

ИК-МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗАРЯДА В ОБЛУЧАЕМОМ ДИЭЛЕКТРИКЕ

Н.И. Базалеев, Б.Б. Бандурян, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко

Институт электрофизики и радиационных технологий НАНУ, г. Харьков, Украина

Рассмотрен метод дистанционной диагностики электрического заряда, накапливающегося в диэлектрических материалах под действием ионизирующего излучения. В основу метода положены эффекты изменения величины пробега заряженной частицы в заряженном материале, а также конверсии энергии излучения, проходящего через вещество, в тепловую энергию. О величине накопившегося заряда предлагается делать вывод по разнице между прогнозируемой температурой на поверхности облучаемого объекта и измеренной с помощью детектора ИК-излучения.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что диэлектрические материалы, находящиеся в поле ионизирующего излучения, способны накапливать электрический заряд [1]. В качестве источника заряда выступают как частицы первичного излучения, так и вторичные электроны. Необходимость диагностики заряда в радиационно-технологическом процессе обусловлена возможным электрическим пробоем диэлектрика. Помимо этого поле заряда вносит дополнительный вклад в рассеивание первичных частиц излучения и таким образом влияет на распределение поглощенной дозы.

Существенным может оказаться влияние заряда на протекание радиационно-стимулированных превращений, за формирование которых ответственны вторичные электроны. Для последнего обстоятельства характерно то, что электрический заряд распределен неравномерно по объему облучаемого объекта (ОО). Причем зона формирования заряда может простирается за пределы области проникновения первичного излучения, так как, например, накопление отрицательного заряда в зоне наиболее интенсивного действия пучка приводит к возникновению компенсирующего положительного заряда.

Разработка методов и технических средств диагностики радиационного заряда является емким направлением исследований [2,3], носящих как фундаментальный, так и прикладной характер. Существующее разнообразие средств контроля и диагностики позволяет достаточно успешно определять величину заряда в образцах вне поля излучения. Вместе с тем остается задача дистанционного контроля и оценки величины заряда непосредственно в условиях облучения, что принципиально важно для реализации целевой технологической функции и выполнения норм техники безопасности в радиационных технологиях.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В основу разработки метода дистанционного контроля положено свойство полимерных материалов повышать температуру под действием ионизирующего излучения. Накопление электрического за-

ряда приводит к смещению зоны радиационного воздействия в сторону облучаемой поверхности (вследствие торможения в поле заряда). Зная величину среднего пробега электронов в конкретном типе диэлектрика, величину его теплоемкости, можно спрогнозировать температуру на поверхности ОО в определенный момент времени. Накопление заряда приводит к отличию температурного поля от прогнозируемого. На основании различия прогнозируемой и измеряемой температуры можно сделать вывод о величине накопленного электрического заряда. В этой связи возникает задача построения модели, описывающей температуру поверхности облучаемого объекта в зависимости от величины мощности поглощенной дозы, значения линейной плотности термализации электронов, теплофизических и электрофизических характеристик облучаемого диэлектрика; на основе построенной модели разработать методику дистанционной ИК-радиометрии температурного поля поверхности облучаемого объекта.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Особенностью радиационных технологий является нелинейный характер распределения энергии в облучаемом объекте вдоль направления нормали к его поверхности. Максимум поглощенной дозы находится в приповерхностной области, причем его расположение зависит от энергии первичного излучения и плотности облучаемого вещества. Соответственно функция распределения электрического заряда η [2] будет коррелировать с пространственным распределением поглощенной дозы. При условии полного поглощения первичных частиц в ОО и известном значении максимального пробега R_m функция η определяется выражением, нормированным на единицу $\int_0^{R_m} \eta(x) dx = 1$. Или в дифференциальной форме $\eta(x) = -\frac{dJ}{dx}$, где $J(x)$ обозначает число частиц, прошедших через координату x .

Для реализации предлагаемого нами метода важно знать координату максимума энерговыделения с тем, чтобы величину накапливаемого заряда определять по изменению температурного поля поверхности ОО.

Выражение для энергии, поглощаемой ОО, удобно записать в виде

$$W(x, t) = j_b(x, t) T \xi(x, t) t / e,$$

где $j_b = j_n(t)(1 - K)J(x)$; $j_n(t)$ – плотность тока инжектируемых частиц; K – коэффициент отражения частиц; T – энергия частиц (МэВ); e – заряд электрона; t – время облучения; $\xi(x, t)$ – функция пространственного изменения мощности

поглощенной дозы в веществе $\int_0^{R_m} \xi(x) dx = 1$.

Удельные потери частиц, поглощаемых ОО будут определяться выражением $\frac{dT}{dx} = -B(T) - eE(x)$,

где B – тормозная способность вещества, E – напряженность электрического поля, создаваемого зарядом. Известно, что функции $\eta(x), \xi(x), J(x)$ имеют фиксированные значения максимума при различных x . По мере накопления заряда положение максимума для функций $\eta(x)$ и $\xi(x)$ будет смещаться в сторону облучаемой поверхности, что повлечет более интенсивный ее нагрев.

Повышение температуры полимерных материалов в поле ионизирующего излучения определяется по формуле [4]

$$\Delta T = (1 + 2\beta D / c_0)^{1/2} - 1 / \beta, \quad (1)$$

где β – температурный коэффициент удельной теплоемкости; c_0 – удельная теплоемкость при начальной температуре объекта; D – поглощенная доза. Таким образом, для облучаемого объекта, имеющего заданную геометрическую форму и изготовленного из конкретного полимерного материала можно построить пространственно-временное поле распределения температуры на поверхности. Так, например, в технологиях радиационной модификации полимерных материалов значения поглощенных доз составляют порядка 50...100 кГр. В зависимости от типа облучаемого полимера его температура при данном значении поглощенной дозы может повышаться от 10 до 50 градусов Цельсия. Поскольку, как отмечалось выше, поглощенная доза распределена в направлении проникновения излучения неравномерно, выражение (1) следует переписать в виде

$$\Delta T(x, t) = \left(1 + 2\beta \int_0^{R_m} \frac{W(x, t)}{\rho \cdot x} dx / c_0 \right)^{1/2} - 1 / \beta,$$

где ρ – поверхностная плотность облучаемого объекта.

О величине накапливаемого в процессе облучения электрического заряда можно делать вывод, исходя из различия измеряемой температуры на поверхности облучаемого объекта и прогнозируемой с помощью математической модели или устанавливаемой экспериментально для данного материала, содержащего ингибитор накапливаемого заряда [5].

Определение возможности регистрации теплового поля на поверхности облучаемого объекта было осуществлено с помощью тепловизионного прибора «Крионик-4М» [6] и прилагаемого к нему программного обеспечения. На рис. 1 показано изображение в ИК-диапазоне (6...14 мкм) теплового излучения стеклянной пластины, облучаемой пучком электронов с энергией 4 МэВ.

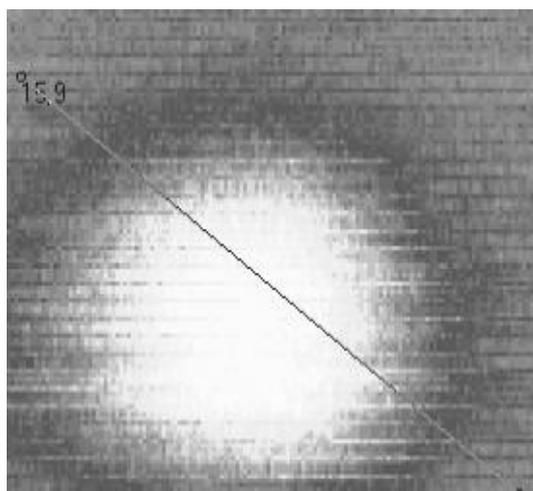


Рис. 1. Изображение теплового следа электронного пучка на стеклянной пластинке

Распределение температуры на поверхности облученной пластины вдоль линии, показанной на рис. 1, приведено на рис. 2.

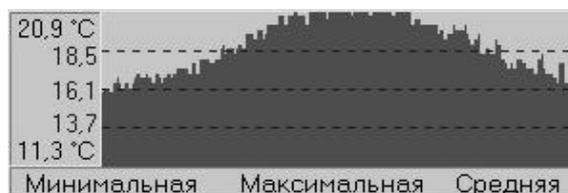


Рис. 2. Распределение температуры на поверхности облученной пластины вдоль продольного сечения следа электронного пучка

Более высокие значения температуры на оси пучка подтверждают известный факт неравномерности плотности потока энергии в поперечном сечении пучка и ее более высокие значения у оси. Колебания температуры, проявляющиеся в виде всплесков, обусловлены шумами системы механического сканирования конкретного прибора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод дистанционной ИК-радиометрии позволяет определять распределение температурного поля и величину приращения температуры на поверхности облучаемого объекта. Накапливаемый в облучаемом объекте электрический заряд приводит к изменению функции распределения поглощенной дозы и, следовательно, к изменению распределения температуры на поверхности объекта. Регистрация отклонения температурного поля от прогнозируемой величины с помощью дистанционной ИК-радиометрии позволяет определить величину накопившегося электрического заряда.

Работа выполнена в рамках Государственной программы фундаментальных и прикладных исследований по проблемам использования ядерных материалов и ядерных и радиационных технологий в сфере развития отраслей экономики. Договор №Х-873.

ЛИТЕРАТУРА

- 1.В.В. Громов. *Электрический заряд в облученных материалах*. М.: «Энергоиздат», 1982, 112 с.
- 2.С.Г. Боев, В.Я. Ушаков. *Радиационное накопление заряда в твердых диэлектриках и методы его диагностики*. М.: «Энергоатомиздат», 1991, 240 с.
- 3.Н.И. Базалеев, И.Г. Евсеев, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко и др. Диагностика многополосным детектором электрического заряда в облучаемом объекте // *Сборник научных трудов ХТУРЭ. 16-19 марта 1998 г.*, с. 30–32.
- 4.Е.И. Книжник, Б.А. Брискман, В.В. Токаревский. Радиационный разогрев полимеров. Оценка максимальной температуры // *Атомная энергия*. 1991, т. 70, в. 6, с. 376–380.
- 5.Э.Э. Финкель, Д.И. Дикерман. Кабели и провода для ядерных энергетических установок. М.: «Энергоатомиздат», 1983, 136 с.
- 6.А.А. Бут, Б.Б. Бандурян. Тепловизоры отечественного производства энергетикам Украины // *Новини енергетики*. 2000, №5-6, с. 34–35.

ІЧ-МЕТОД ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ЗАРЯДУ В ОПРОМІНЮВАНОМУ ДІЕЛЕКТРИКУ

М.І. Базалєєв, Б.Б. Бандурян, В.Ф. Клепиков, В.В. Литвиненко

Розглянуто метод дистанційної діагностики електричного заряду, який накопичується в опромінюваному діелектрику. В основу методу покладені ефекти зміни величини пробігу зарядженої частинки в зарядженому матеріалі, а також конверсії енергії випромінювання, що проходить через речовину, в теплову енергію. Величину накопиченого заряду пропонується визначати як різницю між прогнозованою температурою на поверхні опромінюваного об'єкту та вимірною за допомогою детектора ІЧ-випромінювання.

DIAGNOSTIC OF ELECTRIC CHARGE IN IRRADIATED INSULATORS BY THE IR-METHOD

M.I. Bazaleev, B.B. Banduryan, V.F. Klepikov, V.V. Lytvynenko

The method of remote diagnostic of electric charge were accumulated on irradiated insulators. The methods are based on two effects. The effect of altered value of charge particles penetration in to charged materials (depended from accumulated charge) and effect of ionizing irradiation conversion on heat energy. It is proposed to determine the value of radiation electric charge as a difference of temperatures were prognostic and measured by the IR-detector.