos [5], el autor describe la relación del desempeño de las propiedades básicas de los materiales. Este artículo cubre terreno similar, concentrándose en los temas en los que se han producido avances desde 1984.

II. TECNOLOGÍAS TFT

Los transistores de película delgada de silicio amorfo puede ser hechos con una amplia variedad de estructuras y materiales. Básicamente, existen cuatro tipos de TFT's (figura 1.) Estos definidos por el orden del deposito de las capas, tales como el semiconductor, aislante de compuerta, contactos drenaje-fuente, y el electrodo de compuerta. Las estructuras escalonadas de los TFT's tienen los contactos de fuente y drenaje sobre un lado del semiconductor y del electrodo de contacto sobre el lado opuesto, mientras las estructuras coplanar tienen los tres electrodos sobre el mismo lado de la película semiconductor. En la estructura "invertida" el electrodo de compuerta es la primera capa depositada sobre sustrato de vidrio. Los transistores de película delgada de silicio amorfo han realizado con cuatro estructuras, pero para todos los datos de los dispositivos usados en aplicaciones practicas usan una estructura escalonada. Este contraste para los TFT's de silicio policristalino, los cuales son usualmente una estructura coplanar, que es el análogo a transistores MOS de silicio cristalino.

Para TFT de silicio amorfo, la estructura mas popular y una de las mas responsables para el estado del arte con respecto al desempeño, es el escalonado invertido, el cual usa nitruro de silicio como aislante de compuerta [7]. En este artículo, nos concentramos sobre este tipo de TFT, todos los resultados obtenidos y discutidos sobre este tipo de transistor. Además, la

física de algunos tópicos es generalmente aplicable para algún tipo de TFT de silicio amorfo.

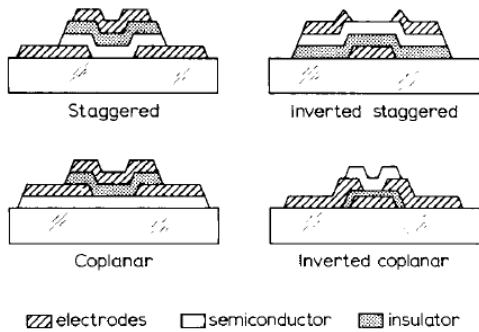


Fig. 1. Example of a figure caption.

Incluso limitándonos al TFT de escalonamiento invertido, hay muchas tecnologías de TFT's diferentes. La figura 2, muestra dos tipos de estructuras de TFT's escalonadas invertidas para silicio amorfo el cual ha sido investigado en nuestro laboratorio [8]. Las características más comunes de estos TFT's son el uso de Cr como metal para el electrodo de compuerta, como aislante de compuerta nitruro de silicio, y la doble capa de metalización Cr/Al para los contactos fuente drenaje. La diferencia esencial es el orden de deposito de otras capas. En el tipo A existen TFT's de un deposito consecutivo de nitruro de compuerta, silicio amorfo intrínseco, silicio amorfo n^+ en un solo paso de crecimiento. El n^+ se graba en la región del canal del transistor. En el caso del TFT de tipo B, existe un deposito consecutivo de nitruro para la compuerta, silicio amorfo intrínseco, y después la segunda capa de nitruro de silicio. El nitruro encima es grabado desde las regiones de contacto, antes de depositar la capa de n^+ .

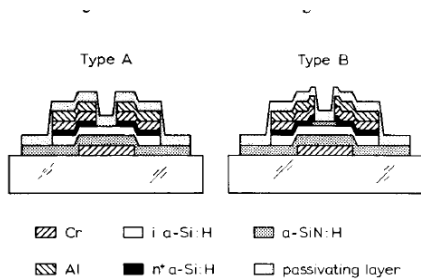


Fig. 2. Example of a figure caption.

Estos tipos de TFT's han sido investigados por numerosos grupos. Además, todavía hay diferencias en los detalles de la tecnología utilizada por cada grupo. Las variaciones incluyen diferentes esquemas de metalización, la posición de electrodo transparente, y la adición de una capa de protección ligera o un condensador de almacenamiento. El tipo de TFT B requiere un mínimo de tres pasos de máscara y el tipo B un mínimo de cuatro pasos de máscaras, pero algunas variaciones anteriores pueden aumentar la complejidad del proceso a seis o incluso ocho pasos de máscaras.

III. CARACTERÍSTICAS ESTÁTICAS DEL TRANSISTOR

Las figuras 3 y 4 muestran ejemplos de las características básicas de transferencia estática y de salida de un transistor de película delgada de silicio amorfo de tipo A, fabricado en nuestro laboratorio. Las características de un transistor de tipo B son esencialmente las mismas (q.v.). En la figura 3, la aplicación de un voltaje de compuerta que conduce a un aumento aproximadamente exponencial de la corriente de drenaje de origen, al principio, seguido de un aumento lineal de la corriente a tensiones de compuerta mas alta. Para la mayoría de los transistores, observamos una región lineal razonablemente bien definida, que nos permite definir el voltaje de umbral (la intercepción menor a $V_D/2$) y la movilidad de efecto de campo (dada por $\mu_{FE} = (d_{ins}L/\epsilon V_d W)(dI_D/dV_G)$) donde dI_D/dV_G es la pendiente. Los voltajes de umbral típicos estan en un rango de 2 – 4V y las movilidades estan en un rango 0.4 – 1.0 $cm^2 V^{-1} s^{-1}$ [7]. El ejemplo se muestra en la figura 3 que tiene una movilidad de 0.6 $cm^2 V^{-1} s^{-1}$.

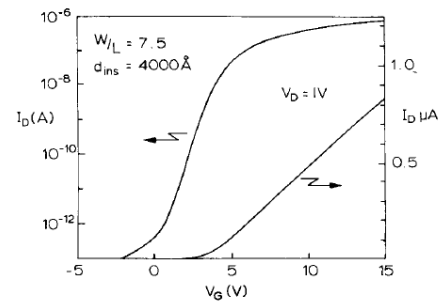


Fig. 3. Example of a figure caption.

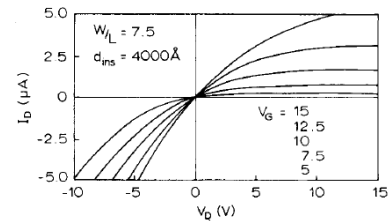


Fig. 4. Example of a figure caption.

Las características de salida muestran una buena saturación y pueden describirse razonablememnte bien mediante las ecuaciones estándar de los MOSFET para las características de umbral anteriores. La movilidad de efecto de campo también puede deducirse de la region de saturación mediante el trazado de la raíz cuadrada de la corriente fuente-drenaje versus al voltaje de compuerta. Esto da el mismo valor que el deducido de la region lineal, dentro del error experimental. Una observación importante es la ausencia del estrechamiento de corriente en las características de salida [15]. Esto es cierto tatnto para los transistores de tipo A como para los de tipo B y demuestra que la interfaz entre las capas n^+ e i puede ser de

calidad suficiente en las dos tecnologías, aunque el transistor de tipo B tenga un deposito interrumpido. La ausencia de aglomeración de corriente (current crowding), significa que la densidad de estados es menor en la masa de a-Si:H que en la región de a-Si:H cerca de la interfaz de compuerta [5][15]. El funcionamiento básico del transistor puede entenderse por la referencia en la figura 5, donde ilustramos esquemáticamente la flexión de banda y la ocupación de los estados electrónicos con un simple diagrama de densidad de estados.

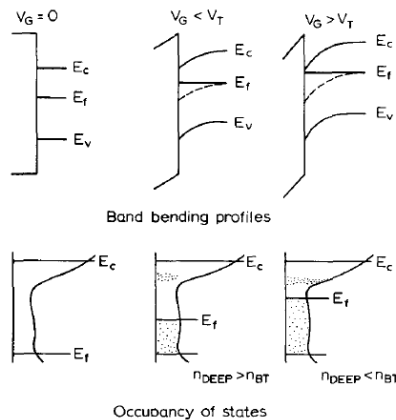


Fig. 5. Example of a figure caption.

Esencialmente, los estados localizados en el silicio amorfo pueden dividirse en dos tipos, estados de cola y estados profundos [16][17]. Los estados de cola son los estados de la banda de conducción de silicio ampliados y localizados por el desorden para formar una “cola” de estados localizados justo por debajo del borde de la movilidad de banda de conducción. Los estados profundos se originan a partir de los defectos de la red de silicio amorfo. Se cree que están formado principalmente por enlaces rotos de silicio, que tienen una amplia gama de energías debido a las variaciones en los entornos locales.

A cero volts de compuerta, las bandas de energía se acercan a la condición de banda plana. Para voltajes de compuerta positivos, menores que el voltaje de umbral, las bandas de energía se doblan hacia abajo y el nivel de Fermi se mueve a través de los estados profundos, que son entonces ocupados. Al mismo tiempo, parte de la carga espacial se localiza en los estados de cola de banda, pero la ocupación de estos estados es baja, ya que están muy por encima del nivel de Fermi, por lo que la carga espacial total está dominada por los estados profundos.

El aumento de la corriente fuente-drenaje se debe a la pequeña fracción de electrones que están en la cola de banda por encima del borde de movilidad de la banda de conducción. La carga espacial en los estados profundos aumenta en proporción al aumento del voltaje de compuerta, pero la corriente aumenta exponencialmente, a medida que aumenta la flexión de la banda. Si la densidad de estados profundos entre el nivel de Fermi y los estados de cola fuera constante, entonces la

pendiente de preumbral en la característica de transferencia logarítmica sería aproximadamente inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la densidad de estados.

Por encima del voltaje umbral, la carga espacial en los estados de cola de la banda supera la carga espacial en los estados profundos, aunque el nivel de Fermi sigue estando por debajo de los estados de cola. Ahora, tanto la carga espacial total como la corriente de drenaje aumentan linealmente con el voltaje de compuerta aplicado y tenemos una movilidad de efecto de campo bien definida. La movilidad se activa térmicamente con una energía de activación dada por la anchura de los estados de cola, no por $E_C - E_F$.

Las características de transferencia pueden modelarse a partir de la densidad de estados o, a la inversa, la densidad de estados puede determinarse a partir de un análisis de las características de transferencia resolviendo la ecuación de Poisson para la región de carga espacial [18]-[21]. Para hacer esto, es habitual suponer que la densidad de estados es homogénea en todo el a-Si:H y que no hay estados en la superficie. En realidad, hay algunas pruebas de que la densidad de estados no es homogénea [15], y la densidad de estados de deriva refleja, por lo tanto, las contribuciones de la interfaz y del bulk. Las mediciones en función de la temperatura proporcionan más información [22]-[24] y proporcionan un método para determinar el voltaje de banda plana [22].

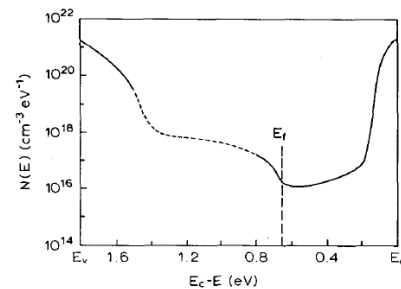


Fig. 6. The field-effect density of states.

Fig. 6. Example of a figure caption.

La figura 6 muestra la densidad de estados de efecto de campo para el silicio no dopado, que coincide con las características de los transistores fabricados en nuestro laboratorio. El nivel de Fermi está cerca de una región en la que la densidad de estados está disminuyendo, lo que conduce a un fuerte desplazamiento estadístico [23]. Esto proporciona autoconsistencia entre la densidad de estados, la pendiente experimental de preumbral en la característica de transferencia y la dependencia de la temperatura de la conductancia de efecto campo. Los experimentos con transistores de canal n no dan información sobre la densidad de estados por debajo de unos 0,8 eV, que se deduce por extrapolación (mostrada en la figura 6).

El modelo que utilizamos para los estados de cola en la banda de conducción es una cola lineal hasta unos 0,15 eV por debajo de E_C , con un posible exponencial pronunciado por

debajo. Esto se justifica esencialmente por la observación de una movilidad de efecto de campo bien definida en un amplio rango de temperaturas. La energía de activación corresponde a la anchura de la región “línea” con la movilidad de la banda de electrones libres que es de unos $10\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, es decir, al menos un factor de 10 más grande. Una imagen similar de la distribución de los estados de cola se obtiene a partir de un análisis de los resultados de la movilidad de deriva [25],[26]. Ha habido varios informes de que los estados de cola tienen una distribución de energía exponencial [27], y tal distribución también se ha utilizado en el análisis de las características de TFT[17][28]. Esto conduce a una movilidad de efecto campo dependiente de la tensión de compuerta, ya que el nivel de Fermi se mueve hacia los estados de cola [17]. En nuestro modelo, también es posible empujar el nivel de Fermi a los estados de cola, pero esto ocurrirá a voltajes de puerta más altos. La diferencia esencial entre los dos modelos para los estados de la banda de conducción es la inclinación (temperatura característica T_c) de cualquier región exponencial y la posición energética en la que la región exponencial cambia a una región lineal. En nuestro modelo, cualquier región exponencial es muy empinada ($T_c \leq 200\text{K}$) o no existe y la transición a una región lineal se produce por debajo del límite de movilidad. En el modelo de cola exponencial, la región exponencial es menos empinada ($T_c \sim 300\text{K}$) y la transición a la región lineal ocurre sólo por encima del borde de movilidad [28]. La principal prueba del modelo de cola lineal es la observación de una movilidad de efecto de campo independiente del voltaje de compuerta por encima del voltaje umbral, la movilidad de efecto de campo activada térmicamente [29], la movilidad de deriva activada térmicamente de forma similar [25], y la falta de dispersión significativa en las mediciones de movilidad de deriva de electrones por encima de 200K [25],[26]. Sin embargo, algunos grupos observan un comportamiento diferente y la forma de los estados de cola sigue siendo controvertida.

IV. CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS

En la mayoría de las aplicaciones, el transistor de película delgada actúa como un interruptor, donde normalmente el transistor se enciende durante decenas de microsegundos y luego se apaga durante decenas de milisegundos. El comportamiento de los transistores en este intervalo de tiempo define las características dinámicas.

En primer lugar, consideremos el encendido. Cuando se aplica una tensión de compuerta positiva al electrodo de compuerta, las bandas de energía del silicio descienden, atrayendo electrones a la región del canal desde los contactos de fuente-drenaje. Ahora se producen dos procesos. Está el transporte de los portadores desde los contactos a la región del canal y está el atrapamiento progresivo de los portadores libres en los estados localizados profundos.

La carga total en la región del canal se llena hasta un valor igual a CXV_G y este proceso da lugar a una corriente capacitiva que fluye entre la compuerta y los contactos fuente-drenaje. Experimentalmente se encuentra que este transitorio de corriente capacitiva dura aproximadamente $1\mu\text{s}$ para un

dispositivo de $10\mu\text{m}$ de longitud de canal. Después de este periodo, la carga total en el canal es constante, pero la corriente fuente-drenaje continúa disminuyendo hasta 1s , debido a la termalización progresiva de la carga en los estados profundos [31].

La termalización de los estados profundos tarda más tiempo que el transporte de carga hacia la región del canal, por lo que es posible modelar el encendido mediante un proceso de atrapamiento múltiple unidimensional en la región de flexión de bandas [31]. Es incorrecto suponer el equilibrio térmico en la distribución de energía y luego calcular el transporte dentro del canal como hicieron Yue et al. [32].

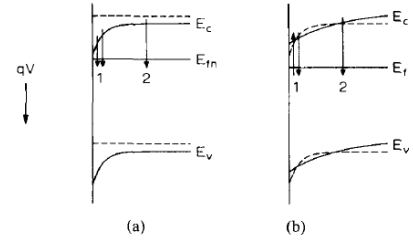


Fig. 7. Example of a figure caption.

La figura 7 ilustra el proceso de termalización. Poco después del encendido (Figura 7(a)), los estados profundos comienzan a atrapar carga, pero la tasa de atrapamiento es mucho mayor cerca de la interfaz del aislante de compuerta (región 1), debido a que la densidad de portadores libres es mucho mayor, y la ocupación de equilibrio térmico de los estados profundos se establece pronto en esa región. Sin embargo, el atrapamiento de portadores libres en la región 2 continúa, lo que conduce a una transferencia de carga de la región 1 a la región 2 y a un cambio en el perfil de flexión de bandas (Figura 7(b)). Esta redistribución de carga tiene lugar en una escala de tiempo entre $1\mu\text{s}$ y 10s y conduce a la disminución de la corriente fuente-drenaje observada experimentalmente. La figura 8 muestra el decaimiento experimental de la corriente fuente-drenaje, comparado con el decaimiento calculado utilizando este modelo. El grosor de la capa i era de 3000\AA . La redistribución de la carga entre los estados de cola y los estados profundos puede describirse como un desplazamiento efectivo del voltaje umbral dinámico [31].

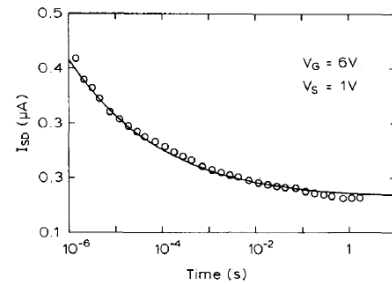


Fig. 8. Example of a figure caption.

El comportamiento de un TFT después de desconectar la puerta se ilustra en la Fig. 9 [33]. Cuando aplicamos una tensión de puerta negativa, las bandas de energía son empujadas hacia arriba y los electrones de la banda son barridos rápidamente hacia los contactos de fuente y drenaje. Después, los electrones comienzan a emitir desde los estados profundos a un ritmo determinado por su profundidad energética. Esto continúa, acumulando una carga espacial uniforme en el silicio amorfo, hasta que la carga espacial positiva en el silicio iguala la carga negativa en la puerta (Figura 9(a)). En este punto, se establece el equilibrio térmico en la región 2, pero los estados profundos de la región 1 siguen emitiendo, lo que conduce a una lenta transferencia de carga de la región 1 a la región 2 y, de nuevo, a un cambio en el perfil de flexión de bandas (Figura 9(b)). El proceso de desconexión puede observarse como un decaimiento de la cantidad total de carga almacenada en el dispositivo. En el procedimiento experimental, llamado técnica de descarga[34], la fuente y el drenaje se conectan juntos y medimos la carga almacenada en el dispositivo en función del tiempo, utilizando un electrómetro integrador. La emisión uniforme de carga (Figura 9(a)) conduce a una corriente de descarga y la redistribución de la carga (Figura 9(b)) conduce a otra pequeña corriente de desplazamiento [33].

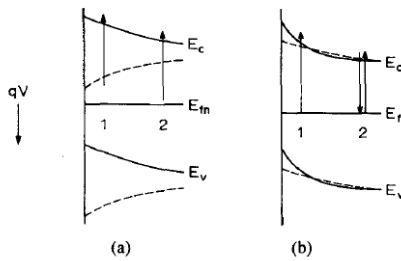


Fig. 9. Example of a figure caption.

La figura 10 muestra un ejemplo de la caída de la carga en un transistor de película delgada de silicio amorfo, después de la desconexión. El decaimiento presenta claramente dos componentes. El primer componente se debe al establecimiento de una carga espacial uniforme y el segundo se debe a la redistribución de la carga espacial. La flecha de la Figura 10 indica el momento en que en el que la carga espacial en el canal del TFT se iguala por primera vez a la carga en la puerta. Los cálculos de la descarga transitoria utilizando la distribución de la densidad de estados de la Figura 6 muestran un acuerdo razonable con el experimento [33]. En particular, el aumento de la densidad de estados por debajo del nivel de Fermi de banda plana es necesario para obtener tal acuerdo, lo que es un apoyo más para esta imagen de densidad de estados.

Evidentemente, el proceso de desconexión tarda mucho tiempo antes de que se establezca la situación de equilibrio térmico completo. En la práctica, el equilibrio térmico nunca se establece antes de que el dispositivo se encienda de nuevo. La corriente de apagado es siempre una magnitud dinámica y la corriente medida en una característica de transferencia con-

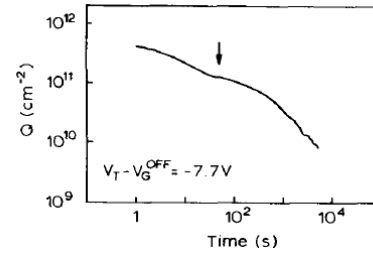


Fig. 10. Example of a figure caption.

vencional dependerá de la velocidad de barrido. La diferencia entre ésta y la verdadera corriente de equilibrio depende del grosor de la capa i , ya que la corriente se transporta en la región alejada de la interfaz de la puerta.

V. ESTABILIDAD.

Los TFT's de silicio amorfo presentan algunas inestabilidades. La inestabilidad más importante es el desplazamiento del voltaje umbral que se observa después de una tensión de polarización prolongada (la aplicación de un voltaje de compuerta durante largos períodos). Este efecto se ha estudiado ampliamente, tanto por su importancia práctica como por la visión fundamental que se puede obtener de las propiedades básicas de los materiales amorfos. La Figura 11 muestra la dependencia temporal de la tensión de umbral medida durante 12 décadas de tiempo después de la conmutación en una polarización de puerta de 12V. Entre $1\mu s$ y $1s$, vemos el desplazamiento dinámico del voltaje umbral, debido a la termalización de los estados profundos, como se ha comentado en la sección anterior. Entre 1 y $100s$ el voltaje umbral es esencialmente constante, lo que nos permite definir las características cuasiestáticas. Más allá de los $100s$, el voltaje umbral comienza a desplazarse de nuevo, y es esta región la que se discute en esta sección.

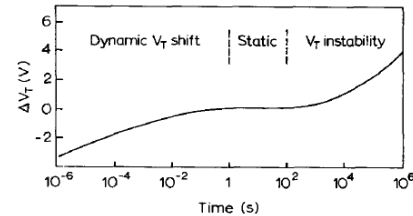


Fig. 11. Example of a figure caption.

Se han propuesto dos modelos para explicar este desplazamiento del voltaje de umbral, a saber, el atrapamiento de la carga en el aislante de la compuerta de nitruro de silicio [35],[36] y la creación metastásica de nuevos estados en el silicio amorfo [37]-[40]. Estos experimentos fueron capaces de distinguir entre los dos mecanismos y así resolver la verdadera causa del cambio de voltaje umbral. El principio del experimento es el siguiente. Si atrapamos la carga en el

nitruro bajo una tensión de polarización positiva, entonces esperamos que el voltaje umbral tanto para la conducción de electrones como de huecos se desplace a valores más positivos. Por otro lado, si creamos estados extra profundos en el a-Si y el nivel de Fermi se mueve a través de estos estados para establecer la capa de acumulación de huecos, entonces esperamos que el voltaje umbral para la conducción de huecos se desplace a un valor más negativo, mientras que el voltaje umbral para la conducción de electrones seguirá desplazándose a un valor más positivo. La Figura 12 muestra un resultado experimental para dos voltajes de polarización positivos diferentes: la creación de estados es el mecanismo dominante a 25V, pero el atrapamiento de carga domina a 55 V.

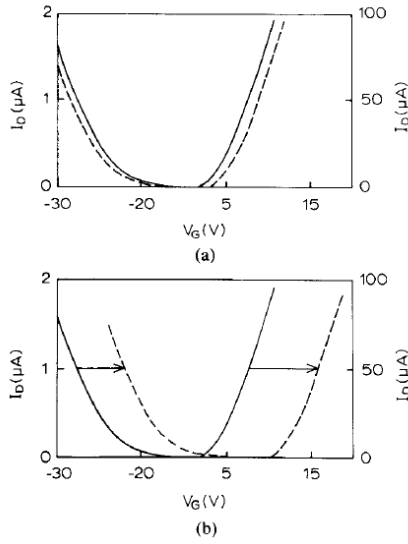


Fig. 12. Example of a figure caption.

La Fig. 13 muestra el desplazamiento del voltaje umbral de los electrones y la contribución a éste de los dos mecanismos en función de la tensión de polarización aplicada V_{GB} [41]. El desplazamiento del voltaje umbral aumenta lentamente con la tensión de polarización hasta el voltaje crítico V_{GC} , a partir del cual aumenta más rápidamente. El desplazamiento del umbral se debe principalmente a la creación de estados por debajo de V_{GC} y al atrapamiento de carga en el nitruro por encima de V_{GC} . El valor de V_{GC} depende del bandgap del nitruro de silicio, lo que confirma que el proceso de captura de carga está relacionado con el nitruro [41].

Para el nitruro casi estequiométrico V_{GC} supera los 80 V. El proceso de creación de estado es independiente del nitruro, lo que confirma que la creación de estado tiene lugar en el a-Si [41]. La Figura 14 muestra la dependencia temporal del desplazamiento de la tensión de umbral para un transistor, donde V_{GC} es de unos 50 V, para dos tensiones de polarización diferentes V_{GB} [42]. Los mismos datos se representan en dos escalas diferentes. Para $V_{GB} = 100V$, domina el atrapamiento de carga y el desplazamiento del voltaje umbral es logarítmico

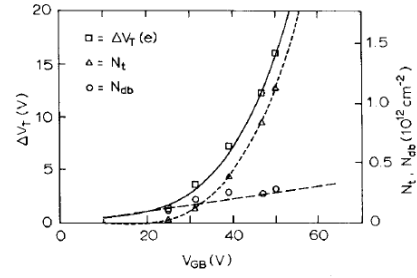


Fig. 13. Example of a figure caption.

en el tiempo. Para $V_{GB} = 20V$, domina la creación de estados y el desplazamiento del voltaje umbral viene dado por una dependencia temporal de ley de potencia. Además, el desplazamiento del umbral es independiente de la temperatura para el atrapamiento de carga, pero se activa térmicamente para la creación de estado [42].

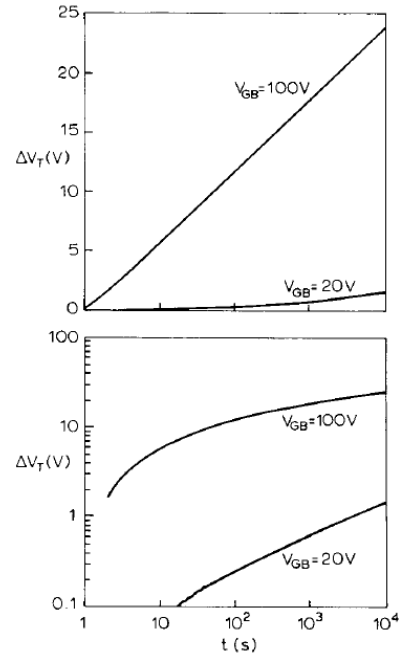


Fig. 14. Example of a figure caption.

La dependencia temporal logarítmica y la independencia de la temperatura se observan generalmente para el atrapamiento de carga en un aislante, donde la corriente de inyección depende exponencialmente de la densidad de la carga previamente inyectada y la carga queda atrapada cerca de la interfaz del aislante de la puerta [43]. Esto se observa en los dispositivos MNOS y en varios sistemas MIS, el paso que limita la velocidad es la inyección en el aislante y la conducción en el nitruro es insignificante [42]. Anteriormente habíamos propuesto que la conducción por salto en el nitruro era significativa [35], pero ahora está claro que observábamos el proceso de creación de estado en ese trabajo.

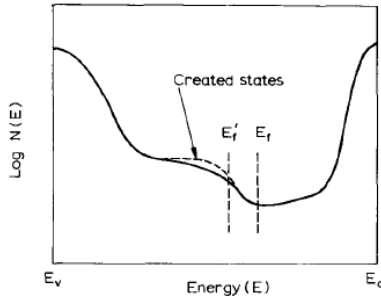


Fig. 15. Example of a figure caption.

El proceso de creación de estado que se observa en los TFT de a-Si tiene varias características en común con las observaciones de creación de estado mediante iluminación o equilibrio térmico[39]. El modelo propuesto es que los enlaces colgantes de Si se crean rompiendo enlaces débiles de Si-Si, que luego se estabilizan por la difusión dispersiva del hidrógeno [44],[45]. La dependencia temporal de la ley de potencia y la dependencia de la temperatura activada térmicamente son consistentes con este modelo [42]. Debido a que la pendiente de preumbral en la característica de transferencia de los transistores de canal n no cambia después de la tensión de polarización, los nuevos estados creados deben estar situados por debajo del nivel de Fermi de banda plana, como se muestra esquemáticamente en la Figura 15. Esto es coherente con la idea de que los estados creados son enlace colgantes de Si. El proceso de creación de estados anfótero en esta posición desplazará el nivel de Fermi a un nivel más cercano al de la banda media, lo que explica el desplazamiento del voltaje umbral de los electrones.

VI. FOTOSENSIBILIDAD

Los TFT de silicio amorfo son fotosensibles y, sin embargo para la mayoría de las aplicaciones esto no es deseable. La Figura 16 muestra las características de transferencia de un TFT en la oscuridad y bajo una iluminación superior de $2 \times 10^4 \text{ lux}$. La corriente de apagado de 10^4 A es demasiado alta para la mayoría de las aplicaciones.

La física básica del efecto fototildado se ha descrito en [46]. Consideremos la generación de pares electrón-hueco en la región de flexión de banda, cuando se aplica una tensión de puerta positiva. Al principio, los electrones son barridos hacia la puerta y los huecos se alejan de la puerta. La carga espacial en los estados localizados se redistribuirá a través del cambio de ocupación inducido por los portadores libres y la flexión de banda se reducirá. Finalmente se alcanza un estado estacionario con un flujo igual de electrones y agujeros en la misma dirección, pero sin flujo de corriente neto perpendicular a la interfaz.

La Figura 17 muestra un ejemplo de la reducción calculada de la flexión de banda, los perfiles de concentración de electrones y huecos, y el flujo de portadores en la condición de estado estacionario [46]. Obsérvese que el nivel de cuasi-

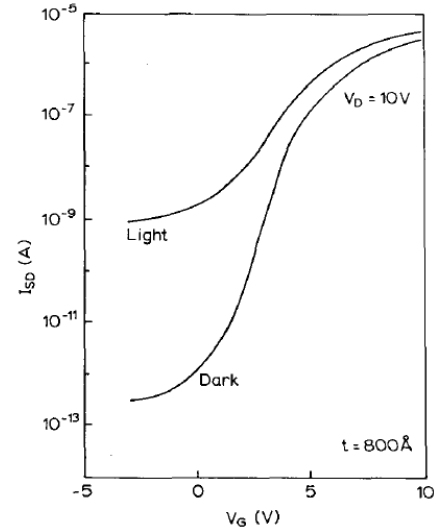


Fig. 16. Example of a figure caption.

Fermi para los electrones es esencialmente plano, pero el nivel de cuasi-Fermi para los huecos no lo es necesariamente. La forma más fácil de reducir la fotosensibilidad de los TFT es utilizar una fina capa de silicio amorfo intrínseco [14],[47]. Además, en los TFT de escalonamiento invertido, hay un cierto apantallamiento de la luz desde el electrodo de puerta.

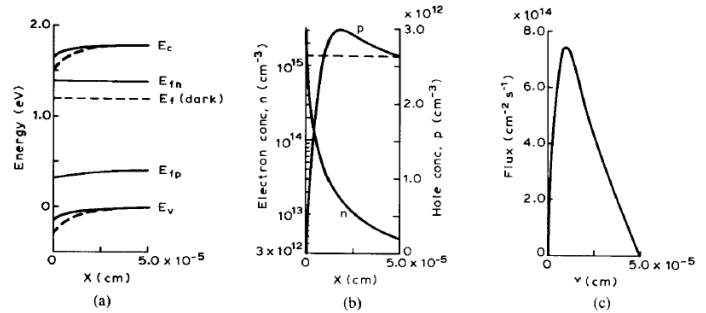


Fig. 17. Example of a figure caption.

Además, en el caso de un LCD, existe un apantallamiento de la luz desde el otro lado, debido a la máscara negra de la placa de filtro de color [8]. El efecto de apantallamiento de la luz del electrodo de puerta es una de las principales ventajas de la estructura escalonada invertida en comparación con la estructura escalonada normal, en la que a veces es necesaria una capa adicional de apantallamiento de la luz [47].

En la Figura 18, mostramos la dependencia del espesor de la capa i de la corriente de salida bajo iluminación, medida a $V_G = -5V$ y $V_D = 10V$, para los transistores de tipo A y de tipo B. La iluminación es desde la parte superior (sin apantallamiento de luz), a un nivel de $2 \times 10^4 \text{ lux}$ [8]. La corriente de apagado es la misma para ambos tipos de transistores por encima de 1000 A , pero para los transistores de tipo B, disminuye más rápidamente para las capas i más

delagadas, mostrando una dependencia de la ley de potencia de aproximadamente 2.5 en función del espesor. En el caso de los transistores de tipo A, la ley de potencia se sitúa en torno a 1, lo que puede explicarse sencillamente por la menor absorción y generación óptica en las capas i más finas.

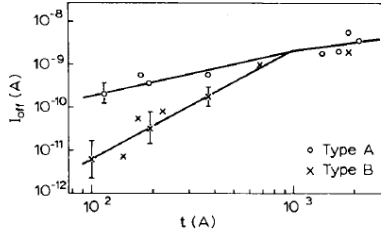


Fig. 18. Example of a figure caption.

Sin embargo, interpretamos que la mayor dependencia del espesor en los transistores de tipo B se debe a una mayor densidad de centros de recombinación en la interfaz superior con el nitrato de silicio. A medida que se reduce el grosor de la capa i , estos centros tienen un efecto proporcionalmente mayor en la eliminación de la fotocorriente, por lo que la corriente de apagado disminuye más rápidamente de lo que cabría esperar debido únicamente a la reducción de la absorción óptica. Estos resultados apoyan la observación de una alta densidad de estados rápidos en la interfaz superior del nitrato [48]. Suponemos que estos mismos estados rápidos actúan como centros de recombinación.

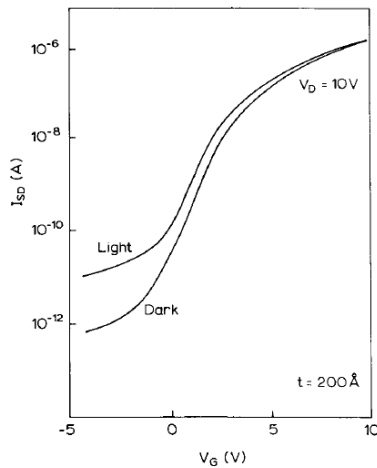


Fig. 19. Example of a figure caption.

La colocación de una alta densidad de centros de recombinación en la interfase, lejos del aislante de puerta, es la forma óptima de disminuir la fotosensibilidad, con una mínima degradación de la pendiente de pre-umbral en la característica de transferencia. Esto es precisamente lo que ocurre en el transistor tipo B, lo que constituye una ventaja de la estructura tipo B sobre la estructura tipo A. La Figura 19 muestra las

características de transferencia, de un transistor tipo B con un espesor de capa i de 200 Å en las condiciones de luz y oscuridad, como en la Figura 16. Esto es típico de un transistor utilizado en nuestra pantalla de cristal líquido [8].

VII. PASIVACION

La capa de pasivación que se deposita sobre el TFT altera las características de un transistor de tipo A, ya que la capa de pasivación está en contacto directo con el silicio en el canal. Por el contrario, la capa de pasivación tiene poco efecto en las características del dispositivo de un TFT de tipo B, ya que el nitrato superior separa la capa de pasivación del silicio. Se han comunicado resultados sobre el efecto de las capas de pasivación en las características de los transistores de tipo A para la pasivación con nitrato de silicio [49], [50], óxido de silicio [50] y poliimida [8]. La Figura 20 muestra un ejemplo del efecto de la pasivación por una capa de poliimida en la característica de transferencia de un transistor tipo A. La pasivación altera las características del transistor al modificar las condiciones de la superficie superior y cambiar la densidad de carga fija y/o los estados superficiales rápidos.

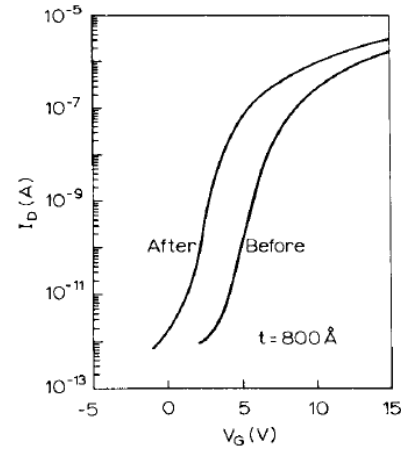


Fig. 20. Example of a figure caption.

El efecto de los estados rápidos y de la carga fija en la interfaz superior se ha calculado utilizando un programa informático que resuelve la ecuación de Poisson para el efecto de campo, sujeto a las condiciones de contorno adecuadas en la interfaz superior [51]. Los resultados dependen de la densidad de estados en el a-Si y del grosor de la capa i . En el caso de las capas i gruesas o de densidades de estado elevadas, la región de flexión de banda en la interfaz del aislante de puerta y cualquier región de flexión de banda en la interfaz superior, inducida por la carga fija, no interactúan. En este caso, la carga fija aumenta la corriente de desactivación con un efecto insignificante en la tensión de umbral y la movilidad. Sin embargo, en el caso de capas i más finas o densidades de estado bajas, las regiones de flexión de banda interactúan y una carga fija en la superficie superior puede alterar el voltaje umbral [51]. Además, una gran densidad de estados

en la superficie superior tenderá a fijar el nivel de Fermi en la interfaz superior y esto hará que el voltaje umbral aumente a medida que el espesor de la capa intrínseca de silicio amorfo disminuya [50].

La Figura 21 muestra algunos resultados experimentales sobre la dependencia del espesor del voltaje umbral de los TFT de a-Si no pasivados, medidos en atmósfera seca después de la recoccido a 80°C. Los resultados experimentales se han comparado con los resultados calculados utilizando el programa informático de Powell y Pritchard [51]. La pronunciada dependencia del grosor está bien modelada por una densidad de estados profundos de $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3} \text{ eV}^{-1}$ y una densidad de estados superficiales de $2 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$, que se indica con la línea sólida de la Figura 21. La línea continua en la Figura 21. La dependencia del espesor desaparece tras el proceso de pasivación de la poliamida o incluso tras después de un simple recocido a 180°C durante 1 h. El origen de los estados superficiales de la superficie no se conoce con exactitud, pero está relacionado con el procedimiento de grabado utilizado en la fabricación del transistor de tipo A del transistor.

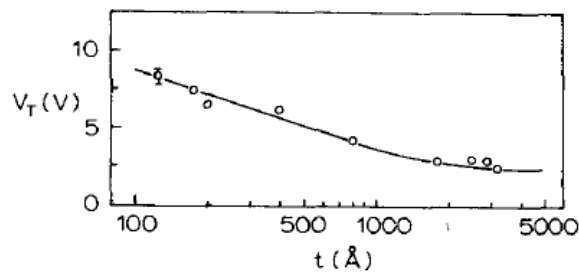


Fig. 21. Example of a figure caption.

Estos estados superficiales son bastante diferentes de los estados interfaciales de la interfaz superior de los transistores de tipo B, que propusimos que actuaran como centros de recombinación y redujeran la fotosensibilidad. Los transistores de tipo B no muestran una dependencia pronunciada del grosor de la tensión umbral, por lo que la densidad de los centros de recombinación no es tan grande como para que se pueda alcanzar el nivel de Fermi. Esto es coherente con nuestra observación de una acción razonable del transistor con los TFT de compuerta superior. Los estados superficiales en el transistor de tipo A son de una densidad lo suficientemente alta como para fijar el nivel de Fermi (esto se confirma por la falta de buena acción del transistor si se añade una puerta superior [50]), pero los estados no actúan como centros de recombinación. La dependencia del grosor de la corriente de apagado bajo iluminación para los transistores de tipo A, mostrada en la figura 18, era para los transistores de tipo A no pasivados, que también mostraban la pronunciada dependencia del grosor del umbral de tensión.

La pasivación con poliimida de los transistores de tipo A también incrementa la corriente de salida, lo que sugiere que este proceso induce una pequeña densidad de carga positiva

fija en la superficie superior. Possin y Su [50] descubrieron que los transistores de tipo A tenían una alta densidad de estados en la superficie superior después de la pasivación con nitruro de silicio, lo que significaba que sólo se podían fabricar transistores satisfactorios con capas gruesas [50]. Hemos comprobado que las características del dispositivo de los transistores de tipo A pasivados con nitruro de silicio eran muy sensibles a las condiciones de deposición del nitruro superior [5], [49]. El estado de la superficie superior varía considerablemente y, en general, es bastante difícil de controlar. Esto es especialmente grave si tenemos que utilizar minicapas y es otra desventaja del transistor de tipo A en comparación con el transistor de tipo 3.

VIII. UNIFORMIDAD Y RENDIMIENTO

En muchas aplicaciones, los TFT de a-Si se utilizan como interruptores de encendido y apagado, por lo que las exigencias de uniformidad del dispositivo no son muy severas. Basta con que la característica básica de cada transistor cumpla unos requisitos mínimos. Por lo tanto, el requisito de uniformidad depende de la característica media. Sin embargo, en algunas aplicaciones la uniformidad de los dispositivos es más importante y siempre es beneficioso tener la mayor uniformidad posible. La figura 22 muestra un histograma de la distribución de la tensión umbral en una matriz de prueba de 96X108 transistores. La variación de la tensión de umbral es de unos 0,5V, que aumenta a unos 1V para matrices de 6 en diagonal de 288X468 transistores, como las utilizadas en una pantalla de cristal líquido [8].

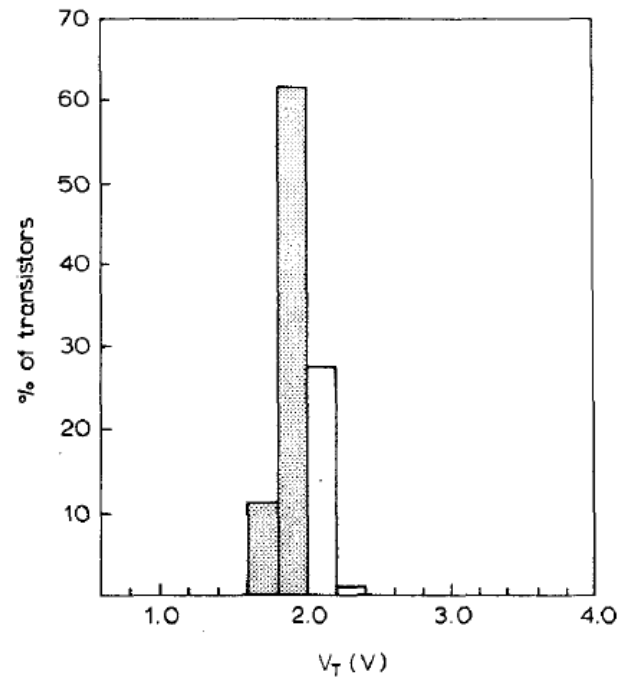


Fig. 22. Example of a figure caption.

La figura 23 muestra un mapa de la distribución espacial del voltaje umbral de los transistores dentro del conjunto, correspondiente al histograma de la figura 22. La dispersión de los voltajes umbral se debe principalmente a las variaciones lentas en el conjunto. El rendimiento de los transistores en funcionamiento es obviamente crucial en todas las aplicaciones. Los defectos en los transistores pueden provocar cortocircuitos o circuitos abiertos que tienen diversas consecuencias. Por ejemplo, en el caso de una pantalla de cristal líquido de matriz activa, los circuitos abiertos en la puerta, los circuitos abiertos en la fuente (línea de columna) y los cortocircuitos entre la puerta y la fuente provocan defectos en la línea de la pantalla, mientras que los circuitos abiertos en el drenaje, los cortocircuitos entre la fuente y el drenaje y los cortocircuitos entre la puerta y el drenaje provocan defectos puntuales en la pantalla. En la figura 23, no hay defectos de línea, pero sí algunos defectos puntuales debidos a circuitos abiertos de drenaje (píxel) (en negro en la Fig. 23) y algunos debidos a cortocircuitos de drenaje de puerta (en blanco en la Fig. 23). Se han propuesto varios métodos para mejorar su rendimiento. Entre ellos, las capas múltiples en los cruces, los perfiles cónicos del electrodo de la puerta, los dieléctricos multicapa[52], [53] y el uso de nuevas arquitecturas de TFT[54]-[56] tienen como objetivo eliminar los cortes de la fuente de la puerta. Otras mejoras potenciales provienen de los esquemas de metalización múltiple para la fuente-drenaje, la optimización del diseño de la máscara y el uso de diseños tolerantes a fallos [57],[58]. Hasta la fecha se han demostrado algunos resultados excelentes, pero este sigue siendo un ámbito en el que es necesario seguir avanzando.

IX. RESUMEN

En este artículo hemos analizado algunos de los aspectos físicos básicos que subyacen al funcionamiento de los TFT de a-Si. Los temas tratados son de interés tanto por su importancia en las aplicaciones prácticas como por la visión que ofrecen de las propiedades fundamentales de los semiconductores amorfos. El tema más común es la electrónica de gran superficie, en la que los transistores deben fabricarse sobre grandes sustratos, generalmente de vidrio, y son dispositivos de entrada-salida para la tecnología de la información y representan un área de crecimiento para el futuro. Los transistores de película fina de silicio amorfo serán el núcleo de esta nueva industria.

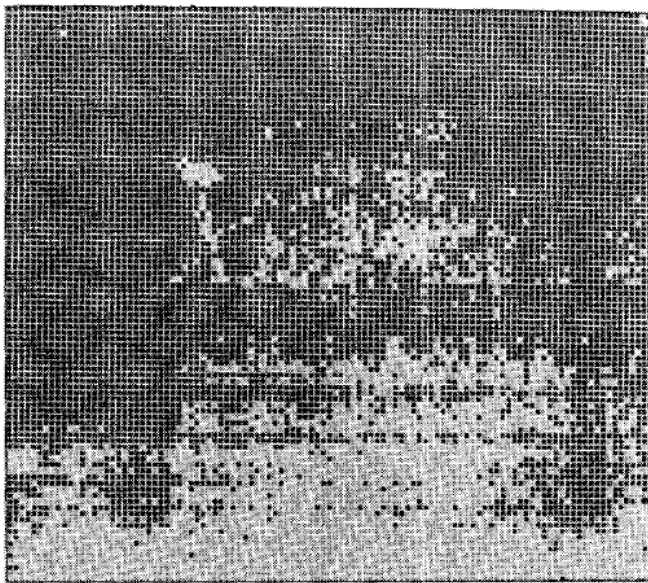


Fig. 23. Example of a figure caption.