**مقاله انرژی نو**

**نویسنده و محقق: محدثه شهبازی**

**دانشگاه محل تحصیل:دانشگاه قم**

**استاد راهنما:دکتر جعفر محمودی**

مقاله انرژی طبیعت

سلول های خورشیدی III-V شش اتصالی با راندمان تبدیل 47.1 درصد تحت غلظت 143 خورشید

سلول های خورشیدی زمینی صفحه تخت تک پیوندی اساساً به حدود 30 درصد راندمان تبدیل خورشیدی به الکتریسیته محدود می شوند، اما اتصالات متعدد و نور متمرکز باعث می شود که راندمان بسیار بالاتر عملاً قابل دستیابی باشد. تا به حال، سلول های خورشیدی متمرکز III-V چهار اتصالی بالاترین راندمان تبدیل خورشیدی را نشان داده اند. در اینجا، ما راندمان تبدیل خورشیدی 47.1٪ را با استفاده از یک ساختار دگرگونی معکوس شش پیوندی، متصل به سری، یکپارچه که تحت طیف مستقیم در غلظت 143 خورشید عمل می‌کند، نشان می‌دهیم. هنگامی که روی طیف جهانی تنظیم می شود، تغییری از این ساختار به بازده جهانی یک خورشیدی 39.2٪ دست می یابد. باندهای تقریباً بهینه برای شش اتصال با استفاده از آلیاژهای نیمه هادی های III-V ساخته شدند. برای توسعه این اتصالات، لازم بود نابجایی رزوه‌ای در آلیاژهای III-V ناهماهنگ با شبکه به حداقل برسد، از جداسازی فاز در آلیاژهای III-V چهارتایی ناپایدار و درک انتشار ناخالصی در ساختارهای پیچیده جلوگیری شود.

کاهش بیشتر مقاومت سری در این ساختار می تواند به طور واقع بینانه ای بازدهی بیش از 50٪ را ممکن کند.

مسیر رسیدن به راندمان تبدیل خورشید به برق بسیار بالا برای دستگاه های فتوولتائیک نیازمند مواد تقریباً کامل، شکاف های باند جاذب متعدد و غلظت نوری بالا است. رسیدن به تعادل جزئی یا حد شاکلی-کویسر در بازده تبدیل سلول خورشیدی مستلزم سرکوب همه اشکال نوترکیبی غیر تشعشعی (یعنی مواد با راندمان تابشی 100 درصد داخلی) و در عین حال دستیابی به استخراج نور کامل از سلول خورشیدی است (یعنی دستگاه‌هایی با 10 عدد). % راندمان تابشی خارجی).

دستگاه‌های Multijunction (MJ) با جمع‌آوری بخش بزرگی از طیف وسیع خورشیدی، از حد دقیق تعادل سلول‌های خورشیدی تک اتصالی فراتر می‌روند. آنها همچنین اتلاف گرمایی را با پیوند باندهای فوتون با استفاده از چندین ماده با فاصله باندی که با انرژی فوتون هر سطل مطابقت دارد، کاهش می دهند.

با افزایش تعداد اتصالات، بازده تبدیل پتانسیل به طور مجانبی به 65٪ در یک خورشید افزایش می یابد.غلظت نوری نور فرودی نیز چگالی حامل های نوری را در نیمه هادی افزایش می دهد که سطوح شبه فرمی را بیشتر جدا می کند و ولتاژ هر اتصال را به سمت حد باند گپ سوق می دهد.بنابراین، از نظر تئوری می توان بازده 85% را برای تعداد نامتناهی از اتصالات در حداکثر غلظت در حد تعادل دقیق به دست آورد.

متأسفانه، ملاحظات عملی تحقق این کارایی نهایی را محدود می کند. این ملاحظات عبارتند از: مواد غیر ایده آل و رابط که منجر به نوترکیبی غیر تشعشعی می شود. تفاوت های ضریب شکست که منجر به تلفات نوری می شود. و تلفات مقاومتی به این ترتیب، در ساخت دستگاه های واقعی باید مبادلاتی انجام شود.

آلیاژهای اپیتاکسیال تک کریستال III-V بالاترین کیفیت مواد اپتوالکترونیکی موجود را ارائه می‌کنند و طیف وسیعی از باند گپ‌های مورد نیاز برای تبدیل با راندمان بالا طیف خورشیدی را دارند. فاصله باند بهینه تحت طیف های نماینده خورشید محاسبه شده است

تابعی از تعداد اتصالات با استفاده از انواع فرضیات معقول. محافظه کارانه ترین این محاسبات نشان می دهد که بازده سلول خورشیدی 62 درصد را می توان در 1000 خورشید با شش اتصال که هر یک دارای 1 درصد بازده تابشی خارجی (ERE) هستند، به دست آورد. ERE به دلیل ماهیت متقابل رابطه بین انتشار نور و عملکرد سلول خورشیدی بهترین کمیت عملکرد ولتاژ اتصال است. برای بسیاری از آلیاژهای معمولی III-V، یک ERE 1٪ یک مقدار قابل دستیابی منطقی است. برای ارائه زمینه، بهترین ERE گزارش شده در یک خورشید حدود 22٪ برای GaAs و 0.6٪ برای سیلیکون است.

دستیابی به کیفیت بالای مواد III-V با شکاف باند مورد نظر زمانی چالش برانگیزتر می شود که آلیاژ با توجه به زیرلایه (که منجر به نابجایی می شود) یا زمانی که آلیاژ III-V از نظر ترمودینامیکی در دمای رشد پایدار نباشد (که منجر به جداسازی فاز می شود) چالش برانگیزتر می شود. ) . با این وجود، چندین استراتژی رشد پیشرفته III-V استفاده از آلیاژهای چالش برانگیز III-V را در سال های اخیر امکان پذیر کرده است.

به طور خاص، استراتژی‌های دگرگونی که به تدریج ثابت شبکه را درجه‌بندی می‌کنند و کرنش حاصل را با کمترین شکل‌گیری دررفتگی کاهش می‌دهند، دستگاه‌هایی را با ترکیب‌های بهینه باند گپ اما تلفات عملکردی کم که از نابجایی‌ها ناشی می‌شوند، فعال کرده‌اند. علاوه بر این، پیشرفت‌ها در علم اپیتاکسی، با استفاده از شرایط رشد اپیتاکسی فاز بخار آلی-فلزی تثبیت‌شده جنبشی (OMVPE) امکان توسعه پیاده‌سازی‌های کم نقص موادی را فراهم کرده است که معمولاً تمایل به جداسازی فاز دارند.این آلیاژهای متا پایدار فضای طراحی وسیع تری را برای ساخت دستگاه های MJ فراهم می کنند.

سلول های خورشیدی یکپارچه MJ III-V بالاترین راندمان عملاً قابل دستیابی را تولید کرده اند. اتصالات انباشته طیف خورشیدی را با جذب باندی از انرژی فوتون در هر پیوند و اجازه دادن به انرژی کمتر باقیمانده را تقسیم می کنند.

شکل 1 | شرح ساختار سلول خورشیدی دگرگونی معکوس شش پیوندی. یک، 220 بازتاب پراش کنتراست تصویر TEM گسترش مقطعی لایه های انتخاب شده. ب، شماتیک ساختار 6J IMM ساده شده. ضخامت جاذب اتصال از بالا به ترتیب 1.2، 2.6، 1.6، 3.0، 3.2 و 2.2 میکرون است. ساختار لایه با جزئیات بیشتر در شکل تکمیلی 1 نشان داده شده است. c، Bandgap در مقابل ثابت شبکه طراحی نیمه هادی 6J IMM. d، تصاویر کاتودولومینسانس با نمای پلان از اتصالات GaInAs دگرگونی. تصاویر CL 65 x 65 میکرومتر هستند. TDD ها تقریباً 10 سانتی متر یا کمتر برای هر سه اتصال دگرگونی هستند.

فوتون ها برای عبور به اتصالات بعدی. دو و سه دستگاه اتصال شبکه منطبق (معمولاً شامل GaInP، GaAs و Ge) بر بازار فضا تسلط دارند زیرا کیفیت مواد عالی علیرغم ترکیبات غیربهینه باند گپ. سلول های خورشیدی سه و چهار پیوندی که به آلیاژهای III-V با ثابت های شبکه متعدد نیاز دارند، بهتر با طیف خورشیدی تنظیم می شوند، اما ساخت آنها با کیفیت بالا دشوارتر است. تا به حال، بالاترین راندمان سلول خورشیدی

راندمان بالا. اینها شامل سیستم‌های فتوولتائیک متمرکز (CPV) می‌شوند که به شدت بر استفاده از دستگاه‌های با راندمان بسیار بالا برای اقتصاد رقابتی متکی هستند. کاربردهای محدود منطقه مانند وسایل نقلیه هوایی و زمینی. برنامه های ماهواره ای و وسایل نقلیه فضایی که از نوعی سلول خورشیدی III-V MJ با راندمان بالا به دلیل قدرت ویژه و سختی تابش بالا استفاده می کنند. تولید هیدروژن توسط تقسیم آب فوتوالکتروشیمیایی. و کاربردهای ترموفتوولتائیک اقتصاد همه این کاربردها با افزایش بازده سلولی مطلوب تر می شود.

در این مقاله، ما راندمان تبدیل خورشیدی به الکتریکی بسیار بالا را با استفاده از یک طراحی سلول خورشیدی IMM شش اتصالی (6J) ارائه می‌کنیم.تحت طیف جهانی یک خورشید (AM1.5G)، ما یک سلول خورشیدی IMM 6J با راندمان (1.3 ± 39.2)٪ (مطلق) را نشان می دهیم. ما همچنین دستگاه 6J IMM را برای کار در غلظت بالا طراحی کرده ایم تا حتی بازدهی بالاتر و استفاده بالقوه در سیستم های CPV را ممکن کند. راندمان تحت طیف مستقیم (AM1.5D) در (3.2 ± 47.1)٪ (مطلق) در غلظت 143 خورشیدی به اوج خود می رسد و بازدهی 44.9٪ از غلظت 1117 خورشیدی را حفظ می کند. این با درک و کاهش منابع مقاومت داخلی به دست می آید. پیش بینی می شود که پیشرفت های بیشتر در 6J IMM از 50 درصد راندمان فراتر رود.

شکل 1b، توسط OMVPE رشد کردند. شماتیک های دقیق تر ساختار لایه در شکل تکمیلی 1 گنجانده شده است. شکاف های باند مربوطه و ثابت های شبکه آلیاژهای III-V در شکل 1c نشان داده شده است. همه اتصالات به جز قسمت بالا، طرح های همجنس ساده با قطره چکان های نازک از نوع n (~ 100 نانومتر)، یک لایه نازک نازک ناخواسته (UID) و لایه های پایه ضخیم تر از نوع p هستند. طراحی "همراهی معکوس" سلول بالایی برای کاهش مقاومت سری در بخش زیر توضیح داده شده است. برای به حداقل رساندن نوترکیب رابط، هر اتصال نیاز به غیرفعال سازی هترو مانع هر اتصال دارد. این لایه‌های غیرفعال‌سازی «پنجره» در بالا و «فیلد سطح پشت (BSF)» در زیر نامیده می‌شوند. سلول خورشیدی 6J IMM شامل CGB برای انتقال شبکه است

ثابت در 4 اتصالات به صورت پلکانی، و ساختارهای اتصال تونلی برای عبور جریان بین اتصالات p-n مجاور. ما هر لایه از 6J IMM را طراحی کرده‌ایم تا تمام این عملکردهای پشتیبانی جانبی را با استفاده از آلیاژهای III-V انجام دهیم که در برابر نوری که باید از آنها به محل اتصال بعدی عبور کند شفاف هستند.

مراحل ساخت در شکل 2 نشان داده شده است که با رشد OMVPE شروع می شود. رشد معکوس روی (001) زیرلایه‌های GaAs به اشتباه 2 درجه به سمت (111) B (از این پس 2 درجه B) با بالاترین محل اتصال شکاف باند شروع می‌شود و همانطور که در مرحله 1 نشان داده شده است با کمترین اتصال شکاف باند به پایان می‌رسد. سه مورد اول 0.18Ga0.33In0. 49P، Al0.23Ga0.77As، و GaAs، شبکه ای با GaAs مطابقت دارند. لایه‌های تونل 0.6Ga0.4As منطبق با شبکه با یک GaAs نازک، اتصالات الکتریکی شفاف را فراهم می‌کنند.

بین چهار اتصال اول سه اتصال پایینی آلیاژهای Ga0.84In0.16As، Ga0.66In0.34As و Ga0.42In0.58As هستند که به ترتیب 1.1%، 2.4% و 4.2% با بستر GaAs که روی آن رشد می‌کنند، مطابقت ندارند. هر اتصال دگرگونی با یک GaInP CGB قابل دسترسی است، و با TJهای دگرگونی متشکل از GaAsSb دوپ شده با کربن و GaInA های دوپ شده با سلنیوم به هم متصل می شود. اندازه گیری های درجا در طول رشد OMVPE در شکل تکمیلی 2 نشان داده شده است. پردازش لیتوگرافی سلول در مراحل 2-7 شکل 2 با جزئیات بیشتر ارائه شده در روش ها نشان داده شده است. یک دستگاه متمرکز کننده تمام شده در مرحله 8 از شکل 2 در زیر بایاس رو به جلو نشان داده شده است.

مواد دگرگونی با کیفیت بالا

ضخامت هر اتصال GaInAs ناهماهنگ حدود 2-3 میکرومتر است تا بخش مناسبی از طیف خورشیدی را به طور کامل جذب کند. چنین ضخامت هایی به مراتب از ضخامت بحرانی این آلیاژهای ناهمخوان با شبکه فراتر می رود و بنابراین لایه های CGB برای کاهش فشار و محدود کردن نابجایی های نامناسب در مواد غیرفعال رشد می کنند. سلول‌های خورشیدی III-V به نوترکیبی مرتبط با نابجایی‌ها بسیار حساس هستند و برای کارکرد کارآمد نیاز به چگالی نابجایی رزوه‌ای (TDD) حدود 10 سانتی‌متر یا کمتر در ناحیه فعال دارند.

به منظور به حداقل رساندن تراکم نقص در لایه‌های فعال، نابجایی‌ها برای سر خوردن در فواصل طولانی در داخل CGB با حذف موانع سر خوردن، مانند جداسازی فاز و ناهمواری سطح، و استفاده از شرایط رشدی که سر خوردن را تشویق می‌کنند، تشویق می‌شوند.

میزان شل شدن کرنش در هر دررفتگی به حداکثر می رسد و احتمال اینکه نابجایی های سرخورده یکدیگر را پیدا کرده و از بین بروند افزایش می یابد و TDD را که به لایه های دستگاه فعال نفوذ می کند محدود می کند.

این دستگاه IMM 6 اتصالی از سه CGB (لایه‌های آبی روشن در شکل 1b) برای دسترسی به ثابت‌های شبکه مورد نظر و در نتیجه شکاف‌های باند هر یک از سه اتصال GaInAs استفاده می‌کند. AlGaInAs و GaInP CGBها قبلاً به همین دلیل توسعه یافته بودند. در حالی که CGB های AlGaInAs را می توان برای دسترسی به GaInAs با محتوای کم ایندیوم استفاده کرد،جداسازی فاز در AlGaInAs در غلظت های بالا (بیش از 30 درصد از سایت های کاتیون حاوی In) رایج است، که به طور چشمگیری سر خوردن نابجایی را محدود می کند و عملکرد بسیار ناهماهنگ را کاهش می دهد. 0.69 eV 0.44In0.58As اتصال. در این کار، از GaxIn1-xP CGB برای دسترسی به ثابت شبکه هر اتصال GaInAs استفاده می‌شود، با درجه‌بندی سومین بافر به ثابت‌های شبکه فراتر از InP 1-xSbx.

ترتیب اتمی نوع Cupt در CGB های GaInP وجود دارد که باعث افزایش لغزش می شود و منجر به TDD پایین در اتصالات فعال می شود. ترتیب در طول رشد در اینجا با استفاده از زیرلایه‌های برش نادرست 2 درجه B ارتقا یافت، اگرچه کار قبلی 6J IMM ما بر روی بسترهای 6 درجه A با استفاده از CGBهای AlGaInAs برای سرکوب نظم در لایه‌های اتصال فعال توسعه یافته و اجرا شده بود.

میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) (شکل 1a) xIn1 xP/InP1-xSbx CGB را نشان می دهد. در این مقیاس هیچ جابجایی در زیرسلول‌های 0.66In0.34As و Ga0.42In0.58As مشاهده نشد. اگرچه TEM برای مشاهده رفتار نابجایی در CGB مفید است، اما اندازه‌گیری‌های ناحیه بزرگ‌تری مانند کاتدولومینسانس (CL) برای اندازه‌گیری دقیق TDD‌های نسبتاً کم در مواد فوتواکتیو مورد نیاز است. شکل 1d CL را از هر یک از اتصالات GaInAs دگرگونی در دستگاه 6 پیوند نشان می دهد. TDDهای تقریباً 10 سانتی‌متری در هر زیرسل به دست می‌آیند.

هزینه های سیستم CPV نوترکیبی مارپیچ در سطوح حامل اقلیت بالا مهم می شود، اما این در مواد سیلیکونی محدودتر از III-Vs است. تلفات ژول (I R) در نهایت برای هر مقاومت سری محدود غالب می شود زیرا چگالی جریان از طریق غلظت افزایش می یابد. در دستگاه های MJ متصل به سری، اوج جریان تونل زنی از طریق اتصالات تونل نیز غلظت عملی را محدود می کند.

چگالی جریان 1 خورشیدی یک دستگاه 6 پیوندی بسیار کمتر از سایر فناوری های PV است زیرا جذب فوتون به طور مساوی در بین اتصالات توزیع می شود. راندمان دستگاه MJ متصل به سری هنوز بسیار بالا است زیرا ولتاژهای اتصالات مجزا به ولتاژ کل بالا می رسد. چگالی جریان پایین تلفات ژول را کاهش می دهد و به طور بالقوه باعث افزایش کارایی قابل توجه در غلظت های بالا می شود. با این حال، ملاحظات مواد خاص برای 6J IMM، دستیابی به مقاومت سری پایین در ساختار نیمه هادی را چالش برانگیز می کند.

که به عنوان جاذب اتصال بالا استفاده می شود، تحرک الکترون پایینی دارد، که مربوط به نقص های همراه با الحاق Al است. مقاومت ورق قطره چکان اتصال بالا یک مقاومت محدود کننده کلیدی است که برای هدایت جانبی بین انگشتان شبکه فلزی لازم است. برای افزایش تحرک (و در نتیجه مقاومت ورق کمتر) امیتر AlGaInP، محتوای Al را در امیتر نوع n به 6% کاهش دادیم در حالی که 18% محتوای Al را در پایه نوع p حفظ کردیم، و یک "هتروجانکشن معکوس" ایجاد کردیم. امیتر دارای شکاف باند کمتری نسبت به پایه استدر حالی که تحرک امیتر با کاهش محتوای Al افزایش می‌یابد، ولتاژ اتصال بالا نیز کاهش می‌یابد زیرا شکاف باند کاهش می‌یابد، و باعث ایجاد تعادل با کاهش مقاومت ورق امیتر می‌شود. بهبود در نسبت ابعاد و شکل انگشتان شبکه فلزی نیز می تواند به کاهش مقاومت های مربوط به شبکه جلو بدون افزایش افت سایه کمک کند

مقاومت های داخلی در 6J IMM بسیار چالش برانگیز بوده است که منجر به ضریب پرکردن ضعیف دستگاه های 6J اولیه در غلظت می شود. زمان‌های رشد نسبتاً طولانی (~ 7.5 ساعت) و دمای بالا در طول اپیتاکسی، انتشار ناخالصی را تشویق می‌کند و بنابراین بر مقاومت سری داخلی مؤثر تأثیر می‌گذارد

ما دریافته‌ایم که انتشار از لایه‌های میدان پشتی سطحی پشتی فسفید با دوپ بسیار روی (BSF) به‌ویژه در اتصالات GaAs همسان با شبکه مشکل‌ساز است. به دلیل بار حرارتی بالا، روی ترجیحاً از لایه‌های BSF فسفید به محل اتصال تونل‌های مجاور و لایه‌های جاذب آرسنید پخش می‌شود، که می‌تواند موانعی برای هدایت ایجاد کند که عملکرد غلظت بالا را محدود می‌کند. نشان داده شده است که روی به دلیل مکانیسم کمکی بینابینی Ga-در فواصل طولانی منتشر می شود.

برای اتصال GaAs، یک راه حل استفاده از AlGaAs BSF دوپ شده با کربن به جای GaInP دوپ شده با روی است. ما یک مقاومت داخلی مشابه مربوط به بخش دگرگونی سلول خورشیدی 6J IMM را شناسایی کرده‌ایم. در اینجا، ما این مشکل را در ساختار آزمایشی دو اتصالی ساده‌تر (2J) شبیه به اتصال 4 و 5 6J IMM همانطور که در شکل 3a نشان داده شده است، تکرار کرده‌ایم. در ابتدا نتایج ضعیف JV متمرکز کننده این ساختار تست 2J که به عنوان منحنی قرمز در شکل 3c نشان داده شده بود، بهبود یافت.

با تغییر ضخامت و ترکیب Al یک مانع انتشار آلاینده روی (Al)GaInAs بین اتصالات. مانع انتشار AlGaInAs که منجر به منحنی آبی شکل 3b شد، برای کاهش مقاومت در 6J IMM که در اینجا گزارش شده است، مفید بود. طیف‌سنجی جرمی ثانویه (SIMS) در شکل 3b ساختار آزمایشی مربوط به منحنی سبز در شکل 3c، روی به‌طور قابل‌توجهی در TJ و پایه اتصال 4 بیش از آنچه در نظر گرفته شده است نشان می‌دهد. علاوه بر مکانیسم انتشار روی در آلیاژهای III-V منطبق با شبکه که در بالا ذکر شد، انتشار روی در این ساختار آزمایش دگرگونی ممکن است در اطراف نابجایی ها نیز افزایش یابد.

ویژگی ها و عملکرد دستگاه 6j

دستگاه‌های سلول خورشیدی شش پیوندی با روش‌های سلول خورشیدی استاندارد، اصلاح شده برای شش اتصال، مشخص شدند: بازده کوانتومی خارجی (EQE) با بازتاب هم‌زمان، و اندازه‌گیری چگالی-ولتاژ جریان (JV) تحت شبیه‌سازهای خورشیدی داخلی. بررسی دقیق شبیه‌سازهای خورشیدی تنظیم طیفی برای اندازه‌گیری‌های 6J در روش‌ها به تفصیل آمده است.دستگاه های 6J IMM هم برای شرایط AM1.5G یک خورشیدی و هم برای شرایط AM1.5D با غلظت بالا طراحی شده اند. تفاوت‌های جزئی در این طیف‌ها نیازمند بهینه‌سازی مجدد شکاف‌های اتصال و ضخامت برای متعادل‌سازی جریان است که در EQE شکل نشان داده شده است. انعطاف پذیری شکاف های باند و ضخامت اتصالات برای دستیابی به جریان بالا در دستگاه های متصل به سری بسیار مهم است. تفاوت در سطوح جریان مورد انتظار دستگاه، نیاز به تغییراتی در طراحی اتصال تونل، طراحی شبکه و مساحت مسا برای عملکرد بهینه تحت شرایط مناسب دارد.

به صورت لگاریتمی با غلظت همانطور که انتظار می رود. FF و راندمان نیز افزایش می یابد تا زمانی که تلفات مقاومت سری I R (یعنی ژول) شروع به غالب شدن کند. این کاهش مقاومت سری یک چالش غالب برای سلول های خورشیدی متمرکز کننده است که در بالا مورد بحث قرار گرفت.

طیف الکترولومینسانس در تزریق 30 (جامد) و 1010 (برق) mA/cm در پس زمینه EQE نشان داده شده است. هر رنگ نشان دهنده EQE هر اتصال است. b، ERE و c، ولتاژ هر اتصال در سلول 6J به عنوان تابعی از تزریق جریان. نشانگرها از داده‌های EL محاسبه می‌شوند و با خطوط توپر با مدل نوری الکترونیکی تعمیم‌یافته با استفاده از پارامترهای فهرست شده در جدول 1 مطابقت دارند.

ما سلول های خورشیدی 6 پیوندی را با کارایی رکورد در هر دو طیف جهانی و مستقیم زمینی نشان داده ایم. اتصالات با کیفیت بسیار بالا با فاصله باند تقریبا بهینه با استفاده از طراحی IMM به دست آمد. بسیاری از چالش‌های مواد III-V، از جمله اتصالات ناهماهنگ شبکه با چگالی نابجایی رزوه‌ای کم، و اتصالات حاوی Al با فاصله باند بالا با اتصالات زیاد برطرف شد.

ولتاژهای فرعی ادغام این اتصالات با هم در یک ساختار یکپارچه تک رشد منجر به بازده 39.2٪در طیف جهانی یک خورشید شد. کاهش مقاومت‌های داخلی با استفاده از یک زیرسلول AlGaInP ناهمگونی معکوس و کاهش مقاومت‌های داخلی ناشی از موانع ناهمگون مربوط به انتشار، دستگاه‌های متمرکزکننده عالی را با راندمان 47.1 درصد در 143 خورشید تحت طیف مستقیم فعال کرد. کاهش بیشتر در مقاومت سری محدود کننده باید منجر به راندمان بیش از 50 درصد در غلظت بالاتر شود.

مواد و روش ها

رشد OMVPE ساختارهای لایه III-V در یک سیستم OMVPE با فشار اتمسفر (~620 torr) سفارشی رشد کردند. ویفرهای زیرلایه GaAs قبل از رشد به اندازه 2×3 سانتی متر بریده شدند و به آرامی در OH:H O:H O (2:1:10) حک شدند. بستر روی یک گیرنده گرافیت قرار داده شد و با القای RF گرم شد. دمای رشد بین 550 درجه سانتی گراد و 750 درجه سانتی گراد برای کنترل کیفیت رشد آلیاژ و دوپینگ متغیر بود. مواد منبع شامل تری متیل گالیوم (Ga)، تری اتیل گالیوم (Ga)، تری متیل آلومینیوم (Al)، تری متیلندیم (In)، آرسین (As)، فسفین (P)، تری اتیل آنتیمون (Sb)، دی متیل هیدرازین (N)، دی اتیل روی (Zn)، تتراکلرید کربن (C)، سلنید هیدروژن (Se) و دیسیلان (Si)ساختار کامل 6J IMM شامل 140 لایه، از جمله لایه‌های بافر درجه‌بندی شده ترکیبی منفرد همانطور که در شکل تکمیلی 1 نشان داده شده است. کل زمان رشد 7.5 ساعت بود. تنش نوری چند پرتوی درجا (MOS) و بازتاب تک طول موج (660 نانومتر) همانطور که در شکل تکمیلی 2 نشانداده شده است، برای درک و بهبود آرامش کرنش نامناسب، و زبری در طول رشد OMVPE اندازه‌گیری شد. توجه داشته باشید که انحنای متوسط ​​در اتصالات GaInAs تقریباً ثابت است، که دلالت بر تطبیق شبکه دقیق این اتصالات دگرگونی با بافر درجه بندی شده ترکیبی زیرین و بنابراین، رشد تقریباً بدون تنش اتصالات فعال دارد. تفاوت در انحنای بین جهت X[-110] و Y[110] نشان دهندهناهمسانگردی آرامش یا خواص مکانیکی است (مثلاً به دلیل نظم اتمی). از نوسانات در داده های بازتابی می توان برای تعیین نرخ رشد برخی از لایه ها استفاده کرد. افزایش کلی در بازتاب معکوس در طول دو بافر درجه بندی شده آخر نشان دهنده افزایش است.

ناهمواری ناشی از ضربدری . پراش اشعه ایکس درجا (نشان داده نشده) نیز برای بهینه سازی شرایط رشد بافر درجه بندی شده ترکیبی استفاده شد.

پردازش فتولیتوگرافی دستگاه‌های 6J IMM همانطور که به صورت شماتیک درشکل 2 نشان داده شده است انجام شد. طلا روی تمام پشت دستگاه وارونه برای تماس پشتی آبکاری شد. این سمت به یک ویفر سیلیکونی (که به عنوان یک دسته سفت و تختاستفاده می‌شود) با اپوکسی با ویسکوزیته کم متصل شد، سپس بستر GaAs با اچ کردن به یک اچ استاپ GaInP با یک اچانت انتخابی OH:H O حذف شد. در صورتی که به جای آن از تکنیک‌های برآمدگی همپایی یا پوسته شدن استفاده شود، می‌توان از بستر برایصرفه‌جویی در هزینه استفاده مجدد کرد. شبکه فلزی Ni/Au با استفاده از لیتوگرافی استاندارد الکترونه‌گذاری شد و دستگاه‌ها تا اچانت O جدا شدند. لایه تماس بالایی GaInNAs/GaAs با استفاده از شبکه های فلزی حذف شدزیرا پوشش ضد بازتاب پهن باند /ZnS/MgF/ZnS توسط تبخیر حرارتی رسوب کرد. NH4 2 2 56,57 58 پشت طلا با استفاده از یک ماسک HBr:Br:H2 غیر انتخابی و یک MgF2 2 59 4 لایه

اندازه گیری عملکرد سلول خورشیدی خصوصیات استاندارد توسط تیم ساخت III-V انجام شد و به طور مستقل توسط تیم عملکرد سلول و ماژول (CMP) در NREL تأیید شد. هر دو نتیجه از نزدیک توافق کردند. نتایج تایید شده از تیم CMP در شکل های تکمیلی 3-5 نشان داده شده است.اندازه‌گیری EQE هر اتصال با بایاس نور همه اتصالات دیگر با LEDهای با روشنایی بالا (تیم III-V) یا نور سفید فیلتر شده (تیم CMP) و همچنین بایاس ولتاژ برای غلبه بر اثرات شکست بایاس معکوس به‌دست آمد

اتصالات 3، 5، و 6 شکست بایاس معکوس را در ربع تولید توان نشان دادند و بنابراین بایاس ولتاژ کمی کمتر از ولتاژ در نقطه حداکثر توان (MPP) بودند. اثرات کوپلینگ نورانی همانطور که در جای دیگر توضیح داده شد حذف شد. نتایج EQE از تیم III-V در شکل 4a نشان داده شده و ادغام شده است.

ناحیه سلول به وضوح مشخص شده است، زیرا دستگاه IMM تا طلای پشتی حک شده است. حداکثر مساحت تحت یک سیستم میکروسکوپ اختصاصی با کالیبراسیون های کنترل شده توسط گواهی ISO ما با استفاده از پروتکل استاندارد تیم CMP برای اندازه گیری مساحت اندازه گیری شد. ناحیه دیافراگم (یا کل مسا) برای اندازه‌گیری‌های AM1.5G در یک خورشید استفاده شد، اما ناحیه تعیین‌شده

ناحیه باسبار را حذف می کند، برای اندازه گیری AM1.5D استفاده شد. تابش یک خورشید برای هر دو طیف 1000 W/cm تعریف می شود. هیچ هیسترزیس یا تخریب دستگاه‌ها طی دو ماه اندازه‌گیری در حالی که در شرایط هوای آزمایشگاهی معمولی ذخیره می‌شدند (نشان داده نشده) مشاهده نشد.

اندازه‌گیری‌های تک خورشیدی روی یک شبیه‌ساز چند منبع تک خورشیدی (OSMSS) متشکل از 9 کانال طیفی قابل تنظیم که از دو لامپ تنگستن 1500 وات و دو لامپ تنگستن 750 وات تقسیم شده است، انجام شد. نور هر کانال از طریق بسته های فیبر نوری بزرگ به جعبهیکپارچه کننده نور (هموژنایزر) کوپل می شود و شدت نور از طریق دیافراگم های متغیر در ورودی هر بسته فیبر قابل تنظیم است. طیف OSMSS با طیف گسترده میدانی Spec 3 در محدوده 300نانومتر تا 2400 نانومتر اندازه‌گیری شد. طیف شبیه ساز به طور مکرر اندازه گیری و تنظیم شد همانطور که در شکل تکمیلی 6b به طیف سیاه منجر شد. نسبت های جریان اتصال بر اساس طیف اندازه گیری شده تعریف می شوند

نسبت‌های جریان اتصال در جدول تکمیلی 1 جدول‌بندی شده‌اند. نسبت‌های جریان اتصال در 1٪ از 1.0 تنظیم شده‌اند، به جز 6، که 6٪ - 8٪ بیش از حد روشن شده بود. برای درک تأثیر این نور بیش از حد، تابش طیفی هر اتصالبه طور سیستماتیک بر روی OSMSS در حین حفظ متفاوت است

1.0 برای سایر ترکیبات اتصال همانطور که در شکل تکمیلی 7 نشان داده شده استاز آنجایی که اتصال 6 از 95% تا 110% در تابش کلی 800 W/m تغییر می کرد، ISC، ضریب پر شدن و حداکثر توان تقریباً ثابت باقی ماندند که منجر به کمتر از 0.4 درصد تغییر نسبی درحداکثر توان. این نشان می‌دهد که اتصال 6، اتصال محدود کننده مطابق با EQE یکپارچه شکل 4a نیست، و روشنایی بیش از حد تنها پیوند 6 تنها منجر به عدم قطعیت کوچک در ضریب پر (و در نتیجه کارایی) می‌شود. تابش کل شبیه ساز با تنظیم ارتفاع با یک سلول مرجع کالیبره شده اولیه NREL با مقدار کالیبراسیون تایید شده 5 ماه قبل از این اندازه گیری ها تنظیم شد.

مرحله نگهداشتن خلاء ام 2 ام

اندازه‌گیری‌های تابش بالا روی یک شبیه‌ساز خورشیدی پالسی با شدت بالا قابل تنظیم (T-HIPSS) با یک لامپ فلاش Xe و ۷ کانال قابل تنظیم از جفت‌های کرکره‌ای از آینه‌های بازتابنده باند سفارشی گرفته شدمنحنی JV T-HIPSS به صورت تکه‌ای از اندازه‌گیری‌ها در طول چند پالس فلاش ۲ میلی‌ثانیه به SC، VOC، MPP و پر کردن داده‌ها بین این نقاط جمع‌آوری شد. داده‌ها فقطدر طول یک بخش 0.5 میلی‌ثانیه از فلاش استفاده شد که دارای حداقل تغییرات طیفی مطابق با سلول‌های مرجع ایزوتیپ منطبق بود (شکل‌های تکمیلی 6 و 8 را ببینید). طیف T-HIPSS با یک طیف سنج سریع آوانتس با سهآشکارساز در محدوده 280 نانومتر تا 1650 نانومتر اندازه‌گیری شد. تابش کل با صفحه نمایش چگالی خنثی متشکل از متفاوت بود.

فویل های نیکل برش لیزری با تخلخل و در نتیجه گذرندگی متفاوت. مطابقت طیفی با طیف مرجع AM1.5D با نسبت‌های جریان نوری اتصال با استفاده از اندازه‌گیری سلول مرجع ایزوتیپ (یعنی تک پیوند فیلتر شده) با اصلاح عدم تطابق طیفی اندازه‌گیری شد.

ولتاژهای فرعی ادغام این اتصالات با هم در یک ساختار یکپارچه تک رشد منجر به بازده 39.2٪ در طیف جهانی یک خورشید شد. کاهش مقاومت‌های داخلی با استفاده از یک زیرسلول AlGaInP ناهمگونی معکوس و کاهش مقاومت‌های داخلی ناشی از موانع ناهمگون مربوط به انتشار، دستگاه‌های متمرکزکننده عالی را با راندمان 47.1 درصد در 143 خورشید تحت طیف مستقیم فعال کرد. کاهش بیشتر در مقاومت سری محدود کننده باید منجر به راندمان بیش از 50 درصد در غلظت بالاتر شود.

این اندازه گیری ها کمترین تغییر را در EQE در این محدوده نشان می دهد. EQE 6 سلول مرجع ایزوتیپ سفارشی (در شکل تکمیلی 6 نشان داده شده است) در NREL اندازه گیری شد و کالیبراسیون ثانویه با اندازه گیری بر روی OSMSS همانطور که قبلا توضیح داده شد انجام شد. اصلاحات عدم تطابق طیفی و نسبت های جریان نوری اتصال برای اندازه گیری های T-HIPSS به ترتیب در جداول تکمیلی 2 و 1 جدول بندی شده اند. غلظت SC 6J DUT نسبت به اندازه گیری یک خورشید آن. این روش منجر به کمتر از 1٪ خطا در تعادل طیفی در T-HIPSS بین 5 اتصال اول شد، اما 6 اتصال 17٪ بیش از حد روشن بود.

نتایج یک تحلیل عدم قطعیت دقیق در جداول تکمیلی 3-5 فهرست شده و بر روی نمودارهای JV تایید شده NREL در شکل های تکمیلی 3-5 خلاصه شده است. همه منابع عدم قطعیت در تابش به هر اتصال منفرد در T-HIPSS را می توان به طور محافظه کارانه با عدم قطعیت 10% از غیر خطی اندازه گیری شده نشان داده شده در شکل تکمیلی 10 دریافت کرد. انتشار این عدم قطعیت در تابش اتصال برای پر کردن فاکتور و کارایی ساده نیست اما می توان با استفاده از مدل Geisz و همکارانش فهمید. . این همان مدلی است که با خطوط در شکل 5 مطابقت دارد. تغییرات سیستماتیک هر جریان نوری اتصال حول 150 خورشید در حالی که نسبت‌های دیگر جریان نوری را 1.0 نگه می‌دارد، منجر به شکل تکمیلی 12a می‌شود، اما این همه احتمالات ترکیب عدم قطعیت را بررسی نمی‌کند. شبیه سازی مونت کارلو از همان مدل که عدم قطعیت توزیع شده گاوسی تابش را برای هر اتصال با انحراف استاندارد 10% اعمال می کند، منجر به انحراف استاندارد نسبی 0.11٪ در Voc، 2.95٪ در ضریب پر و 2.94٪ در کارایی هیستوگرام ضریب پر شدن در شکل تکمیلی 12b با استفاده از 10000 محاسبه نشان داده شده است. در این شبیه سازی، تنها راه دستیابی به ضریب پر شدن کمتر از حدود 85 درصد این است که اتصال ششم به شدت محدود کننده باشد و بنابراین اثرات شکست بایاس معکوس را نشان دهد. این امر در شکل منحنی JV اندازه گیری شده آشکار است و به دلیل 17 درصد روشنایی بیش از حد نقطه اتصال ششم به احتمال زیاد رخ نمی دهد. عدم قطعیت در تنظیم طیفی بر اساس عدم قطعیت 10٪ در تابش به هر اتصال در T-HIPSS که در جزئیات بالا توضیح داده شد یک عدم قطعیت غالب است. سایر منابع عدم قطعیت جدول تکمیلی 3 و نوارهای خطای حاصل در داده های آبی در شکل 5b در شکل تکمیلی 13 نشان داده شده است. 46

الکترولومینسانس برای subcel

الکترولومینسانس برای تجزیه و تحلیل ولتاژ فرعی. EL از 6J IMM به عنوان تابعی از تزریق جریان بایاس رو به جلو اندازه گیری شد. یک طیف رادیومتر برای جمع آوری یک زاویه جامد کوچک از نور ساطع شده از سلول خورشیدی استفاده شد و نسبت به منحنی JV تاریک اندازه گیری شده از مجموع 6J IMM کالیبره شد همانطور که در . کسری از نور EL ساطع شده جفت شده از هر اتصال به اتصال بعدی به طور تجربی با تغییر سیستماتیک شدت نور در هر اتصال در حین اندازه‌گیری منحنی JV کامل تعیین شد و برای تصحیح آنالیز EL استفاده شد.

میکروسکوپ الکترونی انتقالی نمونه‌های مقطع TEM پرتو یون متمرکز (FIB) در ایستگاه کاری FEI NanoLab 200 با پرتو دوگانه FIB با استفاده از روش‌های استاندارد لیفت بیرون پس از محافظت از سطح نمونه ابتدا با پرتوهای الکترونی و سپس لایه‌های پلاتین رسوب‌شده با پرتو یونی تهیه شدند. نمونه ها در FIB با انرژی پرتو یون Ga 3 کیلو ولت تکمیل شدند. آسیب FIB یون Ga با آسیاب یونی Ar با انرژی کم (< 1 کیلو ولت) در نانومیل Fischione مدل 1040 با نمونه خنک شده با استفاده از نیتروژن مایع حذف شد. تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی عبوری کنتراست پراش (TEM) در یک TEM FEI Tecnai G2 30 S-Twin با ولتاژ 300 کیلو ولت انجام شد.

کاتدولومینسانس (CL). تصاویر پلان نمای CL از لایه‌های 6J IMM پردازش نشده که تا محل اتصال دگرگونی مورد علاقه حک شده بودند، به دست آمد. تصاویر پانکروماتیک CL با استفاده از یک سیستم جمع آوری آینه سهموی برای هدایت انتشار به یک فتودیود Gee خنک شده با نیتروژن مایع به دست آمد. ولتاژ شتاب دهنده 15 کیلو ولت و جریان پرتو 1.5 نانوآمپر برای برانگیختن حامل های بار اضافی در نمونه هایی که تا 80K خنک شده بودند برای افزایش شدت انتشار استفاده شد. چگالی نابجایی رزوه‌ای با میانگین تعداد نابجایی‌ها در مساحت 10×4.3 سانتی‌متر محاسبه شد. اتصالات 4 و 5 دارای نقاط کاملاً مشخص بودند و تراکم دررفتگی نخ 10 سانتی متر اندازه گیری شد.

به نظر می رسد پیوند دارای چگالی نابجایی زیر 10 سانتی متر باشد، اما خطا در این نمونه به دلیل تفاوت در توزیع نابجایی و ناهمواری سطح بالاترین است، و بنابراین ما به طور محافظه کارانه تراکم 10 سانتی متر را تخمین زدیم.

طیف سنجی جرمی یون ثانویه (SIMS). SIMS با استفاده از ابزار Cameca IMS 7f انجام شد. پروفیل عمق در شکل 3b از یک پرتو یون اولیه اکسیژن 10 کیلوولت با انرژی ضربه 5 کیلو ولت استفاده می کند زیرا نمونه در 5 کیلو ولت بود.

سیگنال Zn در شکل 3b کمی سازی شده است و به محور چپ اشاره می کند. سیگنال In کمیت نمی شود و به محور سمت راست اشاره می کند. هر دو روی و در به عنوان یون های ثانویه مثبت اندازه گیری شد. سیگنال Zn با استفاده از فاکتورهای حساسیت نسبی تولید شده از استانداردهای ایمپلنت یون روی در GaInAs و GaInP برای لایه‌های مربوطه اندازه‌گیری شد.