

Respuestas Espectrales Mayores a Uno en Junturas n-i-p de $\mu\text{-Si:H}$

Spectral Responses Over Unity in $\mu\text{-Si:H}$ n-i-p Junctions

F. A. Rubinelli, M. De Greef

Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química (INTEC), Universidad Nacional del Litoral (UNL), CONICET, Güemes 3450, (3000), Santa Fe, Argentina

email: frubinelli@santafe-conicet.gov.ar

Recibido: 23/10/2015; Aceptado: 16/03/2016

Respuestas espectrales (SR) por encima de la unidad en el azul aún no se han observadas en dispositivos p-i-n de $\mu\text{-Si:H}$ optimizados para aplicaciones fotovoltaicas o detección de luz al iluminarlos con una luz de polarización roja, efecto conocido como “Photo-gating” Complementario. Calibrando los datos de entrada del código D-AMPS mediante el ajuste de curvas experimentales SR y corriente-tensión (J-V) se exploraron las condiciones necesarias para predecir $\text{SR} > 1$ en el azul. Se determinó que sería necesario la existencia de una interfaz p/i defectuosa con una densidad elevada de defectos. El haz de prueba en la zona azul modula la concentración de portadores en la interfaz p/i defectuosa y en la zona frontal de la capa intrínseca dando lugar a un incremento de la intensidad del campo eléctrico en la capa intrínseca junto a su debilitamiento en las capas dopada (p) e interfaz p/i que a su vez dan lugar a una disminución de la tasa de recombinación generándose una ganancia y una $\text{SR} > 1$. El fenómeno puede observarse en junturas con capas dopadas (p)-aSiC:H de elevado gap de movilidad como con capas (p)- $\mu\text{-Si:H}$ de bajo gap de movilidad siempre que las mismas no presenten una incorporación muy eficiente del boro. Las $\text{SR} > 1$ son muy sensibles a parámetros eléctricos de la interfaz p/i como el gap de movilidad, el espesor, la densidad de defectos, las movilidades y las secciones eficaces de captura de trampas donoras, etc, y a la densidad de boro en la capa (p). Las respuestas anómalas también muestran una gran sensibilidad al contenido espectral de la luz de polarización.

Palabras claves Respuesta Espectral, Celdas Solares, Sensores Ópticos, Silicio micro-cristalino.

Spectral responses (SR) above the unity in the blue region of the spectrum in $\mu\text{-Si:H}$ based p-i-n devices optimized for photovoltaic and optical sensor applications when are illuminated with a red bias light, known as Complementary Photo-gating Effect, have not yet been observed. Calibrating the input parameters of the computer code D-AMPS by matching experimental SR and current voltage (J-V) characteristics the necessary conditions to predict anomalous responses at blue wavelengths were explored. $\text{SR} > 1$ requires the presence of a defective p/i interface with a density of defects. The probe beam in the blue region modulates the carrier concentration at the defective p/i interface and the front region of the intrinsic layer, strengthen and weakening the field inside the intrinsic layer and at the p-doped layer and p/i interface respectively. This redistribution reduces the recombination rate inside the intrinsic layer giving rise to a gain and the $\text{SR} > 1$. The phenomenon is predicted for devices with p-layers with either a high mobility gap such as a-SiC:H or a low mobility gap such as $\mu\text{-Si:H}$ whenever Boron has not been efficiently incorporated. $\text{SR} > 1$ are very sensitive to electrical parameters of the p/i interface such as mobility gap, thickness, density of defects, mobilities and capture cross sections of donor traps, etc, and to the Boron density in the p-layer. They also show a high sensitivity to the spectral content of the bias light.

Keywords: Spectral Response, Solar Cells, Optical Detectors, Micro-crystalline Silicon

I. INTRODUCCIÓN

Los dispositivos de a-Si:H y $\mu\text{-Si:H}$ encuentran aplicaciones en celdas solares, detectores de radiación, TFT, etc. Ambos materiales contienen una gran cantidad de defectos dentro del “gap” que pueden dar lugar bajo ciertas condiciones a la aparición de respuestas espectrales (SR) por encima de la unidad. La primera evidencia fue presentada por Maruska et al en 1984 [1]. Midieron un valor máximo de $\text{SR} \sim 1.04$ a $\sim 550\text{nm}$ en barreras Schottky de a-Si:H iluminadas con una luz auxiliar azul continua

(DC) de $\sim 436\text{nm}$. La juntura fue sujeta a un tratamiento previo de iluminación AM1 o Light-Soaking” (LS) por 400hs. En 1992 Hou y Fonnash reportaron picos de $\text{SR} \sim 1.06-1.1$ a $\sim 600-700\text{nm}$ en estructuras p-i-n de a-Si:H iluminadas con una luz DC azul de $\sim 460\text{nm}$ también luego de un tratamiento de LS [2]. El espesor de la capa intrínseca era de 400nm y la densidad de defectos (DB) fue estimada en $\sim 2.4 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ [2]. El fenómeno fue denominado efecto “Photogating” (PG) ya que una fuente de luz abre la “puerta” (gate) a la aparición de $\text{SR} > 1$. En 1994 Rubinelli encontró máximos de $\text{SR} \sim 1.75$ para

~640-660nm en juntas Ni-(i)a-Si:H/(n)a-Si:H polarizadas con un tensión directa $V \sim 0.2V$ sin un tratamiento previo de LS [3]. El efecto PG también fue observado por Bae et al en estructuras p-i-n de a-Si:H/a-SiGe:H pero en la región del azul utilizando una luz DC de color rojo [4]. A este fenómeno se lo denominó efecto PG complementario (CPG). En sus simulaciones densidades elevadas de DB en la interfaz frontal dieron lugar a $SR > 1$. Para una densidad de DB de $4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ se obtuvo $SR \sim 1.3$ a ~380-400nm pero con $2 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ el fenómeno desaparece. SR experimentales mostraron valores elevados pero ligeramente inferiores a la unidad. Li et al. midieron $SR > 1$ en n-i-p de $\mu\text{-Si:H}$ iluminadas con una luz DC auxiliar azul obtenido un máximo de ~1.6-1.63 a ~700nm [5]. Se encontró consistencia entre las predicciones y los resultados experimentales sobre el aumento de SR con la intensidad de la luz azul auxiliar y su disminución con la intensidad del haz de prueba [5]. La longitud de onda central de la luz auxiliar era de ~380nm. La capa intrínseca poseía un espesor de 1350nm. La física utilizada para describir el fenómeno fue similar a la de las contribuciones previas [2,3]. Según nuestros conocimientos no han sido publicados aun trabajos donde se investigue el efecto CPG en estructuras de $\mu\text{-Si:H}$. El bajo "gap" de movilidad de $\mu\text{-Si:H}$ (1.2eV) hace que las pérdidas por recombinación pueden ser significativas siendo un material interesante para explorar ambos efectos PG y CPG. En este trabajo investigamos con simulaciones numéricas las condiciones necesarias para poder observar el fenómeno CPG en estructuras n-i-p de $\mu\text{-Si:H}$.

II - METODOLOGÍA

El dispositivo a estudiar es: sustrato/Ag/ZnO/(n)- $\mu\text{-Si:H}$ /(i)- $\mu\text{-Si:H}$ /buffer-a-Si:H/(p)- $\mu\text{-Si:H}$ /ITO/Au [5]. Las capas de Si fueron depositadas con un sistema de múltiple cámara UHV en "Debye Institute for Nanomaterials Science", Países Bajos. La capa intrínseca fue crecida con la técnica Hot-Wire utilizando filamentos de Ta a 1850C y una relación $R_H = H_2/(H_2 + SiH_4) = 0.952$. Las capas dopadas fueron depositadas por CVD en cámaras separadas. El Ag y la capa de ZnO se depositó por "sputtering" sobre Asahi tipo-U [5]. La fuente de luz utilizada fué una lámpara Xenon y la luz DC roja se obtuvo con un filtro pasa bajo RG630 transparente aproximadamente a longitudes de onda mayores a 560nm. El flujo de fotones de la luz DC es de $7 \times 10^{16} \text{ fotones cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. La curva corriente - voltaje (J-V) fue medida

con un simulador solar WACOM manteniendo las muestras a 25C. El haz de prueba se hizo pasar por un "chopper" óptico para producir luz "a.c." modulada. Los parámetros ópticos fueron extraídos de espectros de reflexión y transmisión de películas de $\mu\text{-Si:H}$. La densidad global de defectos y la pendiente de la cola de Urbach fueron medidos con DPM (Dual Beam Photoconductivity) en muestras coplanares de $\mu\text{-Si:H}$. Las energías de activación experimentales fueron reproducidas ajustando las densidades de doping en las capas dopadas. Los restantes parámetros se obtuvieron a partir de los ajustes de las curvas J-V y SR medidas bajo iluminación AM1.5 y roja interponiendo el filtro RG630 respectivamente. Las simulaciones numéricas se realizaron con el código D-AMPS-1D [6]. La densidad de estados (DOS) en el $\mu\text{-Si:H}$ contiene dos colas exponencialmente decrecientes desde los bordes de banda hacia el medio del gap y defectos (DB) modelados con tres pares de distribuciones Gaussianas D^- , D^0 and D^+ . La DOS se asume

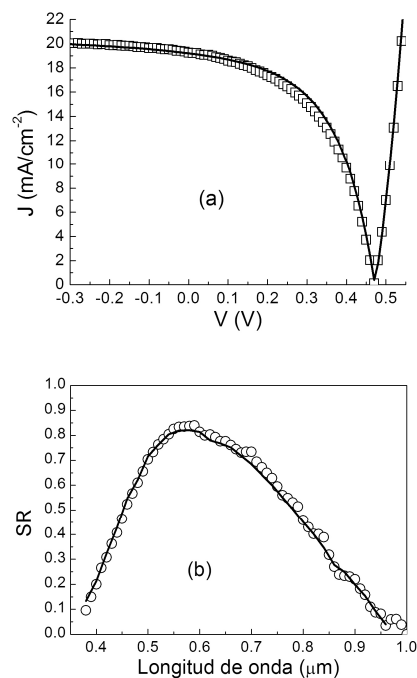


Fig 1: Ajuste (línea sólida) de las curvas experimentales (a) J-V bajo iluminación AM1.5 (∇) y (b) SR con luz roja RG360 (—) en una junta n-i-p de $\mu\text{-Si:H}$ con una capa intrínseca de 1350nm de espesor.

uniforme en cada capa del dispositivo (modelo UDM). Los estados en las colas y defectos son de carácter donador o aceptor. El modelo óptico tiene en cuenta la rugosidad de las interfaces a través de ángulos que desvían la trayectoria normal de N sub-haces de luz cuyas intensidades

des sumadas es la del haz incidente. La velocidad de generación de pares e-h $G(x)$ se obtiene sumando las contribuciones de los sub-haces. Las Figuras 1a y 1b muestran los ajustes obtenidos para las curvas J-V y SR en cortocircuito medidas bajo iluminación AM1.5 y bajo una luz auxiliar roja (filtro RG630) respectivamente. El dispositivo n-i-p presenta experimentalmente una $SR > 1$ cuando se utiliza una luz auxiliar azul [5] y una $SR < 1$ cuando se utiliza luces auxiliares blanca o roja. La Tabla 1 contiene los parámetros eléctricos obtenidos en los ajustes.

III – ECUACIONES

La respuesta espectral SR de un dispositivo iluminado con una luz auxiliar viene dada por:

$$SR(\lambda) = \left(\frac{J_{DC+AC}(\lambda) - J_{DC}(\lambda)}{q\Phi_{AC}(\lambda)} \right) \quad (1)$$

donde $J_{DC+AC}(\lambda)$ es la densidad de corriente generada por la luz auxiliar roja (DC) y el haz de prueba de longitud de onda λ variable (AC), J_{DC} es la densidad de corriente generada sólo por la luz DC, $\Phi_{AC}(\lambda)$ es el flujo de fotones del haz de prueba AC (*chopeado*) a la longitud de onda λ y q es la carga del electrón. Utilizando la ecuación de continuidad y el hecho de que la corriente total es la suma de la de electrones y la de huecos el numerador puede expresarse como:

$$\begin{aligned} J_{DC+AC}(\lambda) - J_{DC}(\lambda) &= -q \int_0^W G_{AC}(x, \lambda) dx \\ &+ q \left[\int_0^W [R_{DC+AC}(\lambda, x) - R_{DC}(\lambda, x)] dx \right] \\ &+ [J_{DC+AC-n}(\lambda, 0) - J_{DC-n}(\lambda, 0)] \\ &+ [J_{BL+AC-p}(\lambda, W) - J_{DC-p}(\lambda, W)] \end{aligned} \quad (2)$$

donde $G_{AC}(x, \lambda)$ es la velocidad de generación de pares e-h en la posición “x” para la longitud de onda λ provocada por el haz de prueba con un flujo de fotones $\Phi_{AC}(\lambda)$ siendo $x=0$ y $x=W$ las posiciones del contacto frontal y posterior respectivamente. El segundo término contiene la diferencia entre las pérdidas por recombinación cuando ambas luces, la auxiliar DC y la de prueba AC y cuando sólo DC inciden sobre el dispositivo. Las fotocorrientes generadas por DC y AC pueden separarse mientras que las pérdidas eléctricas no. La fuente DC abre los cuasi-niveles de Fermi y el haz AC los modula a la frecuencia del “chopper”. Los otros términos contienen las diferencias entre las corrientes de

difusión de electrones y huecos en los contactos frontal ($x=0$) y posterior ($x=W$) respectivamente generadas por ambas luces DC+AC y sólo por la DC. La ecuación (2) expresa la corriente total en términos de la foto-corriente (primer término) y la suma de las pérdidas eléctricas. El primer término es siempre menor que el flujo de fotones incidente del haz de prueba AC:

$$\Phi_{AC}(\lambda) \geq \int_0^W G_{AC}(x, \lambda) dx$$

El signo igual se daría para el caso ideal de un dispositivo con longitud infinita que permita la absorción completa de la luz AC y que posea un contacto anterior con un coeficiente de reflexión nulo. El cociente SR_{OPT} cumple con:

$$SR_{OPT}(\lambda) = \frac{\int_0^W G_{AC}(x, \lambda) dx}{q\Phi_{AC}(\lambda)} \leq 1$$

La SR_{OPT} óptica nunca puede superar el valor de la unidad. Por lo tanto $SR > 1$ sólo pueden pro

Parámetros	p- μ c-Si:H n- μ c-Si:H	i- μ c-Si:H
W (nm)	20 27	1350
E_G (eV)	1.2	1.25
N_c, N_v (cm ⁻³)	3×10^{19}	3×10^{19}
μ_N (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	50	150
μ_P (cm ² V ⁻¹ s ⁻¹)	5	75
E_D (meV)	30	35
E_A (meV)	25	23
$t_N^+ t_P^-$ (cm ²)	5×10^{-15}	1×10^{-15}
$t_N^0 t_P^0$ (cm ²)	5×10^{-17}	1×10^{-17}
D^- (cm ² s ⁻¹)	2×10^{18}	(3) 1×10^{15}
D^0 (cm ² s ⁻¹)	1×10^{16}	(1.5) 0.5×10^{15}
D^+ (cm ² s ⁻¹)	2×10^{18}	(3) 1×10^{15}
E_{D^-} (eV)	0.1	0.225
E_{D^0} (eV)	0.4	0.525
E_{D^+} (eV)	0.7	0.825
s_D (eV)	0.1	0.1
$\sigma_N^+ \sigma_P^-$ (cm ²)	5×10^{-14}	1×10^{-15}
$\sigma_N^0 \sigma_P^0$ (cm ²)	5×10^{-15}	1×10^{-16}
$N_A \cdot N_D$ (cm ⁻³)	8.21×10^{18} 1.53×10^{19}	-
E_A (cm-3)	0.0590 026	0.55

Tabla 1: Lista de parámetros obtenidos con los ajustes de curvas J-V y SR: W espesor de capa, E_G “gap” de movilidad, N_c y N_v densidades efectivas de estados, μ_N y μ_P movilidades de electrones y huecos, E_D y E_A pendientes de las colas de banda de conducción y valencia, t_N y t_P secciones eficaces de captura para electrones y huecos en las colas, D^- , D^0 y D^+ densidades de estados contenida en cada Gaussiana, E_{D^-} , E_{D^0}

y E_D^+ energía de los picos de las Gaussianas donoras respecto del borde de la banda de valencia, s_D desviación estándar, σ_N y σ_P secciones eficaces de captura de electrones y huecos en los defectos, N_A y N_D densidades de dopajes aceptor y donador en las capas dopadas, E_A energía de activación. Sub-índices +, 0, - indican el estado de carga de la trampa.

venir de las diferencias entre las pérdidas eléctricas cuando ambas luces DC y AC y cuando solo la DC ilumina el dispositivo. La contribución de los términos $J_{DC+AC-p}(W, \lambda)$ y $J_{DC-p}(W, \lambda)$ es siempre despreciable y la de $J_{DC+AC-n}(0, \lambda)$ y $J_{AC-n}(0, \lambda)$ son generalmente inferiores a las pérdidas por recombinación debido a que la capa "buffer" en la interfaz p/i es de gap elevado. La ecuación (1) puede reescribirse como:

$$SR(\lambda) \cong SR_{OPT}(\lambda) - \frac{\int_0^w [R_{DC+AC}(\lambda, x) - R_{DC}(\lambda, x)] dx}{q\Phi_{AC}(\lambda)} \quad (3)$$

Por lo tanto, $SR > 1$ son posibles cuando las pérdidas de recombinación en el dispositivo iluminado por ambas luces DC y AC son menores a las presentes cuando solo incide la luz auxiliar DC . Como el haz de prueba AC tiene una intensidad menor a la luz auxiliar los pares e-h foto-generados por AC son superados en número por los generados por DC cuando las longitudes de ondas de DC y AC son similares no pudiendo alterar significativamente la distribución del campo eléctrico al ser atrapados. Las SR anómalas se han observado para luces DC y AC con longitudes de onda en los dos extremos del espectro visible. En el efecto PG convencional DC es azul y absorbida en la parte anterior del dispositivo. El haz AC rojo es absorbido uniformemente en todo el dispositivo. Los pares e-h foto-generados por AC en el seno del dispositivo son atrapados por estados donde la luz DC no llega, impactando en la distribución final del campo eléctrico. Análogamente en el CPG la luz DC roja es absorbida uniformemente y el haz de prueba AC azul es absorbido en la parte anterior del mismo pudiendo generar una cantidad de pares e-h que compiten con los de la luz DC y así alterar la distribución del campo eléctrico. Para obtener $SR > 1$ en el azul es necesario contar con zonas con una considerable densidad de defectos cerca del contacto frontal donde la luz AC es absorbida [5].

IV - RESULTADOS

La SR medida con luz auxiliar roja en la juntura n-i-p de $\mu\text{-Si:H}$ bajo análisis muestra una $SR < 1$ (Fig 1b). Los parámetros de la Tabla 1 se modificaron hasta encontrar escenarios donde sea $SR > 1$. En primera instancia se exploraron

los parámetros de la zona frontal del dispositivo donde la luz azul es absorbida. El primer resultado exitoso se obtuvo modificando los parámetros de la capa "buffer" (ver Tabla 2) y reemplazando la capa (p)- $\mu\text{-Si:H}$ por una de (p)-a-SiC:H ($E_G = 2.0\text{eV}$) que reduce al mínimo la difusión de electrones hacia el contacto frontal. Los tres parámetros eléctricos que resultaron fundamentales para predecir $SR > 1$ fueron: el ancho, el "gap" de movilidad y la densidad de defectos de la capa "buffer". Una "buffer" muy fina, con un gap muy elevado o muy bajo o con una densidad de DB baja no permiten que la luz AC module en forma eficiente las pérdidas por recombinación. Otros parámetros que impactan en el valor final de SR son las movilidades de electrones y huecos que afectan la cantidad de portadores libres atrapados y las densidades efectivas de estados que se disminuyeron porque la capa "buffer" de a-Si:H contiene una alta dilución de hidrogeno. En la Tabla 2 se comparan los parámetros de la capa buffer inicial con la de la buffer defectuosa. En la Figura 2 se muestra la primera $SR > 1$ obtenida.

SR es sensible a las secciones eficaces de captura de trampas donoras y no a las de las trampas aceptoras. La máxima $SR \sim 2.4$ se obtuvo para un espesor de 22nm, una densidad de DB de $\sim 10^{18}\text{cm}^{-3}$ y un gap de 1.7eV. Valores más alejados tienden a disminuir SR obteniéndose $SR > 1$ para espesores entre 16-30nm y gaps entre 1.55-

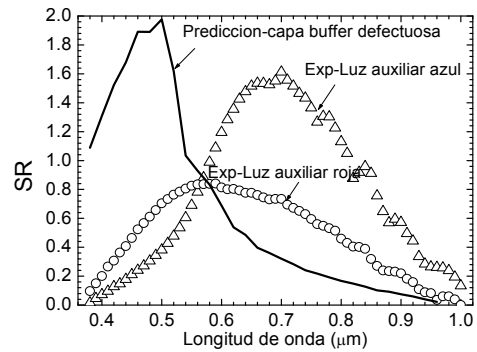


Fig-2: $SR > 1$ obtenida con capa "buffer" defectuosa (línea sólida) y capa (p)-a-SiC:H y SR medidas con luz auxiliar roja (-) y azul (8) en n-i-p de $\mu\text{-Si:H}$.

Parámetros	Buffer-a-Si:H	Nueva buffer
W (nm)	2	20
E_G (eV)	1.9-2	1.65
N_c, N_v (cm^{-3})	3×10^{20}	3×10^{19}
μ_n ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	22	10
μ_p ($\text{cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$)	2.6	1
E_D (meV)	48	48
E_A (meV)	30	30

$t_n^+ t_p^-$ (cm ²)	1×10^{-15}	1×10^{-15}
$t_n^0 t_p^0$ (cm ²)	1×10^{-17}	1×10^{-17}
D^- (cm ² s ⁻¹)	3×10^{15}	4×10^{17}
D^0 (cm ² s ⁻¹)	1.5×10^{15}	2×10^{17}
D^+ (cm ² s ⁻¹)	3×10^{15}	4×10^{17}
E_{D^-} (eV)	0.67	0.5
E_{D^0} (eV)	0.97	0.8
E_{D^+} (eV)	1.27	1.1
\bar{D}_D (eV)	0.13	0.13
$\sigma_n^+ \sigma_p^-$ (cm ²)	1×10^{-15}	7.5×10^{-15}
$\sigma_n^0 \sigma_p^0$ (cm ²)	1×10^{-16}	7.5×10^{-17}

Tabla 2: Comparación de los parámetros de la capa “buffer” obtenida con los ajustes de las curvas J-V y SR (columna izquierda) con los de una capa buffer defectuosa que dan lugar a SR>1 (columna derecha)

2.1eV. Con respecto a las otras capas, SR muestra sensibilidad a la movilidad de huecos de la capa (p)-a-SiC:H, y a los parámetros de los 500nm de la capa intrínseca contiguos a la interfaz buffer/i con una escasa dependencia con el espesor. La sensibilidad de SR al contenido espectral de la luz auxiliar es muy elevada obteniéndose el máximo valor con filtros que dejan pasar longitudes de onda por encima de 700nm lográndose duplicar el valor obtenido con el filtro RG630 (ver Figura 3). El haz de prueba produce una redistribución del campo eléctrico debida a una compleja alteración de la carga positiva presente en la capa

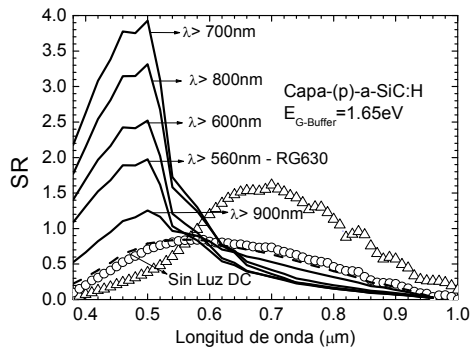


Fig-3: Dependencia de SR > 1 con el espectro de la luz auxiliar. Se indican las longitudes de onda que deja pasar el filtro y se comparan con las SR medidas. dopada (p), en la interfaz p/i y en la zona anterior de la capa intrínseca. La carga positiva se aloja en trampas donoras que al ser mayoritarias en la zona frontal del dispositivo donde el haz AC es absorbido superan ampliamente a las negativas alojadas en los estados aceptores. El campo se debilita en la capa (p) y en la interfaz p/i y se refuerza en toda la capa intrínseca. En la zona frontal de la capa intrínseca la velocidad

de recombinación se vuelve inferior cuando inciden juntos el haz de prueba azul AC y la luz auxiliar roja AC que cuando se ilumina sólo con luz DC cumpliéndose la condición necesaria para predecir SR > 1 (Ecuación 3). Como la tendencia se invierte en las capas (p) e interfaz

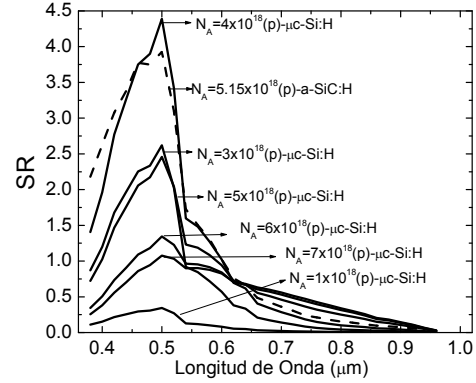


Fig-4: Dependencia de SR > 1 con el dopaje de la capa (p)-μc-Si:H. Se incluye una SR correspondiente a la capa (p)-a-SiC:H para comparación.

p/i el efecto CPG tiene lugar dentro de la capa intrínseca y no en las otras capas. Una mayor intensidad de campo eléctrico se corresponde con una menor tasa de recombinación y con la condición SR > SR_{OPT}. Cuando se reemplaza la capa (p)-a-SiC:H por una de (p)-μc-Si:H eficientemente dopada ($N_A \geq 10^{19} \text{cm}^{-3}$) el efecto SR > 1 desaparece. Sin embargo si se disminuye progresivamente la concentración de dopante en la capa (p)-μc-Si:H, se observan también SR>1 obteniéndose el máximo para $N_A \sim 4 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ reapareciendo el efecto CPG. Nuestras simulaciones también indican que SR> 1 muestran gran sensibilidad a la intensidad de la luz de polarización y poca a la del haz de prueba y a los parámetros de la capa (n).

V - CONCLUSIONES

El efecto “Photogating” complementario de respuestas espectrales por encima de la unidad (SR>1) para longitudes de onda en el azul cuando se ilumina la muestra con una luz auxiliar roja no fue reportada en dispositivos n-i-p de μc-Si:H optimizados para aplicaciones fotovoltaicas. Con simulaciones numéricas se exploraron las condiciones para la observación de SR>1. Se encontró que es necesaria la presencia de una interfaz p/i con una densidad de defectos $\sim 10^{18} \text{cm}^{-3}$, un espesor mínimo, entre 16nm y 30nm, y un gap de movilidad apropiado, entre 1.55eV y 2.1eV. El haz de prueba azul da lugar a un incremento de la intensidad del campo

eléctrico en la capa intrínseca y a un debilitamiento dentro de las capas dopada (p) y la interfaz p/i que genera una tasa neta de recombinación negativa o sea una ganancia que da lugar a una $SR > 1$. El fenómeno puede observarse tanto para capas dopadas (p) de elevado o bajo gap de movilidad. La capa-(p) no debe poseer una elevada concentración de dopaje. Las $SR > 1$ son muy sensibles al gap de movilidad, espesor, densidad de defectos, movilidades y secciones eficaces de captura de las trampas donoras en la interfaz p/i, al boro incorporado a la capa (p) y al contenido espectral e intensidad de la luz auxiliar mientras que presentan poca sensibilidad a la intensidad del haz de prueba y a los parámetros de la capa (n).

Agradecimientos: A la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica por el subsidio PICT-2013-2098.

REFERENCIAS:

- [1] - H.P.Maruska, M.C.Hicks, T.D.Moustakas, R.Froiedman, *IEEE Trans.Electron Devices* **ED-31**, 1343 (1984)
- [2] - H.Hou, S.J.Fonash, *Appl.Phys.Lett.*, **61**, 186 (1002)
- [3] - F.A.Rubinelli, *J.Appl.Phys.*, **75**, 998 (1994)
- [4] - S.H.Bae, S.J.Fonash, *J.Appl.Phys.*, **79**, 2213 (1996)
- [5] - H. Li, R.E.I.Schropp, F.A.Rubinelli, *J. Appl. Phys.*, **108**, 014509, (2010)
- [6] - F. Rubinelli, J. Rath, R. Schropp, *J. Appl. Phys.* **89** (2001) 4010.