

ISSN 1561-8323 (Print)
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 539.23:547-304.4
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-169-174>

Поступило в редакцию 26.09.2018
Received 26.09.2018

**С. Н. Лемешонок, Ж. Д. Чапланова, академик В. Е. Агабеков,
Н. А. Иванова, И. Н. Кухто**

*Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Республика Беларусь*

ФОТОИЗОМЕРИЗАЦИЯ И ФОТООРИЕНТАЦИЯ БРИЛЛИАНТОВОГО ЖЕЛТОГО В ТОНКОПЛЕНОЧНОМ СОСТОЯНИИ

Аннотация. Изучены особенности фотоизомеризации и фотоориентации азокрасителя бриллиантовый желтый (БЖ) в тонкопленочном состоянии. Установлено, что при облучении пленок БЖ полным светом лампы сверхвысокого давления ДРТ-1000 (УФ/ВИД-светом) протекает реакция транс-цис-изомеризации молекул красителя, которая описывается уравнением реакции первого порядка. Под действием линейно-поляризованного синего света ($\lambda = 457$ нм) в пленках на основе БЖ возникает оптическая анизотропия. Показано, что оптически анизотропные пленки БЖ с высоким значением дихроичного отношения (>10) формируются при использовании в качестве растворителей N-метилпирролидона и N,N-диметилформамида, а также ацетилцеллюлозы как полимерной матрицы.

Ключевые слова: транс-цис-изомеризация, фотоориентация, азокраситель, бриллиантовый желтый, тонкая пленка, фотооблучение, дихроизм поглощения

Для цитирования. Фотоизомеризация и фотоориентация бриллиантового желтого в тонкопленочном состоянии / С. Н. Лемешонок [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 169–174. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-169-174>

**Sviatlana N. Lemiashonak, Zhanna D. Chaplanova, Academician Vladimir E. Agabekov,
Nadezhda A. Ivanova, Iryna N. Kukhta**

Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

PHOTOISOMERIZATION AND PHOTOORIENTATION OF BRILLIANT YELLOW IN THE THIN FILM STATE

Abstract. The features of photoisomerization and photoorientation of azo dye brilliant yellow (BY) in the thin film state are studied. The trans-cis-isomerization of the dye molecules is established to proceed upon irradiation of the films based on BY with a full light of an ultra-high pressure lamp DRT-1000 (UV / VID light), this reaction is described by the first-order reaction equation. Under the action of linearly polarized blue light ($\lambda = 457$ nm), an optical anisotropy arises in films of BY. Optically anisotropic films of BY with a high dichroic ratio (>10) are shown to be formed using N-methylpyrrolidone and N,N-dimethylformamide as solvents and cellulose acetate as the polymer matrix.

Keywords: trans-cis-isomerization, photoorientation, azo dye, brilliant yellow, thin film, photoirradiation, absorption dichroism

For citation: Lemiashonak S. N., Chaplanova Zh. D., Agabekov V. E., Ivanova N. A., Kukhta I. N. Photoisomerization and photoorientation of brilliant yellow in the thin film state. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 169–174 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-169-174>

Введение. Тонкопленочные материалы на основе азокрасителей и полимеров широко используются в технологии производства разнообразных поляризационно-оптических элементов и устройств [1; 2]. Несомненный интерес для получения фотоориентированных пленок с высоким параметром порядка представляет промышленный азокраситель бриллиантовый желтый (БЖ) – динатриевая соль 4,4'-бис(4-гидроксифенилазо)стильбен-2,2'-дисульфокислоты [3; 4]. Тонкопленочные покрытия на основе БЖ имеют высокую энергию сцепления с ЖК-материалами и микроскопическую однородность, что позволяет использовать их в качестве фотоориентантов при получении высококонтрастных ЖК-дисплеев [5]. Под действием линейно поляризованного света в пленках на основе БЖ возникает оптическая анизотропия. В литературе нет единого мнения относительно механизма фотоориентации БЖ в конденсированных средах. Так, в [3] высказано предположение, что молекулы БЖ в матрице триацетата целлюлозы ориентируются

в результате транс-цис-изомеризации. Однако согласно данным работ [4; 6] молекулы БЖ не изомеризуются при облучении как растворов, так и индивидуальных пленок красителя. По мнению авторов [7] изменения в спектрах поглощения пленок БЖ, экспонированных линейно поляризованным синим светом ($\lambda = 447$ нм, $I = 25$ мВт/см²), свидетельствуют о том, что молекулы БЖ претерпевают внутрислойное вращение во время процесса фотоориентации. В случае более высокоэнергетического ($\lambda = 365$ нм) поляризованного возбуждения для молекул БЖ предпочтительна ориентация вне плоскости, а релаксация энергии возбуждения молекул БЖ реализуется через вращательно-колебательные уровни без участия конформационных изменений [6].

Ранее [8; 9] мы показали, что природа полимерной матрицы и растворителей, из которых осаждены пленки, оказывают значительное влияние на морфологию и фотоориентацию тонких пленок на основе солей бисазопроизводных салициловой кислоты.

Цель работы – установить особенности фотоизомеризации и фотоориентации БЖ в индивидуальных тонких пленках и в полимерной матрице в зависимости от энергии возбуждающего света.

Материалы и методы исследования. Бриллиантовый желтый, ацетат целлюлозы (АЦ) (Sigma Aldrich) и N-метилпирролидон (НМП) (Merck) использовали без дополнительной очистки. N,N-диметилформамид (ДМФА) применяли свежеперегранным.

Тонкопленочные покрытия на основе БЖ получали методом центрифугирования. Растворы (~0,1 мл), содержащие 0,5–1,5 мас. % красителя в воде, ДМФА и НМП, наносили на стеклянные подложки и центрифугировали со скоростью 1800 об/мин в течение 60 с. Содержание АЦ в рабочих растворах варьировали от 0,5 до 5,0 мас. %. Пленки БЖ сушили в течение 10 мин при 100 °С на воздухе.

Толщину пленок оценивали по величине оптической плотности в соответствии с законом Бугера–Ламберта–Бера: $A = \varepsilon cd$, где A – оптическая плотность; ε – коэффициент молярного поглощения; c – концентрация красителя; d – толщина пленки. Предварительно было установлено, что оптическая плотность пленки линейно зависит от концентрации БЖ в исходных растворах в диапазоне 0,5–1,5 мас. % и концентрации АЦ 0,5–5,0 мас. %. При расчете толщины (d , нм) пленок, осажденных из растворов БЖ в НМП и ДМФА, принимали, что концентрация (c) красителя в них составляла 1,6 и 0,8 моль/кг в пленке, осажденной из 1,0 %-ного раствора БЖ в НМП, содержащего 1,0 мас. % АЦ. Значения молярного коэффициента поглощения БЖ ($\varepsilon_{\lambda_{\max}}$, л/моль · см) определяли из графика зависимости A от концентрации красителя в диапазоне $(1,0-30,5)10^{-6}$ моль/л (толщина кварцевой кюветы 1,0 см). Рассчитанные нами и приведенные в [7] значения толщины пленок, сформированных из растворов БЖ в ДМФА ([БЖ] = 1,5 мас. %), совпадают и составляют ≈ 30 нм.

Оптическую анизотропию пленок БЖ, облученных линейно поляризованным светом (синий светодиод с длиной волны излучения 457 нм и интенсивностью 30 мВт/см²), характеризовали величиной дихроичного отношения (ДО) $ДО = A_{\perp} / A_{\parallel}$ и параметром порядка (S) $S = (A_{\perp} - A_{\parallel}) / (A_{\perp} + 2A_{\parallel})$, где A_{\perp} и A_{\parallel} – поглощение линейно поляризованного зондирующего излучения в перпендикулярном (\perp) и параллельном (\parallel) направлениях относительно поляризации экспонирующего излучения.

При изучении фотоизомеризации красителя пленки облучали на воздухе светом полного спектрального диапазона (УФ/ВИД) и фильтрованным ($\lambda = 365$ нм) светом ртутной лампы сверхвысокого давления ДРТ-1000, а также неполяризованным синим светом ($\lambda = 457$ нм).

Изомеризацию БЖ исследовали с использованием пакета квантово-химических программ Gaussian 03 [10]. Проведена полная оптимизация геометрии для транс- и цис-изомера свободной молекулы БЖ в основном состоянии в рамках теории функционала плотности (DFT), функционал B3LYP, базисный набор 6–31G. Так как молекула БЖ имеет две N=N связи, рассмотрена возможность частичной и полной транс-цис-изомеризации.

Результаты и их обсуждение. Исходный БЖ относится к классу стильбеновых бисазокрасителей, содержит в своей структуре $>C=C<$ и $-N=N-$ связи, обладает развитой цепью сопряжения и способен существовать в изомерных транс- и цис-формах (схема). Как правило, в основном состоянии равновесие между транс- и цис-изомерами сдвинуто в сторону транс-изомера, занимающего меньший объем и поэтому более термодинамически стабильного. Согласно квантово-

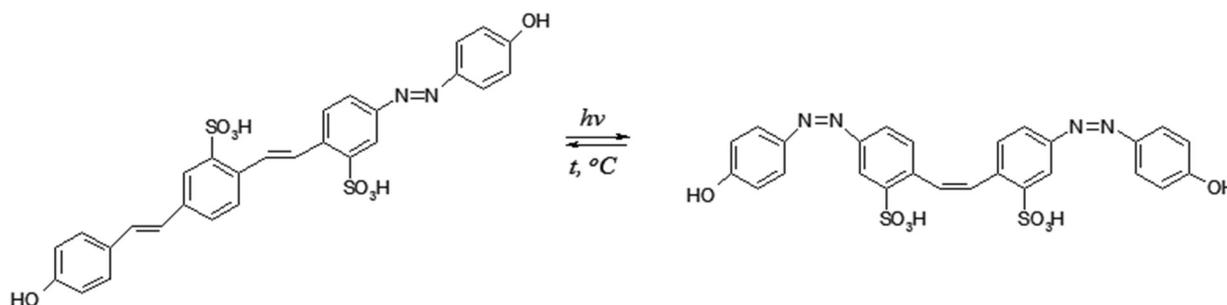


Схема транс-цис-изомеризации бриллиантового желтого
Scheme trans-cis-isomerization brilliant yellow

химическим расчетам (в предположении, что в изомеризации участвуют только азо-связи красителя [11]) разность полных энергий (ΔE) для цис- и транс-изомеров молекулы БЖ составила в случае частичной транс-цис-изомеризации 69,3 кДж/моль и полной – 139,3 кДж/моль.

Пленки БЖ, осажденные из раствора красителя в воде (БЖ/ H_2O), *N,N*-диметилформамиде (БЖ/ДМФА), *N*-метилпирролидоне (БЖ/НМП), чувствительны к облучению УФ/ВИД-светом, о чем свидетельствуют гипсохромный сдвиг λ_{max} и наличие изобестической точки в спектрах поглощения исследуемых образцов (рис. 1, *a*). В то же время в спектре поглощения пленки БЖ/НМП, облученной синим светодиодом ($\lambda = 457$ нм) (рис. 1, *b*), наблюдается только уменьшение величины оптической плотности при $\lambda_{max} = 406$ нм и отсутствуют признаки, характерные для реакции транс-цис-изомеризации красителя.

Способность молекул БЖ к образованию устойчивой цис-формы в пленках БЖ/ H_2O , БЖ/ДМФА и БЖ/НМП при облучении УФ/ВИД-светом может быть обусловлена значительным снижением скорости термической цис-транс-изомеризации в результате уменьшения молекулярной подвижности и возникающих в твердой фазе стерических ограничениях. В то же время для перехода молекулы красителя из транс- в цис-форму требуется наличие в образце свободного объема. В [3] установлено, что сформированные центрифугированием пленки БЖ/АЦ после нагрева при 60, 80 и 100 °С содержат соответственно 4,9, 5,0, и 4,2 мас. % НМП. Таким образом, примеси растворителей в пленках на основе БЖ могут выступать в роли пластификаторов и способствовать образованию свободного объема, необходимого для осуществления реакции транс-цис-изомеризации.

Кинетические кривые (рис. 2, *a*) изменения оптической плотности пленок БЖ при λ_{max} удовлетворительно спрямляются в координатах уравнения реакции 1-го порядка:

$$\ln \frac{A_0 - A_\infty}{A_t - A_\infty} = kt,$$

где k – эффективная константа скорости реакции; A_0 , A_t , A_∞ – оптические плотности пленок до облучения и за время облучения t и t_∞ соответственно.

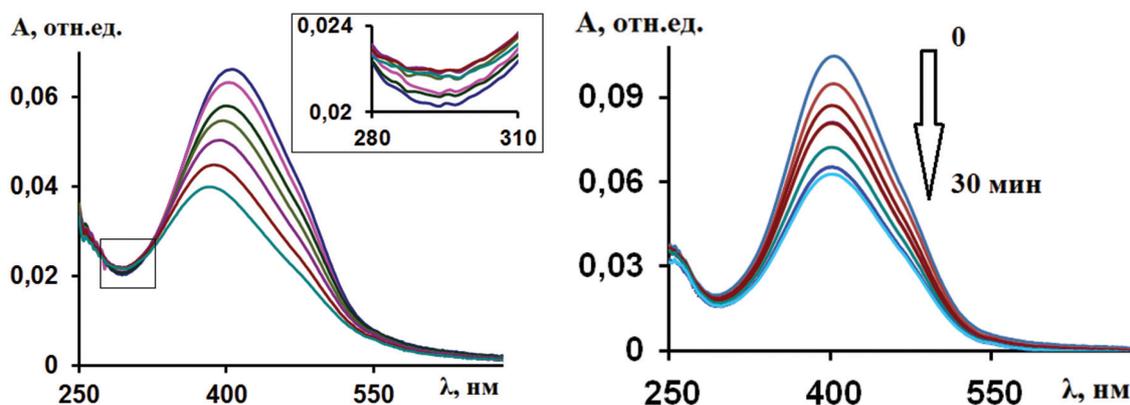


Рис. 1. Спектры поглощения пленок БЖ/НМП, облученных в течение 30 мин: *a* – УФ/ВИД-светом; *b* – синим светом
Fig. 1. Absorption spectra of brilliant yellow *N*-methylpyrrolidone films irradiated for 30 min: *a* – UV / VID light; *b* – blue light

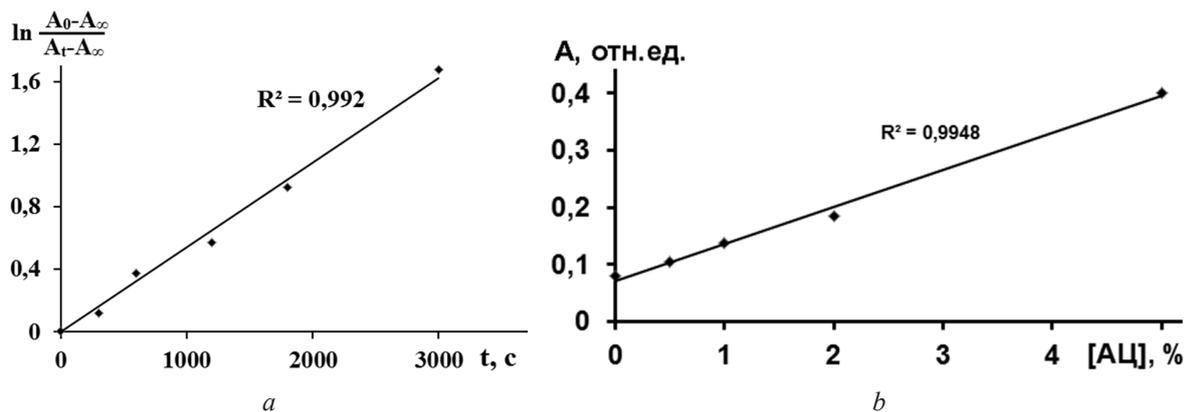


Рис. 2. Кинетическая кривая изменения оптической плотности пленки БЖ/НМП (a) и зависимость оптической плотности пленок БЖ/АЦ от концентрации полимера в исходных растворах (b)
 Fig. 2. Kinetic curve for the optical density of the brilliant yellow N-methylpyrrolidone film (a) and the dependence of the optical density of brilliant yellow-cellulose acetate films on the polymer concentration in the process feeds (b)

Значения k для пленок БЖ/Н₂O, БЖ/ДМФА и БЖ/НМП являются величинами одного порядка и равны $(3,1, 5,3 \text{ и } 5,4)10^{-4} \text{ с}^{-1}$ соответственно.

Ранее было показано [12], что введение БЖ в полимерную матрицу способствует формированию устойчивых к агрегированию оптически анизотропных пленок. Авторы [3] утверждают, что использование в качестве полимерной матрицы АЦ и увлажнение образца (относительная влажность 60 %, температура 40 °С) позволяют получать оптически анизотропные пленки с высоким параметром порядка $S \approx 0,81$.

В данной работе были получены композиционные пленки БЖ, диспергированного в матрице АЦ (БЖ/АЦ), из растворов, содержащих 1,5 мас. % красителя и различные концентрации полимера (0,5–5,0 мас. %). Оптическая плотность пленок БЖ/АЦ линейно зависит от концентрации полимера в исходных растворах (рис. 2, b). Таким образом, варьируя содержание полимера при одной и той же концентрации красителя, можно получать пленки БЖ с заданными оптическими свойствами.

В композиционных пленках БЖ/АЦ молекулы красителя претерпевают транс-цис-изомеризацию при облучении УФ/ВИД-светом (рис. 3, a) и не изомеризуются при воздействии неполяризованном синим светом. Эффективная константа скорости изомеризации БЖ при увеличении концентрации АЦ в исходных растворах от 0,5 до 5,0 мас. % незначительно изменяется от $5,3 \cdot 10^{-4}$ до $6,2 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

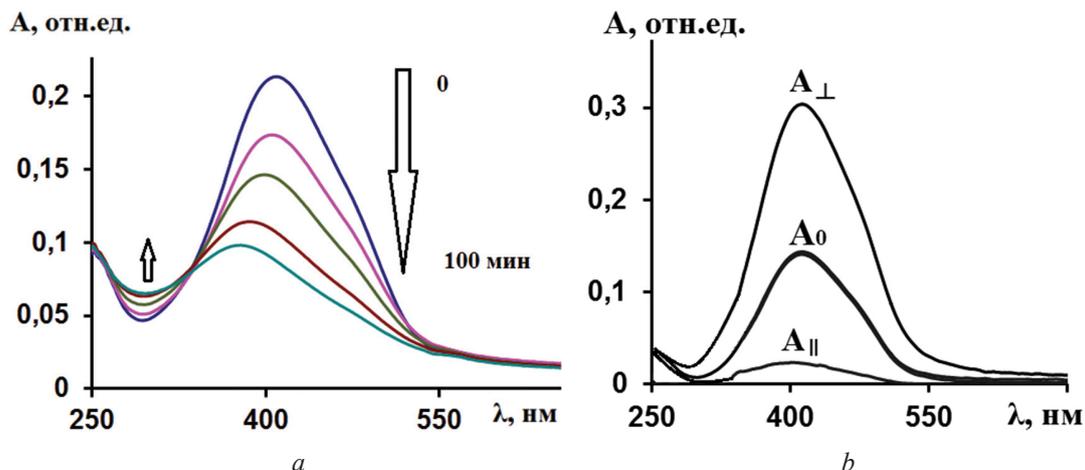


Рис. 3. Спектры поглощения пленок БЖ/АЦ, облученных в течение 100 мин УФ/ВИД-светом (a) и линейно поляризованным синим светом (b) до (A_0) и после (A_{\parallel} и A_{\perp}) облучения
 Fig. 3. Absorption spectra of the brilliant yellow/cellulose acetate films irradiated for 100 min by UV / VID light (a) and a linearly polarized blue light (b) before (A_0) and after (A_{\parallel} and A_{\perp}) irradiation

Под действием линейно поляризованного синего света в пленках БЖ возникает оптическая анизотропия (рис. 3, *b*), величина которой зависит от природы растворителей, используемых при формировании пленок БЖ. Молекулы красителя практически не ориентируются в пленках, сформированных из водного раствора БЖ: дихроичное отношение равно 1,3. Использование органических растворителей способствует фотоориентации БЖ: для пленок БЖ/ДМФА и БЖ/МП дихроичное отношение составляет 9,9 и 12,3 соответственно.

Способность к фотоориентации молекул красителя в композиционных пленках уменьшается при увеличении концентрации полимера в исходных растворах. При концентрации АЦ 1,0, 2,0 и 5,0 мас. % ДО составляет 13,8, 8,5 и 6,3 соответственно. При хранении образцов на воздухе ДО пленок практически не изменяется длительное время.

Заключение. В тонкопленочном состоянии молекулы БЖ претерпевают транс-цис-изомеризацию при облучении УФ/ВИД-светом и не изомеризуются при облучении неполяризованным синим светом. Под действием линейно поляризованного синего света в пленках БЖ возникает оптическая анизотропия. Использование в качестве растворителей для осаждения пленок БЖ N-метилпирролидона и N,N-диметилформамида способствует фотоориентации красителя: для пленок БЖ/ДМФА и БЖ/МП дихроичное отношение составляет 9,9 и 12,3 соответственно. Способность к фотоориентации молекул красителя в матрице ацетата целлюлозы уменьшается при увеличении концентрации полимера в исходных растворах.

Список использованных источников

1. Seiberle, H. Photo-aligned anisotropic optical thin films / H. Seiberle, C. Benecke, T. Bachelts // *J. of the SID*. – 2004. – Vol. 12, N 1. – P. 87–92. <https://doi.org/10.1889/1.1824791>
2. Electrically switchable photonic liquid crystal devices for routing of a polarized light wave / I. I. Rushnova [et al.] // *Optics Communications*. – 2018. – Vol. 413. – P. 179–183. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.12.029>
3. Photoalignment of an azobenzene-based chromonic liquid crystal dispersed in triacetyl cellulose: single-layer alignment films with an exceptionally high order parameter / M. Matsumori [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. – 2015. – Vol. 7, N 21. – P. 11074–11078. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b02577>
4. Photoisomerization in photoaligned azo dyes exhibiting photostability / G. Hegde [et al.] // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* – 2009. – Vol. 507, N 1. – P. 41–50. <https://doi.org/10.1080/15421400903048263>
5. Finnemeyer, V. Reactive mesogen stabilized azodye alignment for high contrast displays / V. Finnemeyer, D. Bryant, Ph. Bos. // *SID Digest*. – 2015. – Vol. 46, N 1. – P. 991–993. <https://doi.org/10.1002/sdtp.10319>
6. Photoalignment properties of brilliant yellow dye / O. Yaroshchuk [et al.] // *IDW'07 – Proceedings of the 14th International Display Workshops*. – 2007. – Vol. 3. – P. 1665–1668.
7. Effects of humidity and surface on photoalignment of brilliant yellow / J. Wang [et al.] // *Liq. Cryst.* – 2017. – Vol. 44, N 5. – P. 863–872. <https://doi.org/10.1080/02678292.2016.1247479>
8. Фотоиндуцированный дихроизм тонких пленок на основе бисазопроизводного салициловой кислоты и поливинилпирролидона / Ж. Д. Чапланова [и др.] // *Весті Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук*. – 2015. – № 3. – С. 45–50.
9. Кинетика и механизм фотоиндуцированной ориентации бисазодиоксидбензотиофена в тонких пленках / Ж. Д. Чапланова [и др.] // *Полимерные материалы и технологии*. – 2016. – № 4. – С. 39–45.
10. Gaussian 03, Revision D 01 / M. J. Frisch [et al.]. – Wallingford, 2004.
11. Inscoc, M. N. The relation between the absorption spectra and the chemical constitution of dyes / M. N. Inscoc, J. H. Gould, W. R. Brode // *J. Am. Chem. Soc.* – 1959. – Vol. 81, N 21. – P. 5634–5637. <https://doi.org/10.1021/ja01530a028>
12. Multi-layered anisotropic films based on the azo dye brilliant yellow and organic polymers / Zh. D. Chaplanova [et al.] // *JAS*. – 2013. – Vol. 80, N 5. – P. 658–662. <https://doi.org/10.1007/s10812-013-9823-3>

References

1. Seiberle H., Benecke C., Bachelts T. Photo-aligned anisotropic optical thin films. *Journal of the Society for Information Display*, 2004, vol. 12, no. 1, pp. 87–92. <https://doi.org/10.1889/1.1824791>
2. Rushnova I. I., Melnikova E. A., Tolstik A. L., Muravsky A. A. Electrically switchable photonic liquid crystal devices for routing of a polarized light wave. *Optics Communications*, 2018, vol. 413, pp. 179–183. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.12.029>
3. Matsumori M., Takahashi A., Tomioka Y., Hikima T., Takata M., Kajitani T., Fukushima T. Photoalignment of an azobenzene-based chromonic liquid crystal dispersed in triacetyl cellulose: single-layer alignment films with an exceptionally high order parameter. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2015, vol. 7, no. 21, pp. 11074–11078. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b02577>
4. Hegde G., Kozenkov V. M., Chigrinov V. G., Kwok H. S. Photoisomerization in photoaligned azo dyes exhibiting photostability. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2009, vol. 507, no. 1, pp. 41–50. <https://doi.org/10.1080/15421400903048263>
5. Finnemeyer V., Bryant D., Bos Ph. Reactive mesogen stabilized azodye alignment for high contrast displays. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, vol. 46, no. 1, pp. 991–993. <https://doi.org/10.1002/sdtp.10319>

6. Yaroshchuk O., Gurumurthy H., Chigrinov V. G., Kwok H. S., Hasebe H., Takatsu H. Photoalignment properties of brilliant yellow dye. *IDW'07 – Proceedings of the 14th International Display Workshops*, 2007, vol. 3, pp. 1665–1668.

7. Wang J., McGinty C., West J., Bryant D., Finnemeyer V., Bryant D., Finnemeyer V., Reich R., Berry S., Clark H., Yaroshchuk O., Bos P. Effects of humidity and surface on photoalignment of brilliant yellow. *Liquid Crystals*, 2017, vol. 44, no. 5, pp. 863–872. <https://doi.org/10.1080/02678292.2016.1247479>

8. Chaplanova Zh. D., Muravsky A. A., Agabekov V. E., Gracheva E. A., Mikulich V. S., Larykava S. N. Photoinduced dichroism of thin films based on a salicylic acid bis-azo derivative and (poly)vinylpyrrolidone. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2015, no. 3, pp. 45–50 (in Russian).

9. Chaplanova Zh. D., Larykava S. N., Agabekov V. E., Kukhta I. N. Kinetics and mechanism of photoinduced orientation of bisazodioksodibenzothiophene in thin films. *Polimernye materialy i tekhnologii = Polymer materials and technologies*, 2016, no. 4, pp. 39–45 (in Russian).

10. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H. B., Scuseria G. E., Robb M. A., Cheeseman J. R. [et al.]. *Gaussian 03, Revision D 01*. Wallingford, 2004.

11. Inscoe M. N., Gould J. H., Brode W. R. The relation between the absorption spectra and the chemical constitution of dyes. *Journal of the American Chemical Society*, 1959, vol. 81, no. 21, pp. 5634–5637. <https://doi.org/10.1021/ja01530a028>

12. Chaplanova Zh. D., Murauski A. A., Rogachev A. A., Agabekov V. E., Gracheva E. A. Multi-layered anisotropic films based on the azo dye brilliant yellow and organic polymers. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2013, vol. 80, no. 5, pp. 658–662. <https://doi.org/10.1007/s10812-013-9823-3>

Информация об авторах

Лемешонок Светлана Николаевна – мл. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: larikova.svetlana@gmail.com.

Чапланова Жанна Давидовна – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chaplanova_zhanna@mail.ru.

Агабеков Владимир Енокович – академик, д-р хим. наук, профессор, директор. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mixa@ichnm.basnet.by.

Иванова Надежда Аркадьевна – канд. хим. наук, заведующая лабораторией. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nadezh_iva@mail.ru.

Кухто Ирина Николаевна – науч. сотрудник. Институт химии новых материалов НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 36, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: iryana.kukhta@tut.by.

Information about the authors

Lemiashonak Sviatlana Nikolaevna – Junior researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: larikova.svetlana@gmail.com.

Chaplanova Zhanna Davidovna – Ph. D. (Chemistry), Leading researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chaplanova_zhanna@mail.ru.

Agabekov Vladimir Enokovich – Academician, D. Sc. (Chemistry), Professor, Director. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mixa@ichnm.basnet.by.

Ivanova Nadezhda Arkadievna – Ph. D. (Chemistry), Head of the Laboratory. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nadezh_iva@mail.ru.

Kukhta Iryna Nikolaevna – Researcher. Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus (36, F. Skoryna Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: iryana.kukhta@tut.by.