

Таким образом, совершенствование технологии сжигания водоугольного топлива является актуальной проблемой при его использовании в котлах малой и средней мощности.

РАДИАЦИОННАЯ ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Жанчилов Б.Д., Истомин К.А.

Томский политехнический университет, г. Томск

*Научный руководитель: Зыков В.М., д.т.н., профессор
кафедры физических методов и приборов контроля качества*

Специфика механизмов радиационного воздействия

Физические механизмы радиационных воздействий на материалы и элементы оборудования КА зависят от вида и энергии воздействующего излучения, типа облучаемого материала, условий облучения – интенсивности воздействующего излучения (мощности дозы), температуры материала и ряда других факторов. Поскольку ионизирующее излучение космического пространства является многокомпонентным по составу и энергии, причем его составляющие могут воздействовать на КА в различных сочетаниях и в разной временной последовательности, то возникающие в материалах КА радиационные эффекты имеют весьма сложный характер.

Радиационными эффектами принято называть любые изменения структуры, свойств, состояния вещества или материала, вызываемые действием излучения. Трудность анализа радиационных эффектов усугубляется также сложностью состава и структуры многих материалов, используемых в конструкции КА: композитов, полимеров, многослойных тонкопленочных структур и т.д.

Обратимые и необратимые изменения свойств материалов происходят за счет всех процессов преобразования энергии ионизирующего излучения в веществе.

Электронно-дырочные пары, генерируемые в твердом теле тормозящимися заряженными частицами в результате ионизационных потерь энергии, вызывают радиационную проводимость, радиолюминесценцию, радиационное окрашивание и радиационно-химические превращения.

Радиационная проводимость и радиолюминесценция определяются в основном мощностью дозы излучения и относительно быстро исчезают после прекращения облучения. Время релаксации

составляет $\sim 10^{-9} - 10^{-1}$ с в зависимости от типа материала. Эти явления характеризуют типичную картину обратимых радиационных процессов.

Радиационное окрашивание диэлектриков и радиационно-химические превращения в основном зависят от суммарной поглощенной дозы излучения. Время релаксации таких явлений достигает $1 \cdot 10^{-7}$ с и более. Носители заряда, образующиеся в облучаемом веществе, создают стационарные и нестационарные токи и приводят к накоплению объемного заряда в диэлектриках, который может сохраняться в течение длительного времени. Последний процесс, как мы увидим далее, может быть причиной возникновения электрических разрядов в диэлектрических материалах КА.

Эффекты смещения, приводящие к образованию простых коротко живущих и сложных долгоживущих радиационных дефектов кристаллической решетки твердого тела, оказывают, как уже отмечалось выше, значительное влияние на электрофизические, оптические и механические свойства материалов. Процессы возникновения и накопления радиационных дефектов весьма критичны для полупроводниковых материалов и приборов, используемых в составе оборудования КА. Их влияние проявляется за счет изменения времени жизни неосновных носителей заряда в полупроводниках, концентрации и подвижности носителей.

Образование радиационных дефектов под действием ионизирующего излучения космического пространства имеет ряд особенностей. Дефекты, создаваемые различными компонентами излучения, сложным образом взаимодействуют между собой и с исходными дефектами облучаемой структуры, в результате чего могут возникать *синергетические эффекты*, заключающиеся в том, что при одновременном или последовательном воздействии на материалы КА нескольких факторов конечный эффект не равен сумме эффектов от воздействия отдельных факторов. При этом комплексное воздействие факторов космического пространства может, как усиливать, так и ослаблять повреждение материалов. Применительно к воздействию космической среды на материалы КА синергетические эффекты исследованы совершенно недостаточно, их изучению уделяется большое внимание.

Важно отметить, что воздействие космического ионизирующего излучения на материалы КА происходит на фоне воздействия других факторов: солнечного электромагнитного излучения, горячей и холодной космической плазмы и т.д., в условиях невесомости и знакопеременной температуры, диапазон изменения которой для

материалов, находящихся на поверхности КА, составляет от -150 до $+100^{\circ}\text{C}$. Это еще более усложняет характер процессов, протекающих в материалах и элементах оборудования КА.

Для описания радиационной стойкости материалов и элементов оборудования используется ряд строго определенных терминов:

♦ *радиационная стойкость* материалов – их способность выполнять определенные функции и сохранять заданные характеристики и параметры в пределах, установленных техническими требованиями, во время и после воздействия ионизирующих излучений;

♦ *предел радиационной стойкости* – доза или флюенс ионизирующего излучения, при которых изменения основных наиболее важных технических характеристик материалов не превышает допустимых значений;

♦ *радиационный отказ* – нарушение работоспособности материала, элемента, изделия за счет воздействия ионизирующих излучений.

Усредненные данные о радиационной стойкости некоторых материалов и элементов оборудования, используемых при создании КА, приведены в табл. 1.1.

Табл. 1. Радиационная стойкость материалов и элементов оборудования КА.

Материал, изделие	Доза, Гр	Изменение характеристик, характер воздействия
Полупроводниковые приборы	$10^3 - 10^4$	увеличение обратных токов, снижение усиления
Микропроцессоры БИС	$10^2 - 10^3$	обратимые и необратимые перемежающиеся отказы, радиационные сбои
Солнечные элементы	$10^3 - 10^4$	снижение КПД
Оптические стекла	$10^3 - 10^4$	ухудшение прозрачности за счет радиационного окрашивания
Волоконная оптика	$10^2 - 10^3$	снижение амплитуды передаваемого сигнала за счет радиационного окрашивания
Интегральная оптика	$10^2 - 10^3$	снижение КПД, радиационная окраска световодов
Полимерные материалы	$10^4 - 10^6$	деградация оптических, механических и электроизоляционных характеристик

Из рассмотрения таблицы 1.1 видно, что в наибольшей степени подвержены воздействию космической радиации полупроводниковые и оптические материалы, в меньшей степени – полимерные материалы и терморегулирующие покрытия, а наиболее высокую стойкость к воздействию радиации имеют металлы.

Использование таких усредненных данных позволяет классифицировать материалы по уровню радиационной стойкости и производить предварительный выбор элементов оборудования КА для различных условий эксплуатации. Окончательный выбор материалов осуществляется на основании результатов комплексных лабораторных и натурных испытаний и сведений о поведении материалов в космической среде, получаемых методами математического моделирования.

Радиационная электризация диэлектриков

Одним важным эффектом, обусловленным воздействием ионизирующих излучений космического пространства, является радиационная электризация диэлектрических материалов, под которой понимают накопление электрического заряда на их поверхности или в объеме. Соответственно различают поверхностную и объемную (внутреннюю) электризацию. В условиях космического пространства поверхностная электризация диэлектриков внешней оболочки КА вызывается воздействием горячей магнитосферной плазмы, электроны которой с характерными энергиями до 50–100 кэВ проникают в материал на глубину ~20–30 мкм, а объемная электризация – воздействием электронов РПЗ (1) с энергиями ~2–10 МэВ, способных проникнуть в толщу диэлектрика на 0,5 – 2 см.

Причиной разделения радиационной электризации диэлектриков на поверхностную и объемную является не только отличие глубин локализации внедренного электрического заряда, но также и существенное отличие в указанных двух случаях физических процессов накопления заряда, потоков первичных заряженных частиц, приводящих к его накоплению, и временных характеристик процессов.

При заряджении в горячей магнитосферной плазме характерные величины первичных токов составляют $\sim 10^{-10} - 10^{-8} \text{ А} \cdot \text{см}^{-2}$, а продолжительность заряджения изменяется от долей секунды до десятков минут. Большие времена относятся к реальным КА, на которых в процессе заряджения происходит перераспределение зарядов. Поверхностная электризация диэлектриков внешней оболочки КА в значительной степени определяется вторично-эмиссионными процессами включая фотоэлектронную эмиссию.

Объемное заряджение диэлектрических материалов КА под действием электронов РПЗ характеризуется следующими параметрами: ток электронов, $\sim 10^{-13} - 10^{-11}$ А·см⁻², характерные времена заряджения измеряются часами. Вторично-эмиссионные токи в этом случае не оказывают влияния на процесс формирования внедренного объемного заряда. Существуют два подхода к описанию и анализу явления поверхностной радиационной электризации диэлектриков. При рассмотрении поверхностной электризации реальных КА, когда главной целью является получение картины распределения потенциала и напряженности электрического поля на поверхности аппарата и в прилегающем пространстве, вычисляется суммарный заряд на элементе поверхности без описания его распределения в приповерхностном слое диэлектрика. В этом случае уравнение для полного тока J , текущего через элемент поверхности, записывается в виде

$$J = J_e - J_i - (\delta J_e - \eta J_e + \gamma J_i + J_{ph}) \pm J_{cond},$$

где J_e и J_i – электронный и ионный токи плазмы; δ , η , γ – коэффициенты истинной вторичной электронной эмиссии, отражения электронов, ионно-электронной эмиссии; J_{ph} – ток фотоэлектронной эмиссии; J_{cond} – токи утечки на металлический корпус КА и соседние элементы поверхности за счет объемной и поверхностной проводимости диэлектрика.

Величины первичных и вторичных токов, входящих в уравнение, зависят от потенциала КА относительно окружающей космической плазмы, причем для вторичных токов эта зависимость проявляется и через изменение значений вторично-эмиссионных коэффициентов, обусловленное изменением энергии первичных электронов и ионов. Равновесное значение потенциала КА определяется из решения уравнения при условии $J = 0$. Для реальных КА сложной конфигурации с неоднородной поверхностью потенциалы отдельных ее участков могут значительно отличаться из-за различия электрофизических свойств находящихся на них диэлектрических материалов, различия условий попадания первичных частиц окружающей плазмы на эти участки, неодинакового освещения их Солнцем и т.д. При этом потенциал металлического корпуса КА не остается постоянным в процессе заряджения.

Во втором подходе, используемом в ряде случаев для анализа и интерпретации результатов лабораторных экспериментов по облучению диэлектриков электронами с энергией $\sim 10 - 100$ кэВ, предполагается возникновение в приповерхностной области двойного электрического слоя за счет ухода вторичных электронов из непосредственно

примыкающего к поверхности слоя толщиной $\sim 10\text{--}50$ нм и локализации первичных электронов на глубине в несколько десятков микрометров.

Объемная электризация диэлектриков при их облучении электронами с энергиями $\sim 1\text{--}10$ МэВ, определяется следующими основными процессами:

- ♦ торможением первичных электронов в диэлектрике за счет ионизационных и радиационных потерь энергии;

- ♦ термализацией электронов в веществе с захватом их на ловушки разных типов;

- ♦ стоком электронного заряда из объема диэлектрика к облучаемой поверхности и подложке за счет токов, обусловленных собственной и радиационной проводимостью диэлектрика.

По мере накопления внедренного заряда в объеме диэлектрика возникает внутреннее электрическое поле, оказывающее воздействие на движение носителей заряда в диэлектрике. Токи и электрические поля в заряжаемом диэлектрике могут быть описаны общей системой уравнений, основанных на уравнении непрерывности, законе Ома в дифференциальной форме и уравнении Пуассона для данного вещества:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \mathbf{j}, \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{j}_i, \quad \Delta \varphi = \frac{\rho}{\varepsilon \varepsilon_0},$$

где ρ – плотность объемного заряда; \mathbf{j} – вектор плотности тока; \mathbf{j}_i – вектор плотности тока инжектируемых носителей; $\sigma \mathbf{E}$ – составляющая тока в электрическом поле с напряженностью \mathbf{E} , определяемая проводимостью диэлектрика σ ; φ – потенциал, создаваемый внедренным зарядом.

В свою очередь, проводимость диэлектрика σ с учетом ее радиационной составляющей описывается выражением, приведенным в предыдущем разделе.

Характерные модельные распределения по глубине диэлектрика z напряженности электрического поля E и потенциала φ , рассчитанные для электронов с энергией 1 МэВ без учета собственной и радиационной проводимости диэлектрика, показаны на рис. 2.

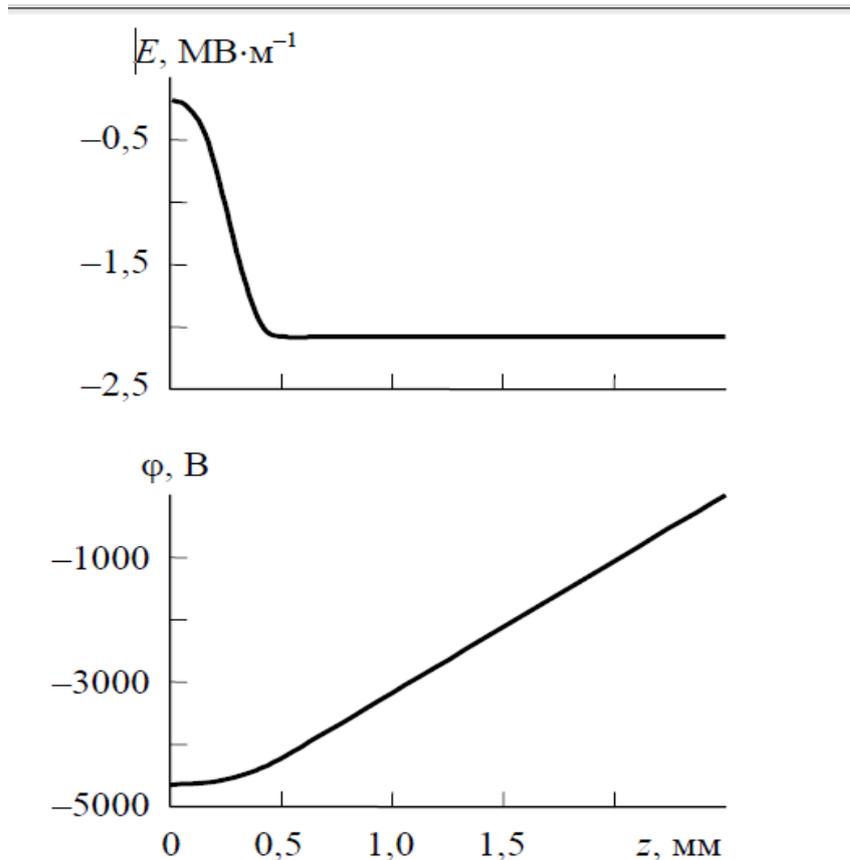


Рис. 2. Распределение по глубине диэлектрика z напряженности электрического поля E и потенциала ϕ

Экспериментальными и расчетными методами исследовалась также динамика накопления объемного заряда в облучаемых диэлектриках.

На рис. 3 приведена зависимость потенциала поверхности образца эпоксидного материала толщиной 725 мкм от времени при его облучении электронами со спектром, характерным для РПЗ в области ГСО. Данные лабораторных измерений (кривая 1) показаны вместе с результатами расчетов, выполненных при различных значениях темновой проводимости и коэффициента радиационной электропроводности. Видно, что без учета радиационной проводимости (кривая 2, $Am = 0$) при стандартной величине $\sigma_0 = 5 \cdot 10^{-17} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ рассчитанный потенциал примерно в 2,5 раза превосходит экспериментальное значение. Наилучшее согласие с экспериментом наблюдается при $Am = 1 \cdot 10^{-14}$ (кривая 3), а при $Am = 6.5 \cdot 10^{-14}$ (кривая 5) рассчитанный потенциал значительно меньше полученного экспериментально. Кривая 4 показывает результаты расчета при $\sigma_0 = 5 \cdot 10^{-15} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$ и $Am = 0$, которые также близки к экспериментальным данным.

Таким образом, возникновение радиационной проводимости в рассматриваемом случае эквивалентно увеличению собственной проводимости примерно на 2 порядка.

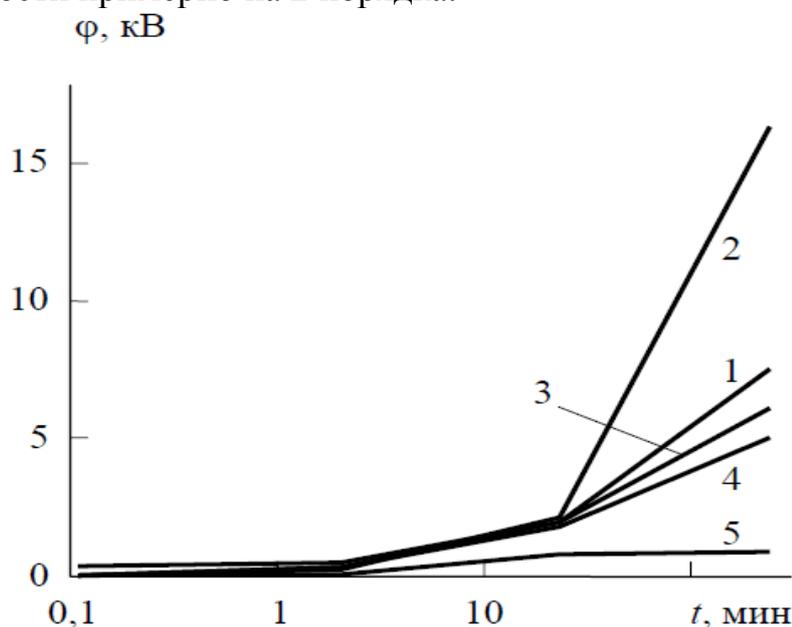


Рис. 3. Зависимость от времени облучения потенциала поверхности эпоксидного образца: 1 – экспериментальные данные; 2–5 – результаты расчетов

Приведенные данные свидетельствуют об отмечавшемся выше существенном влиянии радиационной проводимости на процессы накопления объемного заряда в диэлектриках.

Следствием поверхностной и объемной электризации диэлектрических материалов под действием космического излучения является возникновение электрических разрядов на КА, которые вызывают сбои в работе бортовых систем за счет создаваемых электромагнитных помех, а также могут приводить к необратимым повреждениям элементов оборудования. Возникновение

электрических разрядов в диэлектриках КА может инициироваться воздействием других факторов космического пространства, в частности высокоскоростными ударами твердых микрочастиц естественного и искусственного происхождения.

Список информационных источников

1. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов. Лев Симонович Новиков. Университетская книга, 2010.
2. Гуцин В. Н. Основные устройства космических аппаратов.
3. Большая советская энциклопедия.