



بررسی اثرات تابش باریکه پروتون دستگاه پلاسمای کانونی بر سلول‌های خورشیدی

جندقیان، بهنام*^(۱) - شیرانی بیدآبادی، بابک^(۱) - گورابی، هادی^(۲) - سید حبشی، میرمحمد رضا^(۳)

۱ دانشگاه اصفهان، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، گروه مهندسی هسته‌ای

۲ وزارت ارتباطات و فناوری اطلاعات، پژوهشگاه فضایی ایران، پژوهشکده مواد و انرژی

۳ پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای سازمان انرژی اتمی ایران، پژوهشکده پلاسما و گداخت هسته‌ای

چکیده:

در این پژوهش، اثر تابش باریکه پروتون دستگاه پلاسمای کانونی UIPF روی سلول‌های خورشیدی سیلیکونی بررسی شد. برای انجام آزمون $I-V$ ، به منبع نوری با شدت ثابت و طیف انرژی نزدیک به طیف انرژی خورشید نیاز بود که شبیه‌ساز طیف انرژی خورشیدی طراحی و ساخته شد. پس از انجام آزمایش‌ها مشاهده شد که پس از هر پالس دستگاه UIPF ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه سلول‌های خورشیدی کاهش قابل توجهی داشتند. همچنین با گذشت زمان، ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه سلول‌ها افزایش می‌یافت.

کلمات کلیدی: سلول خورشیدی، دستگاه پلاسمای کانونی، پروتون، طیف انرژی خورشید، آسیب تابش.

مقدمه:

تابش‌های فضایی که به زمین می‌رسند از سه چشمه اصلی تابش‌های با منشأ کهکشانی، تابش‌های خورشیدی و تابش‌های به دام افتاده در کمربندهای مغناطیسی زمین تشکیل می‌شوند. جدول ۱ تابش‌های رسیده به زمین به همراه چشمه آن‌ها را نشان می‌دهد. بررسی اثرات این تابش‌های مخرب روی عملکرد و کارایی قطعات الکترونیکی استفاده شده در سفینه‌ها و ماموریت‌های فضایی امری حیاتی است. برای بررسی اثرات تابش‌های فضایی روی قطعات الکترونیکی از امکانات موجود در سطح زمین استفاده می‌شود [۱ و ۲].

جدول ۱: ذرات مخرب تولید شده از منابع مختلف تابش‌های فضایی و محدوده انرژی هر یک از آن‌ها [۳]

ذره	انرژی (MeV)	منبع
پروتون‌ها	۰/۱ تا ۵۰۰	کمربندهای تابشی زمین و طوفان‌های خورشیدی
الکترون‌ها	تا ۷	کمربندهای تابشی زمین
تابش‌های با منشأ کیهانی	تا 2×10^4	خارج از منظومه شمسی
نوترون‌ها	۰/۰۰۱ تا ۱۰۰۰	ناشی از برهمکنش ذرات با بالای اتمسفر زمین
ذرات آلفا	تا ۹	ناشی از واپاشی‌های پرتوزای مواد استفاده شده درون دستگاه‌ها

پروتون‌ها از جمله اصلی‌ترین پرتوهای رسیده به کره زمین هستند. برهمکنش پروتون‌ها با ماده شامل پراکندگی رادرفورد، پراکندگی کروی سخت، برهمکنش کولنی و برهمکنش هسته‌ای می‌شود. در پراکندگی رادرفورد و برهمکنش



هسته‌ای با هسته‌ی اتم‌های ماده هدف، هسته پس زده و در نتیجه اتم‌های جابجا شده در ساختار کریستال تولید می‌شوند [۴]. پراکندگی کروی سخت، اتم جابجا شده در ساختار کریستالی تولید می‌شود و در برهمکنش کولنی، اتم‌های ساختار شبکه یونیزه می‌شوند. مکانیسم‌های کلی آسیب ناشی از برهمکنش ذرات باردار سنگین از جمله پروتون با کریستال‌های نیمه‌هادی شامل دو بخش یونش و جابجایی می‌شود [۵]. آسیب یونش باعث ایجاد دام‌ها و مراکز باز ترکیب دائمی سطحی در باند ممنوعه نیمه‌هادی می‌شود. میانگین انرژی مورد نیاز برای یونش اتم‌های سیلیکون، حدود $3/6 \text{ eV}$ است. در حالی که باند ممنوعه نیمه‌هادی حدود $1/12 \text{ eV}$ است [۶]. آسیب جابجایی باعث ایجاد تهبجای‌هایی در ساختار شبکه‌ای ساختار کریستالی اتم‌های نیمه‌هادی می‌شود و باند ممنوعه ماده نیمه‌هادی را کاهش می‌دهد. اگر اتم جابجا شده از ساختار کریستالی، انرژی کافی برای غلبه بر انرژی آستانه جابجایی اتم‌های ساختار شبکه را داشته باشد، توانایی ایجاد جابجایی‌های ثانویه را دارد. انرژی آستانه جابجایی برای اتم‌های سیلیکون در ساختار شبکه حدود $12/9 \text{ eV}$ است [۷]. در نتیجه هر دو مکانیسم آسیب ناشی از برهمکنش ذرات باردار با کریستال نیمه‌هادی، مشخصات الکتریکی سلول‌های خورشیدی کاهش می‌یابند. اندازه‌گیری جریان اتصال کوتاه و ولتاژ مدارباز سلول‌های خورشیدی با توجه به تغییرات منحنی جریان-ولتاژ سلول‌ها، معیار مناسبی برای بررسی تغییرات ایجاد شده در ساختار کریستالی آن‌هاست [۸]. تاکنون تحقیقات وسیعی در زمینه بررسی اثرات تابش پروتون و دیگر ذرات باردار بر عملکرد سلول‌های خورشیدی انجام شده است [۹-۱۳]. رونگ^۱ و همکارانش در سال ۲۰۰۱ به بررسی اثرات تابش پروتون‌های پرنرژی روی سلول‌های خورشیدی GaAs/Ge پرداختند. او در این آزمایش‌ها از پروتون‌هایی با انرژی‌های 5 MeV ، 10 MeV و 20 MeV استفاده کرد. شار مورد استفاده در این آزمایش‌ها از 10^9 تا حدود 10^{13} p/cm^2 بود [۹]. در سال ۲۰۰۴ آقای آلورالده^۲ سلول خورشیدی سیلیکونی مونوکریستالی را با پروتون‌های 10 MeV از شار 10^8 تا 10^{13} p/cm^2 با استفاده از شتاب‌دهنده تاندم پرتودهی کرد [۱۰]. رونگ و همکارانش در سال ۲۰۰۶ اثرات تابش پروتون کم انرژی روی سلول‌های خورشیدی GaAs/Ge را بررسی نمودند. در این آزمایش رونگ و همکارانش از شار حدود 10^{13} p/cm^2 و محدوده انرژی $0/1$ تا $0/3 \text{ MeV}$ پروتون استفاده کردند. [۱۱]. یک سال بعد رونگ و همکارانش سلول خورشیدی اتصال سه گانه GaInP/GaAs/Ge را تحت تابش پروتون‌های $0/28 \text{ MeV}$ ، $0/62 \text{ MeV}$ و $2/80 \text{ MeV}$ از شار 10^{10} تا 10^{13} p/cm^2 قرار دادند [۱۲]. رونگ و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به بررسی اثرات ناشی از پروتون‌های $50-100 \text{ keV}$ روی سلول خورشیدی اتصال سه گانه از نوع GaInP/GaAs/Ge پرداختند. آنها این سلول خورشیدی را با شارهای 10^{10} تا 10^{13} p/cm^2 پرتودهی کردند [۱۳].

^۱ Wang Rong

^۲ M. Alurralde



روش کار

سلول‌های خورشیدی استفاده شده در آزمایش‌ها از نوع سیلیکونی پلی کریستالی با ابعاد $1/8 \times 5/3 \text{ cm}^2$ و ضخامت حدود ۱۸۰ میکرومتر بود. از دستگاه پلاسمای کانونی UIPF نوع مدر با انرژی ۵ کیلوژول برای پرتودهی سلول‌های خورشیدی استفاده شد.

شتاب‌دهنده‌های یونی موجود، یون‌های تک انرژی تولید می‌کنند در حالی که دستگاه پلاسمای کانونی محدوده‌ای از انرژی پروتون‌ها را تولید می‌کند و در مدار LEO هم طیفی از انرژی پروتون‌ها وجود دارد. در این پژوهش مدار LEO با ارتفاع ۴۰۰ کیلومتر از سطح زمین انتخاب شد که در انرژی‌های خیلی بالا شار پروتون‌ها بسیار کم و قابل چشم‌پوشی است. با این حال طیف انرژی پروتون‌ها در مدار LEO مورد نظر دارای انرژی نزدیک به پیک انرژی پروتون‌های دستگاه پلاسمای کانونی است. اما شار پروتون‌های دستگاه پلاسمای کانونی بسیار بیشتر از مدار LEO مورد نظر است. بنابراین اگر هدف از انجام تست‌ها را حفاظ‌سازی بدانیم، با استفاده از دستگاه پلاسمای کانونی طیف انرژی از پروتون‌ها را تولید می‌کنیم که دارای پیک انرژی نزدیک به پیک انرژی پروتون‌های مدار LEO می‌باشد اما شار بیشتری دارد که می‌تواند هر شات دستگاه نمایانگر چندین سال حضور سلول در فضا باشد.

دستگاه Autolab-PGSTAT101 برای تست سلول‌های خورشیدی استفاده شد. دستگاه شبیه‌ساز طیف انرژی سلول‌های خورشیدی به عنوان منبعی از نور مرئی با طیف انرژی نزدیک به طیف انرژی خورشید و شدت نوری ثابت طراحی شد. در طراحی این دستگاه از ۷۸۴ عدد LED استفاده شد. LEDهای استفاده شده در ساخت این دستگاه متشکل از ۴ نوع قرمز، آبی، سفید و فروسرخ است. شبیه‌ساز طیف انرژی خورشیدی ساخته شده در فاصله حدود ۱۰ cm روشنایی نوری ۱۰ هزار لوکس دارد.

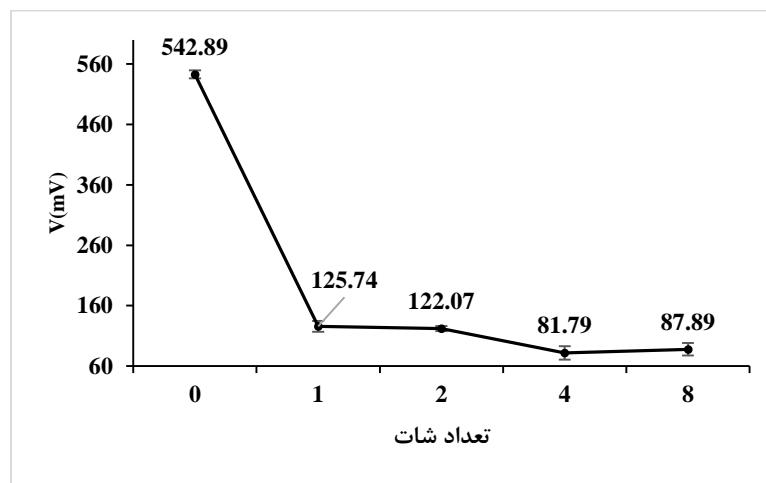
با توجه به استفاده از گاز هیدروژن در دستگاه پلاسمای کانونی، پس از تشکیل پینچ تنها هیدروژن یونیزه شده (پروتون) به همراه اشعه ایکس و UV گسیل می‌شود و گداخت درون محفظه رخ نمی‌دهد. بنابراین یون‌های سنگین و نوترون وجود نخواهد داشت. برای آنکه کاملاً اطمینان حاصل کنیم که اثر ایجاد شده روی سلول‌های خورشیدی تنها ناشی از پروتون‌های دستگاه پلاسمای کانونی است، قبل و بعد از حذف حفاظ سلول‌ها، آزمایش‌هایی با ۸ شات روی سلول‌های خورشیدی انجام شد. در آزمایش‌هایی که سلول‌ها با حفاظ تحت تابش قرار گرفتند، تغییری در پارامترهای الکتریکی سلول‌ها مشاهده نشد. حفاظ سلول‌ها جلوی نفوذ پروتون‌ها را می‌گیرد اما جلوی نفوذ اشعه UV و تابش‌های الکترومغناطیسی را نمی‌گیرد. در نتیجه اطمینان داریم که اشعه UV و تابش‌های الکترومغناطیسی ناشی از دستگاه پلاسمای کانونی تاثیری بر پارامترهای الکتریکی سلول‌ها نداشتند. پس از برداشتن حفاظ سلول‌ها آزمایش‌ها تکرار شد تا اثر پروتون‌های دستگاه پلاسمای کانونی بر سلول‌ها قابل تایید بود.



در این آزمایش‌ها از فشار ۴ میلی‌بار هیدروژن و ولتاژ ۲۳ کیلوولت بانک خازنی استفاده شد. قبل و بعد از هر آزمایش، تست جریان-ولتاژ از تمامی سلول‌ها گرفته شد. هر آزمایش دو بار و هر بار دو سلول خورشیدی پرتودهی شدند. در مجموع برای هر آزمایش ۴ سلول خورشیدی بصورت جفتی تست شدند. پس از پرتودهی سلول‌های خورشیدی، روند بهبود اثرات گذرای تابش‌های فرودی را با گذشت زمان برای ۱۲ ساعت، ۱، ۲، ۳، ۴، ۷ و ۱۰ روز پس از پرتودهی با انجام تست جریان-ولتاژ اندازه‌گیری شد.

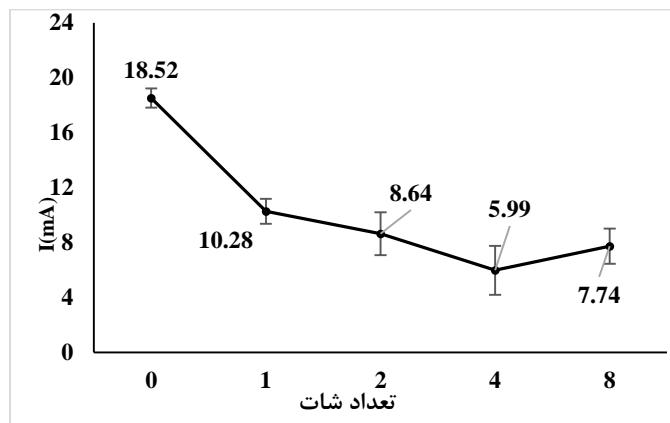
نتایج

در شکل‌های ۱ و ۲ روند تغییرات ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه با افزایش تعداد شات روی سلول‌های خورشیدی مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش تعداد کل پالس‌ها، کاهش عملکرد سلول‌ها بیشتر دیده می‌شود. پس از ۱ شات بطور میانگین نسبت به شرایط اولیه ولتاژ ۷۶/۸۱ درصد کاهش و جریان ۴۳/۱۸ درصد کاهش داشت. پس از ۲ شات بطور میانگین نسبت به شرایط اولیه ولتاژ ۷۶/۷۰ درصد کاهش و جریان ۵۴/۹۱ درصد کاهش داشت. پس از ۴ شات بطور میانگین نسبت به شرایط اولیه ولتاژ ۸۴/۹۴ درصد کاهش و جریان ۶۷/۴۹ درصد کاهش داشت. روند بهبود اثرات گذرای تابش‌های فرودی با گذشت زمان برای ۱۲ ساعت، ۱، ۲، ۳، ۴، ۷ و ۱۰ روز پس از پرتودهی با انجام تست جریان-ولتاژ اندازه‌گیری شد. روند تغییرات در شکل‌های ۳ و ۴ برای ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه مشاهده می‌شود. پس از گذشت ۱۰ روز از پرتودهی، ولتاژ مدار باز سلول‌هایی که ۱، ۲ و ۴ شات خورده‌اند به ترتیب ۲۲/۸۱، ۱۸/۰۰ و ۳۵/۱۰ درصد افزایش داشت. همچنین جریان اتصال کوتاه سلول‌ها به ترتیب ۷/۳۷، ۸/۹۱ و ۲۷/۸۹ درصد افزایش داشت. در نتیجه هرچه یک سلول بیشتر پرتودهی شده باشد، آسیب‌های گذرای بیشتری تولید شده است که در مدت زمان برابر با سرعت بیشتری بهبود می‌یابد.

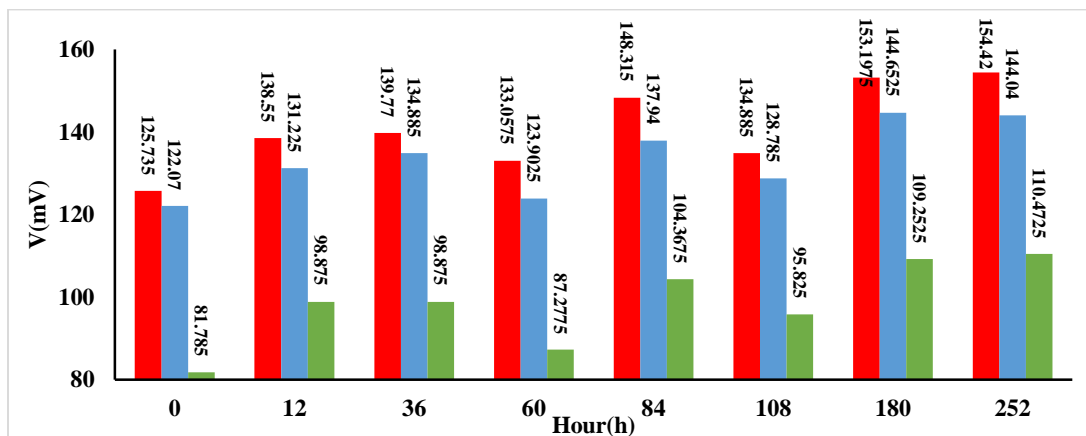


شکل ۱: روند کاهش ولتاژ مدار باز سلول‌های خورشیدی با افزایش تعداد شات

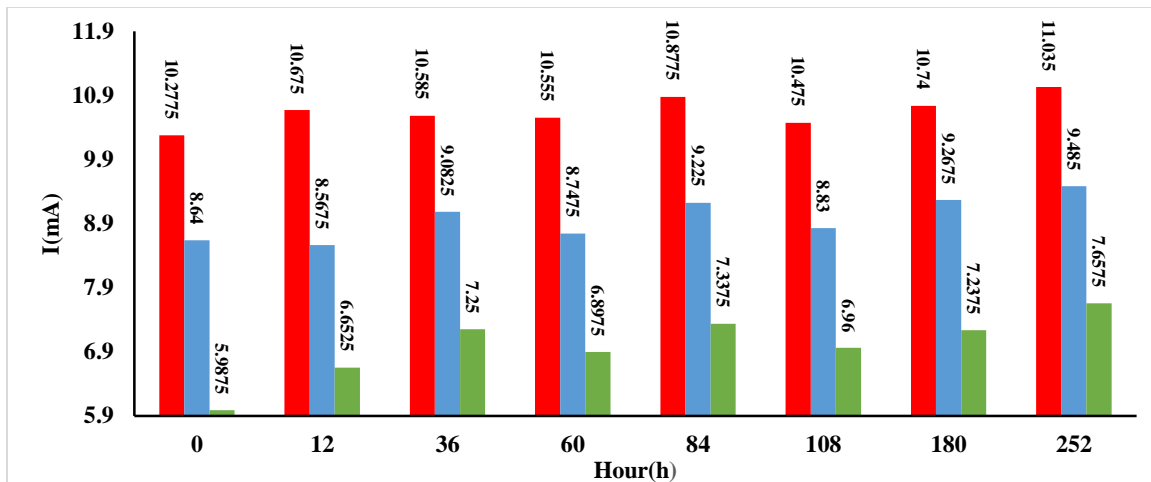
خطاهای اندازه‌گیری در دو فاز (۱) خطای دستگاه‌های شبیه‌ساز طیف انرژی خورشیدی، ساخت سلول‌های خورشیدی و دستگاه اندازه‌گیری جریان-ولتاژ Autolab و (۲) خطای تمامی دستگاه‌های ذکر شده در مورد اول به علاوه دستگاه پلاسمای کانونی بررسی شد. خطای نسبی ناشی از عوامل شماره (۱) را با استفاده از نتایج آنالیز I-V قبل از پرتودهی سلول‌های خورشیدی بدست آوردیم. خطای نسبی ولتاژ ۱/۲۱ درصد و انحراف استاندارد ولتاژ ۶/۵۳ میلی‌ولت است. خطای نسبی جریان ۳/۴۹ درصد و انحراف استاندارد جریان ۰/۷۰ میلی‌آمپر است. خطای نسبی ناشی از عوامل شماره (۲) در آزمایش‌های ۱، ۲، ۴ و ۸ شات به ترتیب برای ولتاژ ۷/۱۸، ۳/۶۵، ۱۳/۸۹ و ۱۲/۰۰ درصد است. همچنین مقدار خطای نسبی برای جریان در این آزمایش‌ها به ترتیب ۸/۷۴، ۱۸/۰۹، ۲۹/۶۸ و ۱۶/۷۳ درصد است.



شکل ۲: روند کاهش جریان اتصال کوتاه سلول‌های خورشیدی با افزایش تعداد شات



شکل ۳: روند تغییرات ولتاژ مدار باز سلول‌های خورشیدی با گذشت زمان (قرمز: ۱ شات، آبی: ۲ شات، سبز: ۴ شات)



شکل ۴: روند تغییرات جریان اتصال کوتاه سلول‌های خورشیدی با گذشت زمان (قرمز: ۱ شات، آبی: ۲ شات، سبز: ۴ شات)

بحث و نتیجه گیری

سلول‌هایی که دارای حفاظ بودند، در مقابل شات‌های دستگاه پلاسمای کانونی مقاوم بوده و به عبارتی یون‌های در محدوده انرژی گسیلی دستگاه پلاسمای کانونی تأثیری در عملکرد سلول‌های با حفاظ نداشتند. این محدوده انرژی پروتون‌ها در مدار LEO و فاصله ۴۰۰ کیلومتر از سطح زمین مشاهده می‌شوند و با بررسی‌های انجام گرفته در صورت وجود حفاظ اثری روی سلول‌های خورشیدی نخواهند داشت. اما در آزمایش روی سلول‌های بدون حفاظ، در هر شات دستگاه پلاسمای کانونی، تغییر پارامترهای الکتریکی سلول خورشیدی بسیار زیاد است که در بخش نتایج تغییرات پارامترهای الکتریکی سلول‌های خورشیدی ارائه شد. پس از گذشت ۱۰ روز از پرتودهی و لتاز مدار باز سلول‌هایی که ۱، ۲ و ۴ شات خورده‌اند به ترتیب ۲۲/۸۱، ۱۸/۰۰ و ۳۵/۱۰ درصد افزایش داشت. همچنین جریان اتصال کوتاه سلول‌ها به ترتیب ۷/۳۷، ۸/۹۱ و ۲۷/۸۹ درصد افزایش داشت. بنابراین با گذشت زمان و بازگشت برخی از اتم‌های جابجا شده به تهیجای‌ها و پر کردن آن‌ها، برخی پارامترهای الکتریکی بهبود می‌یابند. در نتیجه بخشی از آسیب وارد شده ناشی از پرتودهی پروتون، گذراست.

مراجع :

- [1] L. I. Miroshnichenko, Radiation Hazard In Space, National Radio Astronomy Observatory, Charlottesville, 2003.
- [2] E. Seedhouse, Space Radiation and Astronaut Safety, International space university, 2018.
- [3] A. Johnston, Reliability and Radiation Effects in Compound Semiconductors, World Scientific Publishing, 2010.
- [4] C. Kittel, Introduction ro solid state Physics, University of California, 2005.



- [5] A. Luque, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, A John Wiley and Sons, 2011.
- [6] M. A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, & et. al, Solar cell efficiency tables (version 37), Photovoltaics: Research And Applications, 19 (2011), 84-92.
- [7] B. E. Anspaugh, GaAs Solar Cell Radiation Handbook, National Aeronautics and Space Administration, 1996.
- [8] R. Velazco, P. Fouillat, R. Reis, Radiation Effects On Embedded Systems, Springer, 2007.
- [9] W. Rong, G. Zengliang, Z. Xinghui, Z. Zuoxu, 5–20MeV proton irradiation effects on GaAs/Ge solar cells for space use, Solar Energy Materials and Solar Cells, 77(2003), 351-357.
- [10] M. Alurralde, M. J. L. Tamasi, C. J. Bruno, Experimental and theoretical radiation damage studies on crystalline silicon solar cells, Solar Energy Materials & Solar Cells, 82 (2004), 531–542.
- [11] W. Rong, G. Zengliang, W. Guangpu, Low-energy proton irradiation effects on GaAs/Ge solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells, 90 (2006), 1052-1057.
- [12] W. Rong, L. Yunhong, S. Xufang, Effects of 0.28–2.80 MeV proton irradiation on GaInP/GaAs/Ge triple-junction solar cells for space use, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 266 (2008), 745–749.
- [13] W. Rong, F. Zhao, L. Yunhong, & et. al, Effects of 50 keV and 100 keV Proton Irradiation on GaInP/GaAs/Ge Triple-Junction Solar Cells, Plasma Science and Technology, 14 (2012), 647-649.