

Г.А. Исмайлова¹ , М.Б. Умерзакова² , Д.С. Пузикова³ , С.Л. Пешая^{1,3*} 

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г.Алматы, Казахстан

²Институт химических наук им. А.Б. Бектурова, г.Алматы, Казахстан

³Институт топлива, катализа и электрохимии им. Д.В.Сокольского, г. Алматы, Казахстан

*e-mail: peshaya.svetlana@kaznu.kz

ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОЛИИМИДНЫХ ПЛЕНОК

В статье исследованы спектральные характеристики окрашенных полииimidных пленок, содержащих активный ярко-зеленый краситель 4С. Путем применения методов спектрофотометрии и Фурье-ИК-спектроскопии проанализировано влияние концентрации красителя на коэффициенты пропускания и отражения пленок. Экспериментально установлено, что увеличение содержания красителя снижает пропускание в видимой области спектра на 22–25% без изменения положения спектральных максимумов, что свидетельствует о равномерном распределении красителя в матрице без фазовой сегрегации. Показано, что введение красителя 4С приводит к формированию узкой полосы поглощения при 682 нм, что является характерным признаком стабильной окрашенной полимерной структуры. Исследования также подтвердили, что включение красителя способствует ускорению процесса полииimidообразования. Анализ методом ИК-спектроскопии выявил наличие дополнительных полос в области 1500–1000 см⁻¹, что свидетельствует о возможном взаимодействии красителя с полииimidной матрицей. Полученные результаты подтверждают возможность использования окрашенных полииimidных пленок в качестве активных элементов оптических фильтров, сенсоров и лазерных систем. Контроль концентрации красителя позволяет варьировать оптические свойства пленок, что открывает перспективы их применения в фотонике, сенсорных технологиях и разработке функциональных материалов с заданными спектральными характеристиками.

Ключевые слова: окрашенные полииimidные пленки, активный зеленый 4С, коэффициент пропускания, коэффициент отражения.

Г.А. Исмайлова¹, М.Б. Умерзакова², Д.С. Пузикова³, С.Л. Пешая^{1,3*}

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан

²А.Б. Бектұров атындағы химиялық ғылымдар институты, Алматы қ., Қазақстан

³Д.В. Сокольский атындағы жанармай, катализ және электрохимия институты, қ.Алматы, Қазақстан

*e-mail: peshaya.svetlana@kaznu.kz

Модификацияланған полииimidті жұқақабықтардың оптикалық қасиеттері

Мақалада құрамында 4С жасыл түсті белсенді бояғышы бар боялған полииimidті пленкалардың спектрлік сипаттамалары зерттелді. Спектрофотометрия және Фурье-ИК спектроскопия әдістерін қолдану арқылы бояғыш концентрациясының пленкалардың өткізу және шағылу коэффициенттеріне әсері талданды. Эксперименттік зерттеулер бояғыштың мөлшерін арттыру көрінетін спектр аймағында жарық өткізгіштігінің 22–25%-ға төмендеуіне әкелетінін, алайда спектрлік максимумдардың орны өзгеріссіз қалатынын көрсөтті. Бұл бояғыштың матрицада біркелкі таралғанын және фазалық сегregationының болмағанын дәлелдейді. Зерттеу нәтижелері 4С бояғышының енгізілі 682 нм толқын ұзындығында тар сіңіру жолағын қалыптастыратынын көрсөтті, бұл тұрақты боялған полимер құрылымының айрықша белгісі болып табылады. Сондай-ақ, бояғыштың полииimidті қалыптастыру процесін жылдамдататыны расталды. ИК-спектроскопия әдісі 1500–1000 см⁻¹ диапазонында қосынша сіңіру жолақтарының пайда болуын анықтады, бұл бояғыш пен полииimid матрицасы арасындағы ықтимал химиялық өзара әрекеттесуді білдіреді. Алынған нәтижелер боялған полииimidті пленкаларды оптикалық сұзгілердің, сенсорлардың және лазерлік жүйелердің белсенді элементтері ретінде пайдалану мүмкіндігін растайды. Бояғыш концентрациясын бақылау пленкалардың оптикалық қасиеттерін өзгертуге мүмкіндік береді, бұл оларды фотоникада, сенсорлық технологияларда және

берілген спектрлік сипаттамалары бар функционалды материалдарды әзірлеуде қолдану перспективаларын ашады.

Түйін сөздер: боялған полиимидті пленкалар, белсенді жасыл 4С, жарық өткізгіштік коэффициенті, шағылышу коэффициенті.

G.A. Ismailova¹, M.B. Umerzakhova², D.S. Puzikova³, S.L. Peshaya^{1,3*}

¹Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan

²A.B. Bekturov institute of chemical sciences, Almaty, Kazakhstan

³D.V. Sokolsky institute of fuel, catalysis and electrochemistry, Almaty, Kazakhstan

*e-mail: peshaya.svetlana@kaznu.kz

Optical properties of modified polyimide films

The paper investigates the spectral characteristics of colored polyimide films containing the active bright-green dye 4C. Using spectrophotometry and Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy methods, the influence of dye concentration on the transmittance and reflectance coefficients of the films was analyzed. Experimental studies demonstrated that increasing the dye content reduces transmittance in the visible spectral region by 22–25% without shifting the spectral maxima, indicating uniform dye distribution within the matrix and the absence of phase segregation. The study confirmed that the introduction of dye 4C leads to the formation of a narrow absorption band at 682 nm, which is a characteristic feature of a stable dyed polymer structure. Additionally, the results showed that the inclusion of the dye accelerates the polyimide formation process. FTIR spectroscopy analysis revealed the presence of additional absorption bands in the 1500–1000 cm⁻¹ range, suggesting possible chemical interactions between the dye and the polyimide matrix. The obtained results confirm the feasibility of using colored polyimide films as active elements in optical filters, sensors, and laser systems. Controlling the dye concentration allows for fine-tuning the optical properties of the films, opening up new prospects for their application in photonics, sensor technologies, and the development of functional materials with predefined spectral characteristics.

Key words: dyed polyimide films, active green 4C, transmittance coefficient, reflectance coefficient.

Введение

Полимерные системы обладают значительной вариабельностью, что позволяет регулировать их структуру и свойства для создания конкурентоспособных материалов, применимых в оптике, оптоэлектронике и других областях науки и техники [1-4]. На основе оптически прозрачных полимеров разрабатываются фотохромные, люминесцентные и генерирующие материалы, а также нелинейно-оптические нанокомпозиты, перспективные для лазерной оптики и оптоэлектроники [5-8]. Одним из важных преимуществ прозрачных полимеров перед традиционными оптическими материалами (неорганическими стеклами и высокотемпературными кристаллами) является возможность введения в них различных красителей и других соединений, выполняющих функции активных компонент. Это позволяет получать из них не только элементы обычной оптики (линзы, призмы, отклоняющие пластиинки и т. п.), но и специфические элементы для лазерной оптики (активные элементы, пассивные лазерные затворы, пространственно неоднородные

просветляющие фильтры и т. п.), а также ограничители мощного оптического излучения и т. д. [9-11].

В последние годы особый интерес вызывает использование алициклических полиимидов в качестве матрицы для создания оптически активных материалов. Алициклические полиимиды обладают высокой термической стабильностью, механической прочностью и оптической прозрачностью в широком спектральном диапазоне, что делает их перспективными для применения в оптоэлектронных устройствах [12,13]. Введение ярко-зелёного красителя 4С в алициклический полиимид обусловлено его уникальными спектральными характеристиками, включая интенсивное поглощение и излучение в видимой области спектра. Это позволяет создавать материалы с заданными оптическими свойствами, необходимыми для разработки эффективных люминесцентных устройств и сенсоров [14].

Целью настоящей работы является изучение оптических свойств пленок из окрашенного алициклического полиимида, содержащего различную концентрацию ярко-зеленого 4С красителя.

Объектом данного исследования являются алициклические полиимидные пленки с активными красителями. Методы исследования, которые были использованы в данной статье – сканирующая спектрофотометрия в ультрафиолетовой и видимой области, ФТИК-спектрометрия. Понимание влияния концентрации красителя на оптические характеристики пленок позволит оптимизировать его состав для конкретных приложений в области оптики и оптоэлектроники.

Методология

Исследования проводились с растворами полиимида (ПИ), синтезированного по методике [15] в N,N'-диметилацетамиде (ДМАА). Полученные авторами в [15] полиамидокислоты подвергались термоимидизации при 250–350 °C, после чего исследовались их оптические свойства и диэлектрические характеристики. Для исследования оптических характеристик был выбран активный зеленый 4С фирмы ООО "Уралхиминвест" (г. Уфа, Россия) – натриевая соль [4,4'-бис(N,N-диметиламино)-(2"-гидрокси-3",6"-дисульфонато)] нафтилдифенилкарбения, молекулярная формула: $C_{27}H_{25}N_2O_7S_2Na$. Выбор данного красителя был обусловлен его высокой растворимостью в полярных средах, а также термической и химической стабильностью [16, 17].

Композиции ПИ с красителем получали двумя способами:

а. Смешиванием 20 % растворов полиимида с растворами красителя в этом же растворителе;

б. При проведении синтеза полиимида в присутствии каталитических количеств этого красителя.

Концентрацию красителя в первом случае варьировали от 0,1 до 2,0 мас. %. Во втором случае было установлено, что ПИ с наибольшими значениями приведенной вязкости 0,5 % растворов ПИ образуется в присутствии 1,5 мас. % красителя. Из растворов на стеклянных подложках с помощью металлических шаблонов формировали пленки толщиной 27–51 мкм, которые обрабатывали нагреванием в воздушной среде до 250–350 °C. Общее время термообработки образцов составляло 60 мин. Оптические измерения были выполнены с помощью двухлучевого спектрофотометра UV-3600 (фирма Shimadzu) при спектральном разрешении 0,1 нм. в диапазоне от 300–1100 нм. Исследование химического строения полиимидных пленок, полученных после окрашивания красителями, проводилось методом ИК-спектроскопии. ИК-спектры для данного исследования брались в области длин волн 2–20 мкм.

Результаты и обсуждение

Объектами исследования являлись окрашенные пленки на основе композиции алициклического полиимида с активным ярко зеленым 4С красителем, полученные механическим перемешиванием компонентов. Эта связь относится к кислотному красителю, состоящему из фрагментов монохлортриазина с хромофорной группой. Известно, что оптические свойства полимерных пленок зависят от нескольких факторов – толщины образца, условий измерения и т.д. В данной работе исследована зависимость спектров пропускания и отражения от различных концентраций красителя.

[18, 19] и другие исследования показали, что алициклические полиимиды могут связываться с другими органическими соединениями. В результате получается однородная полимерная система с высокими физико-механическими свойствами. В то же время, как определено в настоящей работе, если в полиимидный раствор добавить 0,001–0,05% красителя, то за определенный промежуток времени образуются однородные, стабильные композиции (не менее 12–15 месяцев), из которых можно получить прозрачные пленки.

На рисунках 1 и 2 показаны спектры пропускания и отражения пленок толщиной 27–50 мкм соответственно. На графиках сравнивались спектры пропускания и отражения исходного полиимида, а также полиимидных пленок с различной концентрацией красителя. Показано, что в присутствии красителя спектры пропускания и отражения композиций в видимой области уменьшаются на 22–25% по сравнению с исходным полиимидом.

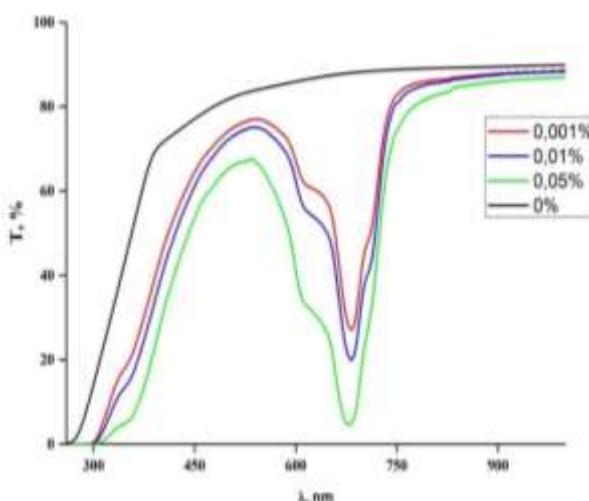


Рисунок 1 – спектры пропускания пленок с различными концентрациями красителя

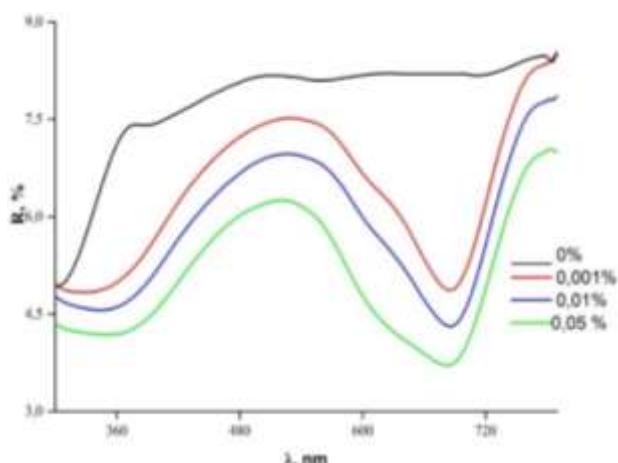


Рисунок 2 – Спектры отражения пленок с различными концентрациями красителя

Количество красителей в растворе подбиралось с учетом сохранения высоких

механических свойств и термостабильности, чтобы эксплуатационные характеристики новой полимерной композиции были не ниже, чем у исходного полимера.

Как видно из рисунка 1, включение этого красителя в полииидную матрицу приводит к появлению узких полос поглощения при 682 нм. Такие соединения активны и в других химических процессах, особенно в синтезе термостойких полимеров. Используемый в работе краситель ускоряет процесс полииидообразования, синтез полииида сокращается на 1,5 часа (без красителей процесс занимает 6,5-7 часов).

Активность красителей в процессе поликонденсации в основном обусловлена влиянием хлортриазинового фрагмента, а химическую структуру образующегося окрашенного полииидного звена можно представить следующим образом (рисунок 3) [20]:

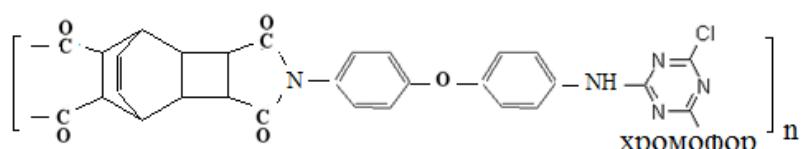


Рисунок 3 – Химическая структура полученного окрашенного полииидного соединения

Скорее всего, хлортриазиновый краситель присоединен к концевой аминогруппе. Поэтому в первом случае краситель взаимодействует с механизмом с исходным полииидом, поскольку в конечном полимере присутствует 5-7% нециклизованных аминогрупп. Значения коэффициента поглощения света через полииидную пленку определяли математически по следующей формуле [21]:

$$\alpha(\lambda) = -\frac{1}{l} * \ln \frac{T(\lambda)}{(1 - R)^2} \quad (1)$$

На рисунке 4 показана зависимость спектральных коэффициентов поглощения исходных и окрашенных полииидных пленок с использованием результатов, рассчитанных программой OriginPro [22]. Согласно рисунку 4, основной пик поглощения расположен в области около 680 нм, что соответствует характеристическому максимуму зеленого красителя в видимом диапазоне. Рост коэффициента поглощения наблюдается при увеличении концентрации красителя. Максимальное поглощение регистрируется для пленки с 0,05% красителя (зеленая кривая).

Форма спектров с увеличением концентрации красителя остается неизменной, что свидетельствует об отсутствии значительных изменений в структуре пленки при введении красителя.

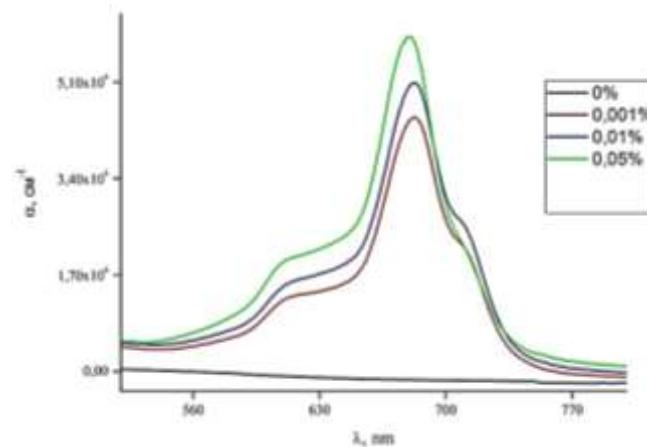


Рисунок 4 – Спектральная зависимость коэффициентов поглощения исходных и окрашенных полииидных пленок

Таким образом, увеличение концентрации красителя приводит к усилению поглощения без изменения спектрального положения максимума, что подтверждает его равномерное распределение в пленке.

Для определения наличия функциональных групп полиимидных пленок после добавления красителя использовали метод ИК-спектроскопии [23-25]. На рисунке 5 показаны ИК-спектры исходных и окрашенных полиимидных пленок.

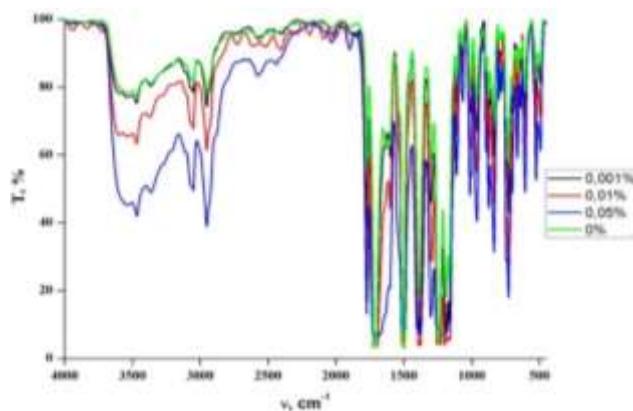


Рисунок 5 – ИК-спектры исходных ПИ и пленок, окрашенных активным ярко-зеленым красителем 4С

Анализ рисунка 5 показал наличие широких полос в области 3600-3100 см⁻¹, что указывает на наличие NH-связей в молекуле [26]. Колебательные частоты в области 3100-2800 см⁻¹ обычно рассматриваются вместе с полосами поглощения в области 1000-900 см⁻¹. Наличие поглощения в этих областях указывает на существование CH-связей [27]. В области 1800-1400 см⁻¹ находятся частоты колебаний связей C=C и C=O [28]. Область 1300-1000 см⁻¹ показывает сильные и слабые пики поглощения из-за связи C-O. В данной области наблюдается ослабление или смещение полос C=O и C-N, что может указывать на образование водородных связей или других взаимодействий между красителем и полиимидной матрицей.

Введение красителя (0,001%, 0,01%, 0,05%) приводит к изменениям интенсивности и положению полос в ИК-спектре. Так же, в области 1500–1000 см⁻¹ наблюдаются дополнительные полосы, что может свидетельствовать о взаимодействии красителя с полиимидной матрицей.

Заключение

В работе показано, что введение красителя 4С в полиимидную матрицу приводит к появлению относительно узкой полосы поглощения с максимумом 682 нм. Кроме того, краситель 4С, используемый в работе, ускоряет образование полиимида, продолжительность его синтеза сокращается на 1,5 часа (без него процесс идет в течение 6,5-7 часов).

Резонансное поглощение модифицированных пленок, видимо, обусловлено поглощением электромагнитного излучения на химических связях красителя. В пользу этого предположения говорят следующие экспериментальные факты: с увеличением концентрации красителя в матрице полимера наблюдается увеличение интенсивности оптического поглощения при неизменном положении максимума поглощения.

Таким образом в работе установлена возможность получения функциональных материалов в качестве термостойких однополосных светофильтров, которые могут применяться в лазерной оптике, термо- и светостойких окрашенных химических волокон и т.д.

Благодарность

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № BR24992812 «Разработка материалов и технологий, направленных на комплексную антикоррозионную защиту технологического оборудования в нефтехимической, машиностроительной и приборостроительной отраслях»).

Литература

- 1 Lee Ch., Seo J., Shul Y., & Han H. Optical Properties of Polyimide Thin Films. Effect of Chemical Structure and Morphology. // Polymer Journal. –2003. –Vol.35(7). –P.578–585. DOI: 10.1295/polymj.35.578.
- 2 Kamanina N. V., Kaporskii N., Pozdnyakov A., & Kotov B. V. Optical limiting in organic polyimide systems doped with fullerenes and dyes. // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. –2000. DOI: 10.1117/12.386380.
- 3 Ebnalwaled A. A., Sadek A. H., Ismail S. H., & Mohamed G. G. Structural, optical, dielectric, and surface properties of polyimide hybrid nanocomposites films embedded mesoporous silica nanoparticles synthesized from rice husk ash for optoelectronic applications. // Optical and Quantum Electronics. –2022. –Vol.54. –Art.No.690. DOI: 10.1007/s11082-022-03976-2.

- 4 Zaikin Yu. A., Ismailova G. A., & Al-Sheikhly M. Effect of pulse electron beam characteristics on internal friction and structural alterations in epoxy. // *Radiation Physics and Chemistry*. –2007. –Vol.76(8–9). –P.1404–1408. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2007.02.042.
- 5 Zhang M., Liu W., Gao X., Cui P., Tao T., Hu G., Tao L., & Lei Zh. Preparation and Characterization of Semi-Alicyclic Polyimides Containing Trifluoromethyl Groups for Optoelectronic Application. // *Polymers*. –2020. –Vol.12(7). DOI: 10.3390/polym12071532.
- 6 Quaranta A., Carturan S., Maggioni G., Mea G., Ischia M., & Campostrini R. Optical study of dye-containing fluorinated polyimide thin films. // *Applied Physics A*. –2001. –Vol.72. –P.671–677. DOI: 10.1007/s003390000690.
- 7 Hu J., Wei H., Wu Q., Zhao X., Chen K., Sun J., Cui Zh., & Wang Ch. Preparation and characterization of luminescent polyimide/glass composite fiber. // *Journal of Materials Research and Technology*. –2022. –Vol.18. –P.4329–4339. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.04.101.
- 8 Sakhno O., Yezhov P., Hrynn V., Rudenko V., & Smirnova T. Optical and Nonlinear Properties of Photonic Polymer Nanocomposites and Holographic Gratings Modified with Noble Metal Nanoparticles. // *Polymers*. –2020. –Vol.12(2). –Art.No.480. DOI: 10.3390/polym12020480.
- 9 Zulfiqar A., Pfreundt A., Svendsen W. E., & Dimaki M. Fabrication of polyimide based microfluidic channels for biosensor devices. // *Journal of Micromechanics and Microengineering*. –2015. –Vol.25(8). –Art.No.035022. DOI: 10.1088/0960-1317/25/3/035022.
- 10 Alfahed R. K., Imran A., Badran H. A., & Al-Salihi A. Synthesis, optical limiting behavior, thermal blooming and nonlinear studies of dye-doped polymer films. // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. –2020. –Vol.31. –P.13862–13873. DOI: 10.1007/s10854-020-03946-y.
- 11 Serova V. N. Polymeric optical materials. –Saint Petersburg: Scientific Foundations and Technologies, 2015. –288 p.
- 12 Wu Y., Ding Ch., Yu J., & Huang P. Synthesis and Characterization of Semi-Aliphatic Polyimide Films with Excellent Comprehensive Performance. // *Polymer Science, Series B*. –2023. –Vol.65(2). –P.120–128. DOI: 10.1134/S1560090423700781.
- 13 Stejskal J. Interaction of conducting polymers, polyaniline and polypyrrole, with organic dyes: polymer morphology control, dye adsorption and photocatalytic decomposition. // *Chemical Papers*. –2020. –Vol.74. –P.1–54. DOI: 10.1007/s11696-019-00982-9.
- 14 Yang Sh. Advanced polyimide materials: synthesis, characterization, and applications. –Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018. –498 p.
- 15 Kravtsova V. D., Umerzakova M., Iskakov R., Prikhodko O., & Korobova N. Optically transparent fluoroc-containing polyimide films with low dielectric permeability. // *IC Micro- and Nanoelectronics and Quantum (ICMNE-2014)*. –Zvenigorod, Russia, 6–8 Oct. 2014. –P1-03.
- 16 Pereira H., Deuchande T., Fundo J. F., Leal T., Pintado M. E., & Amaro A. L. Painting the picture of food colouring agents: Near-ubiquitous molecules of everyday life – A review. // *Trends in Food Science & Technology*. –2024. –Vol.143. –Art.No.104249. DOI: 10.1016/j.tifs.2023.104249.
- 17 Caballero B., Finglas P. M., & Toldrá F. Encyclopedia of food and health. –Elsevier Ltd., 2016. –4006 p.
- 18 Zhubanov B. A., Kravtsova V. D., Umerzakova M. B., Iskakov R. M., & Sarieva R. B. New film composites based on alicyclic polyimide and poly(ethylene glycol). // International Conference on Polymer Chemistry and Materials Science. –Montpellier, France, 3–5 June 2013. –C11.
- 19 Zhubanov B. A., Boiko G. I., Shaikhutdinov E. M., & Maimakov T. P. Catalysis of polycondensation processes. –Almaty: University "UNAT", 1999. –258 p.
- 20 Benkhaya S., M'rabet S., & Harfi A. E. Classifications, properties, recent synthesis and applications of azo dyes. // *Heliyon*. –2020. –Vol.6. –Art.No.e03271. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03271.
- 21 Peshaya S. L., Prikhodko O. Yu., Mukhametkarimov Ye. S., Doseke U., Maksimova S. Ya., Ismailova G. A., Tarapeeva A. Yu., Turmanova K. N., & Kudryashov V. V. Features of determining the optical bandgap of amorphous nanosized composite $TiO_2:Ag$ films. // *Journal of Optical Technology*. –2022. –Vol.89(1). –P.52–57. DOI: 10.1364/JOT.89.000052.
- 22 Prikhodko O. Yu., Mikhailova S. L., Mukhametkarimov Ye. S., Dauthan K., & Maksimova S. Ya. Structure and phase composition of thin a-C:H films modified by Ag and Ti. // *Optics and Spectroscopy*. –2017. –Vol.123. –P.383–387. DOI: 10.1134/S0030400X17090260.
- 23 Zhang Y., Mushtaq N., Fang X., & Chen G. In situ FTIR analysis for the determination of imidization degree of polyimide precursors. // *Polymer*. –2022. –Vol.238. –Art.No.124416. DOI: 10.1016/j.polymer.2021.124416.
- 24 Korshikov Ye. S., & Sapargaliyev G. B. Study of optical properties of CCl_4 recondensates obtained by cryomatrix isolation method. // *Recent Contributions to Physics*. –2021. –Vol.77(2). –P.53–59. DOI: 10.26577/RCPh.2021.v77.i2.07.
- 25 Aldiyarov A., Nurmukan A., Zheksen U., Oman Z., & Torebay A. IR spectra of ethanol nanoclusters in nitrogen cryomatrix. // *Recent Contributions to Physics*. –2019. –Vol.69(2). –P.104–113. DOI: 10.26577/rcph-2019-i2-14.
- 26 Rashid Z. M., Rashid Kh. A. A., & Anwar N. Z. R. Heterotrigona Itama Bee Bread Extracts: Effect of Solvent Polarity on Extraction Yield, Chemical Characteristics and Antioxidant Activity. // *Journal of Agrobiotechnology*. –2023. –Vol.14(1). –P.44–53. DOI: 10.37231/jab.2023.14.1.327.

27 Lee S., Hwang J., Lee J., Chung H., Ryu D.H., Yun H., Choi I.G., Jung H., Lee K., Yeo S., Lee S., Yang J., Jeon H.J., Rim Y.S., Lee J., Choi T. Optimizing low-k SiCOH films deposited by PECVD with a novel C6H16OSi precursor: Impact of oxygen/carbon ratio on film properties. // Materials Chemistry and Physics. –2025. –Vol.334. –Art.No130510. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2025.130510.

28 Ionita D., Cristea M., Sava I., Popescu M.-C., Dobromir M., Simionescu B.C. Temperature-Controlled Chain Dynamics in Polyimide Doped with CoCl₂ Probed Using Dynamic Mechanical Analysis. // Materials. –2024. –Vol.17. –Art.No753. DOI: 10.3390/ma17030753.

References

- 1 Ch. Lee, J. Seo, Y. Shul, and H. Han, Polymer Journal 35, 578–585 (2003). DOI: 10.1295/polymj.35.578.
- 2 N. V. Kamanina, N. Kaporskii, A. Pozdnyakov, and B. V. Kotov, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering (2000). DOI: 10.1117/12.386380.
- 3 A. A. Ebnalwaled, A. H. Sadek, S. H. Ismail, and G. G. Mohamed, Optical and Quantum Electronics 54, 690 (2022). DOI: 10.1007/s11082-022-03976-2.
- 4 Yu. A. Zaikin, G. A. Ismailova, and M. Al-Sheikhly, Radiation Physics and Chemistry 76, 1404–1408 (2007). DOI: 10.1016/j.radphyschem.2007.02.042.
- 5 M. Zhang, W. Liu, X. Gao, P. Cui, T. Tao, G. Hu, L. Tao, and Zh. Lei, Polymers 12, 71532 (2020). DOI: 10.3390/polym12071532.
- 6 A. Quaranta, S. Carturan, G. Maggioni, G. Mea, M. Ischia, and R. Campostrini, Applied Physics A 72, 671–677 (2001). DOI: 10.1007/s003390000690.
- 7 J. Hu, H. Wei, Q. Wu, X. Zhao, K. Chen, J. Sun, Zh. Cui, and Ch. Wang, Journal of Materials Research and Technology 18, 4329–4339 (2022). DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.04.101.
- 8 O. Sakhno, P. Yezhov, V. Hrynn, V. Rudenko, and T. Smirnova, Polymers 12, 480 (2020). DOI: 10.3390/polym12020480.
- 9 A. Zulfiqar, A. Pfreundt, W. E. Svendsen, and M. Dimaki, Journal of Micromechanics and Microengineering 25, 035022 (2015). DOI: 10.1088/0960-1317/25/3/035022.
- 10 R. K. Alfahed, A. Imran, H. A. Badran, and A. Al-Salihi, Journal of Materials Science: Materials in Electronics 31, 13862–13873 (2020). DOI: 10.1007/s10854-020-03946-y.
- 11 V. N. Serova, Polymer optical materials (St. Petersburg: Scientific foundations and technologies, 2015) – 288 p.
- 12 Y. Wu, Ch. Ding, J. Yu, and P. Huang, Polymer Science, Series B 65, 120–128 (2023). DOI: 10.1134/S1560090423700781.
- 13 J. Stejskal, Chemical Papers 74, 1–54 (2020). DOI: 10.1007/s11696-019-00982-9.
- 14 Sh. Yang, Advanced Polyimide Materials: Synthesis, Characterization, and Applications (Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018) – 498 p.
- 15 V. D. Kravtsova, M. Umerzakova, R. Iskakov, O. Prikhodko, and N. Korobova, IC Micro- and Nanoelectronics and Quantum (ICMNE-2014) (Zvenigorod, Russia, 6–8 Oct. 2014) P1-03.
- 16 H. Pereira, T. Deuchande, J. F. Fundo, T. Leal, M. E. Pintado, and A. L. Amaro, Trends in Food Science & Technology 143, 104249 (2024). DOI: 10.1016/j.tifs.2023.104249.
- 17 B. Caballero, P. M. Finglas, and F. Toldrá, Encyclopedia of Food and Health (Elsevier Ltd., 2016) – 4006 p.
- 18 B. A. Zhubanov, V. D. Kravtsova, M. B. Umerzakova, R. M. Iskakov, and R. B. Sarieva, International Conference on Polymer Chemistry and Materials Science (Montpellier, France, 3–5 June, 2013) – C11.
- 19 B. A. Zhubanov, G. I. Boyko, E. M. Shaikhutdinov, T. P. Maimakov, Catalysis of polycondensation processes (Almaty: UNAT University, 1999) – 258 p.
- 20 S. Benkhaya, S. M'rabet, and A. E. Harfi, Heliyon 6, e03271 (2020). DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e03271.
- 21 S.L. Peshaya, O.Yu. Prikhodko, Ye.S. Mukhametkarimov, U. Doseke, S. Ya. Maksimova, G.A. Ismailova, A. Yu. Tarapeeva, K. N. Turmanova, and V.V. Kudryashov, Journal of Optical Technology 89, 52–57 (2022). DOI: 10.1364/JOT.89.000052.
- 22 O. Yu. Prikhodko, S. L. Mikhailova, Ye. S. Mukhametkarimov, K. Dauthan, and S. Ya. Maksimova, Optics and Spectroscopy 123, 383–387 (2017). DOI: 10.1134/S0030400X17090260.
- 23 Y. Zhang, N. Mushtaq, X. Fang, and G. Chen, Polymer 238, 124416 (2022). DOI: 10.1016/j.polymer.2021.124416.
- 24 E.S. Korshikov, G.B. Sapargaliev, Recent Contributions to Physics 77, 53–59 (2021). DOI: 10.26577/RCPh.2021.v77.i2.07.
- 25 A. Aldiyarov, A. Nurmukan, U. Jeksen, Z. Oman, and A. Torebay, Recent Contributions to Physics 69, 104–113 (2019). DOI: 10.26577/rcph-2019-i2-14.
- 26 Z. M. Rashid, Kh. A. A. Rashid, and N. Z. R. Anwar, Journal of Agrobiotechnology 14, 44–53 (2023). DOI: 10.37231/jab.2023.14.1.327.

23 S. Lee, J. Hwang, J. Lee, H. Chung, D. H. Ryu, H. Yun, I. G. Choi, H. Jung, K. Lee, S. Yeo, S. Lee, J. Yang, H. J. Jeon, Y. S. Rim, J. Lee, and T. Choi, Materials Chemistry and Physics 334, 130510 (2025). DOI: 10.1016/j.matchemphys.2025.130510.

24 D. Ionita, M. Cristea, I. Sava, M.-C. Popescu, M. Dobromir, and B. C. Simionescu, Materials 17, 753 (2024). DOI: 10.3390/ma17030753.

Article history:

Received 27 February 2025

Received in revised form 06 March 2025

Accepted 11 March 2025

Information about author:

1. **Guzal Ismaylova** – PhD, Ass. Prof. of the Department of Solid State Physics and Technology of New Materials, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: guzal_a81@mail.ru

2. **Maira Umerzakova** – Doctor of Chemical Sciences, Prof., Corresponding Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Honored Worker of Science and Education, Chief Researcher of the Laboratory of Synthesis and Physical Chemistry of Polymers, JSC “Institute of Chemical Sciences named after A.B. Bekturov” (ICS), Almaty, Kazakhstan, e-mail: umerzak@mail.ru.

3. **Darya Puzikova** – Senior Researcher of the Laboratory of Electrochemistry and Nanotechnological Processes, Institute of Fuel, Catalysis and Electrochemistry named after D.V. Sokolsky, Almaty, Kazakhstan, e-mail: d.s.puzikova@mail.ru

4. **Svetlana Peshaya** (corresponding author) – PhD, Ass. Prof. Deputy Dean for Scientific and Innovative Activities and International Relations of the Physics and Technology Faculty of Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan, e-mail: peshaya.svetlana@kaznu.kz

Мақала тарихы:

Түсті – 27.02.2025

Түзетілген түрде түсті – 03.06.2025

Қабылданды – 11.03.2025

Авторлар туралы мәлімет:

1. **Гузал Исмайлова** – PhD, әл-Фараби атындағы ҚазҰУ «Қатты дene физикасы және жана материалдар технологиясы» кафедрасының доценті. Алматы қ., Қазақстан, e-mail: guzal_a81@mail.ru

2. **Майра Умерзакова** – Химия ғылымдарының докторы, профессор, Ресей жаратылыстану ғылымдары академиясының корреспондент-мүшесі, еңбек сінірген ғылым және педагог, «А.Б.Бектұрова атындағы Химия ғылымдары институты» АҚ полимерлер синтезі және физикалық химиясы зертханасының аға ғылыми қызметкері. Алматы қ., Қазақстан, e-mail: umerzak@mail.ru

3. **Дарья Пузикова** – Д.В. Сокольский атындағы Отын, катализ және электрохимия институтының Электрохимия және нанотехнологиялық процестер зертханасының аға ғылыми қызметкері. Алматы қ., Қазақстан, e-mail: d.s.puzikova@mail.ru

4. **Светлана Пешая** (корреспондент-автор) – PhD, доцент, Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің физика-техникалық факультетінің ғылыми-инновациялық қызмет және халықаралық байланыстар факультетінің декан орынбасары, Алматы қ., Қазақстан, e-mail: peshaya.svetlana@kaznu.kz