

Оригинальная статья

УДК 678.7:539.4.038

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.658-668>**Допирование полиэтилентерефталатной конденсаторной пленки:
выбор условий****Е.И. Попова[✉], Ю.С. Кузнецова, О.Л. Лазарева, Р.Е. Невский, А.В. Соковишин***Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова,
г. Москва, Россия*[✉]mailbox75@vniia.ru**Аннотация**

Полиэтилентерефталатная (ПЭТ) пленка обладает хорошими диэлектрическими свойствами, но высокой радиационно-наведенной проводимостью. Создание ПЭТ пленки с низкой радиационно-наведенной проводимостью возможно за счет допирования промышленно выпускаемых электроизоляционных пленок малыми молекулами – ловушками электронов. В работе исследован процесс допирования полиэтилентерефталатной конденсаторной пленки марки ПЭТ-КЭ (ГОСТ 24234-80) допантами на основе флуоренона – 2,7-динитрофлуореноном-9 (ДНФ) и 2,5,7-тринитрофлуореноном-9 (ТНФ) – с учетом роли растворителя (на примере этиленгликоля и бензилового спирта), выбран температурный диапазон процесса допирования, который ограничен температурой стеклования допируемого полимера (88 °С для ПЭТ) снизу и температурой кипения растворителя сверху, а также подобраны растворитель и концентрация допирующих растворов. На основе результатов эксперимента в качестве растворителей для допантов выбраны этиленгликоль для ТНФ и бензиловый спирт для ДНФ. В результате проведенной работы установлены критерии выбора растворителя для допирующей системы. Растворитель должен иметь высокую температуру кипения, обеспечивать хорошую растворимость допанта и проявлять низкое сродство к полимерной матрице.

Ключевые слова: допирование, радиационная стойкость, электронные ловушки, полиэтилентерефталатная пленка, конденсаторная пленка.

Для цитирования: Попова Е.И., Кузнецова Ю.С., Лазарева О.Л., Невский Р.Е., Соковишин А.В. Допирование полиэтилентерефталатной конденсаторной пленки: выбор условий // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2025. Т. 167, кн. 4. С. 658–668. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.658-668>.


Original article

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.658-668>

**Polyethylene terephthalate capacitor film doping:
Selection of conditions**

E.I. Popova , **Yu.S. Kuznetsova**, **O.L. Lazareva**, **R.E. Nevskiy**, **A.V. Sokovishin**

Dukhov Automatics Research Institute, Moscow, Russia

 mailbox75@vniia.ru

Abstract

Polyethylene terephthalate (PET) film has good dielectric properties but high radiation-induced conductivity, which can be reduced by doping commercially available electrical insulation films with small electron-trapping molecules. This study investigates the doping process of PET-CE capacitor film (State Standard 24234-80) using fluorenone-based dopants, such as 2,7-dinitro-9-fluorenone (DNF) and 2,5,7-trinitro-9-fluorenone (TNF), and focusing on the role of the solvent (ethylene glycol and benzyl alcohol). The optimal doping temperature range was selected to be between the glass transition temperature of the doping polymer (88 °C for PET, lower limit) and the boiling point of the solvent (upper limit). The appropriate solvent and dopant solution concentrations were determined. Based on the experimental results, ethylene glycol and benzyl alcohol were selected as solvents for TNF and DNF, respectively. The following solvent selection criteria for doping systems were established: high boiling point, high dopant solubility, and low affinity for the polymer matrix.

Keywords: doping, radiation resistance, electron traps, polyethylene terephthalate film, capacitor film

For citation: Popova E.I., Kuznetsova Yu.S., Lazareva O.L., Nevskiy R.E., Sokovishin A.V. Polyethylene terephthalate capacitor film doping: Selection of conditions. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2025, vol. 167, no. 4, pp. 658–668. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.4.658-668>. (In Russian)

Введение

Для создания накопителей энергии, устойчивых к воздействию радиации, необходимы соответствующие электроизоляционные материалы. При взаимодействии ионизирующего излучения с полимерным материалом независимо от того, состоит ли излучение из рентгеновских лучей, γ -излучения, протонов или электронов высокой энергии, образуются носители заряда, что приводит к появлению электропроводности [1, 2]. Эта радиационно-наведенная проводимость существенно ограничивает изоляционные свойства полимерных диэлектриков. Физика радиационно-наведенной проводимости в полимерах, в том числе возникновение носителей заряда и перенос заряда, подробно изучена с точки зрения электронных процессов, протекающих в неупорядоченных материалах [2–7]. Падающее на полимер излучение приводит к образованию пар электрон – дырка, которые могут разделиться с образованием мобильных носителей заряда или рекомбинировать.

Электроны и дырки двигаются в материале, перепрыгивая от одного дефекта к другому, при этом подвижность электронов и дырок различна и зависит от природы материала и его морфологии. В большинстве электроизоляционных полимеров дырки более подвижны, чем электроны [3, 8], но вследствие большего времени жизни электронов в электрических полях радиационно-наведенная проводимость сводится преимущественно к электронной проводимости [2, 9].

Существует два подхода к снижению проводимости полимерных диэлектриков под действием радиации: экранирование тяжелыми элементами [10] или допирование ловушками электронов или дырок [2]. Экранирование может быть эффективным, но требует применения объемных и тяжелых защитных слоев. Поэтому лучшим решением является допирование полимерных диэлектриков ловушками электронов или дырок. Этот подход предложен S.R. Kurtz et al. на примере полиэтилентерефталата (ПЭТ) [2] и поливинилиденфторида [11].

В настоящее время увеличивается число публикаций по данной тематике. Так, в работах [12, 13] обсуждается эффективность различных улавливающих электроны допантов для уменьшения радиационно-наведенной проводимости в полимерных материалах. Малые молекулы 2,5,7-тринитрофлуоренона-9 (ТНФ) снижают ее на 98 % при облучении 30 рад/с (Si) в случае применения подходящей концентрации для допирования ПЭТ. Другие электронные ловушки с малыми молекулами, например, тетрацианохинодиметан, нитроаценафтен и динитрофлуоренон, в тех же условиях снижают радиационно-наведенную проводимость на 89–98 % [12]. Фотоактивность и способность удерживать электроны, характерные для флуоренонов, обуславливают использование в качестве допанта ТНФ. В работах [14, 15] рассмотрена эффективность фотогенерации связанного в комплекс с ТНФ поли(*N*-винилкарбазола) под действием видимого света как функции от приложенного электрического поля. При этом допирование проведено простым растворением ТНФ и поли(*N*-винилкарбазола) в подходящем растворителе с последующим его испарением. Оценена также кинетика рекомбинации носителей такого материала [16].

Изучено допирование пленок Mylar® флуоренонами и нитропиреном из растворов в широком диапазоне концентраций допанта и температур, а также длительности экспозиции [17]. Установлено, что допирование происходит в аморфную фазу полимера и является неэффективным при температурах ниже температуры стеклования ПЭТ вследствие ограничения диффузии. При выдерживании пленки в растворе допанта наблюдается одинаковое для всех допантов изменение концентрации в пленке во времени, в частности, регистрируется область быстрого роста с последующим выходом на плато. При температуре > 100 °C концентрация допанта в пленке достигает плато быстрее (коэффициент диффузии увеличивается), однако его равновесная концентрация снижается.

Анализ литературных данных позволяет считать, что создание конденсаторной ПЭТ пленки с низкой радиационно-наведенной проводимостью возможно за счет допирования промышленно выпускаемой пленки ловушками электронов, в качестве которых могут быть использованы нитропроизводные флуоренона. Однако технологические аспекты процесса допирования, например, критерии выбора растворителя для доставки допанта в полимерную матрицу, не рассматриваются. Поэтому цель настоящей работы заключается в оценке влияния растворителя (на примере этиленгликоля и бензилового спирта) на процесс допирования ПЭТ конденсаторной пленки допантами на основе флуоренона (2,7-динитрофлуореноном-9 (ДНФ) и ТНФ).

1. Материалы и методы

Эксперименты проводили на конденсаторной пленке марки ПЭТ-КЭ толщиной 10 ± 1.5 мкм (МРТУ 6-05-1000-67) и 10 ± 1.0 мкм (ГОСТ 24234-80), из которой вырезали образцы прямоугольной формы размером 3×6 см. В качестве допантов рассмотрены ТНФ (ТУ 12-06-79) и ДНФ марки ч. (ТУ 6-09-07-732-85). Растворителями выступали этиленгликоль (сорт высший, ГОСТ 19710-2019) и бензиловый спирт (CAS No 100-51-6).

Содержание допанта в пленке определяли методом УФ-спектроскопии на прецизионном сканирующем спектрофотометре Lambda 1050 WB (PerkinElmer Inc, США) в диапазоне длин волн 300–600 нм. Пленки исследовали с помощью интегрирующей сферы 150 мм InGaAs Int. Sphere, а растворы – в кварцевой кювете с длиной оптического пути 1 см. Спектры градуировочных растворов допантов представлены на рис. 1.

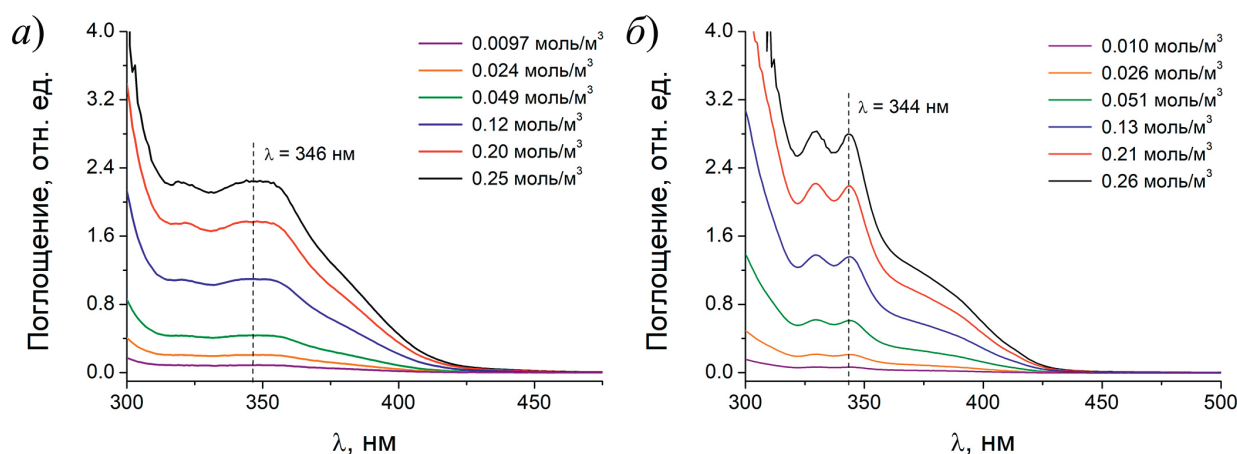


Рис. 1. Спектры поглощения градуировочных растворов ТНФ (а) и ДНФ (б) в этиленгликоле

Fig. 1. Absorption spectra of TNF (a) and DNF (b) calibration solutions in ethylene glycol

Градуировочные зависимости для ТНФ и ДНФ в этиленгликоле описываются уравнениями 1 и 2 соответственно.

$$A = (-0.001 \pm 0.002) + (8.97 \pm 0.02)c_{\text{ТНФ}} [\text{моль/м}^3] \quad r = 0.99999 \quad (1)$$

$$A = (-0.02 \pm 0.03) + (10.7 \pm 0.2)c_{\text{ДНФ}} [\text{моль/м}^3] \quad r = 0.99916 \quad (2)$$

Концентрацию допанта в пленке рассчитывали на основании восьми измерений (по четыре измерения на двух пленках) и представляли как среднее значение и доверительный интервал при доверительной вероятности 95 %.

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Выбор температурных условий. Из литературных данных следует, что нижний порог температурного диапазона процесса допирования ограничен температурой стеклования ПЭТ. Для конденсаторной пленки марки ПЭТ-КЭ методом ДСК определена температура стеклования аморфной фазы, равная 88 °С. Кроме того, с учетом удельной теплоты плавления 100 %-но кристаллического ПЭТ (26.9 кДж/моль) [18] оценена степень кристалличности конденсаторной пленки, составившая ~26 %. Таким образом, пленка ПЭТ-КЭ характеризуется содержанием аморфной фазы 74 % с температурой стеклования 88 °С.

Верхний порог температурного диапазона экспериментов по допированию ограничен температурой кипения растворителей (197.6 °С для этиленгликоля и 205 °С для бензинового спирта [19]) или температурой плавления полимера. Поскольку из литературы известна

тенденция к снижению равновесной концентрации допанта в пленке с ростом температуры допирования, для проведения экспериментов были выбраны три температуры (100, 120 и 140 °С) из нижней части указанного выше диапазона от 88 до ~200 °С.

2.2. Выбор растворителя и концентрации допантов. Задача допирования – внедрение в полимерную пленку допанта в концентрации, соответствующей рабочему диапазону, верхняя граница которого равна ~200 моль/м³ [20], а нижняя, согласно минимальным значениям радиационно-наведенной проводимости для допированной ДНФ пленки Mylar® [13], составляет 20 моль/м³. Таким образом, целевой диапазон концентрации допанта в пленке можно принять равным 20–200 моль/м³. Если концентрация допанта будет ниже, то число молекул, улавливающих все возникающие под действием излучения электроны, недостаточно для подавления радиационно-наведенной проводимости. При очень высоких концентрациях допанта электроны могут «просачиваться» сквозь полимерную матрицу за счет туннельного перехода между молекулами допанта.

С учетом диапазона концентраций допанта в пленке, их концентрация в растворах должна составлять от 10 моль/м³. Согласно литературным данным [1, 17], растворителями для нитропроизводных флуоренона являются этиленгликоль и бензиловый спирт, которые и были использованы в настоящем исследовании. Растворимость ТНФ в этиленгликоле при 100 °С составила ~13 моль/м³, а в бензиловом спирте – на два порядка больше. В рамках проводимого эксперимента это эквивалентно неограниченной растворимости, то есть любой из этих растворителей подходит для проведения эксперимента по допированию пленки ПЭТ-КЭ с позиции обеспечения необходимой концентрации допанта в растворе.

Результаты исследования растворимости ДНФ в этиленгликоле и бензиловом спирте представлены на рис. 2. Установлено, что при температуре 100 °С необходимая концентрация ДНФ может быть достигнута только в бензиловом спирте. Таким образом, для дальнейших исследований по допированию ПЭТ-КЭ использовали системы ТНФ в этиленгликоле и ДНФ в бензиловом спирте.

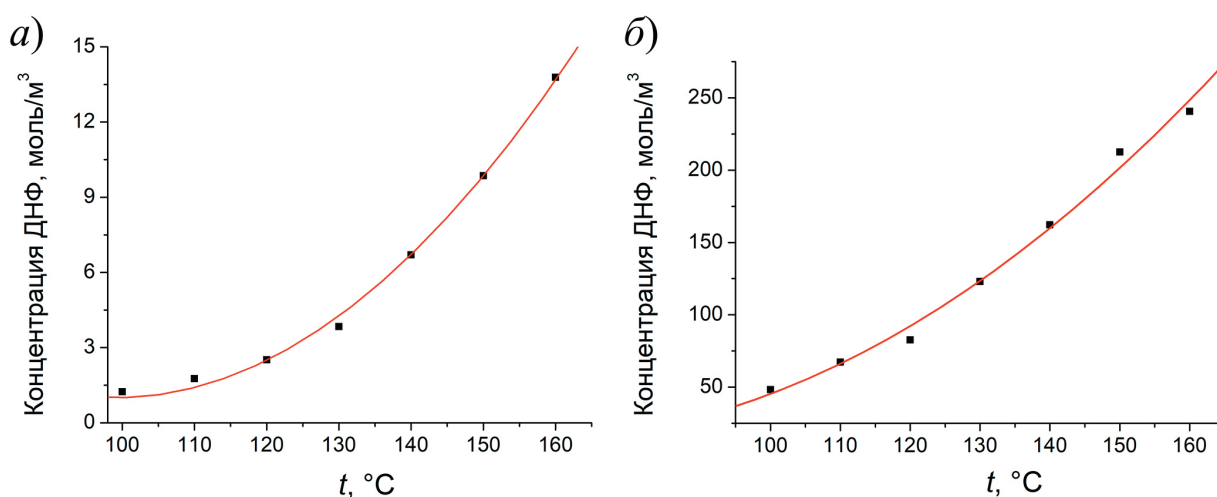


Рис. 2. Изменение концентрации насыщенного раствора ДНФ в этиленгликоле (а) и бензиловом спирте (б) в зависимости от температуры

Fig. 2. Changes in the concentration of saturated DNF solution in ethylene glycol (a) and benzyl alcohol (b) depending on the temperature

2.3. Допирование ПЭТ пленки в системе ТНФ в этиленгликоле. Кривые роста содержания ТНФ в пленке по мере увеличения времени выдерживания при трех температурах представлены на рис. 3. С ростом температуры скорость внедрения допанта на ранних стадиях процесса увеличивается. Так, через 20 мин от начала эксперимента концентрация ТНФ в пленке составляет ~7, ~14 и ~39 моль/м³ для экспериментов при 100, 120 и 140 °С соответственно. В то же время предельно достигаемая (равновесная) концентрация допанта в пленке уменьшается и равна ~150, ~120 и ~90 моль/м³ в случае 100, 120 и 140 °С соответственно. Обе эти тенденции согласуются с литературными данными [17].

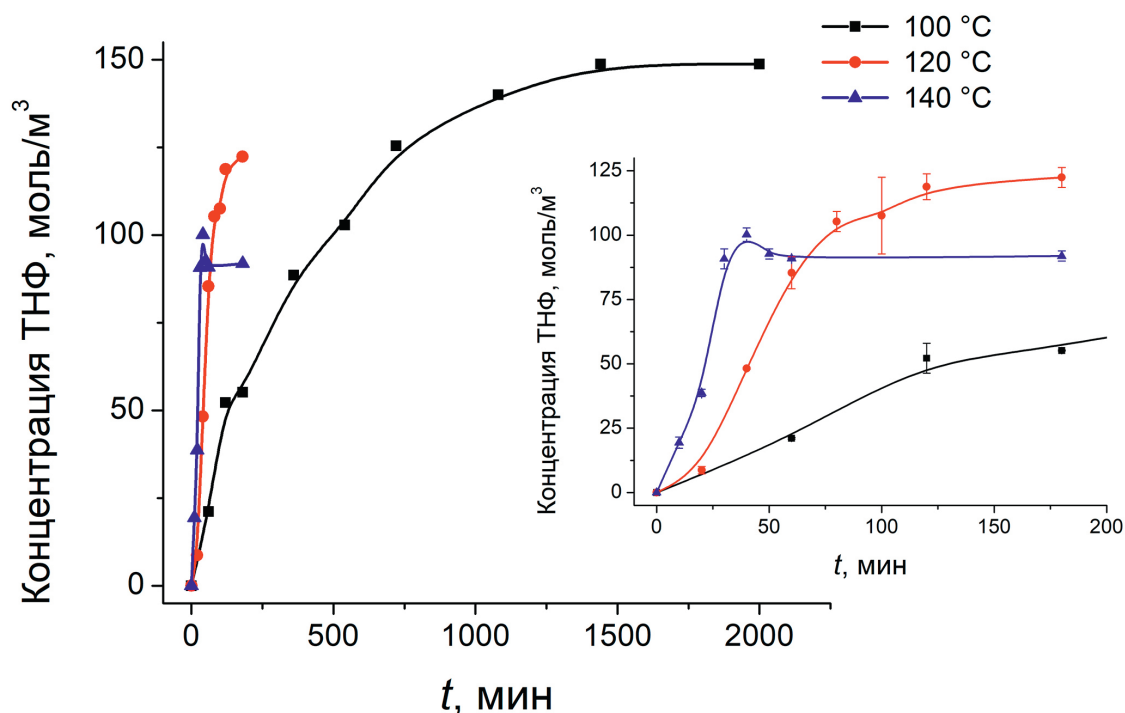


Рис. 3. Зависимость концентрации ТНФ в пленке ПЭТ-КЭ от времени выдерживания в 10.2 моль/м³ допирующем растворе ТНФ в этиленгликоле с концентрацией при различных температурах (вставка –фрагмент зависимости на начальном этапе)

Fig. 3. Dependence of TNF concentration in PET-CE film on the exposure time in 10.2 mol/m³ doping solution of TNF in ethylene glycol at various temperatures (inset shows the fragment of the initial stage of dependence)

Следует отметить, что равновесные концентрации ТНФ в пленке почти на порядок выше, чем концентрация ТНФ в допирующем растворе (10.2 моль/м³) независимо от температуры эксперимента. Максимум на кривой нарастания содержания ТНФ в пленке при температуре эксперимента 140 °С статистически не достоверен. Обобщая серию экспериментов для системы ТНФ в этиленгликоле, можно констатировать, что нижний предел рабочих концентраций ТНФ в пленке (20 моль/м³) может быть достигнут при любой из рассмотренных температур.

2.4. Допирование ПЭТ пленки в системе ДНФ в бензиловом спирте. Учитывая результаты, полученные для системы ТНФ в этиленгликоле, для ДНФ в бензиловом спирте с концентрацией ДНФ 38.8 моль/м³ ожидалось более впечатляющие результаты. Однако как видно из кривой роста содержания ДНФ в пленке от времени выдерживания при температуре 100 °С (рис. 4, а), равновесная концентрация ДНФ в пленке составила всего ~20 моль/м³.

Сопоставление изотерм для систем ДНФ в бензиловом спирте и ТНФ в этиленгликоле (рис. 4, б) показывает близкие скорости роста концентрации допанта в пленке для обеих систем при одной и той же температуре. Однако после достижения концентрации ~ 20 моль/м³ процесс накопления допанта в системе ДНФ в бензиловом спирте останавливается.

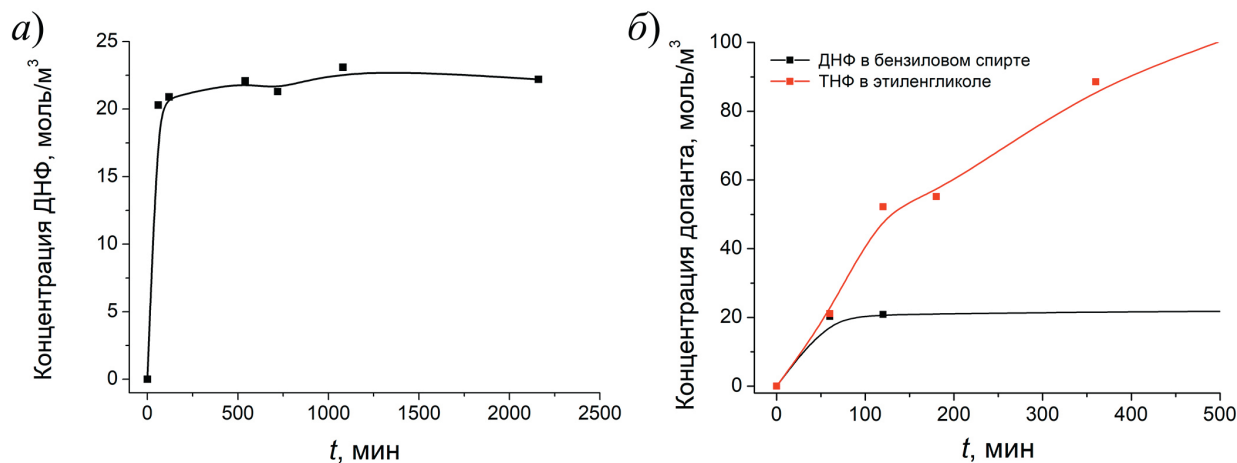


Рис. 4. Зависимость концентрации ДНФ в пленке ПЭТ-КЭ от времени выдерживания в 38.8 моль/м³ допирующем растворе ДНФ в бензиловом спирте при температуре 100 °С (а) и начальный фрагмент зависимостей концентрации допанта в пленке от времени выдерживания для систем ТНФ в этиленгликоле и ДНФ в бензиловом спирте при температуре 100 °С (б)

Fig. 4. Dependence of DNF concentration in PET-CE film on the exposure time in 38.8 mol/m³ doping solution of DNF in benzyl alcohol at 100 °C (a) and the fragment of the initial stage of dependence of the dopant concentration in PET-CE film on the exposure time for TNF in ethylene glycol and DNF in benzyl alcohol at 100 °C (b)

Такое поведение можно объяснить следующим образом. В момент достижения равновесия ПЭТ пленка содержит допант и растворитель. В ходе отдельного эксперимента оценено набухание ПЭТ-КЭ пленок при 100 °С, которое составляет 1.5 % (масс.) в этиленгликоле и 5 % (масс.) в бензиловом спирте. Учитывая степень кристалличности ПЭТ (26 % (масс.)), можно оценочно рассчитать соотношение компонентов в равновесных системах пленка – допант – растворитель, которые равны 500 звеньев ПЭТ (аморфной фазы) : 15 молекул ТНФ : 33 молекулы этиленгликоля и 500 звеньев ПЭТ (аморфной фазы) : 2 молекулы ДНФ : 60 молекул бензинового спирта. По-видимому, в равновесном для данной температуры состоянии систем ПЭТ–допант–растворитель соотношение звеньев ПЭТ к сумме молекул допанта и растворителя приблизительно одинаково (на уровне 50–60 молекул на 500 звеньев аморфной фазы ПЭТ). Если пленка существенно набухает в растворителе, то вакантные места, которые должны быть заняты допантом, оказываются занятыми молекулами растворителя. С этой точки зрения достижение концентраций допанта в пленке, близких к верхнему пределу рабочего диапазона (~ 200 моль/м³), возможно только при использовании растворителя с низким сродством к полимерной матрице. Обсуждая допирование в системе ДНФ в бензиловом спирте, необходимо отметить, что при температуре 100 °С все же возможно достижение концентрации допанта в пленке, близкой к нижнему пределу рабочего диапазона (~ 20 моль/м³). Увеличение температуры приведет к дальнейшему снижению равновесной концентрации ДНФ в пленке.

Заключение

Исследование допирующих систем с различными растворителями позволяет сформулировать критерии выбора растворителя для допанта. Во-первых, растворитель должен иметь высокую температуру кипения. Интервал рабочих температур ограничивается температурой стеклования допируемого полимера (88 °С для ПЭТ) снизу и температурой кипения растворителя сверху. Во-вторых, он должен обеспечивать хорошую растворимость допанта и обладать низким сродством растворителя к полимерной матрице, так как высокое сродство приводит к набуханию полимера и блокированию молекулами растворителя полостей свободного объема в аморфной фазе полимера, что снижает равновесную концентрацию допанта в полимерной пленке.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. Kurtz S.R., Arnold C., Jr., Hughes R.C. Effect of chemical doping on the radiation-induced conductivity of polyethylene terephthalate // *Appl. Phys. Lett.* 1983. V. 43, No 12. P. 1132–1134. <https://doi.org/10.1063/1.94257>.
2. Kurtz S.R., Arnold J.C., Jr. Photocarrier transport and trapping processes in doped polyethylene terephthalate films // *J. Appl. Phys.* 1985. V. 57, No 7. P. 2532–2537. <https://doi.org/10.1063/1.335441>.
3. Хатипов С.А. Радиационно-индуцированные процессы переноса электронов в полимерных диэлектриках // *Химия высоких энергий*. 2001. Т. 35, № 5. С. 323–339.
4. Тютнев А.П., Саенко В.С., Смирнов И.А., Пожидяев Е.Д. Радиационная электропроводность полимеров при длительном облучении // *Химия высоких энергий*. 2006. Т. 40, № 5. С. 364–375.
5. Zhutayeva Yu.R., Khatipov S.A. Relaxation model of radiation-induced conductivity in polymers // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B.* 1999. V. 151, Nos 1–4. P. 372–376. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00154-8](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00154-8).
6. Faria R.M., Gross B., Filho R.G. Radiation-induced conductivity of polymers in different gases // *J. Appl. Phys.* 1987. V. 62, No 4. P. 1420–1424. <https://doi.org/10.1063/1.339646>.
7. Yang G.M., Sessler G.M. Radiation-induced conductivity in electron-beam irradiated insulating polymer films // *IEEE Trans. Electr. Insul.* 1992. V. 27, No 4. P. 843–848. <https://doi.org/10.1109/14.155808>.
8. Hayashi K., Yoshino K., Inuishi Y. Carrier mobilities in insulating polymers measured by time of flight method // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1975. V. 14, No 1. P. 39–45. <https://doi.org/10.1143/JJAP.14.39>.
9. Kurtz S.R. Observation of electron transport in polyethylene terephthalate and the radiation hardening of dielectrics // *Appl. Phys. Lett.* 1985. V. 46, No 11. P. 1105–1107. <https://doi.org/10.1063/1.95724>.
10. Fan W.C., Drumm C.R., Roeske S.B., Scrivner G.J. Shielding considerations for satellite microelectronics // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1996. V. 43, No 6. P. 2790–2796. <https://doi.org/10.1109/23.556868>.
11. Kurtz S.R., Hughes R.C. Radiation-induced photoconductivity in polymers: Poly(vinylidene fluoride) compared with polyethylene terephthalate // *J. Appl. Phys.* 1983. V. 54, No 1. P. 229–237. <https://doi.org/10.1063/1.331746>.
12. Lenhart J.L., Cole P.J., Cole S.M., Schroeder J.L., Belcher M. Radiation tolerant polymeric films through the incorporation of small molecule dopants in the polymer matrix // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 103, No 2. Art. 024908. <https://doi.org/10.1063/1.2832755>.
13. Klein R.J., Schroeder J.L., Cole S.M., Belcher M.E., Cole P.J., Lenhart J.L. Reduction of radiation-induced conductivity in poly(ethylene terephthalate): Effect of dopant structure // *Polymer*. 2008. V. 49, No 11. P. 2632–2635. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.03.048>.

14. Lardon M., Lell-döller E., Weigl J.W. Charge transfer sensitization of some organic photoconductors based on carbazole // *Mol. Cryst.* 1967. V. 2, No 3. P. 241–266. <https://doi.org/10.1080/15421406708083419>.
15. Melz P.J. Photogeneration in trinitrofluorenone–poly(*N*-vinylcarbazole) // *J. Chem. Phys.* 1972. V. 57, No 4. P. 1694–1699. <https://doi.org/10.1063/1.1678457>.
16. Hughes R.C. Bulk recombination of charge carriers in polymer films: Poly-*N*-vinylcarbazole complexed with trinitrofluorenone // *J. Chem. Phys.* 1973. V. 58, No 6. P. 2212–2219. <https://doi.org/10.1063/1.1679494>.
17. Klein R.J., Cole S.M., Belcher M.E., Schroeder J.L., Cole P.J., Lenhart J.L. Radiation tolerance in polymeric dielectrics by small-molecule doping, part I: Dopant uptake as a function of temperature, time, and chemistry // *Polymer*. 2008. V. 49, No 25. P. 5541–5548. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.08.067>.
18. Wunderlich B. *Thermal Analysis of Polymeric Materials*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. xvi, 894 p. <https://doi.org/10.1007/b137476>.
19. Lide D.R. *Basic Laboratory and Industrial Chemicals: A CRC Quick Reference Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1993. 384 p. <https://doi.org/10.1201/9780429333026>.
20. Kurtz S.R., Arnold C., Hughes R.C. Development of a radiation hardened polymer dielectric by chemical doping // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1983. V. 30, No 6. P. 4077–4080. <https://doi.org/10.1109/TNS.1983.4333084>.

References

1. Kurtz S.R., Arnold C., Jr., Hughes R.C. Effect of chemical doping on the radiation-induced conductivity of polyethylene terephthalate. *Appl. Phys. Lett.*, 1983, vol. 43, no. 12, pp. 1132–1134. <https://doi.org/10.1063/1.94257>.
2. Kurtz S.R., Arnold J.C., Jr. Photocarrier transport and trapping processes in doped polyethylene terephthalate films. *J. Appl. Phys.*, 1985, vol. 57, no. 7, pp. 2532–2537. <https://doi.org/10.1063/1.335441>.
3. Khatipov S.A. Radiation-induced electron transport processes in polymeric dielectrics (a review). *High Energy Chem.*, 2001, vol. 35, no. 5, pp. 291–307. <https://doi.org/10.1023/A:1011914004155>.
4. Tyutnev A.P., Saenko V.S., Smirnov I.A., Pozhidaev E.D. Radiation-induced conductivity in polymers during long-term irradiation. *High Energy Chem.*, 2006, vol. 40, no. 5, pp. 319–330. <https://doi.org/10.1134/S0018143906050079>.
5. Zhutayeva Yu.R., Khatipov S.A. Relaxation model of radiation-induced conductivity in polymers. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, 1999, vol. 151, nos. 1–4, pp. 372–376. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00154-8](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00154-8).
6. Faria R.M., Gross B., Filho R.G. Radiation-induced conductivity of polymers in different gases. *J. Appl. Phys.*, 1987, vol. 62, no. 4, pp. 1420–1424. <https://doi.org/10.1063/1.339646>.
7. Yang G.M., Sessler G.M. Radiation-induced conductivity in electron-beam irradiated insulating polymer films. *IEEE Trans. Electr. Insul.*, 1992, vol. 27, no. 4, pp. 843–848. <https://doi.org/10.1109/14.155808>.
8. Hayashi K., Yoshino K., Inuishi Y. Carrier mobilities in insulating polymers measured by time of flight method. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1975, vol. 14, no. 1, pp. 39–45. <https://doi.org/10.1143/JJAP.14.39>.
9. Kurtz S.R. Observation of electron transport in polyethylene terephthalate and the radiation hardening of dielectrics. *Appl. Phys. Lett.*, 1985, vol. 46, no. 11, pp. 1105–1107. <https://doi.org/10.1063/1.95724>.
10. Fan W.C., Drumm C.R., Roeske S.B., Scrivner G.J. Shielding considerations for satellite microelectronics. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1996, vol. 43, no. 6, pp. 2790–2796. <https://doi.org/10.1109/23.556868>.
11. Kurtz S.R., Hughes R.C. Radiation-induced photoconductivity in polymers: Poly(vinylidene fluoride) compared with polyethylene terephthalate. *J. Appl. Phys.*, 1983, vol. 54, no. 1, pp. 229–237. <https://doi.org/10.1063/1.331746>.

12. Lenhart J.L., Cole P.J., Cole S.M., Schroeder J.L., Belcher M. Radiation tolerant polymeric films through the incorporation of small molecule dopants in the polymer matrix. *J. Appl. Phys.*, 2008, vol. 103, no. 2, art. 024908. <https://doi.org/10.1063/1.2832755>.
13. Klein R.J., Schroeder J.L., Cole S.M., Belcher M.E., Cole P.J., Lenhart J.L. Reduction of radiation-induced conductivity in poly(ethylene terephthalate): Effect of dopant structure. *Polymer*, 2008, vol. 49, no. 11, pp. 2632–2635. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.03.048>.
14. Lardon M., Lell-döller E., Weigl J.W. Charge transfer sensitization of some organic photoconductors based on carbazole. *Mol. Cryst.*, 1967, vol. 2, no. 3, pp. 241–266. <https://doi.org/10.1080/15421406708083419>.
15. Melz P.J. Photogeneration in trinitrofluorenone–poly(*N*-vinylcarbazole). *J. Chem. Phys.*, 1972, vol. 57, no. 4, pp. 1694–1699. <https://doi.org/10.1063/1.1678457>.
16. Hughes R.C. Bulk recombination of charge carriers in polymer films: Poly-*N*-vinylcarbazole complexed with trinitrofluorenone. *J. Chem. Phys.*, 1973, vol. 58, no. 6, pp. 2212–2219. <https://doi.org/10.1063/1.1679494>.
17. Klein R.J., Cole S.M., Belcher M.E., Schroeder J.L., Cole P.J., Lenhart J.L. Radiation tolerance in polymeric dielectrics by small-molecule doping, part I: Dopant uptake as a function of temperature, time, and chemistry. *Polymer*, 2008, vol. 49, no. 25, pp. 5541–5548. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2008.08.067>.
18. Wunderlich B. *Thermal Analysis of Polymeric Materials*. Berlin, Heidelberg, Springer, 2005. xvi, 894 p. <https://doi.org/10.1007/b137476>.
19. Lide D.R. *Basic Laboratory and Industrial Chemicals: A CRC Quick Reference Handbook*. Boca Raton, FL, CRC Press, 1993. 384 p. <https://doi.org/10.1201/9780429333026>.
20. Kurtz S.R., Arnold C., Hughes R.C. Development of a radiation hardened polymer dielectric by chemical doping. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1983, vol. 30, no. 6, pp. 4077–4080. <https://doi.org/10.1109/TNS.1983.4333084>.

Информация об авторах

Екатерина Ивановна Попова, доктор технических наук, начальник лаборатории в составе научно-исследовательского отдела, лаборатория полимерных материалов, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова

E-mail: mailbox75@vniia.ru

Юлия Семеновна Кузнецова, инженер I категории лаборатории полимерных материалов, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова

Ольга Леонидовна Лазарева, кандидат химических наук, ведущий специалист по физико-химическим исследованиям полимерных материалов, лаборатория полимерных материалов, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова

Роман Евгеньевич Невский, кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3698-0883>

Алексей Владимирович Соковишин, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заместитель главного конструктора – начальник отделения, Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н.Л. Духова

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8876-9065>

Author Information

Ekaterina I. Popova, Dr. Sci. (Engineering), Head of Laboratory within Research Department, Laboratory of Polymeric Materials, Dukhov Automatics Research Institute

E-mail: *mailbox75@vniia.ru*

Yuliya S. Kuznetsova, First Rank Engineer, Laboratory of Polymeric Materials, Dukhov Automatics Research Institute

Olga L. Lazareva, Cand. Sci. (Chemistry), Leading Specialist in Physical and Chemical Research of Polymeric Materials, Laboratory of Polymeric Materials, Dukhov Automatics Research Institute

Roman E. Nevskiy, Cand. Sci. (Engineering), Head of Research Department, Dukhov Automatics Research Institute

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3698-0883>

Alexey V. Sokovishin, Dr. Sci. (Engineering), Senior Researcher, Deputy Chief Designer – Head of Division, Dukhov Automatics Research Institute

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8876-9065>

Поступила в редакцию 10.09.2025

Принята к публикации 14.11.2025

Received September 10, 2025

Accepted November 14, 2025