

LIQUID-CRYSTALLINE POLYMERS

V. P. SHIBAEV

The main principles of synthesis of liquid crystalline (LC) polymers combining the unique optical properties of liquid crystals and macromolecular compounds are considered. Special attention is paid on creation of new type of passive optical elements, electrically-regulated media for information storage systems as well as creation of super high-strength fibers and self reinforced plastics obtained on the base of LC polymers.

Рассматриваются основные принципы синтеза жидкокристаллических полимеров, сочетающих уникальные оптические свойства жидких кристаллов и высокомолекулярных соединений. Особое внимание обращено на создание новых типов тонкопленочных оптических материалов и электрически управляемых сред для записи и отображения информации, а также на получение сверхвысокопрочных синтетических волокон и самоармированных пластиков.

ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОЛИМЕРЫ

В. П. ШИБАЕВ

Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

ВВЕДЕНИЕ

Что такое полимеры, в настоящее время представляет себе, по-видимому, каждый, а необычное сочетание слов “жидкокристаллические полимеры” понятно, пожалуй, лишь специалистам. Однако именно к этим соединениям в последнее время привлечено внимание исследователей разного профиля, работающих в области химии высокомолекулярных соединений и физики твердого тела, кристаллографии и кристаллохимии, биологии и медицины, а также специалистов электронной промышленности и технологии полимерных материалов.

Жидкокристаллические (ЖК) полимеры — это высокомолекулярные соединения, способные при определенных условиях (температуре, давлении, концентрации в растворе) переходить в ЖК состояние. ЖК состояние полимеров является равновесным фазовым состоянием, занимающим промежуточное положение между аморфным и кристаллическим состоянием, поэтому его также часто называют мезоморфным или мезофазой (от греч. мезос — промежуточный). Характерными особенностями мезофазы являются наличие ориентационного порядка в расположении макромолекул (или их фрагментов) и анизотропии физических свойств при отсутствии внешних воздействий. Весьма существенно подчеркнуть, что ЖК фаза образуется самопроизвольно, в то время как ориентационный порядок в полимере может быть легко наведен путем простого растяжения образца за счет высокой анизодиаметрии (асимметрии) макромолекул.

Если полимеры переходят в ЖК состояние или мезофазу в результате термического воздействия (нагревания или охлаждения), их называют **термотропными ЖК полимерами**, если ЖК фаза образуется при растворении полимеров в определенных растворителях, их называют **лиотропными ЖК полимерами**.

Научный и практический интерес к термотропным и лиотропным ЖК полимерам, возникший в последние два десятилетия, диктуется возможностью создания новых типов конструкционных и функциональных полимерных материалов, удачно сочетающих уникальные свойства низкомолекулярных жидких кристаллов и высокомолекулярных соединений. Мы рекомендуем читателю ознакомиться со статьей “Необычные кристаллы или загадочные жидкости”, посвященной низкомолекулярным

жидким кристаллам, опубликованной в “Соросовском Образовательном Журнале” (1996. № 11).

ПРИНЦИПЫ МОЛЕКУЛЯРНОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ ЖК ПОЛИМЕРОВ

Известно, что главная особенность низкомолекулярных жидких кристаллов (которые часто называют мезогенами) связана с асимметрией формы жестких стержнеобразных, а также диско- и планкообразных молекул. Жесткие фрагменты таких молекул, в роли которых чаще всего выступают одно или несколько бензольных колец, а также многоядерные ароматические и гетероциклические группировки называют мезогенными группами. Именно наличие мезогенных групп предопределяет тенденцию молекул к преимущественно параллельному расположению относительно друг друга и сопровождается спонтанным появлением значительной анизотропии всех физических свойств.

В отличие от достаточно жестких молекул жидких кристаллов макромолекулы полимеров, имея цепное строение, обладают значительной гибкостью, которая определяется способностью полимерных цепей менять свою форму (конформацию) в результате внутримолекулярного теплового движения звеньев. Наиболее простой мерой гибкости (или жесткости) цепи является некоторая эквивалентная величина A , называемая статистическим сегментом (или сегментом Куна), которая как бы заменяет определенный участок реальной цепи, а сама макро-

молекула может быть представлена эквивалентной цепью, состоящей из гипотетических свободно сочлененных сегментов, способных ориентироваться в пространстве независимо друг от друга (рис. 1, а). В свою очередь, величина сегмента A может быть выражена либо его длиной (обычно в Å), либо числом мономерных звеньев s , соответствующих длине сегмента. Ясно, что, чем больше A (или s), тем более жесткой является полимерная цепь.

В зависимости от гибкости (или жесткости) макромолекул все полимеры можно условно разделить на гибкоцепные (для которых $A \sim 15-50 \text{ \AA}$ и $s = 10-15$) и жесткоцепные ($A \sim 100-1000 \text{ \AA}$ и $s > 100$). (Во всех случаях будем считать, что величина сегмента много больше толщины цепи d , то есть параметр асимметрии формы макромолекулы A/d весьма велик.) Примерами гибкоцепных полимеров являются полиэтилен, полипропилен, полиоксипропилен, полидиметилсилоксан. К жесткоцепным полимерам относятся ароматические полиамиды, полиизоцианаты, биополимеры, имеющие спиральную конформацию. Макромолекулы таких полимеров могут быть представлены в виде длинных жестких стержней (рис. 1, б). Полимеры, имеющие значения A , промежуточные между указанными выше, часто называют полужесткоцепными.

Сопоставляя формы макромолекул гибко- и жесткоцепных полимеров легко прийти к выводу о том, что именно жесткоцепные полимеры должны в максимальной степени удовлетворять условиям

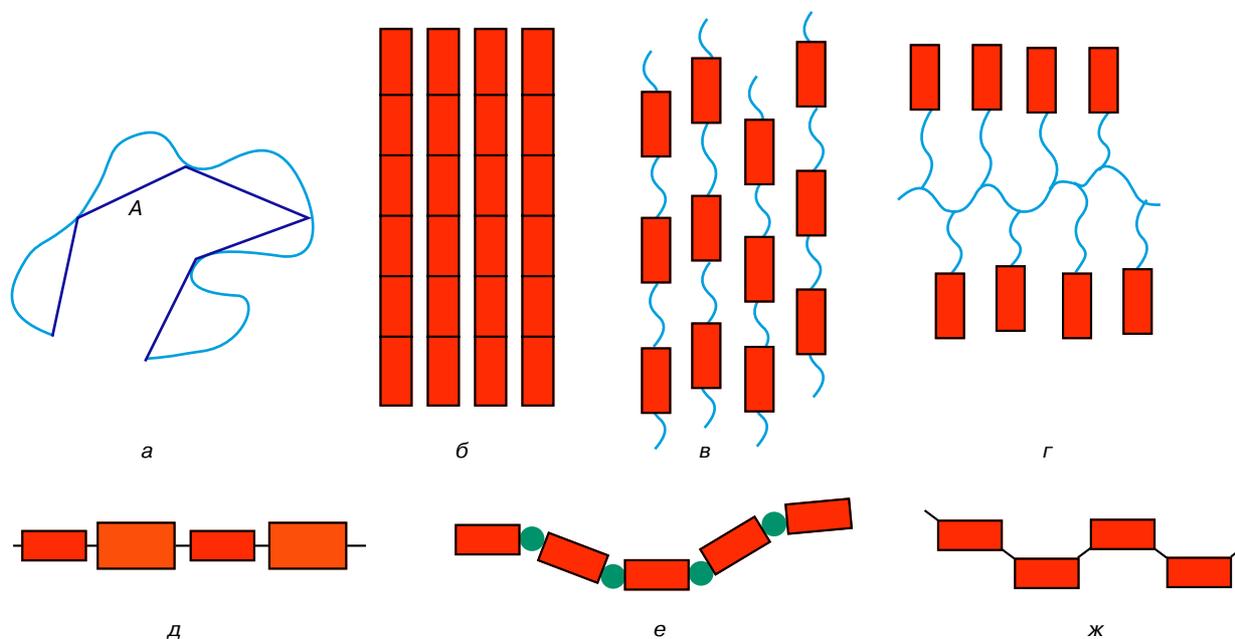


Рис. 1. Схематическое изображение макромолекул полимеров с различной жесткостью: а – гибкоцепные, б – жесткоцепные ЖК полимеры с мезогенными группами и гибкими развязками в основной (в) и боковой (г) цепях, ЖК полимеры с объемными заместителями (д), шарнирными атомами (е) и нарушенным линейным строением цепи (ж)

образования ЖК фазы и в определенном смысле всю жесткую стержнеобразную макромолекулу можно рассматривать как мезогенную. Однако большинство таких жесткоцепных полимеров характеризуются весьма высокими температурами плавления, лежащими в области их химического разложения, что существенно ограничивает, а зачастую и полностью исключает возможность образования термотропной мезофазы. Такие полимеры образуют лишь лиотропные жидкие кристаллы за счет их растворения в определенных, иногда достаточно агрессивных растворителях. Макромолекулы же гибкоцепных полимеров в расплавах имеют конформацию статистически свернутых клубков (см. рис. 1, а), что существенно затрудняет образование областей спонтанной упорядоченности фрагментов цепей и препятствует формированию мезофазы.

Компромиссное решение, направленное на создание термотропных ЖК полимеров, достигается путем химического связывания жестких и гибких фрагментов в единую макромолекулу, которая может иметь линейное (рис. 2, в) или разветвленное (гребнеобразное) строение (рис. 2, з). При этом в качестве жестких фрагментов используют обычно молекулы низкомолекулярных жидких кристаллов или их мезогенные группы, ответственные за образование ЖК фазы. В свою очередь, гибкие фрагменты, обычно называемые развязками, понижая жесткость макромолекул за счет их своеобразного разбавления, снижают температуры плавления полимеров, придавая жестким мезогенным группам достаточно высокую автономию, необходимую для их кооперативного взаимодействия с образованием мезофазы. (В отечественной литературе вместо термина “раз-

вязка” часто используют английский эквивалент “spacer” – спейсер.)

Впервые принципы молекулярного дизайна, основанные на концепции развязки – спейсера для синтеза гребнеобразных ЖК полимеров с мезогенными группами в боковых цепях, были предложены учеными Московского государственного университета (В.П. Шибаев, Я.С. Фрейдзон, Н.А. Платэ) в 1974 году, а первые линейные ЖК полимеры с мезогенными группами в основных цепях были получены два года спустя итальянскими учеными А. Сиригу и А. Ровьелло.

Такой подход к получению ЖК полимеров может быть несколько модифицирован и расширен, если вместо гибких фрагментов использовать иные химические группировки, нарушающие линейное строение жесткоцепных макромолекул. Снижение жесткости может быть достигнуто, например, введением объемных заместителей (рис. 1, д), включением “шарнирных” атомов кислорода, серы (рис. 1, е) или введением химических групп, способствующих появлению изгибов в цепи и нарушению их симметричного линейного строения (например, за счет наличия фениленовых или нафталиновых ядер, включаемых в цепь не в *para*-, а в *meta*- и *ortho*-положения (рис. 1, ж).

СИНТЕЗ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛИМЕРОВ

Ниже рассмотрено конкретное применение указанных выше принципов для синтеза жесткоцепных линейных и разветвленных полимеров.

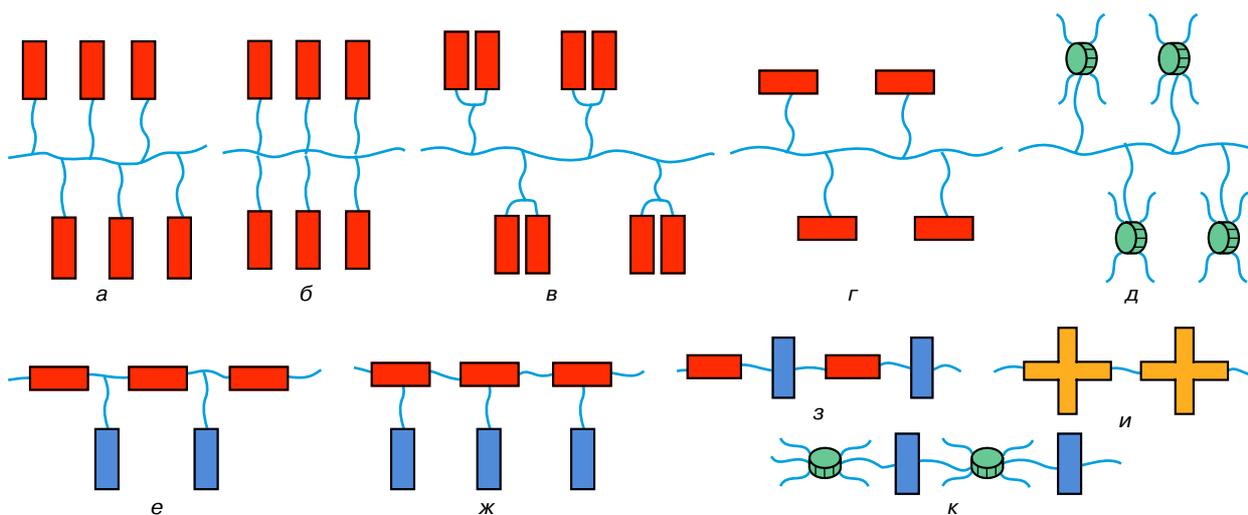
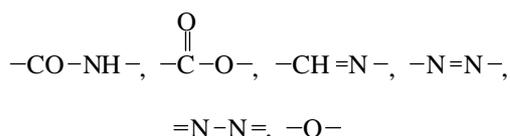


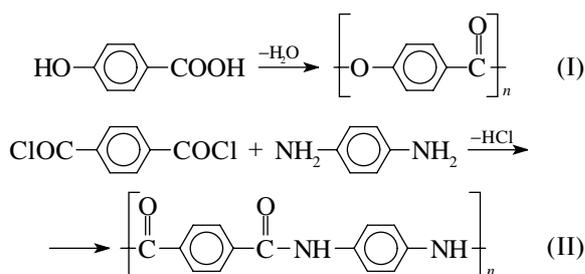
Рис. 2. Различные типы макромолекул ЖК полимеров со стержне- и дискообразными мезогенными группами. Объяснение в тексте

Жесткоцепные полимеры, образующие лиотропные ЖК растворы

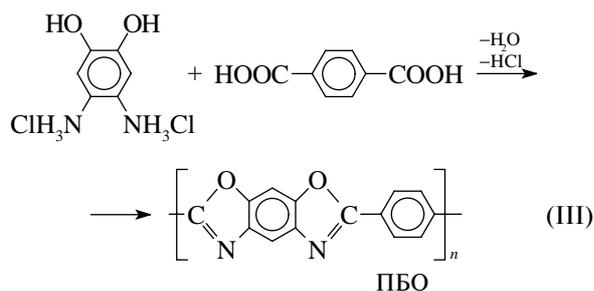
Основными структурными единицами жесткоцепных полимеров линейного строения являются ароматические (чаще всего бензольные или нафталиновые ядра), или гетероциклические, фрагменты, соединенные коллинеарно друг с другом с помощью таких мостичных группировок, как, например:



Чаще всего такие полимеры получают методами поликонденсации или сополиконденсации одинаковых или разных бифункциональных производных. Примеры синтеза ароматического полиэфира полигидроксibenзойной кислоты (I) и поли-*n*-фенилентерефталамида (торговая марка “Кевлар”¹) (II) показаны ниже



Более сложная реакция получения гетероциклического полимера – поли-*n*-фениленбензобисоксазола (ПБО) протекает при взаимодействии аминопроизводного резорцина с терефталевой кислотой



Все указанные выше полимеры характеризуются высокой жесткостью макромолекул (сегмент Куна лежит в интервале 400–600 Å), высокими температурами плавления (450–500°C), лежащими вблизи температурного интервала их химического разложения, что исключает возможность появления термотропной мезофазы. Однако, несмотря на это,

¹ Этот полимер используют для получения высокопрочных волокон. См. также статью А.А. Берлина в “Соросовском Образовательном Журнале” (1995. № 1).

жесткоцепные полимеры образуют лиотропные ЖК системы, в таких высокополярных растворителях, как серная и хлорсульфоновая кислоты, диметилацетамид с хлоридом лития.

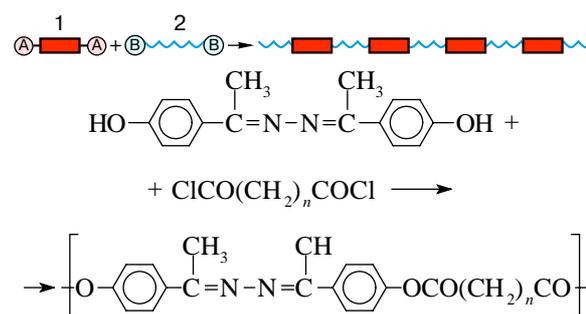
Жидкокристаллические термотропные полимеры

В зависимости от характера расположения мезогенных групп все термотропные полимеры разделяют на две большие группы: ЖК полимеры с мезогенными группами в основных и боковых цепях.

Линейные полимеры с мезогенными группами в основных цепях

Термотропные ЖК полимеры с мезогенными группами в основных цепях обычно получают либо: а) путем поликонденсации различных бифункциональных соединений, состоящих из жестких (мезогенных) (1) и гибких (2) фрагментов, либо: б) путем сополиконденсации разнородных ароматических бифункциональных соединений:

а) поликонденсация

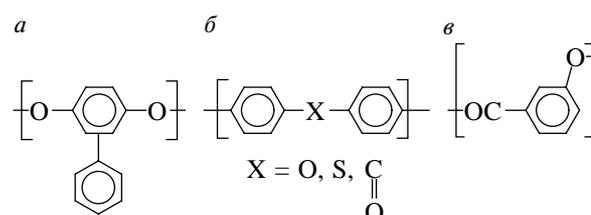


б) сополиконденсация



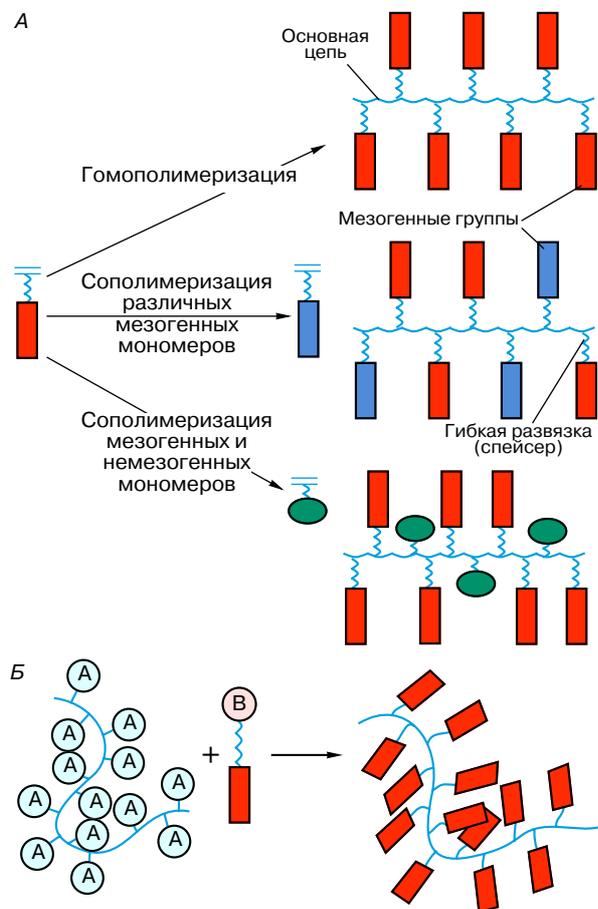
где А, В и С – функциональные группы.

Наиболее эффективным вариантом методов а или б является использование в качестве одного из компонентов бифункционального соединения, выполняющего роль нарушителя линейного строения цепи в соответствии с рис. 1, д, е, ж. Примеры таких звеньев-нарушителей, имеющих объемные заместители (а), шарнирные атомы (б) и несимметричные группы (в), показаны ниже:

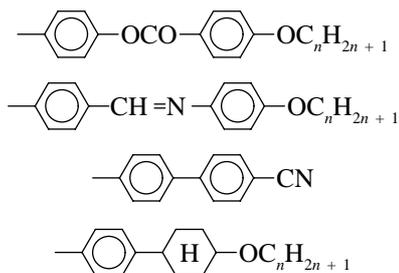


Гребнеобразные ЖК полимеры с боковыми мезогенными группами

Принцип получения таких ЖК полимеров заключается: а) в синтезе мономеров с ЖК (мезогенными) группами и их дальнейшей гомополимеризации или сополимеризации с мезогенными или немезогенными соединениями либо: б) в присоединении молекул низкомолекулярных жидких кристаллов к полимерной цепи. Во втором случае необходимо, чтобы вступающие в реакцию как полимер, так и мезогенные молекулы содержали функциональные группы (А и В), способные к взаимодействию. В обоих случаях необходимо наличие развязки, разделяющей основные и боковые группы.



Примеры типичных стержнеобразных мезогенных групп показаны ниже:



Кроме того, мезогенные группы могут иметь и дискообразную форму. В качестве основных цепей макромолекул обычно используют полиакриловые, поливиниловые, полисилоксановые, в качестве гибких развязок — алифатические или оксиалифатические фрагменты.

Используя все указанные выше методы, к настоящему времени осуществлен синтез многих тысяч разнообразных по строению ЖК полимеров (рис. 2). Как видно, помимо “чисто линейных” и “чисто гребнеобразных” разветвленных макромолекул (рис. 2, а, б) существует большое разнообразие ЖК полимеров, содержащих парные мезогены (рис. 2, в), макромолекулы с латерально связанными мезогенными группами (рис. 2, г), дискообразными (рис. 2, д) и крестообразными фрагментами (рис. 2, и). Возможно также чередование разных мезогенных групп в пределах одной и той же макромолекулы (рис. 2, е–к). Принципиальная возможность синтеза ЖК полимеров, построенных из макромолекул, состоящих из любой комбинации мезогенных и немезогенных фрагментов, открывает богатейшие возможности для молекулярного конструирования новых полимерных ЖК соединений.

Важно подчеркнуть, что включаемые в состав макромолекул как мезогенные, так и немезогенные группы (в случае сополимеров) могут обладать определенными функциональными свойствами, определяющими в конечном счете области практического применения таких ЖК материалов. Это могут быть, например, высокополярные группировки, способные к ориентации в электромагнитных полях в ЖК фазе, фоточувствительные, группы (“гости”), подверженные направленному фотохимическим изменениям в полимерной матрице (“хозяине”) (эфф-факт гость–хозяин) и другие функционально работающие фрагменты.

СТРУКТУРА И ОСОБЕННОСТИ СВОЙСТВ ЖК ПОЛИМЕРОВ

Так же как и низкомолекулярные жидкие кристаллы, ЖК полимеры образуют те же структурные типы мезофаз: нематики (N), смектики (S) и холестерики (Ch) с характерным для них расположением мезогенных фрагментов — наличием только ориентационного порядка в нематиках (рис. 3, а) и слоевого порядка в смектиках (рис. 3, б). В холестерической фазе, образуемой оптически активными полимерами, реализуется спиральная структура, определяющая особые оптические свойства холестериков (рис. 3, в).

Основная особенность ЖК полимеров — их двойственная природа, позволяющая сочетать в едином материале свойства высокомолекулярных соединений (с их способностью к образованию пленок, стекол, волокон и покрытий) и мезоморфные уникальные свойства жидких кристаллов (которые,

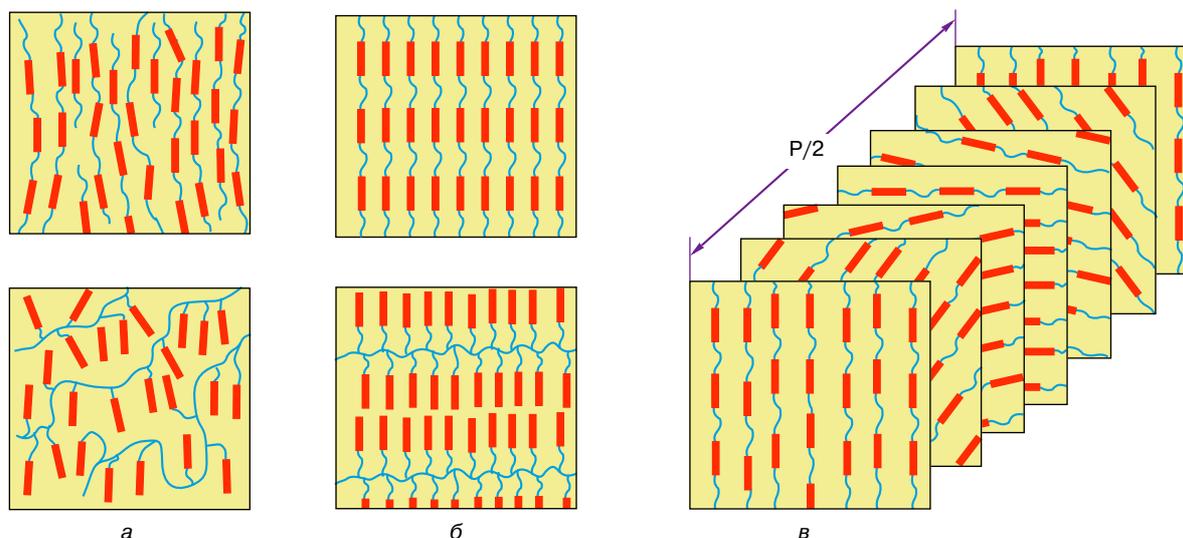


Рис. 3. Расположение молекул в нематических (а), смектических (б), холестерических (в) ЖК полимерах с мезогенными группами в основных и боковых цепях (P – шаг спирали холестерической структуры)

в свою очередь, обладают дуализмом свойств). В силу последнего обстоятельства двойственность свойств ЖК полимеров приобретает как бы особый гипертрофированный характер.

ЖК термотропные полимеры переходят в ЖК состояние выше их температуры плавления, $T_{пл}$ или выше их температуры стеклования T_c (размягчения) (если исходный полимер не кристаллизуется). Эти температуры соответствуют нижней границе образования ЖК фазы, в то время как верхней границей является так называемая температура просветления (или изотропизации) $T_{пр}$, выше которой полимер переходит в изотропный расплав. Именно в температурном интервале T_c (или $T_{пл}$) – $T_{пр}$ мезогенные фрагменты ЖК полимера самопроизвольно организуются, формируя определенный структурный тип мезофазы (N, S или Ch) в соответствии с молекулярным строением и молекулярной массой полимера. В случае лиотропных ЖК полимеров, образующихся в растворах, определенный структурный тип мезофазы реализуется при строго фиксированных значениях температуры и концентрации полимера в растворе, что обычно хорошо видно при изучении их фазовых диаграмм.

Использование ЖК полимеров основано на эксплуатации их высокоупорядоченной ЖК структуры, которая достаточно легко (хотя и медленно) поддается управлению с помощью различных методов внешнего воздействия с последующей фиксацией ориентированной структуры в твердом теле, предварительно заданной в ЖК фазе. Рассмотрим наиболее важные аспекты такого управления свойствами ЖК полимеров с точки зрения их применения.

Управление электрическим полем – путь к получению тонкопленочных оптических материалов

Используя электрические (или магнитные) поля, традиционно применяемые для ориентации низкомолекулярных жидких кристаллов, можно (уже нетрадиционно!) управлять структурой ЖК полимеров в мезофазе, заставляя его мезогенные группы ориентироваться в нужном направлении. Тип ориентации мезогенных групп в этом случае определяется знаком величины анизотропии диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon_{\parallel} = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$, где ϵ_{\parallel} и ϵ_{\perp} – диэлектрические постоянные измеренные при параллельной (\parallel) и перпендикулярной (\perp) ориентации длинных осей мезогенных групп. При $\Delta\epsilon > 0$ длинные оси мезогенов ориентируются вдоль электрического поля, при $\Delta\epsilon < 0$ перпендикулярно ему.

Схема на рис. 4 демонстрирует процесс ориентации нематического гребнеобразного полимера (при $\Delta\epsilon > 0$), помещенного между двумя токопроводящими прозрачными стеклянными пластинами под действием электрического поля. Наблюдая за кинетикой процесса ориентации мезогенных групп по изменению интенсивности поляризованного света I , прошедшего через полимерную пленку (см. рис. 4), можно видеть, как мутный, сильно рассеивающий свет образец постепенно превращается в прозрачную пленку, структура которой может быть заморожена при охлаждении полимера и отключении электрического поля. Изображенная на рис. 4 структура, при которой мезогенные группы ориентируются перпендикулярно поверхности ячейки, называется гомеотропной. Используя ЖК полимеры с отрицательной анизотропией диэлектрической постоянной ($\Delta\epsilon < 0$) получают иной характер ориентации

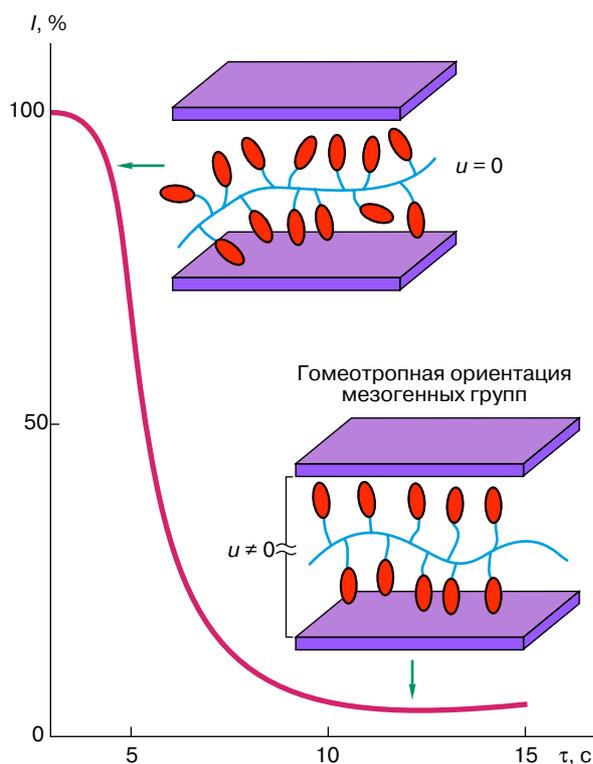


Рис. 4. Ориентация нематического ЖК полимера в электрическом поле

мезогенных групп — их длинные оси располагаются вдоль поверхности стекл-электродов, это так называемая планарная структура. Такие высокоориентированные пленки по существу представляют собой твердые оптические элементы, характеризующиеся высокой оптической анизотропией (двойное лучепреломление, $\Delta n = 0,2-0,3$), которые могут быть использованы для получения оптических материалов, таких, как фазовые пластинки, фазовые линзы, поляриды и другие интересные тонкопленочные оптические материалы.

Холестерические ЖК полимеры — спектрональные фильтры и циркулярные поляризаторы

Среди ЖК полимеров особый интерес представляют холестерические пленки, образуемые холестерическими гребнеобразными сополимерами, которые обычно получают сополимеризацией мезогенных мономеров и хиральных (оптически активных), но необязательно мезогенных мономеров. Термин “хиральный” (от греч. хирос — рука) используется для описания структур, которые не могут быть совмещены со своим зеркальным изображением путем наложения друг на друга. Такие структуры асимметричны и вращают плоскость поляризации поляризованного света.

Наличие оптически активных звеньев в составе макромолекул стимулирует закручивание мезогенных групп и формирование надмолекулярной спиральной структуры, селективно отражающей свет определенного диапазона длин волн, λ_{\max} в соответствии с шагом спирали P (рис. 3, в). Варьируя состав сополимера можно менять шаг спиральной структуры и область селективного отражения света, поскольку $\lambda_{\max} = P\bar{n}$ (где \bar{n} — показатель преломления холестерика). Чем больше концентрация хиральных звеньев в сополимере, тем сильнее закручена спираль, тем меньше шаг спирали P . Таким образом, меняя концентрацию хиральных звеньев можно в широких пределах варьировать λ_{\max} (от 300 до 10^4 нм), получая спектрональные оптические фильтры и отражатели для ИК-, видимой и УФ-областей спектра. Причем направление поляризации прошедшего через пленку света противоположно закрутке спирали, что делает такие пленки эффективными циркулярными поляризаторами.

Существенным преимуществом полимерных ЖК соединений перед низкомолекулярными жидкими кристаллами является возможность получения многослойных тонкопленочных материалов с необычными оптическими свойствами.

ЖК полимеры как управляемые оптически активные среды для записи информации

Наряду с использованием ЖК полимеров в качестве материалов для пассивных оптических элементов, когда в основном эксплуатируются оптические свойства этих материалов, заданные внешними полями единожды на этапе их изготовления, ЖК полимеры могут применяться и в активных управляемых элементах. Проиллюстрируем это на примере термооптической записи информации на гомеотропно ориентированной пленке гребнеобразного смектического ЖК полимера (рис. 5, а); основные цепи на рисунке для упрощения не показаны.

Исходная прозрачная пленка ЖК полимера с гомеотропной ориентацией мезогенных групп (созданной, как указано выше, воздействием электрического поля) (рис. 5, а) подвергается воздействию лазерного луча, который создает места локального перегрева полимера выше его $T_{\text{пр}}$. В этих местах ЖК полимер плавится, переходя в изотропный расплав, при этом, естественно, нарушается гомеотропная ориентация мезогенных групп (рис. 5, б). Охлаждение пленки (например, за счет перемещения лазерного луча) приводит к самопроизвольному формированию ЖК фазы, сильно рассеивающей свет на фоне прозрачной пленки, что равносильно записи определенного объема информации (рис. 5, в). Освещение такой пленки расфокусированным лучом лазера позволяет спроектировать записанное изображение на экран. На рис. 5, г показаны примеры записи геометрических фигур на пленке ЖК полимера. Возможно также использование для этих

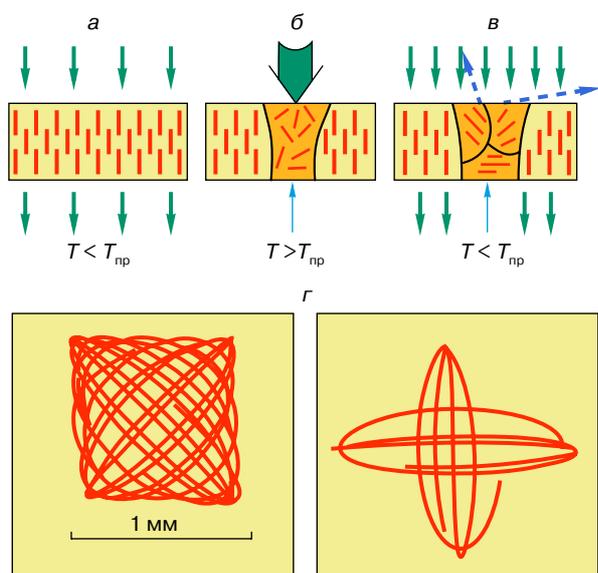


Рис. 5. Принцип термооптической записи на пленке гомеотропно ориентированного смектического полимера (а–в) и примеры записанных геометрических фигур (г)

целей и холестерических полимерных пленок, которые в комбинации с циркулярными правыми и левыми поляризаторами дают возможность менять цвет записанных символов и цвет фона, на котором ведется запись.

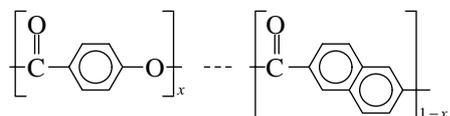
Несмотря на то что быстрдействие ЖК полимерных пленок невелико (секунды, десятые доли секунд), они представляют интерес для записи и долговременного (архивного) хранения информации, получения микрофиш, картографирования и использования в системах микрографии.

Супервысокопрочные волокна и самоармированные пластики

Высокая степень порядка в расположении жесткоцепных и полужесткоцепных макромолекул в лиотропных и термотропных ЖК полимерах соответственно используется для получения высокопрочных волокон, пленок и разнообразных изделий из ЖК полимеров. Среди ЖК полимеров лиотропные полимеры исторически были первыми, вышедшими на арену практического применения в середине 60-х годов нашего столетия. Использование лиотропных ЖК растворов, таких, как поли-*n*-бензамид, поли-*n*-фенилентерефталтамид (см. выше реакцию II), а также других ароматических полиамидов произвело настоящую революцию и позволило создать индустрию нового поколения высокопрочных, так называемых высокомодульных (имеющих высокие значения модуля растяжения) волокон.

В исходной анизотропной ЖК фазе достигается значительно более совершенная упаковка макромолекул по сравнению с изотропным расплавом за счет формирования в мезофазе доменных областей, характеризующихся параллельной агрегацией макромолекул. Получение волокон из таких растворов приводит к резкому повышению их прочностных характеристик, что определяется как химической структурой полимеров, так и совершенной ориентацией их макромолекул по сравнению с волокнами, полученными из изотропных растворов. Прочность таких волокон в 2,5 раза, а модуль упругости в 10–20 раз выше, чем у самых прочных нитей из алифатических полиамидов типа нейлон. Так, прочность на разрыв волокон кевлар и ПБО составляет 2,8 и 3,4 ГПа, а модуль упругости при растяжении – 180 и 450 ГПа соответственно (см. реакции II и III). С учетом низкого удельного веса этих ароматических волокон их удельная прочность в 2–4 раза превосходит стальные и стеклянные волокна.

Тот же принцип лежит в основе получения высокопрочных, так называемых самоармирующихся пластиков, когда за счет продавливания уже не растворов, а анизотропных расплавов ЖК термотропных полимеров через капилляры литьевых машин образуются фибриллярные (волокнистые) структуры, выполняющие роль армирующих материалов. Однако в этом случае и матрица и армирующий материал одинаковы по составу. Одним из примеров таких ЖК полимеров может служить сополимер “Вектра”, состоящий из разнородных звеньев:



строение которого соответствует структуре, изображенной на рис. 1, ж. Прочность этого и других подобных термотропных ЖК полимеров необычно высока и в несколько раз превосходит соответствующие величины для изотропных пластиков, что дало основание рассматривать их как новое поколение самоармированных молекулярных композитов для использования в качестве конструкционных материалов.

Помимо отличных механических свойств этих пластиков существенный интерес представляет низкий коэффициент линейного расширения термотропных ЖК полимеров α . Значение α для них составляет величины порядка $\leq 1 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$, что сопоставимо с величиной α для неорганического стекла ($5 \cdot 10^{-7}$ град $^{-1}$) и значительно меньше, чем у нейлона ($1 \cdot 10^{-4}$ град $^{-1}$). Это позволяет использовать такие ЖК полимеры в качестве защитных оболочек для световодов, что обеспечивает практически полное отсутствие светопотерь у световодов при температурах от -80 до $+80^\circ\text{C}$.

Высокие механические показатели, термостойкость, удобство переработки обеспечивают широкое практическое использование ЖК полимеров в виде конструкционных и армирующих материалов в электронной и радиотехнической промышленности, самолетостроении, космической технике, ракетостроении, для получения шинного корда, создания огнезащитных и других полимерных материалов.

Как видно из рассмотренных выше данных, ЖК полимеры активно вторгаются в сферы научной и практической деятельности. Быстрыми темпами развивается промышленное производство ЖК линейных полимеров, получаемых из лиотропных и термотропных систем, мировое производство которых уже исчисляется сотнями тысяч тонн. Разрабатываются подходы к производству гребнеобразных полимеров. Настоящий период характеризуется быстрым накоплением знаний в этой области, что, несомненно, приведет не только к расширению наших представлений вообще о ЖК соединениях, но и к созданию качественно новых полимерных материалов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Платэ Н.А., Шibaев В.П.* Гребнеобразные полимеры и жидкие кристаллы. М.: Химия, 1980.
2. *Шibaев В.П.* Жидкие кристаллы // Химическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1990. Т. 2. С. 286–289.
3. *Платэ Н.А., Шibaев В.П.* Жидкокристаллические полимеры // Наука и человечество. М.: Знание, 1983. С. 283–298.
4. *Шibaев В.П.* Настоящее и будущее жидкокристаллических полимеров // Хим. волокна. 1987. № 3. С. 4–12.
5. Жидкокристаллические полимеры / Под ред. Н.А. Платэ. М.: Химия, 1988.

* * *

Валерий Петрович Шibaев, доктор химических наук, профессор кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Заслуженный деятель науки РФ, член-корреспондент Российской академии естественных наук, лауреат Государственной премии СССР. Автор более 400 научных работ, включая пять монографий (три из которых изданы за рубежом), 20 изобретений и патентов.