طراحی و شبیه‌سازی سلول خورشیدی سه‌پیوندی بر مبنای چاه کوانتومی

هما زارع بیدکی[۱] **رحیم فائز**[۲]

۱- کارشناس ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران

homa.zare@gmail.com

۲- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران

faez@sharif.edu

چکیده: در این مقاله، هدف بالابردن بازده سلول خورشیدی بر مبنای چاه کوانتومی است. ابتدا سلول خورشیدی سه‌پیوندی با ساختار $In_{0.51}Ga_{0.49}P/GaAs/In_{0.28}Ga_{0.72}As$ شبیه‌سازی می‌شود. سپس ساختار چاه کوانتومی مناسب برای یک سلول تک اتصالی GaAs معرفی می‌شود. با طراحی مناسب چاه کوانتومی برای سلول تک-پیوندی GaAs، یعنی در کنار هم قرار دادن چاه‌های مرتفع و کم عمق و انتخاب مناسب مواد، جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدار باز را می-توان افزایش داد. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که با استفاده از چاه کوانتومی در سلول سه‌پیوندی،می‌توان جریان اتصال کوتاه را افزایش داد، بدین ترتیب بازده ٪۵۷.۱ به دست آمده است. این بازده، نسبت به سلول بدون چاه کوانتومی حدود ٪۱۲ افزایش یافته است. برای رسیدن به بالاترین بازده، اثر ضخامت لایه‌ها، پارامترها و تعداد چاه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

کلمات کلیدی: سلول خورشیدی سه-پیوندی، چاه کوانتومی، بازده تبدیل،GaAs

---

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۲/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۲۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۴/۰۹/۲۳

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر رحیم فائز

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – تهران – خیابان آزادی– دانشگاه صنعتی شریف– دانشکده‌ی برق

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.6.6]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.4-Winter 2016

۱- مقدمه

امروزه، سلول‌های خورشیدی پربازده به‌طور خاص برای کاربردهای فضایی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱]. بازده تبدیل سلول‌های خورشیدی تک‌پیوندی به شکاف نوار ماده تشکیل‌دهنده آن محدود می‌شود، زیرا نیمه هادی با شکاف نوار مشخص، تنها فوتون‌های را از طیف وسیع تابش خورشید می‌تواند جذب کند که انرژی بیشتر یا مساوی شکاف نوارش داشته باشند [۲].

یکی از راهکارهای افزایش بازده سلول خورشیدی استفاده از ساختارهای چند اتصالی است که سبب وسیع‌تر شدن طیف جذب و در نتیجه افزایش ولتاژ مدارباز و بازده تبدیل سلول می‌گردد [۱]. برای این منظور، نیمه‌هادی‌های گروه III-V بسیار مورد توجه هستند [۳]، [۴]. حد بازده برای ساختارهای چند اتصالی در [۵] آورده شده است. برای سلول سه‌پیوندی حداکثر بازده ۶۳.۶٪ گزارش شده است [۵]. سلول‌های خورشیدی سه‌پیوندی InGaP/GaAs/Ge بر مبنای چاه کوانتومی با بازده بالاتر از ۳۰٪ ساخته شده‌اند [۶]. بازده برای ساختار سلول سه‌پیوندی شبیه‌سازی شده با سیلواکو به ۳۶.۲٪ رسیده است [۷].

برای بالابردن بازده سلول، ساختار متامورفیک معکوس‌شده[۱] پیشنهاد شده است که در این ساختار برای پیوند سوم با شکاف نوار کوچک‌تر به جای Ge از $In_{0.28}Ga_{0.72}As$ با شکاف نوار 1ev استفاده می‌شود که موجب بالا رفتن بازده سلول تا حدود ۴۵٪ می‌شود [۸].

یکی از محدودیت‌های اساسی سلول‌های خورشیدی چند پیوندی، عدم تطبیق جریان سلول‌هاست که محدود شدن جریان کل به کمترین جریان را به همراه دارد [۹]. بنابراین بخش زیادی از جریان تولید شده توسط طبقات دیگر را از دست می‌دهیم [۸]. در این ساختار، طبقه محدودکننده GaAs است که برای افزایش جریان تولیدی آن، یک راه‌حل می‌تواند استفاده از چاه کوانتومی چندگانه در لایه ذاتی پیوند pin سلول GaAs باشد [۶]. اضافه‌کردن چاه کوانتومی موجب بالا رفتن جریان اتصال کوتاه ساختار می‌شود ولی می‌تواند ولتاژ مدار باز را کاهش دهد [۱۰]، [۱۱]. برای بالابردن کارایی چاه کوانتومی هم یک راه‌حل موثر، استفاده از لایه‌های پله‌ای است [۱۲].

در این مقاله، ابتدا ساختار سلول سه‌پیوندی پیشنهادی شده توسط تاکاموتو و آگوی[۲] و همکاران (از مرجع [۸]) شبیه‌سازی شده است. در مرحله اول سعی شده است با ایجاد چاه و سد، بازده یک سلول تکی GaAs بهبود یابد. برای این منظور ابتدا ساختار پیشنهادی یوون و یانپنگ[۳] [۱۶] برای چاه کوانتومی چندگانه پله‌ای[۴] شبیه‌سازی شده است. سپس با ارائه ساختار جدید برای چاه کوانتومی سعی بر افزایش جریان اتصال کوتاه بدون تاثیر قابل توجه روی ولتاژ مدار باز داشته‌ایم. برای ساختار پیشنهادی در این مقاله، اثر تغییر ضخامت‌ها و تعداد چاه‌ها بررسی و حالت بهینه انتخاب شده است. سپس این چاه‌ها در طبقه دوم ساختار اصلی سلول سه‌پیوندی وارد شده است و با تغییر ضخامت طبقه اول حالت بهینه انتخاب می‌شود.

هرچه بهره سلول خورشیدی بیشتر باشد، استفاده از آن در سیستم های پیشرفته توزیع انرژی، بهینه و به صرفه تر خواهد بود [۲۰]، [۲۱].

۲- ساختارهای شبیه‌سازی شده برای سلول خورشیدی سه‌اتصالی بهینه شده با چاه کوانتومی

در این بخش، ابتدا یک ساختار سه‌اتصالی معرفی‌شده توسط توسط تاکاموتو و آگوی و همکاران (از مرجع [۸]) شبیه‌سازی می‌شود. نرم‌افزار شبیه‌ساز انتخاب شده، سیلواکو است[۱۳]، که نرم‌افزار پیشنهادی برای شبیه‌سازی سلول خورشیدی است [۷]، [۱۴]، [۱۵].

ساختار سلول سه‌پیوندی پیشنهاد شده توسط تاکاموتو و آگوی و همکاران، بر اساس مرجع [۸] در جدول (۱) آمده است. در این مرجع، ضخامت لایه‌ها ذکر نشده بود، در نتیجه ضخامت لایه‌ها بر اساس مقادیر مراجع [۱۴] و [۱۷] انتخاب شد. نتایج شبیه‌سازی و بازده تبدیل برای این ساختار در جدول (۲) نشان داده شده است.

معمولاً در ساختار سلول خورشیدی سه‌پیوندی تطبیق کامل ثابت شبکه رعایت می‌شود و نیمه‌هادی‌های انتخابی به‌صورت InGaP/GaAs/Ge خواهند بود. در ساختار متامورفیک معکوس‌شده با پذیرفتن کمی عدم تطبیق ثابت شبکه (حدود ۲٪)، در طبقه سوم به جای Ge (E_g=0.67eV) از InGaAs (E_g=1eV) استفاده شده است که این تغییر باعث افزایش ولتاژ مدار باز شده است [۸].

هدف مقاله حاضر، معرفی و بهینه‌سازی سلول خورشیدی سه‌پیوندی بر مبنای چاه کوانتومی است، پس ساختار معرفی شده بالا را که هنوز چاه کوانتومی به آن اضافه نشده است، بهینه نکردیم و بالاترین بازده گزارش شده ۴۵٪ را بر اساس مرجع [۸] می‌پذیریم.

۲-۱- ساختار چاه کوانتومی پیشنهاد شده برای سلول GaAs

۲-۱-۱- شبیه‌سازی سلول تک‌پیوندی GaAs با چاه کوانتومی پیشنهادی یوون و یانپنگ [16]

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.6.6]

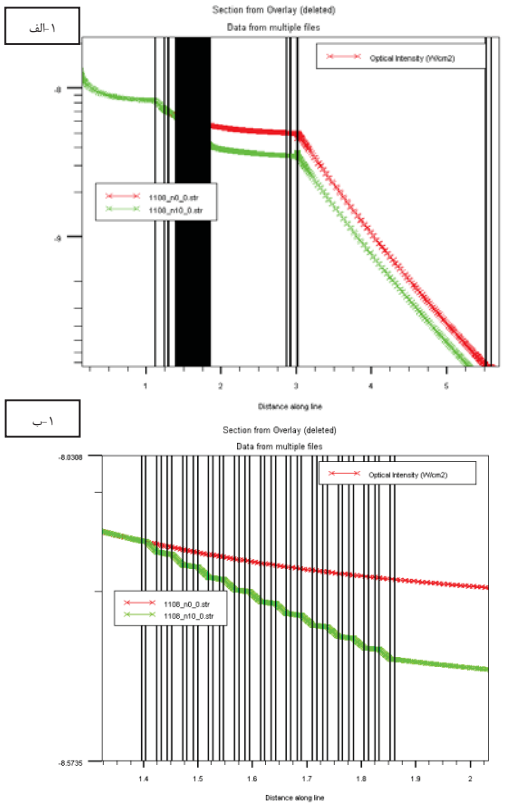
جدول (۱): ساختار پیشنهاد شده برای سلول خورشیدی سه‌پیوندی

Window	P+ InAlGaP	$0.01\mu m$	$2*1\cdot^{18} cm^{-3}$
Emitter	P+ InGaP	$0.05\mu m$	$2*1\cdot^{18} cm^{-3}$
Base	n+ InGaP	$0.5\mu m$	$7*1\cdot^{16} cm^{-3}$
BSF	n+ InAlGaP	$0.03\mu m$	$2*1\cdot^{18} cm^{-3}$
TJ	n+ GaAs	$0.025\mu m$	$5*1\cdot^{19} cm^{-3}$
TJ	p+ GaAs	$0.025\mu m$	$3*1\cdot^{19} cm^{-3}$
Window	p+ AlGaAs	$0.01\mu m$	$3*1\cdot^{18} cm^{-3}$
Emitter	p+ GaAs	$0.03\mu m$	$1*1\cdot^{19} cm^{-3}$
Base	n+ GaAs	$1.5\mu m$	$2*1\cdot^{18} cm^{-3}$
TJ	n+ GaAs	$0.025\mu m$	$5*1\cdot^{19} cm^{-3}$
TJ	p+ GaAs	$0.025\mu m$	$3*1\cdot^{19} cm^{-3}$
Window	P+InP	$0.01\mu m$	$2*1\cdot^{18} cm^{-3}$
Emitter	p+ InGaAs	$0.3\mu m$	$2*1\cdot^{18} cm^{-3}$
Base	n+ InGaAs	$1.5\mu m$	$7*1\cdot^{17} cm^{-3}$
BSF	n+ InP	$0.01\mu m$	$1*1\cdot^{19} cm^{-3}$
Sub.	n InGaAs	$10\mu m$	$7*1\cdot^{16} cm^{-3}$

جدول (۲): نتایج شبیه‌سازی شده برای سلول با ساختار IMM

QW Triple Junc.	$I_{SC}(\frac{mA}{cm^2})$	$V_{OC}(V)$	$F.F\%$	$\eta\%$
IMM	14.1	2.78	89.5	35.08

یکی از راه‌های افزایش بازده، استفاده از چاه‌های کوانتومی چندگانه در لایه ذاتی سلول GaAs است [۱۱]. وجود چاه باعث افزایش میزان جذب فوتون به وسیله حامل‌های داخل نوار ظرفیت و در نتیجه افزایش جریان اتصال کوتاه می‌شود [۱۱]. این اثر در شکل (۱) نشان داده شده است. همان طور که قابل مشاهده است در شکل (۱-ب) با اضافه کردن چاه شدت نور در طبقه دوم کاهش بیشتری نسبت به حالتی که از چاه استفاده نکرده‌ایم (شکل (۱-الف)) داشته است که به مفهوم جذب بیشتر نور در این طبقه است.



شکل (۱): شدت نور بر حسب w/cm^2 در طبقات مختلف الف) با (سبز)و بدون(قرمز) استفاده از چاه کوانتومی در طبقه دوم. ب) بزرگنمایی شده قسمت چاه کوانتومی

در این مقاله، ابتدا ساختار پیشنهادی یوون و یانپنگ شبیه‌سازی می‌شود و سپس برای بهبود بازده ساختار جدیدی برای چاه کوانتومی پیشنهاد می‌شود.

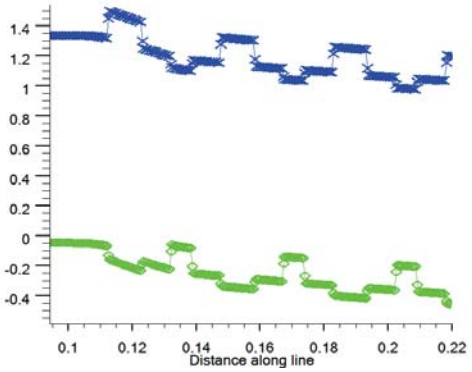
یوون و یانپنگ، چاه کوانتومی را به‌صورت $In_{0.16}Ga_{0.84}As$ چاه، $GaAs_{0.79}P_{0.21}$ برای سد و GaAs برای پله پیشنهاد داده‌اند. وجود پله احتمال خروج حامل‌ها از نوار هدایت افزایش می‌دهد و بدین ترتیب موجب افزایش جریان اتصال کوتاه می‌شوند. ساختار نوار چاه کوانتومی پیشنهادی مرجع [۱۶] در شکل (۲) آمده است.

مرجع [16]، لایه پنجره را از جنس AlGaAs با ضخامت 10nm، امیتر با ضخامت 400nm، بیس، 1000nm و لایه BSF، 50nm انتخاب کرده است.

نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی در جدول (۳) آمده است. در این ساختار چاه، احتمال به دام افتادن الکترون در چاه کم شود ولی باز هم چون چاه برای الکترون‌ها در نوار هدایت متناظر با چاه برای حفره‌ها در نوار ظرفیت است، بازترکیب حامل‌ها موجب کاهش ولتاژ مدار باز می‌شود. همچنین در این ساختار لبه جذب کاهش یافته است که خود کاهش V_{oc} را به دنبال دارد. با این حال، از طرف

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.6.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.4-Winter 2016

دیگر اضافه‌شدن چاه موجب افزایش جریان اتصال کوتاه می‌شود، ولی در کل بازده بهتر نشده است و این ساختار وقتی فقط افزایش جریان اتصال کوتاه مورد نظر است، مفید واقع می‌شود.



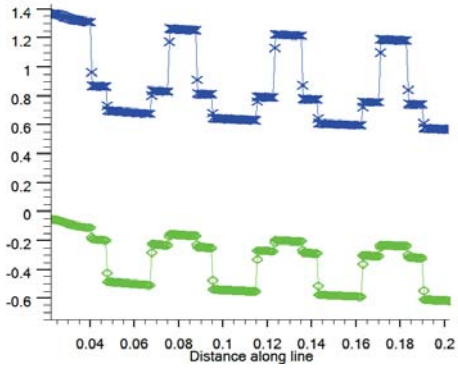
شکل (۲): ساختار نوار چاه کوانتومی با لایه‌های پله‌ای برای سلول GaAs پیشنهادی یوون و یانپنگ [16]

جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی شده سلول GaAs بدون چاه و با ۲۰ عدد چاه کوانتومی پیشنهادی مرجع [16]

GaAs	$I_{sc}(\frac{mA}{cm^2})$	$V_{oc}(V)$	$F.F\%$	$\eta\%$
بدون چاه کوانتومی	29.2	1.08	82	25.9
با ۲۰ عدد چاه کوانتومی پله‌ای	34.6	0.84	80	23.25

۲-۱-۲- پیشنهاد و شبیه‌سازی چاه کوانتومی برای سلول تک‌پیوندی GaAs

همان‌طور که قابل مشاهده است، یکی از محدودیت‌های اصلی که افزودن چاه به ساختار تحمیل می‌کند، کاهش ولتاژ مدار باز سلول است. برای جلوگیری از کاهش بیش از حد ولتاژ مدار باز، ساختار چاه‌های شکل (۳) پیشنهاد می‌شود. ساختار نوار این چاه پیشنهادی مقاله حاضر به‌نحوی انتخاب می‌شود که تراز انرژی مجاز، در کمترین فاصله از لبه نوار هدایت GaAs قرار گیرد، همچنین ساختار چاه به گونه‌ای انتخاب شده است که با توجه به ساختار نوارها شکاف انرژی مؤثر، نسبت به ساختار چاه پیشنهادی [۱۶] (شکل ۲) کاهش کمتری داشته باشد. مقایسه دو شکل (۲) و (۳) این تفاوت ساختار نوار را آشکار می‌کند. در این ساختار، چاه برای الکترون در نوار هدایت، متناظر با سد برای حفره در نوار ظرفیت است. این تکنیک باعث می‌شود کاهش ولتاژ مدار باز قابل ملاحظه نباشد. در این ساختار جریان تونل‌زنی بخش مهمی از جریان تولیدی را تشکیل می‌دهد، بنابراین ضخامت سد، نازک در نظر گرفته می‌شود تا الکترون‌های تولید شده با نور در نوار هدایت بتوانند به‌راحتی تونل بزنند و در جریان شرکت کنند. برای رسیدن به ساختار مورد نظر، چاه از جنس InGaAs، سد از GaAs و لایه‌های پله‌ای از جنس InGaAsP با ضخامت 8 nm، دو طرف چاه انتخاب شده است.



شکل (۳): ساختار چاه کوانتومی پیشنهادشده به صورت InGaAs (چاه با ضخامت L=20nm) و GaAs (سد با ضخامت L=11.6nm) و لایه‌های پله‌ای از جنس InGaAsP با ضخامت 8 nm، دو طرف چاه است

فرایند تونل‌زنی و فرار الکترون‌ها از چاه با استفاده از لایه‌های پله تسریع می‌شود. از آنجا که حفره‌ها در پایین‌ترین سطح تولید می‌شوند، در دام نمی‌افتند و در جریان شرکت خواهند کرد. به بیان دیگر سطح مجاز انرژی الکترون‌ها نزدیک به لبه بالایی نوار هدایت و سطح مجاز انرژی حفره‌ها نزدیک به لبه پایینی نوار ظرفیت قرار دارند؛ بنابراین ریسک به دام افتادن حامل‌ها کم است. در نتیجه بازترکیب کمتر و V_{OC} بیشتر نسبت به ساختارهای چاه کوانتومی معمول به‌دست می‌آید.

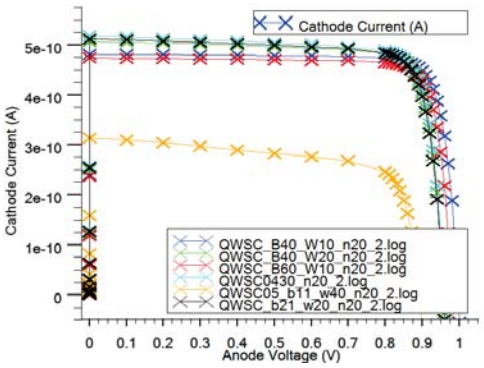
نتایج حاصل از اضافه کردن لایه‌های پله، در جدول (۴) نشان داده شده است. در این جدول یک بار پاسخ بدون اضافه کردن لایه‌های پله، و بار دیگر با در نظر گرفتن لایه‌های پله از جنس InGaAsP و با ضخامت 8nm آورده شده است. افزودن لایه‌های پله، موجب می‌شود الکترون‌ها راحت‌تر از درون چاه فرار کنند و جریان اتصال کوتاه بیشتری خواهیم داشت.

جدول (۴): بررسی اثر اضافه کردن لایه پله به چاه کوانتومی در ساختار پیشنهادی در این مقاله (تعداد سد و چاه افزوده شده=۲۰)

GaAs	$I_{sc}(\frac{mA}{cm^2})$	$V_{oc}(V)$	$F.F\%$	$\eta\%$
n=20,s=0	51.34	0.98	77.8	39.14
n=20,Step	52.3	0.96	83.6	41.97

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.6.6]

در گام بعدی، اثر تغییر ضخامت سد و چاه را بررسی می‌کنیم. پاسخ جریان ولتاژ حاصل از تغییرات ضخامت‌ها، در شکل (۴) و مقادیر حاصل از شبیه‌سازی، در جدول ۵، آمده است.



شکل (۴): بررسی اثر تغییر ضخانت سد و چاه

جدول (۵): بررسی اثر تغییر ضخامت لایه‌های چاه کوانتومی در ساختار پیشنهادی این مقاله در یک سلول تک-پیوندی GaAs. تعداد چاه‌ها ۲۰ و دو لایه پله با ضخامت ۸نانومتر انتخاب شده است

ضخامت سد و چاه بر حسب نانومتر	$I_{SC}(\frac{mA}{cm^2})$	$V_{OC}(V)$	$F.F\%$	$\eta\%$
B=11.6, W=10	48.5	1	80.6	39.09
B=20, W=10	48.5	1	83.6	40.5
B=40, W=10	48.1	1	87.3	42
B=60, W=10	47.3	0.98	87.3	40.47
B=40, W=20	50.9	0.96	83.5	40.8
B=11.6, W=20	52.3	0.96	83.6	42

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اگر ضخامت سد از حدی بیشتر شود، احتمال تونل زدن حامل‌ها کم می‌شود و اثر چاه از بین می‌رود و جریان کم می‌شود.

برای این ساختار بدون در نظر گرفتن لایه پله، $\Delta E_c = 0.6eV$ و $\Delta E_v = 0.3eV$ است. برای الکترون در چاه پتانسیل سطوح انرژی مجاز از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۸]:

$$E_n = \frac{\hbar^2\pi^2n^2}{2m_e^*L^2} \quad (۱)$$

چاه از جنس InGaAs انتخاب شده است، پس برای جرم موثر الکترون در چاه $m_e^* = 0.043m_0$ در نظر گرفته می‌شود [۱۹]. عرض چاه ۲۰نانو متر و ضخامت لایه‌های پله ۸نانومتر انتخاب شده است. پس خواهیم داشت:

$$W = 20nm, S = 8nm \rightarrow L = 36nm \rightarrow E_1 = 191meV = 0.19eV \quad (۲)$$

با توجه به شکل (۴)، با تابش نور، الکترون نوار ظرفیت انرژی لازم را به دست می‌آورد و به نوار هدایت می‌رود و در آنجا به دلیل نازک بودن ضخامت لایه سد، تونل می‌زند و در جریان شرکت می‌کند. پس با افزایش ضخامت سد، جریان کم می‌شود. افزایش ضخامت سد، از ۴۰نانومتر به ۶۰نانومتر، لاوه بر کاهش جریان، علی رغم ضخامت بیشتر، کاهش ولتاژ مدار باز را نیز به دنبال دارد. زیرا با افزایش ضخامت چاه، به دلیل کاهش احتمال تونل زنی، زیادتر می‌شود و تراز مجاز انرژی درون چاه تاثیر بیشتری خواهد داشت که به دلیل شکاف انرژی موثر کوچکتر، ولتاژ مدار باز کمتری حاصل می‌شود.

افزایش تعداد سطوح مجاز داخل چاه باعث می‌شود الکترون‌های سطوح مجاز پایینی نتوانند انرژی کافی را به دست آورند و از چاه فرار کنند، در نتیجه جریان کل کاهش می‌یابد. موقعیت تراز انرژی درون چاه در تعیین جریان مهم است: اگر این تراز خیلی پایین باشد، موجب می‌شود الکترون درون چاه به دام بیفتد و همچنین ولتاژ مدار باز کاهش یابد. از سوی دیگر، اگر تراز خیلی بالا باشد (نسبت به سطح چاه)، اثر چاه تقریباً از بین می‌رود.

افزایش بیشتر ضخامت چاه هم باعث کاهش جریان می‌شود، زیرا اثر چاه از بین می‌رود و الکترون چاه را حس نمی‌کند و همچنین ولتاژ مدار بازکاهش می‌یابد، زیرا پایین‌ترین سطح مجاز به لبه چاه (از جنس InGaAs) نزدیک‌تر می‌شود و تعداد سطوح مجاز در چاه افزایش می‌یابد که سبب به دام افتادن حامل‌ها در چاه می‌شود.

در قدم بعدی، اثر تغییر تعداد چاه‌های کوانتومی را برای ساختار چاه کوانتومی پیشنهادی در سلول تک پیوندی GaAs بررسی می‌کنیم.

جدول (۶): بررسی اثر تغییر تعداد چاه کوانتومی در ساختار پیشنهادی این مقاله در یک سلول تک-پیوندی GaAs

تعداد چاه سلول GaAs	$I_{SC}(\frac{mA}{cm^2})$	$V_{OC}(V)$	$F.F\%$	$\eta\%$
n=5	42.65	1.0	77.8	33.18
n=20	52.34	0.96	83.6	41.97
n=25	51.44	0.96	83.1	41.02
n=30	48.1	0.95	77.5	35.41

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.6.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.4-Winter 2016

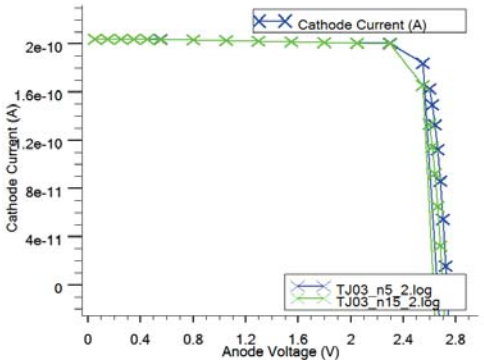
همانطور که در جدول (۶) آمده است، افزایش تعداد چاه باعث افزایش جریان می‌شود ولی از تعدادی به بعد ولتاژ مدار باز کاهش می‌یابد، همچنین جریان هم کم می‌شود. افزایش تعداد چاه ابتدا موجب افزایش اثر چاه و در نتیجه افزایش جریان می‌شود اما از تعدادی به بعد، افزایش تعداد چاه موجب به دام افتادن الکترون-حفره‌های تولید شده، بازترکیب بیشتر حامل‌ها و همچنین کاهش بیشتر ولتاژ مدار می‌شود، پس همانطور که پیشبینی می‌شد، همواره تعداد بهینه‌ای برای چاه‌ها وجود دارد، که برای چاه کوانتومی طراحی شده در این مقاله، این تعداد ۲۰ عدد است.

۲-۲- سلول سه-پیوندی بهینه شده با چاه کوانتومی

در این بخش، از ساختار چاه معرفی‌شده برای سلول تکی GaAs در ساختار سه‌پیوندی معرفی‌شده توسط تاکاموتو و آگوی و همکاران (از مرجع[8]) -شبیه‌سازی شده در بخش اول- استفاده می‌کنیم و با تغییر ضخامت‌ها، ساختار بهینه سلول را همراه با چاه کوانتومی معرفی می‌کنیم.

چاه کوانتومی معرفی‌شده در بخش اول-(InGaAs/InGaAsP(×2- را در طبقه دوم که محدودکننده جریان است، وارد می‌کنیم.

در قدم بعدی باید تعداد بهینه چاه‌ها را برای افزودن به سلول دوم این ساختار بدست بیاوریم. برای سلول تکی GaAs، تعداد بهینه چاه ۲۰عدد محاسبه شد، اما این تعداد برای سلول سه پیوندی می‌تواند متفاوت باشد. پاسخ جریان ولتاژ سلول برای چاه‌های کوانتومی با تعداد ۵ و ۱۵ -اضافه شده به لایه خالص طبقه دوم (GaAs)- در شکل (۵) آمده است.



شکل (۵): پاسخ سلول سه‌پیوندی با چاه کوانتومی n=5,n=15

شکل (۵) نشان می‌دهد که اضافه کردن تعداد چاه، تغییری در جریان اتصال کوتاه ایجاد نکرده است، پس یک فرض می‌تواند این باشد که از این به بعد، طبقه اول محدودکننده جریان است. با اضافه کردن چاه‌های کوانتومی، محدودیت جریان طبقه دوم را برطرف کردیم و از اینجا به بعد اضافه کردن تعداد چاه و در نتیجه افزایش جریان طبقه دوم جریان کل ساختار را افزایش نمی‌دهد. پس باید ضخامت طبقه اول را بهینه کنیم. طبقه سوم با کمترین شکاف نوار نسبت به دو طبقه دیگر، طبق شکل (۵) معمولا محدودکننده جریان نیست چون اکثر فوتون‌ها را جذب می‌کند و جریان بالاتری نسبت به دو سلول دیگر دارد.

نتایج عددی اثر تغییر ضخامت لایه‌های طبقه اول در جدول (۷) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، برای ضخامت-های طبقه اول –بزرگ‌ترین شکاف نوار- اندازه بهینه خواهیم داشت. اگر ضخامت بیس از حدی کمتر باشد، فوتون‌های جذب‌شده در این طبقه کاهش می‌یابد، زیرا قبل از جذب در این طبقه، عبور خواهند کرد. با افزایش بیش از حد ضخامت بیس این طبقه، مانع از عبور فوتون‌ها و رسیدن آن‌ها به طبقات بعدی خواهیم شد و در نتیجه هم جریان اتصال کوتاه و هم ولتاژ مدارباز کم می‌شوند.

جدول (۷): بررسی اثر پارامترهای طبقه اول روی بازده سلول

ضخامت لایه‌های BFS و با ناخالصی دهنده سلول اول بر حسب نانومتر n=15	I_{SC} $(\frac{mA}{cm^2})$	V_{OC} (V)	$F.F\%$	$\eta\%$
$BSF_1 = 30,$ $d_n = 400$	20.5	2.73	87.5	48.97
$BSF_1 = 50,$ $d_n = 400$	21.9	2.74	87.2	52.33
$BSF_1 = 50,$ $d_n = 630$	22.3	2.74	87.2	53.28
$BSF_1 = 70,$ $d_n = 400$	23.3	2.74	85.1	54.33
$BSF_1 = 100,$ $d_n = 700$	24.6	2.74	84.5	57.1
$BSF_1 = 100,$ $d_n = 800$	23.2	2.73	84	53.2

با بهینه‌سازی پارامترها و ضخامت لایه‌ها می‌توان به بهره ٪۵۷.۱ برای سلول سه اتصالی بهینه شده با چاه کوانتومی رسید. بنابراین با استفاده از چاه‌های کوانتومی پله‌ای توانستیم بهره حداکثری ٪۴۵ پیش‌بینی‌شده در مرجع [۸] را حدود ٪۱۲ افزایش دهیم.

بهره‌ی ٪۵۷.۱ بالاترین درصد بازده برای سلول‌های خورشیدی سه پیوندی بر پایه GaAs است. این بهره با توجه به حد فیزیکی ٪۶۳.۶ برای بازده سلول خورشیدی سه پیوندی [۵]، منطقی و قابل دسترس است و با ترکیب فرآیند ساخت ارائه شده برای سلول سه پیوندی متامورفیک ارائه شده در مرجع [۸] و فرآیند ساخت چاه

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]
[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.6.6]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.4- Winter 2016

کوانتومی در مرجع [۱۲]، قابل پیاده سازی و ساخت خواهد بود. هرچند رسیدن به این بهره بالا با لایه‌های نازک نیاز به فرآیند دقیق با کنترل دقیق ضخامت لایه‌ها و درصد عناصر مواد ترکیبی دارد.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله با پیشنهاد ساختار جدیدی برای چاه کوانتومی، جذب و در نتیجه جریان اتصال کوتاه و در نهایت بازده افزایش یافت. این ساختار چاه پیشنهادی به نحوی طراحی شده است که حدلقل کاهش را در ولتاژ مدار باز حاصل کند و همین وجه تمایز اصلی این ساختار چاه با چاه‌های پیشنهاد شده تا کنون است.

سپس این چاه‌ها در ساختار سلول خورشیدی سه اتصالی با ساختار متامورفیک معکوس‌شده وارد شد و بازده به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت. محدود کننده جریان، در ابتدا طبقه میانی است و وقتی جریان مربوط به این طبقه با کمک چاه‌های کوانتومی افزایش می‌یابد، طبقه اول محدود کننده جریان می‌شود که با بهینه سازی ضخامت‌های این طبقه، به بالاترین جریان و در نتیجه بهره بهینه می‌رسیم.

چاه کوانتومی بهینه InGaAs (چاه با ضخامت L=20nm) و GaAs (سد با ضخامت L=11.6nm) و لایه‌های پله‌ای از جنس InGaAsP با ضخامت 8 nm به دست آمد. در این ساختار، چاه آن در نوار هدایت برای الکترون متناظر با سد در نوار ظرفیت برای حفره است. با استفاده از این چاه جریان بیشتری نسبت به حالتی داشتیم که چاه نوار هدایت، سد در نوار ظرفیت محسوب می‌شد. سپس سلول خورشیدی سه اتصالی با چاه کوانتومی با بازده مطلوب شبیه‌سازی شد. با استفاده از چاه کوانتومی در سلول میانی، بدون تاثیر روی ولتاژ مدار باز، جریان مدار باز به میزان قابل توجهی افزایش یافت و بازده نسبت به میزان گزارش شده ۴۵٪، به حدود ۵۷٪ رسید.

مراجع

[1] Gui jiang, L., Jingfeng, B., et al "Optoelectronics - Advanced Materials and Devices". Chapter 18. INTECH, 2013

[2] Yastrebova, "High-efficiency multi-junction solar cells: Current status and future potential", Centre for Research in Photonics, University of Ottawa, April 2007.

[3] King R. R., Karam N. H., et al, "NEXT-GENERATION, HIGH-EFFICIENCY III-V MULTIJUNCTION SOLAR CELLS" . Presented at the 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference – Anchorage, Alaska, pp. 15-22, Sep. 2000.

[4] Sze, S. M., Kwok, K.Ng. "Physics of Semiconductor Devices", Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., 2007.

[5] Luque A. "Will we exceed 50% efficiency in photovoltaics?", J. Appl. Phys., vol. 110, no. 3, pp.031301-1 -031301-19, 2011.

[6] Liu, R. Lou, Ch., et al. "Over 30% efficiency Triple-Junction GaInP/GaAs/Ge Quantum Well Solar Cells". Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 37th IEEE, pp. 133-135, 2011.

[7] M. H. Tsutagawa, S. Michael, "Triple junction InGaP/GaAS/Ge solar cell optimization: The design parameters for a 36.2% efficient space cell using Silvaco ATLAS modeling & simulation", in 34th IEEE PVSC, pp. 001954-001957, 2009.

[8] T. Takamoto , T. Agui and A. Yoshida "World's highest efficiency triple-junction solar cells fabricated by inverted layers transfer process", Proc. Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC), pp.412 -417 2010.

[9] Cabrera C. I., Rimada J. C. "Modelling of GaAsP/InGaAs/GaAs strain-balanced multiple-quantum well solar cells". Superficies y Vacío 25(4), pp.234-239, 2012.

[10] Rimada,J.C., Hernandez,L. "modeling of ideal AlGaAs quantum well solar cells". Microelectronics Journal 32, pp.719-723, 2001.

[11] Barnham K. W. J., Ballard I., et al., "Quantum well solar cells", Physica E, vol. 14, no. 1-2, pp. 27–36, 2002.

[12] Yu Wen, Yunpeng, Kentaroh, et al."Enhanced Carrier Escape in MSQW Solar Cell and Its Impact on Photovoltaics Performance", IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS,Vol 2, issue 2, pp. 221 - 2262012.

[13] ATLAS User's Manual: Device Simulation Software, Version 5.18.3.R, Silvaco Int., SantaClara, CA, USA, 2012.

[14] Michalopoulos, p. "A Novel Approach for the Development and Optimization of State-of-the-Art Photovoltaic Devices Using Silvaco". NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL, Monterey, California, 2002.

[15] Michael.S. "SILVACO ATLAS AS A SOLAR CELL MODELING TOOL", Conference Record of the 31st IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp.719-721, 2005.

[16] Yu Wen, Yunpeng, Kentaroh, Masakazu, Yoshiaki, et al. " Effect of GaAs Step Layer on InGaAs/GaAsP Quantum Well Solar Cells" Applied Physics, Express4, 122301 (3 pages), 2011.

[17] Tsutagawa. "Triple junction solar cell". United States Patent application publication, 2011.

[18] Levi. "Applied Quantum Mechanics". Second edition. Cambridge University Press, 2006.

[19] Ponomarev D. S., Vasil'evskii I. S., et al. "Electron mobility and effective mass in composite InGaAs quantum wells with InAs and GaAs nanoinserts". Semiconductors 46, Issue 4, pp.484-490, 2012.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.6.6]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.13- No.4-Winter 2016

[۲۰] مهران صباحی، امین اشرف گندمی، سعید سعیدآبادی، **"مبدل چند سطحی متصل به شبکه با ایمنی بالا با قابلیت اخذ بشینه توان از سلول خورشیدی،"** مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سیزدهم، شماره سوم، پائیز ۱۳۹۵.

[۲۱] محمدعلی یزدان پناه جهرمی، سید مسعود برکاتی، **" دیدگاهی جدید در طراحی و بهینه سازی سیستم‌های تجدیدپذیر تولید انرژی الکتریکی،"** مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال سیزدهم، شماره سوم، پائیز ۱۳۹۵.

1 Inverted Metamorphic (IMM)

2 Takamoto, Agui, 2010

3 YuWen and Yunpeng, 2011

4 Multi Stepped Quantum Well

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-10-10]

[DOR: 20.1001.1.26765810.1395.13.4.6.6]