

МЕТОДИКА ИМИТАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОТОНОВ ИЗ ЯДЕРНОЙ РЕАКЦИИ (^3He , d)

И.Е. Копанец, Г.Д. Толстолицкая, А.В. Рыбка, В.Е. Кутний, В.А. Белоус
Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий ННЦ ХФТИ,
Харьков, Украина
E-mail: ikopanets@mail.ru

Разработана методика имитационных испытаний материалов, применяемых в космической отрасли для экранировки ионизирующих излучений, с использованием высокоэнергетических протонов (энергия 12...13 МэВ) из ядерной реакции (^3He , d) и применением полупроводниковых детекторов на основе CdZnTe для регистрации заряженных частиц с энергией до нескольких десятков мегаэлектронвольт.

ВВЕДЕНИЕ

Важнейшую роль в обеспечении длительной и безотказной работы космических аппаратов играет стойкость конструкционных материалов и элементов аппаратуры к воздействию различных излучений. Основными видами проникающей корпускулярной радиации в космическом пространстве являются электроны и протоны радиационных поясов Земли, галактические космические лучи (ГКЛ) – изотропный поток протонов и более тяжелых ядер, приходящий из удаленных областей Галактики, и солнечные космические лучи (СКЛ).

Сложные энергетические спектры воздействующих на материалы корпускулярных и электромагнитных излучений, возможность их воздействия в различных сочетаниях и в разной временной последовательности – все это значительно затрудняет изучение и прогнозирование поведения материалов, как в условиях космической среды, так и ядерных установок. Несмотря на то, что к настоящему времени накоплен значительный опыт, касающийся поведения материалов и отдельных узлов космических аппаратов (КА) в условиях космического полета, непрерывное усложнение программ полетов и обновление элементной базы космической аппаратуры требуют дальнейшего развития методов как прогнозирования радиационной надежности изделий космической техники, так и ее повышения.

Поскольку вся совокупность повреждающих факторов космического пространства не может быть воспроизведена в земных условиях, при исследовании радиационной надежности космической аппаратуры широко используются имитационные испытания. Лабораторные имитационные испытания проводятся, как правило, ускоренно при сокращении сроков испытаний в 1000 раз и более по отношению к периоду работы материалов и элементов аппаратуры в космосе на борту КА. Такой подход помимо выигрыша во времени дает значительный экономический эффект. Однако он требует детального знания механизмов воздействия факторов космического пространства на материалы: недостаточная научная

обоснованность ускоренных испытаний может привести к получению ошибочных результатов.

Для характеристики радиационной стойкости часто используется понятие «предельно допустимый поток» – отнесенное к единице площади максимальное число попаданий частиц, которое материал или прибор выдерживает без изменения параметров. Например, при облучении кремниевых транзисторов протонами с энергией 20 МэВ коэффициент усиления этих транзисторов начинает уменьшаться после того, как суммарный поток протонов превысит величину 10^{11} прот./см² [1]. Такой поток протонов высокой энергии могут получить за год приборы, находящиеся вне гермоотсека КА, при полете во внутреннем радиационном поясе.

Более универсальным критерием для оценки радиационной стойкости является величина поглощенной дозы излучения, при которой начинаются заметные изменения параметров материалов или приборов. Поглощенная доза ионизирующего излучения измеряется энергией излучения, которая поглощается единицей массы вещества.

Важными моментами при имитационных испытаниях на радиационную стойкость являются: выбор вида излучения; замена излучения одного вида другим, замена корпускулярных излучений сложными энергетическими спектрами, характерными для космического пространства, потоками частиц с одной энергией, получаемыми на ускорителях.

Для бортовой аппаратуры космических объектов, имеющих тонкостенную защиту, наибольшую опасность в спектре космического корпускулярного излучения представляют электроны с энергиями от 0,5 до 7 МэВ, а также протоны и альфа-частицы с энергиями от 1 до 30 МэВ. В связи с ограниченным количеством ускорителей электронов и протонов с ускоряющим напряжением более 5 МэВ возникает необходимость создания методик облучения материалов космической техники частицами, в частности, протонами с энергией в десятки мегаэлектронвольт.

Целью настоящей работы была разработка методики имитационных испытаний материалов с

использованием высокоэнергетических протонов (энергия 12...13 МэВ) из ядерной реакции (${}^3\text{He}, d$) и применением полупроводниковых детекторов на основе CdZnTe для регистрации заряженных частиц с энергией до нескольких десятков мегаэлектронвольт.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Применение ядерной реакции $D({}^3\text{He}, p){}^4\text{He}$ для изучения поведения дейтерия в конструкционных материалах детально описано в работах [2–4]. На рис. 1 приведена энергетическая зависимость сечения реакции, имеющей широкий резонанс с максимумом при $E_{\text{He}} \sim 650$ кэВ. Рождающиеся ${}^4\text{He}$ и протон из-за экзотермичности реакции ($Q = 18,35$ МэВ) имеют энергию, существенно превосходящую энергию налетающей частицы ${}^3\text{He}$ [2]. Так при энергии ионов ${}^3\text{He}^+ \approx 0,7$ МэВ, энергия частиц ${}^4\text{He}$ и протонов составляет ≈ 2 и 13 МэВ соответственно. Один из продуктов реакции (${}^3\text{He}, d$) – высокоэнергетические протоны – использовали при разработке методики имитационных испытаний защитных материалов, экранирующих ионизирующее излучение.

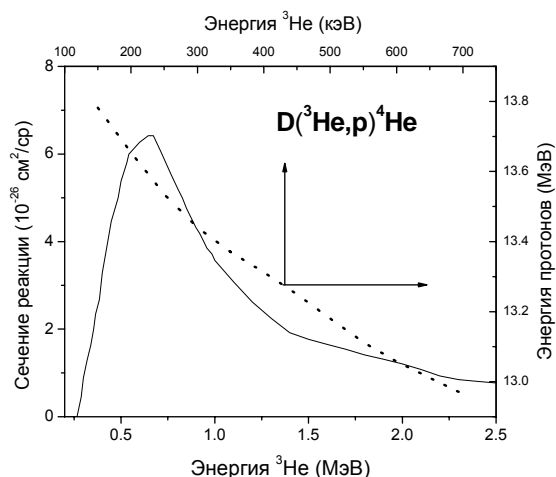


Рис. 1. Зависимость сечения реакции $D({}^3\text{He}, p){}^4\text{He}$ [2] и энергии протонов от энергии ${}^3\text{He}$

Следует отметить, что энергия протонов зависит от энергии пучка ${}^3\text{He}$ (см. рис. 1) и угла эмиссии. При увеличении энергии гелия-3 от 150 до 700 кэВ энергия протонов изменяется от 13,8 до 13 МэВ при угле эмиссии 25° по отношению к падающему пучку. Изменение угла эмиссии от 20 до 50° приводит к увеличению энергии протонов с 12,9 до 13,58 МэВ. Этими особенностями и конфигурацией экспериментальной камеры определялись выбор энергии пучка ионов ${}^3\text{He}^+$ и геометрия эксперимента.

Пучок ионов ${}^3\text{He}^+$ получали с помощью электростатического ускорителя ЭСУ-2 [5]. Схема эксперимента приведена на рис. 2. Энергия ионов ${}^3\text{He}^+$ была выбрана в области резонанса и составила 700 кэВ. Облучали мишень, установленную на рабочем столике в вакуумной камере, имеющей давление 10^{-4} Па. Мишень представляла собой таблетки титана, толщиной 0,3 мм, приготовленные из полученного электронно-лучевым переплавом

материала чистотой 99,9 ат.%. Таблетки насыщали по всей толщине дейтерием из газовой фазы при высоком давлении (до 8 атм) и температуре до 700 К. Стехиометрия определялась по привесу образца после насыщения. Привес измерялся с высокой точностью ($\pm 1 \cdot 10^{-5}$ г) и для образца Ti массой 48 г составил около 3,4 г. Структура и состав образца по дейтерию исследовались также методом рентгеноструктурного анализа [6]. Для обоих методов был определен совпадающий средний состав TiD_x ($x = 1,7$).

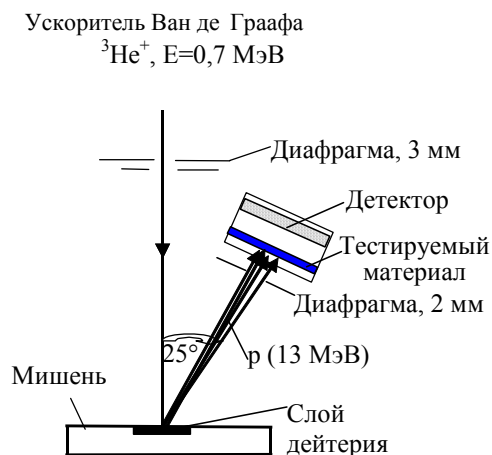


Рис. 2. Схема эксперимента

Рожденные в ядерной реакции протоны с энергией 13 МэВ формируются с помощью диафрагм и направляются на тестируемый материал. Диаметр диафрагмирующих отверстий выбран таким образом, чтобы поток протонов составлял $\sim 10^3$ част./с в телесном угле $5,0 \cdot 10^{-3}$ ср. Снижение потока протонов обусловлено необходимостью уменьшения загрузки спектрометрического тракта с целью устранения возможных аппаратных искажений энергетических спектров протонов.

Тестируемый материал устанавливался в специальном держателе, который расположен под углом 25° по отношению к падающему пучку ${}^3\text{He}^+$. За тестируемым материалом находится детектор на основе CdZnTe, с помощью которого измеряется энергия протонов, прошедших через тестируемый материал.

Полупроводниковые детекторы на основе широкозонного соединения CdZnTe в последнее время находят все более широкое применение при регистрации различных излучений. Они отличаются высокой эффективностью регистрации излучения, относительно хорошим соотношением сигнал/шум и энергетическим разрешением при комнатной температуре. Спектрометрические характеристики CdTe (CdZnTe) детекторов при регистрации гамма-излучений в диапазоне 15...500 кэВ и альфа-излучений в диапазоне 4...8 МэВ приведены в [7].

Для эффективного сбора и регистрации прошедших сквозь образец протонов необходимо, чтобы толщина детектора была больше максимального пробега протонов 13 МэВ в CdZnTe, а его площадь должна превышать сечение падающего на образец пучка протонов для

устранения краевых эффектов. Исходя из этого для данного исследования были изготовлены CdZnTe-детекторы с объемом рабочей части кристалла $5 \times 5 \times 3 \text{ мм}^3$, при этом сечение пучка падающих протонов составляло $2 \times 2 \text{ мм}^2$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

На рис. 3 приведен спектр продуктов ядерной реакции $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$, полученный с помощью детектора без поглотителя, при бомбардировке мишени $\text{TiD}_{1.7}$ ионами $^3\text{He}^+$ с энергией 0,7 МэВ.

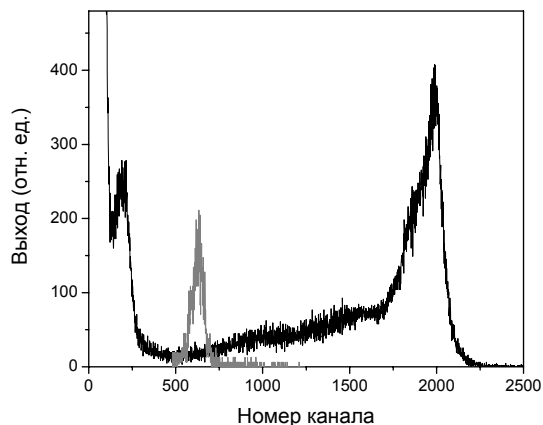


Рис. 3. Спектры 13 МэВ протонов и альфа-частиц, полученных от реакции на дейтерии (черный) и от альфа-источника (серый). Детектор без поглотителя

Пик в 2000 канале относится к протонам с энергией 13 МэВ, а пик в 200 канале – к альфа-частицам с энергией 2,2 МэВ. С целью градуировки шкалы каналов анализатора был снят спектр альфа-частиц с энергией 5150 кэВ от образцового источника ^{239}Pu (см. рис. 3). По градуировочной кривой определена цена канала, составившая 6,3 кэВ/канал. Таким образом, используя градуировку, определяли энергетический спектр протонов, прошедших через защитный материал, установленный перед детектором.

Для тестирования методики в качестве защитных материалов выбраны чистый алюминий и слоистые образцы из алюминия и вольфрама.

Рис. 4 иллюстрирует, как при увеличении толщины алюминия падает энергия протонов, пришедших в детектор.

Измеряя интегральный выход пика протонов на энергетическом спектре (см. рис. 4), определяли энергию протонов. Разность между энергией, измеренной в детекторе без поглотителя и закрытом испытываемым материалом, давала значение потерь энергии протонами при прохождении через защитный материал. Разделив полученное значение на массу зоны материала, облучаемой 13 МэВ протонами, можно определить величину поглощенной дозы излучения, а именно, величину энергии ионизирующего излучения, переданную веществу.

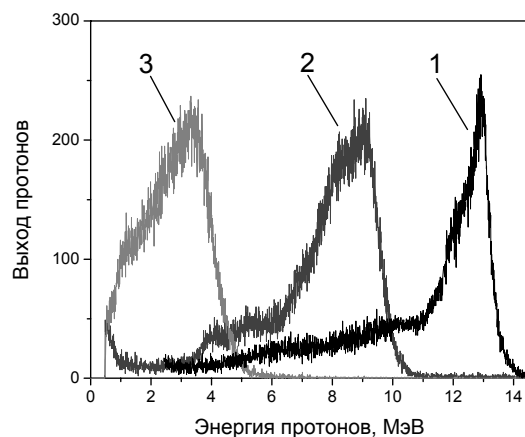


Рис. 4. Спектры от 13 МэВ протонов в детекторе без поглотителя (1) и с установленным перед ним алюминиевым диском толщиной 0,5 мм (2) или 0,85 мм (3)

Зависимость поглощенной энергии от толщины образцов из алюминия показана на рис. 5. Видно, что поглощенная энергия линейно возрастает с толщиной и выходит на насыщение, когда пробег протонов становится равным толщине образца. Использование для испытаний протонов с энергией ~ 13 МэВ ограничивает толщину образцов до ~ 3 мм при плотности материала ~ 1 г/см^3 и ~ 0,3 мм для вольфрама.

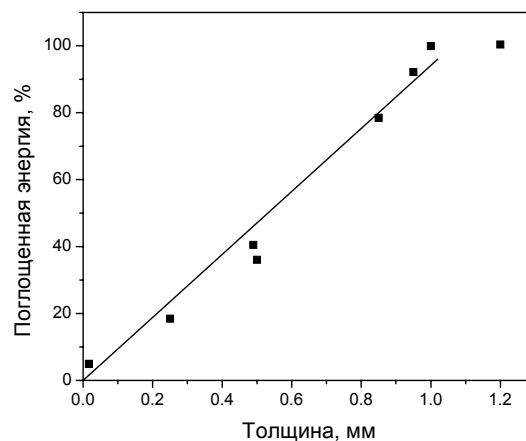


Рис. 5. Зависимость поглощенной энергии от толщины алюминиевых образцов

В таблице приведены данные по поглощенной энергии в слоистых образцах из алюминия и вольфрама. Исследовано шесть наборов с разным чередованием слоев алюминия и вольфрама. Для каждого набора измеряли поглощенную энергию при расположении в наружном слое покрытия, в одном случае – вольфрама, в другом – алюминия.

Сравнение результатов, приведенных в таблице, показало, что для одинаковых толщин образцов, но с разным чередованием слоев алюминия и вольфрама, поглощенная доза изменяется в пределах $\pm 10 \%$, что не превышает ошибку эксперимента.

Результаты измерения поглощенной дозы защитными покрытиями из W+Al

Состав образца*	Толщина, мкм	Энергия, выделенная в поглотителе, $\times 10^{-8}$ Дж
1. 9 W + 18 Al	360	19,52
2. 18 Al + 9 W	360	18,86
3. (W + 2Al)×9слоев	360	17,69
4. (2 Al + W)×9слоев	360	17,33
5. (2W+5Al)×3+(3Al+3W)	360	19,35
6. (3W+3Al)+(2W+5Al)×3	360	18,86
7. 10 Al + 5 W	200	9,66
8. 5 W + 10 Al	200	9,48
9. (2 Al + 1 W)×5	200	9,16
10. (1 W + 2 Al) ×5	200	8,82
11. 5 Al + 2 W+5 Al + 3 W	200	8,53
12. 3 W + 5 Al + 2 W+5 Al	200	9,21

*Каждый слой алюминия имел толщину 10 мкм, а слой вольфрама – 20 мкм; плотность – 11 г/см³.

В то же время при исследовании слоистых композитов обнаружена тенденция изменения поглощающей способности для одного и того же композита при выставлении образца по отношению к пучку протонов в одном случае слоем вольфрама, в другом – алюминия (рис. 6).

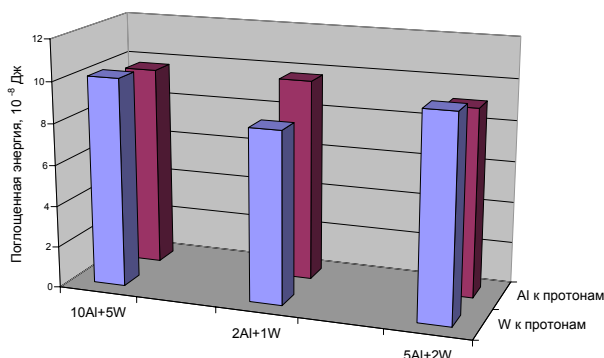


Рис. 6. Зависимость поглощенной энергии защитных покрытиях из W+Al толщиной 200 мкм

Из рис. 6 видно, что поглощающая способность зависит от того, какой из материалов (с большим или малым Z) первым встречает пучок протонов на своем пути. В двух случаях из трех более тяжелый металл в первом слое увеличивает поглощающую способность. Определение механизмов процессов, приводящих к наблюдаемым зависимостям, требует дополнительных исследований.

В космических аппаратах поглощенные дозы космической корпускулярной радиации, при которых заметно изменяются характеристики материалов и элементов аппаратуры, составляют $\sim 10^3$ Гр и выше. В настоящих экспериментах измерялась не столько поглощенная доза, определяющая радиационную стойкость материала, сколько проводилось сравнение разных материалов по их способности ослаблять ионизирующее излучение. Для определения предельной

поглощенной дозы, приводящей к необратимым изменениям, необходимо увеличить время экспозиции под пучком протонов до 7 сут.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием протонов с энергией 13 МэВ из ядерной реакции ($^3\text{He}, d$) разработана методика имитационных испытаний материалов, применяемых в космической отрасли для экранировки ионизирующих излучений.

Показана возможность использования полупроводниковых детекторов на основе CdZnTe для спектрометрии высокоэнергетических протонов, прошедших через тестируемый материал.

Установлено, что поглощающая способность слоистых материалов зависит от последовательности слоев, а также от того, с каким материалом (с большим или малым Z) происходит первое взаимодействие протонов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.И. Акишин. *Космическое материаловедение*. М.: НИИЯФ МГУ, 2007, 209 с.
2. R.A. Langley, S.T. Picraux, F.L. Vook. Depth distribution profiling of deuterium and ^3He // *J. Nucl. Mater.* 1974, v. 53, p. 257-261.
3. S.T. Picraux. Defect trapping of gas atoms in metals // *Nucl. Instr. Meth.* 1981, v. 182/183, p. 413-437.
4. S.M. Myers, P.M. Richards, W.R. Wampler, F. Besenbacher. Ion-beam studies of hydrogen-metal interaction // *J. Nucl. Mater.* 1989, v. 165, p. 9-64.
5. Л.И. Пивовар, К.М. Хургин, Г.Д. Толстолуцкая. Модернизированный компактный электростатический ускоритель на 2 МэВ // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Техника физического эксперимента»*. 1985, в. 1(22), с.12-17.
6. А.И. Жуков, Г.Д. Толстолуцкая, В.Ф. Рыбалко и др. Определение профиля залегания дейтерия в материалах по выходу продуктов ядерных реакций //

Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». 1992, в. 1(58), 2(59), с. 133-135.
7. В.В. Левенец, А.П. Омельник, А.А. Щур и др.

Спектрометрия гамма- и альфа-излучений полупроводниковыми детекторами на основе CdTe (CdZnTe) // Ядерна фізика та енергетика. 2007, №4(22), с. 109-113.

Статья поступила в редакцию 04.09.2013

МЕТОДИКА ІМІТАЦІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ МАТЕРІАЛІВ З ДОПОМОГОЮ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОТОНІВ З ЯДЕРНОЇ РЕАКЦІЇ (${}^3\text{He}$, d)

І.Є. Копанець, Г.Д. Толстолуцька, А.В. Рибка, В.Є. Кутній, В.А. Білоус

Розроблено методику імітаційних випробувань матеріалів, застосовуваних у космічній галузі для екранування іонізуючих випромінювань, з використанням високоенергетичних протонів (енергія 12...13 МеВ) з ядерної реакції (${}^3\text{He}$, d) і застосуванням напівпровідникових детекторів на основі кристалів CdZnTe для реєстрації заряджених частинок з енергією до декількох десятків мегаелектронвольт.

METHOD SIMULATION TEST MATERIALS BY HIGH-ENERGY PROTONS FROM NUCLEAR REACTIONS (${}^3\text{He}$, d)

I.E. Kopanets, G.D. Tolstolutskaia, A.V. Rybka, V.E. Kutny, V.A. Belous

The technique of simulation testing of materials used in the space industry for the screening of ionizing radiation, using high-energy protons (12...13 MeV energy) from the nuclear reaction (${}^3\text{He}$, d) and the use of semiconductor detectors based on crystals of CdZnTe for the detection of charged particles energy of up to several tens of MeV was developed.