Сравнительный анализ электретного и фотоэлектретного режимов электронной обработки полимерных материалов

И. Н. Рагимли[a,*], Н. А. Ганиева[a], Г. М. Керимли[b]

[a]*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, 1010, Азербайджан*
[b]*Университет Игдир, г. Игдир, 76000, Турция*
[*]*e-mail: ilhamra65@mail.ru*

Поступила в редакцию 06.02.2026
После доработки 28.04.2026
Принята к публикации 16.06.2026

Выполнен сравнительный анализ электретного и фотоэлектретного режимов электронной обработки полимерных материалов. Режимы рассматриваются как различные механизмы формирования пространственного заряда и внутреннего электрического поля, определяющего условия переноса носителей заряда и электрические свойства материалов. Для количественного сравнения предложена модель перераспределения электрического поля с введением параметра полевого баланса, характеризующего соотношение внутреннего и внешнего электрических полей. Показано, что в электретном режиме формируется квазистатическое внутреннее поле, приводящее к частичной компенсации внешнего поля и умеренному снижению электропроводности. Установлено, что в фотоэлектретном режиме оптическое воздействие усиливает пространственный заряд и внутреннее электрическое поле, что влечет за собой (обусловливает) существенное подавление эффективного поля переноса и проявление эффекта фотогашения электропроводности. Показано, что фотоэлектретный режим является более эффективным и управляемым инструментом электронной обработки полимерных материалов.

Ключевые слова: электронная обработка материалов, полимерные материалы, электретный режим, фотоэлектретный режим, пространственный заряд, электропроводность

УДК 537.226:678
https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.3.18

ВВЕДЕНИЕ

Электронная обработка материалов, основанная на целенаправленном воздействии электрических полей и электромагнитного излучения, широко применяется для модификации их электрических, диэлектрических и функциональных свойств. В отличие от химических и термических методов электронная обработка позволяет изменять свойства материалов за счет перераспределения зарядового состояния и внутренних электрических полей без нарушения химической структуры вещества [1–3].

Особое место в этом контексте занимают полимерные материалы, для которых характерны выраженная структурная неоднородность, наличие глубоких ловушек носителей заряда и высокая чувствительность к внешним электрическим и оптическим воздействиям [4–8]. Эти особенности обусловливают возможность формирования в полимерах электретного состояния, сопровождающегося накоплением пространственного заряда и возникновением устойчивого внутреннего электрического поля.

Электретный эффект в полимерах реализуется за счет электронных процессов инжекции, переноса и захвата носителей заряда на локализованные состояния различной природы [9–11]. При дополнительном воздействии оптического излучения активируются фотоиндуцированные процессы генерации носителей, что приводит к формированию фотоэлектретного состояния и изменению зарядовой структуры материала. Возникающее при этом внутреннее электрическое поле способно существенно влиять на условия переноса заряда и в ряде случаев доминировать над внешним электрическим полем [12–13].

Несмотря на значительное количество работ, посвященных электретным полимерам, в большинстве исследований электретный эффект рассматривается преимущественно как диэлектрическое или прикладное явление. При этом его роль в рамках электронных процессов и механизмов электронной обработки полимерных материалов, а также связь между пространственным зарядом, внутренними электрическими полями и модификацией электропроводности остаются недостаточно систематизированными. Это ограничивает использование электретного состояния как управляемого инструмента модификации свойств материалов.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью настоящей работы является сравнительный анализ электретного и фотоэлектретного режимов электронной обработки полимерных материалов и установление физических критериев их эффективности на основе моделирования перераспределения электрического поля и электронных процессов переноса заряда [1, 3, 11].

В рамках работы электретное и фотоэлектретное состояния рассматриваются как различные режимы электронной обработки, отличающиеся механизмами формирования внутреннего электрического поля, степенью управляемости зарядового состояния и влиянием на электропроводность полимерных материалов.

Для достижения указанной цели в работе необходимо решить следующие задачи:

1. Сформулировать физическую модель электретного и фотоэлектретного режимов электронной обработки, основанную на учете пространственного заряда, ловушек носителей и перераспределения электрического поля в полимерных материалах.
2. Ввести параметр полевого баланса, характеризующий соотношение внутреннего электретного и внешнего электрических полей, и использовать его в качестве критерия эффективности электронного воздействия.
3. Проанализировать электретный режим как квазистатический режим электронной обработки, при котором внутреннее электрическое поле формируется преимущественно под действием внешнего электрического поля.
4. Проанализировать фотоэлектретный режим как динамический режим электронной обработки, в котором оптическое излучение приводит к дополнительной генерации и захвату носителей заряда и усилению внутреннего электрического поля.
5. Сравнить влияние электретного и фотоэлектретного режимов на электропроводность полимерных материалов и определить области параметров, в которых фотоэлектретный режим является более эффективным инструментом электронной обработки.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе электретный и фотоэлектретный эффекты рассматриваются как два различных режима электронной обработки полимерных материалов, отличающихся механизмами формирования внутреннего электрического поля и характером влияния на электронные процессы переноса заряда. Метод исследования основан на физическом моделировании перераспределения электрического поля в полимерном материале с учетом пространственного заряда и ловушек носителей.

Полимерный материал моделируется как диэлектрическая среда с неоднородной энергетической структурой, характеризующейся наличием локализованных состояний в объеме и вблизи межфазных границ [6, 12]. В процессе электронной обработки под действием внешнего электрического поля и в случае фотоэлектретного режима происходят инжекция, генерация и захват носителей заряда, приводящие к формированию пространственного заряда с плотностью $\rho(x)$ [2, 7]. Распределение внутреннего электрического поля, создаваемого этим зарядом, описывается уравнением Пуассона:

$$\frac{dE_{\text{int}}(x)}{dx} = \frac{\rho(x)}{\varepsilon\varepsilon_0},$$

где ε – относительная диэлектрическая проницаемость полимерного материала; ε_0 – электрическая постоянная.

Ключевым элементом метода является сравнение конкуренции внешнего и внутреннего электрических полей в различных режимах обработки. Для этого вводится параметр полевого баланса:

$$\eta = \frac{E_{\text{int}}}{E_{ext}}$$

где $E_{ext} = U / d$ – внешнее электрическое поле, определяемое приложенным напряжением U и толщиной образца d. Параметр η используется в качестве критерия эффективности электронной обработки, поскольку он напрямую характеризует степень влияния электретного состояния на перенос носителей заряда.

В электретном режиме внутренняя напряженность поля формируется преимущественно за счет захвата инжектированных носителей и носит квазистатический характер. В этом случае параметр η определяется условиями поляризации и свойствами материала и остается практически постоянным во времени. Электронные процессы переноса заряда в данном режиме контролируются главным образом внешним электрическим полем, модифицированным электретным вкладом.

В фотоэлектретном режиме дополнительное оптическое воздействие приводит к генерации фотоиндуцированных носителей заряда, часть которых захватывается ловушками и усиливает пространственный заряд. В результате

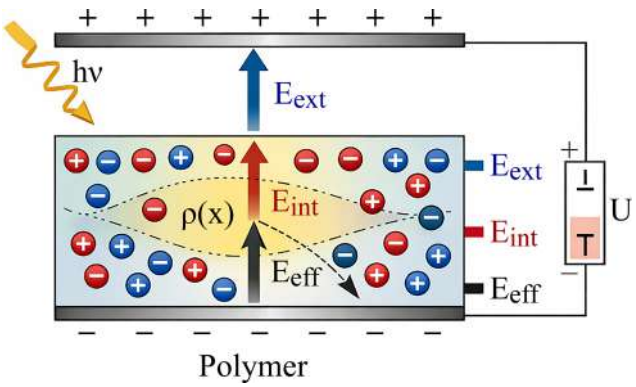


Рис. 1. Схематическое представление формирования электретного и фотоэлектретного состояний в полимерном материале: E_{ext} – внешнее электрическое поле; E_{int} – внутреннее поле, обусловленное пространственным зарядом; ρ(x) – распределение локализованных зарядов; E_{eff} – результирующее поле, определяющее перенос носителей заряда.

Таблица 1. Электронные процессы, определяющие формирование электретного и фотоэлектретного состояний в полимерных материалах

Электронный процесс	Физическая природа	Влияние на зарядовое состояние	Влияние на электрические свойства
Инжекция носителей заряда	Ввод электронов и дырок с электродов при действии электрического поля	Формирование начального пространственного заряда	Рост или снижение проводимости в зависимости от полярности поля
Захват носителей на ловушки	Локализация зарядов на дефектах и межфазных границах	Стабилизация электретного заряда	Уменьшение подвижности носителей
Формирование пространственного заряда	Неоднородное распределение локализованных зарядов	Возникновение внутреннего электрического поля	Компенсация внешнего Поля
Фотоиндуцированная генерация зарядов	Образование электрон-дырочных пар под действием света	Усиление пространственного заряда	Возможное фотогашение электропроводности
Фотоэлектретное усиление поля	Захват фотоиндуцированных носителей	Рост внутреннего электрического поля	Снижение эффективного поля переноса
Релаксация электретного заряда	Термическое высвобождение носителей	Ослабление электретного состояния	Восстановление проводимости

внутренняя напряженность поля становится функцией интенсивности и времени оптического воздействия, а параметр η приобретает динамический характер. Это позволяет рассматривать фотоэлектретный режим как управляемый режим электронной обработки, в котором внутреннее электрическое поле может быть целенаправленно усилено [9–11].

Электропроводность полимерного материала в обоих режимах определяется эффективным электрическим полем:

$$E_{eff} = E_{ext} - E_{\text{int}}$$

и рассчитывается по выражению:

$$\sigma = qn\mu\left(E_{eff}\right),$$

где q – заряд носителя; n – концентрация свободных носителей; μ – их подвижность. Таким образом, снижение эффективного поля переноса при росте параметра η приводит к уменьшению электропроводности и может проявляться в виде фотогашения электропроводности в фотоэлектретном режиме.

Сравнительный анализ электретного и фотоэлектретного режимов проводится на основе оценки параметра η, величины эффективного электрического поля и относительного изменения электропроводности или сопротивления. Схематическое представление перераспределения полей в рассматриваемых режимах приведено на рис. 1, а основные электронные процессы, определяющие различия между режимами электронной обработки, систематизированы в табл. 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе предложенной модели выполнен сравнительный анализ электретного и фотоэлектретного режимов электронной обработки поли-

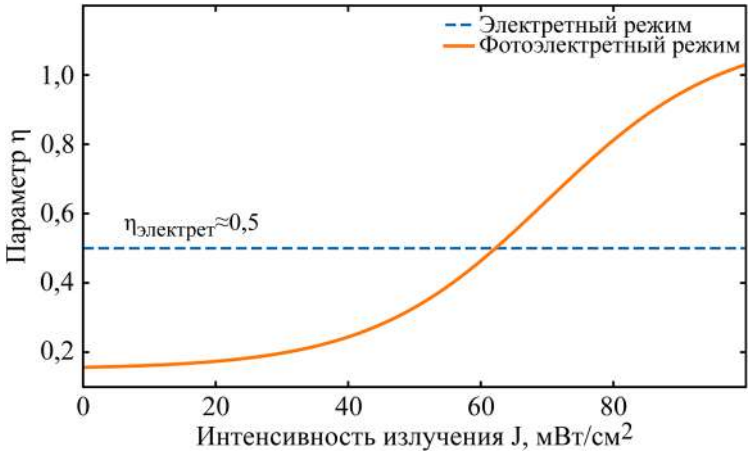


Рис. 2. Зависимость параметра полевого баланса η от интенсивности оптического излучения J для электретного и фотоэлектретного режимов электронной обработки полимерных материалов.

мерных материалов с использованием параметра полевого баланса $\eta = E_{\text{int}} / E_{ext}$ в качестве критерия эффективности.

Расчеты показывают, что в электретном режиме внутренняя напряженность электрического поля формируется за счет захвата инжектированных носителей и определяется в основном свойствами материала и условиями поляризации. При типичных значениях относительной диэлектрической проницаемости полимеров и плотности пространственного заряда Q = 10^{-7}–10^{-6} Кл/см величина внутреннего поля составляет:

$$E_{\text{int}}^{el} = \frac{Q}{\varepsilon\varepsilon_0} \sim (3-6)\times 10^5 \text{ В/см}.$$

Полученные значения внутреннего электрического поля по порядку величины согласуются с современными оценками пространственного заряда и полевой дисторсии в полимерных диэлектриках, представленными в ряде экспериментальных и модельных работ [1, 7, 13].

В этих условиях параметр полевого баланса находится в диапазоне:

$$\eta = 0{,}2-0{,}5,$$

что соответствует режиму частичной компенсации внешнего электрического поля. Эффективное поле переноса уменьшается, однако остается достаточным для обеспечения проводимости, и снижение электропроводности носит умеренный характер.

В фотоэлектретном режиме дополнительное оптическое воздействие приводит к генерации фотоиндуцированных носителей заряда, часть которых захватывается ловушками и усиливает пространственный заряд. В результате внутренняя напряженность электрического поля возрастает и может достигать значений:

$$E_{\text{int}}^{ph} \sim (7-10)\times 10^5 \text{ В/см},$$

что соответствует диапазону:

$$\eta = 0{,}6-1{,}1.$$

При таких значениях параметра η эффективное электрическое поле переноса существенно снижается, а в ряде случаев практически компенсируется внутренним электретным полем. Это приводит к резкому уменьшению электропроводности и проявлению эффекта фотогашения.

Сравнительный анализ показывает, что ключевым отличием фотоэлектретного режима является динамический характер параметра η. В отличие от электретного режима, где η_{el} определяется условиями предварительной поляризации и остается практически постоянным, в фотоэлектретном режиме величина η_{ph} может управляться за счет интенсивности и времени оптического воздействия. Это позволяет целенаправленно изменять степень компенсации внешнего поля и, следовательно, электрические свойства материала в процессе обработки.

Для иллюстрации принципиального различия между электретным и фотоэлектретным режимами электронной обработки и наглядного представления управляемости параметра полевого баланса на рис. 2 приведена расчетная зависимость параметра η от интенсивности оптического излучения. Для электретного режима параметр η сохраняет практически постоянное значение, тогда как в фотоэлектретном режиме наблюдается его монотонный рост с увеличением интенсивности освещения.

Как видно из рис. 2, в фотоэлектретном режиме увеличение интенсивности оптического излучения приводит к росту параметра η вплоть до значений, соответствующих практически полной компенсации внешнего электрического

Таблица 2. Сравнительная характеристика электретного и фотоэлектретного режимов электронной обработки полимерных материалов

Параметр	Электретный режим	Фотоэлектретный режим
Источник формирования внутреннего поля	Захват инжектированных носителей заряда при действии внешнего электрического поля	Захват инжектированных и фотоиндуцированных носителей при совместном воздействии поля и света
Характер электретного состояния	Квазистатический	Динамический
Внутреннее электрическое поле E_{int}	(3–6)×10^5 В/см	(7–10)×10^5 В/см
Параметр полевого баланса $\eta = E_{\text{int}} / E_{ext}$	0,4–0,6	0,7–1,1
Эффективное поле переноса E_{eff}	Частично компенсировано	Существенно компенсировано или подавлено
Изменение электропроводности	Умеренное снижение	Резкое снижение, вплоть до фотогашения
Управляемость режима	Ограниченная (задается условиями поляризации)	Высокая (управление интенсивностью и временем освещения)
Обратимость изменений	Частичная	Высокая
Эффективность как метод электронной обработки	Ограниченная	Высокая

поля, что обусловливает более выраженное снижение электропроводности по сравнению с электретным режимом.

Анализ изменения относительного сопротивления показывает, что в электретном режиме отношение R_f/R_0 увеличивается, как правило, не более чем на один порядок, тогда как в фотоэлектретном режиме рост сопротивления может достигать одного–двух порядков. Нелинейный характер изменения электропроводности подтверждает доминирующую роль внутренних электрических полей и процессов захвата носителей заряда на ловушки, а не простого изменения их концентрации.

Для наглядного сопоставления электретного и фотоэлектретного режимов электронной обработки и обобщения полученных расчетных результатов выполнено их сравнительное представление по основным физическим и электрическим параметрам. Основные характеристики электретного и фотоэлектретного режимов приведены в табл. 2 [1, 3].

Таким образом, сравнительный анализ демонстрирует, что электретный режим соответствует квазистатическому режиму электронной обработки с ограниченной степенью управления, тогда как фотоэлектретный режим является более эффективным инструментом электронной обработки полимерных материалов, обеспечивающим динамическое управление внутренним электрическим полем и электрическими свойствами за счет оптического воздействия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе выполнен сравнительный анализ электретного и фотоэлектретного режимов электронной обработки полимерных материалов на основе физической модели перераспределения электрического поля и электронных процессов переноса заряда. Показано, что оба режима связаны с формированием пространственного заряда и внутреннего электрического поля, однако существенно различаются механизмами его формирования и степенью влияния на электрические свойства материала.

Установлено, что в электретном режиме внутренняя напряженность электрического поля формируется преимущественно за счет захвата инжектированных носителей заряда и носит квазистатический характер. При этом параметр полевого баланса η принимает значения, соответствующие частичной компенсации внешнего электрического поля, что приводит лишь к умеренному снижению электропроводности полимерных материалов.

Показано, что фотоэлектретный режим характеризуется усилением внутреннего электрического поля за счет захвата фотоиндуцированных носителей заряда, что приводит к росту параметра полевого баланса вплоть до значений, при которых эффективное поле переноса существенно подавляется. В результате в фотоэлектретном режиме наблюдается более выраженное снижение электропроводности, вплоть до проявления эффекта фотогашения, что подтверждает его более высокую эффективность по сравнению с электретным режимом (табл. 2).

Сравнительный анализ показал, что принципиальным преимуществом фотоэлектретного режима является его динамическая управляемость, обусловленная возможностью регулирования зарядового состояния и внутреннего

электрического поля за счет параметров оптического воздействия. Это расширяет функциональные возможности электронной обработки полимерных материалов и позволяет целенаправленно модифицировать их электрические свойства без изменения химического состава [1, 7, 13–15].

Таким образом, электретный режим может рассматриваться как квазистатический режим электронной обработки с ограниченной степенью управления, тогда как фотоэлектретный режим является более эффективным и гибким инструментом электронной обработки полимерных материалов, что делает его перспективным для применения в функциональных и изоляционных полимерных системах [14–15].

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Montanari, G.C., and Fabiani, D., Charge transport and trapping in polymeric insulating materials, *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2018, vol. 34, no. 6, p. 7.
2. Li, S., Min, D., Wang, W., and Chen, G., Linking traps to dielectric breakdown through charge dynamics, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2016, vol. 23, no. 5, p. 2777.
3. Zhang, C., Wang, X., and Wu, J., Space charge behavior in polymer dielectrics under electric field and illumination, *Journal of Applied Physics*, 2019, vol. 125, art. ID 245101.
4. Hassan, M.M., El-Nemr, K.F., and El-Megeed, A.A., Effect of gamma radiation on physico-mechanical properties of vulcanized natural rubber/carbon fiber composites, *Journal of Elastomers & Plastics*, 2016, vol. 48, no. 8, p. 677.
5. Alarifi, I.M., A comprehensive review on advancements of elastomers for engineering applications, *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2023, vol. 6, no. 4, p. 451. https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.05.001
6. Tanaka, T., Montanari, G.C., and Mulhaupt, R., Polymer nanocomposites as dielectrics and electrical insulation, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2004, vol. 11, no. 5, p. 763.
7. Fabiani, D., and Montanari, G.C., The role of space charge in polymeric insulation ageing, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, vol. 25, no. 5, p. 1479.
8. Lipińska, M., and Imiela, M., Morphology, rheology and curing of EPDM/HNBR blends reinforced by POSS and organoclay, *Polymer Testing*, 2019, vol. 75, p. 26. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.01.020
9. Zaharescu, T., and Dumitru, A., Radiation crosslinking and degradation of elastomers: recent advances, *Radiation Physics and Chemistry*, 2021, vol. 182, art. ID 109379. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109379
10. Clough, R.L., High-energy radiation and polymers: a review of modification mechanisms, *Progress in Polymer Science*, 2020, vol. 101, art. ID 101198. https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2019.101198
11. Chapiro, A., Radiation chemistry of polymeric systems and crosslinking processes, *Radiation Physics and Chemistry*, 2020, vol. 169, art. ID 107962. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.107962
12. Bhatnagar, A., et al., Gamma radiation effects on mechanical and thermal properties of rubber composites, *Polymer Testing*, 2022, vol. 108, art. ID 107489. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107489
13. Kwon, S.J., and Lee, J., Structure–property relationships in radiation-cured elastomers, *Journal of Applied Polymer Science*, 2023, vol. 140, art. ID e53721. https://doi.org/10.1002/app.53721
14. Mammadov, S.M., Rzayeva, S.V., Mehdiyeva, R.H., Akhundzada, H.N., et al., Structural parameters and dynamical properties of the radiative and peroxide vulcanizates based on EPM participation. *American Journal of Polymer Science*, 2016, vol. 6, no. 1, p. 12. https://doi.org/10.5923/j.ajps.20160601.02
15. Mamedov, S.M., Ahmedov, E.N., Rzayeva, S.V., Modified ethylene-propylene rubbers with unsaturated rubbers and low-molecular reactive compounds. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2024, vol. 60, no. 6, p. 883. https://doi.org/10.3103/S1068375524700492

Summary

This study presents a comparative analysis of electret and photoelectret modes in the electronic processing of polymer materials. Those modes are considered to be different mechanisms of the space charge formation and internal electric field generation, which determine charge carrier transport conditions and the electrical properties of materials. For quantitative comparison, a model of an electric field redistribution is proposed with an introduction of a field balance parameter characterizing the ratio between internal and external electric fields. It is shown that in the electret mode, a quasi-static internal field is formed, leading to partial compensation of the external field and a moderate decrease in electrical conductivity. In the photoelectret mode, optical stimulation enhances space charge and the internal electric field, resulting in a significant suppression of the effective transport field and the manifestation of photoconductivity quenching. It is demonstrated that the photoelectret mode is a more efficient and controllable tool for the electronic processing of polymer materials.

Keywords: electronic processing of materials, polymer materials, electret mode, photoelectret mode, space charge, electrical conductivity