CELDAS SOLARES DE SILICIO AMORFO

HOENEISEN, BRUCE DR.
ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

RESUMEN

Hacia 1975 se descubrió que el silicio amorfo hidrógenado presenta propiedades ideales para la fabricación de celdas solares de bajo costo. En este artículo se revisa brevemente la tecnología desarrollada y las perspectivas futuras del silicio amorfo.

INTRODUCCION

Los paneles solares comerciales contienen celdas solares[1] de silicio monocristalino o policristalino con rendimiento de 11 a 15%. Su precio es del orden de US$20 por watt pico lo que implica un costo de unos US$100 por watt medio. En comparación el costo de una central hidráulica es del orden de US$1 por watt. Al costo del panel solar hay que agregar costos de baterías, reguladores, terrenos, obras civiles e instalación, lo que resulta en un costo total prohibitivo para la mayoría de aplicaciones. Por este motivo la utilización de paneles solares se ha limitado a aplicaciones de baja potencia en sitios aislados donde otras fuentes de energía son aún más costosas. Por otra parte la energía empleada en la fabricación de un panel solar con celdas de silicio cristalino es recuperada en forma de electricidad en un período de tiempo comparable a la vida útil del panel, o sea 10 a 20 años. En consecuencia no es posible ahorrar energía significativamente mediante la utilización de paneles solares disponibles actualmente en el comercio.

Las celdas solares de alto rendimiento (≈ 22%) de arseniuro de galio monocristalino tienen costos por watt pico en dinero y energía aún más desfavorables que las celdas de silicio cristalino. Por este motivo se las utiliza normalmente con concentradores de luz y en proyectos de carácter experimental.

Las celdas solares de película delgada de sulfuro de cadmio policristalino (CdS/Cu_2S) tienen en principio bajos costos de fabricación por watt pico, tanto en dinero como en energía. Sin embargo su modesto rendimiento (5 a 9%) y corta vida útil han hecho escasas las aplicaciones prácticas de estas celdas solares (se las utiliza en calculadoras y en cámaras fotográficas).

A la luz de estos datos resulta de singular importancia el descubrimiento[2] hacia 1975 de un compuesto de silicio amorfo e hidrógeno (en adelante a - Si:H) que presenta fotoconductividad y que puede ser dopado de tipo n y p. Estas propiedades de a - Si:H son escenciales para su utilización en celdas solares. Más aún el compuesto a - Si:H absorbe la luz solar en ≈ 1 μm (en comparación con 100 μm en silicio cristalino) lo que permite fabricar celdas de "película delgada" de bajo costo. Otra característica importante de a - Si:H es que su banda de energía de movilidad es de 1,6 a 1,8 eV, cerca del valor ideal para convertir el espectro de luz solar en electricidad (e ideal para convertir la luz fluorescente). En siete años de investigación y desarrollo se ha logrado alcanzar un rendimiento de 10%. Ya hay fábricas que producen celdas solares de silicio amorfo para calculadoras, juguetes, etc.

Otra aplicación del compuesto a - Si:H es en circuitos integrados e híbridos de grandes dimensiones. Un ejemplo son las pantallas de información. También podría utilizarse en la xerografía y en los fototubos de las cámaras de televisión.

FABRICACION DE CELDAS SOLARES DE SILICIO AMORFO[3]

El método de fabricación más investigado y que hasta el momento ha dado los mejores resultados es el siguiente: Se aplica radiofrecuencia (generalmente 13,5 MHz) a las placas de un capacitor. Sobre una de estas placas se encuentra el sustrato sobre el cual se desea depositar el silicio amorfo hidrogenado. Entre las placas del capacitor se hace circular el gas SiH_4 a una presión de 5 a 250 m Torr y un flujo de 10 a 30 cm^3 normales por minuto. La radiofrecuencia genera un plasma en el cual se descomponen las moléculas de SiH_4 y se deposita sobre el sustrato una película de a - Si:H a razón de 100 a 1000 Å/min. Durante la deposición el sustrato se mantiene a una temperatura de 200 a 400°C. La película de silicio amorfo resultante contiene 5 a 50% atómico de hidrógeno. Se cree que este hidrógeno "satura" los enlaces covalentes insatisfechos del silicio amorfo. (Estos enlaces no satisfechos de silicio amorfo no-hidrogenado impiden la fotoconductividad y la posibilidad de dopar el material).

Para depositar una película de a - Si:H tipo n se introduce una pequeña cantidad (≈ 1%) de gas PH_3 al gas SiH_4. Para depositar una película tipo p se introduce una pequeña cantidad de gas B_2H_6. De esta forma se producen estructuras p - i - n, p - n, p - i - Cr, n - i - Pt, p - i - In_2O_3:Sn, etc. Todas estas estructuras han sido utilizadas para fabricar celdas solares.

Debo mencionar que los gases SiH_4, PH_3 y B_2H_6, son altamente tóxicos y explosivos y deben manejarse con extremo cuidado. Normalmente se los diluye con un gas inerte como el argón y además se utilizan complicados sistemas de purga para evitar que entren en contacto con el aire.

En la figura 1 se indica una estructura típica de una celda solar de silicio amorfo.

OTRAS AREAS DE INVESTIGACION

Se han fabricado celdas solares de silicio amorfo hidrogenado utilizando varias técnicas además de la ya mencionada: descomposición de SiH_4 en un plasma generado mediante radiofrecuencia con acoplamiento inductivo; descomposición de SiH_4 a baja presión mediante una descarga eléctrica de corriente contínua; y "sputtering" de silicio sólido en un ambiente de hidrógeno. También se investiga la implantación de protones en películas de silicio evaporado y en películas depositadas por el método CVD (descomposición térmica de SiH_4 al entrar en contacto con el sustrato a 600°C).

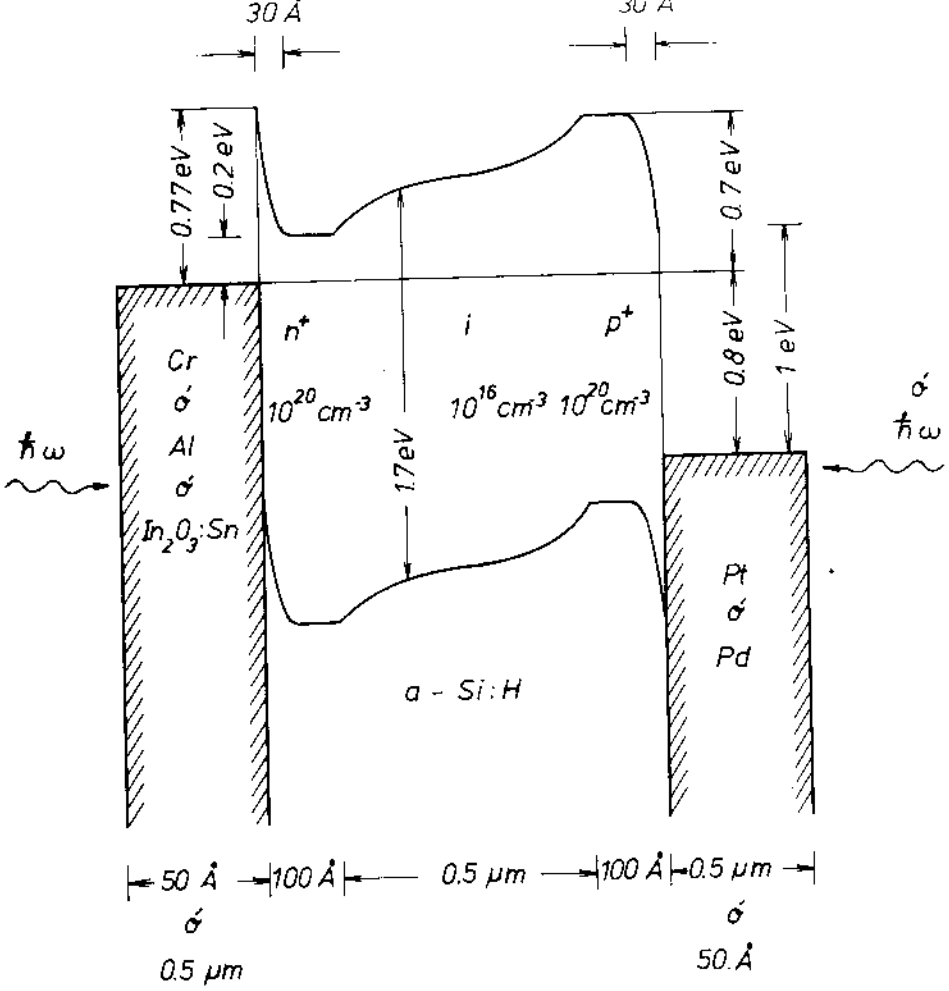

Figura 1.- Diagrama de energía de una celda solar de silicio amorfo. En la vertical se indica la energía de los electrones. A esta estructura hay que añadir el sustrato (por ejemplo vidrio), la grilla metálica del contacto frontal y la capa anti-reflectante (por ejemplo Zn S). El voltaje entre electrodos a máximo rendimiento es de 0,8 V.

SILICIO AMORFO EVAPORADO[4]

En el período julio - octubre de 1982 tuve la oportunidad de colaborar con el grupo University of Western Ontario - Chinese University of Hong Kong en London, Ontario, Canadá. Este grupo está formado por B.Y.Tong, P.K.John, S.K.Wong, K.P.Chik; A. Berman (visitante sabático); P.K.Gogna (contratado como post-doctorado); A.Prasad, M.Prasad y B. Hoeneisen (como visitantes en 1982), y varios estudiantes graduados. El grupo investiga el silicio amorfo evaporado post-hidrogenado y el silicio depositado por el método CVD.

Resumo brevemente los resultados obtenidos por el grupo en el período 1977 - 1982 en relación al silicio amorfo evaporado.

Evaporación: El silicio se calienta mediante un haz de electrones de ≈ 4,7 KV y ≈ 0,4 A en vacío de ≈ 3.10^{-7} Torr El sustrato se encuentra a ≈ 25 cm de la fuente de silicio y está a temperatura ambiente. Se deposita una película de silicio amorfo de unos 5000 Å a razón de ≈ 1 Å/s. La película resultante es aislante ($\sigma \approx 10^{-7}$ Ω^{-1} cm^{-1}) y no tiene fotoconductividad observable.

Calentamiento: Luego de la evaporación se calienta la película a 560°C durante 20 minutos en un ambiente de nitrógeno. Sin este proceso no se consigue fotoconductividad en el paso siguiente. (Sobre 600°C la película se vuelve policristalina).

Hidrogenación: Se implantan iones de hidrógeno (protones) con energías entre 1 y 20 KV. El sustrato se mantiene a 500°C. Se utiliza el método "θ - pinch"(pulsos de ≈ 200 A/cm² de ≈ 2,5 μs de duración; presión de H de 10^{-3} Torr 125 pulsos a 1 KV, 300 pulsos a 7 KV, 125 pulsos a 4 KV y 125 pulsos de 1 KV) o el método del haz de iones (2 a 3 mA, 4 a 8 KV, 20 min). Se obtienen resultados similares con ambos métodos: $\sigma \approx 10^{-7}$ Ω^{-1} cm^{-1} a oscuras y $\sigma \approx 10^{-4}$ Ω^{-1} cm^{-1} con un sol de insolación y a temperatura ambiente.

Dopado: El grupo logró dopar la película de tipo p implantando B_2H_6 y de tipo n implantando PH_3 mediante el método " θ - pinch". También se logró dopar la película por difusión de boro. En cambio no se logró el dopado por difusión de fósforo.

Discusión: La película de silicio amorfo evaporado y post-hidrogenado tiene todas las características requeridas para su utilización en celdas solares. Aún no se ha fabricado una celda solar con éxito porque no se sabe todavía como producir la estructura p-i-n. El aspecto más atractivo de esta película es su estabilidad: puede calentarse a 560°C en el vacío sin perder su fotoconductividad (en cambio pierde su fotoconductividad si se calienta a 400°C en nitrógeno); muestras

no encapsuladas no han alterado sus características en tres años; y no presenta la inestabilidad de Staebler - Wronski al ser iluminado. En cambio las películas depositadas por descomposición de SiH_4 en un plasma pierden su hidrógeno y su fotoconductividad si se calientan a más de 300°C, y presentan la inestabilidad de Staebler - Wronski. Además un análisis con microscopio electrónico revela que la estructura de estas películas tiene dos fases.

CONCLUSION

Falta mucha investigación y desarrollo antes de que pueda iniciarse la producción en gran escala de dispositivos de silicio amorfo. Sin embargo creo que no está lejano el día en que todos tengamos silicio amorfo desde el tejado hasta el televisor de 14 pies colgado en la pared. Veremos la segunda revolución del silicio: la del silicio amorfo.

BIOGRAFIA

HOENEISEN, BRUCE. Ingeniero Civil Electricista de la Universidad de Chile, "Master of Science", y "Doctor of Philosophy" en Ingeniería Eléctrica y Física de "California Institute of Technology". Ha hecho contribuciones a la Física y Tecnología de semiconductores, a la física del estado sólido y a la física de partículas. Su experiencia profesional incluye telecomunicaciones y control Industrial. Ha diseñado más de 100 transmisores de televisión y de radio AM y FM que se encuentran operando en toda la república.

REFERENCIAS

(1) Artículos relacionados con celdas solares de silicio monocristalino, arseniuro de galio y sulfuro de cadmio se encuentran recopilados en Charles E. Backus, "Solar cells", IEEE press (1976). Es interesante observar que en esta obra no se menciona todavía el silicio amorfo hidrogenado.
Ver también B. Hoeneisen, Politécnica 4 (2), 92 (1979), Escuela Politécnica Nacional, Quito Ecuador.

(2) W.E. Spear and P.G. LeComber, Solid State Comm., 17, 1193 (1975). W.E. Spear and P.G. LeComber, Philos. Mag. 33, 935 (1976).

(3) M.H. Brodsky, "Amorphous semiconductors", Springer, Berlin (1979).

(4) B.Y. Tong, P.K. John, S.K. Wong and K.P. Chik, Appl. Phys. Lett. 38 (10), 789 (1981). P.K. John, S.K. Wong, P.K. Gogna, B.Y. Tong and K.P. Chick, Journal de Physique 42 (10) c4-639 (1981). Para una introducción simple a la teoría del silicio amorfo ver B.Y. Tong, Physics in Canada 36, 26 (1980).