

# МОДЕЛИРОВАНИЕ УПОРЯДОЧЕННОГО МОНОСЛОЯ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ

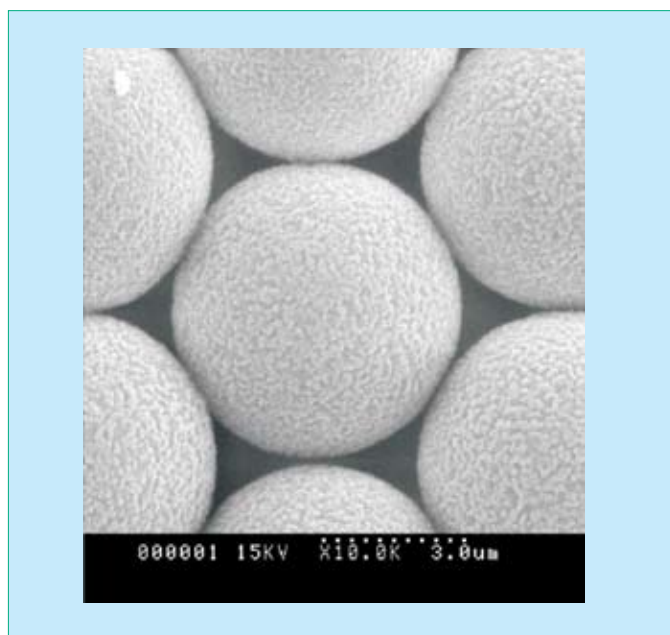
**Д**ля получения упорядоченных гексагональных структур, устойчивых к внешним воздействиям, необходимо разработать модель их образования, проанализировав механизмы создания таких структур. Из визуальных наблюдений ясно, что шероховатая поверхность полистирольных мезосфер (ПМ) препятствует образованию плотноупакованной гексагональной структуры. При сближении ПМ при попытке выстроить плотную упаковку силы трения из-за шероховатости увеличиваются.

Ранее были описаны фотонные кристаллы, т.е. структуры самоупорядоченных полимерных микросфер (ПМ) с диаметрами 6 мкм, 20 мкм и 58 мкм, которые предполагаются к применению в инженерной медицине и биотехнологиях. Подобные образования используются в качестве матрикса для внедрения биологических клеток внутрь пустот, образованных в пространственных слоях плотной упорядоченной структуры ПМ. При этом, для создания упорядоченных гексагональных структур, устойчивых к внешним воздействиям, необходим анализ механизмов создания таких структур и создание моделей их образования.

На рис.1 представлена электронная микрофотография элементов упорядоченного монослоя микросфер, изготовленных из полистирола, диаметром 6 мкм.

На фотографии видно, что поверхность микросфер не является гладкой. При этом ясно, что шероховатая поверхность мезосфер препятствует образованию плотноупакованной гексагональной структуры. Из-за шероховатости увеличиваются силы трения при перемещении ПМ при их сближении для выстраивания плотной упаковки. Однако, шероховатость поверхности имеет большую смачиваемость, что увеличивает капиллярное воздействие сил жидкой прослойки (воды, спирта или водно - спиртовой смеси)

в пространстве между микросферами. Таким образом, каждая микросфера покрыта жидкой оболочкой, что улучшает возможность их индивидуального движения, как поступательного, так и вращательного, для каждой микросферы, и



**Рис.1** Полистирольные микросферы в виде упорядоченного монослоя на подложке

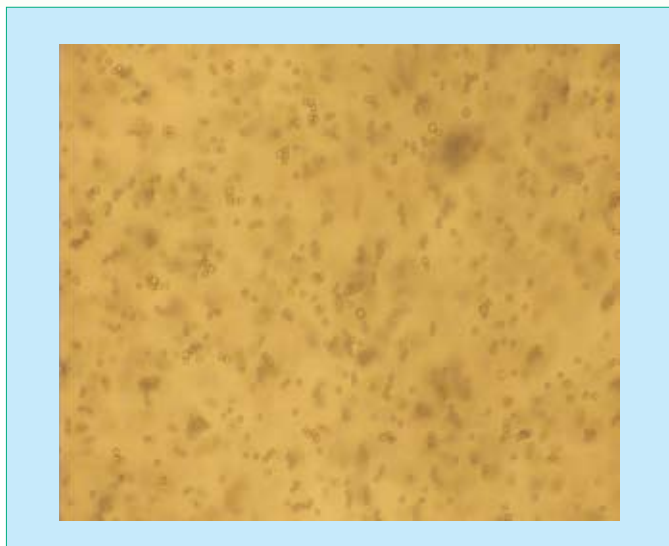


Рис. 2 Расположение микросфер  $d=6\text{мкм}$  на поверхности жидкости при  $V_{\text{суспензии}}=30\text{мкл}$

создает благоприятные условия для плотной упаковки всего ансамбля ПМ.

Для разработки моделей при формировании плотной упаковки ПМ на различных подложках является ответ на вопрос: являются ли сами микросферы твердыми и упругими частицами? Для ответа был проделан следующий эксперимент.

На металлическую фольгу при комнатной температуре из спиртовой суспензии, охлажденной до  $t = -20^\circ\text{C}$  были нанесены микросферы диаметром 20 мкм. После испарения спирта на фольге остались микросферы, произвольно упакованные в виде мультислоев. Фольга с нанесенными микросферами помещалась на наковальню. Далее по этой структуре был нанесен удар стандартным молотком с силой 30 – 50 кгс. При площади ударной поверхности  $4\text{см}^2$ , давление на площадку фольги с микросферами составляло  $7,5 - 12,5\text{кгс/см}^2$ . Наблюдение результатов удара под микроскопом показало, что на поверхности фольги остался только монослой микросфер. Остальные микросферы из-за слабых сил взаимодействия друг с другом разлетелись после удара. После второго удара по оставшимся микросферам под микроскопом наблюдалось два вида структур:

- 1) микровмятины в фольге, оставшиеся после вминания в нее микросфер, слетевших с поверхности фольги;
- 2) расположенные на поверхности фольги микроструктуры, в виде правильных кружков, оставшиеся после разрушения микросфер.

Подводя итоги, мы вывели, что микросферы представляют собой твердые элементы.

Данный эксперимент затрагивает более серьезную проблему – адсорбционное взаимодействие микросфер с поверхностью. Он позволяет считать микросферы твердыми шарами с шероховатой поверхностью, подчиняющимися действию

классической механики поступательного и вращательного движения упругого тела. Поэтому при взаимодействии с твердыми подложками, например, стеклянными, шары ведут себя как упругие тела, слабо связанными с такими поверхностями. Силы притяжения к поверхности твердых тел (стекло, металл) – это силы Ван-дер-Ваальса. Таким образом для удерживания микросфер на подобных подложках из-за слабости сил притяжения подложку необходимо модифицировать так, чтобы значительно улучшить ее адсорбционные свойства, например, создать избыточный заряд, увеличить шероховатость и т.п. Для прочного прикрепления упорядоченного монослоя микросфер на поверхности твердого тела должна присутствовать либо склеивающая субстанция, либо модифицированная структура поверхности микросфер и подложки.

Еще одним вопросом моделирования упорядоченных структур полимерных микросфер на различных поверхностях является определение поверхностных концентраций ПМ на подложке при нанесении микросфер из коллоидных растворов.

Для ответа на этот вопрос были созданы суспензии из микросфер диаметром 6 мкм, 20 мкм и 58 мкм в жидкой



среде. Масса навесок  $m = 75$  мг, объем спирта  $V = 500$  мл, т.е. концентрация микросфер - 15% (г/мл). Суспензии охлаждались до  $t = -20^\circ\text{C}$  в течение 2-х суток.

Для отработки модели в качестве подложки было взято предметное стекло при комнатной температуре ( $t = 25^\circ\text{C}$ ) и на него была нанесена специальная жидкость  $V = 500$  мл при  $t = 25^\circ\text{C}$ . На поверхность жидкости был нанесен слой микросфер диаметром 6 мкм из 15 % суспензии в 3-х различных вариантах объемов – 30 мкл, 50 мкл и 70 мкл. Разные объемы требовались для того, чтобы определить пороговые концентрации микросфер, необходимые для получения самоорганизующейся плотноупакованной структуры микросфер на поверхности. Требовалось понять, является ли самоорганизация микросфер пороговым процессом с определенным количеством микросфер, распределенном по фиксированной площади подложки (в нашем случае жидкая поверхность), или процесс образования самоорганизующейся структуры не зависит от площади подложки (и, в частности, от силы ее поверхностного натяжения). Объемы спиртовой суспензии с микросферами для экспериментов были выбраны – 30 мкл, 50 мкл и 70 мкл.

Результаты экспериментов при образовании самоупорядоченной гексагональной плотноупакованной структуры приведены на рисунках 2–4.

Структура ПМ рассматривалась под микроскопом с линейным увеличением  $\Gamma = 300^*$ .



Рис.3 Расположение микросфер  $d=6$  мкм на поверхности жидкости при  $V_{\text{суспензии}} = 50$  мкл



Рис.4 Расположение микросфер  $d=6$  мкм на поверхности жидкости при  $V_{\text{суспензии}} = 70$  мкл

Из представленных фотографий видно, что только при нанесении на поверхность жидкой подложки суспензии микросфер с  $V = 70$  мкл образуется законченная самоупорядоченная гексагональная плотная упаковка микросфер. Это подтверждает, что процесс упорядочивания связан с качеством подложки.

Сам процесс образования упорядоченной структуры на поверхности представляет собой сложный процесс, сопровождающийся процессами конвекционного перемешивания суспензии и жидкой фазы, оседания микросфер в глубине этой фазы и последующего их всплывания под действием конвекционных потоков. В процессе образования структуры внутри перехода жидкость – стекло наблюдаются линейные агрегированные скопления микросфер, расположенные эквидистантно друг от друга, что свидетельствует о наличии капиллярных волн внутри жидкости. Сам процесс упорядочивания микросфер состоит из двух основных частей:

- 1) конвекционные процессы в глубине подложки;
- 2) поверхностные процессы движения и самоорганизации микросфер, вызванные поверхностными капиллярными волнами.

Таким образом, анализ модели создания упорядоченной структуры монослоя фотонных кристаллов, образованных из полимерных микросфер, показывает необходимость создания поверхностных концентраций ПМ выше определенных, пороговых, а также зависимость образования плотной гексагональной структуры ПМ от индивидуальных свойств каждого отдельного элемента структуры (микросферы).

## ПРЕОДОЛЕН 100-НАНОМЕТРОВЫЙ БАРЬЕР В ЛАЗЕРНОЙ ЗАПИСИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НАНОСТРУКТУР



Сотрудниками Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН) в сотрудничестве с физиками из МГУ, БелГУ и ИОФ РАН были получены регулярные одномерные наноструктуры с периодом до 90 нм. Для этого физики использовали метод многоимпульсного воздействия фемтосекундным лазерным излучением на поверхность твердого материала (в воздухе или жидкости).

Раньше в однолучевых схемах записи поверхностных нанорешеток с помощью наносекундных лазеров, где основным является тепловое воздействие, получались структуры с периодом порядка длины волны лазерного излучения – это субмикронные масштабы. Позднее, с использованием фемтосекундных импульсов, были получены регулярные одномерные наноструктуры с субволновыми, но все-таки субмикронными периодами (то есть более 100 нм). И только при осуществлении процесса в жидкости впервые удалось преодолеть этот 100-нанометровый «психологический» барьер, разделяющий сферы нано- и микротехнологий. При этом длина волны лазерного излучения в работе была в 8 раз больше периода получившихся наноструктур.

Минимально возможные периодические наноструктуры сейчас получают путем молекулярно-атомарной сборки. Но для того, чтобы выстроить этим способом сколь-либо большую, даже с точки зрения наноразмеров, структуру, нужно потратить колоссальное время. А с помощью фемтосекундного лазера за несколько часов, а в некоторых случаях даже минут, можно записать на поверхности твердого материала наноструктурированный участок миллиметровых размеров, достаточных для исследований различными физико-химическими методами. Периодические наноструктуры уже получены на титане, кремнии и алюминии. В настоящий момент их активно изучают на предмет выявления общих закономерностей наблюдаемого эффекта для каждого из материалов. Но особенно интересным для изучения оказался механизм образования наноструктур на поверхности титана: структуры получают все более мелкими при увеличении плотности энергии фемтосекундного лазерного импульса на поверхности металла. Этот факт весьма любопытен, так как обычно наблюдаемая тенденция прямо противоположна.

*АНИ «ФИАН-информ»*