

Investigating the Test and Evaluation of GaN Transistors Radiation Resistance in SSPA Amplifier Board in LEO Satellite Payload

Roghieh Karimzadeh Bae^{1*} , Hamideh Daneshvar² , Amir Hossin Ahmadi³ and Parvin Sojoodi⁴

1. Assistant Professor, Satellite Communication Group, Faculty of Communications Technology, ICT Research Institute, Tehran, Iran
2. Assistant Professor, Radiation Processing and Dosimetry Research Group, Radiation Application Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute, Atomic Energy Agency of Iran, Tehran, Iran
3. Ph.D., Faculty of Communications Technology, ICT Research Institute, Tehran, Iran
4. M.Sc., Expert of Faculty of Communications Technology, ICT Research Institute, Tehran, Iran

*Corresponding Author's E-mail: rkbaee@itrc.ac.ir

Abstract

With the advent of gallium nitride (GaN) technology, achieving microwave power with high efficiency by solid-state devices has become more and more available. Therefore, the use of solid-state power amplifier (SSPA) with GaN technology in satellites, especially low earth orbit (LEO) satellites, has been considered. On the other hand, space radiation can affect the performance and reliability of components in space systems, which needs to be investigated. One of the most important technologies that can be affected by radiation effects is GaN transistors. In this paper, the effect of total ionizing dose (TID) on GaN transistors in the SSPA amplifier board is investigated. Since commercial components have been used in the engineering sample of the SSPA amplifier and the calculations obtained from the RDM estimates under the worst conditions show that it is necessary to conduct a test for the classification of commercial components, the radiation resistance test was performed for this amplifier. The results of the test conducted in this article show that the SSPA GaN board has radiation tolerance up to a dose of approximately 16 krad. Therefore, mismatched GaN transistors are resistant up to this amount of dose. This is while the sequencer board actually has less tolerance than 5.5 krad.

Keywords : Radiation resistance, Space radiation, GaN transistors, SSPA amplifier, LEO satellite

1. Introduction

The space is a harsh environment in which equipment is exposed to radiation, space debris, and extreme temperature changes [1-3]. Radiation can cause destructive effects on electronic components. These effects include the effect of TID, displacement damage (DD), and single event effects (SEE). GaN transistors are one of the most important technologies that can be affected by radiation effects. On the other hand, its operating temperature range is wide. These features have led to the technology being used in space. In recent years, there have been many advantages to using this technology in power components. The availability of these parts and its higher production has reduced the price and increased its use [4-6].

In this paper, the manufactured SSPA amplifier using Die-GaN transistors for the LEO satellite is presented. This SSPA includes the amplifier board and sequencer board which their components are introduced. In the following, simulations and calculations are performed to determine the dose of space radiation and then the dose is determined according to the thickness of the shield. In this research, radiation design margin (RDM) calculations are based for the use of COTS components in missions with a period of 2 years at different altitudes. TIDL calculations were performed using OMERE software. After determining this quantity, a decision is made about whether or not to perform the test. When testing is required, the setup conditions must be in accordance with the requirements of the space standards. In this regard, the conditions and requirements of the



COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

How to cite this article:

R. Karimzadeh Bae, H. Daneshvar, A. Ahmadi, and P. Sojoodi, "Investigating the Test and Evaluation of GaN Transistors Radiation Resistance in SSPA Amplifier Board in LEO Satellite Payload," *Journal of Space Science and Technology*, Vol. 16, No. 1, pp. 59-74, 2023 (in Persian), <https://doi.org/10.30699/jsst.2023.1400>.

radiation test on the part under test are investigated and the method and feasibility of TID damage test based on ECSS space standards are presented. The results of the radiation test are presented and finally, the summary, evaluation and results of the test are presented.

2. Methodology

OMERE software has been used for simulations and calculations related to dose determination due to space radiation [7]. TID radiation damage calculations have been performed for commercial grade components for using on the LEO satellite with three different altitudes of 350, 450 and 550 km [8]. The dose amount in terms of thickness is determined. The requirements of the space radiation test in the total ionizing dose domain on the SSPA amplifier board along with the sequencer board were extracted based on space standards. Since the effects of electrons and protons on TID damage are similar to the effects of gamma rays, an experiment was designed which the behavior of the two boards was investigated and recorded [9-14].

3. Results and Discussion

In order to determine the threshold dose for commercial parts, considering RDM = 2 for acceptance test, parts up to 6 krad were examined. Due to the test results and the health of the GaN amplifier board and due to the limitation of irradiation in one day, the evaluation test was performed for irradiation up to 16 krad dose. During the evaluation test for the SSPA GaN board, after a dose of approximately 9 krad, a time stop of 110 min was performed and this factor was also investigated. The time interruption has caused a sudden change in the parameters. The results show that the standard deviation of the changes in the output detector voltage, reverse detector voltage and Drain current in this Die-GaN class in the whole irradiation process up to 16 krad is approximately equal to 0.03%, 0.08% and 9%, respectively. Therefore, it can be estimated that the SSPA GaN board can withstand radiation up to a dose of approximately 16 krad. The irradiation results of the sequencer board show that the passive load Drain current at a dose of 5.5 krad will change by more than 13.6% compared to the amount before irradiation. In this range, the amount of drain current in the passive load in radiation with a dose between 6.5 and 7 krad, decreases sharply and suddenly becomes zero, and therefore it can be estimated that the sequencing board actually has a tolerance of less than 5.5 krad

4. Conclusions

In this research, the radiation resistance of Die-GaN transistors has been investigated considering TID damage for using on LEO satellite. In this study, the worst possible conditions were considered and the tolerance of COTS components was considered to determine the radiation margin of RDM. According to the instructions related to space standards, the amount of RDM has been determined and then a conclusion has been made about the necessity of conducting the experiment. Calculations resulting from RDM estimates under the worst conditions, show that testing is required to classify commercial components. In this work, two acceptance and evaluation tests have been performed. In

general, it can be concluded from the performance of these experiments that alone and with the classification of radiation tolerance cannot be considered specifically for the boards used in space systems. Due to the use of different types of components with different grades, the process of estimating radiation tolerance should be done by testing. Given that these experiments have recently become mandatory in the country; this could be promising to do more research in this area in research centers.

5. References

- [1] Ö. Amutkan, "Space radiation environment and radiation hardness assurance tests of electronic components to be used in space missions," 2010 .
- [2] E. G. Stassinopoulos a/ac J. P. Raymond, "The Space Radiation Environment for Electronics," *Proc. IEEE*, vol. 76, no. 11, pp. 1423–1442, 1988.
- [3] "ESA ESA and Space Debris", European Space Agency
- [4] K. Hirche et al., "GaN Reliability Enhancement and Technology Transfer Initiative (GREAT2)," *Abstr. ESA/ESTEC Contract no. 21.499/08/nl/pa.*, vol. 21, no. 8, 2014.
- [5] A. Y. Polyakov, S. J. Pearton, P. Frenzer, F. Ren, L. Liu, a/ac J. Kim, "Radiation effects in GaN materials and devices," *yn Journal of Materials Chemistry C*, vol. 1, no. 5, 2013, pp. 877–887.
- [6] A. C. Vilas Bôas et al., "Ionizing radiation hardness tests of GaN HEMTs for harsh environments," *Microelectron. Reliab.*, vol. 116, 2021.
- [7] A. Varotsou, "OMERE space radiation environment and effects tool: new developments and new interface," 2017.
- [8] H. Daneshvar, A. Eidi, L. Mohamadi, R. Omid, a/ac P. Hajipour, "Investigation and feasibility study of using components with different categories from the perspective of radiation damage in LEO and GEO orbits," *J. of Space Science and Technology.*, vol. 14, no. 4, 2021 pp. 11–23.
- [9] D. Custodian a/ac E. S. Agency, "Total Dose Steady-State Irradiation Test Method Escc Basic Specification no . 22900," Test, no. 22900. ESCC, 2007, pp. 1–17.
- [10] M. Poizat, "Radiation Environment and its Effects in EEE. Components and Hardness Assurance for Space. Application," *yn Radiation environment and its effects in EEE components and hardness assurance for space applications*, 2017.
- [11] Y. Ye et al., "The Secular Variation of the Center of Geomagnetic South Atlantic Anomaly and Its Effect on the Distribution of Inner Radiation Belt Particles," *Sp. Weather*, vol. 15, no. 11, 2017.
- [12] H. Daneshvar, "Calculation of Radiation Damage on Electronic Devices," Shahid Beheshti University, 2011.
- [13] Jet Propulsion Laboratory, "Radiation Design Margin Requirement," NASA, 1999.
- [14] ESA ECSS, "ECSS-Q-ST-60-15C Radiation hardness assurance - EEE components," ECSS Secretariat, vol. October, no. 32, 2012.

بررسی آزمون و ارزیابی مقاومت تشعشی TID ترانزیستورهای GaN در برد تقویت کننده SSPA جهت به کارگیری در محموله ماهواره LEO

رقیه کریم زاده بائی^{۱*}، حمیده دانشور^۲، امیرحسین احمدی^۳ و پروین سجودی سردرود^۴

۱- گروه ارتباطات ماهواره‌ای پژوهشکده فناوری ارتباطات، پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات (مرکز تحقیقات مخابرات ایران)، تهران، ایران
۲- گروه پژوهشی پرتو فرآوری و دزیمتری، پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مخاطب: rkbaee@itrc.ac.ir

چکیده

با ظهور فناوری GaN، دست‌یابی به توان مایکروویو با استفاده از ادوات حالت جامد و با بازدهی بالا، بیش از پیش میسر شده است. لذا استفاده از تقویت‌کننده‌های SSPA با فناوری GaN در ماهواره‌ها به خصوص ماهواره‌های LEO، مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی، تشعشعات فضایی می‌تواند بر عملکرد و قابلیت اطمینان قطعات موجود در سامانه‌های فضایی تأثیرگذار باشد که لازم است مورد بررسی قرار گیرد. به منظور صحت‌گذاری بر امکان استفاده از ترانزیستورهای GaN در ماهواره‌های LEO لازم است اثرات تابشی بر روی این ترانزیستورها بررسی شود. در این مقاله به بررسی اثر TID بر ترانزیستورهای GaN در برد تقویت‌کننده SSPA به همراه برد توالی‌ساز آن، پرداخته شده است. از آنجا که در نمونه مهندسی تقویت‌کننده SSPA از قطعات تجاری استفاده شده است و محاسبات حاصل از تخمین‌های RDM تحت بدترین شرایط نشان می‌دهد که انجام آزمون برای این قطعات الزامی است، آزمون بررسی مقاومت تشعشی برای این تقویت‌کننده انجام شد. نتایج آزمون نشان می‌دهد که برد SSPA GaN تا دز تقریباً ۱۶ krad دارای قابلیت تحمل تشعشی است. بنابراین ترانزیستورهای تطبیق نیافته GaN، تا این مقدار از دز، مقاوم هستند. این درحالی است که برد توالی‌ساز عملاً دارای قدرت تحمل کمتر از ۵/۵ krad است.

واژه‌های کلیدی: مقاومت تشعشی، تشعشعات فضایی، ترانزیستورهای GaN، تقویت‌کننده SSPA، ماهواره LEO

Radiation Hardness Assurance (RHA)

تضمین مقاومت در برابر تابش

Critical Design Review (CDR)

بازبینی طراحی بحرانی

Galium Nitride (GaN)

گالیوم‌نیتراید

Silicon Carbide (SiC)

سیلکون کرباید

Galium Arsenide (GaAs)

گالیوم‌آرسناید

علائم و اختصارات

Total Ionizing Dose (TID)

دز یونیزاسیون کل

Displacement Damage (DD)

اثر آسیب جابه‌جایی

Single Event Effects (SEE)

اثرات تکرخدادی

۳. دکتری

۴. کارشناسی ارشد

۱. استادیار

۲. استادیار



COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Published by Aerospace Research Institute. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [the Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ویژگی‌های تابشی می‌تواند در انتخاب فناوری و فعالیت‌های مصالحه^۵ طراحی کمک کند.

فاز B: محیط تابشی مطابق با الزامات بالا به پایین تکمیل می‌گردد. طراحی الکترونیکی طرح‌بندی ماهواره یا فضاپیما تعریف می‌شود. تحلیل اولیه از حفاظ می‌تواند مانند ویژگی‌های محیط تابشی آغاز شود.

فاز C: آزمون‌های ویژگی‌های تابشی اجرا و تحلیل حفاظ تجهیزات نهایی می‌شود. آنالیز برای بدتری شرایط تابشی در مدار انجام می‌شود. در انتهای فاز C، برای CDR^۶، بیشتر فعالیت‌های RHA تکمیل شده است.

فاز D: فعالیت‌های RHA باقیمانده مربوط به آزمون‌های تابشی بر روی lotهای پروازی (RVT^۷ و یا RADLAT^۸) هستند [6]. بنابراین طبق فازبندی صورت گرفته در بالا، بررسی مقاومت تشعشعی قطعات یکی از گام‌های مهم و ضروری در تضمین مقاومت در برابر تابش می‌باشد.

از سوی دیگر، یکی از فناوری‌های بسیار مهم نیمه‌هادی که می‌تواند تحت تاثیر اثرات تابشی باشد، گالیوم‌نیتراید^۹ (GaN) است. فناوری GaN، در مقایسه با سایر فناوری‌های ساخت ادوات نیمه‌هادی، مانند سیلیکون (Si)، سیلیکون کرباید^{۱۰} (SiC) و گالیوم‌آرسناید (GaAs) که بیش از ۴۰ سال در SSPAها به کار گرفته شده‌اند، یک تکنولوژی نسبتاً جدید به حساب می‌آید که به گزینه مورد استفاده در بسیاری از کاربردهای رادیویی توان بالا برای ارسال سیگنال به فاصله‌های دور، تبدیل شده است. محدوده دمای عملکردی این فناوری زیاد است و در ائتلاف توان یکسان، افزایش دمای کمتری نسبت به فناوری‌های نیمه-هادی دیگر دارد. علاوه بر آن، در فناوری GaN به دلیل فاصله زیاد بین دو تراز باند انرژی^{۱۱} اندازه میدان شکست بیشتری نسبت به سایر فناوری‌های نیمه‌هادی دارد. این ویژگی به این نیمه‌هادی، توانایی کار کردن در ولتاژ کاری بالاتر را نسبت به سایر نیمه‌هادی‌ها می‌دهد. مجموعه ویژگی‌های فوق در ادوات GaN به معنی امکان فراهم آوردن چگالی توان زیاد تا ده برابر بیشتر از فناوری GaAs است. به طور مشخص، چگالی توان بیشتر، به معنی آن است که با استفاده از قطعه-ای با ابعاد کوچکتر، می‌توان به توان بیشتری دست یافت. به این ترتیب، می‌توان از ترانزیستورهای GaN در کاربردهایی با توان بالاتر نسبت به سایر نیمه‌هادی‌ها استفاده کرد. از سوی دیگر، الکترون‌ها در تکنولوژی GaN سرعت اشباع بیشتری دارند؛ که این به معنی چگالی

Solar Particle Events (SPE)	رویداد ذرات خورشیدی
South Atlantic Anomaly (SAA)	ناهنجاری‌های آتلانتیک جنوبی
Solid-State Power Amplifier (SSPA)	تقویت کننده توان حالت جامد
Radiation Design Margin (RDM)	حاشیه طراحی تشعشعی
Total Ionizing Dose Level (TIDL)	سطح دز یونیزاسیون کل
Total Ionizing Dose Sensitivity (TIDS)	حساسیت دز یونیزاسیون کل
Total Ionizing Dose (TID)	دز یونیزاسیون کل

مقدمه

محیط فضا یک محیط پیچیده است که در آن تجهیزات با تشعشعات، زباله‌های فضایی و تغییرات شدید دما مواجه می‌شوند [3]–[1]. ماهواره‌ها بنا به مأموریت‌های مدنظر، در مدارهای مختلف در محیط فضا قرار دارند و در تمام طول عمر خود، درگیر تشعشعات فضایی می‌باشند. به دلیل وجود کمرندهای مغناطیسی اطراف زمین، مقدار قابل توجهی از ذرات باردار در این کمرندها به دام افتاده و نمی‌توانند به جو زمین برسند، اما در فضا شار این ذرات بسیار زیاد بوده که بایستی در طراحی سامانه‌های فضایی به این مسئله توجه داشت. شار ذرات یونیزان فضایی با توجه به طول و عرض جغرافیایی زمین، ارتفاع از سطح زمین، آغاز مأموریت و بازه زمانی آن، تغییرات قابل توجهی دارد. بنابراین، چگالی انواع ذرات موجود در محیط‌های تابشی می‌تواند به طور قابل ملاحظه‌ای با توجه به ارتفاع، زاویه میل مداری، فعالیت خورشیدی و مقدار حفاظ فضاپیما (به علت پراکندگی) تغییر کند [4].

تابش می‌تواند موجب اثرات مخربی بر روی اجزاء مختلف زیرسیستم‌های ماهواره به خصوص قطعات الکترونیکی زیرسیستم محموله گردد. این اثرات شامل اثر دز یونیزان کل^۱ (TID)، اثر آسیب جابه‌جایی^۲ (DD) و اثرات تک‌رخدادی^۳ (SEE) می‌باشند. قابلیت اطمینان مورد نیاز برای کاربردهای فضایی موجب می‌شود که فرآیند تضمین مقاومت در برابر تابش^۴ (RHA)، فرآیندی کلیدی در دستیابی به موفقیت مأموریت ماهواره باشد [5]. فازبندی RHA در پروژه‌های فضایی بدین صورت می‌باشد [6]:

فاز ۰ یا فاز A: محیط تابشی تعریف می‌شود و الزامات سطح بالای تابشی از آن استخراج می‌شود. بررسی‌های مقدماتی

7. Radiation Verification Testing
8. Radiation Lot Acceptance Testing
9. Gallium Nitride
10 . Silicon Carbide
11 . Band Gap

1. Total Ionizing Dose
2. Displacement Damage
3. Single Evenet Effects
4. Radiation Hardness Assurance
5. Trade-off
6. Critical Design Review

گرفته است [18]. در مراجع [19]-[20] که پژوهش در زمینه حفاظت‌سازی در برابر تشعشعات فضایی صورت گرفته، نویسندگان اثر حفاظ‌های چند لایه را مورد بررسی قرار داده‌اند. در تحقیقی دیگر، تاثیر استفاده از چند سازه ساندویچی مورد بررسی قرار گرفته است [21]. در این مقاله با استفاده از پارامتر «حفاظت ویژه» ساختارهای مختلف تست و مقایسه شده‌اند و بهترین ساختار از دیدگاه حفاظتی شناسایی و گزارش شده است.

در این پژوهش، به بررسی اثر TID بر ترانزیستورهای GaN بر برد تقویت‌کننده توان حالت جامد^۸ (SSPA) بر مبنای دستورالعمل‌های آزمون این پدیده، پرداخته شده است. مبنای الزامات دستورالعمل‌های آزمون، استانداردهای فضایی اژانس فضایی اروپا [25]-[22] هستند. در نظر گرفتن این الزامات منوط به داشتن اطلاعات اولیه از پارامترهای مداری ماهواره و همچنین اطلاعات در خصوص حساسیت‌پذیری قطعات مختلف و تحمل آن‌ها نسبت به پرتو است؛ لیکن برخی از این اطلاعات برای ترانزیستورهای فرکانس بالای توان با فناوری GaN بسیار محدود است. الزام دیگر در رابطه با آزمون TID، مشخصات چشمه تابشی است. چشمه تابشی مورد استفاده برای آزمون بررسی آسیب یونیزان می‌تواند از نوع پرتوی گاما تشعشع شده از عنصر کُبالت ^{60}Co یا باریکه الکترون خروجی شتاب‌دهنده باشد. چشمه‌های دیگری نیز می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. چشمه ^{60}Co دارای دو انرژی 1.33 MeV و 1.17 MeV می‌باشد [26].

در این مقاله، ابتدا ساختار تقویت‌کننده SSPA ساخته شده با استفاده از ترانزیستورهای تطبیق نیافته GaN^{10} برای ماهواره LEO مورد بررسی قرار می‌گیرد و قطعات برد تقویت‌کننده و برد توالی‌ساز^{۱۱} آن، معرفی می‌شوند. در ادامه، محاسبات انجام شده برای تعیین دُز ناشی از تشعشعات فضایی آورده شده و مقدار دُز دریافتی بر حسب ضخامت بدنه تعیین می‌گردد. در این کار پژوهشی، مبنای محاسبات، حاشیه طراحی تشعشی^{۱۲} (RDM) برای استفاده از قطعات تجاری در ماموریت با بازه زمانی ۲ سال در ارتفاع‌های ۳۵۰، ۴۵۰ و ۵۵۰ km می‌باشد. محاسبات مربوط به تعیین^{۱۳} TIDL با استفاده از نرم‌افزار OMERE انجام شده است. پس از تعیین این کمیت، در خصوص انجام و یا عدم انجام آزمون تصمیم‌گیری به عمل می‌آید. در شرایطی که انجام آزمون لازم باشد، باید شرایط چیدمان مطابق با الزامات استانداردهای فضایی باشد. در این راستا، به بررسی شرایط، الزامات و روش انجام آزمون تشعشی به منظور بررسی اثر آسیب TID بر قطعه تحت آزمون مطابق با استاندارد فضایی ECSS پرداخته شده است. در

جریان بیشتر نسبت به سایر نیمه‌هادی‌هاست. [۱۷] مجموع این خصوصیات باعث شده که تکنولوژی GaN کارایی بالاتر، دفع حرارت بهتر و به تبع قابلیت اطمینان بیشتری داشته باشد و نهایتاً، امکان استفاده از این فناوری برای کاربردهای فضایی فراهم گردد [9]-[8]. ترانزیستورهای GaN به علت داشتن پهنای باند زیاد، برای کاربردهای فرکانس بالا و میدان‌های بالاتر از 5 MV/cm مناسب می‌باشند. خروجی توان این فناوری در فرکانس‌های بالای رادیویی در مقایسه با فناوری‌های نیمه‌هادی دیگر بیشتر است. در سال‌های اخیر مزیت‌های زیادی برای استفاده از این فناوری در قطعات توان، شمرده شده است. در دسترس بودن این قطعات و تولید زیادتر آن موجب کاهش قیمت و افزایش استفاده از آن شده است [14]-[12]. انتظار می‌رود که فناوری GaN به دلیل داشتن پیوند یونی کووالانسی قوی، دارای مقاومت تابشی زیادی باشد و بتواند در محیط‌های پیچیده تابشی که دارای انواع مختلفی از ذرات با شارهای متغیر هستند، مورد استفاده قرار گیرد [11]-[10].

اثرات طولانی‌مدت تابش (به خصوص الکترون‌ها و پروتون‌های پرانرژی^۱ SPE^۱ و SAA^۲) بر اجزای الکترونیکی، TID نامیده می‌شود و جزء آسیب‌های تجمعی است. این اثرات یونیزان، علت اصلی از کار افتادگی^۳ تجهیزات الکترونیکی هستند. ساز و کار این اثر به‌طور کلی عبارت است از تولید بار، به‌دام افتادن و انباشت بار در لایه‌های عایق. اثرات اصلی آن شامل تغییر پارامتر^۴، افزایش جریان‌های نشتی، از دست مقاومت در برابر نویز^۵، کاهش بهره ترانزیستور، تغییر خواص کارکردی و از کارافتادگی احتمالی^۶ می‌باشد [15]. این اثر بر حسب راد^۷ یا گری^۸ اندازه‌گیری می‌شود.

اخیراً کارهایی که در حوزه تشعشعات فضایی صورت گرفته، رو به گسترش است. اکثر کارهایی که در این حوزه انجام شده، محاسباتی می‌باشد در حالیکه انجام امور تجربی، بیشتر در زمینه بررسی‌های حفاظت‌سازی بوده است. در [16] محاسبات قابلیت اطمینان در مدار LEO از منظر محاسبات و تعیین خطای واژگونی مورد بررسی قرار گرفته است. در پژوهشی دیگر، تاثیر ذرات خورشیدی بر ساختار بلوری قطعات نیمه‌هادی مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده شده است که هرچه ضخامت حفاظ‌ها بیشتر باشد، مقاومت قطعات نیمه‌هادی در برابر پرتوهای تابشی بیشتر می‌شود [17]. در پژوهش دیگری که در این حوزه انجام شده، پارامترهای مدل‌سازی در تعیین آسیب‌های پرتویی TID، DD و SEE با استفاده از نرم‌افزار OMERE مورد بحث قرار

8. Gray
9. Solid-State Power Amplifier
10. Die GaN
11. Sequencer
12. Radiation Design Margin
13. Total Ionizing Dose Level

1. Solar Particle Events
2. South Atlantic Anomaly
3. Failure
4. Parameter drift
5. Loss of noise immunity
6. Eventual functional failure
7. Rad

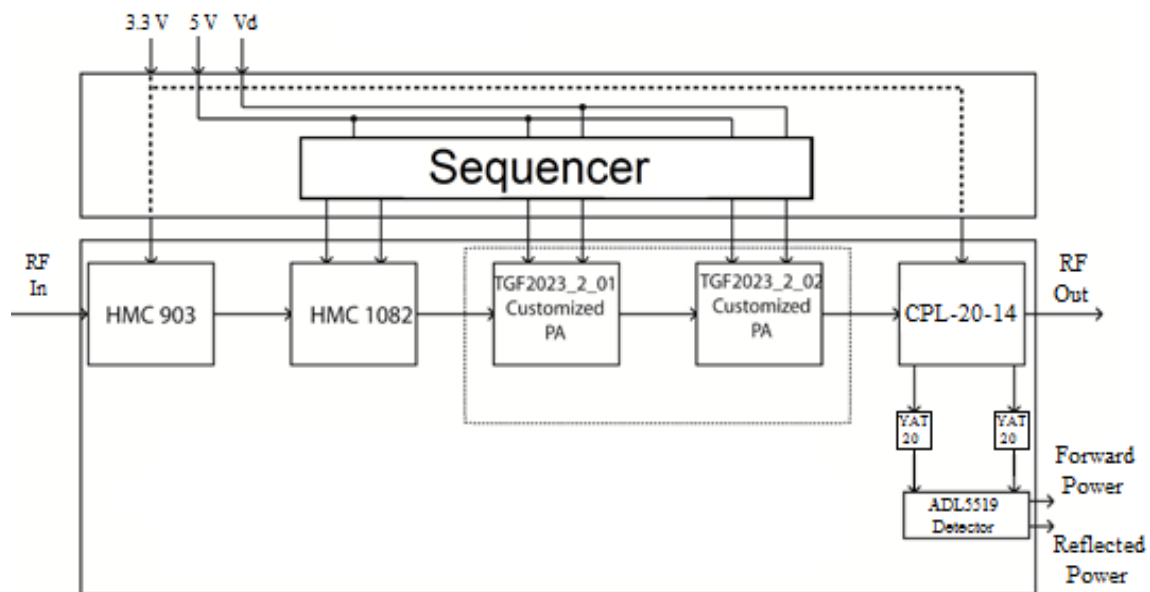
۲۰ dB می‌باشد. آشکارساز مورد استفاده، ADL5519 از کمپانی Analog Devices با محدوده دینامیکی بیش از 50dB در 10GHz است. برای قرارگیری توان خروجی کوپلر در محدوده دینامیکی آشکارساز از تضعیف‌کننده‌های YAT20 شرکت Mini-Circuits استفاده شده است. در جدول ۱ مشخصات قطعات برد تقویت‌کننده آورده شده است.

ترانزیستورهای مورد استفاده در برد تقویت‌کننده، از نوع Depletion Mode pHEMT هستند و در هنگام صفر بودن ولتاژ گیت، این نوع ترانزیستورها در ناحیه روشن قرار می‌گیرند و در صورتی که ولتاژ درین این ترانزیستورها پیش از اعمال ولتاژ گیت مناسب، متصل شوند، جریان زیادی از ترانزیستور عبور کرده و ممکن است قطعه آسیب ببینند. در همین راستا لازم است که از مدار توالی‌ساز برای بایاس کردن این نوع از ترانزیستورها استفاده شود تا هیچ‌گاه ولتاژ درین پیش از اعمال ولتاژ گیت متصل نشود. این مدارها معمولاً علاوه بر ایجاد توالی در اعمال ولتاژ گیت و درین، امکانات دیگری را نیز فراهم می‌کنند که قابلیت تنظیم ولتاژ گیت، جبران‌سازی دمایی ولتاژ گیت و همچنین ایجاد توالی در روشن شدن طبقات تقویت‌کننده از این جمله است. در مدل مهندسی تقویت‌کننده، از مدار توالی‌ساز پیشنهادی شرکت Cree استفاده شده است که قابلیت تنظیم ولتاژ گیت، ایجاد توالی مناسب بین گیت و درین، جبران‌سازی دمایی و همچنین استفاده به صورت Dazy Chain را دارد. مدار توالی‌ساز پیشنهادی شرکت Cree برای هر طبقه از تقویت‌کننده در شکل ۲ آمده است.

ادامه، نتایج آزمون تشعشعی ارائه می‌گردد و در نهایت، به ارائه جمع‌بندی و ارزیابی از نتایج حاصل از آزمون، پرداخته می‌شود.

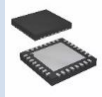

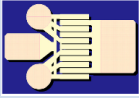



معرفی تقویت‌کننده SSPA ساخته‌شده برای ماهواره LEO

شکل ۱ شمای بلوکی از تقویت‌کننده SSPA GaN به همراه مدار توالی‌ساز آن را نشان می‌دهد. تقویت‌کننده با خروجی ۸ وات در فرکانس ۱۱ GHz، از ۴ طبقه تشکیل شده است. در طبقات اول و دوم که به عنوان طبقات گین قرار گرفته‌اند، تقویت‌کننده‌های مدار مجتمع شرکت Analog Devices با شماره‌های HMC903LP3E و HMC1082LP4E به کار گرفته شده است. طبقه HMC903 به صورت Self Bias بوده و با اتصال ولتاژ ۳/۵V راه‌اندازی می‌شود. جریان مصرفی این طبقه ۸۰ mA می‌باشد. طبقه HMC1082 نیز به ولتاژ درین ۵V متصل شده و با استفاده از توالی‌ساز با ولتاژ گیت در حدود ۱V- بایاس می‌شود. جریان بایاس این تقویت‌کننده در حدود ۲۲۰mA است. در طبقات سوم و چهارم، از تقویت‌کننده‌های طراحی شده با استفاده از ترانزیستورهای Die GaN شرکت Qorvo به‌منظور افزایش بازدهی استفاده می‌شود که در شکل ۱ به‌صورت Customized PA نشان داده شده است. ولتاژ درین این دو طبقه ۲۸ V و ولتاژهای گیت آن‌ها در حدود ۲/۸ V- می‌باشد. به منظور قرائت توان رفت و برگشت از کوپلر و آشکارساز توان استفاده شده است. کوپلر مورد استفاده، کوپلر CPL-20-14 از شرکت Mini-Circuits است که دارای ضریب کوپلاژ



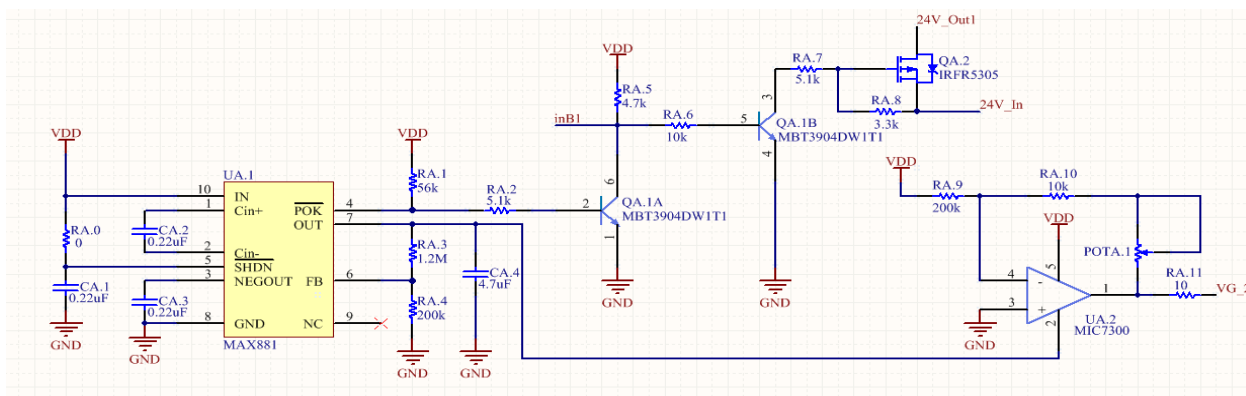
شکل ۱- شمای بلوکی تقویت‌کننده SSPA GaN

جدول ۱ - قطعات برد تقویت کننده SSPA GaN

Part No.	Manufacturer	Description	Production Process	Picture
HMC903LP3E	Analog Devices	GaAs, pHEMT, MMIC, Low Noise Amplifier	GaAs, pHEMT	
HMC1082LP4E	Analog Devices	GaAs pHEMT MMIC MEDIUM POWER AMPLIFIER	GaAs, pHEMT	
TGF2023-2-01	Qorvo	6 Watt Discrete Power GaN on SiC HEMT	GaN on SiC QGaN25 production process	
TGF2023-2-02	Qorvo	12 Watt Discrete Power GaN on SiC HEMT	GaN on SiC QGaN25 production process	
ADL5519	Analog Devices	1 MHz to 10 GHz, 62 dB Dual Log Detector/Controller	-	
CPL-20-14+	Mini Circuits	High Power Bi-Directional Coupler	-	





صورت دستی تنظیم می شود. در جدول ۲ مشخصات قطعات یک طبقه از برد توالی ساز آورده شده است. برد تقویت کننده SSPA GaN به همراه توالی ساز در جعبه ای قرار گرفت که نمایی از این جعبه در شکل ۳ آورده شده است. ضخامت و جنس این جعبه در محاسبه شدت تابش دریافتی توسط المان الکترونیکی مهم است. مشخصات جعبه به همراه قطعات مورد استفاده، در جدول ۳ آورده شده است.

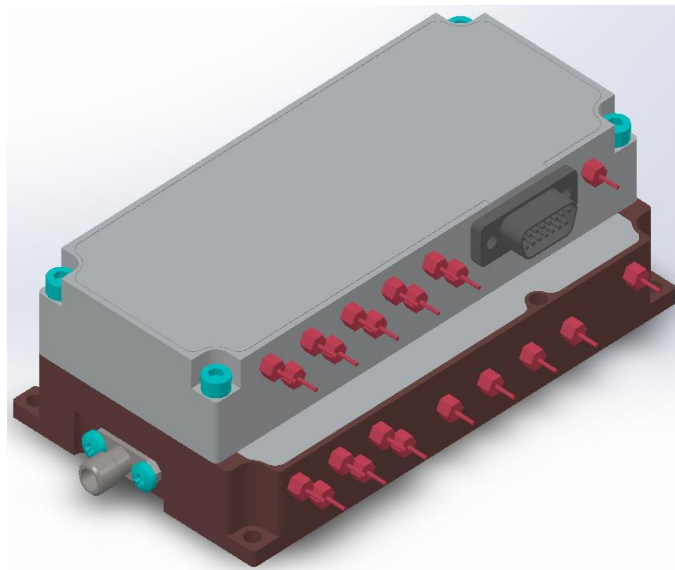
با توجه به تعداد طبقات نشان داده شده در شکل ۱، در اینجا برد توالی ساز سه طبقه می باشد زیرا طبقه اول مدار تقویت کننده به صورت Self Bias بوده و طبقات دوم، سوم و چهارم نیاز به توالی دارند. سه طبقه از مدار توالی ساز نشان داده شده در شکل ۲، به صورت پشت سرهم استفاده می شود. در این مدارها از قطعه MAX881 برای تولید ولتاژ منفی و همچنین ایجاد فرمان قطع یا وصل جریان درین استفاده می شود که این ولتاژ منفی با استفاده از OpAmp و پتانسیومتر به



شکل ۲- مدار یک طبقه از توالی ساز

جدول ۲- قطعات یک طبقه از برد توالی ساز

Part No.	Manufacturer	Description	Picture
MAX881R	Maxim Integrated	Low-Noise Bias Supply in μ MAX with Power-OK for GaAs FET PA	
MBT3904DW1T1	ON Semiconductor	General Purpose Bi-polar Transistor	
MIC7300	Micrel	High-Output Drive Rail-to-Rail OpAmp	
IRF5305	Infineon Technologies	HEXFET power MOSFET	



شکل ۳- شمای کلی جعبه تقویت کننده SSPA GaN و مدار توالی ساز

جدول ۳- مشخصات جعبه دربرگیرنده تقویت کننده SSPA GaN و برد توالی ساز به همراه قطعات مورد استفاده در این بردها

نوع قطعه	تعیین نوع قطعه	نوع حفاظ			ضخامت حفاظ (mm)		
		بالا	پایین	گوشته	بالا	پایین	گوشته
MAX881	Integrated Circuits	Al	Al	Al	1.5	2	5.5
ADL5519	Integrated Circuits	Al	Cu	Cu	1.5	4	5.5
HMC903	GaAs Integrated Circuits	Al	Cu	Cu	1.5	4	5.5
HMC1082	GaAs Integrated Circuits	Al	Cu	Cu	1.5	4	5.5
MBT3904DW1T	Transistors (MOS and bipolar)	Al	Al	Al	1.5	2	5.5
MIC7300	Transistors (MOS and bipolar)	Al	Al	Al	1.5	2	5.5
IRF5305	Transistors (MOS and bipolar)	Al	Al	Al	1.5	2	5.5
TGF2023-2-01	Die GaNs	Al	Cu	Cu	1.5	4	5.5
TGF2023-2-02	Die GaNs	Al	Cu	Cu	1.5	4	5.5

جدول ۴- پارامترهای ورودی ماهواره LEO در نرم افزار OMERE

مشخصات	OMERE نسخه # : 5.5
# Duration :	2 year(s)
# Perigee :	350km, 450km, 550km
# Apogee :	350km, 450km, 550km
# Inclination :	60°
# Number of orbits :	100
# Number of points per orbit :	100
Mission starting year:	2019
Trapped electron	AE8_MAX
Trapped proton	AP8_MIN
Protons model	ESP
Cosmic rays	GCR_ISO

محاسبات تعیین دُز ناشی از تشعشعات فضایی و آسیب‌های پرتویی TID

برای شبیه‌سازی و محاسبات مربوط به تعیین دُز ناشی از تشعشعات فضایی از نرم‌افزار OMERE استفاده شده است [27]. در این نرم‌افزار می‌توان مقدار SEE، آسیب جابه‌جایی، مقدار دُز و تخریب سلول‌های خورشیدی را محاسبه کرده و محیط تشعشی مورد نظر و دوره مأموریت را بر حسب این که ماهواره در چه مداری قرار داشته باشد، تعیین کرد [18].

در این قسمت محاسبات مربوط به آسیب‌های پرتویی TID برای قطعات با رده تجاری داده می‌شود، محاسبات برای ماهواره LEO است. به منظور بررسی بیشتر، محاسبات برای سه ارتفاع متفاوت km ۳۵۰، ۴۵۰ و ۵۵۰ انجام شده است. بازه زمانی مأموریت ۲ سال و آغاز مأموریت از ابتدای سال ۲۰۱۹ در نظر گرفته شده است [28]. پارامترهای ورودی در نرم‌افزار OMERE برای شبیه‌سازی ماهواره LEO به شرح جدول ۴ می‌باشد.

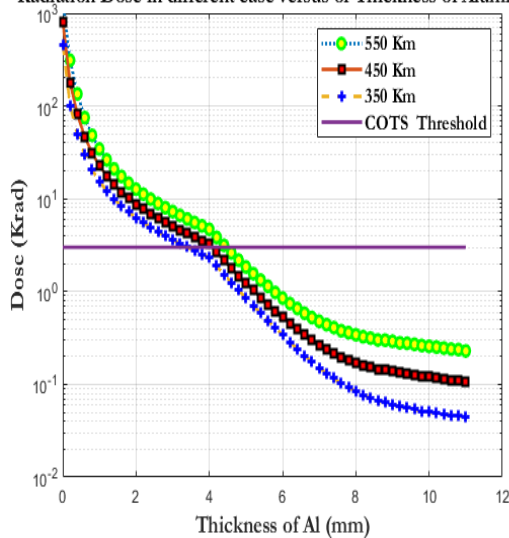
جدول ۵- تقسیم‌بندی قطعات به لحاظ آسیب‌پذیری نسبت به اثر TID [29]-[30]

نوع قطعه	TID (krad)
تجاری	[0-3]
نظامی	[3-30]
فضایی	[20-1000]

تعیین مقدار دُز بر حسب ضخامت شیلد

برای تعیین مقدار دُز بر حسب ضخامت، از منوی dose در نرم‌افزار OMERE استفاده می‌شود. همانطور که پیش‌تر گفته شد، این محاسبات برای بازه زمانی ۲ ساله و در ارتفاع‌های km ۳۵۰، ۴۵۰ و ۵۵۰ انجام شده است. حد آستانه عدم آسیب‌پذیری قطعات تجاری در برابر تابش تقریباً ۳ krad می‌باشد [29]-[30]. از تقاطع نمودار دُز بر حسب ضخامت با این مقدار آستانه مقدار کمینه لازم برای ایمنی این دسته از قطعات به دست می‌آید که در شکل ۴ نشان داده شده است.

Radiation Dose in different case versus of Thickness of Aluminum



تاب‌آوری قطعات نسبت به تشعشعات متفاوت است. قطعات تجاری در صورت برآوردن نمودن الزامات مربوط به ارتعاش، دما و غیره می‌توانند در کاربردهای فضایی نیز به کار بروند. این قطعات برای محیط‌های با تشعشعات بسیار کم برای مثال مدارهای کم‌ارتفاع و مأموریت‌های کوتاه‌مدت می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند [32]. در جدول ۵ محدوده عدم آسیب‌پذیری نسبت به اثر TID برای رده‌بندی قطعات آورده شده است [29]-[30].

در صورتی که میزان تحمل آستانه قطعات تجاری به صورت ۳ krad در نظر گرفته شود، کمترین میزان ضخامت لازم برای ایمنی قطعات تجاری به ترتیب در ارتفاع‌های km ۳۵۰، ۴۵۰ و ۵۵۰ برای پارامترهای مأموریت گفته شده، برابر با ۱/۸، ۲/۱ و ۲/۵ معادل آلومینیم می‌باشد.

شکل ۴- تعیین ضخامت حفاظ کمینه آلومینیم برای قرارگیری قطعات تجاری در ماهواره LEO با ارتفاع‌های مختلف

الزامات آزمون تشعشعی

تکمیل پرتودهی تا شروع پرتودهی دیگر نیز باید حداکثر ۲ ساعت باشد [26]. معیار پذیرش انجام آزمون TID، عدم تغییرات پارامترها قبل و بعد از پرتودهی در بازه ۱۰ درصد است [29].

روش و امکان‌سنجی آزمون آسیب TID

در این بخش به الزامات تشعشعات فضایی در حوزه دُز یونیزان کل بر روی برد تقویت‌کننده SSPA به همراه برد توالی‌ساز، پرداخته می‌شود. برای در نظرگیری این الزامات، استانداردهای فضایی ECSS مبنای کار قرار گرفته است. در نظرگیری این الزامات منوط به داشتن اطلاعات اولیه از پارامترهای مداری ماهواره و همچنین اطلاعات در خصوص حساسیت‌پذیری قطعات مختلف و تحمل آنها نسبت به پرتو است. مشخصات قطعات مورد استفاده در این دو برد در جدول ۳ آمده است. همانطور که مشخص است، کمترین میزان حفاظ مورد استفاده برابر ۱/۵ mm آلومینیم می‌باشد. با در نظرگیری تقریبی حداکثر ۱/۵ mm برای حفاظ محموله، بدترین شرایط در این حالت ۱/۵ mm از آلومینیم می‌باشد.

مطابق با مطالب مطرح شده در [30]، مقدار RDM قطعات تجاری با در نظرگیری حفاظ‌های ۱/۵ mm و ۳ در جدول ۶ ارائه شده است. برای نتیجه‌گیری از لزوم انجام آزمون می‌توان از دستورالعمل مربوط به استاندارد [23] استفاده کرد.

همانطور که مشخص است مقدار RDM با توجه به ارتفاع تغییر می‌کند. مقدار RDM در واقع نسبت مقدار TIDL به TIDS است. مقدار آهنگ دز نیز برای مدار LEO و زوایای انحراف بین ۲۰ تا ۸۵ درجه، تقریباً در بازه ۱۰-۱۱ krad/year تغییر می‌کند [36]. در مدار LEO در یک زاویه انحراف ثابت؛ با افزایش ارتفاع میزان شار ذرات افزایش می‌یابد و بنابراین بر مقدار دز تاثیر خواهد داشت [37].

طبق آستانه‌های بیان شده در بخش الزامات آزمون تشعشعی برای RDM، برای حفاظ ۱/۵ mm آلومینیم و در ارتفاع‌های به ترتیب ۳۵۰ km، ۴۵۰ و ۵۵۰ استفاده از قطعات تجاری جایز نیست. برای حفاظ ۳ mm و در ارتفاع‌های ۳۵۰ و ۴۵۰ km، نیازی به انجام آزمون نیست ولی برای ارتفاع ۵۵۰ کیلومتر باید آزمون انجام شود. در بقیه موارد باید آزمون انجام شود. همانطور که مشخص است، مقدار ضخامت

۱/۵ mm آلومینیم مربوط به بدترین شرایط است و قاعداً ضخامت کلی حفاظ اصلی از این مقدار یعنی ۱/۵ mm بیشتر ولی از ۳ mm کمتر خواهد بود. بنابراین با جمع‌بندی کلی، آزمون باید برای تمام شرایط انجام شود. برای آنکه مقاومت برد تقویت‌کننده SSPA GaN

در انجام دُزیمتری بر روی قطعه تحت آزمون، قدرت تفکیک دُزیمتر باید بهتر از ۱۰٪ بوده و گیریکنواختی میدان تابشی در محیط آزمون حداکثر ۱۰٪ باشد. اگر هندسه مجموعه آزمون تغییر کند، یکنواختی میدان باید همچنان برقرار باشد. آهنگ دُز تابشی می‌بایست در طرح آزمون مشخص شده باشد. آهنگ دُز در بازه زمانی پرتودهی باید حداکثر ۱۰ درصد ثابت نگه داشته شود. بسته به بیشینه سطح تابش مورد انتظار، آهنگ دز باید به گونه‌ای انتخاب شود که خطاها در دُز، ناشی از خطاهای زمانی و تنظیم باریکه اولیه به زیر ۵ درصد برسد. دو پنجره آهنگ دُز در استاندارد فضایی اروپا مشخص شده است [31].

- پنجره ۱ ("آهنگ استاندارد"): $0.36 \text{ krad(Si)/hour}$ تا 180 rad/s (یا 36 Gy(Si)/hour تا 50 rad/s)
- پنجره ۲ ("آهنگ کم"): 36 rad(Si)/hour تا 360 rad/s (یا 36 Gy(Si)/hour تا 10 rad/s) [10].

برای تصمیم‌گیری جهت انجام آزمون تابشی از کمیت حاشیه ایمنی تشعشعی یا RDM استفاده می‌شود. مقدار RDM، مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌شود و از این پارامتر برای تعیین لزوم انجام آزمون و کفایت محاسبات استفاده خواهد شد [33].

$$RDM = TIDS/TIDL \quad (1)$$

در این رابطه TIDL، سطحی از TID است که به قطعه مورد نظر می‌رسد [34]. در برخی دیتاشیت‌ها بر اساس پارامتر RHA و یا TID مقدار TIDS (مقدار TID که قطعه مورد نظر تحمل می‌کند)، تعیین می‌شود [34]. پس از محاسبه مقدار RDM، جهت تصمیم‌گیری برای انجام آزمون از دستورالعمل زیر استفاده می‌شود [29]-[35]، [23].

- اگر $TIDL < 2 TIDS$ یعنی $RDM > 2$ در این صورت آزمون نیاز نیست.
- اگر $1.2 TIDL < TIDS < 2 TIDL$ یعنی $1.2 < RDM < 2$ که آزمون مطابق با الزام بالا مورد نیاز است.
- اگر $TIDS < 1.2 TIDL$ یعنی $RDM < 2$ که در این صورت استفاده از آن جایز نیست.

در بخش روش و امکان‌سنجی آزمون آسیب TID مقدار TIDS برد تقویت‌کننده به همراه برد توالی‌ساز در داخل جعبه آلومینومی با ضخامت مشخص، محاسبه و مطابق بندهای فوق، لزوم انجام پرتودهی و انجام آزمون بررسی خواهد شد. مطابق با استانداردهای فضایی، فاصله زمانی از زمان تکمیل پرتودهی تا زمان شروع اندازه‌گیری پارامترها باید حداکثر ۱ ساعت باشد. فاصله زمانی از زمان

با توجه به عدم اطلاع کافی از میزان تحمل تشعشی قطعات مورد استفاده در این بردها، آزمون‌ها در دو مرحله انجام شده است.

۱. با توجه به در نظرگیری حد آستانه $RDM=2$ برای لزوم انجام آزمون، آزمون پذیرش و کیفیت با در نظرگیری بدترین شرایط برای رده قطعات تجاری یعنی 3 krad ، آزمون تقریباً برای 6 krad با گام‌های 0.5 krad انجام می‌شود چون طبق موارد بیان شده قطعات تجاری باید در مدار LEO و زوایای انحراف بین 20 تا 85 درجه، تقریباً در بازه $10-1 \text{ krad/year}$ را باید بتواند تحمل نمایند.

۲. آزمون ارزیابی: در صورت سالم بودن قطعات، آزمون برای دُزهای بالاتر از 6 krad انجام می‌شود.

با در نظرگیری آهنگ دُز در سامانه پرتودهی در زمان انجام آزمون، مقدار زمان لازم برای پرتودهی 6 krad تقریباً برابر با 5 ساعت است.

این اندازه‌گیری‌ها برای بردهای تقویت‌کننده SSPA GaN و توالی‌ساز انجام شده است. لازم به ذکر است که عملکرد و روشن بودن برد تقویت‌کننده SSPA GaN منوط به عملکرد درست برد توالی‌ساز است؛ لذا به منظور ادامه آزمون بر روی برد تقویت‌کننده موردنظر، حتی در صورت از دست رفتن برد توالی‌ساز، برد توالی‌ساز دیگری از بیرون از اتاق پرتودهی، به برد تقویت‌کننده متصل گردد. برد توالی‌ساز داخل اتاق به بار پسیو وصل شده است به نحوی که جریان‌های هر یک از طبقات در حالت اشباع مجموعه تقویت‌کننده توسط بار پسیو ایجاد شود. با توجه به انجام کالیبراسیون در آزمایشگاه آزمون در حین انجام آزمون، نیازی به استفاده از دُزیمتر نبود. چیدمان این آزمون در شکل ۶ نشان داده شده است.

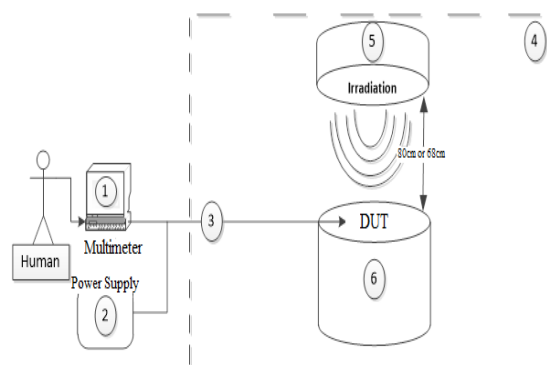


شکل ۶- نمایی از چیدمان آزمون دُز یونیزان

و برد توالی‌ساز در مقابل امواج الکترون و پروتون در فضا اندازه‌گیری شود، لازم است که آزمایشی برای این منظور طراحی شود. از آنجا که اثرات الکترون و پروتون برای آسیب TID مانند اثرات پرتوهای گاما است، در نتیجه آزمایشی با شرایط و ساختار شکل ۵ طراحی شد که در حین آن رفتار این دو برد، بررسی و ثبت شد.

جدول ۶- تعیین مقدار RDM قطعات با رده تجاری در ارتفاع‌ها و ضخامت‌های مختلف

ارتفاع	۳۵۰ km	۴۵۰ km	۵۵۰ km
ضخامت	۰/۸۳	۰/۵۹	۰/۴۱
	۲/۹۱	۲/۰۴	۱/۳۷
			۳ mm

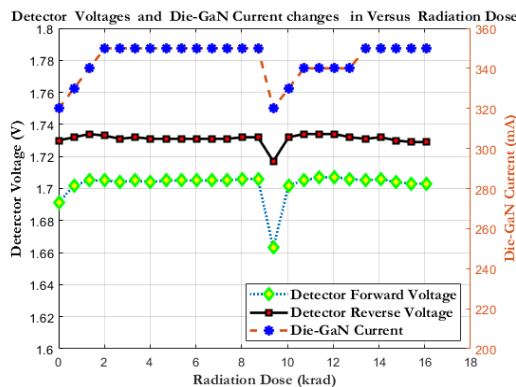


شکل ۵- بلوک‌دیگرام آزمون تشعشی TID

هریک از قسمت‌های شکل ۵، بدین شرح است.

۱. Multimeter: با استفاده از این ابزار، مقادیر ولتاژ و جریان بردها، اندازه‌گیری و سپس در جداول ثبت شده است.
۲. Power Supply: برای روشن کردن بردهای مورد آزمون به منبع ولتاژهای 28 و 5 ولت با جریان حدود 1 آمپر نیاز است.
۳. کابل‌ها: برای ارتباط میان برد توالی‌ساز بیرون از اتاق آزمون برای راه‌اندازی توالی برد تقویت‌کننده SSPA GaN و همچنین اندازه‌گیری مقادیر ولتاژ و جریان برد توالی‌ساز داخل آزمون نیاز به تعدادی کابل تغذیه است.
۴. اتاق آزمون: در این اتاق، دستگاه پرتودهی اشعه گاما به همراه بردهای SSPA GaN و توالی‌ساز قرار گرفته است.
۵. چشمه مورد استفاده برای پرتودهی: چشمه مورد استفاده برای پرتودهی ^{60}Co است.
۶. برد آزمون: بردهای SSPA GaN و توالی‌ساز برد آزمون بر روی یک میز با قابلیت تنظیم ارتفاع در معرض میدان پرتو گاما قرار داده شده است.

نسبت به مقادیر آن قبل از پرتودهی تغییر کرده است و پس از گذشت بازه زمانی ۱ ساعت و ۲۰ دقیقه مقادیر پارامتر ثابت می‌شوند. میزان انحراف معیار تغییرات ولتاژ آشکارساز توان رفت، ولتاژ آشکارساز توان برگشت و جریان درین طبقه Die GaN پس از انجام آزمون پذیرش یعنی پس از دریافت ۶ krad دُز در فرآیند پرتودهی، به ترتیب تقریباً برابر با ۰/۰۱ درصد، ۰/۰۴ درصد و تقریباً ۱۰ درصد می‌باشد. بنابراین با توجه به اینکه میزان تغییرات کمتر از ۱۰ درصد است، آزمون ارزیابی نیز انجام می‌شود. پس از تقریباً ۴ ساعت پرتودهی، وقفه زمانی min ۱۱۰ باعث تغییرات ناگهانی در پارامترها می‌شود.



شکل ۷- تغییرات مقدار ولتاژ آشکارساز توان رفت، توان برگشت و جریان برد دو طبقه تقویت کننده Die-GaN، مقدار جریان بر روی محور سمت راست نشان داده شده است.

در عین حال میزان انحراف معیار تغییرات ولتاژ آشکارساز توان رفت، ولتاژ آشکارساز توان برگشت و جریان درین طبقه Die GaN در کل فرآیند پرتودهی تا ۱۶ krad، به ترتیب تقریباً برابر با ۰/۰۳ درصد، ۰/۰۸ درصد و ۹ درصد می‌باشد. با توجه به اینکه پس از اعمال وقفه زمانی و در حین پرتودهی، مقادیر پارامترهای ولتاژ توان رفت، برگشت و جریان GaN مجدداً به حالت اولیه قبل از اعمال این وقفه، باز می‌گردد، بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که تغییرات ناگهانی، در اثر وقفه زمانی تولید شده است و به فرآیند پرتودهی ارتباطی ندارد. در کل بازه زمانی پرتودهی مقدار جریان درین طبقه دوم (HMC1082) جریان درین طبقه اول (HMC903) تغییر نمی‌کند. با توجه به نتایج استخراج شده از آزمون TID، می‌توان به صورت تخمینی نتیجه‌گیری کرد که برد SSPA GaN دارای قابلیت تحمل دُز تشعشعی برابر با حدود ۱۶ krad است.

نتایج آزمون تشعشعی بر روی برد توالی ساز

همانطور که قبلاً بیان شد، روش انجام آزمون به گونه‌ای تنظیم شد که در صورت از دست رفتن برد توالی ساز، آزمون ادامه یافته تا به برد

با توجه به واپاشی چشمه تشعشع میزان آهنگ دُز با گذشت زمان تغییر می‌کند. این مقدار با توجه به فاصله نیز قابل تغییر است و هر قدر فاصله نمونه از چشمه بیشتر باشد، مقدار آهنگ دُزی که به نمونه می‌رسد، کمتر خواهد بود. مقداری که از آهنگ دُز با میدان $10 \times 10 \text{ cm}^2$ و در فاصله ۸۰ cm و در تاریخ ۲۴ تیر ۱۳۹۶ اندازه‌گیری شده، برابر با $252/672 \text{ mGy/min}$ می‌باشد. این مقدار برای میدان $30 \times 30 \text{ cm}^2$ و در فاصله ۳۰ cm برابر با $244/80 \text{ mGy/min}$ می‌باشد.

برای دریافت آهنگ دُز بیشتر نسبت به استاندارد ۸۰ cm، نمونه در فاصله ۶۸ cm چشمه قرار گرفته و به آن نزدیک تر می‌شود. با محاسباتی که بر حسب تغییر در فاصله انجام شده می‌توان به این نتیجه رسید که در گام‌های ۲۰ min مقدار دُز دریافتی تقریباً برابر با $0/67 \text{ krad}$ می‌باشد. در شرایط مذکور، میزان آهنگ دُز در پنجره استاندارد قرار دارد.

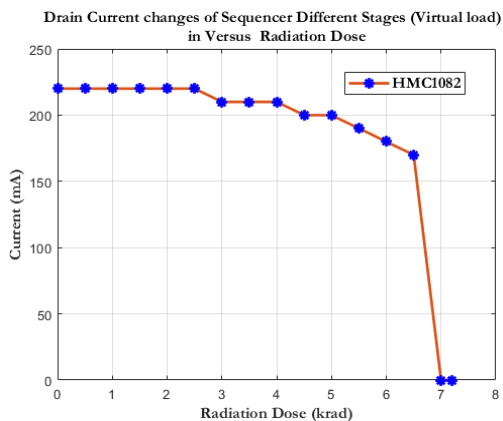
نتایج آزمون تشعشعی بر روی بردهای تقویت کننده SSPA GaN و توالی ساز

در حین انجام آزمون، مقادیر جریان درین دو طبقه Die-GaN، جریان درین طبقه درایور HMC1082، جریان طبقه گین HMC903، ولتاژ قرائت توان رفت و ولتاژ قرائت توان برگشت ثبت گردید. در ادامه نتایج هر یک به تفصیل آمده است. مقادیر جریان درین طبقه درایور HMC1082 و جریان طبقه گین HMC903 در طول کل بازه پرتودهی ثابت و به ترتیب برابر با ۳۱۰ mA و ۱۳۰ mA ثبت شد.

ولتاژ آشکارساز توان رفت، توان برگشت و جریان درین دو طبقه Die-GaN

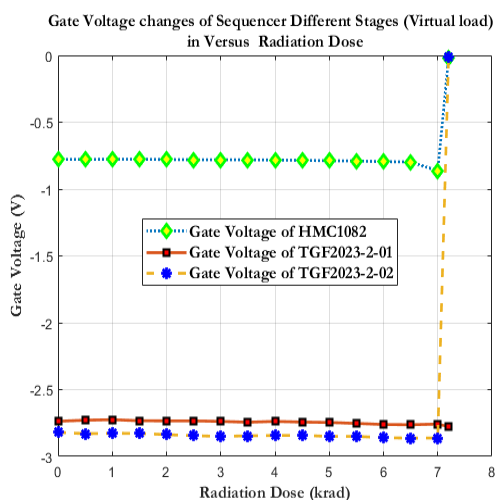
نتایج مربوط به درصد تغییرات مقدار ولتاژ آشکارساز توان رفت، توان برگشت و جریان برد GaN را می‌توان در شکل ۷ مشاهده کرد. مقدار جریان بر روی محور سمت راست نشان داده شده است. آزمون پذیرش در ابتدا برای پرتودهی تا دُز ۶ krad انجام شد. با توجه به محدودیت پرتودهی در یک روز و هم چنین عدم تغییرات پارامترهای مورد اندازه‌گیری بیش از ۱۰ درصد قبل از پرتودهی، آزمون ارزیابی نیز تا دُز ۱۶ krad انجام شد. با توجه به این نکته که فاصله زمانی از زمان تکمیل پرتودهی تا شروع پرتودهی دیگر باید حداکثر ۲ ساعت باشد، وقفه زمانی در حد ۱۱۰ min در حین پرتودهی انجام شده و مورد بررسی قرار گرفته است.

مقادیر پارامترهای ولتاژ آشکارساز توان رفت، ولتاژ آشکارساز توان برگشت و جریان درین طبقه Die-GaN در ابتدای پرتودهی



شکل ۹- تغییرات جریان درین بار پسیو جایگزین طبقه HMC1082

از آنجا که وظیفه برد توالی ساز، علاوه بر تأمین ولتاژهای منفی گیت طبقات دوم تا چهارم، توالی مناسب بین روشن و خاموش نمودن این طبقات نیز است، بنابراین با عدم عملکرد صحیح قطعه MAX881 مربوط به طبقه گین HMC1082، فرمان فعال شدن طبقات Die-GaN در توالی ساز ارسال نخواهد شد و در نتیجه طبقات سوم و چهارم توالی ساز خاموش شده و ولتاژهای گیت این طبقات نیز تغییرات ناگهانی خواهند داشت. همانطور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، آسیب در MAX881 طبقه گین HMC1082 باعث تغییر در ولتاژ گیت طبقه TGF2023-2-01 و TGF2023-2-02 شده است.

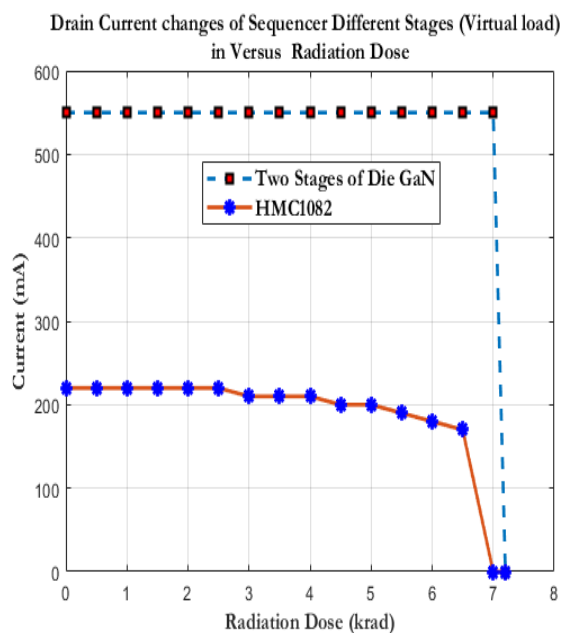


شکل ۱۰- ولتاژ گیت طبقات

در روز بعد، مجدداً برد توالی ساز تحت آزمون تشعشی قرار گرفت. این بار نیز پس از سه گام پرتودهی، یعنی تقریباً در ۱ krad، برد مجدداً از کار افتاد. نکته قابل توجه این است که در سه گام پرتودهی نتایج مربوط به سه گام اولیه روز قبل تکرار می شود و پس از سه گام پارامترها افت می کند. برد بعد از ۲۰ min مجدداً تحت پرتو قرار گرفته و بعد از یک گام پرتودهی یعنی در ۰/۵ krad پارامترها افت می کنند.

Die GaN، میزان پرتو بیشتری اعمال شود و این دو برد مستقل از یکدیگر مورد پرتودهی قرار گیرند. در همین راستا، سه طبقه توالی سازی که ولتاژهای منفی و توالی مناسب طبقات دوم تا چهارم تقویت کننده را تأمین می کند، از خارج از اتاق آزمون به تقویت کننده متصل شده است. این درحالی است که برد توالی ساز دیگری به بارهای پسیوی وصل شده است که معادل همان جریان های اشباع طبقات دوم تا چهارم تقویت کننده را فراهم می کنند. این برد توالی ساز در اتاق آزمون و تحت پرتودهی قرار می گیرد. در ادامه، نتایج مربوط به آزمون بر روی برد توالی ساز با بار پسیو ارائه می گردد که شامل جریان درین دو طبقه Die GaN، جریان درین طبقه دوم (طبقه گین)، ولتاژ گیت دو طبقه Die GaN و ولتاژ گیت طبقه دوم (طبقه گین) ارائه است. شکل ۸، جریان درین دو طبقه Die GaN را به همراه جریان درین مربوط به طبقه دوم تقویت کننده (طبقه گین HMC1082) نشان می دهد.

همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، جریان درین بار پسیو مربوط به طبقه گین HMC1082 در دز ۵/۵ krad دارای تغییرات بیش از ۱۳/۶ درصد نسبت به مقدار آن قبل از پرتودهی خواهد شد، درحالی که جریان درین بار مجازی دو طبقه Die GaN، تغییری نکرده است. تغییرات جریان درین بار مجازی طبقه HMC1082، به طور مجزا در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، در این برد مقدار جریان درین بار پسیو طبقه HMC1082، در پرتودهی با دز بین ۶/۵ و ۷ دچار افت شدید شده و ناگهان صفر می شود.



شکل ۸- تغییرات جریان درین بار پسیو دو طبقه Die GaN و طبقه گین HMC1082

عامل نیز مورد بررسی قرار گرفته است. وقفه زمانی موجب تغییر ناگهانی در پارامترهای ولتاژ آشکارساز توان رفت و برگشت و جریان برد شده است. معیار پذیرش انجام آزمون TID، عدم تغییرات پارامترها قبل و بعد از پرتودهی در بازه ۱۰ درصد است نتایج نشان می‌دهد میزان انحراف معیار تغییرات ولتاژ آشکارساز توان رفت، ولتاژ آشکارساز توان برگشت و جریان درین طبقه Die-GaN در کل فرآیند پرتودهی تا ۱۶ krad، به ترتیب تقریباً برابر با ۰/۰۳ درصد، ۰/۰۸ درصد و ۹ درصد می‌باشد و بنابراین می‌توان به صورت تخمینی نتیجه‌گیری کرد که تا دز تقریباً ۱۶ krad برد SSPA GaN دارای قابلیت تحمل تشعشعی است. نتایج پرتودهی برد توالی‌ساز نشان می‌دهد که جریان درین بار پسیو در دز ۵/۵ krad دارای تغییرات بیش از ۱۳/۶ درصد نسبت به مقدار آن قبل از پرتودهی خواهد شد. و بنابراین از میزان معیار پذیرش بیشتر است. در این برد مقدار جریان درین بار پسیو در پرتودهی با دز بین ۶/۵ و ۷ کراد دچار افت شدید شده و ناگهان صفر می‌شود. از آنجا که معیار پذیرش انجام آزمون TID، عدم تغییرات پارامترها قبل و بعد از پرتودهی در بازه ۱۰ درصد است، بنابراین می‌توان به طور تخمینی نتیجه گرفت که برد توالی‌ساز عملاً دارای قدرت تحمل تشعشعی کمتر از ۵/۵ krad می‌باشد. با توجه به عدم اطلاع کافی از رده قطعات و همچنین میزان تحمل تشعشعی قطعات به کار گرفته شده در ساخت برد، تست‌ها در دو مرحله پذیرش و کیفیت و همچنین ارزیابی انجام شده است. تست پذیرش و کیفیت با در نظرگیری بدترین شرایط در مقدار TID تقریباً برابر با ۶krad و با گام‌های ۰/۵krad صورت گرفت. تست ارزیابی نیز در صورت سالم بودن قطعات، برای دزهای بالاتر از ۶krad انجام شد. با توجه به نتایج بدست آمده در تست پذیرش و کیفیت، تست ارزیابی برای برد توالی‌ساز انجام نشده است.

به طور کلی می‌توان از انجام این آزمایش‌ها نتیجه‌گیری کرد که به تنهایی و با در دست داشتن رده‌بندی تحمل تشعشعی و به طور خاص برای رده‌بندی قطعات تجاری، نمی‌توان برای بردهای مورد استفاده در سامانه‌های فضایی نظر داد. با توجه به استفاده از انواع قطعات با رده‌های مختلف، فرآیند تخمین تحمل تشعشعی باید از طریق انجام آزمون صورت بگیرد.

تعارض منافع

هیچگونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

لازم به ذکر است که بعد از پایان زمان کل آزمون و گذشت یک روز، برد توالی‌ساز متصل شده به برد با بار پسیو، مورد بررسی قرار گرفت. دیده شد که قطعه MAX881 طبقه گین HMC1082 از کار افتاده و آسیب دیده و قطعات MAX881 دو طبقه دیگر سالم است. پس از تعویض این قطعه، برد توالی‌ساز به عملکرد خود بازگشته و جریان درین بار پسیو طبقه گین HMC1082 به همان مقدار ۲۲۰ mA قبل از شروع آزمون برگشته است. به طور کلی با توجه به نتایج به دست آمده از پرتودهی و میزان درصد تغییرات جریان درین بار پسیو در دز بیش از ۵/۵ krad برای اولین بار پرتودهی می‌توان به طور تخمینی نتیجه گرفت که برد توالی‌ساز عملاً دارای قدرت تحمل کمتر از ۵/۵ krad می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مقاومت تشعشعی ترانزیستورهای GaN با در نظرگیری آسیب TID و برای قرارگیری در ماهواره LEO مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی جهت محاسبه میزان شار ذرات رسیده در بازه زمانی ماموریت، بدترین شرایط به لحاظ تشعشعی در نظر گرفته شده است و برای تعیین حاشیه تشعشعی RDM، میزان تحمل قطعات تجاری مد نظر بوده است.

محاسبات میزان دز برای کمترین میزان حفاظ با استفاده از نرم‌افزار OMERE انجام شده است. با توجه به دستورالعمل مربوط به استانداردهای فضایی، میزان RDM تعیین شده است و سپس در مورد لزوم انجام تست تشعشعی نتیجه‌گیری صورت گرفته است. محاسبات حاصل از تخمین‌های RDM برای کمترین میزان حفاظ یعنی حفاظ با ضخامت ۱/۵mm آلومینیم، نشان می‌دهد که انجام آزمون برای قطعات با رده‌بندی تجاری الزامی است. دو رویکرد متفاوت برای انجام آزمون تشعشعی وجود دارد. آزمون پذیرش و آزمون ارزیابی. در این پژوهش هر دو آزمون پذیرش و ارزیابی انجام شده است. بر حسب تعیین میزان دز آستانه برای قطعات تجاری که برابر با ۳ krad است و با در نظرگیری RDM=2 به عنوان تاکید بر لزوم انجام آزمون پذیرش، آزمون پذیرش انجام شد و در این آزمون قطعات باید تا دز ۶ krad تحت تابش میدان تشعشعی قرار گیرند. نتایج آزمون مربوط به بُرد تقویت‌کننده GaN نشان می‌دهد که تا این حد از دز یعنی ۶ krad برد هم چنان دارای عملکرد مناسب است. با توجه به نتیجه آزمایش و سالم بودن بُرد تقویت‌کننده GaN و همچنین محدودیت اعمال پرتودهی در یک روز، علاوه بر آزمون پذیرش، آزمون ارزیابی برای پرتودهی تا دز ۱۶ krad انجام شد. هنگام انجام آزمون ارزیابی برای برد تقویت‌کننده SSPA GaN، پس از دز تقریباً ۹ krad، توقف ۱۱۰ min انجام شده است و این

مراجع

- Environments”, *Microelectron. Reliab.*, Vol. 116, 2021, doi: 10.1016/j.microrel.2020.114000.
- [15] ECSS, “Methods for the Calculation of Radiation Received and Its Effects, and a Policy for Design Margins”, EcSS-E-St-10-12C, Vol. November, pp. 1–218, 2008.
- [16] R. Omid , K. Mohammadi, “ SEU Rate and Reliability Analysis in LEO Satellites”, *J. Sp. Sci. Technol.*, Vol. 5, No. 3, pp. 1–9, 2012,
- [17] A. Esmaelian, S. Amirhossin feghhi, H. Jafari and A. Pahlavan , “Studying and Calculating the Radiation Damage Caused by the Solar Radiation Spectrum in the Crystal Structure of Semiconductor Components”, *J. Sp. Sci. Technol.*, Vol. 6, No. 16, pp. 55–60, 2013.
- [18] H. Daneshvar, M. Khoshsima and A. Dayani, “Study of Modeling Parameters in Determination of TID, DD, and SEE Radiation Damages for Satellite in LEO Orbit Using OMERE Software”, *J. Sp. Sci. Technol.*, Vol. 12, No. 40, pp. 63–71, 2019.
- [19] H. Daneshvar, K. Gh. Milan, A. Sadri, S. H. Sedighy, Sh. Malekie and A. Mosayebi, “Multilayer Radiation Shield for Satellite Electronic Components Protection”, *Nature Scientific Reports*, Vol. 11, pp. 1-12, 2021.
- [20] K. Gh. Milan, A. Sadri, S. H. Sedighy and H. Daneshvar, “Analysis, Design and Optimization of the Multi Layer Radiation Shielding of Satellite Electronic Components”, *J. Sp. Sci. Technol.*, Vol. 4, No. 2, pp. 71–76, 2021.
- [21] M. Mokhtari et al., “Experimental Study of the Effect of Using Space Sandwich Structures for Protection Against Space Radiation”, *J. Sp. Sci. Technol.*, Accepted Manuscript Available Online from 21 September 2021.
- [22] ESA ESCC Basic Specification No. 22900, “Total dose steadystate irradiation test method”, issue 4, October 2010.
- [23] ESA ECSS, “ECSS-Q-ST-60-15C Radiation Hardness Assurance - EEE Components”, *ECSS Secretariat*, Vol. October. No. 32, 2012.
- [24] ECSS-E-ST-10-12C– Methods for The Calculation of Radiation Received and Its Effects and A Policy for Design Margins, (15 November 2008) + “Identified typographical error,” This Standard is Supported by ECSS Handbook:ECSS-E-HB-10-12A (17 December 2010).
- [25] ECSS, Space product Assurance Radiation Hardness Assurance - EEE components for JUICE, in ESA-TEC-Q/2012/155, ESA, 2012.
- [26] D. Custodian a/ac E. S. Agency, "Total Dose Steady-State Irradiation Test Method ESCC Basic Specification No . 22900", Test, No. 22900. ESCC, pp. 1–17, 2007.
- [27] A. Varotsou, "OMERE Space Radiation Environment and Effects Tool: New Developments and New Interface", ESA-CNES RFP Days – March 7, 2017.
- [1] Ö. Amutkan, "Space Radiation Environment and Radiation Hardness Assurance Tests of Electronic Components to be Used in Space Missions," [Thesis PhD] Submitted to the Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University, 2010.
- [2] E. G. Stassinopoulos and J. P. Raymond, "The Space Radiation Environment for Electronics", *Proceedings of the. IEEE*, Vol. 76, No. 11, pp. 1423–1442, 1988, doi: 10.1109/5.90113.
- [3] “ESA ESA and Space Debris”, *European Space Agency*. https://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/ESA_Publications_Brochures/ESA_BR309_ESA_and_Space_Debris.
- [4] J. R. Schwank, M. R. Shaneyfelt, and P. E. Dodd, "Radiation Hardness Assurance Testing of Microelectronic Devices and Integrated Circuits: Radiation Environments, Physical Mechanisms, and Foundations for Hardness Assurance", *IEEE Transactions on Nuclear Science.*, Vol. 60, No. 3, pp.2074–2100, 2013, doi:10.1109/TNS.2013.2254722.
- [5] ECSS, “Space Product Assurance - Software Product Assurance”, ESA, 1996.
- [6] ECSS, Space product Assurance Radiation Hardness Assurance, in ESA-TEC-QE/2009/22, ESA, 2009.
- [7] Moore A, and Jimenez J. *GaN RF Technology for Dummies*. TriQuint Special Edition Published by John Wiley & Sons, Inc. 111 2015.
- [8] K Bernard, "Advantages of Using Gallium Nitride FETs in Satellite Applications", *White Paper, Renensas*, February, Tokyo, Japan 2018.
- [9] J. Haiwei, L. Qin, L. Zhang, and et al., "Review of Wide Band-Gap Semiconductors Technology", in *MATEC Web of Conferences*, Vol.40, p. 01006, EDP Sciences 2016, DOI: 10.1051/mateconf/20164001006.
- [10] S.J Pearton, F. Ren, E. Patrick, and et al. "Review – Ionizing Radiation Damage Effects on GaN Devices", *ECS J.Solid State Sci. Technol.* Vol. 5, No. 2, pp.35-60, 2016
- [11] Alexis C.Vilas Bôasa, et al., “Ionizing Radiation Hardness Tests of GaN HEMTs for Harsh Environments”, *Microelectronics Reliability journal*, Vol. 116, January 2021.
- [12] K. Hirche et al., “GaN Reliability Enhancement and Technology Transfer Initiative (GREAT2)”, Abstr. ESA/ESTEC Contract No. 21.499/08/ NL/PA., Vol. 21, No. 8, 2014.
- [13] A. Y. Polyakov, S. J. Pearton, P. Frenzer, F. Ren, L. Liu, a/ac J. Kim, “Radiation Effects in GaN Materials and Devices”, *yn Journal of Materials Chemistry C*, 2013, Vol. 1, No. 5, pp. 877–887, doi: 10.1039/c2tc00039c.
- [14] A. C. Vilas Bôas et al., “Ionizing Radiation Hardness Tests of GaN HEMTs for Harsh

- its effects in EEE components and hardness assurance for space applications, 2017.
- [32] F. W. Sexton, "Measurement of Single-Event Phenomena in Devices and ICs", 1992.
- [33] "Integrated Circuits (Microcircuits) Manufacturing, General Specification for", MIL, 2002.
- [34] S. Division, "Space Product Assurance Radiation Hardness Assurance", 2012.
- [35] Jet Propulsion Laboratory, "Radiation Design Margin Requirement", NASA, 1999. [Arlein]. Ar gael: <http://llis.nasa.gov/lesson/792>.
- [36] <https://llis.nasa.gov/lesson/824>.
- [37] J. Ripa, G. Dilillo, R. Campana, G. Galgoczi, "A Comparison of Trapped Particle Models in Low Earth Orbit", *arXiv:2101.03090v1*, pp.1-10 2021, <https://doi.org/10.1117/12.2561011>.
- [28] H. Daneshvar, A. Eidi, L. Mohamadi, R. Omid, P. Hajipour, "Investigation and Feasibility Study of Using Components with Different Categories from the Perspective of Radiation Damage in LEO and GEO Orbits", *J. Sp. Sci. Technol.*, Vol. 14, No. 4, pp. 11-23, 2021.
- [29] Y. Ye et al., "The Secular Variation of the Center of Geomagnetic South Atlantic Anomaly and Its Effect on the Distribution of Inner Radiation Belt Particles", *Sp. Weather*, Vol. 15, No. 11, 2017, doi: 10.1002/2017SW001687.
- [30] H. Daneshvar, "Calculation of Radiation Damage on Electronic Devices", Shahid Beheshti University, 2011.
- [31] M. Poizat, "Radiation Environment and its Effects in EEE. Components and Hardness Assurance for Space. Application", yn Radiation environment and