

DEPÓSITO Y CARACTERIZACIÓN DE PELÍCULAS DOPADAS DE A-SI:H (TIPO N O TIPO P)

ANA CAROLINA SARMIENTO CHÁVEZ¹

MARIO MORENO MORENO²

ALFONSO TORRES JACOME³

ABEL GARCÍA BARRIENTOS⁴

 JAIRO PLAZA CASTILLO⁵

RESUMEN:

El silicio amorfo hidrogenado (a-Si:H) surge como un material prometedor en la industria fotovoltaica gracias a su alto coeficiente de absorción y a su bajo costo de producción. En este trabajo se estudiaron las propiedades ópticas y eléctricas de películas de a-Si:H dopadas tipo p y tipo n tales como: transmitancia, coeficiente de absorción, conductividad, energía de activación y espesor. Dichas películas se fabricaron mediante la técnica Depósito Químico en fase Vapor Asistido por Plasma (PECVD, por su sigla en inglés) a baja frecuencia con una temperatura de sustrato de 300 °C, variando el flujo de hidrógeno y de los gases dopantes. La caracterización de las películas se hizo mediante las técnicas de caracterización eléctrica, transmisión óptica y elipsometría UV – Visible. Los resultados muestran que el silicio amorfo hidrogenado es una buena alternativa para la fabricación de dispositivos fotovoltaicos.

PALABRAS CLAVE: Silicio amorfo, silicio hidrogenado, silicio amorfo dopado, películas de silicio amorfo, películas semiconductoras dopadas, películas de silicio hidrogenado.

DEPOSIT AND CHARACTERIZATION OF DOPED FILMS A-SI: H (N-TYPE OR P-TYPE)

ABSTRACT

The hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) appears as a promising material in the photovoltaic industry due to its high absorption coefficient and low manufacturing cost. The optical and electrical properties of a-Si:H doped p-type or n-type films were studied: transmittance, absorption coefficient, conductivity, activation energy and thickness. The films were fabricated by the Plasma Enhance Chemical Vapor Deposition (PECVD) at low frequency with a substrate temperature of 300 °C by varying the flow of hydrogen and dopant gases. The characterization of the films was done by electrical characterization techniques, optical transmission and UV-visible ellipsometry. The results show that the hydrogenated amorphous silicon is a good alternative for the manufacture of photovoltaic devices.

¹ Maestría. Egresada Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia

² Doctorado. Investigador de INAOE, Tonantzintla, México

³ Doctorado. Investigador de INAOE, Tonantzintla, México

⁴ Doctorado. Investigador. U. P. de Tulancingo, Tulancingo, México

⁵ Doctorado. Investigador. Universidad del Atlántico. Barranquilla, Colombia



Autor de correspondencia: Plaza Castillo, J. (Jairo): Universidad del Atlántico: Km 7 Antigua, vía Puerto Colombia, Barranquilla, Colombia. Tel.: (57) 3157659050 / Correo electrónico: jaiplaza@gmail.com

Historia del artículo:

Artículo recibido: 30-X-2015 / Aprobado: 16-III-2016

Disponibile online: mayo 30 de 2016

Discusión abierta hasta mayo de 2017

KEYWORDS: Amorphous silicon, hydrogenated silicon, doped amorphous silicon, amorphous silicon films, doped semiconductor films, hydrogenated silicon films.

DEPOSITO E CARACTERIZAÇÃO DE FILMES DOPADOS DE A-SI:H (TIPO N OU TIPO P)

RESUMO

O silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) surge como um material promissor na indústria fotovoltaica devido ao seu alto coeficiente de absorção e baixo custo de produção. Neste trabalho, foram estudadas propriedades ópticas e elétricas de filmes de a-Si:H dotadas tipo p y tipo n tais como: transmitância, coeficiente de absorção, condutividade, energia de ativação e espessura. Tais filmes foram fabricados usando a técnica de Deposição Química em fase Vapor assistida por plasma (PECVD) a baixa frequência com uma temperatura do substrato de 300 °C, variando o fluxo do hidrogênio e dos gases dopantes. A caracterização dos filmes foi feita por meio de técnicas de caracterização elétrica, transmissão óptica e elipsometria e UV-Visível. Os resultados mostram que o silício amorfo hidrogenado é uma boa alternativa para a fabricação de dispositivos fotovoltaicos.

PALAVRAS-CHAVE: Silício amorfo, silício hidrogenado, silício amorfo dopado, filmes de silício amorfo, filmes dopado de semicondutores, filmes de silício hidrogenado.

1. INTRODUCCIÓN

Un material que ha tenido una gran aceptación en la industria microelectrónica debido a su bajo costo, en comparación con el silicio cristalino (c-Si), es el silicio amorfo (a-Si). El a-Si presenta una gran aleatoriedad en su ordenamiento atómico ya que sus átomos no están localizados a distancias y ángulos definidos. Fueron Chittick *et al.* (1969) quienes incorporaron hidrógeno en el silicio amorfo encontrando un efecto beneficioso, pues el hidrógeno satura los defectos de la red. Este descubrimiento fue fundamental para desarrollar semiconductores amorfos, debido a que se pudo demostrar que el a-Si:H podía ser dopado con fósforo o boro (Spear *et al.* 1975). Para la obtención del a-Si se recurre a técnicas de depósito de películas delgadas, la técnica más utilizada es la de Depósito Químico en Fase Vapor asistido por Plasma (PECVD, por su sigla en inglés), la cual es una variante del CVD en la que se aplica un plasma a una mezcla de gases con el fin de disociar las moléculas contenidas en el gas a bajas temperaturas. En caso de que se requiera dopar la película se sugiere la inyección del átomo dopante en la cámara como componente esencial de un gas (Poortmans J. *et al.* 2006; Roca i Cabarrocas P. J. 2000; Roca i Cabarrocas, Fontcuberta i Morral, Lebib y Poissant, 2002).

En este trabajo se depositaron películas delgadas de a-Si:H dopadas con PH₃ (tipo *n*) y con B₂H₆ (tipo *p*) mediante la técnica PECVD a baja frecuencia, variando el flujo de los gases PH₃, B₂H₆ y H₂ para observar cómo influye la concentración de los gases en la cámara en las propiedades de ópticas y eléctricas de las películas (Butte R. *et al.*, 2000). Estas películas fueron fabricadas y caracterizadas en el Laboratorio de Microelectrónica del INAOE (México – Puebla).

2. MÉTODOS Y MATERIALES

Para obtener las películas de a-Si:H dopadas tipo *n* y tipo *p* se procedió a depositar tres tipos de muestras en un sistema PECVD, así: primero una película delgada de a-Si:H intrínseca que servirá como referencia y después dos series de películas delgadas de a-Si:H dopadas. En la primera serie se doparon las muestras tipo *n*, para esto se utilizó una mezcla de gases de SiH₄, H₂ y PH₃; en la segunda serie se doparon las muestras tipo *p*, en este caso se utilizó una mezcla de gases de SiH₄, H₂ y B₂H₆. Los substratos que se utilizaron en ambas series fueron muestras de vidrio Corning Glass 2974 y 1737 (Benmenssaoud A., 2001).

En las **Tablas 1 y 2** se muestran los valores de los flujos empleados en cada una de las series.

Los coeficientes de absorción de las películas se determinaron con los resultados de las mediciones de transmisión realizadas con un espectrómetro Perkin Elmer Lambda, en el rango de 300 nm a 900 nm y el *software* PUMA (Pointwise Unconstrained Minimization Approach) [3].

La energía de activación (E_a) y la conductividad se obtuvieron mediante las medidas de corriente – voltaje, estas mediciones se realizaron en un amplio rango de temperaturas, de 300 K a 400 K.

Mediante la técnica de elipsometría espectroscópica UV – Visible se midió la parte imaginaria de la función pseudo-dieléctrica ($\text{Im}[\epsilon]$) de las películas de a-Si:H dopadas para obtener el espesor de las películas.

Tabla 1. Serie 1: Parámetros del depósito de las películas de a-Si:H dopadas tipo n. Esta serie se fabricó con una presión de cámara de 600 mTorr, una potencia de 300 W, una densidad de potencia correspondiente a 90 mW/cm², flujo de SiH₄ igual a 50 sccm, a una temperatura de 300 K durante 30 minutos.

Gas	Unidad	Serie 1 – Proceso No.					
		1	2	3	4	5	6
H ₂	sccm	1000	200	1000	1000	1000	1000
PH ₃	sccm	0	4	4	6	8	8

Tabla 2. Serie 2: Parámetros del depósito de las películas de a-Si:H dopadas tipo p. Esta serie se fabricó con una presión de cámara de 600 mTorr, una potencia de 300 W, una densidad de potencia correspondiente a 90 mW/cm², flujo de SiH₄ igual a 50 sccm, a una temperatura de 300 K durante 30 minutos.

Gas	Unidad	Serie 2 – Proceso No.					
		1	7	8	9	10	11
H ₂	sccm	1000	200	1000	1000	1000	1000
B ₂ H ₆	sccm	0	4	5	6	8	10

3. RESULTADOS

Los espectros de transmitancia de las películas dopadas muestran un comportamiento diferente en su transmitancia con respecto a la película intrínseca, es así como ambos tipos de películas presentan una mayor transmitancia entre los 600 nm y los 700 nm aunque entre 400 nm y 550 nm su transmitancia es bastante

baja, menor que la intrínseca. En las gráficas de la **Figura 1** se observa la dependencia de la transmitancia con el flujo del gas dopante, en ellas las particularidades encontradas fueron:

- En el rango entre 300 nm y 550 nm la muestra intrínseca muestra una mayor transmitancia, sin embargo, en el rango entre 550 nm y 900 nm, para ambas series, se observa una transmitancia de casi el doble con respecto a la muestra intrínseca.

-Las muestras depositadas con menor flujo de H₂ para ambas series, proceso 2 (dopado tipo n) y proceso 7 (dopado tipo p), muestran un comportamiento opuesto para cada tipo, mientras que la película tipo n muestra una mayor transmitancia a una mayor longitud de onda, la muestra dopada tipo p muestra un comportamiento similar al de la muestra intrínseca, es decir una menor transmitancia a una mayor longitud de onda.

Los coeficientes de absorción se determinaron ingresando los datos de la transmitancia en función de la longitud de onda (T Vs. λ) en el *software* PUMA, los resultados se muestran en las gráficas de la **Figura 2**.

En los gráficos de la **Figura 2** se observa un comportamiento similar para todas las muestras, la única muestra que se diferencia es la intrínseca, la cual presenta un mayor coeficiente de absorción en el rango de 1,5 eV a 2,2 eV, mientras que en el rango de 2,2 eV a 4,0 eV las muestras dopadas presentan un mayor coeficiente de absorción que la muestra intrínseca.

Los resultados de las mediciones de la conductividad se muestran en la **Figura 3**, en las respectivas gráficas de Arrhenius se detallan los valores de la energía de activación de cada película. En las gráficas se observa que a mayor flujo de dopante mayor conductividad. Ahora bien, si analizamos los resultados de las muestras fabricadas con el menor flujo de H₂ se observa que la muestra del proceso 2 (tipo n) presenta la menor conductividad, mientras que la muestra del proceso 7 (tipo p) presenta la mayor conductividad.

A partir de las medidas de elipsometría UV – Visible se obtuvo el espesor de las películas, como se observa en la **Tabla 3**, de este se puede notar que ninguna de las películas supera 110 nm de espesor.

Figura 1. Espectro de transmitancia de ambas series de películas. a) Con flujos de SiH₄, H₂ y PH₃. b) Con flujos de SiH₄, H₂ y B₂H₆.

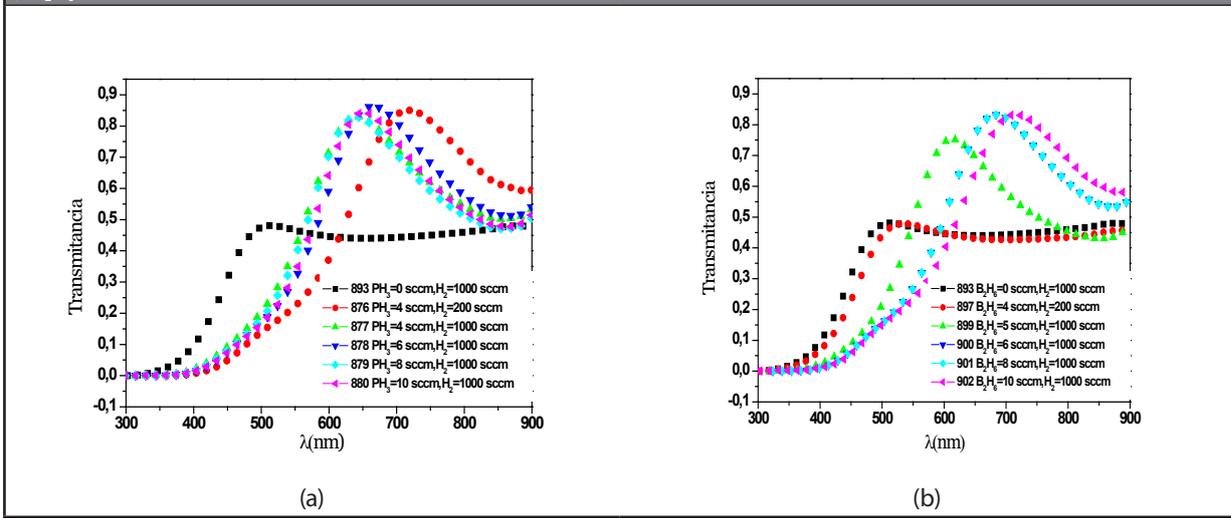


Figura 2. Gráficos de los coeficientes de absorción de ambas series. a) Películas depositadas con flujos de SiH₄, H₂ y PH₃. b) Películas depositadas con flujos de SiH₄, H₂ y B₂H₆.

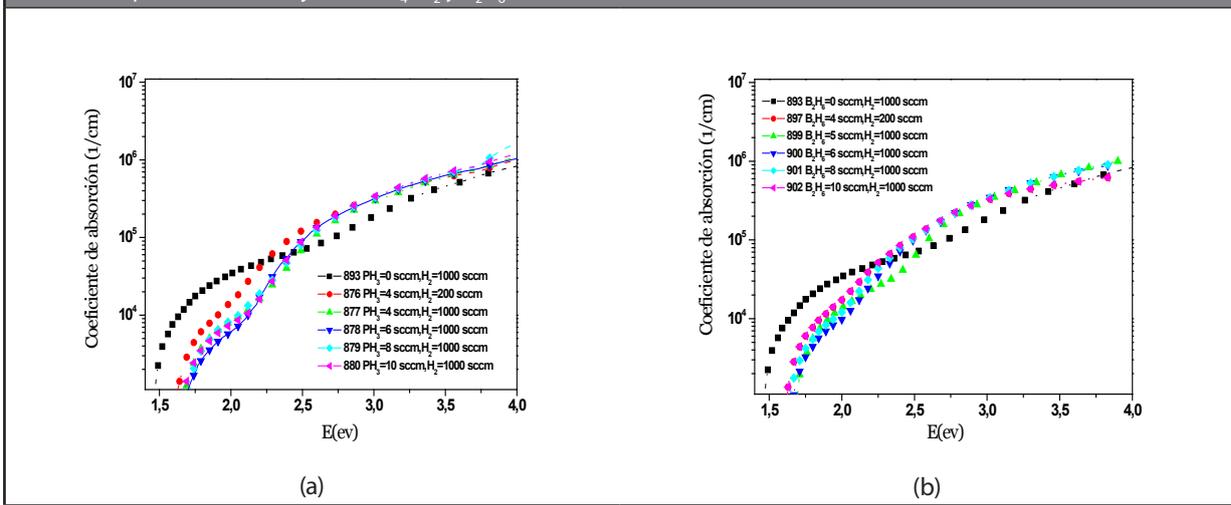
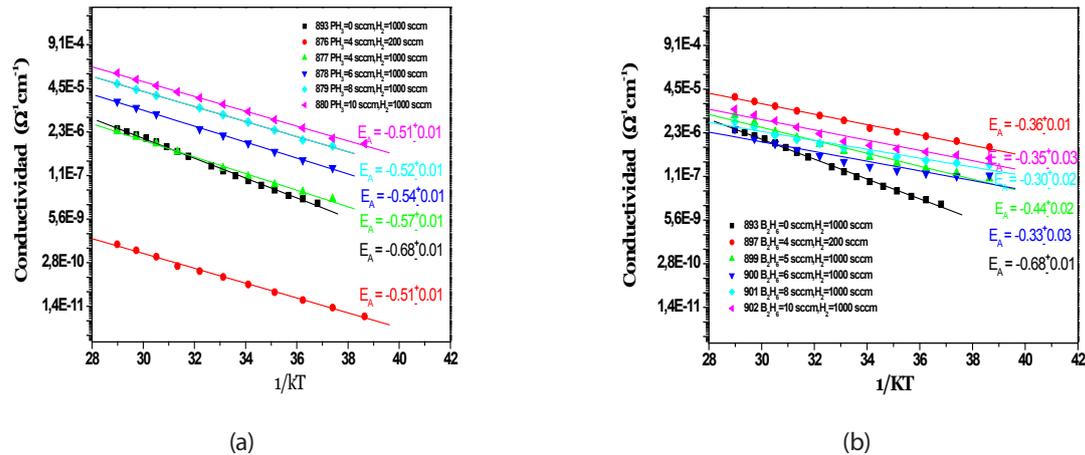


Tabla 3. Resultados de las mediciones de los espesores y ancho del gap de cada una de las muestras de los procesos de las series 1 y 2.

Serie 1			Serie 2		
Proceso	Espesor (Å)	Gap (eV)	Proceso	Espesor (Å)	Gap (eV)
1	583	1,97	1	583	1,97
2	1066	1,71	7	601	1,83
3	942	1,71	8	860	1,74
4	995	1,82	9	986	1,70
5	911	1,79	10	1030	1,69
6	956	1,78	11	1079	1,67

Figura 3. La medición de la conductividad en la oscuridad en función de la temperatura muestra que esta se incrementa con los dopantes para ambos tipos. a) Serie de películas depositadas con un flujos de SiH₄, H₂ y PH₃. b) Serie de películas con flujos de SiH₄, H₂ y B₂H₆.



4. DISCUSIÓN

Las películas de a-Si:H dopadas tipo *p* y tipo *n* fueron depositadas exitosamente utilizando la técnica de PECVD a baja frecuencia, en cada serie se consideraron condiciones específicas para los flujos de cada uno de los gases: silano, hidrógeno, diborano y fosfina.

Al comparar la muestra intrínseca con las muestras dopadas se encuentra que las muestras dopadas presentan mejores propiedades que la muestra intrínseca, este hecho se evidencia con los gráficos de conductividades y medición del gap: las muestras dopadas presentan una mayor conductividad y su gap se ve disminuido en valores que van desde un 7 % hasta un 15 %.

De las muestras de a-Si:H dopadas tipo *p* o tipo *n*, se puede concluir que las mejores condiciones se presentan con los mayores flujos de dopantes, bien sea gas fosfina o gas diborano pues se alcanzaron conductividades superiores a la conductividad mínima requerida en materiales de a-Si:H para celdas solares de calidad.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad del Atlántico y al Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

Se agradece expresamente al técnico del Laboratorio de Microelectrónica Adrian Itzmoyol, quien participó activamente en la fabricación de las muestras.

REFERENCIAS

Benmenssoud A. (2001). *Caracterización de subóxido de silicio obtenido por la técnica PECVD*. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Barcelona, Recuperado el (octubre 30 de 2015 de <http://www.tdx.cat/handle/10803/3336>).

Butte R., Vignoli S., Meaudre M., Meaudre R., Saviot L. y Roca i Cabarrocas P. (2000). Structural, optical and electronic properties of hydrogenated polymorphous silicon films deposited at 150 °C. En *Journal of Non-Crystalline Solids, Vol 266-269, Part 1*, pag. 263-268.

Chittick R. C., Alexander J. H. y Sterling H. F. (1969). The Preparation and Properties of Amorphous Silicon. En *Journal Electrochemical Society, 116(1)*, pág. 77-81.

Poortmans J. y Arkhipov V. (2006). *Thin film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications*. Ed. John Wiley & sons, Hoboken (NJ), EUA.

Roca i Cabarrocas P. J. (2000). Plasma enhanced chemical vapor deposition of amorphous, polymorphous and microcrystalline silicon films. En *Non - Crystalline Solids 266 - 269*, pag. 31-37.

Roca i Cabarrocas P., Fontcuberta i Morral A., Lebib S. y Poissant Y. (2002). Plasma production of nanocrystalline

silicon particles and polymorphous silicon thin films for large - area electronic device. En *Pure and applied Chemistry, Vol. 74, No. 3*, pag. 359 - 367.

Spear W. y LeComber P. (1975). Substitutional doping of amorphous silicon. En *Solid State Comm., 17 (9)*, 1193, 1975.

**PARA CITAR ESTE ARTÍCULO /
TO REFERENCE THIS ARTICLE /
PARA CITAR ESTE ARTIGO /**

Sarmiento Chávez, A.C.; Moreno Moreno, M. Torres Jacome, A.; García Barrientos, A.; Plaza Castillo, J. (2016). Depósito y caracterización de películas dopadas de a-Si:H (tipo n o tipo p). *Revista EIA*, 12(E3), mayo, pp. 53-58. [Online]. Available on: <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2016.12.e3.53-58>