

Мохаммед Али Яхья Али АЛЬ-МУЗАЙКЕР¹
Таир Ерикович ЕСЕНБАЕВ²
Николай Сергеевич КУБОЧКИН³
Мария Дмитриевна ГОРЕВА⁴
Наталья Анатольевна ИВАНОВА⁵

УДК 532.64

ВЛИЯНИЕ СМАЧИВАЕМОСТИ ПОДЛОЖКИ И ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА НА САМОСБОРКУ НАНОЧАСТИЦ ПРИ ИСПАРЕНИИ КАПЕЛЬ КОЛЛОИДНЫХ РАСТВОРОВ

- ¹ аспирант, Физико-технический институт, инженер-исследователь, научно-исследовательская лаборатория фотоники и микрофлюидики, Х-БИО, Тюменский государственный университет
m.al-muzajker@utmn.ru
- ² аспирант, Физико-технический институт, младший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория фотоники и микрофлюидики, Х-БИО, Тюменский государственный университет
t.e.esenbaev@utmn.ru; ORCID: 0000-0003-1071-4894
- ³ аспирант, Физико-технический институт, младший научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория фотоники и микрофлюидики, Х-БИО, Тюменский государственный университет
n.s.kubochkin@utmn.ru
- ⁴ студент, Физико-технический институт, Тюменский государственный университет
mariya.gorewa2012@yandex.ru
- ⁵ кандидат физико-математических наук, доцент, Физико-технический институт, федеральный исследователь, заведующий научно-исследовательской лабораторией фотоники и микрофлюидики, Х-БИО, Тюменский государственный университет
n.ivanova@utmn.ru

Цитирование: Аль-Музайкер М. Я. Влияние смачиваемости подложки и влажности воздуха на самосборку наночастиц при испарении капель коллоидных растворов / М. Я. Аль-Музайкер, Т. Е. Есенбаев, Н. С. Кубочкин, М. Д. Горева, Н. А. Иванова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2019. Том 5. № 3. С. 83-96.
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-83-96

Аннотация

В настоящей статье рассматривается влияние смачиваемости подложки и влажности воздуха на процесс формирования упорядоченных паттернов наночастиц в испаряющихся микрокаплях. Исследован процесс самосборки частиц полистирола и оксида алюминия на стекле, покрытом вольфрамом, углеродом, титаном, золотом и тефлоном. Проведена оценка времени испарения капель и анализ полученных упаковок частиц в зависимости от гидрофобности подложек. Выявлено влияние влажности на динамику испарения и самоорганизацию наночастиц.

Ключевые слова

Самоорганизация наночастиц, конвекция Марангони, смачивание, дзета-потенциал, испарение капель.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-83-96

Введение

Работа нацелена на решение проблемы управления процессами самоорганизации наночастиц в диссипативных системах и технологиях создания материалов с заданными свойствами [1] и, в частности, на комплексное исследование влияния смачиваемости поверхности на упорядочивание и формирование паттернов наночастиц. Многие современные оптоэлектронные устройства [8], сенсоры [19], сверхпроводящие материалы на основе нанотрубок [13], прозрачные и гибкие проводники [10], материалы с усовершенствованными трибологическими свойствами, а также технологии адресной доставки лекарственных препаратов и тестирования лекарственных средств [15] основаны на технологии формирования упорядоченных структур коллоидных кристаллов [16] в процессе испарения капель и тонких пленок коллоидных растворов.

В настоящее время существует несколько методов управления самосборкой микро- и наночастиц, основанных на использовании внешнего воздействия на процессы высыхания микро- и нанокapель коллоидных растворов, например: воздействия акустическими волнами [2], инерционным полем [18], ИК и рентгеновским излучением [3, 6, 11], давлением света на частицу [5] и фотохимическим действием света [7, 17].

Процесс самоорганизации наночастиц определяется типом частиц и энергией используемых подложек. Несмотря на многочисленные исследования факторов, влияющих на процесс самоорганизации микро- и наночастиц при испарении микро- и нанокapель, влияние энергии подложки до сих пор мало изучено [12]. Так, в работе [16] было изучено влияние таких физико-химических параметров, как концентрация и размер частиц, объем капель, состав коллоидных растворов, однако анализ проведен только для двух поверхностей, что не позволяет сделать вывод о влиянии поверхностной энергии на процесс самоорганизации наночастиц.

В настоящей работе изучено влияние энергии подложки на процесс самоорганизации наночастиц в испаряющихся микрокаплях при двух значениях влажности воздуха.

Экспериментальная часть

В качестве подложек использовались покровные стекла размером 18×18 мм, модифицированные различными материалами. Перед модификацией стекла промывали в ультразвуковой ванне с ацетоном в течение 10 минут, а затем — в дистиллированной воде, после чего сушили.

Поверхность полученных стекол модифицировали путем напыления пленок углерода (JEOL JEC-570 coater, Japan), золота (Quorum Q150R-S, UK), вольфрама и титана (Nanofab-100, NT MDT Russia). Напыление титаном и вольфрамом осуществляли при температуре 400 и 600 °С соответственно. Для создания гидрофобных поверхностей на стекло наносили пленку тефлона (PTFE AF) толщиной около 1 мкм методом, описанным в работе [9].

На полученные подложки для оценки их смачивающих свойств помещали каплю дистиллированной воды (3 мкл) и измеряли краевой угол смачивания θ . Малый объем позволял пренебречь отклонением формы капли от сферической, обусловленным гравитацией. Геометрия сидящей на подложке капли показана на рис. 1. Обработку полученных изображений осуществляли в программном пакете LWAC собственной разработки. Результаты измерений представлены в таблице 1.

В экспериментах использовали водные растворы частиц полистирола PS ($d = (100 \pm 3)$ нм, объемная доля 0,1%) и оксида алюминия Al_2O_3 ($d = (150 \pm 20)$ нм, объемная доля 0,2%, Microtrac, USA). Измерение дзета-потенциалов частиц Al_2O_3 и PS в коллоидных растворах проводили с помощью Microtrac Nanotrac Wave II.

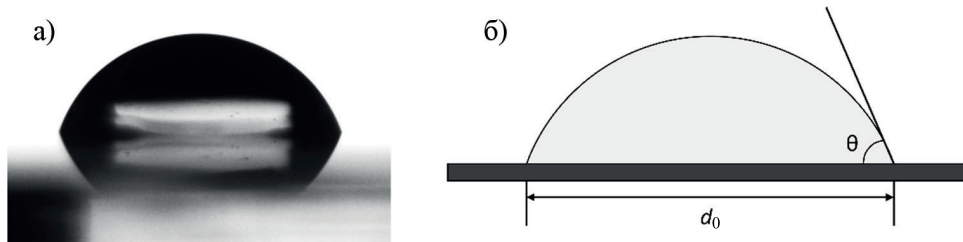


Рис. 1. Геометрия сидящей на подложке капли: а) капля воды (3 мкл) на подложке с углеродным напылением толщиной 75 нм; б) геометрия капли на подложке, где θ — краевой угол смачивания, d_0 — начальный диаметр капли

Fig. 1. The droplet geometry on the substrate: а) water droplet (3 μ l) on a substrate coated with carbon 75 nm thick; б) geometry of droplet on a substrate, where θ — contact angle, d_0 — initial diameter of droplet

Таблица 1

Свойства используемых подложек

Table 1

Properties of substrates

Тип подложки	Краевой угол смачивания водой θ , °	Толщина покрытия, нм
Вольфрам	43	75
Покровное стекло	60	—
Углерод	70	60
Титан	74	60
Золото	80	60
Тефлон	116	1 000

Капли раствора объемом 3 мкл наносили на подложку с помощью микродозатора при температуре 22 °С и двух значениях относительной влажности воздуха — 22 и 37%. Для наблюдения за процессом испарения использовался микроскоп ZEISS AXIOZoom.V16 с объективом ZEISSAPOZ 1.5x/0.37 FWD 30 mm и с камерой ZEISS AxioCam 506 color. Экспериментальная установка схематично показана на рис. 2.

Кадры упаковок частиц PS и Al_2O_3 , образованных в результате испарения растворов, получены с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM, JEOL JSM-6510LV).

Результаты экспериментов и их обсуждение

Известно, что наиболее интенсивное испарение происходит на линии трехфазного контакта, что приводит к локальному понижению температуры и, в свою очередь, к возникновению градиента поверхностного натяжения между кромкой и вершиной капли, что создает потоки Марангони, которые переносят частицы к кромке, где они формируют кольцевые структуры — кофейные пятна [4].

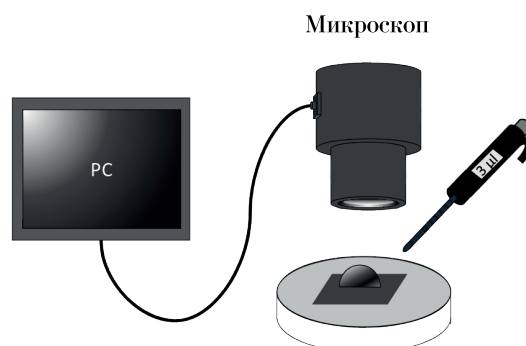


Рис. 2. Схема экспериментальной установки

Fig. 2. Experimental setup (schematic)

Линии тока частиц Al_2O_3 в капле на стеклах, покрытых углеродом и вольфрамом, показаны на рис. 3а и 3б. Результаты самоорганизации частиц полистирола PS и оксида алюминия Al_2O_3 на разных подложках после полного высыхания капли приведены на рис. 4.

Видно, что независимо от величины краевого угла и типа частиц они формируют кольцо на кромке капли, т. е. проявляется так называемый эффект кофейного пятна. Время формирования кольцевой структуры и полного высыхания капли в зависимости от θ показано на рис. 5.

Также можно заметить, что время высыхания мало изменяется в зависимости от θ в диапазоне значений от 43° до 74° . Однако для гидрофобной подложки (тефлон) с краевым углом смачивания $\theta = 116^\circ$ время высыхания возрастает, причем для коллоидного раствора PS почти в 2 раза. Такое поведение связано с отсутствием стадии, в течение которой капля испаряется с постоянным диаметром [14], в то время как процесс испарения капли, частично смачивающей подложку, включает в себя этап, на котором диаметр основания капли сохраняется постоянным при уменьшающемся краевом угле смачивания. Отметим, что экспериментальные наблюдения находятся в соответствии с результатами, представленными в работе [14].

На рис. 6 показано влияние смачиваемости подложки на отношение начального диаметра капли d_0 ко внешнему диаметру образованного кольца d_1 , равное 1 для $\theta = 43\text{--}80^\circ$ (вольфрам, покровное стекло, углерод, титан и золото) и возрастающее до 1,6-1,7 для $\theta = 116^\circ$ (тефлон).

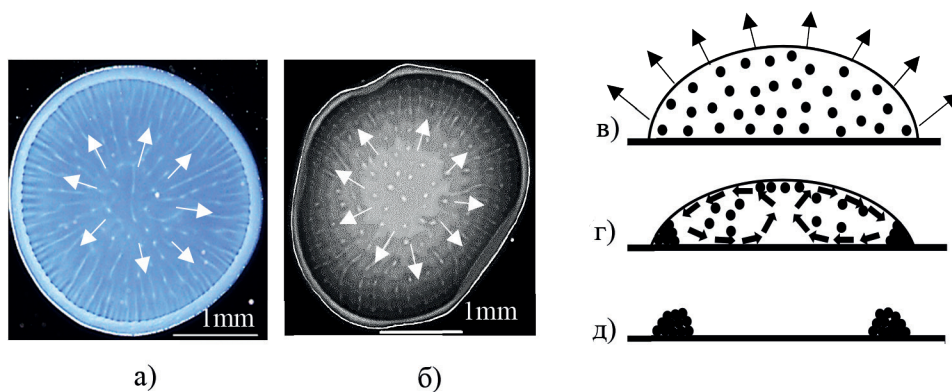


Рис. 3. Линии тока частиц Al_2O_3 в капле на стеклах, покрытых углеродом и вольфрамом: а) испаряющаяся капля (стрелки указывают направление движения частиц) коллоидного раствора Al_2O_3 объемом 3 мкл на углероде; б) на вольфраме; в-д) схематичная иллюстрация формирования кофейного пятна

Fig. 3. Al_2O_3 particles' streamlines in a drop on carbon and tungsten-coated glass: a) evaporating droplet (arrows indicate the direction of particles movement) of Al_2O_3 colloidal solution of 3 μl volume on carbon; б) on tungsten; в-д) schematic illustration of coffee stain formation

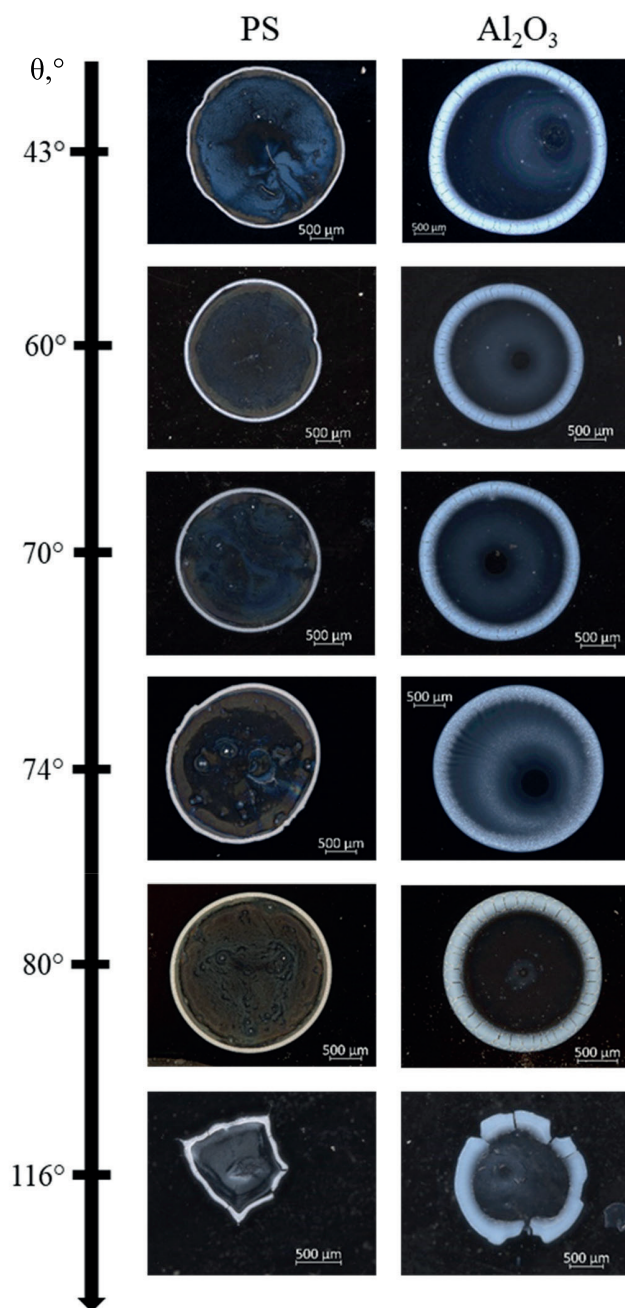


Рис. 4. Микрофотографии кофейных пятен, образованных после полного высыхания коллоидных растворов на подложках с различной поверхностной энергией при RH = 22%

Fig. 4. Microscopic photos of coffee stains formed after complete drying of colloidal solutions on substrates with different surface energy at RH = 22%

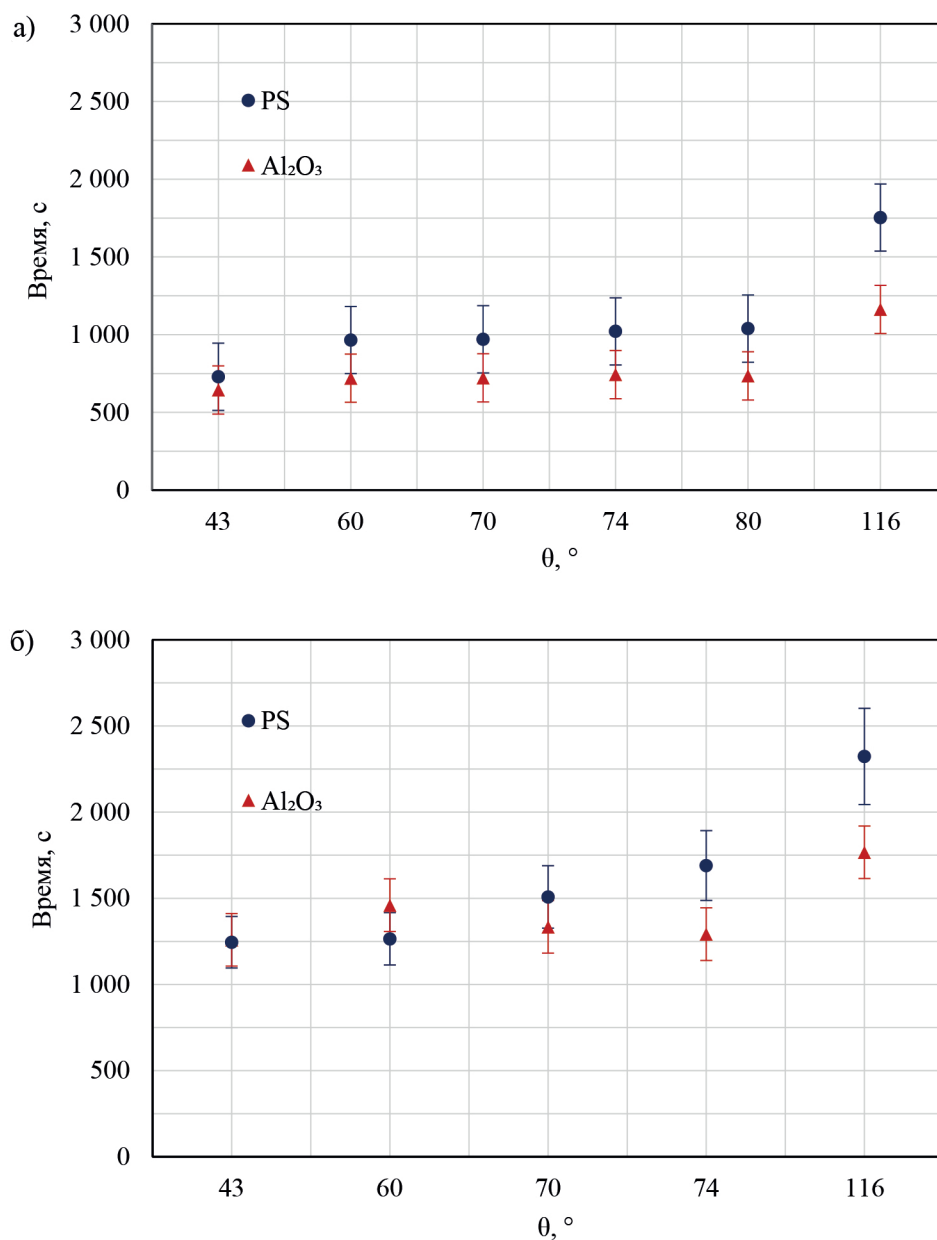


Рис. 5. Зависимость времени полного высыхания капли от краевого угла смачивания водой для частиц PS и Al_2O_3 при $\text{RH} = 22\%$ (а) и при $\text{RH} = 37\%$ (б)

Fig. 5. Dependence of the total drying time of the droplet on the water contact angle of the PS and Al_2O_3 particles at $\text{RH} = 22\%$ (a) and at $\text{RH} = 37\%$ (b)

Таким образом, на гидрофильных $\theta = (43-60^\circ)$ и умеренно гидрофобных подложках $\theta = (70-80^\circ)$ наблюдается эффект припинивания трехфазной границы, а на тефлоне испарение капли коллоидного раствора происходит с уменьшением диаметра капли.

Ширина кольца упаковки частиц определяется как $\Delta d = d_1 - d_{\text{внут}}$, где d_1 — внешний диаметр кольца (паттерна), $d_{\text{внут}}$ — внутренний диаметр кольца (паттерна). Как видно из рис. 7, ширина кольца остается практически неизменной независимо от поверхностной энергии и влажности воздуха.

Также было обнаружено, что ширина кольца, образованного частицами после высыхания капли коллоидного раствора Al_2O_3 , значительно больше ширины кольца, образованного частицами после высыхания капли коллоидного раствора PS, что обусловлено большей объемной долей частиц Al_2O_3 в коллоидном растворе. Кроме того, частицы PS формируют упорядоченную упаковку, а частицы Al_2O_3 располагаются хаотично, что также обуславливает большую площадь, занимаемую частицами Al_2O_3 (рис. 8).

Известно, что одним из параметров, определяющих степень и характер взаимодействия частиц в коллоидных растворах и, как следствие, формируемый паттерн, является дзета-потенциал ζ , представляющий собой разность потенциалов в непосредственной близости к частице (потенциал неподвижного слоя жидкости, примыкающего к частице) и окружающей жидкости. Дзета-потенциал частиц Al_2O_3 в коллоидном растворе был измерен с помощью лазерного анализатора размеров частиц (Microtrac Nanotrac Wave II) и равен 50 ± 5 мВ,

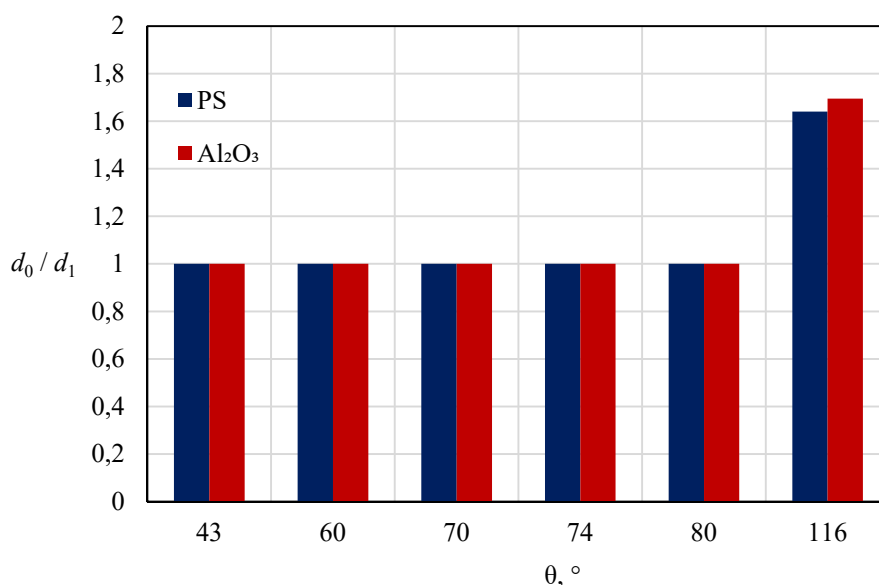


Рис. 6. Отношение начального диаметра капли ко внешнему диаметру кольца

Fig. 6. The ratio of the initial diameter of the droplet to the outer diameter of the ring

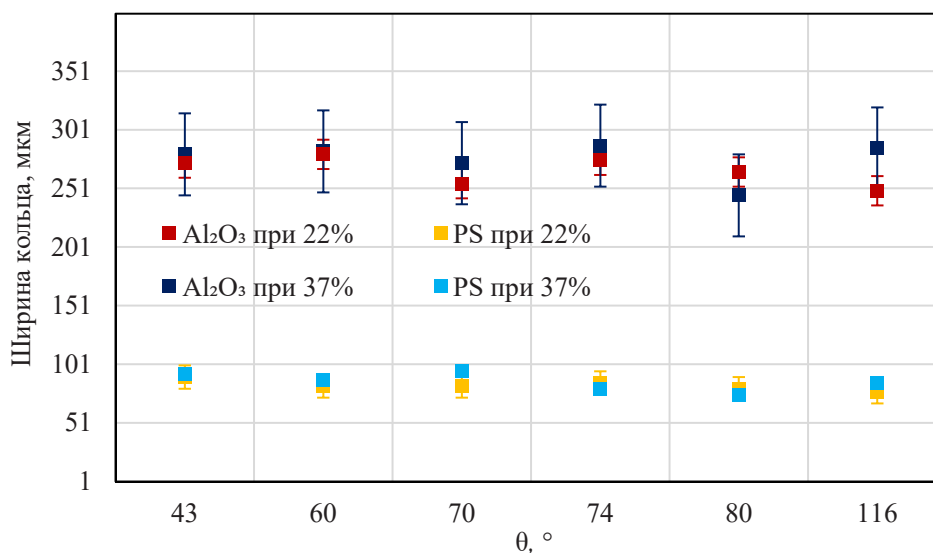


Рис. 7. Зависимость ширины кольца от поверхностной энергии для коллоидных растворов частиц PS и Al₂O₃ при RH = 22% (а) и при RH = 37% (б)

Fig. 7. Dependence of the ring width on the contact angle of water for colloidal solutions of PS and Al₂O₃ particles at RH = 22% (a) and at RH = 37% (б)

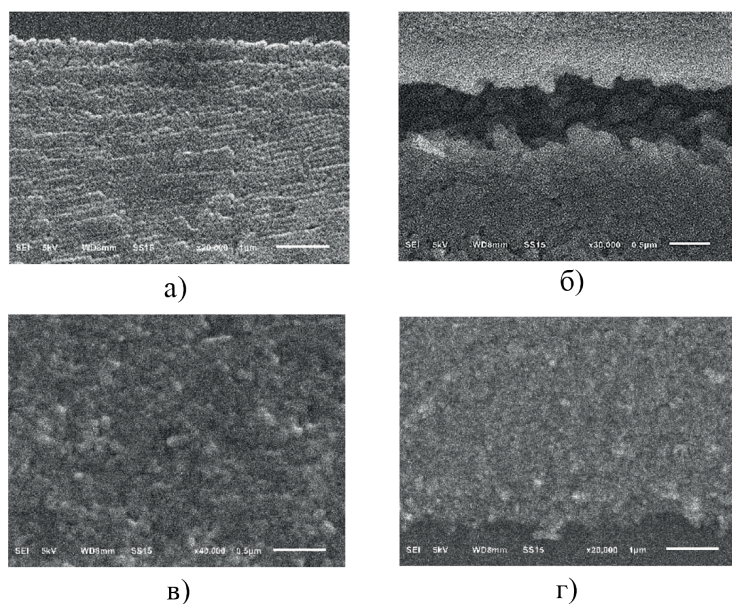


Рис. 8. SEM-кадры упаковки частиц PS на пленке углерода (а) и титана (б), SEM-кадры упаковки частиц Al₂O₃ на углероде (в) и титане (г)

Fig. 8. SEM frames of PS particles packing on carbon (а) and titanium (б), SEM frames of Al₂O₃ particles packing on carbon (в) and titanium (г)

а для частиц PS — приведен в технической документации к Microtrac Nanotrac Wave II и равен 14,2 мВ. Для частиц PS, обладающих малым дзета-потенциалом, взаимное притяжение, обусловленное силами Ван-дер-Ваальса, превышает электростатическое отталкивание, и они начинают коагулировать еще в растворе, осаждаясь на поверхности большими агломератами. Напротив, частицы Al_2O_3 долгое время остаются взвешенными в коллоидном растворе, осаждаясь на поверхности поодиночке или малыми скоплениями непосредственно перед окончательным высыханием капли.

На финальный паттерн также оказывает влияние размер частиц, который для Al_2O_3 варьируется в гораздо большем диапазоне (± 20 нм), чем для PS (± 3 нм), что обуславливает их менее упорядоченную упаковку (рис. 8).

Заключение

Показано, что смачиваемость поверхности оказывает значительное влияние на процесс самоорганизации наночастиц в испаряющихся микрокаплях коллоидных растворов. Установлено, что ширина кольца зависит от объемной доли наночастиц в растворе, а также от типа упаковки частиц. В то же время для рассмотренного диапазона краевых углов смачивания и значений влажности воздуха ширина кольца оставалась неизменной.

Первоначальный диаметр капли на гидрофильных подложках равен внешнему диаметру кольца упаковки частиц после полного испарения капель, а на гидрофобном тефлоне диаметр кольца упаковки меньше, чем начальный диаметр капли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев-Степанов П. В. Самосборка наночастиц в микрообъеме коллоидного раствора: физика, моделирование, эксперимент / П. В. Лебедев-Степанов, Р. М. Кадушников, С. П. Молчанов, А. А. Иванов, В. П. Митрохин, К. О. Власов, Н. А. Рубин, Г. А. Юрасик, В. Г. Назаров, М. В. Алфимов // Российские нанотехнологии. 2013. № 3-4. С. 5-23.
2. Руденко О. В. Самосборка ансамблей коллоидных частиц в акустическом поле / О. В. Руденко, А. И. Коробов, Б. А. Коршак, П. В. Лебедев-Степанов, С. П. Молчанов, М. В. Алфимов // Российские нанотехнологии. 2010. Том 5. № 7-8. С. 63-65.
3. Ashkin A. Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers / A. Ashkin // Proceedings of the National Academy of Sciences. 1997. Vol. 94. № 10. Pp. 4853-4860. DOI: 10.1364/OPN.10.5.000041
4. Deegan R. D. Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops / R. D. Deegan, O. Bakajin, T. F. Dupont, G. Huber, S. R. Nagel, T. A. Witten // Nature. 1997. Vol. 389. № 6653. Pp. 827-829. DOI: 10.1038/39827
5. Feldmann D. Manipulation of small particles at solid liquid interface: light driven diffusioosmosis / D. Feldmann, S. R. Maduar, M. Santer, N. Lomadze, O. I. Vinogradova, S. Santer // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. Article 36443. DOI: 10.1038/srep36443

6. Georgiadis A. Bespoke periodic topography in herd polymer films by infrared radiation-assisted evaporative lithography / A. Georgiadis, A. F. Routh, B. M. Murray, J. L. Keddie // *Soft Matter*. 2011. Vol. 7. № 23. Pp. 11098-11102. DOI: 10.1039/C1SM06527K
7. Han W. Learning from «coffee rings»: ordered structures enabled by controlled evaporative self-assembly / W. Han, Z. Lin // *Angewandte Chemie*. 2012. Vol. 51. № 7. Pp. 1534-1546. DOI: 10.1002/anie.201104454
8. Helseth L. E. Particle interactions near the contact line in liquid drops / L. E. Helseth, T. M. Fischer // *Physical Review E*. 2003. Vol. 68. № 4. Article 042601. DOI: 10.1103/PhysRevE.68.042601
9. Ivanova N. A. Removal of micrometer size particles from surfaces using laser-induced thermocapillary flow: experimental results / N. A. Ivanova, V. M. Starov, A. Trybala, V. M. Flyagin // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2016. № 473. Pp. 120-125. DOI: 10.1016/j.jcis.2016.04.001
10. Layani M. Transparent conductive coatings by printing coffee ring arrays obtained at room temperature / M. Layani, M. Gruchko, O. Milo, I. Balberg, D. Azulay, S. Magdassi // *ACS Nano*. 2009. Vol. 3. № 11. Pp. 3537-3542. DOI: 10.1021/nn901239z
11. Li J. Drying dip-coated colloidal films / J. Li, B. Cabance, M. Sztucki, J. Gummel, L. Goehring // *Langmuir*. 2012. Vol. 28. № 1. Pp. 200-208. DOI: 10.1021/la203549g
12. Molchanov S. P. The factors determining formation dynamics and structure of ring-shaped deposits resulting from capillary self-assembly of particles / S. P. Molchanov, V. I. Roldughin, I. A. Chernova-Kharaevac, G. A. Yurasik, I. N. Senchikhi // *Colloid Journal*. 2018. Vol. 80. № 1. Pp. 59-72. DOI: 10.1134/S1061933X18010076
13. Shimoni A. Inkjet printing of flexible high-performance carbon nanotube transparent conductive films by «coffee ring effect» / A. Shimoni, S. Azoubel, S. Magdassi // *Nanoscale*. 2014. № 6. Pp. 11084-11089. DOI: 10.1039/c4nr02133a
14. Shin D. H. Evaporating characteristics of sessile droplet on hydrophobic and hydrophilic surfaces / D. H. Shin, S. H. Lee, J.-Y. Jung, J. Y. Yoo // *Microelectronic Engineering*. 2009. № 86. Pp. 1350-1353. DOI: 10.1016/j.mee.2009.01.026
15. Takhistov P. Complex stain morphologies / P. Takhistov, H. C. Chang // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. Vol. 41. № 25. Pp. 6256-6269. DOI: 10.1021/ie010788+
16. Utgenannt A. Directed organization of gold nanoparticles in polymer coatings through infrared-assisted evaporative lithography / A. Utgenannt, J. L. Keddie, O. L. Muskens, A. G. Kanaras // *Chemical Communications*. 2013. Vol. 49. № 39. Pp. 4253-4255. DOI: 10.1039/c2cc37844b
17. Varanakkottu S. N. Light-directed particle patterning by evaporative optical Marangoni assembly / S. N. Varanakkottu, M. Anyfantakis, M. Morel, S. Rudiuk, D. Baigl // *Nano Letters*. 2016. Vol. 16. № 1. Pp. 644-650. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b04377
18. Zhao Y. Spin coating of a colloidal suspension / Y. Zhao, J. S. Marshall // *Physics of Fluids*. 2008. Vol. 20. № 4. DOI: 10.1063/1.2896601
19. Zhiqun L. *Evaporative Self-Assembly of Ordered Complex Structures* / L. Zhiqun // World Scientific Publishing Company. 2010.

Mohammed Ali Y. Ali AL-MUZAIQER¹

Tair E. ESENBAEV²

Nikolai S. KUBOCHKIN³

Maria D. GOREVA⁴

Natalya A. IVANOVA⁵

UDC 532.64

**INFLUENCE OF SUBSTRATE WETTABILITY AND AIR HUMIDITY
ON SELF-ASSEMBLY OF NANOPARTICLES IN EVAPORATING
DROPLETS OF COLLOIDAL SOLUTIONS**

¹ Postgraduate Student, Institute of Physics and Technology,
Junior Researcher, Research Laboratory of Photonics and Microfluidics,
X-BIO, University of Tyumen
m.al-muzajker@utmn.ru

² Postgraduate Student, Institute of Physics and Technology,
Junior Researcher, Research Laboratory of Photonics and Microfluidics,
X-BIO, University of Tyumen
t.e.esenbaev@utmn.ru; ORCID: 0000-0003-1071-4894

³ Postgraduate Student, Institute of Physics and Technology,
Junior Researcher, Research Laboratory of Photonics and Microfluidics,
X-BIO, University of Tyumen
n.s.kubochkin@utmn.ru

⁴ Undergraduate Student, Institute of Physics and Technology, University of Tyumen
mariya.gorewa2012@yandex.ru

⁵ Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Institute of Physics and Technology,
Federal Researcher, Head of the Research Laboratory of Photonics and Microfluidics,
X-BIO, University of Tyumen
n.ivanova@utmn.ru

Citation: Al-Muzaiqer M. Y., Esenbaev T. E., Kubochkin N. S., Goreva M. D., Ivanova N. A. 2019. "Influence of substrate wettability and air humidity on self-assembly of nanoparticles in evaporating droplets of colloidal solutions". Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy, vol. 5, no 3, pp. 83-96.
DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-83-96

Abstract

This article discusses the influence of substrate wettability and air humidity on the process of nanoparticle patterns formation in evaporating microdroplets. The process of self-assembly of polystyrene and aluminum oxide particles on the glass covered with titanium, tungsten, carbon, and teflon was investigated.

The droplet evaporation time and the obtained packing of particles with increasing hydrophobicity of substrates were evaluated. The influence of air humidity on the evaporation dynamics and on the process of nanoparticles self-assembly is revealed.

Keywords

Self-assembly of nanoparticles, Marangoni convection, wetting, zeta potential, droplet evaporation.

DOI: 10.21684/2411-7978-2019-5-3-83-96

REFERENCES

1. Lebedev-Stepanov P. V., Kadushnikov R. M., Molchanov S. P., Ivanov A. A., Mitrokhin V. P., Vlasov K. O., Rubin N. A., Yurasik G. A., Nazarov V. G., Alfimov M. V. 2013. "Self-assembly of nanoparticles in the microvolume of colloidal solution: Physics, modeling, and experiment". *Nanotechnologies in Russia*, vol. 8, no 3-4, pp. 137–162. DOI: 10.1134/S1995078013020110
2. Rudenko O. V., Korobov A. I., Korshak B. A., Lebedev-Stepanov P. V., Molchanov S. P., Alfimov M. V. 2010. "Self-assembly of colloidal-particle ensembles in an acoustic field". *Nanotechnologies in Russia*, vol. 5, no 7-8, pp. 469-473. DOI: 10.1134/S1995078010070062
3. Ashkin A. 1997. "Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 94, no 10, pp. 4853-4860. DOI: 10.1364/OPN.10.5.000041
4. Deegan R. D., Bakajin O., Dupont T. F., Huber G., Nagel S. R., Witten T. A. 1997. "Capillary flow as the cause of ring stains from dried liquid drops". *Nature*, vol. 389, no 6653, pp. 827-829. DOI: 10.1038/39827
5. Feldmann D., Maduar S. R., Santer M., Lomadze N., Vinogradova O. I., Santer S. 2016. "Manipulation of small particles at solid liquid interface: light driven diffusioosmosis". *Scientific Reports*, vol. 6, art. 36443. DOI: 10.1038/srep36443
6. Georgiadis A., Routh A. F., Murray B. M., Keddie J. L. 2011. "Bespoke periodic topography in herd polymer films by infrared radiation-assisted evaporative lithography". *Soft Matter*, vol. 7, no 23, pp. 11098-11102. DOI: 10.1039/C1SM06527K
7. Han W., Lin Z. 2012. "Learning from 'coffee rings': ordered structures enabled by controlled evaporative self-assembly". *Angewandte chemie*, vol. 51, no 7, pp. 1534-1546. DOI: 10.1002/anie.201104454
8. Helseth L. E., Fischer T. M. 2003. "Particle interactions near the contact line in liquid drops". *Physical Review E*, vol. 68, no 4, art. 042601. DOI: 10.1103/PhysRevE.68.042601

9. Ivanova N. A., Starov V. M., Trybala A., Flyagin V. M. 2016. "Removal of micrometer size particles from surfaces using laser-induced thermocapillary flow: experimental results". *Journal of Colloid and Interface Science*, no 473, pp. 120-125. DOI: 10.1016/j.jcis.2016.04.001
10. Layani M., Gruchko M., Milo O., Balberg I., Azulay D., Magdassi S. 2009. "Transparent conductive coatings by printing coffee ring arrays obtained at room temperature". *ACS Nano*, vol. 3, no 11, pp. 3537-3542. DOI: 10.1021/nn901239z
11. Li J., Cabance B., Sztucki M., Gummel J., Goehring L. 2018. "Drying dip-coated colloidal films". *Langmuir*, vol. 28, no 1, pp. 200-208. DOI: 10.1021/la203549g
12. Molchanov S. P., Roldughin V. I., Chernova-Kharaevac I. A., Yurasik G. A., Senchikhi I. N. 2018. "The factors determining formation dynamics and structure of ring-shaped deposits resulting from capillary self-assembly of particles". *Colloid Journal*, vol. 80, no 1, pp. 59-72. DOI: 10.1134/S1061933X18010076
13. Shimoni A., Azoubel S., Magdassi S. 2014. "Inkjet printing of flexible high-performance carbon nanotube transparent conductive films by 'coffee ring effect'". *Nanoscale*, no 6, pp. 11084-11089. DOI: 10.1039/c4nr02133a
14. Shin D. H., Lee S. H., Jung J.-Y., Yoo J. Y. 2009. "Evaporating characteristics of sessile droplet on hydrophobic and hydrophilic surfaces". *Microelectronic Engineering*, no 86, pp. 1350-1353. DOI: 10.1016/j.mee.2009.01.026
15. Takhistov P., Chang H. C. 2002. "Complex stain morphologies". *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 41, no 25, pp. 6256-6269. DOI: 10.1021/ie010788+
16. Utgenannt A., Keddie J. L., Muskens O. L., Kanaras A. G. 2013. "Directed organization of gold nanoparticles in polymer coatings through infrared-assisted evaporative lithography". *Chemical Communications*, vol. 49, no 39, pp. 4253-4255. DOI: 10.1039/c2cc37844b
17. Varanakkottu S. N., Anyfantakis M., Morel M., Rudiuk S., Baigl D. 2016. "Light-directed particle patterning by evaporative optical Marangoni assembly". *Nano Letters*, vol. 16, no 1, pp. 644-650. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b04377
18. Zhao Y., Marshall J. S. 2008. "Spin coating of a colloidal suspension". *Physics of Fluids*, vol. 20, no 4. DOI: 10.1063/1.2896601
19. Zhiqun L. 2010. *Evaporative Self-Assembly of Ordered Complex Structures*. World Scientific Publishing Company.