

ISSN 0002-3566 (print)

УДК 621.357.74

Поступила в редакцию 09.10.2016

Received 09.10.2016

С. С. Грабчиков, С. Б. Ластовский, А. А. Солобай, А. В. Труханов, Д. И. Чушкова*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
Минск, Беларусь*

ОСОБЕННОСТИ СИНТЕЗА МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИ ОСАЖДЕННЫХ ПЛЕНОК НИКЕЛЬ-ЖЕЛЕЗО И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИХ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ

Современные полупроводниковые приборы и микросхемы чувствительны к воздействию ионизирующих излучений. Тем не менее они широко применяются в военной и космической технике, в ядерной индустрии. При этом используется ряд технологических, схемотехнических и программных решений, уменьшающих последствия радиационного воздействия. Наиболее предпочтительным решением является выбор метода на основе использования экранов, поскольку он экономичнее и определяется радиационными свойствами используемых для изготовления экранов материалов. В последнее время особое внимание уделяется исследованию многослойных структур, так как при прохождении излучений через эти материалы возможно значительное ослабление эффектов радиационного воздействия, что имеет значительный научный и прикладной интерес.

Методом электролитического осаждения получены экспериментальные образцы покрытий сплавов NiFe и многослойных структур NiFe/Cu с различным химическим составом. Установлены зависимости изменения химического состава от условий осаждения. Методом рентгеновской дифракции проведены исследования кристаллической структуры. Покрытия характеризуются гранецентрированной кубической решеткой, с увеличением концентрации железа параметр элементарной ячейки увеличивается.

Эффективность радиационной защиты многослойных структур NiFe/Cu оценивалась при облучении электронами с энергией 4 МэВ на линейном ускорителе ЭЛУ-4. В качестве тестовых структур использовались кремниевые МОП-транзисторы. Эффективность ослабления электронного потока была оценена по изменению вольтамперных характеристик: порогового напряжения для МОП транзисторов, расположенных за экранами на основе многослойных структур NiFe/Cu, и без экранов. Установлено, что с ростом количества слоев при сохранении суммарной толщины эффективность экранирования увеличивается, что позволяет создавать высокоэффективные экраны при сопоставимых массогабаритных параметрах.

Ключевые слова: электроосаждение, экранирование, экраны, радиационная защита, сплавы NiFe

S. S. Grabchikov, S. B. Lastovskii, A. A. Solobai, A. V. Trukhanov, D. I. Chushkova*Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

SYNTHESIS FEATURES AND RADIATION PROTECTION EFFICIENCY OF MULTILAYER STRUCTURES BASED ON Ni-Fe ELECTRODEPOSED FILMS

Modern semiconductor devices and microchips are sensitive to the effects of ionizing radiation. Nevertheless, they are widely used in military and space technology, in the nuclear industry. At the same time, a number of technological, circuit and software solutions are used to reduce the effects of radiation exposure. The most preferable method is one based on using shields, due to its low cost and excellent radiation properties of shield's materials. Recently, special attention has been paid to the study of multilayer structures.

Experimental samples of Ni-Fe alloys and multilayer Ni-Fe/Cu structures with different chemical composition were obtained by electrochemical deposition. The dependence of chemical composition variation from deposition conditions was determined. Ni-Fe alloys crystal structure was studied using X-ray diffraction.

Shielding properties of Ni-Fe/Cu multilayer structures were investigating on linear accelerator ELA-4 under 4 MeV electron irradiation. Silicon p-MOSFETs were used as test structures. Evaluation of electron flow weakening effectiveness was performed by current-voltage characteristics changing – threshold voltage of pMOS-transistors, which were located behind shields based on NiFe/Cu multilayered structures and without shields. It was found that increasing number of Ni-Fe layers within the same total thickness leads to maximum shielding efficiency.

Keywords: electrodeposition, shielding, shields, radiation protection, Ni-Fe alloys

Введение. На сегодняшний день актуальной проблемой, стоящей перед инженерами и разработчиками техники, является повышение стойкости элементов и приборов микроэлектронной техники, эксплуатируемой как в земных условиях, так и в космическом пространстве, к воздействию различного типа ионизирующих излучений. При этом, согласно оценкам экспертов [1],

стоимость стойких к излучениям приборов и микросхем увеличивается в 10–30 раз по сравнению с нестойкими аналогами.

Современные полупроводниковые приборы и микросхемы чувствительны к воздействию ионизирующих излучений [2, 3]. Тем не менее они широко применяются в военной и космической технике, в ядерной индустрии. При этом используется ряд технологических, схемотехнических и программных решений, уменьшающих последствия радиационного воздействия. Основными типами радиационных повреждений, приводящих к разовым или необратимым отказам полупроводниковых приборов, являются: накопление электрического заряда в подзатворных диэлектриках, что в свою очередь приводит к смещению порога открытия полевых транзисторов и долговременному отказу; фотоэффект на $p-n$ -переходах, который увеличивает паразитные утечки и ложные сигналы; дефекты кристаллической структуры.

Основные методы обеспечения радиационной стойкости условно можно разделить на две группы – методы, использующие схемотехнические и конструкционные решения, и методы радиационной защиты на основе экранов. Схемотехнический метод имеет значительные ограничения по причине низкой радиационной стойкости большого количества элементов электронных приборов и микросхем. Наиболее предпочтительным решением является выбор метода на основе использования экранов, поскольку он экономичнее и определяется радиационными свойствами используемых для изготовления экранов материалов. Основная задача защиты от мощных пучков электронов сводится к защите от вторичного тормозного излучения. Для защиты от электронного излучения чаще всего используют такие материалы, как алюминий, железо, медь, плексиглас, силикатное стекло и др. [4].

Спектр синтезируемых в настоящее время материалов достаточно широк, некоторые из них могут быть перспективны для использования в качестве экранов радиационной защиты [5–8]. В настоящее время особое внимание уделяется исследованию многослойных структур, так как при прохождении излучений через эти материалы возможно значительное ослабление эффектов радиационного воздействия, что имеет значительный научный и прикладной интерес.

Методика эксперимента. Экспериментальные образцы покрытий сплавов NiFe формировались с помощью метода электролитического осаждения, описанного в [9].

В зависимости от режимов электролиза и состава растворов (концентрация железа серноокислого семиводного изменялась от 10 до 60 г/л) были получены 5 образцов покрытий сплавов NiFe, содержащих от 7 до 50 ат.% железа. Средняя толщина составляла 30 мкм. Осаждение покрытий проводилось в термостатируемой ванне с перемешиванием при температуре $T = 25–30$ °С, плотности тока $D_k = 20–30$ мА/см², кислотности pH = 1,8–2,4. В качестве анодов использовались пластины электролитического никеля. Источниками постоянного тока служили приборы типа Б5-49, ТЭС-14.

Экспериментальные экраны на основе многослойных структур с чередующимися слоями NiFe/Cu (далее – экраны) были получены из электролита для пленочных структур NiFe и электролита меднения следующего состава: медь серноокислая пятиводная – 30–35 г/л, калий пиррофосфорнокислый – 140–145 г/л, натрий фосфорнокислый двузамещенный двенадцативодный – 90–95 г/л, калий-натрий виннокислый четырехводный – 20–25 г/л. Осаждение слоев меди проводилось в термостатируемой ванне с перемешиванием при $T = 36–38$ °С, $D_k = 5–10$ мА/см², pH = 8,2–8,5. В качестве анодов использовались пластины электролитической меди.

Химический состав покрытий NiFe определялся с помощью рентгеновского энергодисперсионного спектрометра AN-10000 фирмы LINK. Структура покрытий сплавов NiFe исследовалась на программно-аппаратном комплексе рентгеновской дифракции «ДРОН-3М» в $Co-k_\alpha$ -излучении.

Электронное облучение экранов проводили на линейном ускорителе ЭЛУ-4 (номинальная энергия электронов $E_e = 4$ МэВ). Величина энергии электронов определялась по длине их пробега в меди с точностью $\pm 1,0$ %. Плотность потока электронов составляла $(5–10) \cdot 10^{11}$ см⁻²·с⁻¹, флюенс электронов $\Phi_e = 10^{15}–2 \cdot 10^{16}$ см⁻². Температуру экранов при облучении ($T = 25–30$ °С) контролировали термопарой медь-копель с регистрацией термо-ЭДС универсальным вольтметром В7-23. Дозиметрический контроль осуществлялся с помощью цилиндра Фарадея, который пред-

ставлял собой металлический блок, помещенный внутрь изолированной камеры. Погрешность измерения плотности потока электронов составляла $\pm 10\%$.

В качестве тестовых структур при облучении электронами использовались МОП-транзисторы (элементы КМОП интегральных микросхем IN74АС04), изготовленные по эпитаксиально-планарной технологии. Эффективность экранирования (K_3) определяли по формуле

$$K_3 = D_{\text{п}} / D_{\text{п0}}$$

где $D_{\text{п}}$ – доза параметрического отказа тестовой приборной структуры в защитном экране; $D_{\text{п0}}$ – доза параметрического отказа тестовой приборной структуры без экрана.

Измерение вольтамперных характеристик (ВАХ) МОП-транзисторов до и после облучения проводилось с помощью автоматизированного измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/6. Из ВАХ МОП-транзисторов определялись пороговое напряжение $U_{\text{п}}$ (при токе стока $I_{\text{с}} = 10^{-7}$ А) и ток утечки канала $I_{\text{ут}}$ (при напряжении затвора $U_3 = 0$, напряжении стока $U_{\text{с}} = -5$ В).

Результаты и обсуждение. Установлено, что состав и качество покрытий сплавов NiFe в значительной степени зависит от величины $D_{\text{к}}$, режимов перемешивания, температуры и pH раствора. Необходимо учитывать, что между параметрами процесса электролиза существует взаимосвязь, то есть при изменении одного из них должны изменяться и другие. С увеличением температуры необходимо уменьшать pH и увеличивать плотность тока при осаждении, так как при росте температуры свыше 40°C происходит окисление ионов железа Fe^{2+} в ионы Fe^{3+} . При низком значении $\text{pH} < 1,5$ выделяется много водорода, что служит причиной появления питтинга на поверхности и снижения качества покрытия.

Установлено, что оптимальный интервал рабочих плотностей тока составляет $20\text{--}30$ mA/cm^2 , а повышение величины $D_{\text{к}}$ приводит к увеличению содержания железа в покрытиях. Выбор температуры осаждения при получении покрытий заданного состава в каждом конкретном случае требует индивидуального подхода.

При электролитическом осаждении покрытий сплава NiFe выделяется водород, поэтому большое значение имеет pH электролита и его поддержание в процессе электролиза. На основе изучения качества покрытий и их химического состава от величины pH установлено, что оптимальное значение $\text{pH} = 1,8\text{--}2,4$. Увеличение pH до 2,5 и более способствует образованию гидроксидов железа и никеля, которые затрудняют процесс осаждения покрытий сплавов NiFe требуемого состава и ухудшают их качество. Для предотвращения процесса окисления ионов Fe^{2+} и поддержания pH в нужных пределах в электролит добавляют 25%-ную серную кислоту, что позволяет осуществлять осаждение покрытий с заданным составом во всем диапазоне pH.

Установлено, что важным условием для получения качественных покрытий сплавов NiFe является перемешивание электролита. Поскольку при электролизе pH прикатодного слоя сильно отличается от pH в остальном объеме электролита, то перемешивание способствует более быстрому восполнению ионов осаждающихся металлов в прикатодном слое и удалению водорода и, как следствие, восстановлению нужной кислотности для осаждения сплавов.

Результаты исследования химического состава покрытий сплава NiFe, полученные методом рентгеновского энергодисперсионного анализа, представлены в таблице.

Результаты исследования химического состава покрытий сплава NiFe, полученные методом рентгеновского энергодисперсионного анализа

Results of the chemical composition study of Ni-Fe alloy coatings obtained by X-Ray energy-dispersive analysis

Исходные элементы	№ образца				
	1	2	3	4	5
Fe, ат.%	7,03	21,79	30,09	39,98	47,45
Ni, ат.%	92	78, 21	69, 91	61, 02	52,55

Из данных таблицы видно, что минимальная концентрация железа характерна для образца № 1 $\sim 7\%$ (полученного при концентрации $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O} - 10$ г/л), а максимальная – для образца № 5 $\sim 50\%$, (полученного при концентрации $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O} - 60$ г/л).

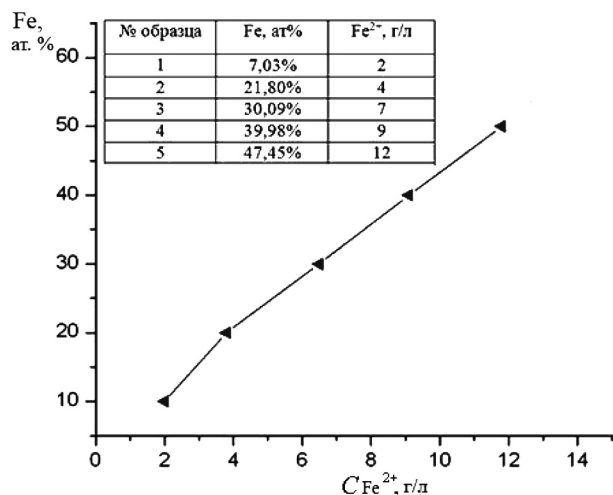


Рис. 1. Зависимость содержания Fe в покрытиях сплавов NiFe от концентрации ионов Fe²⁺ в электролите

Fig. 1. Dependence of content of Fe in the coatings of Ni-Fe alloys on the concentration of Fe²⁺ ions in the electrolyte

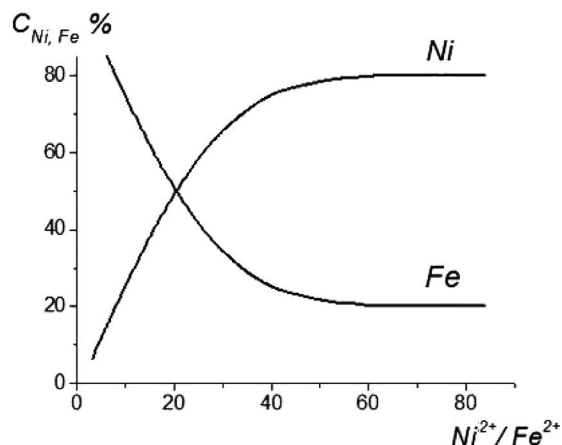


Рис. 2. Зависимость содержания Ni и Fe в покрытиях сплавов NiFe от соотношения концентраций ионов в электролите

Fig. 2. Dependence of content of Ni and Fe in the coatings of Ni-Fe alloys on the ratio of ion concentration in the electrolyte

На основании данных рентгеновского энергодисперсионного анализа построен график зависимости содержания железа в пленках NiFe от концентрации ионов Fe²⁺ в электролите (рис. 1). Используя данную зависимость, полученную эмпирическим путем, можно формировать пленки NiFe заданного состава.

При постоянном соотношении ионов Ni²⁺/Fe²⁺ содержание железа в покрытиях возрастает с увеличением суммарной концентрации ионов в электролите (рис. 2). Это связано с большей активностью ионов железа по сравнению с ионами никеля. Концентрация ионов металлов в электролите должна быть высокой, так как при этом повышается скорость их подачи в прикатодный слой и сокращается время установления процесса на катоде.

На рис. 3 представлены спектры рентгеновской дифракции для образцов пленок NiFe, содержащих: *a* – Fe 30,09 ат.% Ni 69,91 ат.%; *b* – Fe 21,79 ат.% Ni 78,21 ат.%; *c* – Fe 7,03 ат.% Ni 92,97 ат.%. На спектрах отчетливо видны два дифракционных максимума в областях углов 51–52 град и 60–61 град, соответствующие отражениям от плоскостей (111) и (200).

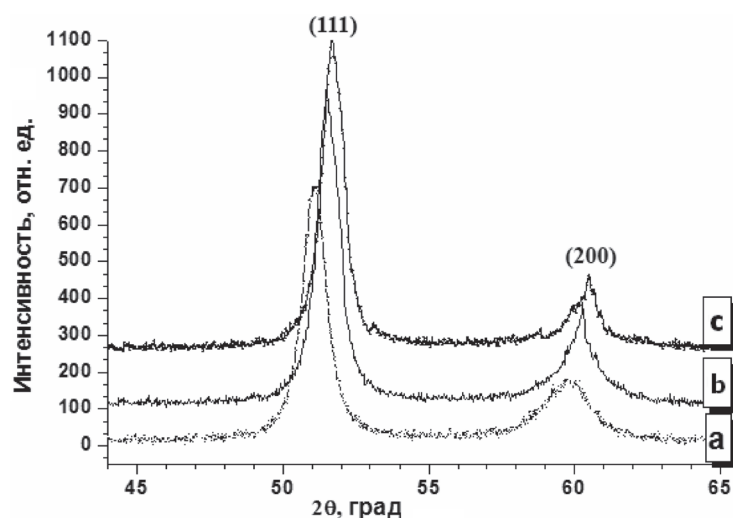


Рис. 3. Спектры рентгеновской дифракции покрытий сплавов NiFe, содержащих: *a* – Fe 30,09 ат.% Ni 69,91 ат.%; *b* – Fe 21,79 ат.% Ni 78,21 ат.%; и *c* – Fe 7,03 ат.% Ni 92,97 ат.%

Fig. 3. X-ray diffraction spectra of Ni-Fe coatings, which contain: *a* – Fe 30.09 at.% Ni 69.91 at.%; *b* – Fe 21.79 at.% Ni 78.21 at.%; *c* – Fe 7.03 at.% Ni 92.97 at.%

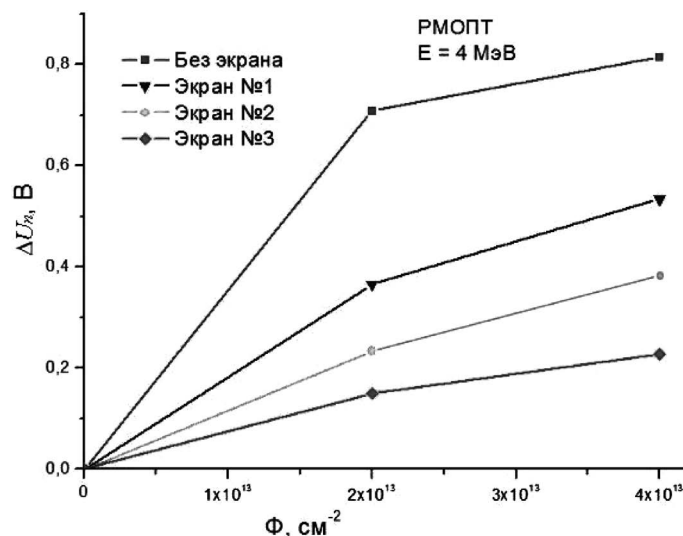


Рис. 4. Зависимость изменения порогового напряжения защищенных и незащищенных МОП-транзисторов от флюенса электронного облучения

Fig. 4. Threshold voltage variation dependence of protected and unprotected MOSFETs on the fluence of electron irradiation

Можно отметить смещение дифракционных максимумов в области больших углов с увеличением концентрации никеля. Результаты обработки спектров позволяют сделать вывод, что все исследованные образцы представляют твердый раствор на основе гранецентрированной решетки. Отмечено, что с увеличением концентрации железа в покрытиях сплавов NiFe от 7 до 50 ат.% параметр элементарной ячейки увеличивается от $3,523 \cdot 10^{-10}$ до $3,551 \cdot 10^{-10}$ м. Данный результат связан с большим значением атомного радиуса Fe ($1,26 \cdot 10^{-10}$ м) по сравнению с атомным радиусом Ni ($1,24 \cdot 10^{-10}$ м).

Эффективность радиационной защиты при облучении электронами исследовалась на образцах экранов, представляющих собой многослойные структуры NiFe/Cu следующего строения: № 1 – 125 мкм NiFe×8 слоев + 5 мкм Cu×8 слоев; № 2 – 25 мкм NiFe×33 слоя + 5 мкм Cu×33 слоя; № 3 – 5 мкм NiFe×100 слоев + 5 мкм Cu×100 слоев. Состав сплава NiFe – 20 ат.% железа, остальное – никель. На рис. 4 представлены результаты измерений пороговых напряжений МОП-транзисторов, не защищенных и защищенных экранами.

Наибольшей эффективностью экранирования обладали многослойные экраны, содержащие: 5 мкм NiFe×100 слоев + 5 мкм Cu×100 слоев. При флюенсе электронов $\Phi = 2 \cdot 10^{13}$ см⁻² изменение порогового напряжения на тестовых МОП-транзисторах, расположенных за экраном, было в 4,7 раз меньше по сравнению с неэкранированным образцом.

Закключение. В работе исследованы условия электролитического осаждения покрытий сплавов NiFe с содержанием от 7 до 50 ат.% железа. Установлено, что повышение плотности катодного тока приводит к увеличению концентрации железа в покрытиях. Оптимальные интервалы рабочих плотностей тока составляют 20–30 мА/см², температуры – 30–35 °С, значений pH = 1,8–2,4. Показано, что при увеличении концентрации ионов двухвалентного железа от 2 до 19 г/л содержание железа в покрытиях увеличивается от 7 до 50 ат.%.

Результаты исследования структуры покрытий сплавов NiFe, содержащих от 7 до 50 ат.% железа, свидетельствуют о том, что покрытия характеризуются гранецентрированной кубической решеткой, с увеличением концентрации железа параметр элементарной ячейки увеличивается от $3,523 \cdot 10^{-10}$ до $3,551 \cdot 10^{-10}$ м.

Получены многослойные структуры системы NiFe/Cu, перспективные для использования в качестве экранов радиационной защиты изделий электронной и микроэлектронной техники. Исследования вольтамперных характеристик тестовых МОП-транзисторов, защищенных и не

защищенных экранами на основе многослойных структур NiFe/Cu, при облучении электронами показали, что наибольшей эффективностью обладают экраны, содержащие максимальное количество слоев. При флюенсе $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ изменение порогового напряжения в образцах МОП-транзисторов, расположенных за экраном, в 4,7 раз меньше, по сравнению с неэкранированными образцами.

Благодарность

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Ф15РМ-011) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 15-52-04036-Бел-мол-а).

Acknowledgement

This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant no F15RM-011) and Russian Foundation for Basic Research (grant no 15-52-04036-Bel-mol-a).

Список использованных источников

1. Методы повышения радиационной стойкости интегральных микросхем НПО «ИНТЕГРАЛ», предназначенных для условий работы в космических летательных аппаратах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.1551a3.ru/datafiles/l817vf11.pdf>. – Дата доступа: 24.04.2017.
2. Кужир, П. Г. Прикладная ядерная физика / П. Г. Кужир. – Минск: Технопринт, 2004. – 113 с.
3. Evwaraye, O. Electron-irradiation-induced divacancy in lightly doped silicon / O. Evwaraye, E. Sun // J. Appl. Phys. – 1976. – Vol. 47, N 9. – P. 3776–3780.
4. Машкович, В. П. Защита от ионизирующих излучений / В. П. Машкович, А. В. Кудрявцева. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 418 с.
5. Effectiveness of IC shielded packages against space radiation / J. P. Spratt [et al.] // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1997. – Vol. 44, N 6. – P. 2018–2025.
6. US Pat. 6858795. H05K009/00. Radiation shielding of three dimensional multi-chip modules / Czjakowski David R., Eggleston Neil, Patterson Janet S. 18.08.2003.
7. TID Effects of High-Z Material Spot Shields on FPGA Using MPTB Data / S. H. Crain [et al.] – NASA/CR–2003–212638. – 22 p.
8. Борц, Б. В. Моделирование прохождения электронов через слоистый композиционный материал / Б. В. Борц, И. Г. Марченко, П. Н. Бездверный // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2009. – № 4. – С. 175–177.
9. Многослойный электромагнитный экран для защиты фотоэлектронных умножителей и способ его нанесения : пат. РФ, № 2474890 / В. В. Дмитренко, А. Г. Батищев, С. С. Грабчиков, Л. Б. Сосновская, Т. Е. Шарапа. – Опубл. 10.02.2013.

References

1. *Methods for radiation resistance increasing of integrated microcircuits of NPO "INTEGRAL", intended for work in spaceships*. Available at: <http://www.1551a3.ru/datafiles/l817vf11.pdf> (accessed 24 April 2017) (in Russian).
2. Kyzhir P. G. *Applied nuclear physics*. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2004. 113 p. (in Russian).
3. Evwaraye O., Sun E. Electron-irradiation-induced divacancy in lightly doped silicon. *Journal of Applied Physics*, 1976, vol. 47, no. 9, pp. 3776–3780. Doi: 10.1063/1.323260
4. Mashkovich V. P., Kudryavtseva A. V. *Ionizing radiation protection*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1995. 418 p. (in Russian).
5. Spratt J. P., Passenheim B. C., Leadon R. E., Clark S., Strobel. D. J. Effectiveness of IC shielded packages against space radiation. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1997, vol. 44, no. 6, pp. 2018–2025. Doi: 10.1109/23.658984
6. Czjakowski D. R., Eggleston N., Patterson J. S. *Radiation shielding of three dimensional multi-chip modules*. US Pat. No. 6858795. Publ. date 18.08.2003.
7. Crain S. H., Mazur J. E., Looper. M. D. *TID Effects of High-Z Material Spot Shields on FPGA Using MPTB Data*. NASA/CR–2003–212638. 22 p.
8. Bore B. V., Marchenko I. G., Bezvernii P. N. Modeling of electron transmission through laminated composition material. *Voprosy atomnoi nauki i tekhniki. Seriya Fizika radiatsionnykh povrezhdenii i radiatsionnoe materialovedenie* [Questions of atomic science and technology. Ser. Physics of Radiation Damage and Radiation Material Science], 2009, no. 4, pp. 175–177 (in Russian).
9. Dmitrenko V. V., Batischev A. G., Grabchikov S. S., Sosnovskaya L. B., Sharapa T. E. *Multilayer electromagnetic shield for photoelectronic multipliers protection and methods of its application*. Patent RF, no. 2474890. Publ. date 10.02.2013 (in Russian).

Информация об авторах

Грabcиков Сергей Степанович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gss@ifftp.bas-net.by

Ластовский Станислав Брониславович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиационных воздействий, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by

Солобай Анастасия Андреевна – младший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: catacore@mail.ru

Труханов Алексей Валентинович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: truhanov86@mail.ru

Чушкова Дарья Ивановна – младший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dashachushkova@gmail.com

Для цитирования

Особенности синтеза многослойных структур на основе электролитически осажденных пленок никель-железо и эффективность их радиационной защиты / С. С. Грabcиков [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 2. – С. 23–29.

Information about the authors

Grabchikov Sergey Stepanovich – D. Sc. (Physics and Mathematics), Chief Researcher at the Laboratory of Physics of Magnetic Films, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gss@ifftp.bas-net.by

Lastovski Stanislav Branislavovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of Laboratory of Radiation Effects Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by

Solobai Anastasia Andreevna – Junior Researcher at the Laboratory of Physics of Magnetic Films, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: solobai@ifftp.bas-net.by

Truhanov Aleksei Valentinovich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher at the Laboratory of Physics of Magnetic Films, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: truhanov86@mail.ru

Chushkova Daria Ivanovna – Junior Researcher at the Laboratory of Physics of Magnetic Films, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dashachushkova@gmail.com

For citation

Grabchikov S. S., Lastovskii S. B., Solobai A. A., Truhanov A. V., Chushkova D. I. Synthesis features and radiation protection efficiency of multilayer structures based on Ni-Fe electrodeposited films. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk* [Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series], 2017, no. 2, pp. 23–29 (in Russian).