

УДК 535.012.2

ФОТОИНДУЦИРОВАННЫЙ НАГРЕВ ТОНКИХ АЗОПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК

Е.А. Черных¹, С.С. Харинцев^{1,2}, А.Т. Едрисов³, Д.П. Хрусталева³

¹*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, 420008, Россия*

²*Академия наук Республики Татарстан, Институт прикладных исследований,
г. Казань, 420111, Россия*

³*Назарбаев Университет, г. Астана, 010000, Республика Казахстан*

Аннотация

В работе впервые исследован фотоиндуцированный нагрев полимерных пленок, функционализированных молекулами азохромофора, с использованием сканирующей тепловой микроскопии с нанометровым разрешением. Показано, что при облучении пленки толщиной 800 нм резонансным лазерным излучением (532 нм) и мощностью порядка 25 мВт/см² наблюдается нагрев пленки на 1.7 К. Предложен также метод определения температуры стеклования тонких (< 100 нм) полимерных пленок на основе термоиндуцированной атомно-силовой микроскопии. Температура стеклования определяется по изменению фазы осциллирующего АСМ-кантилевера. Используя этот подход, в работе показано аномальное снижение температуры стеклования азополимерных тонких пленок без и со стеклянной подложкой.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, тонкие пленки, полимерные пленки, температура стеклования, фотоиндуцированный нагрев, азополимеры, азохромофоры.

Введение

Тонкопленочные полимерные системы, функционализированные молекулами азохромофора, являются одними из наиболее перспективных материалов для гибкой органической наноэлектроники и фотоники. Повышенный интерес к таким средам вызван возможностью управления их оптическими свойствами с помощью внешних электрических полей [1, 2]. Азополимеры нашли применение в следующих технологиях: в формировании поверхностных рельефных решеток, в наблюдении нелинейных оптических эффектов, в системах записи и хранения оптической информации, в оптических переключателях [3–11]. Молекула азокрасителя, первоначально находящаяся в транс-состоянии, поглощает квант света и переходит в возбужденное состояние. Далее она переходит либо непосредственно обратно в транс-состояние, либо косвенно через метастабильное цис-состояние в транс-состояние. В течение всего процесса избыточная энергия преобразуется в тепло. Такой многоциклический механизм приводит к фотоиндуцированному нагреву всей пленки. Тепло, накопленное в пленке, может влиять на стабильность ориентированного состояния молекул в стекловидной среде, поэтому оптическая анизотропия может изменяться во времени. Стабильность ориентированного состояния таких сред определяется температурой стеклования (T_g). Температура стеклования характеризует переход, при котором внутренняя структура полимера изменяется от твердого стеклообразного состояния к вязкотекучему. В настоящее время существует множество методов определения температуры стеклования объемных аморфных

и жидких кристаллических полимеров, таких как дифференциальная сканирующая калориметрия [12], динамический механический анализ [13], комбинационное рассеяние [14], рассеяние Бриллюэна [15] и др. Однако большинство из этих методов обладает низкой чувствительностью. Кроме того, перечисленные подходы неприменимы к полимерным пленкам толщиной менее 100 нм. В настоящей работе мы предлагаем метод определения температуры стеклования тонких полимерных пленок с использованием термической атомно-силовой микроскопии, а также исследуем их фотоиндуцированный нагрев.

1. Экспериментальная часть

На рис. 1, *а* схематически показана экспериментальная установка для измерения температуры тонкой азополимерной пленки, облучаемой лазерным лучом. Тепловые измерения проводились с помощью установки SThM (НТ-МДТ) с использованием специализированного зонда SThM (датчика). На вершине датчика находится резистивное сопротивление NiCr/Pd с радиусом кривизны < 100 нм. Инструментальная погрешность составляет порядка 0.1 °С. Консоль SThM вводится в пленку, освещенную резонансным (532 нм) лазерным пучком диаметром 5 мм и интенсивностью 25 мВт/см², который освещает изотропную (неориентированную) пленку толщиной 800 нм при нормальном падении. Чтобы учесть фотоиндуцированный нагрев самого датчика, мы сначала освещаем его без пленки с двумя длинами волн возбуждения. Как видно из рис. 1, *с*, наблюдаются заметные изменения температуры 0.3 ± 0.1 К (632.8 нм, темно-красная кривая) и 0.4 ± 0.1 К (532 нм, темно-зеленая кривая) при интенсивности 25.5 мВт/см². Таким образом, необходимо учитывать нагрев самого датчика. Объектом данного исследования является полимер ОАХФ (полимер эпоксидного олигомера с ковалентно присоединенным 4-амино-4'-нитроазобензол хромофором) ($T_g = 130$ °С) (рис. 1, *а*). Химическая структура этой молекулы и поглощение неориентированной тонкой пленки азополимера приведены на рис. 1, *б*. На стеклянной подложке методом центрифугирования создавались полимерные пленки разной толщины (20–500 нм). Особенности приготовления пленок на подложке и в всячем состоянии рассмотрены в работе [16]. Толщина пленки определялась с помощью АСМ в контактном режиме.

Измерения температуры стеклования проводились на атомно-силовом микроскопе (НТ-МДТ) в полуконтактном режиме, когда регистрируется фаза колебаний кантилевера. Схема эксперимента представлена на рис. 1, *а*. Атомно-силовой микроскоп использовался как динамический механический анализатор, измеряющий кинетику колебаний кантилевера во время нагрева образца с помощью температурного столика с постоянной скоростью 5 °С/мин.

2. Результаты и выводы

При контакте зонда SThM со свободной висящей пленкой ОАХФ мы наблюдаем резкое снижение температуры на величину 1 К. Это обусловлено передачей тепла от «горячего» датчика к образцу. Минимальная интенсивность, необходимая для повышения температуры на 0.1 К, составляет порядка 2.5 и 10.1 мВт/см² для длин волн 532 и 632.8 нм соответственно. При интенсивности 25.5 мВт/см² чистое изменение температуры достигает 0.2 ± 0.1 К (632.8 нм) и 1.7 ± 0.1 К (532 нм) (рис. 1, *с*). Для пленок с толщиной менее 100 нм нагрев замедляется из-за фотоориентации азокрасителей, и, следовательно, уменьшается количество поглощающих хромофоров, тогда как для более толстых пленок (толщина которых более 10 мкм) все лазерное излучение поглощается основной частью пленки

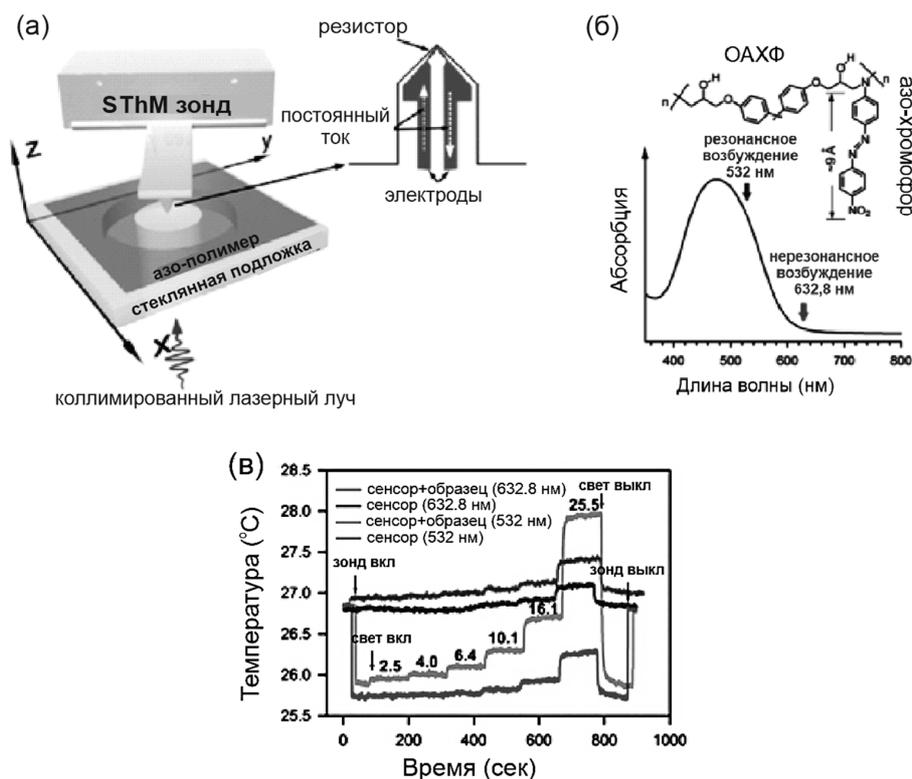


Рис. 1. а) Принципиальная схема эксперимента по измерению температуры пленки в свободно висящем состоянии; б) спектр поглощения ОАХФ; в) фотоиндуцированный нагрев датчика с тонкой пленкой ОАХФ и без нее при воздействии лазерного излучения с длиной волны 532 и 632.8 нм (на рисунке указана интенсивность света, мВт/см²)

и регистрируется рассеянное тепло, прошедшее через верхние слои. В эксперименте ОАХФ пленка помещалась на стеклянную подложку с просверленным отверстием для исключения влияния подложки на результаты измерений.

В результате того, что изменения температуры пленки были слишком малы системе пленка-подложка, мы наблюдали тепловой отклик от подложки, а не самой пленки, поскольку теплопроводность стекла (0.8 Вт/мК) в 4 раза выше, чем у азокрасителей (0.17 Вт/мК). Благодаря как межфазному взаимодействию, так и более высокой теплоемкости подложки (1.56 · 10⁶ Дж/Км³) по сравнению с воздухом (1300 Дж/Км³) фотоиндуцированное тепло внутри пленки ОАХФ мгновенно доставляется в стеклянную подложку.

В настоящее время существует множество инструментов для измерения температуры стеклования объемных аморфных и жидкокристаллических полимеров. К сожалению, большинство из них обладает низкой чувствительностью для определения этого параметра для тонких полимерных пленок. Термоиндуцированная атомно-силовая микроскопия – многообещающий метод, который обеспечивает косвенный доступ к стеклообразным переходам посредством регистрации механического поведения АСМ-кантилевера с нанометровой точностью. Несмотря на то что этот инструмент широко используется в различных практических приложениях, здесь мы предлагаем новый подход, основанный на измерении фазы АСМ-кантилевера для мониторинга (T_g).

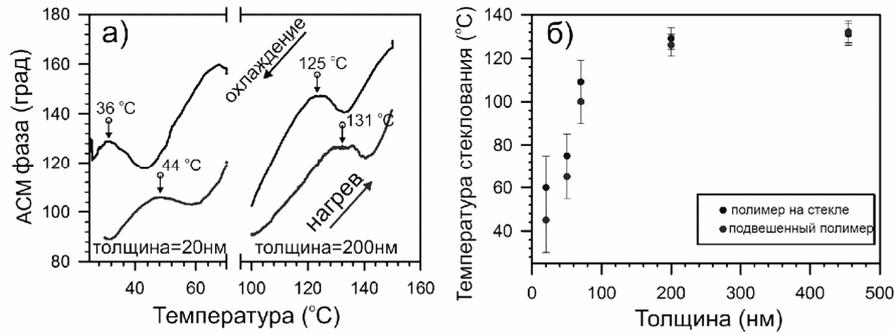


Рис. 2. а) График зависимости фазы колебаний кантилевера от температуры образца для пленок толщиной 20 и 200 нм; б) график зависимости температуры стеклования полимерных пленок на стеклянных подложках и подвешенных пленок от их толщины

В линейном приближении фаза колебаний АСМ кантилевера определяется следующим образом:

$$\sin \varphi = \frac{f_{nf} A_{nf}}{f_f A_f} + \frac{Q E_{\text{dis}}}{\pi k A_f A_{nf}} \quad (1)$$

где f_{nf} и f_f – частоты несвободных и свободных колебаний кантилевера, а A_{nf} и A_f – амплитуды несвободных свободных колебаний соответственно; Q – добротность, E_{dis} – энергия диссипации за один период колебаний, k – жесткость кантилевера.

Фазовый сдвиг кантилевера φ определяется энергией E_{dis} , рассеиваемой при взаимодействии зонда с образцом: $\sin \varphi \sim E_{\text{dis}}$. Фаза колебаний кантилевера чувствительна к любым изменениям, происходящим в образце, что можно объяснить потерей энергии самим кантилевером. Эта потеря энергии связана с изменением свободной энергии Гиббса полимера: $\Delta G = \Delta - T \Delta S$. При температуре стеклования происходит изменение энтальпии и энтропии системы, в результате чего фаза, определяемая по формуле (1), претерпевает обратимый скачок, который наблюдается как при нагреве (красный график) образца, так и при охлаждении (синий график) (рис. 2, а). Рост фазы колебаний с увеличением температуры обусловлен изменением резонансной частоты колебаний кантилевера [17], которое объясняется изменением коэффициента жесткости в зависимости от температуры. С помощью данного метода величина T_g определяется как температура, при которой воспроизводится скачок во время нагрева/охлаждения по зависимостям фазы колебаний АСМ-кантилевера от температуры образца.

На рис. 2, б представлен график зависимости температуры стеклования от толщины для свободноподвешенных пленок и для пленок на подложке. Наблюдается убывающий характер графиков, который согласуется с работами других авторов для других полимеров [14, 15]. Однако характер убывания температуры стеклования для пленок на подложке и свободноподвешенных пленок отличается. Для пленок на подложках и без имеем соответственно следующие выражения:

$$T_g(h) = T_g(\text{bulk}) \left[1 - \left(\frac{h_0}{h} \right)^\alpha \right] \quad \text{и} \quad T_g(h) = T_g(\text{bulk}) \left[1 - a e^{-h/d} \right],$$

где $T_g(\text{bulk})$ – значение температуры стеклования толстой (> 100 нм) полимерной пленки.

Заключение

Таким образом, температура свободноповешенной тонкой азополимерной пленки, облучаемой лазерным излучением с интенсивностью в несколько мВт/см², была впервые измерена с помощью сканирующей тепловой микроскопии. Стабильность ориентированного состояния азополимерной пленки определяется температурой стеклования, которая критически зависит от толщины пленки. Мы экспериментально продемонстрировали аномальное снижение T_g до комнатной температуры как для повешенной пленки, так и для пленки на подложке. Несмотря на незначительный фотоиндуцированный нагрев, составляющий 2 К при умеренной интенсивности 1 мВт/см², этот эффект усиливается при освещении азополимерной пленки лазерным излучением мощностью порядка 1 кВт/см². Поэтому мы заключаем, что фотоиндуцированное нагревание сверхтонкой (< 100 нм) пленки азополимера может отрицательно влиять на стабильность его ориентированного состояния из-за пониженной температуры стеклования. Анизотропия может быть чувствительной к фотоиндуцированному нагреванию азополимерной пленки даже при комнатной температуре. Это исследование будет способствовать дальнейшему прогрессу в области создания новых сред для сверхплотной записи и хранения информации, а также в активных нано-фотонных устройствах.

Благодарности. Работа поддержана Министерством образования и науки Республики Казахстан (проект № AP05132037).

Литература

1. *Nikonorova N.A., Balakina M.Yu., Fominykh O.D., Pudovkin M.S., Vakhonina T.A., Diaz-Calleja R., Yakimansky A.V.* Dielectric spectroscopy and molecular dynamics of epoxy oligomers with covalently bonded nonlinear optical chromophores // *Chem. Phys. Lett.* – 2012. – V. 522. – P. 114–121. doi: 10.1016/j.cplett.2012.09.053.
2. *Natansohn A., Rochon P.* Photoinduced motions in azo-containing polymers // *Chem. Rev.* – 2002. – V. 102, No 11. – P. 4139–4176. – doi: 10.1021/cr970155y.
3. *Mahimwalla Z., Yager K.G., Mamiya J.-I., Shishido A., Priimagi A., Barrett Ch.J.* Azobenzene photomechanics: Prospects and potential applications // *Polym. Bull.* – 2012. – V. 69, No 8. – P. 967–1006. – doi: 10.1007/s00289-012-0792-0.
4. *Cojocariu C., Rochon P.* Light-induced motions in azobenzene-containing polymers // *Pure Appl. Chem.* – 2004. – V. 76, No 7–8. – P. 1479–1497. – doi: 10.1351/pac200476071479.
5. *Sekkat Z., Knoll W.* Photo-Reactive Organic Thin Films. – San Diego: Acad. Press, 2002. – 559 p. – doi: 10.1016/B978-0-12-635490-4.X5000-8.
6. *Labarthe F.L., Sourisseau C.* Raman study of the photoisomerization and angular reorientation of azobenzene molecules in a DR1-doped polymer matrix // *J. Raman Spectrosc.* – 1996. – V. 27, No 6. – P. 491–498. – doi: 10.1002/(SICI)1097-4555(199606)27:6<491::AID-JRS988>3.0.CO;2-G.
7. *Natansohn A., Rochon P., Pezolet M., Audet P., Brown D., To S.* Azo polymers for reversible optical storage. 4. Cooperative motion of rigid groups in semicrystalline polymers // *Macromolecules.* – 1994. – V. 27, No 9. – P. 2580–2585. – doi: 10.1021/ma00087a029.
8. *Shi W., Ding Y.J.J., Mu X.D., Yin X., Fang C.S.* Electro-optic and electromechanical properties of poled polymer thin films // *Appl. Phys. Lett.* – 2001. – V. 79, No 23. – P. 3749–3751. – doi: 10.1063/1.1418448.

9. Wang Y.X., Tai O.Y.H., Wang C.H. Second-harmonic generation in an optically poled azo-dye/polymer film // J. Chem. Phys. – 2005. – V. 123, No 16. – P. 704–709. – doi: 10.1063/1.2087387.
10. Ho M.S., Natansohn A., Rochon P. Azo polymers for reversible optical storage. 7. The effect of the size of the photochromic groups // Macromolecules. – 1995. – V. 28, No 18. – P. 6124–6127. – doi: 10.1021/ma00122a020.
11. Fiorini C., Charra F., Nunzi J.M., Raimond. P. Quasi-permanent all-optical encoding of noncentrosymmetry in azo-dye polymers // J. Opt. Soc. Am. B. – 1997. – V. 14, No 8. – P. 1984–2003. – doi: 10.1364/JOSAB.14.001984.
12. Dargent E., Cabot C., Saiter J.M., Bayard J., Grenet J. The glass transition correlation of DSC and TSDC investigations // J. Therm. Anal. – 1996. – V. 47, No 3. – P. 887–896. – doi: 10.1007/BF01981823.
13. Twombly B., Shepard D.D. Simultaneous Dynamic Mechanical Analysis and Dielectric Analysis of Polymers (DMA-DEA) // Instrum. Sci. Technol. – 1994. – V. 22, No 3. – P. 259–271. – doi: 10.1080/10739149408000454.
14. Liem H., Cabanillas-Gonzalez J., Etchegoin P., Bradley D.D.C. Glass transition temperatures of polymer thin films monitored by Raman scattering // J. Phys.: Cond. Matt. – 2004. – V. 16, No 6. – P. 721–728. – doi: 10.1088/0953-8984/16/6/003.
15. Forrest J.A., Dalnoki-Veress K., Dutcher J.R., Rowat A.C., Stevens J.R. Brillouin light scattering determination of the glass transition in thin, freely-standing poly(styrene) films // Disord. Mater. Interfaces. – 1995. – V. 407. – P. 131–136. – doi: 10.1557/PROC-407-131.
16. Kharintsev S.S., Chernykh E.A., Fishman A.I., Saikin S.K., Alekseev A.M., Salakhov M.K. Photoinduced heating of freestanding azo-polymer thin films monitored by scanning thermal microscopy // J. Phys. Chem. C. – 2017. – V. 121, No 5. – P. 3007–3012. doi:10.1021/acs.jpcc.6b12658.
17. Liu D., Orozco R.O., Wang T. Deviations of the glass transition temperature in amorphous conjugated polymer thin films // Phys. Rev. E. – 2010. – V. 88, No 2. – Art. 022601, P. 1–5. – doi: 10.1103/PhysRevE.88.022601.

Поступила в редакцию
11.12.17

Черных Елена Александровна, студент Института физики

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
E-mail: elenorchernykh@gmail.com

Харинцев Сергей Сергеевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры оптики и нанофотоники; старший научный сотрудник

Казанский (Приволжский) федеральный университет
ул. Кремлевская, д. 18, г. Казань, 420008, Россия
Академия наук Республики Татарстан, Институт прикладных исследований
ул. Баумана, д. 20, г. Казань, 420111, Россия
E-mail: skharint@gmail.com

Едрисов Азамат Тиржанович, доктор химических наук, руководитель лаборатории новых материалов и систем солнечной энергетики

Назарбаев университет
пр. Кабанбай Батыра, д. 53, г. Астана, 010000, Республика Казахстан
E-mail: azamat.yedrissov@nu.edu.kz

Хрусталеv Дмитрий Петрович, доктор химических наук, старший научный сотрудник лаборатории новых материалов и систем солнечной энергетики

Назарбаев университет

пр. Кабанбай Батыра, д. 53, г. Астана, 010000, Республика Казахстан

E-mail: khrustalev@bk.ru

ISSN 2541-7746 (Print)

ISSN 2500-2198 (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA.
SERIYA FIZIKO-MATEMATICHESKIE NAUKI
(Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series)

2018, vol. 160, no. 1, pp. 145–153

Photoinduced Heating of Thin Nitrogen-Polymer Films

E.A. Chernykh^{a}, S.S. Kharintsev^{a,b**}, A.T. Edrisov^{c***}, D.P. Khrustalev^{c****}*

^a*Kazan Federal University, Kazan, 420008 Russia*

^b*Tatarstan Academy of Sciences, Institute of Applied Research, Kazan, 420111 Russia*

^c*Nazarbayev University, Astana, 010000 Republic of Kazakhstan*

E-mail: *elenorchernykh@gmail.com, **skharint@gmail.com,

azamat.yedrissov@nu.edu.kz, *khrustalev@bk.ru

Received December 11, 2017

Abstract

In this work, the photo-induced heating of polymer films functionalized with azo-chromophore molecules has been studied for the first time. We have characterized the photoinduced heating of free-standing thin films with the use of scanning thermal microscopy with nanometer resolution. It has been shown that the film of 800 nm thickness being irradiated by resonant laser radiation (532 nm) and the power of 25 mW/cm² is heated by 1.7 K. Furthermore, a method has been introduced for determining the glass transition temperature of thin (< 100 nm) polymer films based on thermo-induced atomic force microscopy (thermal-assisted AFM). In the proposed approach, the change of the phase of oscillating AFM cantilever has been used to determine the glass transition temperature. An anomalous decrease in the glass transition temperature has been shown for both free-standing and supported azobenzene-functionalized polymeric thin films.

Keywords: atomic force microscopy, thin films, polymer films, glass transition temperature, photoinduced heating, azo-polymers, azo-chromophores

Acknowledgments. The study was supported by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (project no. AP05132037).

Figure Captions

Fig. 1. *a)* The layout diagram of the experiment on measuring the temperature of free-standing film; *b)* the absorption spectrum of CFAO; *c)* photoinduced heating of the detector with a thin CFAO film and without it upon the impact of laser radiation with the wave length of 532 and 632.8 nm (the figure shows light intensity, mW/cm²).

Fig. 2. *a)* The graph showing the dependence of the oscillating phase of the cantilever on the sample temperature for films with the thickness of 20 and 200 nm; *b)* the graph showing the dependence of the temperature of glass transition for polymer films on base glass and cantilever films on their thickness.

References

1. Nikonorova N.A., Balakina M.Yu., Fominykh O.D., Pudovkin M.S., Vakhonina T.A., Diaz-Calleja R., Yakimansky A.V. Dielectric spectroscopy and molecular dynamics of epoxy oligomers with covalently bonded nonlinear optical chromophores. *Chem. Phys. Lett.*, 2012, vol. 522, pp. 114–121. doi: 10.1016/j.cplett.2012.09.053.
2. Natansohn A., Rochon P. Photoinduced motions in azo-containing polymers. *Chem. Rev.*, 2002, vol. 102, no. 11, pp. 4139–4176. doi: 10.1021/cr970155y.
3. Mahimwalla Z., Yager K.G., Mamiya J.-I., Shishido A., Priimagi A., Barrett Ch.J. Azobenzene photomechanics: Prospects and potential applications. *Polym. Bull.*, 2012, vol. 69, no. 8, pp. 967–1006. doi: 10.1007/s00289-012-0792-0.
4. Cojocariu C., Rochon P. Light-induced motions in azobenzene-containing polymers. *Pure Appl. Chem.*, 2004, vol. 76, nos. 7–8, pp. 1479–1497. doi: 10.1351/pac200476071479.
5. Sekkat Z., Knoll W. *Photo-Reactive Organic Thin Films*. San Diego, Acad. Press, 2002. 559 p. doi: 10.1016/B978-0-12-635490-4.X5000-8.
6. Labarthe F.L., Sourisseau C. Raman study of the photoisomerization and angular reorientation of azobenzene molecules in a DR1-doped polymer matrix. *J. Raman Spectrosc.*, 1996, vol. 27, no. 6, pp. 491–498. doi: 10.1002/(SICI)1097-4555(199606)27:6<491::AID-JRS988>3.0.CO;2-G.
7. Natansohn A., Rochon P., Pezolet M., Audet P., Brown D., To S. Azo polymers for reversible optical storage. 4. Cooperative motion of rigid groups in semicrystalline polymers. *Macromolecules*, 1994, vol. 27, no. 9, pp. 2580–2585. doi: 10.1021/ma00087a029.
8. Shi W., Ding Y.J.J., Mu X.D., Yin X., Fang C.S. Electro-optic and electromechanical properties of poled polymer thin films. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, vol. 79, no. 23, pp. 3749–3751. doi: 10.1063/1.1418448.
9. Wang Y.X., Tai O.Y.H., Wang C.H. Second-harmonic generation in an optically poled azo-dye/polymer film. *J. Chem. Phys.*, 2005, vol. 123, no. 16, pp. 704–709. doi: 10.1063/1.2087387.
10. Ho M.S., Natansohn A., Rochon P. Azo polymers for reversible optical storage. 7. The effect of the size of the photochromic groups. *Macromolecules*, 1995, vol. 28, no. 18, pp. 6124–6127. doi: 10.1021/ma00122a020.
11. Fiorini C., Charra F., Nunzi J.M., Raimond. P. Quasi-permanent all-optical encoding of noncentrosymmetry in azo-dye polymers. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1997, vol. 14, no. 8, pp. 1984–2003. doi: 10.1364/JOSAB.14.001984.
12. Dargent E., Cabot C., Saiter J.M., Bayard J., Grenet J. The glass transition correlation of DSC and TSDC investigations. *J. Therm. Anal.*, 1996, vol. 47, no. 3, pp. 887–896. doi: 10.1007/BF01981823.
13. Twombly B., Shepard D.D. Simultaneous dynamic mechanical analysis and dielectric analysis of polymers (DMA-DEA). *Instrum. Sci. Technol.*, 1994, vol. 22, no. 3, pp. 259–271. doi: 10.1080/10739149408000454.
14. Liem H., Cabanillas-Gonzalez J., Etchegoin P., Bradley D.D.C. Glass transition temperatures of polymer thin films monitored by Raman scattering. *J. Phys.: Condens. Matter*, 2004, vol. 16, no. 6, pp. 721–728. doi: 10.1088/0953-8984/16/6/003.
15. Forrest J.A., DalnokiVeress K., Dutcher J.R., Rowat A.C., Stevens J.R. Brillouin light scattering determination of the glass transition in thin, freely-standing poly(styrene) films. *Disord. Mater. Interfaces*, 1995, vol. 407, pp. 131–136. doi: 10.1557/PROC-407-131.

-
16. Kharintsev S.S., Chernykh E.A., Fishman A.I., Saikin S.K., Alekseev A.M., Salakhov M.K. Photoinduced heating of freestanding azo-polymer thin films monitored by scanning thermal microscopy. *J. Phys. Chem. C*, 2017, vol. 121, no. 5, pp. 3007–3012. doi: 10.1021/acs.jpcc.6b12658.
 17. Liu D., Orozco R.O., Wang T. Deviations of the glass transition temperature in amorphous conjugated polymer thin films. *Phys. Rev. E*, 2010, vol. 88, no. 2, art. 022601, pp. 1–5. doi: 10.1103/PhysRevE.88.022601.
-

⟨ **Для цитирования:** Черных Е.А., Харинцев С.С., Едрисов А.Т., Хрусталеv Д.П. Фотоиндуцированный нагрев тонких азополимерных пленок // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Физ.-матем. науки. – 2018. – Т. 160, кн. 1. – С. 145–153. ⟩

⟨ **For citation:** Chernykh E.A., Kharintsev S.S., Edrisov A.T., Khrustalev D.P. Photoinduced heating of thin nitrogen-polymer films. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Fiziko-Matematicheskie Nauki*, 2018, vol. 160, no. 1, pp. 145–153. (In Russian) ⟩