sina-pub.ir

تاثیر توزیع دم باند روی به دام افتادن حامل ها در سیلیکون بی نظم هیدروژنه برای کاربردهای سلول خورشیدی

چکیده

به دام افتادن حامل ها در سیلیکون بی نظم هیدروژنه (a-Si:H) توسط تکنیک پمپ-پروب نوری بررسی شده است. حامل های به دام افتاده (الکترون ها) در دم باند هدایت به صورت افزایش تدریجی جریان نوری آشکار می شوند و چگالی آنها از لحاظ کمی تحت فرض تولید حامل و سینتیک بازترکیب تعیین می شود. ما دریافتیم که به دام افتادن حامل شدیداً وابسته به توزیع دم باند و نیز شدت نور پمپ است. به طور مشخص, چگالی الکترون به دام افتاده با انرژی Urbach افزایش می یابد که گسترش دم باند ظرفیت را مشخص می کند. تحت شرایط شدت نور پمپ $10\,\mathrm{mW/cm^2}$ بهره برداری شده در 532 نانومتر, چگالی الکترون به دام افتاده تقریباً $4\times10^{17}\,\mathrm{cm^{-3}}$ برای یک فیلم a-Si:H ذاتی با یک انرژی 45 urbach میلی ولت تعیین شده است. اثرات به دام افتادن حامل در عملکرد این وسیله در سلول های خورشیدی a-Si:H p-i-n تک-پیوند مطالعه شده است. این نتایج نشان می دهند که به دام افتادن حامل موجب کاهش در عامل پر کردن سلول های خورشیدی می شود.

کلمات کلیدی:به دام افتادن حامل-تکنیک پمپ-پروب نوری-سیلیکون بی نظم هیدروژنه (a-Si:H)-سلول های خورشیدی-جریان نوری

1. مقدمه

به دام افتادن حامل, یک عامل کلیدی است که حمل و نقل حامل را در ادوات نیمه هادی بی نظم [1-5] محدود می کند. زمانی که حامل ها در آن ادوات به دام می افتند, به خصوص در لایه فعال, حاملان به دام افتاده منجر به بازترکیب Shockley–Read–Hall (SRH) می شود [6] و از اینرو طول عمر حامل کاهش می یابد. در کنار اینها, یک تجمع از حاملان به دام افتاده, شیفت سطح شبه-فرمی را همراه با حمش باند القا می کند [7,8], که می تواند موجب تنزل

sina-pub.ir

جمع آوری حامل شود. بنابراین به دام افتادن حامل روی بازترکیب و جمع آوری حامل تاثیر می گذارد به طوری که مطالعات در مورد به دام افتادن حامل برای درک حمل و نقل حامل و بهبود عملکرد وسیله سودمند هستند.

در نیمه هادی های بی نظم مانند سیلیکون بی نظم هیدروژنه (a-Si:H), حاملان ممکن است در حالات شکاف (که حالات موضعی نامیده می شوند) همراه با نقایص مختلف به دام بیافتند. حالات شکاف معمولاً به دو گروه طبقه بندی می شوند: حالات دم باند و حالات نیمه-شکاف [9,10]. حالات دم باند, مرتبط با اختلال شبکه از لبه های باند هدایت و ظرفیت (CB و VB) گسترش می یابند. حالات دم CB, تله های الکترون را نشان می دهند, در حالیکه حالات دم VB, تله های حفره را نشان می دهند [6]. به دلیل وجود این تله ها, تحرک حامل, u, به شدت محدود می شود. از سوی دیگر, حالات میان-شکاف که از پیوندهای آویزان (DBها) نشات می گیرند, نزدیک میانه باندگپ تشکیل می شوند. آنها به صورت مراکز بازترکیب برای حاملان رفتار می کنند. بنابراین, طول عمر حامل, T, اغلب تحت حاکمیت چگالی این حالات میان-شکاف است [6].

در میان نیمه هادی های بی نظم, a-Si:H به طور گسترده برای کاربردهای مختلف وسیله استفاده می شود. به طور مثال, در سلول های خورشیدی Si فیلم-نازک [11,12], یک فیلم a-Si:H به عنوان لایه فتوولتائیک استفاده می شود که نقش های مهمی را در حمل و نقل حاملان و جذب نور ایفا می کند. در سلول های خورشیدی پیوند-ناهمگون (c-Si) بلوری/بی نظم [13,14], یک لایه نازک a-Si:H برای رویینگی سطح c-Si به کار گرفته می شود و نیز به طور انتخابی حاملان را انتقال می دهد, یعنی الکترون ها یا حفره ها تا الکترودها. مشخص شده است که رویینگی و انتقال انتخابی برای این نوع سلول های خورشیدی با بازده-بالا مورد نیاز است [15].

تا به حال, به دام افتادن حامل در یک فیلم a-Si:H به خوبی توسط زمان تکنیک پرواز مطالعه شده است [2-5]. حالات شکاف, یعنی, منشا به دام افتادن حامل توسط چندین روش مانند روش جریان نوری ثابت (CPM) -16] [19, طیف بینی جریان نوری تبدیل فوریه (FTPS) [20,21], طیف بینی (MPC) جریان نوری مدوله شده و طیف بینی گذرای سطح عمیق (DLTS) [23-25] مشخص شده است. به طور خاص, چگالی حالات میان-شکاف, مرتبط با DBها توسط رزونانس اسپین الکترون (ESR) [26,27] تعیین کمیت شده است. علاوه بر این, توزیع حالات

sina-pub.ir

میان-شکاف توسط هدایت-نوری پرتوی-دوگان (DBP) مطالعه شده است که در آن نور بایاس برای کنترل دقیق سطح شبه-فرمی [28] استفاده می شود. هرچند, تاثیر توزیع حالت شکاف روی به دام افتادن حامل و عملکرد وسیله به طور نظام مند بررسی شده است.

در این مقاله, ما به دام افتادن حامل در فیلم های ذاتی a-Si:H از نقطه نظر توزیع دم باند بررسی می کنیم. چگالی (الکترون) حامل به دام افتاده در دم CB, به طور کمیتی با استفاده از یک تکنیک پمپ-پروب نوری تعیین می شود. این تکنیک قبلاً برای نظارت آزمایشگاهی بر فرآیندهای رشد فیلم در a-Si:H [29] به کار برده شده است. به دلیل حساسیت و راحتی بالای آن, ما این تکنیک را به مشخص نمودن خارج از آزمایشگاهی a-Si:H در این مقاله گسترش دادیم. یک مزیت این تکنیک اینست که می توان چگالی تله های الکترون ها در نمونه ها با ضخامت حدود چند صد نانومتر را ارزیابی نمود [29] که شامل ضخامت نوعی در سلول های خورشیدی a-Si:H مدرن می شود [11,12]. این متضاد با مورد تکنیک زمان پرواز است که در آن نمونه های دارای ضخامت چندین میکرومتر لازم هستند [2-5]. با استفاده از این تکنیک پمپ-پروب و CPM, یک همبستگی بین چگالی الکترون به دام افتاده و گسترش دم VB مطالعه شده است. اثرات به دام افتادن حامل روی عملکردهای وسیله در سلول های خورشیدی a-Si:H p-i-n بررسی شده است.

این مقاله شامل بخش های زیر می شود. در بخش بعدی (بخش 2), یک تئوری برای تولید و بازترکیب حامل به طور خلاصه به منظور به دست آوردن چگالی حامل به دام افتاده توصیف شده است. در بخش آزمایشی (بخش 3), ما تهیه نمونه, تکنیک های مشخص نموده تله و ساختار سلول خورشیدی a-Si:H را توضیح می دهیم. در نتایج و بررسی (بخش 4), چگالی حامل به دام افتاده, توزیع دم حالت و عملکرد وسیله گزارش شده است. سپس, کار, منشا تله ها, حمل و نقل حامل و به دام افتادن مورد بررسی قرار می گیرند. نهایتاً, عملکردهای سلول خورشیدی از نظر حمل و نقل حامل و به دام افتادن آن بررسی می شوند.

2. تئوری

sina-pub.ir

حاملان به دام افتاده توسط یک تکنیک پمپ-پروب نوری با استفاده از تنظیمات آزمایشی نشان داده شده در شکل 1 تشخیص داده می شوند. این پمپ, حاملان را تولید می کند و تله ها را پر می کند, در حالیکه پروب, حاملان به دام افتاده را به CB ساطع می کند (همچنین شکل 2(a) را ببینید). پمپ به سطح شبه-فرمی می رسد که از پروب تاثیر نمی پذیرد (این مورد در بخش 4.1 تایید خواهد شد). حاملان تولید شده با اتصالات جمع آوری می شوند و به صورت جریان نوری اندازه گیری می شوند. جریان نوری به طور مختصر افزایش می یابد در حالیکه یک نمونه با پروب علاوه بر پمپ تابش می کند [30]. این افزایش از تله-زدایی حاملان نشات می گیرد و حاملان به دام افتاده به صورت افزایش تدریجی جریان نوری سنجیده می شوند. از این به بعد ما آن را یک جریان تله می نامیم.

در حالت پایدار,

$$I_p = eg_v\tau v_d, \quad (1)$$

$$I_t = eg_t\tau v_d, \quad (2)$$

که در آن $e, g_v, g_t, \tau,$ و vd, به ترتیب بار مقدماتی, نرخ های تولید حامل تحت تابش پمپ و پروب (شکل 2(a)), طول عمر بازترکیب و سرعت رانش حاملان می باشند. در اینجا, بازترکیب توسط t مشخص می شود و تحت سلطه نوع SRH واسطه تله [6] برای حالات میان-شکاف بزرگ و پدیده های تونل زنی برای حالات دم باند بزرگ می باشد [9]. برای تولید حامل, gv و gt, به صورت زیر بیان می شوند.

$$g_v = n_v\sigma_v\Gamma_{\text{pump}}, \quad (3)$$

$$g_t = n_t\sigma_t\Gamma_{\text{probe}}, \quad (4)$$

که در آن $n_v, n_t, \sigma_v, \sigma_t, \Gamma_{\text{pump}},$ و Γ_{probe}, به ترتیب چگالی های حاملان ظرفیت و به دام افتاده (الکترون ها), سطوح مقاطع جذب نوری حاملان ظرفیت و به دام افتاده (الکترون ها), و شارهای فوتون نور پمپ و پروب می باشند. با تقسیم It بر Ip, چگالی حامل به دام افتاده, nt به صورت زیر به دست می آید.

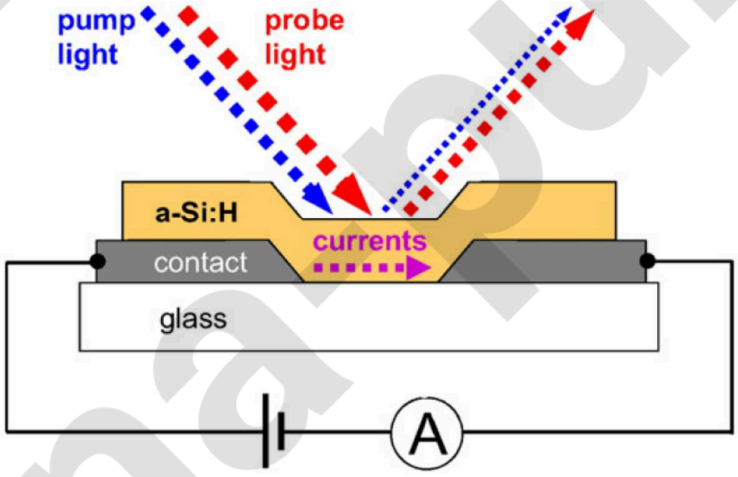
sina-pub.ir

$$n_t = \frac{\sigma_v \Gamma_{\text{pump}}}{\sigma_t \Gamma_{\text{probe}}} \frac{I_t}{I_p} n_v. \quad (5)$$

ما در اینجا خاطرنشان می کنیم که nt تابعی از t نیست زیرا در هنگام تقسیم It بر Ip از آن صرفه نظر می شود. برای راحتی, ما nt را توسط nv نرمالیزه می نماییم. چگالی حامل به دام افتاده نرمالیزه شده, nt/nv, به صورت زیر ارائه می شود

$$n_t/n_v = \frac{\sigma_v}{\sigma_t} \frac{\Gamma_{\text{pump}}}{\Gamma_{\text{probe}}} \frac{I_t}{I_p}. \quad (6)$$

در این مطالعه, ما فرض می کنیم که $\sigma_v/\sigma_t = 1$, زیرا عناصر ماتریس نوری فیلم های a-Si:H کمتر وابسته به انرژی فوتون در گستره $h\nu = 0.6$ تا 3.0 eV [31] هستند. یک فرض مشابه نیز در مرجع [32] برای بررسی طیف جذب زیر-شکاف توصیف شده است. انرژی های فوتون پمپ و پروب مورد استفاده در این مطالعه نیز در این طیف گنجانده شده اند که بعداً توصیف خواهد شد (بخش 3.2).



شکل 1. نمایش شماتیک از راه اندازی آزمایشی. یک فیلم a-Si:H با نور پمپ و پروب برای القای جریان های نوری و تله تابش می کند. شدت های نور پمپ و پروب در فرکانس های مختلف مدوله می شوند و جریان های نوری در حال

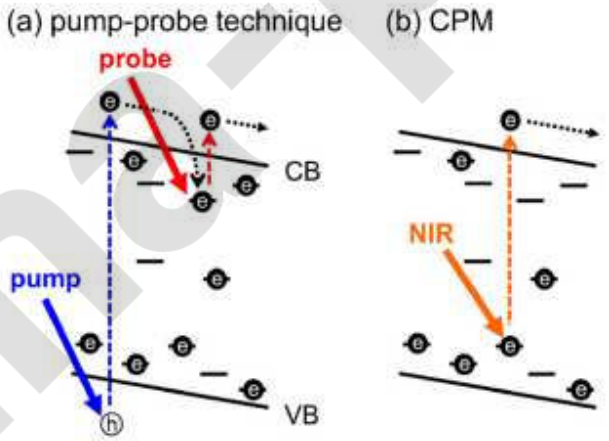
sina-pub.ir

نوسان و تله با تکنیک قفل-داخلی آشکار می شوند. ساختار نمونه یک فیلم a-Si:H $(220 \pm 10\ \text{nm})$ روی زیرلایه شیشه ای با اتصالات بهم جفت شده است. این اتصالات در 10 ولت با توجه به یکدیگر بایاس می شوند.

3. آزمایش

3.1. آماده سازی فیلم های a-Si:H

به منظور نشان دادن سودمندی تکنیک نوری پمپ-پروب برای ارزیابی چگالی الکترون های به دام افتاده در a-Si:H, ما از این تکنیک برای یک سری از نمونه های a-Si:H, استفاده نموده ایم که در آن دمای رشد تغییر یافت. فیلم های a-Si:H ذاتی روی زیرلایه های شیشه ای با استفاده از رسوب-بخار-شیمیایی ارتقایافته پلاسما, در دماهای رشد مختلف $Tg = 373\ K–593\ K$ اماده سازی می شوند. PECVD ما, با استفاده از تخلیه یک ترکیب گاز هیدروژن (H2) و سیلان (SiH4) جفت شده-خازنی 60 مگاهرتز در پیکربندی صفحه-موازی مورد بهره برداری قرار گرفت. این ترکیب گاز از سردوش الکترود (PWD) برقی عرضه شد؛ نرخ های جریان H2 و SiH4 به ترتیب 50 و 10 sccm بودند. تخلیه بین PWD و الکترودهای (GND) زمین شده از نظر الکتریکی توسط به کار بردن یک ولتاژ 35 ولت پیک تا پیک در فشار 0.3 Torr حفظ شد. شکاف الکترود در 22 میلی متر تنظیم شد. ما یک زیرلایه شیشه ای را روی الکترود GND قرار دادیم که در Tg معین حرارت داده شد. یک فیلم a-Si:H روی زیرلایه در نرخ $0.23 \pm 0.04\ \text{nm/s}$, رشد داده شد و ضخامت در $220 \pm 10\ \text{nm}$ توسط تنظیم دوره رشد کنترل شد. جزئیات برای راه اندازی PEVCD ما در جای دیگر توصیف شده است [33-35].



sina-pub.ir

دینامیک حامل در یک تکنیک پمپ-پروب و روش ثابت فوتونیک (CPM). (الف) در یک روش پمپ پروب، نور پمپ تولید کننده های آزاد و تله ها را پر می کند، در حالی که نور پروب، حامل های متوقف شده (الکترون ها) را در دم CB به CB منتشر می کند. (ب) در CPM، نور نیمه مادون قرمز (NIR) نزدیک به مادون قرمز موجب تحریک الکترون ها در دم VB به CB

3.2 اندازه گیری های جریان نوری و تله

ما Ip و It را در یک فیلم a-Si:H تحت نور پمپ و پروب اندازه گیری نمودیم که در شکل 1 نشان داده شده است. دو لیزر به عنوان منابع نوری استفاده شدند: یک لیزر مرئی 532 نانومتر $(h\nu_{\text{pump}} = 2.33\ \text{eV})$ بهره برداری شده در یک توان خروجی (CW) موج-پیوسته 10 میلی وات $(\Gamma_{\text{pump}} = 2.7 \times 10^{16}\ \text{photons/cm}^2\text{s})$ برای پمپ و لیزر نزدیک مادون قرمز 1342 نانومتری $(h\nu_{\text{probe}} = 0.92\ \text{eV})$ در یک توان خروجی CW به اندازه 500 میلی وات $(\Gamma_{\text{probe}} = 3.4 \times 10^{18}\ \text{photons/cm}^2\text{s})$ برای پروب. بنابراین انرژی های فوتون پمپ و پروب برای برآورده سازی $h\nu_{\text{pump}} > E_g > h\nu_{\text{probe}}$ انتخاب می شوند که در آن Eg, باندگپ نوری است. شدت های این نور, Ppump و Pprobe با فیلترهای چگالی خنثی تنظیم می شوند. هر دوی نور پمپ و پروب روی فیلم a-Si:H با یک مساحت $\approx 1\ \text{cm}^2$ در زاویه برخوردی 45 درجه جمع شدند. سپس حاملان تولید شده با یک جفت اتصال بهم جفت شده جمع آوری شدند که جریان های Ip و It را ارائه دادند. از اینرو این جریان ها توسط جریان الکترون غالب می شوند نه به واسطه جریان حفره [36], حاملان به دام افتاده آشکار شده با این تکنیک به عنوان الکترون های به دام افتاده در نظر گرفته می شوند. این اتصالات از Ag پوشش داده شده با Ga Zno-دوپ شده با ضخامت 40 نانومتر ساخته شدند و در 10 ولت با توجه به یکدیگر بایاس شدند. اتصالات بهم جفت شده, نوزده کانال را فراهم نمودند. ابعاد هر کانال 0.2 میلی متر در طول و 5 میلی متر در عرض بودند. تمام کانال ها شامل مساحت تابش یافته بودند.

چون It در مقایسه با Ip نسبتاً کوچک بود, ما از تکنیک قفل کردن برای متمایز نمودن It از Ip استفاده نمودیم. نور پمپ و پروب در 1.001 کیلوهرتز و 0.999 کیلوهرتز مدوله شد و جریان های در حال نوسان در این دور فرکانس با

sina-pub.ir

استفاده از یک تقویت کننده قفل کردن با ثابت زمانی 100 یملی ثانیه استخراج شدند. ما تایید نمودیم که It کمتر وابسته به فرکانس برش از 10 تا 1 کیلوهرتز بود؛ این مقدار تا $\pm 20\%$، به دلیل اورشوت شدت نور پروب تغییر یافت. با Ip و It اندازه گیری شده, چگالی حامل به دام افتاده از معادله (5) محاسبه شد.

3.3 مشخص نمودن حالت شکاف

توزیع حالت شکاف توسط استفاده از یک تکنیک ایجاد شده CPM اندازه گیری شد [16-19]. نمونه های ارزیابی شده با CPM, نمونه های استفاده شده برای آشکارسازی حاملان به دام افتاده بودند. در CPM, یک فیلم a-Si:H روی زیرلایه شیشه ای با نور نزدیک مادون-قرمز شبه-مونوکروماتیک (NIR) برای تحریک الکترون ها در دم VB تا CB تابش نمود, همانطور که در شکل 2(b) نشان داده شده است. سپس الکترون های تحریک شده با اتصالات جمع آوری شدند و به عنوان یک جریان جذب زیر-شکاف اندازه گیری شدند. این جریان در حین اسکن نمودن طول موج نور NIR برای حفظ طول عمر الکترون ثابت نگهداشته شد. برای نمونه های ما, این جریان در 0.5 pA توسط تنظیم شدت نور NIR تثبیت شد. سپس, یک طیف جذب زیر-شکاف, یعنی طیف CPM توسط اسکن طول موج در گستره 700 نانومتر تا 1300 نانومتر به دست آمد (یعنی, انرژی فوتون بین 10.3 و 1.77 الکترون ولت). کمیت این طیف با استفاده از یک ضریب جذب, آلفا, در 1.77 الکترون ولت که از بیضی سنجی اسپکتروسکوپیک (SE) تحت جذب مدل Tauc-Lorentz تعیین شد [39,40]

توزیع حالت-شکاف توسط دو پارامتر به دست آمده از یک طیف CPM مشخص شد: انرژی Urbach [41] و چگالی حالات میان-شکاف [9,10]. انرژی Urbach, Eu, یعنی, معیاری برای گسترش دم VB, از یک میرایی نمایی طیف در گستره 1.45 تا 1.75 الکترون ولت محاسبه شد. چگالی حالات میان-شکاف از ضریب جذب در 1.2 الکترون ولت, $\alpha_{1.2eV}$، ارزیابی شد. این $\alpha_{1.2eV}$، برای منعکس نمودن چگالی حالات میان-شکاف شناخته شده است و به طور خطی با چگالی DBs, n_{DB} افزایش می یابد [42,43]. برای تعیین کمی n_{DB}, ما یک اندازه گیری ESR را برای یک فیلم a-Si:H با ضخامت 220 نانومتر و تهیه شده روی شیشه کوارتز در $T_g = 473$ K انجام دادیم. در اندازه گیری ESR [26,27], جذب مایکروویو در مقدار-g برای 2.0055 تحت میدان مغناطیسی

sina-pub.ir

اندازه گیری شد. مقدار مطلق n_{DB} از جذب, در مقایسه با مقدار مطلق n_{DB} نمونه کنترل شده استنباط شد که در آن چگالی DB شناخته شد.

3.4 سلول های خورشیدی A-Si:H p-i-n

سلول های خورشیدی تک-پیوند A-Si:H p-i-n برای مطالعه همبستگی بین به دام افتادن حامل ها و عملکرد سلول خورشیدی آماده شد. ما سلول های خورشیدی را روی زیرلایه های شیشه ای بافته شده (نوع-Asahi U) با یک ساختار زیر ساختیم: یک F-doped SnO_2/p-layer(a-SiC:H 10 nm)/i-layer(a-Si:H 220 nm)/n-layer(μc-Si:H 30 nm)/Ga-doped ZnO(40 nm)/Ag(200 nm) زیرلایه شیشه ای. در این سلول های خورشیدی, لایه-i a-Si:H در Tg مختلف $373\ K - 553\ K$ برای تغییر حمل و نقل و به دام افتادن حامل رشد یافت. رسوب لایه-i در Tg مختلف ممکن است از ویژگی های واسطه p-لایه و p-i در چنین ساختار فرا-مستقیمی تاثیر بپذیرد؛ هرچند, عملکرد سلول ابتدائاً توسط حمل و نقل و به دام افتادن حامل در لایه-i اداره می شود. مساحت فعال سلول های خورشیدی 0.25 سانتی متر مربع بود. عملکرد سلول خورشیدی در شرایط آزمون استاندارد اندازه گیری شد: جرم هوا (AM) 1.5, $100\ mW/cm^2$ تابش در 25 درجه.

4. نتایج و بررسی

4.1 اشغال تله ها

اشغال تله ها توسط تغییر Ppump در آزمایشات پروب-پمپ مطالعه شده است. شکل 3 نشاندهنده وابستگی-Ip,It Ppump و nt/nv در فیلم رشد یافته a-Si:H در $T_g = 473\ K.$. همانطور که مشخص است, Ip متناسب با Ppump در گستره وسیع Ppump است, در حالیکه It, گرایش به اشباع تدریجی را در شدت های بالا نشان می دهد $P_{pump} \gtrsim 1\ mW.$. بر این اساس, nt/nv, که از معادله (6) با نسبت It به Ip محاسبه می شود, گرایش مشابه به It روی Ppump را نشان می دهد. چنین گرایشی نشان می دهد که حاملان بیشتر در Ppump بالاتر جمع می شوند و بنابراین اشغال تله به تدریج افزایش می یابد.

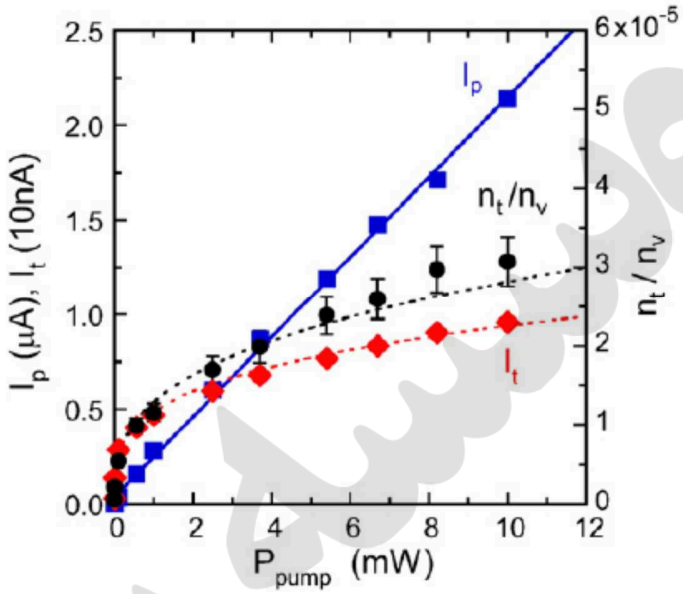
sina-pub.ir

این اشغال از تابش نور پروب تاثیر نمی پذیرد ($P_{probe} \leq 500\ mW$). این مورد توسط یک رابطه خطی بین It و Pprobe نشان داده می شود, همانطور که در شکل 4 نشان داده شده است. مطابق با معادله (5), انتظار می رود که It به طور خطی با Pprobe افزایش می یابد, در حالیکه اشغال, یعنی, nt ثابت می ماند. اگر مقداری زیادی از حاملان تحت شرایط Pprobe-بالا از تله بیرون بیایند, It باید کاهش یابد؛ هرچند این امر در مورد ما مشاهده نشده است, همانند شکل 4.

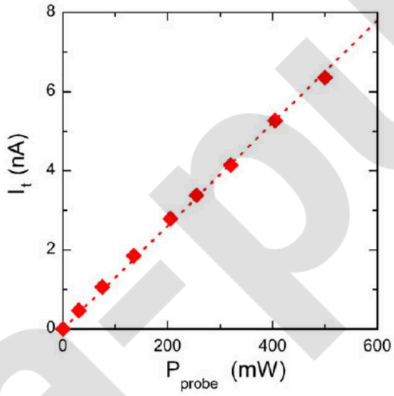
4.2 منشا حاملان به دام افتاده

منشا حاملان به دام افتاده (الکترون ها) را می توان از ارزیابی مقدار کمیتی nt استنباط نمود و آن را با چگالی های شکاف-میانی و حالات دم CB مقایسه نمود. همانطور که در شکل 3 نشان داده شده است, nt/nv به صورت $\approx 3 \times 10^{-5}$ برای یک فیلم a-Si:H رشد یافته در $T_g = 473\ K$ تحت یک شرایط تابش $P_{pump} = 10\ mW$ به دست می آید. با استفاده از چگالی متوسط حالات VB, $2 \times 10^{22}\ cm^{-3}\ eV^{-1}$ [31], و در نظر گرفتن پهنای انرژی برای تحریک الکترون توسط پمپ $(h\nu_{pump}\text{-}E_g = 2.33 - 1.73 = 0.6\ eV)$, ما برآورد می کنیم که $n_v = 1.2 \times 10^{22}\ cm^{-3}$. با این مقدار nv, ما $n_t \approx 4 \times 10^{17}\ cm^{-3}$ از معادله (5).

sina-pub.ir



شکل 3. جریان نوری, Ip, جریان تله, It, و چگالی حامل به دام افتاده نرمال شده, nt/nv به صورت تابعی از شدت نور پمپ, Ppump. Ip به طور خطی با Ppump افزایش می یابد, در حالیکه It و nt/nv, گرایش به اشباع تدریجی را در Ppump بالا نشان می دهند. خط توپر, بهترین تناسب خطی Ip است. خطوط نقطه نقطه, راهنماهایی برای چشمان هستند.



شکل 4. It به عنوان تابعی از شدت نور پروب, Pprobe. It به طور خطی با Pprobe افزایش می یابد. خط تکه تکه, تناسب خطی را نشان می دهد.

برای چگالی حالات میان-شکاف, ما آن را به صورت n_{DB}در نظر می گیریم. اندازه گیری ESR ما, $n_{DB} = 4.9 \pm 0.5 \times 10^{16}\,\mathrm{cm}^{-3}$ را برای فیلم ارائه می دهد که nt ذکر شده در بالا را ارائه داد. همانند حد

sina-pub.ir

بالایی چگالی حالات دم CB, n_{tail}, این مقدار تقریباً $10^{19}\,\text{cm}^{-3}$ [44]. است. بنابراین, ما یک رابطه $n_{\text{DB}} < n_t < n_{\text{tail}}$ را خاطرنشان می کنیم. این رابطه تایید می کند که به دام افتادن حامل عمدتاً در حالات دم CB رخ می دهد نه حالات میان-شکاف. به علاوه, مقدار nt تعیین شده در این تحلیل, سازگار با چگالی توزیع حالت در دم CB a-Si:H است که با طیف بینی MPC به دست می آید [22].

4.3 حمل و نقل و به دام افتادن حامل

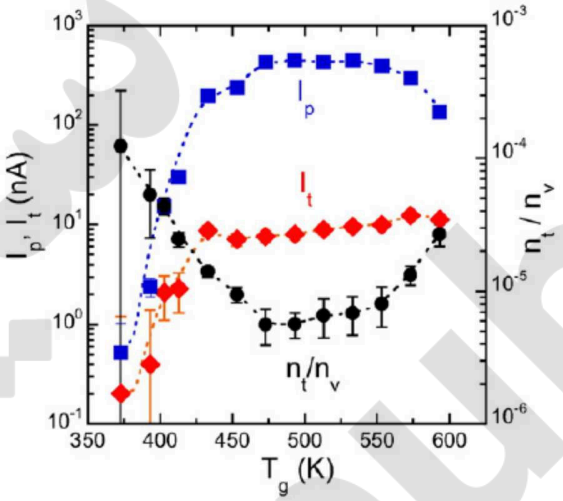
در اینجا, ما حمل و نقل و به دام افتادن حامل را در فیلم های a-Si:H رشد یافته در Tg مختلف توصیف می کنیم. حمل و نقل حامل که اغلب توسط ضرب $\mu\tau$ مشخص می شود, با Ip تحت وضعیت ثابت gv ارزیابی می شود, زیرا $I_p \propto g_v \mu\tau$ [36]. شکل 5, Ip, It و nt/nv را به عنوان تابعی از Tg نشان می دهد. همانطور که نشان داده شده است, Ip به طور گسترده حول و حوش $T_g = 493\ \text{K},$ پیک می شود و به طور چشمگیر در Tg پایین $(T_g \lesssim 433\ \text{K}).$ پیک می شود. از سوی دیگر, It, گرایشی متفاوت از گرایش Ip, به خصوص در $T_g \gtrsim 433\ \text{K}$ بالا را نشان می دهد؛ به طور آرام با Tg افزایش می یابد. با مقایسه It و Ip, تایید می کنیم که It نوعاً متناظر با یک درصد پایین از Ip است. مقادیر نوعی Ip و It, 500 نانوآمپر و 10 نانوآمپر برای یک فیلم آماده شده در پیرامون $T_g = 493\ \text{K}$ تحت شرایط تابش خود هستند.

ما دریافتیم که nt/nv برای یک فیلم تهیه شده حول و حوش $T_g = 493\ \text{K}$ مینیمم می شود. کمترین مقدار nt/nv به اندازه $\approx 5 \times 10^{-6}$ تحت تابش نسبتاً ضعیف $P_{\text{pump}} = 0.4\,\text{mW}.$ تعیین می شود. یک فیلم a-Si:H نشاندهنده کمترین nt, بالاترین Ip را نشان می دهد. این تناظر تایید می کند که بالاترین حمل و نقل حامل زمانی به دست می آید که به دام افتادن تله مینیمم شود.

4.4 توزیع حالت شکاف

sina-pub.ir

طیف های جذب زیر-شکاف فیلم های a-Si:H رشد یافته در سه Tg مختلف در شکل 6 نشان داده شده است. همانطور که انتظار می رود [16–19]، دو ویژگی برجسته متمایز شده است. میرایی نمایی در گستره انرژی فوتون از ≈ 1.45 تا ≈ 1.75 الکترون ولت و یک پیک گسترده حول و حوش 1.2 الکترون ولت. میرایی نمایی، مرتبط با دم VB، توسط Eu مشخص می شود. همانطور که در شکل 7(a) مشخص شده است، Eu در گستره $\approx 40\ \text{meV}$ تا $\approx 65\ \text{meV}$ است. این مقدار در $T_g = 493\ \text{K}$ مینیمم می شود که موافق با یک دمای بهینه به خوبی شناخته شده برای رشد a-Si:H گزارش شده در کارهای اولیه است [37,38]. خطاها در Eu به طور نسبی به دلیل یک تداخل مشاهده شده در طیف جذب زیر-شکاف بزرگ هستند.

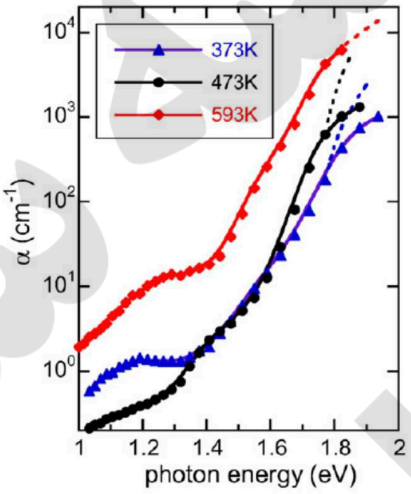


شکل 5. Ip، It و nv/nt در فیلم های a-Si:H ذاتی رشد یافته در دمای رشد مختلف. Tg، nv/nt در فیلم های a-Si:H در حدود $T_g = 493\ \text{K}$، کاهش می یابد که در آن Ip، ماکزیمم می شود. هر دوی Ip و It به طور چشمگیری با Tg در $T_g \lesssim 433\ \text{K}$ افزایش می یابد. خطوط نقطه نقطه، راهنماها برای چشم هستند.

پیک گسترده پیرامون 1.2 الکترون ولت در شکل 6، منعکس کننده وجود حالات میان-شکاف است که در بخش 3.3 توصیف شده است. چگالی این حالات با $\alpha_{1.2\text{eV}}$ ارزیابی می شود که در شکل 7(b) نشان داده شده است. فیلم های ما دارای $\alpha_{1.2\text{eV}}$ از $\approx 0.3\ \text{cm}^{-1}$ تا $\approx 10\ \text{cm}^{-1}$، وابسته به Tg، هستند. $\alpha_{1.2\text{eV}}$ به دست آمده حول و حوش $T_g = 473\ \text{K}$ کاهش می یابد که سازگار با آزمایشات دیگر انجام شده در کارهای اولیه

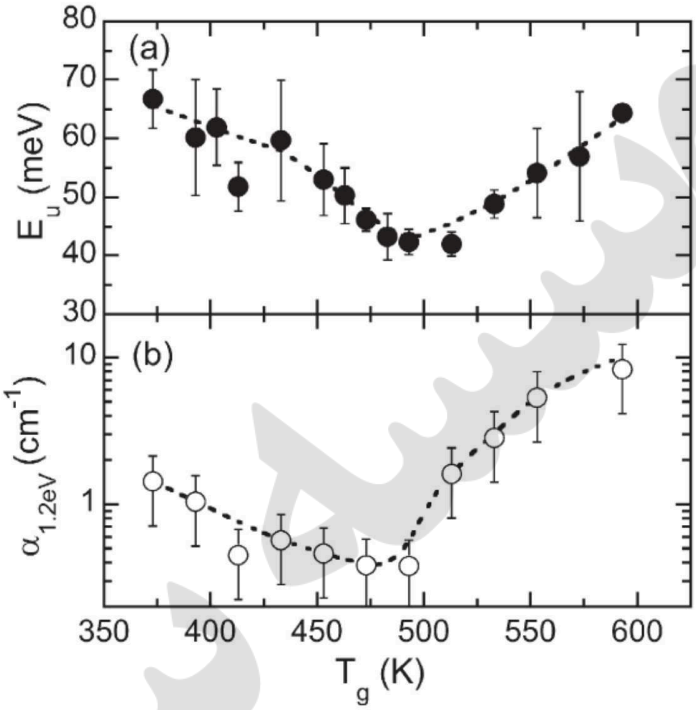
sina-pub.ir

[19] است. هرچند, مقادیر $\alpha_{1.2eV}$, فیلم های رشد یافته در $T_g\ (T \lesssim 433\ \mathrm{K})$ در مقایسه با مقادیر $\alpha_{1.2eV}$, فیلم های تهیه شده توسط دشارژهای فرکانس رادیویی 13.6 مگاهرتز نسبتاً کم هستند [19]. این می تواند اثر بمباران یون کم را در طی رشد a-Si:H با فرکانس رادیویی 60 مگاهرتز نسبتاً بالا نشان دهد. مشخص شده است که انرژی بمباران یونی با افزایش فرکانش دشارژ به طور چشمگیر کاهش می یابد [45] و از اینرو خلق نقص DB حذف می شود.



شکل 6. طیف CPM برای فیلم های a-Si:H رشد یافته در Tg مختلف. ضریب جذب, آلفا, به صورت انرژی فوتون ترسیم می شود. دو ویژگی برجسته متمایز می شوند: میرایی نمایی در گستره انرژی فوتون از ≈ 1.45 تا $\approx 1.75\ \mathrm{eV}$ و یک پیک گسترده حول و حوش 1.2 الکترون ولت. خطوط توپر, راهنماهایی برای چشمان هستند. خطوط تکه تکه, آلفای تعیین شده از بیضی سنجی طیفی بینی (SE) را تحت فرض مدل Tauc-Lorentz نشان می دهند. خطوط توپر (طیف های CPM) و تکه تکه (طیف های نشان دهنده SE) به طور نسبی در ارتباط با 1.77 الکترون ولت صاف هستند. انحراف از منحنی توپر در $\geq 1.77\ \mathrm{eV}$ نشاندهنده اشباع جریان حذف میان-شکاف ناشی از اثرات بازترکیب سطحی است.

sina-pub.ir



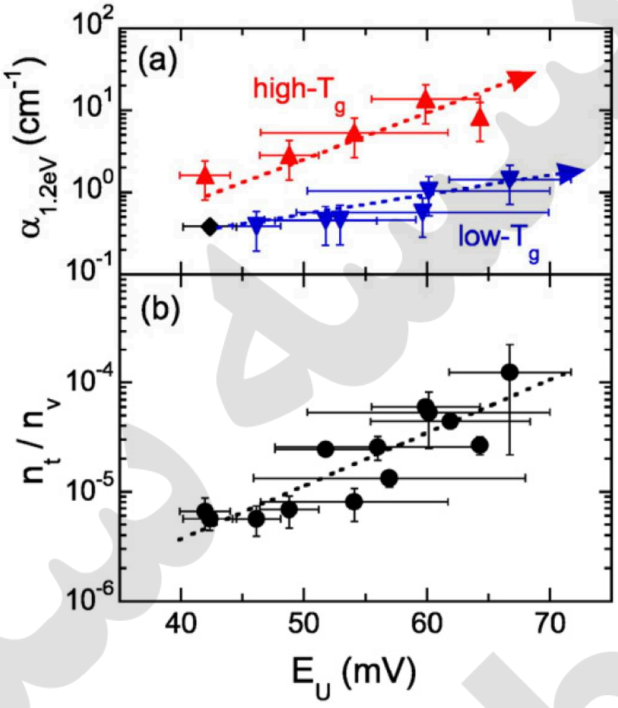
شکل 7. (a) انرژی Urbach, Eu, (b) ضریب جذب در 1.2 الکترون ولت, $\alpha_{1.2eV}$, به عنوان تابعی از Tg, Eu در گستره $\approx 40\ \text{meV}$ تا $\approx 65\ \text{meV}$ است و حول و حوش $T_g = 493\ \text{K}$ مینیمم می شود. (b) $\alpha_{1.2eV}$ در گستره $\approx 0.3\ \text{cm}^{-1}$ تا $\approx 10\ \text{cm}^{-1}$ برای فیلم های a-Si:H رشدیافته در $T_g = 373\ \text{K}$ تا $593\ \text{K}$ است. خطوط نقطه نقطه, راهنماهایی برای چشمان هستند.

4.5 دروازه های شکاف و به دام افتادن حامل

حال, ما روابط میان $\alpha_{1.2eV}$, n_t/n_v و Eu را برای بررسی به دام افتادن حامل از نظر توزیع دم باند توصیف می کنیم. همانطور که در شکل 8(a) نشان داده شده است, $\alpha_{1.2eV}$ با Eu افزایش می یابد, با این حال, این دو گرایش متفاوت را نشان می دهد, یعنی, شیب های تند و آرام با توجه به Eu وابسته به Tg. شیب تند برای فیلم های a-Si:H تهیه شده در $T_g \gtrsim 493\ \text{K}$ به دست می آید در حالیکه شیب آرام, برای فیلم های رشد یافته در $T_g \lesssim 493\ \text{K}$ است. این نتیجه نشان می دهد که حالات میان-شکاف بیشتر برای فیلم های a-Si:H رشد یافته در Tg بالاتر در مقایسه با فیلم های رشدیافته در Tg پایین تر رخ می دهد, حتی اگر توزیع دم VB به طور مشابه تشکیل شود. این احتمالاً مرتبط با عدم جذب هیدروژن از سطح در حال رشد تحت PEVCD است [46]. عدم جذب هیدروژن در Tg

sina-pub.ir

بالا برجسته است که نقایص DB را در سطح و فیلم حجمی می گذارد [26,27] و بنابراین بیشتر حالات میان-شکافی تشکیل می شوند.



شکل 8. $\alpha_{1.2eV}$ و n_t/n_v به عنوان تابعی از Eu. (a) $\alpha_{1.2eV}$ با Eu افزایش می یابد. با این حال, این دو گرایش متفاوت را نشان می دهد, یعنی, شیب های تند و آرام با توجه به Eu وابسته به Tg. شیب تند که توسط فلش نقطه نقطه بالایی نشان داده شده است برای فیلم های a-Si:H تهیه شده در $T_g \gtrsim 493$ K به دست می آید در حالیکه شیب آرام, که توسط فلش نقطه نقطه پایینی نشان داده شده است برای فیلم های رشد یافته در $T_g \lesssim 493$ K است. نماد الماس, نشاندهنده $\alpha_{1.2eV}$ به دست آمده در است, که در آن n_t/n_v مینیمم می شود (b) n_t/n_v به طور یکنواخت با Eu افزایش می یابد. n_t/n_v از $\approx 5 \times 10^{-6}$ در $E_U \approx 40$ meV تا $\approx 1.5 \times 10^{-4}$ در $E_U \approx 65$ meV تغییر می کند. خطوط نقطه نقطه, راهنمایی برای چشمان هستند.

یافته اصلی ما در این مطالعه, یک همبستگی مناسب بین n_t/n_v و Eu است که در شکل 8(b) نشان داده شده است. ما دریافتیم که n_t/n_v به طور یکنواخت با Eu افزایش می یابد. n_t/n_v از $\approx 5 \times 10^{-6}$ در

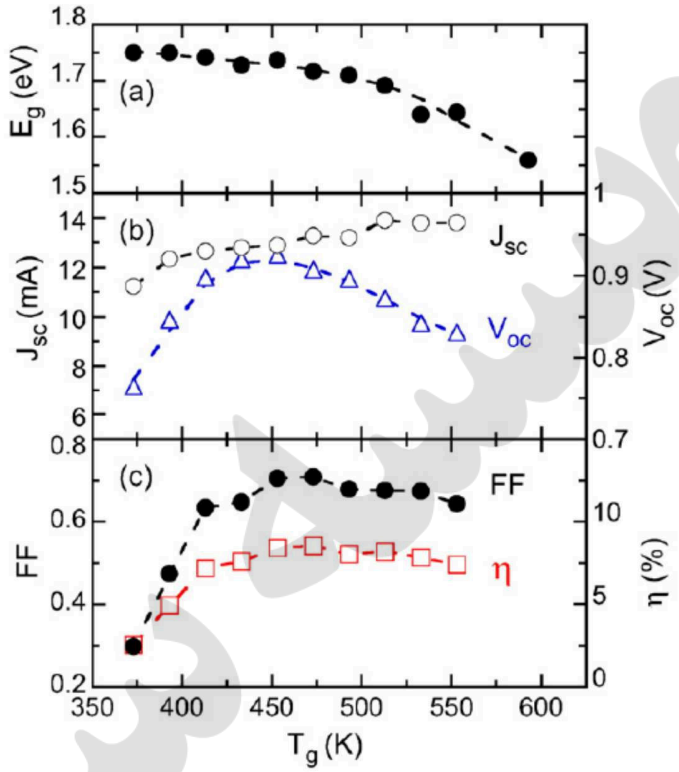
sina-pub.ir

$E_U \approx 40$ meV تا $\approx 1.5 \times 10^{-4}$ در $E_U \approx 65$ meV تغییر می کند. زیرا n_t/n_v به شدت مرتبط با Eu است که تیز شدن توزیع دم باند, برای کاهش حاملان به دام افتاده بسیار کارآمد است. در کنار اینها, چنین همبستگی خوبی بین n_t/n_v و Eu با نتایج قبلی سازگار است [47] که در آن انرژی مشخصه حالات دم CB و حالات دم VB از نزدیک به یکدیگر مرتبط هستند. با این حال باید توجه نمود که انرژی مشخصه حالات دم CB از تحلیل ترانزیستور فیلم-نازک ارزیابی می شود [47] و بنابراین این مقدار, ویژگی های a-Si:H نزدیک عایق گیت/ واسطه a-Si:H را نشان می دهد. از سوی دیگر, رابطه بین nt/nv و Eu به دست آمده در مقاله حاضر نشاندهنده ویژگی های حجمی فیلم های a-Si:H است.

4.6 به دام افتادن حامل و عملکردهای سلول خورشیدی

در این بخش, تاثیر به دام افتادن حامل روی عملکرد سلول خورشیدی را نشان می دهیم. همانطور که در بخش 3.4 دیدیم, ما سلول های خورشیدی a-Si:H p-i-n را آماده نمودیم که در آن لایه-i از a-Si:H در Tg متفاوت برای تغییر توزیع حالت شکاف و بنابراین nt در لایه-i رشد یافت. شکل 9, عملکردهای سلول خورشیدی را به صورت تابعی از Tg, Eg برای لایه-i- a-Si:H نشان می دهد که از SE تحت فرض مدل لورنتز-Tauc [39,40] تعیین شده است. به طور مشخص, جریان اتصال کوتاه, Jsc, به تدریج با Tg افزایش می یابد. این در ابتدای امر ناشی از اثر باریک شدن باندگپ است (اشکال 9(a) و (b) را ببینید). ولتاژ مدار باز Voc, حول و حوش $T_g = 453$ K. ماکزیمم می شود. یک افت بزرگ در Voc در پیرامون $T \lesssim 453$ K, از حمل و نقل حامل محدود نشات می گیرد که توسط Ip در شکل 5 نشان داده می شود. یک افت نسبتاً کم در Voc در $T \lesssim 453$ K ناشی از اثر باریک شدن باندگپ است که در شکل 9(a) نشان داده شده است.

sina-pub.ir



شکل 9. باندگپ نوری, Eg, عملکردهای سلول خورشیدی به عنوان تابعی از Tg (a) Eg از 1.75 الکترون ولت در $T_g = 373\ K$ تا 1.55 الکترون ولت در $T_g = 593\ K.$ افزایش می یابد (b) جریان اتصال کوتاه, Jsc, به تدریج با Tg افزایش می یابد که از اثر باریک شدن باندگپ نشات می گیرد. ولتاژ مدار باز, Voc, حول و حوش $T_g = 373\ K$ ماکزیمم می شود. (c) عامل پر کردن, FF و بازده , η, به طور گسترده حول و حوش $T_g = 373\ K$ پیک می شوند. بالاترین FF و η, به ترتیب 0.71 و 8.6٪ هستند. خطوط تکه تکه, راهنمایی برای چشمان هستند.

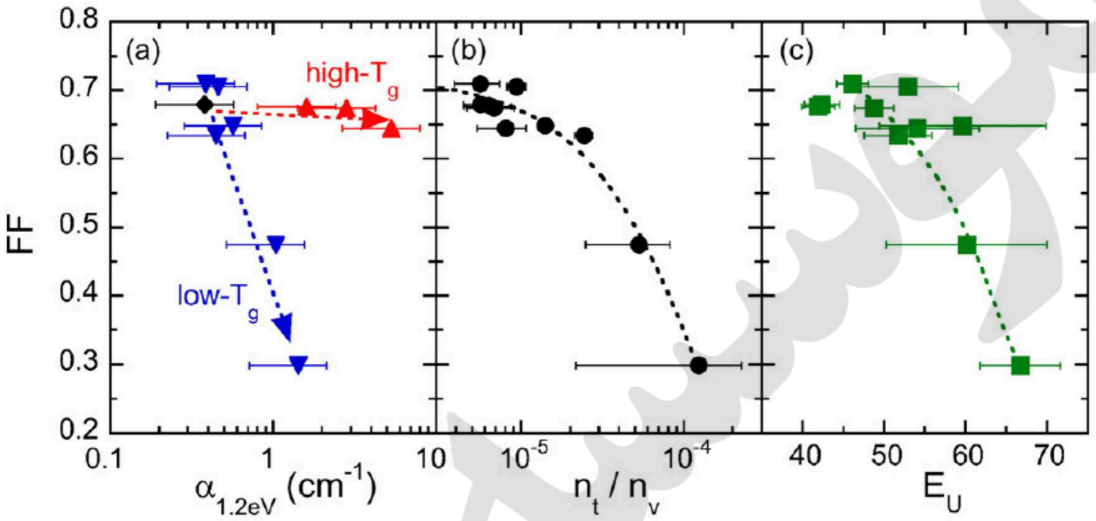
عامل پر کردن, FF و بازده η حول و حوش $T_g = 373\ K$ پیک می شوند که در شکل 9(c) نشان داده شده است. بالاترین FF و η به دست آمده در این مطالعه به ترتیب 0.71 و 8.6٪ می باشند. مطابق با فیزیک و شبیه سازی وسیله [7,8], انتظار می رود که FF وابسته به چگالی حالات میان-شکاف و حاملان به دام افتاده باشد (الکترون ها و حفره ها). بنابراین, ما سه نمودار را به منظور بررسی روابط میان این پارامترها آماده می سازیم: FF به ازای $\alpha_{1.2eV}$ برای بررسی اثر حالات میان-شکاف, FF به ازای nt/nv برای بررسی الکترون های به دام افتاده و FF به ازای Eu برای بررسی حفره های به دام افتاده. همانطور که در شکل 10(a) نشان داده شده است, FF به شدت وابسته به

sina-pub.ir

$\alpha_{1.2eV}$ تنها برای فیلم های رشد یافته در $T_g \lesssim 493$ K است؛ هرچند, این برای $T_g \gtrsim 493$ K.. برقرار نیست. در مقابل, FF به طول یکنوا از ≈ 0.7 در $n_t/n_v \approx 5 \times 10^{-6}$ تا ≈ 0.3 در $n_t/n_v \approx 10^{-4}$ کاهش می یابد, که در شکل 10(b) نشان داده شده است. علاوه بر این, FF, یک همبستگی واضح با Eu را نشان می دهد, یعنی معیاری برای گستردگی دم VB که به طور دقیق مرتبط با به دام افتادن حفره است که در شکل 10(c) نشان داده شده است. FF با افزایش Eu از ≈ 40 meV تا ≈ 65 meV. کاهش می یابد.

در نتیجه این همبستگی ها, ما در نظر می گیریم که کاهش در FF از به دام افتادن حامل در دم باند لایه-i a-Si:H متاثر می شود. همانطور که در بخش 1 توصیف شده است, به دام افتادن حامل موجب ارتقای بازترکیب نوع SRH می شود, در کنار اینها, تجمع حامل های به دام افتاده در لایه-i موجب القای خمش باند می شود که حمل و نقل و جمع آوری حامل را محدود می کند. چنین اثری در کارهای شبیه سازی اولیه نشان داده شده است [7] که در آن مشخص شده است که چگالی بار فضایی مرتبه $10^{16}\,\mathrm{cm}^{-3}$ به طور چشمگیری موجب تغییر توزیع میدان الکتریکی و در نتیجه تنزل حمل و نقل حامل ها در سلول های خورشیدی a-Si:H می شود. در حقیقت یک مقدار $n_t \approx 4 \times 10^{17}\,\mathrm{cm}^{-3}$ تعیین شده در این مطالعه, به اندازه کافی برای اصلاح موضعی میدان الکتریکی بزرگ است و در نتیجه موجب کاهش حمل و نقل حامل در سلول های خورشیدی a-Si:H می شود. باید ذکر نمود که $n_t/n_v \lesssim 10^{-5}$ و یا $E_U \lesssim 45$ meV به منظور بهبود حمل و نقل حامل و به منظور دستیابی به FF و η بالا است. برای متمایز نمودن اثرات به دام افتادن الکترون و حفره در تعیین FF, بررسی های بیشتر لازم است.

sina-pub.ir



شکل 10. FF به ازای $\alpha_{1.2eV}, n_t/n_v$ و Eu. (a) FF به شدت وابسته به $\alpha_{1.2eV}$, فقط برای فیلم های رشد یافته در $T_g \lesssim 493\ K.$ است. هرچند کمتر به Tg در $T_g \gtrsim 493\ K.$ وابسته است. با این حال این یک مقدار FF به دست آمده در Tg = 493 K است که در آن n_t/n_v تعیین می شود, توسط نماد الماسی نشان داده می شود. (b) FF دارای همبستگی مناسبی با nt/nv است, یعنی الکترون های به دام افتاده در دم CB. FF از ≈ 0.7 در $n_t/n_v \approx 5\times10^{-6}$ تا ≈ 0.3 در $n_t/n_v \approx 10^{-4}$. کاهش می یابد. (c) FF به Eu مرتبط است, یعنی گسترش دم VB, به به دام افتادن حفره مرتبط می شود. FF به طور یکنواخت با افزایش Eu از $\approx 40\ meV$ تا $\approx 65\ meV$. کاهش می یابد.

5. نتایج

به دام افتادن حامل در فیلم های a-Si:H, که توسط PEVCD آماده سازی می شود از نقطه نظر توزیع حالت شکاف بررسی شد. ما حاملان به دام افتاده (الکترون ها) را به صورت افزایش تدریجی جریان نوری با استفاده از یک تکنیک پمپ-پروب نوری مشخص نمودیم. چگالی حامل به دام افتاده به طور کمیتی از افزایش تدریجی جریان نوری تحت فرض تولید حامل و سینتیک های بازترکیب تعیین شد. مشخص شد که تحت شدت پمپ $10\ mW/cm^2$, چگالی الکترون به دام افتاده نوعاً $\approx 4\times10^{17}\ cm^{-3}$ برای یک فیلم a-Si:H رده-وسیله ذاتی با انرژی

sina-pub.ir

45 Urbach میلی ولت بود. با مقایسه این مقدار با چگالی توزیع حالت شکاف, مشخص شد که به دام افتادن الکترون عمدتاً در حالات دم CB رخ می دهد. اشغال حالات دم CB, افزایش تدریجی شدت نور پمپ را تایید نمود.

ما دیدیم که در فیلم های a-Si:H, به دام افتادن حامل به شدت از گسترش دم باند تاثیر می پذیرد. یک همبستگی مشخص بین چگالی الکترون به دام افتاده در دم CB و انرژی Urbach دیده شد که نشاندهنده توزیع انرژی نمایی حالات دم VB است. بنباراین, چگالی الکترون به دام افتاده در حالات دم-CB و دم VB با یکدیگر مرتبط هستند و اینها با دمای رشد a-Si:H تحت PEVCD تغییر می یابند. برای یک فیلم رشد یافته در 493 K, چگالی الکترون به دام افتاده مینیمم شد و در نتیجه حمل و نقل حامل ماکزیمم شد.

تاثیر به دام افتادن حامل روی عملکرد وسیله در سلول های خورشیدی a-Si:H بررسی شد. افزایش حامل های به دام افتاده مرتبط با گسترش دم باند در لایه فعال a-Si:H منجر به کاهش عامل پر کردن و بازده شد. نتایج ما نشان داد که چگالی حامل به دام افتاده نرمال شده باید $\lesssim 10^{-5}$ باشد و یا انرژی Urbach باید $\lesssim 45$ meV باشد تا عامل پر کردن بهبود یابد و در نتیجه بازده بالا به دست آید.