

Электретный эффект и подвижность носителей заряда в кабельных полимерных диэлектриках

НОВИКОВ Г.К.

Показано, что рентгеновское излучение электрического газового коронного разряда (ЭГКР) имеет глубину полупоглощения в кабельных полимерных диэлектриках (0,1–1 мкм) и создает градиент радиационной электропроводности. Результаты экспериментального измерения стабильности электретной разности потенциалов, спектров токов ТСД и глубины полупоглощения рентгеновского излучения ЭГКР могут быть использованы для определения подвижности носителей заряда в кабельных диэлектриках.

Ключевые слова: полимерные кабельные диэлектрики, газовый коронный разряд, рентгеновское излучение, радиационная электропроводность, термостимулированный разряд электретов

При рассмотрении различных моделей изотермической и термостимулированной релаксации электретного эффекта в полимерных кабельных диэлектриках бывает важно оценить вклад подвижности носителей заряда m в процесс деполяризации [1–11]. Для полимерных кабельных диэлектриков – полиэтилена (ПЭ), полипропилена (ПП), полиэтилентерефталата (ПЭТФ), поликарбоната (ПК), характерно очень малое значение подвижности носителей заряда, которое не определяется с помощью традиционных методов физики полупроводников [1, 2]. Нами показано, что значение подвижности носителей заряда в таких диэлектриках можно определить по результатам исследования электретного эффекта в тонких кабельных полимерных пленках, облученных излучением ЭГКР.

Плазма электрического газового разряда (ЭГР) является источником мягкого ионизирующего излучения (УФ и рентгеновского), которое используется в электротехнологиях модификации полиолефиновых кабельных диэлектриков для контроля дефектности полимерной кабельной изоляции и т.д. [3–7]. Из-за сильного фотоэлектрического поглощения любое вещество в газообразном, жидком или твердом состоянии имеет чрезвычайно низкую прозрачность в УФ и мягком рентгеновском диапазоне излучений. Излучение ЭГР полностью поглощается в тонком поверхностном слое диэлектрика.

Глубина полупоглощения мягкого рентгеновского излучения ЭГКР $d_{1/2}$ в полимерных кабельных диэлектриках в зависимости от напряжения короны составляет 0,1–1 мкм [8]. Рентгеновское излучение ЭГКР вызывает обратимое увеличение электропроводности полимерных диэлектриков [8], что удобно использовать для создания градиента

It is shown that the X-ray radiation from an electric gas corona discharge (EGCD) has the length of semiabsorption in polymeric cable dielectrics ranging from 0.1 to 1 μ m and creates a gradient of radiation electrical conductivity. The results obtained from experimental measurements of the stability of electret potential difference, spectra of thermally stimulated discharge currents, and semiabsorption depth of X-ray radiation from an EGCD can be used for determining the mobility of charge carriers in cable dielectrics.

Key words: polymeric cable dielectrics, gas corona discharge, X-ray radiation, radiation electrical conductivity, thermally stimulated discharge of electrets

радиационной электропроводности $g = f(h)$ по толщине в тонких полимерных кабельных электретах ($h = 1, 10$ мкм).

Для определения подвижности носителей заряда в ПЭ, ПП, ПЭТФ и ПК кабельных полимерных пленках нами использовались методы измерения изотермических зависимостей $U_3 = f(t)$ и спектров токов термостимулированной деполяризации (ТСД) тонкопленочных коронно- и электроэлектретов. Подвижность m определялась в условиях, когда деполяризация электретов происходила за счет дрейфа носителей заряда в слоях диэлектрика, имеющих разные значения электропроводности (градиент электропроводности по толщине $g = f(h)$).

Экспериментально было установлено, что процессы деполяризации (характеризуются зависимостью $U_3 = f(t)$ и спектром токов ТСД) электретов из полимерных пленок ПЭТФ, ПК, ПЭ, ПП толщиной $h = 10$ мкм и $h \approx 1$ мкм, заряженных не газоразрядными способами (такими как термоэлектретирование, электроэлектретирование или трибоэлектризация), когда отсутствует мягкое ионизирующее излучение ЭГР, совпадают независимо от толщины и способа поляризации. Однако толщина полимерной пленки h оказывает сильное влияние на зависимости $U_3 = f(t)$ и спектры токов ТСД электретов, поляризованных в ЭГР, когда процесс поляризации электретов сопровождается облучением мягким ионизирующим излучением. Для случая поляризации электретов ЭГКР было установлено (рис. 1), что график временной зависимости электретной разности потенциалов $U_3 = f(t)$ при нахождении электретов из сравнительно толстой ($h \approx 10$ мкм) пленки ПЭТФ при комнатной температуре состоит из двух прямолинейных участков и верши-

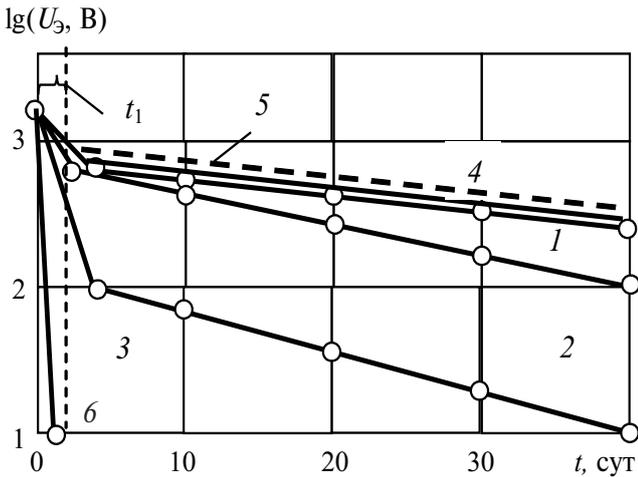


Рис. 1. Зависимости $\lg U_3 = f(t)$ пленки ПЭТФ толщиной $h=1$ мкм (1, 2, 3, 4, 6) и $h=10$ мкм (5), облученной в коронном разряде в течение разного времени: 1- $t_s=0,5$ ч; 2- $t_s=1$ ч; 3- $t_s=4$ ч; 4- через 30 сут после облучения ($t_s=8$ ч); 5- $t_s=4$ ч; 6- $t_s=8$ ч

на основного пика тока ТСД соответствует температуре 100 °С. (рис. 2). Отличие вида зависимости $U_3 = f(t)$ и формы спектров токов ТСД наблюдается для короноэлектретов и электроэлектретов из очень тонкой пленки ПЭТФ ($h \leq 1$ мкм) (рис. 1, 2).

На рис. 2 сопоставлены спектры токов ТСД электроэлектретов из пленок ПЭТФ толщиной 1 и 10 мкм, поляризованных с облучением и без облучения мягким ионизирующим излучением ЭГКР. Стрелки на спектрах ТСД указывают, по какой шкале отсчитываются значения тока деполаризации. Видно, что ионизирующее излучение ЭГКР вызывает радиационные изменения спектров токов ТСД только в наиболее тонкой (толщиной 1 мкм) полимерной пленке ПЭТФ и практически не оказывает влияния на спектр ТСД пленки толщиной 10 мкм. Это обусловлено очень небольшой проникающей способностью мягкого ионизирующего излучения ЭГКР в полимерный диэлектрик. На рис. 3 представлены результаты экспериментального измерения глубины полупоглощения рентгеновского излучения ЭГКР в полимерной пленке ПЭТФ с использованием тонкопленочных электретных дозиметров. Здесь P – интенсивность рентгеновского излучения ЭГКР.

Из рис. 3 видно, что глубина полупоглощения $d_{1/2}$ рентгеновского излучения ЭГКР увеличивается с ростом напряжения коронирования и находится в пределах от 0,1 до 1 мкм.

Рентгеновское излучение ЭГКР поглощается в тонком поверхностном слое полимерного диэлектрика и формирует резкую неоднородность электропроводности по его толщине. На рис. 4 представлена схема движения носителей заряда в электрете с неравномерным распределением электропроводности по толщине, соответствующая развитой в [9–11] теории дрейфа электретного заряда в

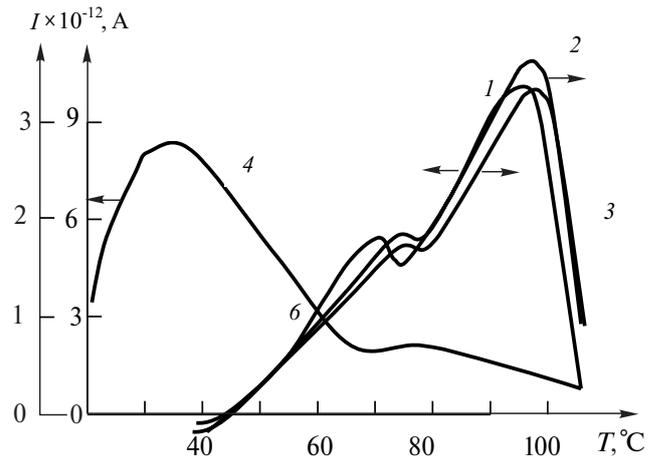


Рис. 2. Спектры токов ТСД электроэлектретов из необлученных (1, 2) и облученных ионизирующим излучением ЭГКР (3, 4) полимерных пленок ПЭТФ толщиной 1 мкм (1, 4) и 10 мкм (2, 3)

собственном электрическом поле с перезахватом на ловушки.

Величина m определялась из уравнений, описывающих процесс дрейфа зарядового облака в собственном поле электрета [9–11]:

$$n = mE = m \frac{U_3}{h}; \tag{1}$$

$$n = \frac{d_{1/2}}{t_1}; \tag{2}$$

$$\frac{dU_3}{dt} = - \frac{1}{2} \frac{e U_{30} \dot{\phi}^2}{\epsilon h \dot{\phi}}, \tag{3}$$

где t_1 – время до точки излома зависимости $\lg U_3 = f(t)$ (рис. 1).

В таблице представлены результаты измерения подвижности m полученные при облучении приповерхностного слоя полимерного диэлектрика рентгеновским излучением ЭГКР для создания неравномерного распределения проводимости по толщине.

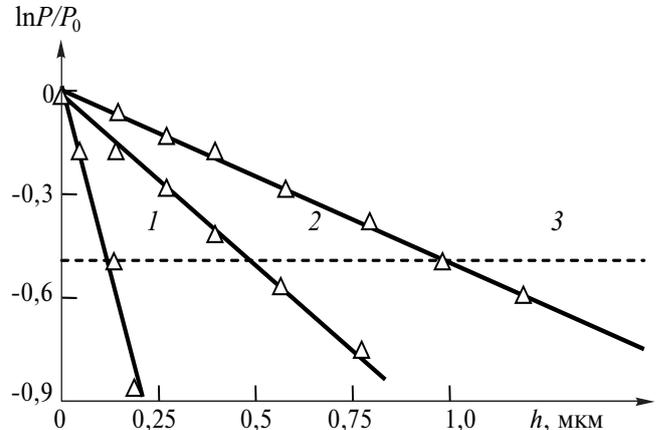


Рис. 3. Определение глубины полупоглощения рентгеновского излучения ЭГКР в пленке ПЭТФ при разных значениях напряжения ЭГКР: 1 – $U=10$ кВ; 2 – $U=12$ кВ; 3 – $U=15$ кВ

Полимерный диэлектрик	Знак заряда поверхности	Толщина диэлектрика h , мкм	U_3 , В	Подвижность μ , $\text{м}^2\text{В}^{-1}\text{с} \cdot 10^{15}$
ПЭТФ	+	10	3000	1,4
ПЭТФ	+	20	3500	1,45
ПЭТФ	-	10	3000	1,6
ПЭТФ	-	20	3500	1,7
ПК	+	10	3000	1,2
ПК	+	20	3500	1,2
ПК	-	10	3000	1,2
ПК	-	20	3500	1,3
ПЭ	+	100	3000	1,7
ПЭ	-	100	3000	1,7
ПП	+	10	3000	1,5
ПП	-	20	3500	1,5



Рис. 4. Схема движения носителей заряда электрета с неравномерным распределением электропроводности по толщине в собственном электрическом поле

Порядок результатов измерения подвижности носителей заряда полимерных электретов, представленных в таблице, соответствует порядку результатов измерения μ полученных при исследовании статической электризации полиметилметакрилата [9–11].

Значения энергии активации E_a подвижности носителей заряда в полимерных пленках ПЭТФ, ПК, ПП, ПЭ, ПВХ (рис. 5) находятся в пределах $26, 30 \text{ ккал/моль}^{-1}$, что хорошо соответствует значениям энергии активации, полученным по результатам измерения вязкости полимерных диэлектриков [11].

Выводы: 1. Мягкое рентгеновское излучение ЭГКР вызывает обратимые радиационные изменения свойств тонкопленочных полимерных электретов.

2. Измеренная глубина полупоглощения рентгеновского излучения ЭГКР в полимерных пленках в зависимости от напряжения ЭГКР составляет $0,1-1 \text{ мкм}$.

3. Результаты экспериментального измерения μ и E_a носителей заряда в полимерных электретах, полученные методом формирования градиента электропроводности, хорошо согласуются с дан-

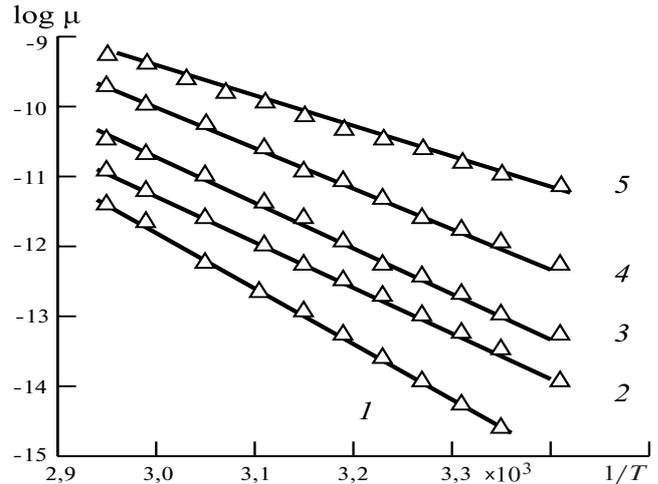


Рис. 5. Зависимости $\log \mu = f(1/T)$ для коронозлектретов из полимерных пленок ПЭТФ(1), ПК(2), ПП(3), ПЭ(4), ПВХ(5)

ными, определенными по измерениям вязкости диэлектриков [11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Блатт Ф. Теория подвижности электронов в твердых телах/Пер с англ. – М.; Л.: Физматлитгиз, 1963.
- Гантмахер В.Ф., Левинсон И.Б. Рассеяние носителей тока в металлах и полупроводниках. – М.: Наука, 1984.
- Райзер Ю.П. Физика газового разряда, 2 изд. – М.: Наука, 1992.
- Александрова И.В., Аллин А.П., Басов Н.Г. и др. Исследование системы лазер – плазма на установке «Дельфин-1». – Тр. ФИАН им. П.Н. Лебедева, 1985, т. 149.
- Басов Н.Г., Крохин О.Н., Склизов Г.В. и др. Мощная лазерная установка и исследование эффективности высокотемпературного нагрева плазмы. – ЖЭТФ, 1972, т. 62.
- Прохоров А.М., Анисимов С.И., Пашинин П.П. Лазерный термоядерный синтез. – УФН, 1976, т. 119, № 3.
- Ушаков В.Я. Изоляция установок высокого напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1994.
- Новиков Г.К. Плазменные электротехнологии швирования и контроля дефектности полиолефиновой кабельной изоляции. Монография. – Иркутск.: Изд-во ИрГТУ, 2009.
- Gross B., Sessler G., West J. TSC studies of carrier trapping in electron and g irradiated Teflon. – J. of Appl. Phys., 1976, vol. 47, № 3.
- Wintle H.J. Decay of static electrification by conduction processes in polyethylene. – J. of Appl. Phys., 1970, vol. 41, № 10.
- Reiser A., Lock M.W.B., Knight J. Migration and trapping of extrinsic charge carriers in polymer films. – Wealdstone, Harrow, Middlesex: Research laboratory, Kodak Ltd., 1968.

[29.09.10]

Автор: Новиков Геннадий Кириллович окончил в 1971 г. физический факультет Иркутского государственного университета (ИрГУ). В 1995 г. защитил кандидатскую диссертацию «Электретный эффект и электрическая релаксация в полимерах и слюдах» в ИрГУ. Доцент кафедры «РЭ и ТС» Иркутского государственного технического университета (ИрГТУ).