

¹В.Ф. Грищенко, ²С. Толендиулы, ²Г. Талгатқызы*, ²А. Нурланқызы

¹Ионосфера институты, ЕЖШСД, Алматы, Қазақстан

²Өнеркәсіптік автоматтандыру және цифрлау институты, Satbayev University, Алматы, Қазақстан

*e-mail: gozi_94@mail.ru

РАДИАЦИЯНЫҢ ӘСЕРІНЕН ҒАРЫШ АППАРАТЫНЫҢ БОРТТЫҚ ЭЛЕКТРОНИКАСЫНЫҢ ЕСТЕ САҚТАУ ЭЛЕМЕНТТЕРІНІҢ БІРЛІКТІК ІСТЕН ШЫҒУЛАРЫН СҮЛБАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ

Андатпа. Түрлі ғарыш аппараттарын (ҒА) пайдалану кезінде ғарыштық сәулелер (ҒС) әсерінің нәтижесінде борттық электрониканың істен шығуы орын алатыны белгілі, бұл авариялық жағдайларға, ал бірқатар жағдайларда спутниктерінің жоғалуына әкеп соқтырады. Оған мысал ретінде "Қазсат-1" және "Фобос-Грунт" спутниктерін айтсақ болады. Әр түрлі елдерде (Франция, Ресей, АҚШ, Қытай) ұзақ уақыт ғарыштық ұшулар кезінде ғарыштағы күрделі құрылымдардың әрекетін болжау немесе шешім қабылдау, әр түрлі оқиғалардың орын алуы мен олардың салдарларының бірнеше нұсқаларын алдын-ала "ойнатуды" талап еткен кезде орбитадағы төтенше жағдайларға әкелетін процестерді анықтау нақты қажет болған жағдайларда жүйелердің әрекетін модельдеу әдістері қолданылады. Сондықтан осы жұмыста борттық электрониканың функционалдық жағдайы мен істен шығуларына ғарыш кеңістігі факторларының (ҒКФ) кешенді әсерін бағалауға мүмкіндік беретін тиімділігі жоғары және салыстырмалы түрде арзан әдіс болып табылатын схемотехникалық модельдеу әдісі қарастырылады. Жұмыстың негізгі міндеті-бір бөлшектің өтуі кезінде жад элементінің транзисторларының берілген шарттары мен параметрлері үшін жад модульдерінің ұяшықтарының жалғыз ақауларын схемалық модельдеу. Ионизация тогы мен критикалық зарядтар анықталды, бұл жад модулінің ұяшығының логикалық күйінің бұзылуына және инверсиясына әкеледі.

Негізгі сөздер: тізбекті модельдеу, критикалық заряд, ионизация тогы, борттық жабдық.

Мәселенің қазіргі жағдайы. Спутниктердің сәтсіздіктері пайда болу себептері бойынша, сондай-ақ олардың жеке борттық жүйелердің қабілетінің төмендеуіне әсері бойынша ерекшеленеді.

ҒКФ-ның пайда болу себептеріне кешенді әсерлер жатады, оның ішінде: күн (КҒС) және галактикалық (ГҒС) ғарыштық сәулелердің, жердің радиациялық белдеулерінің (ЖРБ) бөлшектерінің радиациялық әсері, күн электрмагниттік сәулелену, магнитосфералық плазма, ҒКФ-ның өзіндік атмосферасы, микрогравитация, микрометеориттер және т.б. Ғарыш кеңістігінің борттық радиоэлектрондық аппаратураның істен шығуына радиациялық әсерін микрогравитация жағдайларында авторлар [1] жұмыста толығырақ қарастырған.

Борттық радиоэлектрондық жабдықта жоғары сенімді электрондық компоненттерді қолдану сыртқы ҒКФ-ның әсерінен істен шығу ықтималдығын жоймайтынын атап өткен жөн.

Жекелеген борттық жүйелердің істен шығуы жобалау қателіктерінен, ұшу алдындағы нашар сынақтардан, жүйелердің механикалық және электрлік компоненттерінің тозуынан, операторлардың немесе жер үсті жүйелерінің қателіктерінен қате командалардан немесе операциялардан және істен шығуды талдау кезінде жабдықты әзірлеушілер анықтаған басқа себептерден туындауы мүмкін.

Электрондық борттық жабдықтың істен шығудың жіктелуі. Бұл жұмыста ҒС ядроларының әсерінен туындаған жалғызілікті істен шығулар борттық аппаратураны басқару жүйелеріндегі авариялық жағдайлар тұрғысынан неғұрлым қауіпті деп қаралатын болады.

Көбінесе жер үсті модельдеу эксперименттерінде және нақты жағдайларда байқалатын ақаулардың түрлері:

SEU (single event upset) - жеке ұяшықтарда ақпараттың жоғалуы түрінде көрінетін тұрақты логикасы бар интегралдық сұлбалардағы (ИС) жалғызілікті қайтымды істен шығулар;

SEL (single event latchup) - протондар немесе FC ауыр ядролары КМОП ИС-ның сезімтал аймағына түскен кезде паразиттік тиристорлық құрылымдардың қосылуынан туындаған жалғызілікті істен шығулар ("ілемктің" әсері);

SEHE (single event hard error) - элементтің одан әрі "дозаланған" істен шығуымен (термиялық күйдіруден кейін, әдетте, жұмыс күйіне оралу байқалады) протондар немесе FC ядролары кірген кезде ИС белсенді элементтерінің сезімтал аймағына энергияның жергілікті шығарылуымен байланысты жалғыз микродозалық әсер;

SEFI (single event functional interrupt) - функционалдық үзілістің жалғызілікті әсері (микропроцессорлар, контроллерлер және т.б.);

SEB (single event burnout) - FC протондары немесе ядролары түскен кезде паразиттік биполярлық транзистордың ашылуымен байланысты қуатты МОП-транзисторлардағы күйдің жалғызілікті әсері;

SEGR (single event gate rupture) - FC протондары немесе ядролары кірген кезде МОП-құрылымдардағы диэлектриктің ысырмасындағы жалғызілікті тесіп өту әсері;

SES (single event snapback) - n-МОП транзисторларындағы қайталама тесудің жалғызілікті әсері;

SET (single event transient) - ИС сезімтал аймағына FC протонының немесе ядросының кіруінен туындаған ионизацияның өтпелі реакциясы. Аналогты ИС тиімділігі және аралас типті ИС шығыс тізбектеріндегі ток импульстері түрінде көрінуі мүмкін, сонымен қатар жоғары жиілікті оптикалық ақпарат беру желілеріндегі ақпараттың бұрмалануына әкелуі мүмкін [2].

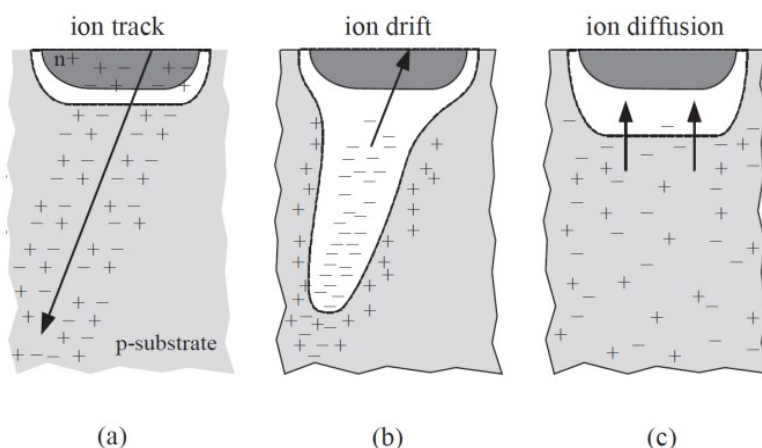
Микрогравитация жағдайында FC бір бөлшегінің өтуі кезінде жад модульдерінде істен шығулардың пайда болу механизмін (SEU) және электростатикалық разрядтардың пайда болуы нәтижесінде істен шығуларды модельдеу схемасы (SEL) ұсынылған [3].

Бұл жұмыста FC иондаушы бөлшегінің өтуінен туындаған ионизация тогының әсерінен КМОП құрылымының сақтау құрылғыларында (жадта) ақаулардың схемалық модельдеуі жүргізілді. Бұған КМОП құрылымдарының сипаттамалары ықпал етеді: статикалық жағдайда өте төмен қуат тұтыну және жоғары шуға төзімділігі.

Ионизация тогының пайда болу механизмі. Жалпы жағдайда жалғыз тұйықталу тиімділігі транзистордың белсенді аймағына бір бөлшектердің енуімен, содан кейін транзисторлардың ішінде ионизация жолының пайда болуымен және электронды тесік жұптарының пайда болуымен байланысты.

Иондаушы бөлшектердің бойында бос электр зарядының тасымалдаушылары пайда болады. Кремнийде бір электронды тесік жұбын жасау үшін қажет орташа энергия 3,6 эВ құрайды [4].

1-суретте n-каналды транзистордағы (nМОП) радиациялық әсерден туындаған ионизация тогының пайда болуының мысалы көрсетілген.



1-сурет. Бір ғарыш сәулесінің бөлшегінен туындаған бұзылу механизмі

1-сурет ионизация тогының қалыптасу кезеңдерін және осы токтың уақыт диаграммасын көрсетеді:

1a - зарядталған бөлшек кері ығысумен p-n-ауысуына жақын өтеді және бос электронды тесік жұптарын жасайды; 1b - электрондар оң зарядталған ағын өрісімен тартылып, оған қарай жылжиды, сарқылу аймағын кеңейтеді және иондаушы ток импульсін жасайды; 1c - импульс аяқталғаннан кейін қалған заряд жиналғанға немесе рекомбинацияланғанға дейін сарқылу аймағына ауытқуды жалғастырады.

Жад ұяшығындағы жалғызілікті істен шығулар (SEU) зарядталған бөлшек транзистордың сезімтал аймағымен соқтығысқан кезде пайда болады және сол жасушаның күйінің өзгеруіне әкеледі. Жад ұяшығында, әсіресе жоғары логикалық деңгейде сақталатын түйінде, ағызу мен субстрат арасындағы кері ығысулар иондаушы бөлшектерден туындаған SEU типінің істен шығуына өте сезімтал. Бұл сақтау түйінінің басқа түйіндегі күшті төмендету транзисторымен (nМОП транзисторымен) салыстырғанда салыстырмалы түрде әлсіз тарту транзисторымен (рМОП транзисторымен) қолдау көрсетілуіне байланысты [5].

ҒС бөлшегінің әсерінен пайда болатын зарядтың жинақталуы 1 суретте көрсетілген. Жиналған Q_{coll} заряды иондаушы бөлшектің түріне, траекториясына, энергия мөлшеріне және әсер ету орнына байланысты болады. Q_{coll} диапазон аралығы 1-ден жүздеген компьютерге дейін жетеді. Әдетте статикалық жад ұяшығы үшін Q_{coll} сыни заряды деп өріс пен кеңістіктік зарядтың үлкен аймағының болуына байланысты ҒС бөлшектерінің әсеріне ең сезімтал nМОП транзисторларының кері ығысуымен жад ұяшығының логикалық күйін өзгерту үшін зардап шеккен тораппен жинауға болатын минималды заряд түсініледі. Сонымен, $Q_{coll} < Q_{crit}$ сақтау түйінінен кіші, содан кейін тартқыш транзистор шығаратын ток биттің бұрылуына жол бермейді. Q_{crit} мәнін келесідей анықтауға болады:

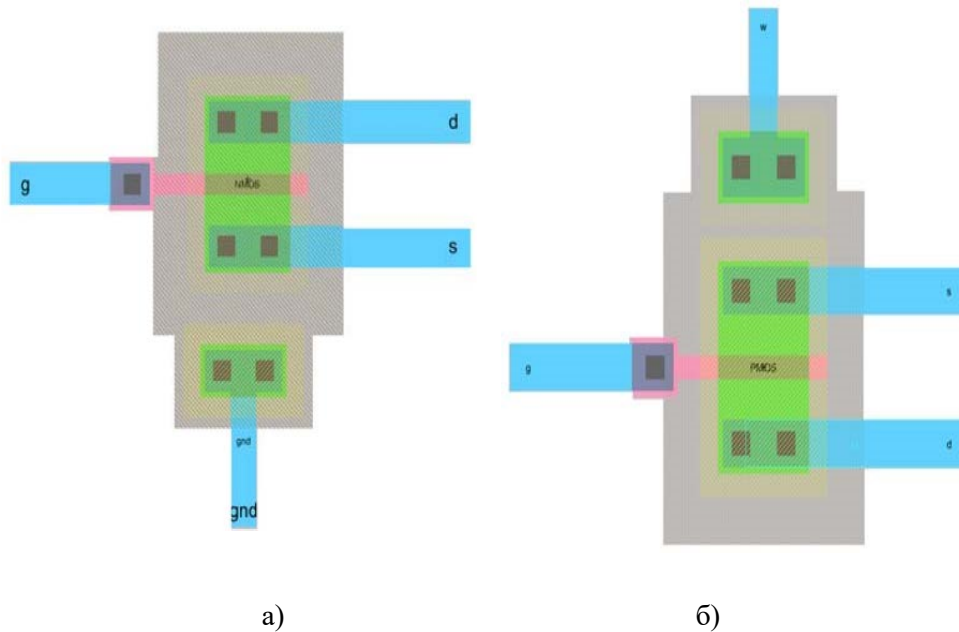
$$Q_{crit} = \int_0^F I_D dt = (C_{min} \times V_{dp}) + (I_{dp} \times T_F), \quad (1)$$

мұндағы C_{min} - транзистордың минималды сыйымдылығы, V_{dp} - жад ұяшығының кернеуі, I_{dp} - транзистордың рМОП максималды дренаждық өткізгіштігі, ал T_F - жад ұяшығының ауысу уақыты.

Қазіргі уақытта шекті кернеу тұжырымдамасына негізделген әртүрлі модельдер белгілі. Оларға Level1-Level3, МОП Модель 9, BSIM3, BSIM4 кіреді. BSIM4 моделі ең сенімді және 1 - математикалық өрнек үшін барлық қажетті параметрлерді сипаттайды. Ықшам модельдердің маңызды айырмашылығы-транзистордағы физикалық процестерді сипаттайтын негізгі айнымалыларды таңдау.

1-өрнектен критикалық зарядтың мөлшері МОП тізбегінің параметрлеріне байланысты болатындығын көруге болады. Сондықтан біз транзистордың ықшам схемалық моделінің SPICE параметрлерін қолдандық (SPICE - Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) [6].

Біз 2-суретте көрсетілген транзисторлардың геометриялық модельдерін жасадық, 0,5 мкм технологиялық процеске сәйкес келеді.



2-сурет. МОП транзисторларының геометриялық модельдері

nМОП және рМОП транзисторларының физика-топологиялық модельдері BSIM4 моделін қолдана отырып жасалған.

1-суретте көрсетілген nМОП және рМОП транзисторларының физика-топологиялық модельдері МОП тізбегінің параметрлерін алу үшін жасалды. МОП транзисторларының физика-топологиялық модельдері электр VLSI автоматтандырылған дизайнын қолдана отырып жасалды. Бұл қосымша өте үлкен интегралды схемаларды жобалау үшін қолданылады [7].

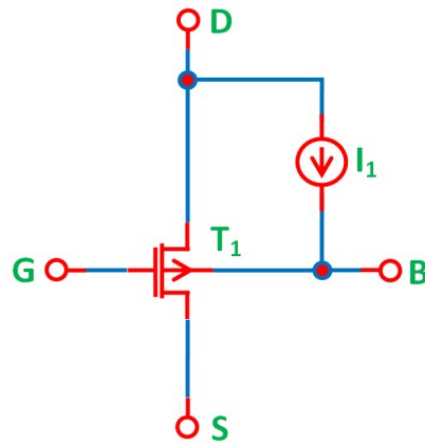
Иондық жолдарда зарядтарды жинауға арналған индукцияланған токтың толқын пішінінің аналитикалық моделі, әдетте, тез өсу мен құлдырау уақытымен қоса экспоненциалды қисыққа жақындағанын ескерту керек:

$$I_{ioniz}(t) = \frac{Q_0}{\tau_0 - \tau_R} \left[e\left(\frac{-t}{\tau_R}\right) - e\left(\frac{-t}{\tau_F}\right) \right], \quad (2)$$

мұндағы Q_0 -бір бөлшектен жиналған жалпы заряд, τ_F -диффузиялық зарядты жинау уақытына байланысты ағымдағы ыдырау уақыты ($\sim 0.1 \dots 0,4$ нс), τ_R -KFC рп-өткелі арқылы тасымалдаушылардың дрейф уақытына байланысты ағымдағы өсу уақыты ($\sim 10 \dots 50$ пс). Модельденген ионизация тогының импульсі 1 - суретте түсіндірмемен қарастырылған.

Жалғызілікті істен шығу орын алатын I_{dp} өткізгіштік тогының мәнін тек SPICE электронды схемасының имитаторын қолдана отырып, FC бір ядроларының әсерін модельдеу арқылы бағалауға болады [8].

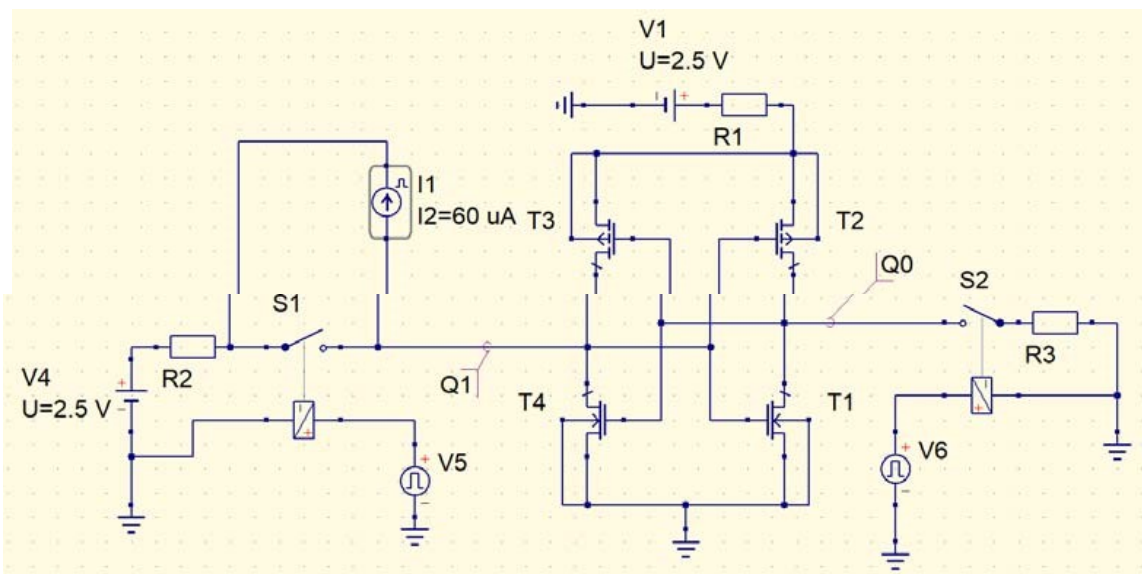
FC ядроларының SPICE симуляторында транзистордың сезімтал аймағына әсері өтетін бөлшектің иондану тогымен модельденеді [9]. Ионизация тогын модельдеу үшін өріс эффектісі транзисторының тізбек моделінен және р-п-ағынды өтуге параллель қосылған ток генераторының моделінен тұратын эквивалентті тізбек құрылды. 3 - сурет FC ядроларының әсерінен туындаған ионизация тогын алмастырудың макромоделін көрсетеді.



3-сурет. Ғарыш сәулелері ядроларының әсерінен туындаған иондаушы токты алмастыру макромоделі

6 статикалық жад ұяшығындағы жалғыз ақаулықты модельдеу тізбегінде жабық транзисторлардың p-n өтулерінің қоры бір бөлшек тигенде осал болады.

4-сурет статикалық жад элементін (ұяшық) көрсетеді.



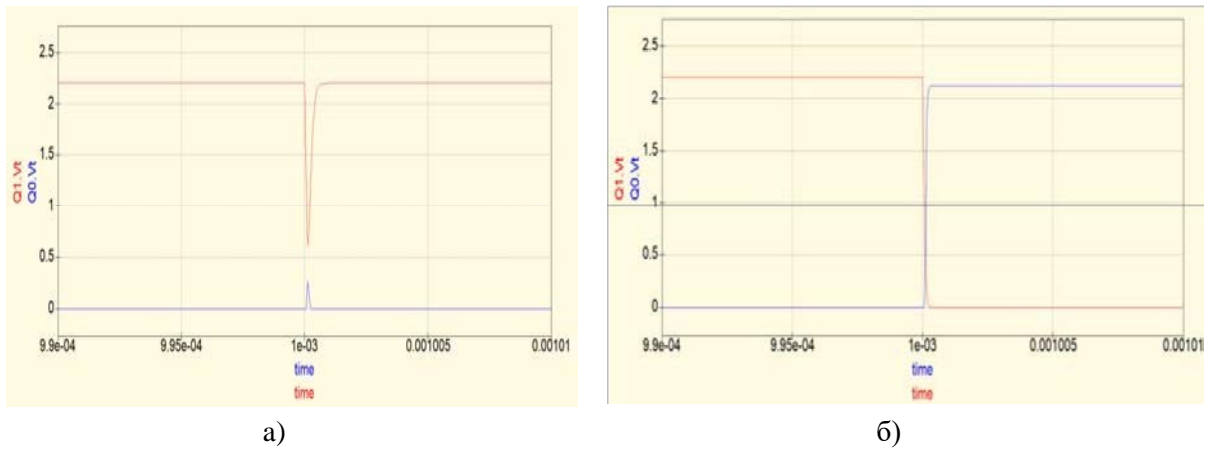
4-сурет. КМОП құрылымдарға негізделген жад құрылғысының жад элементі

Жад ұяшығының негізгі элементтері – 3 - суретте көрсетілген логикалық инвертор болып табылатын КМОП транзисторларының жұптары (T1, T2 және T3, T4 транзисторлары). Мұндай инверторда логикалық сигналдарды беру кезінде транзисторлардың бірі әрдайым ашық, ал екіншісі жабық болады. S1 және S2 қосқыштары модельдеудің бастапқы шарттарын анықтау үшін қолданылады [10].

Бір элементтің істен шығуын тізбекті модельдеу келесідей жүргізілді. Мысалы, бастапқыда T4 және T1 транзисторлары жад ұяшығында ашылып, ал транзисторлар T3 және T2 жабылды [11]. Ионның өтуінен туындаған I_{dp} өткізгіштік тогы 2-суретке сәйкес істен шыққан транзисторға параллель қосылған ток көзімен модельденеді. Содан кейін бөлшектің енуінен туындаған токтың ұлғаюы жад ұяшығында екі бәсекелес процесті тудырады: артық зарядты оң және кері байланыста сіңіреді.

Сондай-ақ, ашық транзисторлардың ағынды иондау токтары жад ұяшығының логикалық күйін растайтындығын байқауға болады [12]. Тек T3 және T2 жабық транзисторлардың ағынды иондау токтары жад ұяшығының ауысуына ықпал етеді. Бұл жағдайда T2 жабық n-канал транзисторының ағу тогы T4 және T3 транзисторларының кірістеріндегі кернеуді төмендетеді, T3 жабық p-канал транзисторының иондану тогы T1 және T2 транзисторларының кірістеріндегі кернеуді төмендетеді [13].

Виртуалды модельдеу кезінде жад элементі амплитудасы 36 мА дейінгі токқа жетеді. 5а - суретте модельдеу нәтижелері ұяшықтың тұрақты күйде екенін көрсетеді, бірақ кішігірім ауытқулар болады. Бұл ауытқулар шекті мәннен аспайтындықтан, жад элементі ақпараттың бір бөлігін сақтауды қамтамасыз етеді деп болжауға болады [14]. Ионизация тогының амплитудасы 36 мА-дан асқан кезде, жад элементі оның күйін өзгертеді, осылайша ақпараттың бір бөлігін сақтаудан бір рет бас тартады. Алынған уақытша тәуелділік 5б - суретте көрсетілген.



5-сурет. Жад ұяшығының шығуына уақытша тәуелділік (Q0, Q1) және ионизация тогының әсері
 а) жад элементіне 36 мкА дейін, б) жад элементіне 36 мкА астам

5а - және 4б - суретте көрсетілген модельдеу нәтижелерінен, бір FC бөлшегі ғана жалғыз ақаулықтарға әкелмейтінін көруге болады. Ол үшін жад ұяшығының сезімтал бөлігіне түсіп, сыни мәннен асатын зарядты қосу керек.

Схемалық модельдеу әдісімен алынған жад элементінің әртүрлі кернеулеріндегі критикалық зарядты бағалау нәтижелері 1-кестеде келтірілген.

1-кесте. Әртүрлі қуат кернеулеріндегі критикалық заряд пен өткізгіштік тогының мәні

	Кернеу беру $V_{dd} = 2.5 \text{ V}$	Кернеу беру $V_{dd} = 3.3 \text{ V}$	Кернеу беру $V_{dd} = 5 \text{ V}$
Схеманы модельдеу бағдарламасында есептелген I_{dp} , μA өткізгіштік тогының мәні	30	80	160
I_{dp} μA тиісті өткізгіштік тогы бар Q_{crit} , pC критикалық зарядының мәні	36	96	193

Ұсынылған нәтижелерден жад элементінің қуат кернеуінің жоғарылауы жад ұяшығының инверсиясына әкелетін критикалық зарядтың көбеюіне ықпал ететіндігін көруге болады.

Q_{crit} критикалық зарядының V_{dd} қуат кернеуіне және жад модулі ұяшығының логикалық күйінің инверсиясына әкелетін I_{dp} өткізгіштік тогына тәуелділігі 1- кестеде келтірілген.

Қорытынды. Осылайша, бұл жұмыста бір бөлшектің өтуі кезінде жад элементінің транзисторларының берілген шарттары мен параметрлері үшін жад модулі ұяшығының істен шығуын схемалық модельдеу жүргізілді. Өткізу тогы және жад элементінің кернеу мәні, онда ұяшық күйі ауысады, яғни жалғыз істен шығулары анықталды. Жад модулі ұяшығының логикалық күйін түрлендіруге әкелетін зарядтың критикалық мәні анықталды.

ӘДЕБИЕТТЕР

- [1] T. Musabayev, Zh. Zhantayev, V. Grichshenko. Complex influence of space environment on materials and electronic devices in the conditions of microgravity//Advances in Space Research, Volume 58, Issue 6, 2016, Pages 1138-1145, ISSN 0273-1177.
- [2] Kuznetsov N.V., Panasuk M.I. Cosmic radiation and prediction of errors and fault tolerance of integrated circuits in the on-board equipment of spacecrafts. Problems of Atomic Science and Technology. Physics of radiation effects on electronic equipment. 1-2. pp. 3-8, 2015.
- [3] Кузнецов Н. В. Радиационная обстановка на орбитах космических аппаратов // Кітап: Космическая модель. ред. М. И. Панасюк, Л. С. Новиков, Ғылым, 2017. Т.1. Б. 25-30. ISBN: 978-5-98227-418
- [4] Жантаев Ж.Ш., Грищенко В. Ф., Мукушев А. Схемотехническое моделирование защиты электронной аппаратуры от электростатического разряда. ҚР ҰҒА жаңалықтары. №4- физика-математика сериясы, 2016, б. 15-19. ISSN 1991-346X ,
- [5] Wang F.,Agrawal V. (2008) Single event upset: An embedded tutorial, 21st International Conference on VLSI Design (VLSID 2008), pp. 429-434.
- [6] Keller, A. M., Whiting, T. A., Sawyer, K. B., Wirthlin, M. J. Dynamic SEU sensitivity of designs on two 28-nm SRAM-based FPGA architectures // IEEE Transactions on Nuclear Science 65 (1). -2018, -P.280-287.
- [7] Van-Harten, Jordans R., Pourshagliagli H. Necessity of fault tolerance techniques in Xilinx kintex 7 FPGA devices for space missions : a case study, In : Euromicro Conference on Digital System Design (DSD), IEEE.-2017. -P. 299-306.
- [8] Грищенко В.Ф., Төлендіұлы С., Нурланқызы А. Схемотехническое имитационное моделирование воздействия разрядов на элементы интегральных схем // Вестник КазННТУ №6 (136). с. 478-483. 2019.
- [9] А. Строганов, С. Цыбин, П. Городков, (2019). Методы повышения стойкости ПЛИС со статическим ОЗУ к воздействию ионизирующего излучения. ELECTRONICS: SCIENCE, TECHNOLOGY, BUSINESS. 186. 98-101. 10.22184/1992-4178.2019.186.5.98.101.
- [10] V. Grichshenko & A. Mukushev. (2020). Circuit simulation of single failures of memory modules of on-board electronics. Physico-mathematical series. 3. 118-126. 10.32014/2020.2518-1726.44.
- [11] Vladimirov A. M., Bezhayev A. Yu., Zykov V. M., Isaychenko V. I., Lukashchuk A. A., Lukonin S. E. Automated test bench for simulation of radiation electrification of spacecraft structural dielectrics // XII International Conference Radiation-thermal Effects and Processes in Inorganic Materials IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 168 – 2017. doi:10.1088/1757-899X/168/1/012037.
- [12] Van-Harten, Jordans R., Pourshaghghi H. Necessity of fault tolerance techniques in Xilinx kintex 7 FPGA devices for space missions: a case study // Euromicro Conference on Digital System Design (DSD), IEEE. - 2017. - P. 299–306.
- [13] ПЛИС и параллельные архитектуры для применения в аэрокосмической области. Программные ошибки и отказоустойчивое проектирование. Под ред. Ф. Кастеншмидт, П. Реха. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 326 с. 2018
- [14] Гаврилов С.В.,Гуров С.И., Жукова Т.Д., Рыжова Д.И. Применение теории кодирования для повышения надежности комбинационных систем // Информационные технологии. – 2016. – №12. – С. 931-937.
- [15] Грищенко В.Ф., Төлендіұлы С., Нурланқызы А. Расчет интенсивности отказов модулей памяти бортовых электронных аппаратур низкоорбитальных космических аппаратов // Вестник ПГУ №3. с. 149-160. 2019.

REFERENCES

- [1] T. Musabayev, Zh. Zhantayev, V. Grichshenko. Complex influence of space environment on materials and electronic devices in the conditions of microgravity//Advances in Space Research, Volume 58, Issue 6, 2016, Pages 1138-1145, ISSN 0273-1177.
- [2] N. V. Kuznetsov, M. I. Panasuk. Cosmic radiation and prediction of errors and fault tolerance of integrated circuits in the on-board equipment of spacecrafts. Problems of Atomic Science and Technology. Physics of radiation effects on electronic equipment. 1-2. pp. 3-8, 2015.
- [3] Kuznetsov N. V. Radiation situation in the orbits of spacecraft / / Book: Cosmic model. ed. M. I. Panasyuk, L. S. Novikov, Science, 2017. Vol. 1. B. 25-30. ISBN: 978-5-98227-418
- [4] Zhantaev Zh. Sh., Grishchenko V. F., Mukushev A. Circuit modeling of protection of electronic equipment from electrostatic discharge. NS news of the republic of Kazakhstan. No. 4-Physics-Mathematics series, 2016, b. 15-19. ISSN 1991-346X ,
- [5] Wang F.,Agrawal V. (2008) Single event upset: An embedded tutorial, 21st International Conference on VLSI Design (VLSID 2008), pp. 429-434.
- [6] Keller, A. M., Whiting, T. A., Sawyer, K. B., Wirthlin, M. J. Dynamic SEU sensitivity of designs on two 28-nm SRAM-based FPGA architectures // IEEE Transactions on Nuclear Science 65 (1). -2018, -P.280-287.
- [7] Van-Harten, Jordans R., Pourshagliagli H. Necessity of fault tolerance techniques in Xilinx kintex 7 FPGA devices for space missions : a case study, In: Euromicro Conference on Digital System Design(DSD), IEEE.-2017. -p.299-306.
- [8] Grishchenko V. F., Tolendiuly S., Nurlankyzy A. Circuit simulation modeling of the impact of discharges on the elements of integrated circuits // Bulletin of KazNITU No. 6 (136). p. 478-483. 2019.
- [9] A. Stroganov, S. Tsybin, P. Gorodkov, (2019). Methods for increasing the resistance of FPGAs with static RAM to ionizing radiation. ELECTRONICS: SCIENCE, TECHNOLOGY, BUSINESS. 186. 98-101. 10.22184/1992-4178.2019.186.5.98.101.
- [10] V. Grichshenko., A. Mukushev. (2020). Circuit simulation of single failures of memory modules of on-board electronics. Physico-mathematical series. 3. 118-126. 10.32014/2020.2518-1726.44.
- [11] Vladimirov A. M., Bezhayev A. Yu., Zykov V. M., Isaychenko V. I., Lukashchuk A. A., Lukonin S. E. Automated test bench for simulation of radiation electrification of spacecraft structural dielectrics // XII International Conference Radiation-thermal Effects and Processes in Inorganic Materials IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 168 – 2017. doi:10.1088/1757-899X/168/1/012037.
- [12] Van-Harten, Jordans R., Pourshaghagh H. Necessity of fault tolerance techniques in Xilinx kintex 7 FPGA devices for space missions: a case study // Euromicro Conference on Digital System Design (DSD), IEEE. - 2017. - P. 299–306.
- [13] FPGAs and parallel architectures for aerospace applications. Software errors and fault-tolerant design. Edited by F. Kastenschmidt, P. Reha. Moscow: TECHNOSPHERE, p.326// 2018
- [14] Gavrilov S. V., Gurov S. I., Zhukova T. D., Ryzhova D. I. Application of coding theory for improving the reliability of combinational systems. - 2016. - No. 12. - pp. 931-937.
- [15] Grishchenko V. F., Tolendiuly S., Nurlankyzy A. Calculation of the failure rate of memory modules of onboard electronic devices of low-orbit spacecraft // Bulletin of PSU No. 3. pp. 149-160. 2019.

¹В.Ф. Грищенко, ²С. Толендиулы, ²Г. Талгаткызы*, ²А. Нурланкызы

¹ДТОО "Институт ионосферы", Алматы, Казахстан

²Институт промышленной автоматизации и цифровизации, Satbayev University, Алматы, Казахстан

*e-mail: gozi__94@mail.ru

СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕДИНИЧНЫХ ОТКАЗОВ ЗАПОМИНАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ БОРТОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАДИАЦИИ

Аннотация. Известно, что при эксплуатации различных космических аппаратов (КА) в результате воздействия космических лучей (КЛ) происходит отказ бортовой электроники, что приводит к аварийным ситуациям, а в ряде случаев - к потере спутников. В качестве примера можно привести спутники "КазСат-1" и "Фобос-Грунт". В разных странах (Франция, Россия, США, Китай) в случаях, когда необходимо прогнозировать или принимать решения о поведении сложных структур в

космосе при длительных космических полетах, выявлять процессы, приводящие к чрезвычайным ситуациям на орбите, когда требуется заранее "воспроизведение" несколько вариантов возникновения различных событий и их последствий, применяются методы моделирования поведения систем в реальных условиях. Поэтому в этой работе рассмотрен метод схемотехнического моделирования, представляющий собой высокоэффективный и относительно недорогой метод, позволяющий оценить комплексное воздействие факторов космического пространства (ФКП) на функциональное состояние и отказы бортовой электроники. Основной задачей работы является схематическое моделирование одиночных сбоях ячеек модулей памяти для заданных условий и параметров транзисторов элемента памяти при прохождении одной частицы. Определены ток ионизации и критические заряды, что приводит к нарушению и инверсии логического состояния ячейки модуля памяти.

Ключевые слова: схемотехническое моделирование, критический заряд, ток ионизации, бортовое оборудование.

¹V. F. Grishchenko, ²S. Tolendiuly, ²G. Talgatkyzy*, ²A. Nurlankyzy

¹ SLLP "Ionosphere Institute", Almaty, Kazakhstan

²Institute of Industrial Automation and Digitalization, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: gozi__94@mail.ru

SCHEMATIC MODELING OF UNIT FAILURES OF MEMORY ELEMENTS OF ONBOARD ELECTRONICS OF SPACECRAFT UNDER THE INFLUENCE OF RADIATION

Abstract. The main purpose of the work is the circuit simulation of failures of on-board electronic equipment of spacecraft (SC) for various purposes under specified conditions and the parameters of the transistors of the memory element during the passage of a single cosmic ray particle (CR). Actuality of the problem. It is known that during the operation of spacecraft for various purposes, as a result of the impact of cosmic rays (CR), on-board electronic systems fail, which leads to abnormal situations, and in some cases to the loss of satellites, for example, KazSat -1 and Phobos-Grunt. Therefore, this paper uses the method of circuit modeling, which is a highly efficient and relatively low-cost method that allows us to evaluate the circuit parameters of the transistors of the memory element during the passage of a single cosmic ray particle. In this paper, we present the results of circuit failure modeling (SEU and SEL) under radiation exposure to storage devices (memory), which was carried out on the CMOS structure, which is the dominant one in the manufacture of ICS.

Keywords: circuit modeling, critical charge, ionization current, on-board equipment.