

Синтез и переработка полимеров и композитов на их основе Synthesis and processing of polymers and polymeric composites

УДК 655.026

<https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-4-350-359>

EDN EZTLUE



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Применение межслойной перфорации и закладки прозрачных элементов в технологии дублированных декоративных полимерных пленок

А.А. Николаев✉, А.П. Кондратов

Московский политехнический университет, Москва, 127008 Россия

✉ Автор для переписки, e-mail: nikolaevaleksandr1992@gmail.com

Аннотация

Цель. Исследовать технологии многослойных пленок из прозрачных термопластичных полимеров, способы модификации их надмолекулярной структуры, а также изучить их оптические свойства с помощью оптико-поляризационных методов для использования модифицированных пленок в качестве декоративных и дизайнерских материалов в современной архитектуре.

Методы. Объектами исследования являлись промышленные образцы пленок полистирола, полиэтилена низкой плотности, полипропилена и поливинилхлорида различных производителей («Дон Полимер», «Вектор» и «Сибур»). Оптические свойства пленок исследовали с помощью спектрофотометрии в поляризованном потоке света. Для модификации надмолекулярной структуры полимеров поверхности пленок обрабатывали в изометрических условиях летучими растворителями или их водными растворами. Части слоев многослойных пленок удаляли высечкой штанцевым ножом с помощью пресса или ручным устройством для перфорации полиграфических материалов.

Результаты. Получены спектральные характеристики многослойных пленок из нескольких прозрачных термопластичных полимеров в поляризованном потоке света. Показаны возможности получения широкой палитры цветов и контрастных изображений механическим удалением части слоев многослойных пленок. Обнаружен эффект «псевдоисчезновения» внешнего слоя при обработке пакета пленок в изометрических условиях летучими растворителями или их водными растворами.

Выводы. На примере крупнотоннажных термопластов показано, что сочетанием технологических приемов сборки, перфорирования и локальной пластификации пленок из прозрачных термопластичных полимеров можно решать задачи создания многоцветных материалов с эффектом плеохроизма для различных сфер деятельности человека. Возможность скрытого кодирования информации на многослойных упаковочных материалах, ее визуализации и инструментального считывания в поляризованном свете подтверждена достаточным цветовым отличием и контрастом в 150 и 60 единиц соответственно. Показана возможность получения нескольких монохромных тонов различной светлоты и яркости варьированием числа слоев или перфорацией пленок в многослойных материалах.

Ключевые слова

двойное лучепреломление, интерференционное изображение, модификация, термоусадочные пленки, внутренние напряжения, надмолекулярная структура

Поступила: 28.02.2023

Доработана: 27.12.2023

Принята в печать: 21.06.2024

Для цитирования

Николаев А.А., Кондратов А.П. Применение межслойной перфорации и закладки прозрачных элементов в технологии дублированных декоративных полимерных пленок. *Тонкие химические технологии*. 2024;19(4):350–359. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-4-350-359>

RESEARCH ARTICLE

Application of interlayer perforation and installation of transparent elements in the technology of duplicated decorative polymer films

Alexander A. Nikolaev✉, Alexander P. Kondratov

Moscow Polytechnic University, Moscow, 127008 Russia

✉ Corresponding author; e-mail: nikolaevaleksandr1992@gmail.com

Abstract

Objectives. To develop technologies for producing multilayer films of transparent thermoplastic polymers; to study methods of modifying their supramolecular structure; and to determine their optical properties by means of optical-polarization methods for the use of modified films as decorative and design materials in modern architecture.

Methods. Industrial samples of polystyrene, low-density polyethylene, polypropylene, and polyvinyl chloride films from various manufacturers (*Don Polimer*, *Vektor*, and *Sibur*) were the objects of the study. The optical properties of the films were studied by means of polarized-light spectrophotometry. In order to modify the supramolecular structure of the polymers, the surfaces of the films were treated under isometric conditions with volatile solvents or their aqueous solutions. Parts of the layers of multilayer films were removed by cutting with a punching knife using a press or with a manual device for perforating printing materials.

Results. The spectral characteristics of multilayer films of several transparent thermoplastic polymers in polarized light were determined. The study showed that a wide palette of colors and contrasting images can be obtained by mechanically removing part of the layers of multilayer films. The phenomenon of pseudo-disappearance of the outermost layer was discovered after treatment of a stack of films under isometric conditions with volatile solvents or their aqueous solutions.

Conclusions. Based on the example of large-scale production thermoplastics, it was shown that a combination of technological methods of stacking, perforation, and local plasticization of films of transparent thermoplastic polymers can produce pleochroic multicolor materials for a range of human activities. The possibility of hidden coding of information on multilayer packaging materials, and its visualization and instrumental reading in polarized light was confirmed by color differential and contrast of 150 and 60 units, respectively. It was also shown that several monochrome tones of different lightness and brightness can be obtained by varying the number of layers or perforating the films in multilayer materials.

Keywords

birefringence, interference image, modification, shrink films, internal stresses, supramolecular structure

Submitted: 28.02.2023

Revised: 27.12.2023

Accepted: 21.06.2024

For citation

Nikolaev A.A., Kondratov A.P. Application of interlayer perforation and installation of transparent elements in the technology of duplicated decorative polymer films. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2024;19(4):350–359. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2024-19-4-350-359>

ВВЕДЕНИЕ

Известные оптические эффекты в поляризованном свете в виде яркой цветной окраски чередующихся полос, возникающих в прозрачных полимерных телах, при наличии механических напряжений позволяют прогнозировать их разрушение и/или контролировать допустимый уровень нагрузки при эксплуатации [1–2]. Этот практически важный и эффективный прием неразрушающего контроля и механического испытания моделей из прозрачных материалов применяется при конструировании сложных деталей машин и строительных

конструкций. Другим важным применением цветных оптических эффектов в поляризованном свете в прозрачных полимерах является технология скрытой маркировки упаковки [3] и создание цветных ярлыков, многослойных этикеток и других элементов оригинальных полимерных изделий для их защиты от подделки. Преимущества таких технологий заключаются в получении привлекающих внимание цветных эффектов на изделиях и упаковке без использования токсичных красителей и пигментов, возможности вторичной переработки использованных по назначению изделий и упаковки из термопластичных полимерных материалов, налаженном

производстве исходного сырья (крупнотоннажных полимеров) [4].

Цвета, возникающие в результате взаимодействия света с пространственно-упорядоченными или квазиаморфными наноструктурами или микроструктурами, называют структурными цветами [5]. Такие цвета широко встречаются в природе у различных насекомых, растений и животных [6, 7]. Структурные цвета с широкой палитрой оттенков появляются и в прозрачных полимерных пленках с высоким уровнем внутренних напряжений при прохождении сквозь них поляризованного света. Чувствительность структурного цвета пленок из крупнотоннажных термопластов к тепловому воздействию весьма специфична, зависит от наличия в них низкомолекулярных ингредиентов и особенностей технологии формирования пленок, что незначительно увеличивает их себестоимость, но существенно расширяет область применения [8].

Внутренние напряжения в полимерных изделиях и пленках являются естественным следствием технологии их производства [9]. В производстве тонкой полимерной пленки применяют экструзию и фильерную вытяжку расплава с последующей ориентацией эластичной заготовки, в процессе которой в пленке фиксируются внутренние напряжения. Таким образом получают одномерные анизотропные термоусадочные этикетки и двуосноориентированные пленки из термопластов: полипропилена, полиэтилена, поливинилхлорида и полиамидов [10, 11]. Комбинация и дублирование этих материалов открывает новые возможности практического применения в различных отраслях промышленности и строительства, в том числе за счет многообразия оптических эффектов [12], обусловленных преломлением, отражением, поляризацией и интерференцией естественного дневного и искусственного света, являющегося совокупностью многофазного электромагнитного излучения [13].

Известно, что интенсивность белого света после прохождения через прозрачную систему «поляризатор — напряженные структуры — поляризатор» можно определить выражением

$$I = \sin^2 2\alpha \sum I_{\lambda} \sin^2 \frac{\Phi_{\lambda}}{2},$$

где I — интенсивность света; α — угол между осью поляризации и вектором падающего света; I_{λ} — интенсивность света длины волны из спектра; Φ_{λ} — разность хода длины волны из спектра излучения [1].

Разность фаз в точке наблюдения сквозь пленку светящихся и отражающих свет объектов зависит от внутренних напряжений и обуславливает эффект плеохроизма, т.е. зависимости их цвета от взаимного расположения относительно источника излучения и наблюдателя. Плеохроизм предложено использовать для создания новых способов защиты от подделки изделий из прозрачных полимеров и идентификации оригинальной продукции по упаковке, а также в производстве декоративных световых панелей и прозрачных элементов интерьера помещений [14, 15].

Цель работы — исследовать рецептурно-технологические приемы управления эффектом плеохроизма в многослойных полимерных материалах из термопластичных полимеров и обосновать возможность использования их для скрытой записи информации путем штрихового кодирования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследования являлись промышленные образцы бесцветных прозрачных термоусадочных пленок из термопластичных карбоцепных полимеров российского производства — полиэтилена низкой плотности толщиной 50 ± 2 мкм, полипропилена толщиной 30 ± 1.5 мкм марки Biaxplen HGPL (Сибур-Биакспен, Россия), поливинилхлорида 50 ± 2 мкм (Дон-Полимер, Россия), полистирола 60 ± 2 мкм (Вектор, Россия).

Эксперименты по исследованию эффекта двойного лучепреломления проводились на лабораторном стенде (рис. 1), предназначенном для фотографирования и оптических измерений в проходящем поляризованном свете. В качестве источника излучения использовалась лента диодов с цветовой температурой проходящего светового потока (6500 К) и нелинейной спектральной характеристикой (рис. 2). Светодиодная лента размещена по периметру герметичного короба с прозрачным «окном» из силикатного стекла, на котором располагался пленочный линейный поляризатор фирмы Nitto Denko (Япония). После прохождения сквозь поляризатор и анализатор в скрещенном положении спектр излучения можно считать монотонным или линейным [1, 13] (рис. 2).

Для получения спектральных характеристик источника излучения, поляризационных пленок и пакетов термоусадочных пленок до и после внешних воздействий, использовали спектрофотометр X-Rite i1Pro (X-Rite Incorporated, США) с модулем командной строки spotread из программного обеспечения ArgyllCMS¹ версии 2.3.0. При измерении

¹ <https://www.argyllcms.com/>. Дата обращения 08.02.2023. / Accessed February 8, 2023.

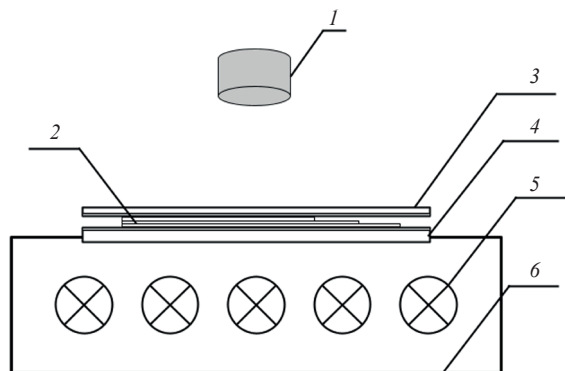


Рис. 1. Схема стенда для получения спектральных характеристик образцов пленки (1) спектрофотометр; (2) образец пленки или пакет пленок (стопа Столетова); (3) подвижный поляризатор; (4) неподвижный поляризатор; (5) лента светодиодов по периметру камеры; (6) герметичная камера

Fig. 1. Schematic of a setup for measuring the spectral characteristics of film samples: (1) spectrophotometer, (2) a film sample or a stack of films (Stoletov's stack), (3) movable polarizer, (4) fixed polarizer, (5) light-emitting diode (LED) strip around the perimeter of the camera, and (6) sealed chamber

использовался режим «высокого разрешения» (шаг измерений равен 3.333 нм). Характеристики излучения и цвет проходящего потока света записывались в единицах энергетической яркости — ватт настерадиан на квадратный метр на нанометр ($\text{mW}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{nm})$). Спектрофотометр также использовался для оценки контраста изображений, видимых в поляризованном свете, и для получения координат цвета в системе CIE Lab², используемых для вычисления цветового отличия ΔE_{ab} :

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2},$$

где L^* — светлота; a^* — координаты красно-зеленого оттенка; b^* — координаты желто-синего оттенка.

Из спектральных коэффициентов пропускания различных участков многослойных пленок были рассчитаны координаты цвета в пространстве XYZ, где Y является яркостной составляющей. Затем вычитанием из одного значения Y_1 второго значения Y_2 для смежного участка получено значение контраста символов.

Изменение внутренних напряжений в образцах полимерных пленок проводилось пластификацией путем локальной обработки активными растворителями и их водными растворами (тетрагидрофуран,

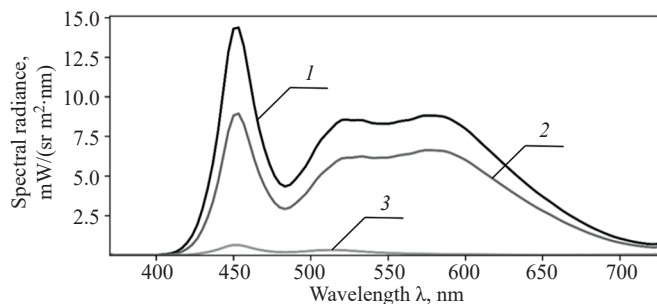


Рис. 2. Спектральные энергетические яркости светодиодной ленты. (1) Спектр света источника излучения; (2) спектр света через два линейных поляризатора с взаимно параллельными осями поляризации; (3) спектр света через два линейных поляризатора с взаимно перпендикулярными осями поляризации

Fig. 2. Spectral radiances of the LED strip: (1) light spectrum of the radiation source, (2) light spectrum through two linear polarizers with mutually parallel polarization axes, and (3) light spectrum through two linear polarizers with mutually perpendicular polarization axes

ацетон, метилформамид (Россия)). Для термообработки использовали лабораторные аппараты для сварки полимерных пленок различной конструкции [16].

Визуально цветные эффекты фиксировали с помощью фотоаппарата Nikon D7000 (Nikon, Япония).

Из выбранных полимерных материалов собирались пакеты пленок в форме стопы Столетова с высечкой части слоев или добавлением плоских прозрачных элементов, как в монополимерном исполнении, так и используя комбинацию пленок из разных термопластов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для получения и количественной оценки эффекта плеохроизма образцы пленок разрезались на ленты различной длины шириной 30 мм вдоль (или поперек) направления намотки рулона и укладывались друг на друга в стопы Столетова. Для подготовки пакета из пленок использовали от 2 до 14 слоев, т.к. при наложении большего количества слоев пленки существенно снижается интенсивность проходящего света и точность измерений [12].

Максимальный радужный эффект обнаружен на пленках аморфных стеклообразных полимеров

² CIE Lab — это цветовое пространство, определенное Международной комиссией по освещению (CIE) в 1976 г. [CIE Lab is a color space defined by the International Commission on Illumination (CIE) in 1976.]

поливинилхлорида и полистирола. Пленки эластичных кристаллизующихся полимеров показали менее яркие и менее многоцветные палитры цветов. Меньшая яркость цветов в пакетах полиэтилена обусловлена, по-видимому, снижением уровня внутренних напряжений в материалах вследствие релаксации при хранении. Для каждого полимера и пакета пленок установлены оригинальный цвет при наблюдении под прямым углом, порядок смены цвета и изменения светлоты оттенков, периодичность возникновения и чередование гаммы цветов (табл. 1). Для пленок поливинилхлорида и полистирола — цвет и светлота повторяются через 2–3 слоя. В пакетах пленок полиэтилена низкой плотности и полипропилена изменения цвета происходят через каждый слой.

Для практического применения результатов спектрофотометрии многослойных пленок из всех исследованных полимеров на диаграмме цветности (рис. 3) установили точки с координатами цвета.

Воздействие активных растворителей, вызывающих пластификацию полимеров и снижение внутренних напряжений в пленках влияет на палитру цвета пакета пленок из аморфных стеклообразных полимеров — поливинилхлорида и полистирола. Причиной изменения цвета пакета пленок в поляризованном свете является изменение внутренних напряжений этих полимеров вследствие пластификации [17]. Даже кратковременное воздействие растворителя (несколько минут) на поверхность пленки привело к заметному локальному изменению цвета пакета пленок (рис. 4). В многослойных образцах на участках контакта пленки с жидкостью проявляются цвета смежных внутренних слоев, которые

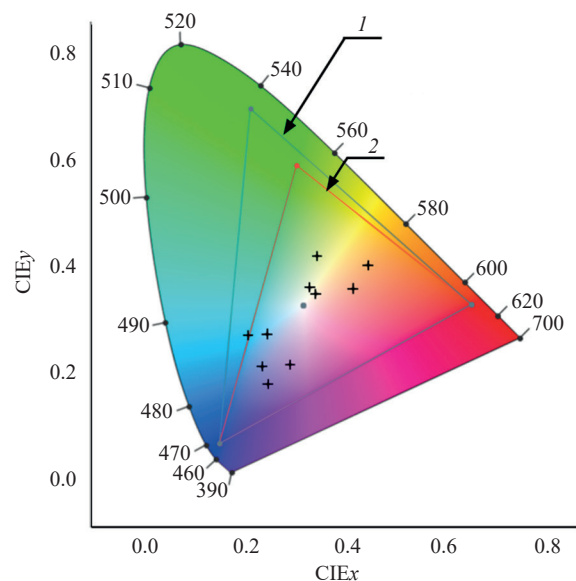


Рис. 3. Положения цветов пакета пленки поливинилхлорида на диаграмме цветности CIExy: (1) цветовой охват системы Adobe RGB (1998); (2) цветовой охват системы sRGB

Fig. 3. Positions of colors of a polyvinyl chloride film stack on the CIExy chromaticity diagram: (1) Adobe RGB (1998) color gamut and (2) sRGB color gamut

находятся под внешним слоем, сорбирующем некоторое количество растворителя. Такое явление можно назвать «псевдоисчезновением» внешнего слоя многослойной пленки. После испарения растворителя этот локальный оптический эффект сохраняется длительное время, что свидетельствует о необратимом снижении внутренних напряжений.

Воздействие растворителей на цвет пленки можно использовать в технологии специальных

Таблица 1. Цвета пленок при наблюдении под прямым углом

Table 1. Film colors when observed at a right angle

Полимер Polymer	Палитра цветов Color palette
Поливинилхлорид Polyvinyl chloride	
Полистирол Polystyrene	
Полиэтилен низкой плотности Low-density polyethylene	
Полипропилен Polypropylene	

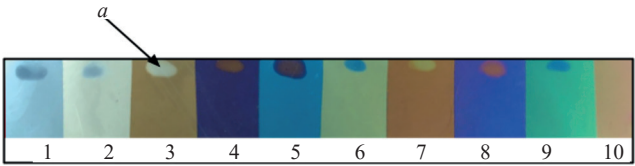


Рис. 4. Воздействие растворителя на пленку ПВХ в участках *a*. Цифрами 1–10 показано количество слоев по возрастанию

Fig. 4. Exposure of a PVC film to the solvent in areas *a*. The numbers 1–10 show the number of layers in ascending order

ликвочувствительных материалов для защищенной полиграфии. Прием смачивания поверхности отпечатков из специальных водо- и ликвочувствительных материалов тестовыми жидкостями или растворами для проверки подлинности банкнот и документов является одним из способов их оперативного визуального контроля [18].

Правомерно предположить, что при просвечивании пакета в верхнем внешнем слое пленки не происходит никаких изменений в направлении и фазах светового пучка, как при отсутствии пленки в этом месте. Это так называемое «псевдоисчезновение» внешнего слоя из пакета прозрачных пленок. Поскольку интерференционная картина возникает при прохождении поляризованного света через среду с внутренними напряжениями, можно предположить, что в пленке после контакта с растворителем внутренние напряжения отсутствуют, или их уровень существенно снижается и недостаточен для изменения характеристик проходящего света. Для подтверждения этого предположения о физической сущности эффекта «псевдоисчезновения» в многослойном пакете рядом с местом нанесения капли пластифицирующей жидкости специально

вырезались фрагменты пленок, расположенных внутри и на поверхности в разных слоях. Проходящий поляризованный свет пакета пленок с перфорацией слоев приводил к такому же эффекту, что и воздействие на пленку летучего растворителя — пластификатора.

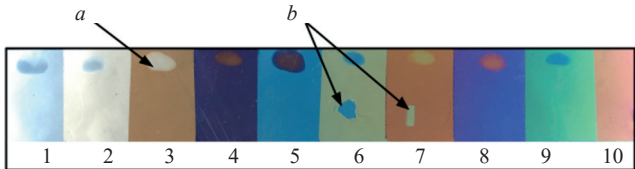


Рис. 5. Кратковременное локальное воздействие на пленку растворителя *a* и высечка одного слоя пленки *b*

Fig. 5. Short-term local exposure of a film to solvent in areas *a* and cutting of one layer of film in areas *b*

Перфорация пленок имеет важное технологическое и эксплуатационное преимущество перед обработкой растворителем. Перфорировать можно не только и не столько внешние слои пленок многослойных материалов, а любые внутренние. При перфорировании внутренних слоев многослойный материал со скрытым от «невооруженного глаза» изображением или текстом будет обладать большей прочностью и устойчивостью к внешним воздействиям при его использовании, например, в качестве товарной упаковки.

Для практического использования данного эффекта надо установить, между какими слоями следует удалять часть пленки, чтобы получить максимальное цветовое отличие смежных участков. Для количественной оценки применяли формулу цветового отличия CIE76 [3]. Для каждой из пленок выявлены максимальные значения цветового отличия и количество слоев, при котором оно возникает (табл. 2).

Таблица 2. Цветовое отличие между смежными слоями

Table 2. Color difference between adjacent layers

Материал полимерной пленки Material of polymer film	Цветовое отличие _{max} Color difference _{max}	Слои Layers
Полистирол Polystyrene	150	Между 10 и 5 слоями Between layer 10 and layer 5
Поливинилхлорид Polyvinyl chloride	126	Между 10 и 8, 8 и 6 слоями Between 10 and 8, 8 and 6 layers
Полипропилен Polypropylene	125	Между 4 и 3 слоями Between layer 4 and layer 3
Полиэтилен низкой плотности Low-density polyethylene	117	Между 9 и 8 слоями Between layer 9 and layer 8

Таблица 3. Контрасты участков градиентного цвета пленки полиэтилена**Table 3.** Contrasts of gradient color areas of a polyethylene film

Сравниваемые участки многослойного пакета Compared areas of multilayer stack	1–3	1–5	3–5	2–4	2–6	4–6	7–9
Контраст Contrast	44	48	12	29	23	9	11

Такие показатели цветового отличия многократно превышают пороговое значение, которое способен различить глаз человека $\Delta E \approx 2-3$ [12]. Эти количественные оценки подтверждаются визуально, т.к. кривые светлоты или яркости этих цветов различны. Для решения задач скрытой маркировки многослойных пленок, предназначенных для упаковки и защиты от подделки дорогостоящей оригинальной продукции [12, 18], важнее всего сравнить цветовые показатели между оттенками одного цвета. Так, например, для пленок полиэтилена низкого давления с повторяющимися цветами составлена таблица контрастов участков многослойной пленки одного цвета спектра, но различных тонов (градиентный цвет) (табл. 3).

Цвета таких участков пленки выглядят одинаковыми, но их цветовое отличие (ΔE) многократно превышает разрешающую способность глаза человека. Это цветовое отличие установлено для всех исследованных в данной работе полимерных материалов.

Таблица 4. Максимальные значения контраста смежных участков**Table 4.** Maximum contrast values of adjacent areas

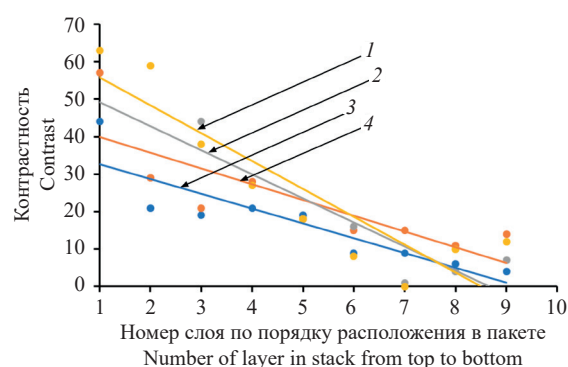
Материал полимерной пленки Material of polymer film	Контраст _{max} Contrast _{max}	Слой Layers
Полиэтилен низкой плотности Low-density polyethylene	44	Между 1 и 2 слоями Between layer 1 and layer 2
Полистирол Polystyrene	46	Между 10 и 3 слоями Between layer 10 and layer 3
Поливинилхлорид Polyvinyl chloride	57	Между 1 и 2 слоями Between layer 1 and layer 2
Полипропилен Polypropylene	63	Между 1 и 2 слоями Between layer 1 and layer 2

Наличие нескольких оттенков одного цвета, получаемого в материалах из одного полимера, но с различным числом слоев, расширяет художественные возможности для создания тонового изображения.

Еще одним важным показателем многослойных пленок, предназначенных для маркировки, является контраст смежных участков пленки с разным числом слоев или мест высечки. Контрастность изображения — отличная от цветового отличия величина, которая показывает разницу между двумя параметрами [19].

Для рассматриваемых пакетов пленок, собранных в стопе Столетова (рис. 3), был рассчитан контраст (табл. 4).

Можно заметить (рис. 6), что для большинства исследованных полимерных пленок максимальный контраст возникает в пакете между 1 и 2 слоями, что весьма важно для применения в производстве двуслойных материалов с высококонтрастными защитными элементами. Видно, что контраст смежных участков в многослойных пленках падает по мере увеличения числа слоев (рис. 6). При этом лидирует по показателям контраста пленка из полипропилена марки Biaxplen HGPL (*Biaxplen*, Россия), предназначенная для упаковки пищевых продуктов и диетических продуктов питания для детей.

**Рис. 6.** Контраст цвета смежных слоев пленок из термопластичных полимеров: (1) полипропилен; (2) полистирол; (3) поливинилхлорид; (4) полиэтилен**Fig. 6.** Color contrast of adjacent layers in films of thermoplastic polymers: (1) polypropylene, (2) polystyrene, (3) polyvinyl chloride, and (4) polyethylene

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере крупнотоннажных термопластов показано, что путем сочетания технологических приемов сборки, перфорирования и пластификации пленок из прозрачных термопластичных полимеров можно решать задачи создания цветных материалов для применения в различных сферах деятельности человека: архитектуре и строительстве при создании витражей и многоцветных театральных декораций, в производстве многослойных светофильтров, розничной торговле для кодирования и защиты товарной упаковки от подделки. Многослойные полимерные материалы, изменяющие окраску в поляризованном свете в зависимости от расположения поляризаторов, направления проходящего потока и положения наблюдателя (эффект плеохроизма), собираются из пленок стеклообразных аморфных и аморфно-кристаллических полимеров с высоким уровнем внутренних напряжений. Изменение уровня внутренних напряжений в пленках без изменения их габаритных размеров может быть произведено с помощью обработки внешних слоев полимерных пленок жидкими летучими растворителями или пластификаторами. Снижение уровня внутренних напряжений во внешних слоях дублированных полимерных материалов из N пленок после воздействия пластификаторов, обуславливающее смену цвета пакета пленок в поляризованном свете на цвет материалов из $N - 1$ слоев пленок, получило название эффекта «псевдоисчезновения» внешнего слоя и является основой нового технологического приема

в производстве декоративных полимерных материалов и художественных произведений.

«Псевдоисчезновение» внешнего и перфорация внутренних слоев обуславливают значительное цветовое отличие и контраст смежных участков пакета пленок, достигающих 150 и 60 единиц соответственно. Установленные значения контраста достаточны для скрытого штрихового кодирования прозрачной упаковки товаров, идентифицируемой в поляризованном свете.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта им. В.Е. Фортова (II очередь) Московского Политехнического университета.

Acknowledgments

This work was financially supported by the Moscow Polytechnic University within the framework of the Vladimir Fortov grant.

Вклад авторов

А.А. Николаев — планирование эксперимента, проведение исследований, сбор и представление материала, написание статьи.

А.П. Кондратов — анализ результатов эксперимента, редактирование текста статьи.

Authors' contributions

A.A. Nikolaev — planning the experiment, carrying out the study, collection and provision of the material, writing the article.

A.P. Kondratov — writing the article, scientific editing.

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

The authors declare no conflicts of interest.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров А.Я., Ахметзянов М.Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. Москва: Наука; 1973. 576 с.
2. Марков А.В., Лобанов В.Н. Синтез и переработка полимеров и композитов на их основе. *Тонкие химические технологии*. 2022;17(1): 65–75. <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-1-65-75>
3. Николаев А.А., Ермакова И.Н., Кондратов А.П. Диапазон варьирования цвета многослойных защитных элементов упаковки из полимеров идентифицируемой в поляризованном свете. *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2017;(12-2):78–88.
4. Иванова Н.Г., Иванчев С.С., Домарева Н.М. Влияние условий синтеза на состав и композиционную неоднородность поли-(стирол-блок-метилметакрилатов), получаемых радикальной полимеризацией, иницированной полифункциональными перекисными инициаторами. *Высокомолекулярные соединения. Серия А*. 1976;18(12):2788–2792. URL: http://polymsci.ru/static/Archive/1976/VMS_1976_T18_12/VMS_1976_T18_12_2788-2792.pdf
5. Lim Y.-S., Kim J.S., Choi J.H., Kim J.M., Shim T.S. Solvatochromic discrimination of alcoholic solvents by structural colors of polydopamine nanoparticle thin films. *Colloid Interface Sci. Commun.* 2022;48:100624. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2022.100624>
6. Hsiung B.-K., Siddique R.H., Stavenga D.G., Otto J.C., Allen M.C., Liu Y., Lu Y.-F., Deheyn D.D., Shawkey M.D., Blackledge T.A. Rainbow peacock spiders inspire miniature super-iridescent optics. *Nat. Commun.* 2017;8(1):2278. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02451-x>
7. Teyssier J., Saenko S.V., van der Marel D., Milinkovitch M.C. Photonic crystals cause active colour change in chameleons. *Nat. Commun.* 2015;6:6368. <https://doi.org/10.1038/ncomms7368>
8. Wen X., Lu X., Li J., Wei C., Qin H., Liu Y., Yang S. Multi-responsive, flexible, and structurally colored film based on a 1D diffraction grating structure. *iScience*. 2022;25(4):104157. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104157>
9. Kondratov A.P., Cherkasov E.P., Paley V., Volinsky A.A. Recording, storage, and reproduction of information on polyvinylchloride films using shape memory effects. *Polymer*. 2021;13(11):1802. <https://doi.org/10.3390/polym13111802>

10. Власов С.В., Кулезнев В.Н., Марков А.В., Лапин Г.Ф., Марков Н.Г., Донцова Э.П., Блинов Ф.В., Зимин Ю.В. Двухосная ориентация полиамидных пленок. *Пласт. массы*. 1983;(2):41–43.
11. Власов С.В., Марков А.В., Щербакоева Е.А., Чимед Э. Высокоориентированные пленки из полипропилена и полипропиленовых композиций. *Конструкции из композиционных материалов*. 2000;(3):21–25.
12. Kondratov A.P., Yakubov V., Volinsky A.A. Recording digital color information on transparent polyethylene films by thermal treatment. *Appl. Opt.* 2019;58(1):172–176. <https://doi.org/10.1364/AO.58.000172>
13. Shurkliff W.A. *Polarized Light. Production and Use*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press; 1962. 207 p.
14. Kondratov A.P. New materials for light strain-optical panels. *Light & Engineering*. 2014;22(3):74–77.
15. Кондратов А.П., Назаров В.Г., Николаев А.А. *Способ записи и считывания информации на бесцветных прозрачных полимерных пленках*: пат. 2776598 РФ. Заявка № 2021130867; заявл. 22.10.2021; опублик. 22.07.2022. Бюл. № 21.
16. Kondratov A.P., Volinsky A.A., Zhang Yi., Nikulchev E.V. Polyvinylchloride film local isometric heat treatment for hidden 3D printing on polymer packaging. *J. Appl. Polym.* 2016;133(8):43046. <http://doi.org/10.1002/app.43046>
17. Шибяев В.П., Петрухин Б.С., Zubov V.A., Каргин В.А., Платэ Н.А. Влияние длины разветвлений на кристаллизацию и структурообразование полимеров различной микроструктуры. В сб.: *Электронная микроскопия твердых тел и биологических объектов*. М.: Наука; 1969. С. 150.
18. Маресин В.М. *Защищенная полиграфия: справочник*. М.: Флинта; 2019. 640 с.
19. Peli E. Contrast in complex images. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1990;7(10):2032–2040. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.7.002032>

REFERENCES

1. Aleksandrov A.Ya., Akhmetzyanov M.Kh. *Polyarizatsionno-opticheskie metody mekhaniki deformiruemogo tela (Polarization-Optical Methods of Mechanics of Deformable Body)*. Moscow: Nauka; 1973. 576 p. (in Russ.).
2. Markov A.V., Lobanov V.A. Study of the stress state of polycarbonate monolithic sheets using optical-polarization methods. *Tonk. Khim. Tekhnol. = Fine Chem. Technol.* 2022;17(1):65–75 (Russ., Eng.). <https://doi.org/10.32362/2410-6593-2022-17-1-65-75>
3. Nikolaev A.A., Ermakova I.N., Kondratov A.P. Variation range of color multilayer protective packaging elements made of polymers identified in polarized light. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of the TSU. Technical Sciences*. 2017;(12–2):78–88 (in Russ.).
4. Ivanova N.G., Ivanchev S.S., Domareva N.M. Effect of conditions of synthesis on the composition and composition heterogeneity of poly-(styrene-block-methyl methacrylates), obtained by radical polymerization initiated by polyfunctional peroxides. *Polymer Sci. U.S.S.R.* 1976;18(12):3190–3196. [https://doi.org/10.1016/0032-3950\(76\)90434-2](https://doi.org/10.1016/0032-3950(76)90434-2) [Original Russian Text: Ivanova N.G., Ivanchev S.S., Domareva N.M. Effect of conditions of synthesis on the composition and composition heterogeneity of poly-(styrene-block-methyl methacrylates), obtained by radical polymerization initiated by polyfunctional peroxides. *Vysokomolekulyarnye Soedineniya. Seriya A*. 1976;18(12):2788–2792 (in Russ.). URL: http://polymsci.ru/static/Archive/1976/VMS_1976_T18_12/VMS_1976_T18_12_2788-2792.pdf]
5. Lim Y.-S., Kim J.S., Choi J.H., Kim J.M., Shim T.S. Solvatochromic discrimination of alcoholic solvents by structural colors of polydopamine nanoparticle thin films. *Colloid Interface Sci. Commun.* 2022;48:100624. <https://doi.org/10.1016/j.colcom.2022.100624>
6. Hsiung B.-K., Siddique R.H., Stavenga D.G., Otto J.C., Allen M.C., Liu Y., Lu Y.-F., Deheyn D.D., Shawkey M.D., Blackledge T.A. Rainbow peacock spiders inspire miniature super-iridescent optics. *Nat. Commun.* 2017;8(1):2278. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02451-x>
7. Teyssier J., Saenko S.V., van der Marel D., Milinkovitch M.C. Photonic crystals cause active colour change in chameleons. *Nat. Commun.* 2015;6:6368. <https://doi.org/10.1038/ncomms7368>
8. Wen X., Lu X., Li J., Wei C., Qin H., Liu Y., Yang S. Multi-responsive, flexible, and structurally colored film based on a 1D diffraction grating structure. *iScience*. 2022;25(4):104157. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.104157>
9. Kondratov A.P., Cherkasov E.P., Paley V., Volinsky A.A. Recording, storage, and reproduction of information on polyvinylchloride films using shape memory effects. *Polymer*. 2021;13(11):1802. <https://doi.org/10.3390/polym13111802>
10. Vlasov S.V., Kuleznev V.N., Markov A.V., Lapin G.F., Markov N.G., Dontsova E.P., Blinov F.V., Zimin Yu.V. Biaxial orientation of polyamide films. *Plasticheskie Massy*. 1983;(2):41–43 (in Russ.).
11. Vlasov S.V., Markov A.V., Shcherbakova E.A., Chimed E. Highly oriented films from polypropylene and polypropylene compositions. *Konstruktsii iz kompozitsionnykh materialov = Composite Materials Constructions*. 2000;(3):21–25 (in Russ.).
12. Kondratov A.P., Yakubov V., Volinsky A.A. Recording digital color information on transparent polyethylene films by thermal treatment. *Appl. Opt.* 2019;58(1):172–176. <https://doi.org/10.1364/AO.58.000172>
13. Shurkliff W.A. *Polarized Light. Production and Use*. Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press; 1962. 207 p.
14. Kondratov A.P. New materials for light strain-optical panels. *Light & Engineering*. 2014;22(3):74–77.
15. Kondratov A.P., Nazarov V.G., Nikolaev A.A. *Method for Recording and Reading Information on Colorless Transparent Polymer Films*: RF Pat. 2776598. Publ. 07.22.2022. (in Russ.).
16. Kondratov A.P., Volinsky A.A., Zhang Yi., Nikulchev E.V. Polyvinylchloride film local isometric heat treatment for hidden 3D printing on polymer packaging. *J. Appl. Polym.* 2016;133(8):43046. <http://doi.org/10.1002/app.43046>
17. Shibaev V.P., Petrukhin B.S., Zubov V.A., Kargin V.A., Plate N.A. Effect of branching length on crystallization and structure formation of polymers with different microstructures. In: *Elektronnaya mikroskopiya tverdykh tel i biologicheskikh ob'ektov*. Moscow: Nauka; 1969. P. 150. (in Russ.).
18. Maresin V.M. *Zashchishchennaya poligrafiya: spravochnik (Security Printing: Reference Book)*. Moscow: Flinta; 2019. 640 p. (in Russ.).
19. Peli E. Contrast in complex images. *J. Opt. Soc. Am. A*. 1990;7(10):2032–2040. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.7.002032>

Об авторах

Николаев Александр Африканович, преподаватель кафедры «Инновационные материалы принтмедиаиндустрии», Полиграфический институт, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (127008, Россия, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38). E-mail: nikolaevaleksandr1992@gmail.com. Scopus Author ID 57224628186, ResearcherID AHB-3757-2022, SPIN-код РИНЦ 8146-7143, <https://orcid.org/0000-0003-3232-6753>

Кондратов Александр Петрович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Инновационные материалы принтмедиаиндустрии», Полиграфический институт, ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (127008, Россия, Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38). E-mail: apkrezerv@mail.ru. Scopus Author ID 6603924314, SPIN-код РИНЦ 8689-3888, <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>

About the authors

Alexander A. Nikolaev, Lecturer, Department of Innovative Materials of the Print Media Industry, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semenovskaya ul., Moscow, 127008, Russia). E-mail: nikolaevaleksandr1992@gmail.com. Scopus Author ID 57224628186, ResearcherID AHB-3757-2022, RSCI SPIN-code 8146-7143, <https://orcid.org/0000-0003-3232-6753>

Alexander P. Kondratov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Innovative Materials of the Print Media Industry, Moscow Polytechnic University (38, Bolshaya Semenovskaya ul., Moscow, 127008, Russia). E-mail: apkrezerv@mail.ru. Scopus Author ID 6603924314, RSCI SPIN-code 8689-3888, <https://orcid.org/0000-0001-6118-0808>