

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНИКА

УДК 533.9.07+539.1.043+621.384

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕР-ПЛАЗМЕННОГО УСКОРИТЕЛЯ ПРОТОНОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДИНОЧНЫХ РАДИАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ В МИКРОЭЛЕКТРОННОМ УСТРОЙСТВЕ

© 2024 г. К. В. Сафронов^а, *, В. А. Флегентов^а, С. А. Горохов^а,
Н. Н. Шамаева^а, А. С. Тищенко^а, Д. О. Замураев^а, А. Л. Шамраев^а,
С. Ф. Ковалёва^а, Н. А. Фёдоров^а, С. М. Дубровских^а, А. С. Пилипенко^а,
А. С. Кустов^а, Е. А. Шибаков^а, А. В. Потапов^а

*^аВсероссийский научно-исследовательский институт технической физики
им. академика Е.И. Забабахина Российского федерального ядерного центра
Россия, 456770, Снежинск, Челябинская область, ул. Васильева, 13*

**e-mail: dep5@vniitf.ru*

Поступила в редакцию 20.01.2023 г.

После доработки 04.03.2024 г.

Принята к публикации 09.05.2024 г.

На фемтосекундной лазерной установке мощностью 200 ТВт проведены эксперименты по облучению пучками ускоренных лазером протонов микроконтроллера, изготовленного по топологической норме 180 нм. Частицы с энергиями до 6 МэВ генерировались на тыльной поверхности алюминиевых фольг толщиной 6 мкм. После облучения в памяти микроконтроллера зарегистрированы сбои. Установлено, что сбои носят характер одиночных радиационных эффектов, восстановлено сечение данных эффектов. Проведенные эксперименты демонстрируют возможность применения лазерных ускорителей для исследования одиночных радиационных эффектов в микроэлектронных устройствах под действием низкоэнергетичных протонов.

DOI: 10.31857/S0032816224050129 EDN: ESSIOA

1. ВВЕДЕНИЕ

Воздействие ионизирующего излучения космического пространства на микроэлектронные устройства бортовой аппаратуры является одной из основных причин выхода из строя космических спутников. Попадание даже одной заряженной частицы в чувствительную область микросхемы способно привести к переключению состояния отдельного транзистора, либо при определенных условиях к полной потере его работоспособности — так называемый одиночный радиационный эффект (ОРЭ) (single event effect, SEE). Продолжающееся развитие космической отрасли требует повышения производительности бортовой аппаратуры, что приводит к необходимости применения микросхем со все

меньшими размерами отдельных элементов. С уменьшением топологических норм происходит снижение критического заряда, необходимого для переключения состояния отдельного транзистора на кристалле [1], и, следовательно, повышение чувствительности микросхем к ОРЭ. Ранее считалось, что ОРЭ вызывают тяжелые ионы с энергиями более 1 МэВ/нуклон, а также протоны с энергиями более 30 МэВ. Однако за последние 15 лет появились работы, свидетельствующие о том, что в микросхемах с топологией менее 90 нм ОРЭ могут вызывать протоны с энергиями около 1 МэВ [2–9] (так называемые низкоэнергетичные протоны, НЭП). Проблема усугубляется тем, что чувствительность микроэлектронных устройств к низкоэнергетичным частицам оказалась на 4 порядка

выше по сравнению с областью высоких энергий [4]. НЭП могут вносить существенный вклад в полную скорость отказов микросхем космических аппаратов на различных орбитах [10].

Радиочастотные ускорители, применяемые в настоящее время для испытаний космической микроэлектроники, рассчитаны на генерацию протонов с энергиями от нескольких десятков до сотен МэВ [11], поэтому плохо подходят для получения НЭП. В последние 20 лет большое внимание научного сообщества привлекают лазерные методы ускорения заряженных частиц. На мощных лазерных установках петаваттного класса (10^{15} Вт) продемонстрирована генерация пучков протонов с энергиями до примерно 100 МэВ [12–14]. Малогабаритные лазеры с Ti:Sa активными элементами, обладающие пиковой мощностью до 200 ТВт, позволяют создавать пучки протонов с энергиями от менее 1 МэВ до примерно 20 МэВ [15–18] посредством хорошо изученного механизма ускорения в слое разделения зарядов у тыльной поверхности мишени (target normal sheath acceleration, TNSA) [19]. Таким образом, лазерные ускорители можно применять для исследований ОПЭ при воздействии НЭП на изделия микроэлектронной техники. В данной работе мы подтверждаем данный тезис. Представляемые эксперименты показали, что пучки протонов с энергиями около 1 МэВ, генерируемые фемтосекундным лазером с пиковой мощностью 100 ТВт, при облучении микроэлектронного устройства вызывают в нем ОПЭ.

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проведены на фемтосекундной установке Ti:Sa при энергии лазерных импульсов на мишени (0.1–2) Дж, длительности (25–30) фс. Схема экспериментов представлена на рис. 1. Контраст основного фемтосекундного импульса по отношению к пьедесталу усиленного спонтанного излучения длительностью около 5 нс составлял примерно 10^9 (по интенсивности). В качестве мишеней использовались алюминиевые фольги толщиной 6 мкм. Лазерный импульс направлялся на мишень по нормали к поверхности посредством внеосевого параболического зеркала $f/2$. Наведение на мишень перед каждым выстрелом осуществлялось посредством непрерывного HeNe-лазера ($\lambda = 632$ нм). Пучок HeNe-лазера предварительно совмещался по расходимости и по направлению с пучком рабочего лазера на входе в вакуумную мишенную камеру. Диаметр фокального пятна по измерениям в пучке HeNe-лазера составлял 3 мкм на полувысоте, что обеспечивает пиковую интенсивность в фокальном пятне на мишени до $5 \cdot 10^{20}$ Вт/см² (содержание энергии лазерного импульса в фокальном пятне 50%).

Плотности потока протонов, эмитируемых с тыльной поверхности мишени, измерялись посредством времяпролетного спектрометра (ВПС) с кремниевым полупроводниковым детектором ФДУК 1УВСКМ (ООО “Техноэксан”, временное разрешение около 2.5 нс). Для

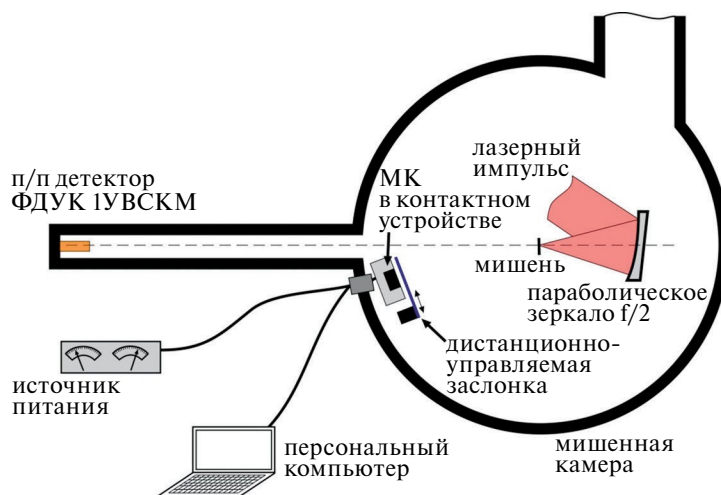


Рис. 1. Схема экспериментов.

защиты от видимого света и низкоэнергетичных частиц входная диафрагма детектора закрывалась алюминиевой фольгой толщиной 6 мкм. Детектор устанавливался на расстоянии 1449 мм от мишени. Посредством ВПС были измерены параметры пучков частиц, эмитированных в направлении нормали к мишени, а также под углом 10° к нормали (под этим углом впоследствии был установлен исследуемый объект).

В качестве исследуемого объекта был выбран микроконтроллер (МК) с ARM-ядром. Исследуемый объект устанавливался внутри мишенной камеры на пути протонного пучка, эмитируемого с тыльной поверхности мишени в момент облучения лазерным импульсом. Микроконтроллер выполнен по технологии “объемный кремний” с топологической нормой 180 нм. Металлическая защитная крышка МК толщиной около 0.5 мм непрозрачна для ускоренных лазером протонов, поэтому она перед экспериментами была удалена механическим способом. Кристалл МК располагался на расстоянии 377 мм от мишени под углом 10° к ее нормали. Микроконтроллер устанавливался в контактное устройство, к которому через вакуумный разъем подключался источник питания и персональный компьютер для записи/считывания данных. Для защиты от электромагнитного импульса, возникающего на мишени во время лазерного выстрела, все электрические провода и контактное устройство внутри мишенной камеры были тщательно обернуты алюминиевой фольгой толщиной 15 мкм. Перед кристаллом МК был установлен фильтр из алюминиевой фольги толщиной 6 мкм. В ходе экспериментов исследовалось возникновение сбоев во встроенной памяти (ОЗУ) МК объемом 32 кБ. Перед каждым выстрелом лазера все ячейки ОЗУ инициализировались значениями 0хAAAAAAAA. Количество сбоев под действием ускоренных лазером протонов определялось при побитном сравнении массивов записанных перед экспериментом и считанных после эксперимента данных. Перед кристаллом МК внутри мишенной камеры была установлена дистанционно-управляемая заслонка из лавсановой пленки толщиной 400 мкм. Закрытая заслонка не пропускает протоны с энергиями менее 6 МэВ, но прозрачна для электромагнитного излучения, генерируемого в мишени во время выстрела. Исследования сбоев в МК проводились при полностью открытой заслонке. Однако

в ходе экспериментов регулярно производились выстрелы при закрытой заслонке. В этих опытах при любых параметрах лазерного импульса сбой не наблюдались. Данный факт свидетельствует о том, что регистрируемые при открытой заслонке сбой вызваны именно ускоренными протонами.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Измерения с применением ВПС показали, что пучки ускоренных протонов обладают широким спектром экспоненциальной формы с некоторой максимальной энергией (для примера на рис. 2 изображен спектр, полученный в одном из экспериментов). На рис. 3 представлены зависимости максимальной энергии протонов в пучке $E_{p,max}$ и флюенсов частиц Φ_p , эмитированных под углами 0° и 10° , от энергии лазерного импульса E_{las} . Флюенсы рассчитывались интегрированием спектров по энергии протонов:

$$\Phi_p = \frac{dN_p}{d\Omega} = \int_0^{E_{p,max}} \frac{dN_p}{dE_p d\Omega} dE_p.$$

Максимальная энергия частиц при обоих углах наблюдения проявляет степенную зависимость от энергии лазерного импульса с показателем степени 0.8. Но флюенсы протонов зависят от энергии E_{las} различным образом. Если в центре пучка (под углом 0°) количество частиц растет линейно с энергией лазерного импульса, то под углом 10° наблюдается более резкий экспоненциальный рост. Этот факт, вероятно, связан с увеличением углового раствора

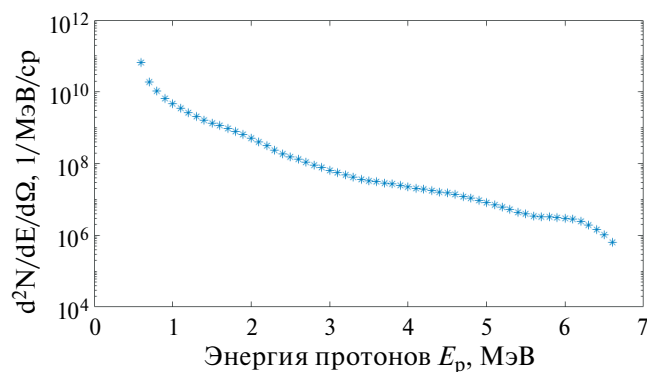


Рис. 2. Спектр протонов в эксперименте №804-04 при энергии лазерного импульса на мишени 1.60 Дж. Измерения выполнены под углом 10° к нормали мишени.

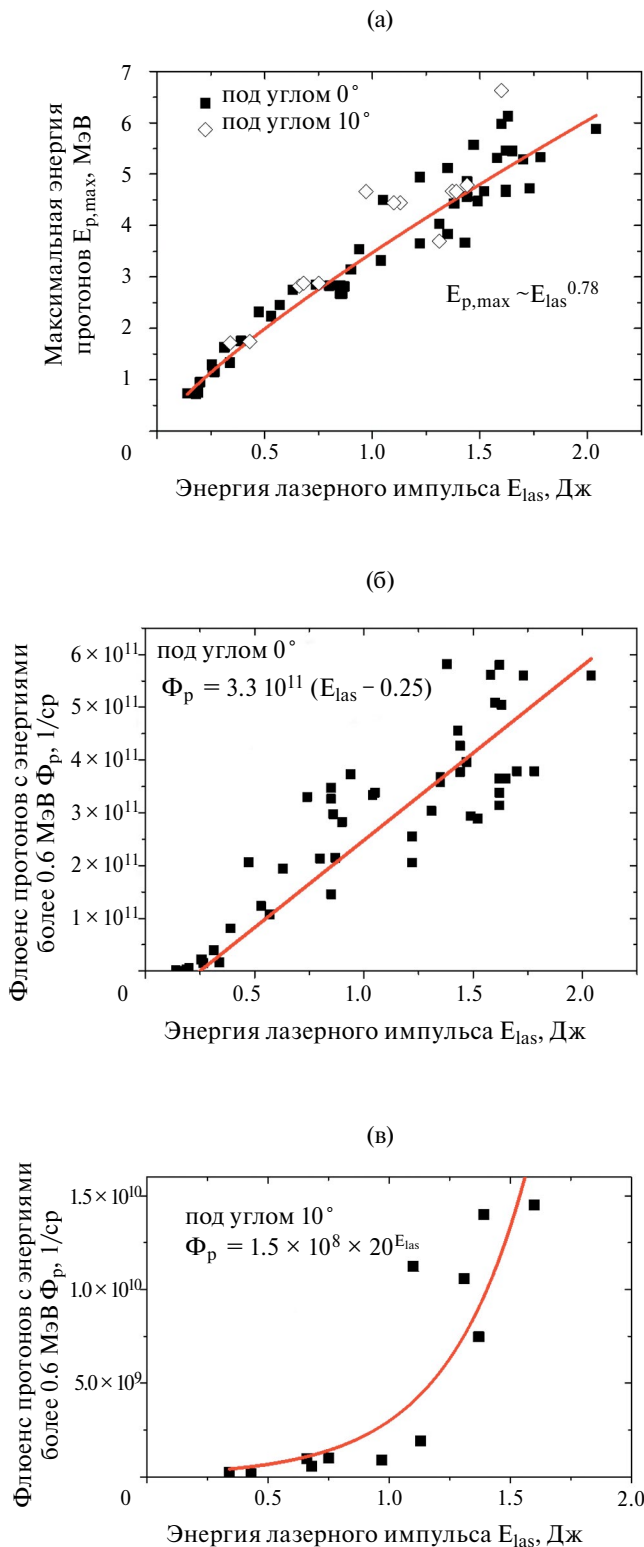


Рис. 3. Зависимости максимальной энергии протонов (а), флюенса протонов, эмитируемых по нормали к мишени (б), флюенса протонов, эмитируемых под углом 10° к нормали мишени (в) от энергии лазерного импульса. Сплошные линии — аппроксимации с параметрами, указанными на соответствующих графиках.

пучка протонов при росте энергии лазерного импульса.

Испытания стойкости микроэлектронных устройств к ОРЭ на традиционных ускорителях проводятся при плотностях потока частиц, обеспечивающих отсутствие объемных радиационных эффектов, связанных с мощностью дозы. Но лазерные ускорители генерируют короткие пучки с высокими плотностями потока. Поэтому при будущих испытаниях с применением мощных лазеров необходимо принимать меры по снижению плотностей потока на исследуемых устройствах: увеличивать расстояние, использовать тонкие фольги в качестве ослабителей пучков. В данной работе исследуемый микроконтроллер был установлен под углом 10° к нормали мишени, где согласно измерениям посредством ВПС флюенс частиц на 1–2 порядка ниже, чем в центре пучка.

После установки микроконтроллера были проведены измерения зависимости количества возникающих в исследуемом объекте сбоев N_{err} от энергии лазерного импульса. Эксперименты были выполнены при номинальном напряжении питания МК $U_{nom} = 1.8$ В. При энергиях лазерного импульса более 0.75 Дж наблюдается экспоненциальный рост количества сбоев (см. рис. 4), что коррелирует с измерениями флюенса (см. рис. 3в). В опытах при меньших энергиях ошибки в памяти МК не регистрировались, так как ожидаемое количество N_{err} менее 1.

Выполненные измерения позволяют оценить сечение эффекта возникновения сбоев в памяти МК, которое равно отношению количества ошибок в памяти МК к флюенсу протонов:

$$\sigma_p^{err} = \frac{N_{err}}{\Phi_p} \frac{R^2}{N_{bit}} = (5 \pm 1) \cdot 10^{-10} \text{ см}^2/\text{В}, \quad (1)$$

где $R = 37.7$ см — расстояние от мишени до кристалла МК, $N_{bit} = 256$ кбит — количество ячеек в памяти МК.

Спектры ускоренных лазером протонов, восстановленные из измерений ВПС, позволяют определить плотность потока протонов и мощность поглощенной дозы в различных слоях микросхемы. На рис. 5 представлены зависимости мощности поглощенной дозы на поверхности МК (после прохождения 6 мкм алюминиевого фильтра) и в чувствительном слое (после прохождения дополнительно 10.6 мкм

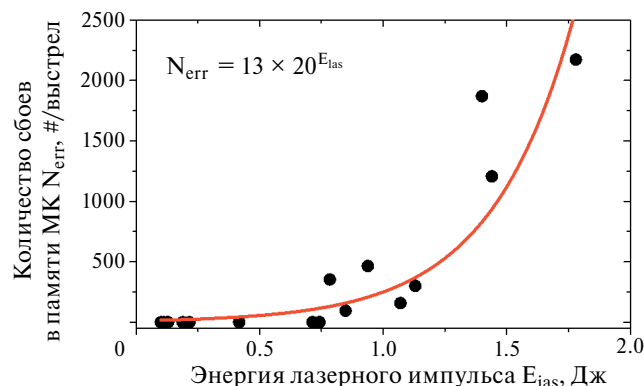


Рис. 4. Зависимость количества сбоев в памяти МК после облучения пучком лазерно-ускоренных протонов от энергии лазерного импульса. Сплошная линия — аппроксимация экспоненциальной функцией.

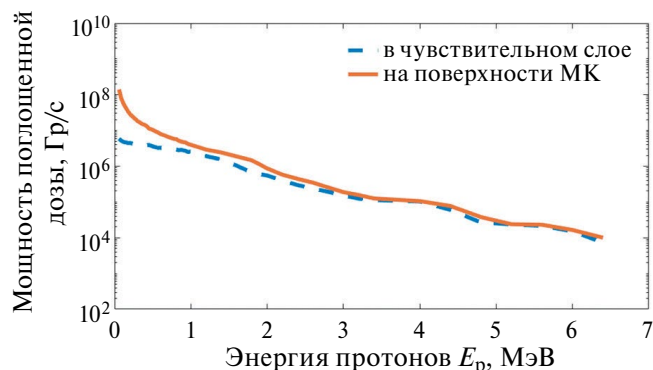


Рис. 5. Зависимость мощности поглощенной дозы на поверхности МК и в чувствительной области (на глубине 10.6 мкм) от энергии протонов. Расчет выполнен для спектра протонов, зарегистрированного в эксперименте №804-04 (см. рис. 2).

слоя изоляции SiO_2) от энергии частиц. Зависимости рассчитаны для спектра, изображенного на рис. 2 с использованием данных по пробегам протонов из SRIM [20]. Отметим также, что расчет не учитывает торможение частиц в слоях металлизации, расположенных внутри изоляционного слоя, поэтому его надо рассматривать как оценку сверху.

Пороговое значение мощности дозы для массового сбоя ячеек памяти по эффекту мощности дозы (порог бессбойной работы, ПБР) было измерено ранее на импульсной рентгеновской установке и для данного МК составляет $(3 \pm 1) \cdot 10^7$ Гр/с. Таким образом, в экспериментах на лазерном ускорителе превышение ПБР происходит только в приповерхностном слое МК. Надпороговую мощность дозы формируют протоны, обладающие на поверхности МК энергиями менее 0.2 МэВ (соответствует энергии 0.65 МэВ вблизи источника). Пролет этих частиц в SiO_2 согласно SRIM составляет менее 2 мкм. В чувствительной области МК мощность дозы более чем в 5 раз ниже ПБР.

Ионизационное торможение протонов в слоях МК перед чувствительным объемом, вызывает протекание импульсного тока в цепи питания, что в свою очередь может приводить к просадке напряжения на транзисторах ячеек памяти [21] и, как следствие, повышению чувствительности к одиночным сбоям. Выполненные в некоторых экспериментах измерения показали, что амплитуда импульса тока в цепи питания МК во время облучения пучком ускоренных лазером

протонов составляет до $I_p \approx 0.1$ А. В свою очередь, в исследованиях на импульсной рентгеновской установке было установлено, что при массовом сбое ячеек памяти, обусловленном объемными радиационными эффектами, в цепи питания МК протекает ток с амплитудой $I_{thr} = 0.8$ А. Таким образом, импульс ионизационного тока, образующийся при облучении МК протонами лазерного ускорителя, недостаточен для сбоя ячеек МК за счет объемных радиационных эффектов, однако связанная с ним просадка напряжения питания может повышать чувствительность микросхемы к ОРЭ. Причем даже небольшое снижение напряжения может приводить к существенному росту количества сбоев, так как чувствительность к ОРЭ зависит от напряжения питания экспоненциально [2, 22, 23]. Величину просадки напряжения ΔU_S в экспериментах на лазерном ускорителе можно оценить в предположении, что она пропорциональна радиационно-индуцированному току, тогда

$$\Delta U_S = (U_{nom} - U_0) \frac{I_p}{I_{thr}} \approx 0.16 \text{ В},$$

где $U_0 = 0.5$ В — напряжения удержания состояния ячеек памяти данного МК.

Для того чтобы оценить вклад объемных радиационных эффектов, была проведена серия экспериментов, в которой измерялась чувствительность МК к сбоям при различных напряжениях питания. В этой серии, чтобы не допустить слишком большого количества ошибок

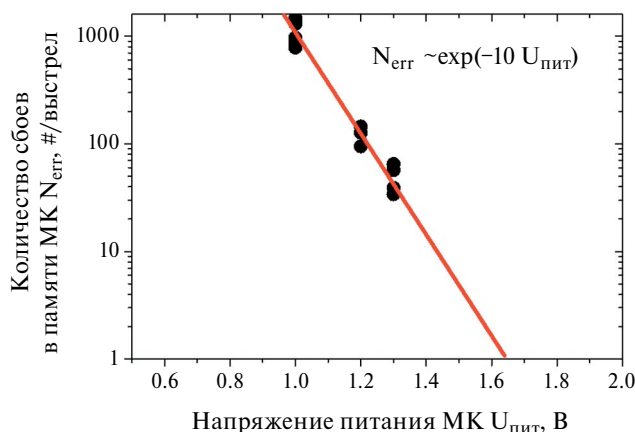


Рис. 6. Зависимость количества сбоев от напряжения питания МК. Эксперименты проведены при энергиях лазерного импульса от 1.4 до 1.7 Дж. Сплошная линия – аппроксимация экспоненциальной функцией.

при малых напряжениях, перед микросхемой была установлена свинцовая пластина толщиной 500 мкм с отверстием диаметром 1 мм напротив центра кристалла МК. Отверстие было закрыто алюминиевым фильтром толщиной 6 мкм. Для анализа были выбраны данные экспериментов, в которых энергия лазерного импульса была примерно одинаковой (от 1.4 до 1.7 Дж). Измерения показали, что чувствительность МК к протонам лазерного ускорителя растет экспоненциально при снижении напряжения питания (см. рис. 6). Это свидетельствует о том, что регистрируемые сбои носят характер одиночных радиационных эффектов. Снижение напряжения питания на 0.16 В приводит к увеличению чувствительности МК к ОРЭ в 5 раз.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование сбоев, возникающих в ячейках памяти микроэлектронного устройства при облучении низкоэнергетичными протонами лазерного ускорителя. Восстановлено сечение сбоев при номинальном напряжении питания исследуемого объекта. Установлено, что количество регистрируемых после облучения сбоев растет экспоненциально при снижении напряжения питания, что является свидетельством одиночного характера радиационных эффектов. Вследствие высокой плотности потока протонов, обеспечиваемой лазерным ускорителем, в верхних слоях

металлизации возникают ионизационно-индуцированные токи, которые приводят к просадке напряжения в цепи питания и повышению чувствительности к одиночным сбоям. В будущих исследованиях на лазерных ускорителях рекомендуется снижать поток частиц на исследуемом объекте. Этого можно добиться, например, применением фильтров из металлических фольг, а также размещением испытываемых устройств на достаточном удалении от лазерной мишени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kobayashi D. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2021. V. 68. № 2. P. 124.
<http://doi.org/10.1109/TNS.2020.3044659>
2. Rodbell K.P., Heidel D.F., Tang H.H.K. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2007. V. 54. P. 2474.
<http://doi.org/10.1109/TNS.2007.909845>
3. Heidel D.F., Marshall P.W., LaBel K.A. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2008. V. 55. P. 3394.
<http://doi.org/10.1109/TNS.2008.2005499>
4. Sierawski B.D., Pellish J.A., Reed R.A. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2009. V. 56. P. 3085.
<http://doi.org/10.1109/TNS.2009.2032545>
5. Lawrence R.K., Ross J.F., Haddad N.F., Reed R.A., Albrecht D.R. // IEEE Radiation Effects Data Workshop, Quebec. 2009. P.123.
<http://doi.org/10.1109/REDW.2009.5336302>
6. Cannon E.H., Cabanas-Holmen M., Wert J. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2010. V. 57. P. 3493.
<http://doi.org/10.1109/TNS.2010.2086482>
7. Pellish J.A., Marshall P.W., Rodbell K.P. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2014. V. 61. P. 2896.
<http://doi.org/10.1109/TNS.2014.2369171>
8. Ye B., Liu J., Wang T.S. et al. // Nucl. Instrum. Meth. B. 2017. V. 406. P. 443.
<http://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.03.162>
9. Akhmetov A.O., Sorokoumov G.S., Smolin A.A., Bobrovsky D.V., Boychenko D.V., Nikiforov A.Y., Shemyakov A.E. // Proc. 31th Int. Conf. on Microelectronics (MIEL). Nis, Serbia. 2019. P. 107.
<http://doi.org/10.1109/MIEL.2019.8889634>
10. Dodds N.A., Schwank J.R., Shaneyfelt M.R. et al. // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2014. V. 61 P. 2904.
<http://doi.org/10.1109/TNS.2014.2364953>
11. Радиационная стойкость изделий ЭКБ. / Под ред. А.И. Чумакова, М.: НИЯУ МИФИ, 2015.
12. Kim I.J., Pae K.H., Choi I.W. et al. // Phys. Plasmas. 2016. V. 23. P. 070701.
<http://doi.org/10.1063/1.4958654>
13. Wagner F., Deppert O., Brabetz C. et al. // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 116. P. 205002.
<http://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.205002>

14. *Higginson A., Gray R.J., King M. et al.* // Nature Comm. 2018. V. 9. P. 724.
<http://doi.org/10.1038/s41467-018-03063-9>
15. *Zeil K, Kraft S.D., Bock S et al.* // New J. Phys. 2010. V. 12. P. 045015.
<http://doi.org/10.1088/1367-2630/12/4/045015>
16. *Neely D., Foster P., Robinson A. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 89. P. 021502.
<http://doi.org/10.1063/1.2220011>
17. *Pirozhkov A.S., Mori M., Yogo A. et al.* // Proc. SPIE 7354. 2009. P. 735414.
<http://doi.org/10.1117/12.820635>
18. *Nishiuchi M., Daito I., Ikegami M. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 061107.
<http://doi.org/10.1063/1.3078291>
19. *Wilks S.C., Langdon A.B., Cowan T.E. et al.* // Phys. Plasmas. 2001. V. 8. P. 542.
<http://doi.org/10.1063/1.1333697>
20. *Ziegler J.F., Biersak J.P., Littmark U.* The stopping and Range of Ions in Solids. Vol. 1. New York: Pergamon, 1985. P. 53.
21. *Ackermann M.R., Mikawa R.E., Massengill L.W., Diehl S.E.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1986. V. 33. № 6. P. 1524.
<http://doi.org/10.1109/TNS.1986.4334635>
22. *King M.P., Reed R.A., Welleret R.A. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 2013. V. 60. №6. P. 4122.
<http://doi.org/10.1109/TNS.2013.2286523>
23. *Sierawski B.D., Mendenhall M.H., Reed R.A. et al.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. V. 57. P. 3273. 2010.
<http://doi.org/10.1109/TNS.2010.2080689>