

РОСТ ИЗ РАСТВОРОВ, СТРУКТУРА И СПЕКТРАЛЬНО- ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ СВОЙСТВА КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ДИ-*n*-ГЕКСИЛ-ПАРА-КВАТЕРФЕНИЛА

© 2021 г. В. А. Постников^{1,*}, Г. А. Юрасик¹, А. А. Кулишов¹, М. С. Лясникова¹, О. В. Борщев²,
Е. А. Свидченко², Н. М. Сурин²

¹ Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН, Москва, Россия

² Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН, Москва, Россия

*E-mail: postva@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.02.2021 г.

После доработки 15.03.2021 г.

Принята к публикации 21.04.2021 г.

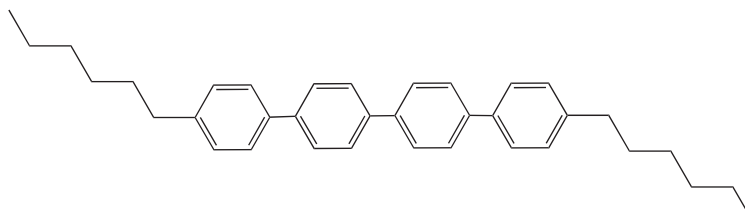
Впервые представлены результаты, полученные при исследовании роста и структуры кристаллических пленок производного пара-кватерфенила с концевыми *n*-гексильными заместителями – ди-*n*-гексил-пара-кватерфенила. Структура кристаллических пленок исследована методом рентгеновской дифракции. Установлено, что кристаллические пленки ди-*n*-гексил-пара-кватерфенила, как и кристаллы незамещенного пара-кватерфенила, склонны к разрастанию на межфазной границе жидкость–воздух в виде стопки параллельных мономолекулярных слоев толщиной $d_{001} = 3.05$ нм. Исследованы спектры оптического поглощения и фотолюминесценции растворов в *n*-гексане, толуоле, тетрагидрофуране и кристаллических образцов.

DOI: 10.31857/S0023476121060266

ВВЕДЕНИЕ

Получение методами роста из растворов кристаллических пленок на основе органических π -сопряженных линейных олигомеров представляет большой интерес для развития органической электроники и фотоники [1–3]. С точки зрения полупроводниковых свойств наибольший интерес для электроники представляют линейные молекулы с количеством π -сопряженных групп $n \geq 4$. Однако из-за стремительного падения растворимости вещества по мере увеличения в структуре молекулы количества π -сопряженных групп уже для $n = 4$ выращивание крупных кристаллических пленок из растворов является непростой задачей, а при $n \geq 5$ и вовсе крайне затруднительно [4–6]. Например, в [4] были представлены результаты по росту из растворов монокристаллических пленок пара-кватерфенила (4P), структура которого состоит из четырех сопряженных групп фенила. Ростовый цикл выращивания тонких монокристаллов 4P толщиной ~ 5 мкм и длиной до 5 мм на границе раздела фаз в условиях медленной диффузии паров осадителя при комнатной температуре составил 20 сут [4]. В [7] показано, что в усло-

виях медленного изотермического испарения высококипящего растворителя из капель раствора на подложках кристаллические пленки 4P длиной в несколько миллиметров могут сформироваться в течение нескольких часов. Увеличение растворимости олигомера за счет добавления в структуру молекулы групп концевых заместителей может привести к улучшению эффективности роста кристаллов из растворов. Данный подход оказался справедливым для производного пара-кватерфенила с концевыми триметилсилильными группами [8]. В ряде работ отмечен положительный эффект наличия длинных алкильных концевых заместителей в структуре сопряженных линейных олигомеров на формирование монокристаллических пленок на границе раздела фаз жидкость–воздух [9–12]. Данная работа посвящена исследованию роста из растворов, структуры и спектрально-люминесцентных свойств кристаллических пленок производного пара-кватерфенила с концевыми *n*-гексильными заместителями – ди-*n*-дигексил-пара-кватерфенила (Hex-4P-Hex).



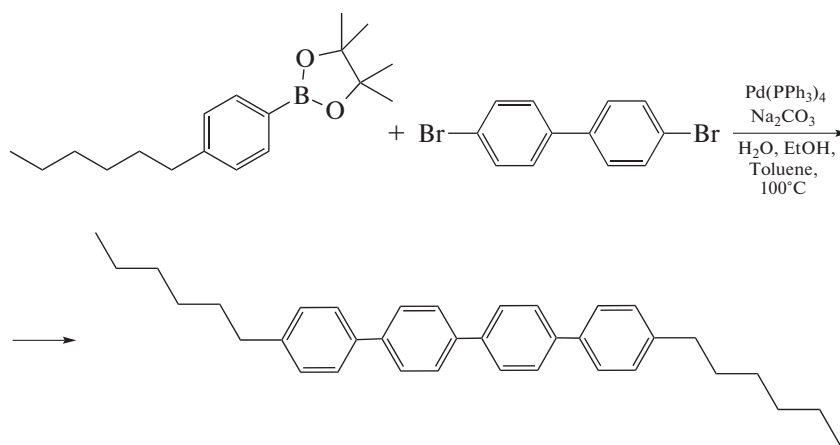
Оптические свойства растворов данного соединения в 2-метилтетрагидрофуране были представлены в [13]. Результаты исследований роста и структуры кристаллических пленок Нех-4Р-Нех в настоящей работе представлены впервые.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Материалы. Карбонат натрия, 4,4'-дибром-1,1'-бифенил, тетраakis(трифенилфосфин) палла-

дия (0) Pd(PPh₃)₄ производства компании Merck. 2-(4-гексил-фенил)-4,4,5,5-тетраметил-[1,3,2]диоксоборолан был синтезирован по методике [14]. В качестве растворителей использовали *n*-гексан (ОСЧ), толуол (ОСЧ), тетрагидрофуран (ОСЧ), 1,2,4-трихлорбензол (ХЧ), изопропанол (ЧДА) и бутанол-1 (ОСЧ).

Синтез. В работе использовали Нех-4Р-Нех, синтезированный по схеме:



Для этого 4,4'-дибром-1,1'-бифенил и 2-(4-гексил-фенил)-4,4,5,5-тетраметил-[1, 3, 2]диоксоборолан вводили в реакцию металлоорганического синтеза в условиях Сузуки. После 28 ч кипячения осадок, образовавшийся в реакционной колбе, отфильтровали и перекристаллизовали из толуола. В результате получили белые кристаллы Нех-4Р-Нех с выходом 85%.

Синтезированные кристаллы исследовали методом спектроскопии ЯМР на ядрах ¹H (эталон – хлороформ СНCl₃). Химический сдвиг δ: 0.86 м.д. (триплет, 6H, J = 6.7), 1.28 м.д. (мультиплет, 12H), 1.58 м.д. (мультиплет, 4H), 2.60 м.д. (триплет, 4H, J = 7.3), 7.26 м.д. (мультиплет 4H), 7.56 м.д. (мультиплет 4H), 7.62–7.74 м.д. (перекрывающиеся сигналы 8H). Для C₃₆H₄₂ определена концентрация химических элементов: С – 91.78, Н – 9.03 мас. %. Вычисленные значения составили 91.08 и 8.92 мас. % соответственно.

Рост кристаллических пленок. Выращивание кристаллических пленок из раствора толуола осу-

ществляли при комнатной температуре (20°C) в условиях медленного изотермического испарения растворителя и методом “растворитель–осадитель” [3, 4, 6, 8, 12]. В качестве осадителя (солюватифобная жидкость) использовали бутанол-1. Раствор с начальной концентрацией 0.45 г/л в стеклянном флаконе объемом 20 мл обрабатывали в ультразвуковой ванне ПСБ-2835-05 (Россия) до полного исчезновения осадка. Затем обработанный раствор в течение нескольких суток отстаивался при комнатной температуре, в результате чего наблюдалось выпадение небольшого количества кристаллического осадка. Полученный таким образом насыщенный раствор Нех-4Р-Нех фильтровали с помощью одноразового ПТФЭ-фильтра (ПТФЭ – политетрафторэтилен) с диаметром пор 0.45 мкм и заливали в стеклянный мерный стакан объемом 50 мл, который размещали в термостате внутри герметичной стеклянной ростовой камеры с предварительно налитым на ее дно осадителем – бутанолом-1. По истечении 14 сут преимущественно на поверхности раствора

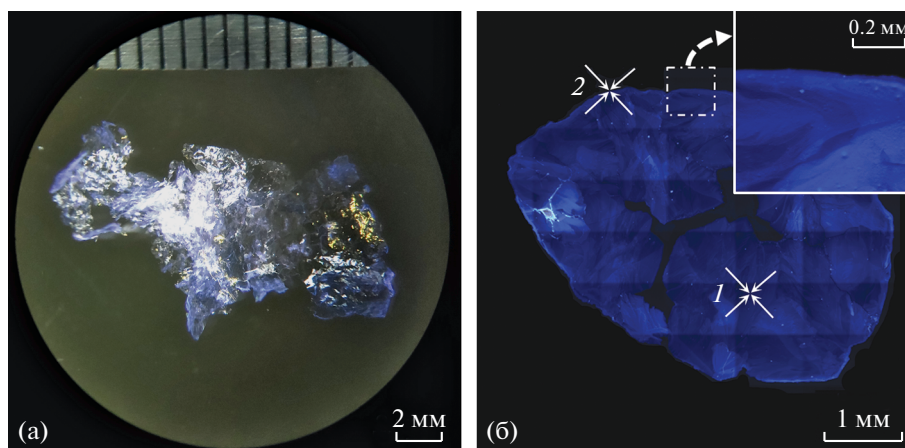


Рис. 1. Кристаллическая пленка Нех-4Р-Нех, выращенная на межфазной границе раствор–воздух (а); люминесцентное изображение кристаллической пленки Нех-4Р-Нех, сформированной при высыхании капли раствора ЗХБ (на вставке в верхнем правом углу – увеличенное изображение области, выделенной штрих-пунктиром) (б).

обнаруживали несколько крупных кристаллических пленок, размер которых достигал 20 мм в длину (рис. 1а). Для выращивания кристаллов методом медленного изотермического испарения растворителя отфильтрованный раствор наливали в чистый стеклянный флакон объемом 20 мл и располагали в термостате с неплотно закрытой крышкой. По истечении 28 сут преимущественно на поверхности раствора наблюдали несколько крупных кристаллических пленок Нех-4Р-Нех.

Кристаллические пленки Нех-4Р-Нех выращивали и на стеклянных подложках при медленном изотермическом высыхании капли раствора (метод сидячей капли [7]). Для обеспечения условия медленного высыхания капли раствора был использован высококипящий растворитель – 1,2,4-трихлорбензол (ЗХБ). Подготовка раствора Нех-4Р-Нех в ЗХБ с начальной концентрацией 0.45 г/л была проведена аналогично описанной выше методике для раствора толуола. Для роста кристаллических пленок на стеклянных подложках использовали насыщенный раствор, разбавленный в 4 раза чистым ЗХБ. Формирование кристаллических пленок Нех-4Р-Нех осуществляли следующим образом: на предварительно очищенные изопропанолом предметные стекла (“Стеклоприбор”, Россия) наносили по одной капле раствора объемом 15 мкл и высушивали под стеклянным колпаком в термостате при 45°C.

Оптическая и атомно-силовая микроскопия. Анализ осушенной поверхности подложек проведен на люминесцентном микроскопе Olympus IX81 (Япония) и оптическом длиннофокусном микроскопе МБС-10 (Россия) в поляризованном свете при скрещенных поляризаторах. Морфологию поверхности и толщину выращенных на стеклянных подложках кристаллических пленок Нех-4Р-Нех исследовали с помощью атомно-си-

лового микроскопа (АСМ) Solver BIO (NT-MDT, Россия) в режиме полуконтактного метода (зонд NSG01, NT-MDT, жесткость 5.1 Н/м, радиус закругления иглы не более 10 нм).

Рентгеновская дифракция. Структурный анализ выращенной из раствора толуола кристаллической пленки Нех-4Р-Нех, приклеенной к кварцевой пластине, при комнатной температуре был проведен на порошковом рентгеновском дифрактометре Miniflex 600 (Rigaku, Япония). Излучение $\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1.54178 \text{ \AA}$, скорость записи 2 град/мин.

Спектры поглощения и фотолюминесценции (ФЛ). Спектры поглощения молекулярных растворов Нех-4Р-Нех в *n*-гексане, толуоле и тетрагидрофуране (ТГФ) измеряли на спектрофотометре Shimadzu UV-2501PC (Япония). Спектры ФЛ измеряли на спектрофлуориметре АЛС-1М (разработка ИСПМ РАН) в режиме счета фотонов на последовательных интервалах времени. При измерении спектров люминесценции растворов использовали стандартные кварцевые кюветы 10 × 10 мм. Измерения спектров ФЛ кристаллических пленок Нех-4Р-Нех проводили в интегрирующей сфере, изготовленной из тефлона. Квантовый выход ФЛ растворов определяли путем сравнения с известным квантовым выходом стандартов по методу измерения флуоресценции оптически разбавленных растворов [15]. В качестве стандарта при измерении квантового выхода Нех-4Р-Нех (ϕ) использовали раствор *para*-терфенила в циклогексане ($\phi = 0.91$) [16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рост кристаллических пленок и их морфология. На рис. 1а представлен один из наиболее крупных образцов кристаллических пленок Нех-4Р-Нех. При извлечении с поверхности раствора и даль-

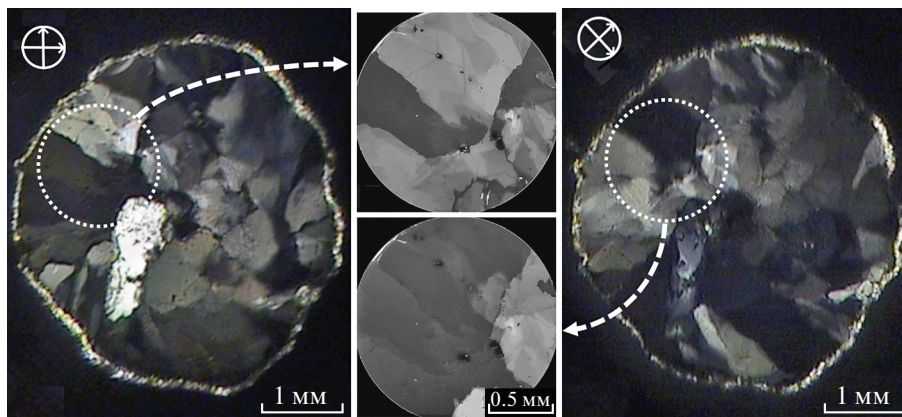


Рис. 2. Оптические поляризованные изображения кристаллической пленки Нех-4Р-Нех, сформированной из капли раствора в ЗХБ на подложке, в различных положениях относительно скрещенных поляризаторов. На центральной вставке вверху и внизу – увеличенные области, выделенные белым пунктиром на изображениях пленки слева и справа.

нейшем высыхании пленки скукоживаются. Как видно на рис. 1а, полученные таким образом пленки бесформенные и имеют неоднородную поверхность.

На рис. 1б представлено люминесцентное изображение кристаллической пленки Нех-4Р-Нех, сформированной в результате медленного высыхания капли раствора в ЗХБ в термостате при 45°C. Ранее на примере незамещенного *пара*-кватерфенила было показано, что данная температура оптимальна для формирования наиболее крупных кристаллических пленок из капель раствора ЗХБ [7]. Как видно на рис. 1б, кристаллическая пленка Нех-4Р-Нех на стеклянной подложке сформировалась практически как единое целое, но с неоднородной толщиной, уменьшающейся к центру пленки. Как и для незамещенного 4Р, по мере стягивания капли раствора в центральную область в процессе испарения ЗХБ не наблюдается образования структур типа “кофейных колец”, состоящих из мелкокристаллического осадка, что указывает на низкую скорость образования центров роста в данных условиях [7]. На изображениях пленок, полученных в поляризованном свете при скрещенных поляризаторах, наблюдается поликристалл (рис. 2), состоящий из кристаллитов длиной до 1 мм (центральная вставка на рис. 2). На отдельных кристаллитах можно наблюдать трещины и, судя по неравномерному цветовому тону, небольшую неоднородность по толщине.

На рис. 3а представлено топографическое изображение поверхности в центральной области пленки, отмеченной стрелкой с индексом 1 на рис. 1б. На представленном участке поверхности наблюдаются ступени роста. Согласно приведенному справа профилю сечения поверхности вдоль белого отрезка на топографическом изображении высота ступени составляет 2.9 ± 0.3 нм. Оценка длины молекулы Нех-4Р-Нех как суммы проек-

ций длин связей на ось сопряженного ядра дает значение $l_0 \approx 3.3$ нм, следовательно, наблюдаемые ступени роста могут быть элементарными. Между ступенями роста на террасах наблюдается множество ямок, глубина которых совпадает с высотой ступени, судя по профилю сечения поверхности. На рис. 3б приведено топографическое изображение поверхности краевого участка кристаллической пленки, отмеченного индексом 2 на рис. 1б. Как видно на изображении, край пленки рыхлый и покрыт наслоением микрокристаллов. Судя по представленному справа профилю сечения вдоль белого отрезка на топографическом изображении, высота кристаллической пленки над поверхностью подложки составляет 280 нм.

Рентгеноструктурный анализ. На рис. 4а приведена рентгеновская дифрактограмма выращенной из раствора толуола кристаллической пленки Нех-4Р-Нех. Дифрактограмма представляет собой набор узких пиков. Поскольку съемка проводилась не с нулевой точки отсчета (от 3°), положение первого максимума полностью не разрешилось, однако остальные пики расположены кратно углу $2.90^\circ \pm 0.05^\circ$. Наблюдаемая дифракционная картина есть результат отражения от семейства параллельных монослоев с наиболее плотной упаковкой молекул. Как и в случае кристаллов 4Р [4, 6], будем считать, что данное семейство плоскостей характеризуется индексами (001). Согласно расчету межплоскостного расстояния по уравнению Вульфа–Брэгга для первого максимума при $2\theta_{001} = 2.90^\circ$ значение толщины мономолекулярного слоя $d_{001} = 3.05$ нм. Таким образом, определенное методом АСМ значение высоты элементарной ступени роста кристаллической пленки Нех-4Р-Нех (рис. 3а) согласуется с толщиной монослоя d_{001} .

На рис. 4б приведена дифрактограмма перетертого кристаллического порошка Нех-4Р-Нех.

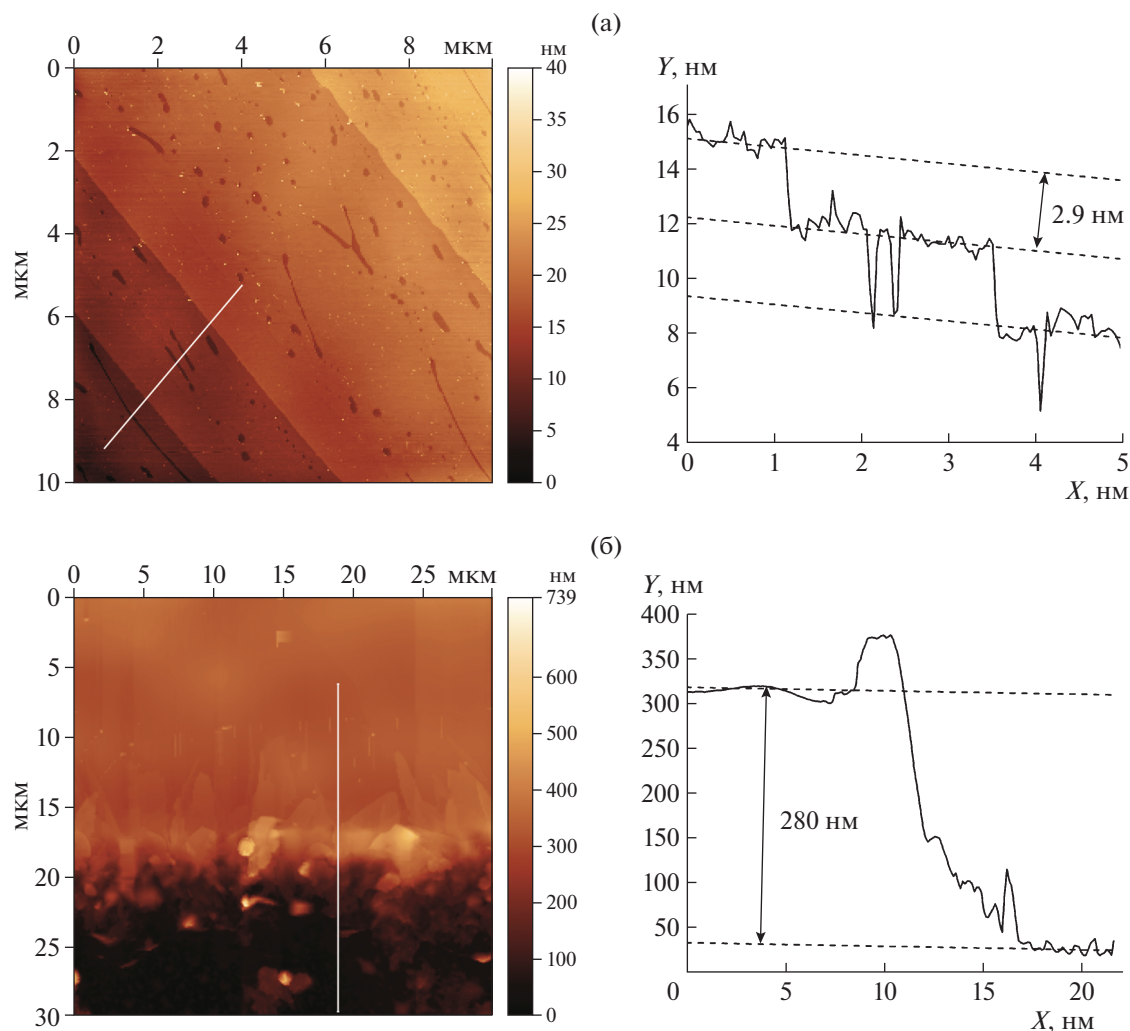


Рис. 3. Топографические изображения поверхности кристаллической пленки Нех-4Р-Нех, выращенной из капли раствора ЗХБ на подложке, с соответствующими профилями сечения (вдоль белого отрезка на изображениях): центральный (а) и краевой (б) участки поверхности пленки.

Положения наиболее интенсивных максимумов, отмеченных стрелками, соответствуют положениям максимумов на дифрактограмме кристаллической пленки на рис. 4а. Наблюдаемая текстура указывает на строение кристаллического порошка преимущественно в виде чешуек, ориентированных параллельно плоскости (001).

Следовательно, в кристалле молекулы ориентированы относительно плоскости монослоя (001) с наклоном приблизительно под углом 68° , как показано на схематическом модельном изображении на рис. 5. Таким образом, кристалл Нех-4Р-Нех представляет собой сэндвичевую структуру чередующихся “мягких” (рыхлых) и “жестких” (с наибольшей плотностью упаковки) слоев, сформированных группами алкильных концевых заместителей и центральным сопряженным ядром молекул соответственно. Данная особенность кристаллического строения, по-ви-

димо, объясняет факт наиболее вероятного скола кристаллов вдоль плоскости скольжения (001) при механическом перетирании.

Абсорбционно-люминесцентные свойства растворов и кристаллических пленок. Спектральные распределения коэффициентов экстинкции растворов Нех-4Р-Нех в *n*-гексане, толуоле и ТГФ приведены на рис. 6. Свойства исследуемого соединения в данных растворителях представлены в табл. 1. Положения максимумов длинноволновой полосы спектра поглощения для растворов толуола и ТГФ совпадают, а для раствора *n*-гексана максимум слегка смещен в коротковолновую область. Коротковолновая полоса поглощения просматривается только в *n*-гексане – 204 нм. В таблице приведены величины коэффициента экстинкции ϵ в соответствующем максимуме длинноволновой полосы поглощения. Коэффициент экстинкции коротковолновой полосы в

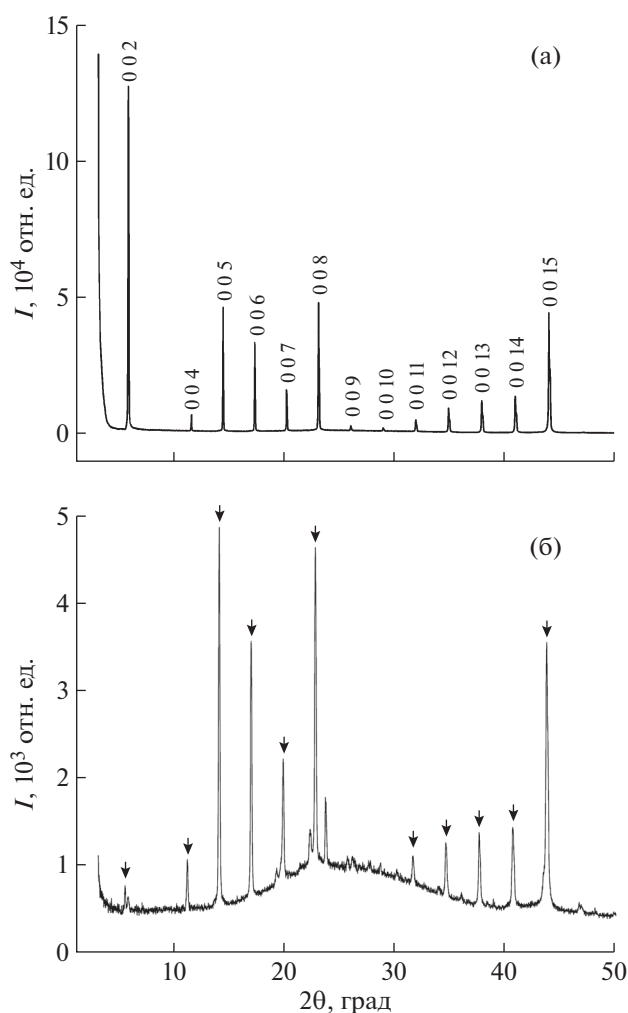


Рис. 4. Рентгеновские дифрактограммы кристаллической пленки Нех-4Р-Нех, выращенной из раствора толуола (а) и перетертого кристаллического порошка (б).

n-гексане $\epsilon_{204\text{нм}} = 99000 \text{ л моль}^{-1} \text{ см}^{-1}$, что в 1.9 раза больше, чем длинноволновой. Во всех трех растворителях контур длинноволновой полосы по-

глощения имеет форму функции Гаусса. Спектр поглощения тонкой кристаллической пленки приведен на рис. 7. Он имеет существенные отличия от спектров поглощения растворов Нех-4Р-Нех, приведенных на этом же рисунке. Полоса поглощения кристаллической пленки в интервале 200–400 нм содержит слабо выраженные максимумы, соответствующие длинам волн 202, 232, 278, 307 и 346 нм (рис. 7). Истинная интенсивность поглощения, соответствующая этим длинам волн, отличается от наблюдаемой, поскольку исследованная пленка Нех-4Р-Нех была значительно неоднородной по толщине и шероховатой. Поэтому приведенный на рис. 7 контур поглощения следует рассматривать как “технический” (искаженный) спектр кристаллической пленки.

Сравним спектры люминесценции растворов и кристаллической пленки Нех-4Р-Нех (рис. 7). В спектрах люминесценции растворов наблюдается достаточно четко выраженная колебательная структура. Частота 0–0 перехода в ТГФ и толуоле одинакова и на 400 см^{-1} ниже, чем в *n*-гексане. Частота 0–0 перехода в кристаллической пленке смещена в “красную” сторону по сравнению с 0–0 переходом в растворах на $2500\text{--}2900 \text{ см}^{-1}$. Величина сдвига Стокса в растворах $6100\text{--}6350 \text{ см}^{-1}$ незначительно возрастает с уменьшением полярности растворителя. Если сравнивать с раствором незамещенного *пара*-кватерфенила в ТГФ, то в Нех-4Р-Нех наблюдается bathochromic сдвиг спектра люминесценции с сохранением его формы, при этом увеличивается Стоксов сдвиг (5040 см^{-1} для 4Р) и немного уменьшается частота 0–0 перехода (29850 см^{-1} для 4Р) [4].

При переходе к кристаллической пленке величина сдвига Стокса зависит от выбора методики его вычисления. Если отсчитывать величину смещения от максимума самой длинноволновой полосы в спектре поглощения пленки (346 нм), то величина сдвига Стокса составит 3800 см^{-1} . Квантовый выход люминесценции ϕ растворов Нех-4Р-Нех в *n*-гексане и толуоле одинаков и несколь-

Таблица 1. Свойства Нех-4Р-Нех в растворителях и тонкой поликристаллической пленке

Среда	Поглощение		Люминесценция	0–0 переход, см^{-1}	Сдвиг Стокса, см^{-1}	ϕ , %
	$\lambda_{\text{abs/max}}$, нм	ϵ , $\text{л моль}^{-1} \text{ см}^{-1}$	$\lambda_{\text{lum/max}}$, нм			
<i>n</i> -гексан	299	53000 ± 1300	369	29700	6350	92 ± 5
Толуол	304	48000 ± 1200	375	29300	6230	92 ± 5
ТГФ	304	55000 ± 1400	373	29300	6090	88 ± 5
Кристалл	346*		398	26800	3800	95 ± 5

Примечание. ϵ – коэффициент экстинкции в максимуме длинноволновой полосы поглощения $\lambda_{\text{abs/max}}$, ϕ – квантовый выход люминесценции.

* Наибольший длинноволновый максимум поглощения.

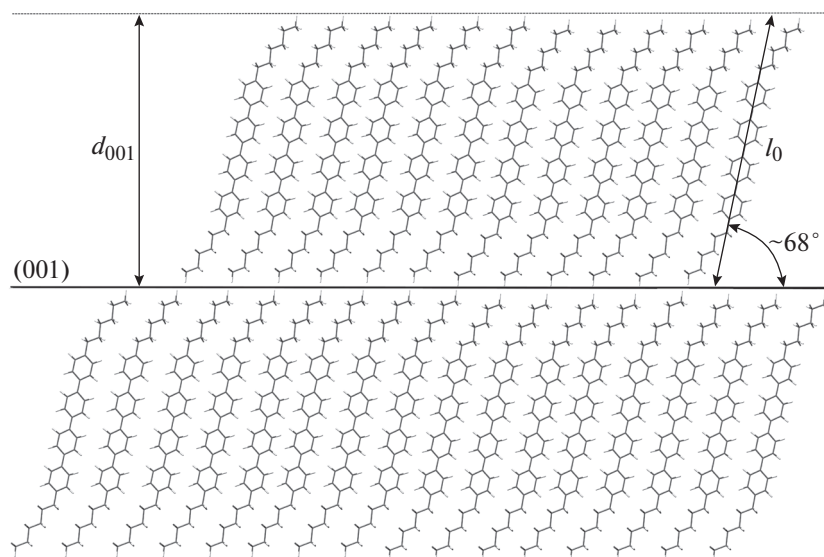


Рис. 5. Схематическое модельное изображение фрагмента кристаллической структуры Нех-4Р-Нех.

ко выше, чем в растворе ТГФ (табл. 1). В пределах погрешности измерения в данных растворителях его можно считать одинаковым и равным $90 \pm 2\%$, что немного ниже, чем для незамещенного *para*-кватерфенила в ТГФ — 94% [4]. Квантовый выход люминесценции кристаллической пленки равен $95 \pm 5\%$. Он незначительно превосходит квантовый выход люминесценции растворов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали, что по сравнению с незамещенным *para*-кватерфенилом наличие концевых *n*-гексильных заместите-

лей в составе молекулы Нех-4Р-Нех заметно повышает скорость разрастания кристаллических пленок из раствора на межфазной границе жидкость—воздух при незначительном росте растворимости. Судя по полученным рентгеноструктурным данным, кристаллы Нех-4Р-Нех, так же как и кристаллы незамещенного 4Р [4], формируются в виде стопки плоскопараллельных монослоев. Наличие концевых *n*-гексильных заместителей в составе молекулы приводит к особенности строения кристаллов, заключающейся в формировании сэндвичевой регулярной структуры чередую-

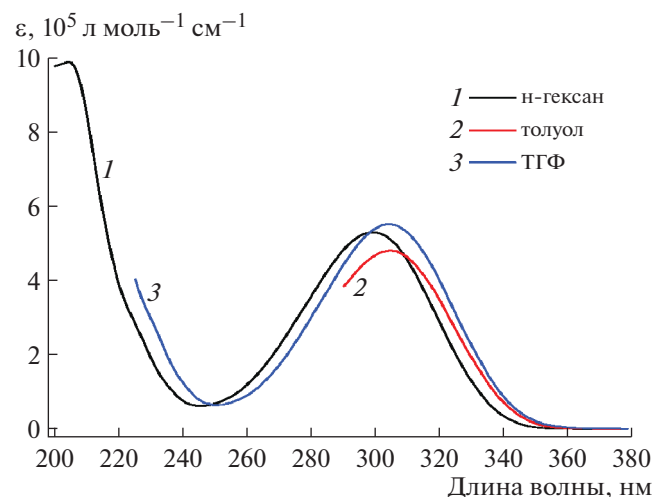


Рис. 6. Спектры коэффициента экстинкции Нех-4Р-Нех в растворителях.

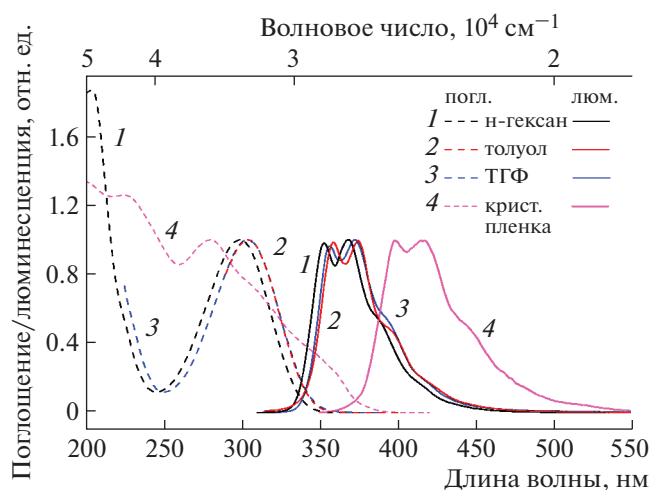


Рис. 7. Нормированные на интенсивности в максимумах спектры поглощения и люминесценции Нех-4Р-Нех в *n*-гексане ($\lambda_{\text{exc}} = 300$ нм), в толуоле и ТГФ ($\lambda_{\text{exc}} = 304$ нм) и тонкой кристаллической пленки ($\lambda_{\text{exc}} = 310$ нм).

щихся “мягких” (сформированных алкильными группами $-C_6H_{13}$) и “жестких” (сформированных сопряженными ядрами $-4P-$) слоев. Однако подобная слоистая кристаллическая структура у Нех-4P-Нех, по-видимому, отрицательно сказывается на дальнейшем упорядочении молекул в кристалле, что обуславливает невысокое структурное совершенство полученных кристаллических образцов. Сформированные на границе раздела фаз кристаллические пленки представляют собой поликристаллические агрегаты, состоящие из разориентированных в плоскости пленки кристаллитов длиной до 1 мкм (рис. 2). Качество поверхностной морфологии кристаллических пленок Нех-4P-Нех, формирующихся на подложке из капли раствора при медленном испарении растворителя, выше, чем у отдельно стоящих кристаллических пленок, выращенных из большого объема раствора. В сравнении со спектрально-люминесцентными свойствами незамещенного пара-кватерфенила в растворе ТГФ наличие концевых *n*-гексилных заместителей приводит к bathochromному сдвигу спектра люминесценции, увеличению величины Стоксового сдвига и небольшому уменьшению частоты $0-0$ перехода с сохранением формы спектра. Квантовый выход люминесценции в растворах Нех-4P-Нех на несколько процентов ниже, чем у незамещенного 4P.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН с использованием научного оборудования ЦКП “Структурная диагностика материалов” ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН (проект RFMEF162119X0035). Синтез, наработка материала и регистрация спектров поглощения и люминесценции выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 0086-2019-0006) с использованием научного оборудования ЦКП “Центр исследования полимеров” ИСПМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yamao T., Miki T., Akagami H. et al. // Chem. Mater.* 2007. V. 19. P. 3748.
<https://doi.org/10.1021/cm071051z>
2. *Inada Y., Yamao T., Inada M. et al. // Synthetic Metals.* 2011. V. 161. P. 1869.
<https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2011.06.026>
3. *Postnikov V.A., Odarchenko Y.I., Iovlev A.V. et al. // Cryst. Growth Design.* 2014. V. 14. P. 1726.
<https://doi.org/10.1021/cg401876a>
4. *Postnikov V.A., Sorokina N.I., Алексеева О.А. и др. // Кристаллография.* 2018. Т. 63. № 1. С. 152.
<https://doi.org/10.7868/S0023476118010150>
5. *Postnikov V.A., Sorokina N.I., Lyasnikova M.S. et al. // Crystals.* 2020. V. 10. P. 363.
<https://doi.org/10.3390/cryst10050363>
6. *Postnikov V.A., Kulishov A.A., Lyasnikova M.S. et al. Crystals of Linear Oligophenyls: Surface Properties, Nucleation and Growth. Материалы конференции “The 2nd International Online Conference on Crystals (IOCC 2020), November, 2020”.*
https://doi.org/10.3390/IOCC_2020-07316
7. *Юрасик Г.А., Кулишов А.А., Лебедев-Степанов П.В. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исследования.* 2021. № 2. С. 78.
<https://doi.org/10.31857/S1028096021020163>
8. *Postnikov V.A., Лясникова М.С., Кулишов А.А. и др. // Журн. физ. химии.* 2019. Т. 93. № 9. С. 1362.
<https://doi.org/10.1134/S0044453719090188>
9. *Hirase R., Ishihara M., Katagiri T. et al. // Org. Electron.* 2014. V. 15 (7). P. 1481.
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2014.04.010>
10. *Xu C., He P., Liu J. et al. // Angew. Chem. Int. Ed.* 2016. V. 55. P. 1.
<https://doi.org/10.1002/anie.201602781>
11. *Kazantsev M.S., Konstantinov V.G., Dominskiy D.I. et al. // Synth. Met.* 2017. V. 232. P. 60.
<https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2017.07.019>
12. *Postnikov V.A., Кулишов А.А., Лясникова М.С. и др. // Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтр. исследования.* 2020. № 6. С. 10.
<https://doi.org/10.31857/S1028096020060187>
13. *Cipolloni M., Kaleta J., Mašt M. et al. // J. Phys. Chem. C.* 2015. V. 119. P. 8805.
<https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b01960>
14. *Sonntag M., Strohhriegl P. // Tetrahedron Lett.* 2006. V. 47. P. 8313.
<https://doi.org/10.1016/j.tetlet.2006.09.089>
15. *Crosby G.A., Demas J.N. // J. Phys. Chem.* 1971. V. 75 (8). P. 991.
<https://doi.org/10.1021/j100678a001>
16. *Berlman I.B. Handbook of fluorescence spectra of aromatic molecules.* N.Y.: Academic Press, 1971. 488 p.