

УДК 541.127.4:541.49

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИХРОМОФОРНЫХ СУПРАМОЛЕКУЛЯРНЫХ УСТРОЙСТВ И МАШИН

© 2022 г. С. П. Громов^{а, б, *}, М. В. Алфимов^{а, б}, А. К. Чибисов^{а, б}^аЦентр фотохимии РАН, ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН,
ул. Новаторов, 7а, корп. 1, Москва, 119421 Россия^бМосковский физико-технический институт (государственный университет),
Институтский пер., Долгопрудный, Московская обл., 141701 Россия

*E-mail: spgromov@mail.ru

Поступила в редакцию 24.06.2021 г.

После доработки 24.08.2021 г.

Принята к публикации 28.08.2021 г.

Среди различных направлений в науке о фотоактивных органических соединениях дизайн, создание и изучение мультихромофорных супрамолекулярных устройств и машин привлекают особое внимание, поскольку на этом пути можно открыть новые подходы к построению сложных иерархических “умных” материалов.

Ключевые слова: транс-цис-фотоизомеризация, [2+2]-фотоциклоприсоединение, перенос заряда, фотоиндуцированный перенос электрона, неопределенные соединения, краун-соединения, кукурбитурилы, супрамолекулярные устройства, супрамолекулярные машины, молекулярный конструктор

DOI: 10.31857/S0023119322010065

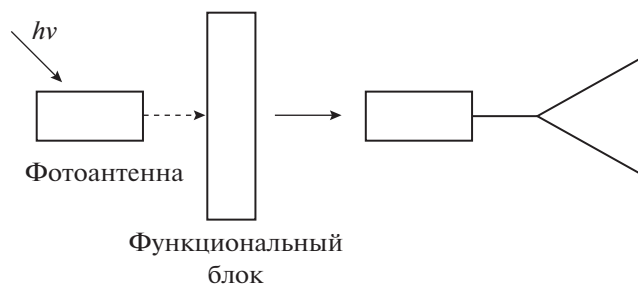
В настоящее время стало очевидным, что основное направление в развитии техносферы цивилизации связано с миниатюризацией устройств и машин. Существует две основные стратегии создания наноразмерных архитектур: “снизу вверх” и “сверху вниз”. В рамках стратегии “сверху вниз” наночастицы и наноразмерные системы получают в результате измельчения более крупных объектов. Стратегия “снизу вверх” может быть реализована, прежде всего, с помощью органического синтеза и супрамолекулярной самосборки.

В настоящее время в нанотехнологии “снизу вверх” сформировалось новое направление — инженерия супрамолекулярных устройств и машин различного назначения. Супрамолекулярными устройствами называют структурно-организованные и функционально-интегрированные химические системы. К супрамолекулярным машинам обычно относят устройства, в которых реализация функции происходит в результате механического перемещения компонентов относительно друг друга [1]. И первые, и вторые могут быть использованы при создании устройств для генерации, преобразования и передачи энергии и устройств перемещения на наноуровнях, при разработке инструментов для контроля, диагностики наноконструкций материалов и веществ [2–5].

Управлять супрамолекулярными устройствами и машинами можно разными способами (на-

пример, с помощью термического, химического или электрохимического воздействия), но самый удобный агент — свет, который легко регулируется как по длине волны, так и по интенсивности [6].

В живой природе фотоактивные супрамолекулярные системы обеспечивают фотосинтез и фототропизм у растений, зрительное восприятие у человека и животных, фототаксис у бактерий: поглощая фотон, молекулы хлорофилла и ретиналя претерпевают перестройки, из-за чего меняется их реакционная способность. В этих системах свет приводит в действие целый ряд жизненно важных процессов. Основные фотопроцессы, которые при этом происходят, — включают флуоресценцию, интеркомбинационный переход в триплетное состояние, перенос энергии и электрона, а также вызванные светом структурные изменения.

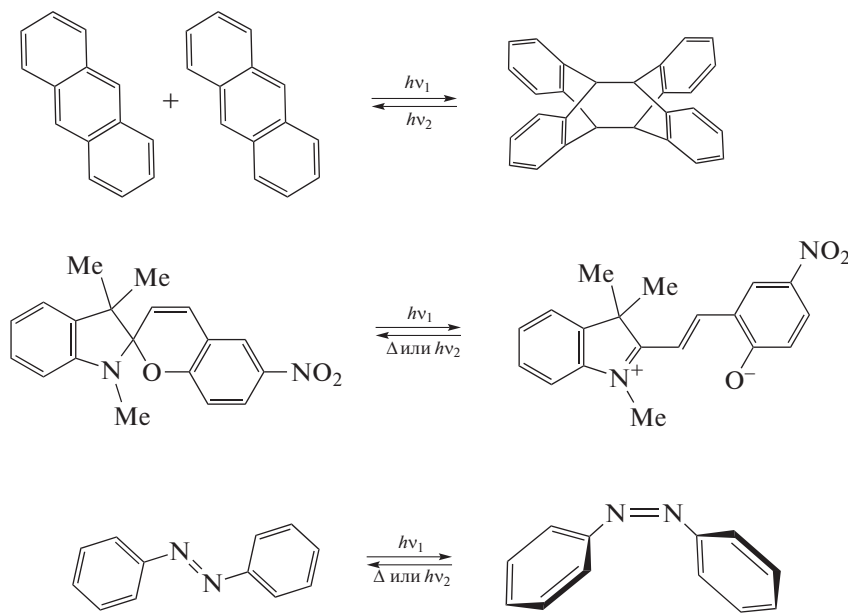


Таким образом, молекулы, составляющие фотоактивные супрамолекулярные системы, должны поглощать свет, приводящий к структурной перестройке и к изменению реакционной способности. Важной является способность фотоактивных супрамолекулярных систем обладать свойствами фотоантенн.

Создать искусственные фотоактивные супрамолекулярные системы различной степени сложности, которые, с одной стороны, обладали бы наиболее ценными свойствами природных объ-

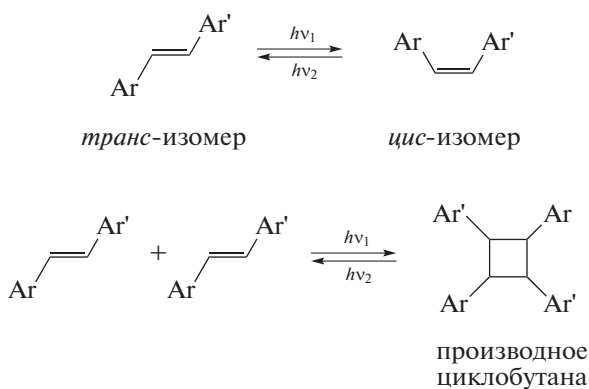
ектов, а с другой – предоставляли бы возможности для новых применений, пытались уже давно.

В качестве фотоантенн в супрамолекулярных устройствах и машинах изучали фотохромные производные антрацена и спиросоединений, но чаще всего использовали производные азобензола, содержащие N=N-связь. Однако принципиальным недостатком азобензолов является то, что они способны вступать только в реакции *транс-цис*- и *цис-транс*-фотоизомеризации.



В этом отношении соединения, содержащие углерод-углеродную двойную связь (непредельные или ненасыщенные соединения), имеют ряд преимуществ, главное из которых состоит в способности вступать не только в реакцию фотоизо-

меризации, но и в другие обратимые фотореакции, приводящие к значительным структурным изменениям, например, в реакцию [2 + 2]-фотоциклоприсоединения с образованием производных циклобутана.



В качестве функционального блока (фрагментов), реагирующих на изменение структуры молекулы при фотопереключении, наиболее часто

используют краун-соединения. Это макроциклические соединения, содержащие гетероатомы с неподеленными электронными парами, которые



Рис. 1. Схематическое представление фотопереключаемых супрамолекулярных устройств на основе краун-содержащих непредельных соединений (КНС).

способны к образованию координационных связей с ионом металла. Одним из фундаментальных свойств этих молекул является их способность в растворах к самосборке вместе с ионами или другими молекулами (гостями) в системы высокой степени сложности, которая сильно зависит от химического и пространственного строения [7].

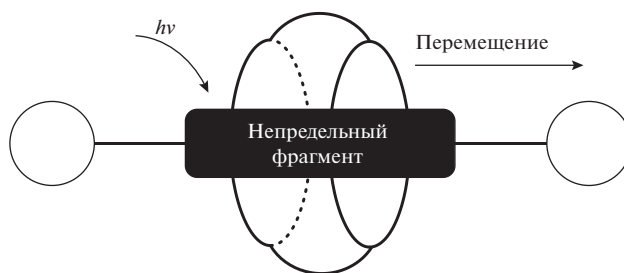
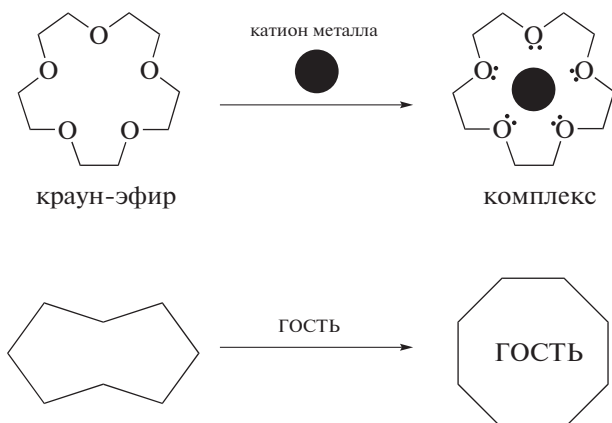
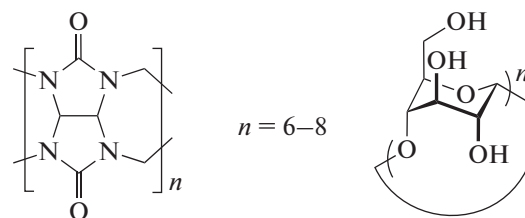


Рис. 2. Схематическое представление фотоуправляемых супрамолекулярных машин на основе непредельных соединений и кукурбитурилов или циклодекстринов.

(рис. 1): это гибридные молекулы (КНС), содержащие непредельный фрагмент в качестве фотоантенны и один или два краун-эфирных фрагмента, способных связывать ион металла [8]. В этом случае самосборка в фотопереключаемые супрамолекулярные устройства позволит изменить спектральные и фотохимические характеристики непредельного фрагмента молекулы, а с помощью света, в свою очередь, можно будет управлять самосборкой таких краунсодержащих молекул.

Прототипами фотоуправляемых супрамолекулярных машин, в которых компоненты могут механически перемещаться относительно друг друга (рис. 2), могут быть напоминающие челнок псевдоротацановые комплексы с участием непредельных соединений (оси) и макроциклических кукурбитурилов или циклодекстринов (ротаторы). Для этого они не должны быть соединены прочными химическими связями.

Кукурбитурилы, которые используются в качестве ротора в псевдоротацановых комплексах, представляют собой макроциклические соединения типа $(C_6H_6N_4O_2)_n$, их строение напоминает тыкву (латинское название *cucurbita*) или бочку. Размеры их внутренней полости позволяют включать «гостей» – органические молекулы – с формированием комплексов. В областях дна и крышки такой бочки располагаются атомы кислорода сильно поляризованных карбонильных групп [9].



кукурбитурилы

циклодекстрины

Это облегчает образование комплексов включения, особенно с положительно заряженными мо-

Если связать ковалентными связями фрагменты краун-соединения и фотоактивного соединения так, чтобы один или два гетероатома макроцикла находились в сопряжении с хромофором, то это приведет к нарушению аддитивности в проявлении специфических свойств краунсодержащих фотоактивных соединений. При этом превращения фотоактивного фрагмента под действием света приведут к изменению эффективности связывания катионов металлов краун-эфирным фрагментом, а самосборка в свою очередь должна изменить спектральные и фотохимические характеристики фотоактивного фрагмента.

Сопряженные реакции этого типа происходят в супрамолекулярных структурах, образованных в результате самосборки с участием молекул краунсодержащего фотоактивного соединения и ионов металла, что используется для разработки и создания фотопереключаемых супрамолекулярных устройств.

Таким образом, фотопереключаемые супрамолекулярные устройства на основе непредельных соединений и краун-соединений схематично могут быть представлены следующим образом

лекулами-гостями, к которым относится большинство фотоактивных непредельных соединений.

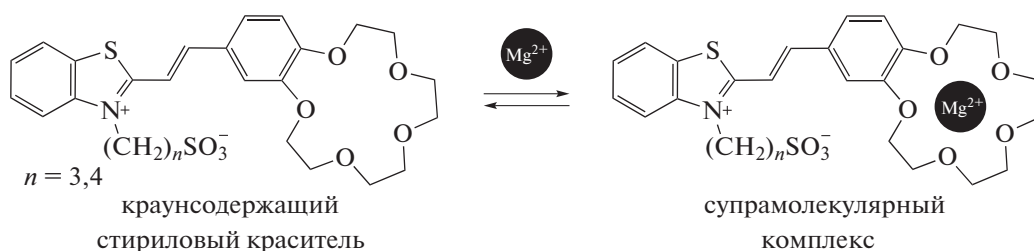
Форма молекул циклодекстринов представляет собой тор, также напоминающий полый усеченный конус. Данная форма стабилизирована водородными связями между ОН-группами, а также α -D-1,4-гликозидными связями. Все ОН-группы в циклодекстринах находятся на внешней поверхности молекулы. Поэтому внутренняя полость циклодекстринов является гидрофобной и способна образовывать в водных растворах комплексы включения с фотоактивными органическими молекулами.

В живой природе огромное многообразие супрамолекулярных архитектур создается на основе ограниченных наборов компонентов. Примерами таких молекулярных конструкторов могут служить нуклеотиды, которые используются природой для построения нуклеиновых кислот различных степеней иерархии.

Универсальным приемом построения в нанотехнологии “снизу вверх” мультихромовых супрамолекулярных устройств и машин с заданной архитектурой и разнообразными свойствами может стать использование методологии супрамолекулярного конструктора. Однако такие подходы в нанотехнологии не разработаны.

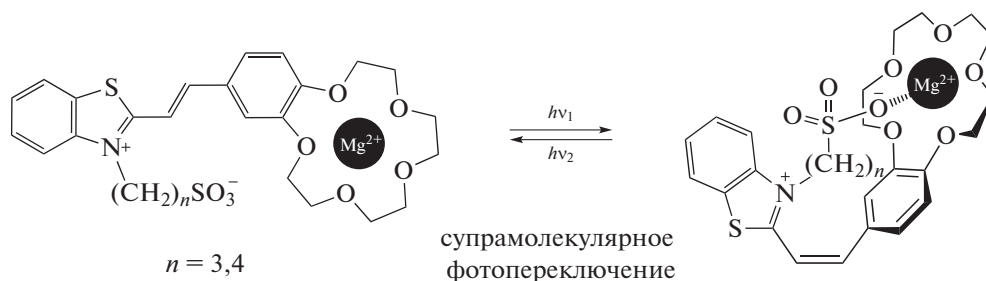
Были синтезированы и изучены КНС, имеющие в качестве фотоантенны связь С=С и при ней арильный и гетарильный остатки [10]. Это позволило осуществлять фотопереключение молекул, используя видимый свет. Одновременно были разработаны методы синтеза ряда соединений, не описанных ранее, весьма перспективных для различных типов фотоактивных супрамолекулярных устройств: производных краун-эфиров, в том числе труднодоступных, например содержащих в макроцикле атомы N, O, S в различных сочетаниях. Можно было предположить, что в результате самосборки молекул КНС и катионов металлов получатся сложные надмолекулярные структуры — супрамолекулярные комплексы, тоже обладающие способностью к фотопереключению.

Было обнаружено, что среди КНС наиболее перспективными для создания фотопереключаемых супрамолекулярных устройств являются краунсодержащие стироловые красители, имеющие способность к координации концевую анионную группу SO_3^- . Путем самосборки удалось получить из этих красителей и катионов металлов супрамолекулярные комплексы [11, 12]:



В зависимости от длины волны активного света такие комплексы могут “надевать” и “снимать” свою

анионную “шапочку” (группу SO_3^-), т.е. способны к супрамолекулярному фотопереключению [11].



Было также показано, что *цис*-изомеры представленных выше стироловых красителей образуют намного более прочные комплексы по сравнению с *транс*-изомерами (отношение констант устойчивости достигает 500). Это значит, что с по-

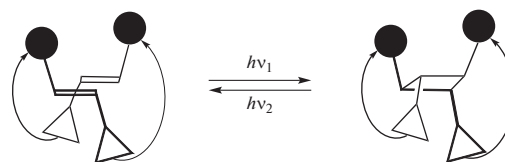
мощью света можно менять средство этих КНС к катиону металла, т.е. управлять процессом образования комплекса. Такие супермолекулы принято называть фотопереключаемыми супрамолекулярными устройствами. Таким образом, впер-

вые были получены на основе краунсодержащих стироловых красителей фотопереключаемые супрамолекулярные устройства [13–15].

Супрамолекулярные комплексы на основе КНС открывают возможности для создания и более сложных мультихромофорных супрамолекулярных устройств.

Судя по данным фотохимических исследований, в присутствии катионов металлов молекулы краунсодержащих стироловых красителей способны к самосборке в фотоактивные сэндвичевые структуры (димеры “голова-к-хвосту”), в которых С=C-связи располагаются одна над другой. Если облучать растворы супрамолекулярных

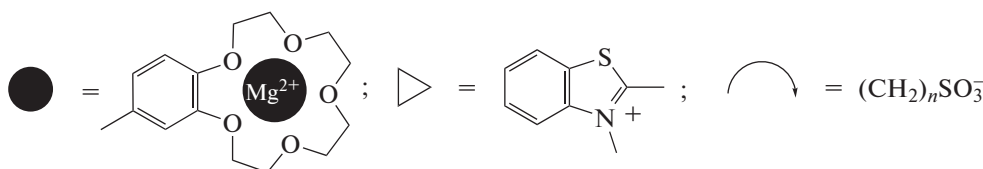
димерных комплексов светом с определенной длиной волны, то с высокой эффективностью происходит реакция фотоциклоприсоединения с образованием производных циклобутана [16–18].



Димерный комплекс “голова-к-хвосту”

Комплекс циклобутана

Здесь использованы следующие обозначения



Если удалить катион, то действием света более короткой длиной волны можно превратить циклобутан в исходный стироловый краситель, а затем повторить процесс образования димерного комплекса. Кроме того, выяснилось, что полученные производные циклобутана связывают катион металла намного лучше, чем исходные красители. Таким образом, и в этом случае можно управлять процессом образования комплекса с помощью света, т.е. димерные комплексы также представляют собой фотопереключаемые супрамолекулярные устройства [8, 19].

Следует заметить, что в результате супрамолекулярного фотоциклоприсоединения образуется единственный из 11 теоретически возможных изомеров циклобутана, иначе говоря, данная реакция протекает стереоспецифически [20]. Это дает возможность целенаправленно создавать фотопереключаемые супрамолекулярные устройства строго определенного строения.

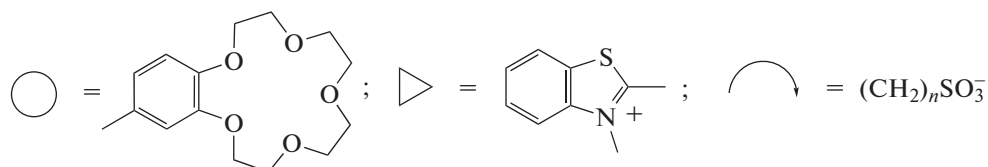
Полученные в настоящее время данные позволяют утверждать, что катионы металлов в димерных комплексах КНС не оказывают прямого влияния на протекание реакции фотоциклоприсоединения, они исполняют роль “молекулярного клея”, сближая молекулы на расстояние, на котором реакция становится возможной, и одновременно обеспечивая благоприятную для реакции взаимную ориентацию С=C-связей [20, 21].

В отличие от комплексов с анионной “шапочкой” (анион-“накрытых” комплексов) продукты фотоциклоприсоединения — краунсодержащие циклобутаны — без ионов металла представляют собой новый тип фотопереключаемых молекул-хозяев, обладающих двумя местами связывания катионов. Краун-эфирные фрагменты в этих молекулах расположены таким образом, что можно

предвидеть возможность их одновременного участия в образовании комплекса сэндвичевого типа с катионом металла большого диаметра, например, Ba^{2+} или Cs^+ , или с небольшим органическим катионом.

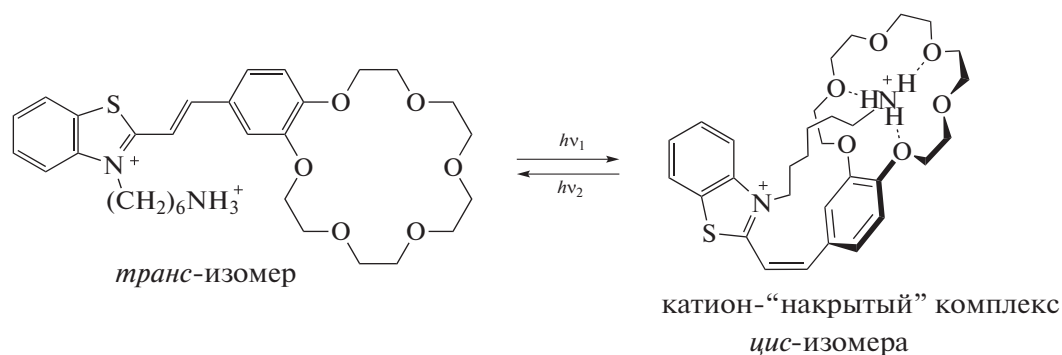
Таким образом, фотопереключаемые мультихромофорные супрамолекулярные устройства с заданными характеристиками могут быть получены из двух молекул КНС и двух катионов металлов путем самосборки в растворе супрамолекулярных димерных комплексов с последующей фотоконверсией в краунсодержащие циклобутаны, обладающие иными комплексообразующими свойствами. При необходимости можно “разобрать” циклобутаны на исходные соединения путем облучения светом с более короткой длиной волны [8].

Представляло интерес исследовать, как влияет наличие дополнительной С=C-связи в краунсодержащих бутадииенильных красителях на их комплексообразующие и фотохимические свойства [22, 23]. Если у атома азота гетероциклического остатка бутадииенильного красителя находится заместитель с терминальной сульфонатной группой, добавление ионов магния вызывает образование димерного комплекса. Облучение светом этого комплекса приводит к регио- и стереоспецифической реакции [2 + 2]-фотоциклоприсоединения. Она идет с участием только одной двойной связи бутадииенильного красителя. При этом образуется единственный из многих возможных изомеров циклобутана. Реакция протекает с квантовыми выходами, достигающими 0.35, существенно более высокими, чем в случае стироловых красителей [24].



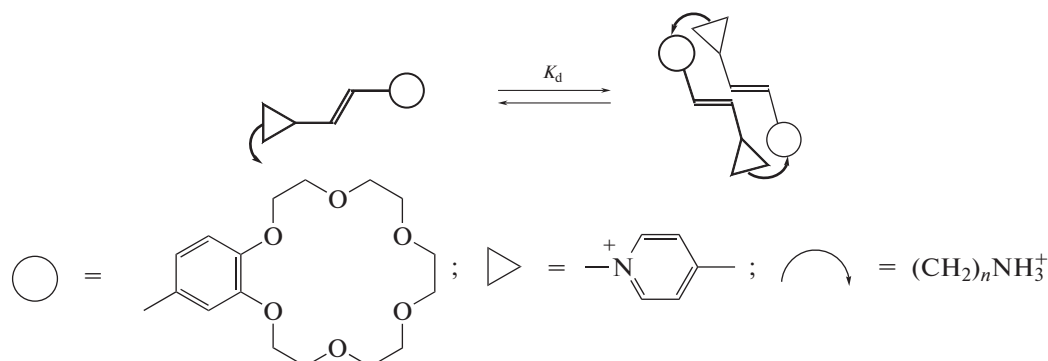
Супрамолекулярное устройство, характеризующееся фотопереключаемым внутримолекулярным комплексообразованием с участием водородных связей в отсутствие катионов метал-

лов, было получено путем введения длинного *N*-аммонийалкильного заместителя в гетероциклический остаток стирилового красителя [25].



В отличие от комплексов с катионной “шапочкой” (катион-“накрытых” комплексов) стироловые красители, имеющие более короткие аммонийалкильные заместители у атома азота гетеро-

циклического остатка, способны образовывать в растворе димерные комплексы путем спонтанной супрамолекулярной самосборки с участием водородных связей [26, 27].

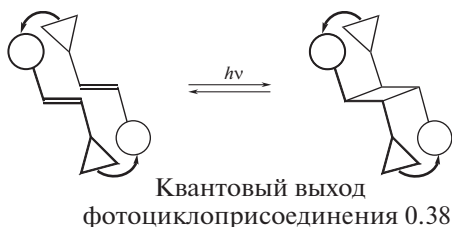


Было установлено, что хромофорные фрагменты двух молекул в этих комплексах расположены на близком расстоянии и практически па-

раллельны друг другу, при этом взаимная ориентация центральных C=C-связей благоприятна для протекания реакции [2 + 2]-фотоциклопри-

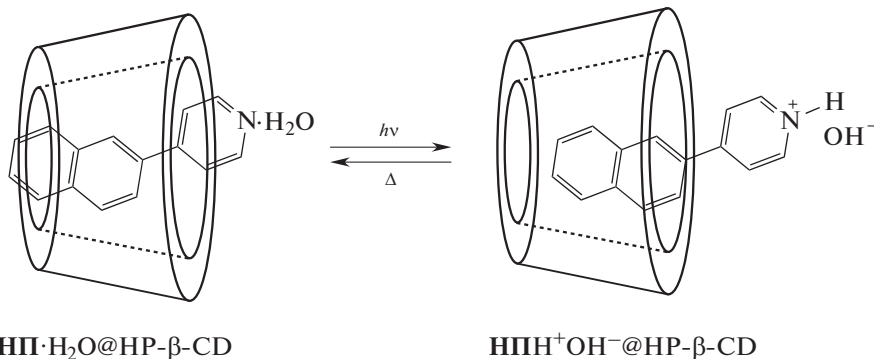
соединения [26]. Неудивительно, что в этом случае удалось осуществить в растворе стереоспецифические реакции [2 + 2]-фотоциклоприсоединения с необычно высокими квантовыми выходами.

Обнаруженное свойство позволяет рассчитывать на использование этих новых фотопереключаемых мультихромофорных супрамолекулярных устройств в технологии оптической записи и хранения информации [26].



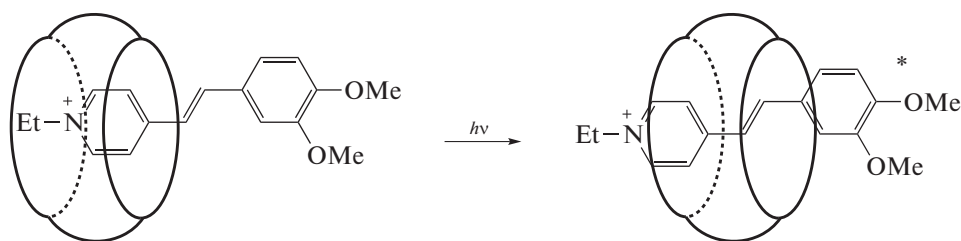
Важным направлением исследований стала самосборка фотоуправляемых супрамолекулярных машин на основе фотоактивных непердельных соединений и кукурбитурилов [8, 20]. Оказалось, что кукурбитурилы образуют с положительно заряженными непердельными соединениями достаточно устойчивые комплексы включения типа “гость–хозяин”.

Представляло интерес исследовать возможность фотоуправления в супрамолекулярных машинах механическими перемещениями. Простейший вариант такой супрамолекулярной машины удалось создать на основе комплекса включения нафтилпиридина (НП) с β-циклодекстрином (НР-β-CD). В этом случае фотооблучение приводит к обратимому протонированию и как следствие к механическому смещению молекулы гостя в полости макроцикла [28].



Простейшая быстрая фотоуправляемая супрамолекулярная машина была получена на основе комплекса включения стирилового красителя и кукурбит[7]урилла. Оказалось, что значительное увеличение времени жизни

флуоресценции красителя связано с механическим смещением электронно-возбужденного катиона красителя вглубь полости молекулы-хозяина в первые несколько пикосекунд [29, 30].



Более сложный вариант фотоуправляемой супрамолекулярной машины был создан на основе псевдоротаганового комплекса кукурбит[8]урилла с производным дихинолилэтилена. В этом случае облучение светом вызывает обратимую *транс-цис-*

фотоизомеризацию гостевой молекулы непердельного соединения (рис. 3) [31].

Пространственное строение этой супрамолекулярной машины после облучения светом, определенное методом рентгеноструктурного анализа

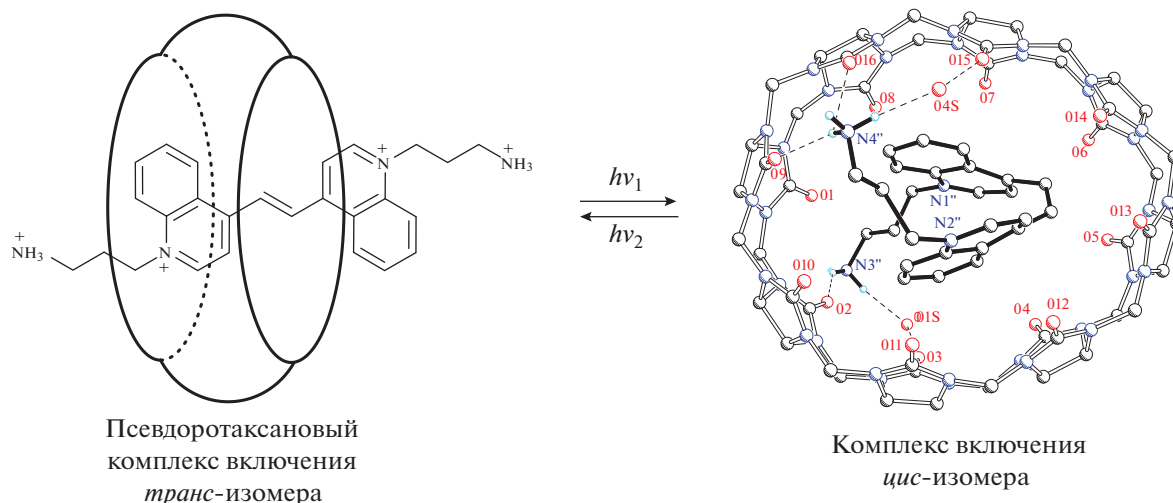


Рис. 3. Фотоуправляемая супрамолекулярная машина на основе псевдорота́ксанового комплекса включения производного дихинолилэтилена с кукурбит[8]урилом.

(см. правую часть рис. 3), показывает, что сложное механическое перемещение молекулы-гостя в полости макроцикла-хозяина, напоминающее свертывание в клубок, легко может быть осуществимо.

Оказалось, что в полости кукурбит[8]урила способны разместиться две молекулы стирилового красителя. На рис. 4 представлена структура соответствующего супрамолекулярного псевдорота́ксанового комплекса включения [32]. Взаимное расположение непердельных фрагментов двух молекул красителя в этом комплексе оказалось благоприятным для осуществления реакции фотоциклоприсоединения. Исследования показали, что образовавшийся циклобутан связан с кукурбитурилом менее прочно, чем исходные компоненты, т.е. появляется возможность управлять не только механическими перемещениями фотоактивных молекул внутри макроцикла, но и прочностью связывания компонентов.

Благодаря этим свойствам удалось создать на основе кукурбит[8]урила фотоуправляемый мультихромоморный супрамолекулярный ассемблер [32]. Ассемблерами называют супрамолекулярные машины, способные направлять химические реакции за счет позиционирования молекул (т.е. “движущейся частью механизма” в данном случае являются молекулы-гости). В живой природе примером ассемблера, предназначенного для синтеза клеточных белков из аминокислот, служит рибосома. В нашем случае присутствие всего пяти мольных процентов кукурбитурила позволяет осуществить при облучении светом полное стереоспецифическое превращение исходных стироловых красителей в производные циклобутана (функционирование фотоуправляемого мультихромоморного

супрамолекулярного ассемблера представлено на рис. 5).

Таким образом, с помощью кукурбитурила можно собирать тримолекулярные псевдорота́ксановые комплексы, осуществлять в этих комплексах реакцию фотоциклоприсоединения и повторять этот цикл превращений необходимое число раз.

В созданных супрамолекулярных системах можно реализовать все основные типы фотопроцессов [8, 20, 33–35].

Все это позволяет говорить о создании на основе непердельных и макроциклических соединений супрамолекулярного конструктора мультихромоморных супрамолекулярных устройств и машин, обладающего уникальным комплексом необходимых характеристик [8]: 1) доступностью с точки зрения органического синтеза, 2) склонностью к самопроизвольной организации в разнообразные супрамолекулярные архитектуры, 3) свойством в зависимости от структуры претерпевать различные типы фотохимических превращений, 4) способностью к молекулярному фотопереключению с высокой эффективностью. Указанные характеристики дают возможность собирать в растворе, на границе раздела фаз и в твердой фазе фотопереключаемые супрамолекулярные устройства, фотоуправляемые супрамолекулярные машины, мультихромоморные супрамолекулярные системы с заданной архитектурой и разнообразными свойствами.

Следует обратить внимание на прикладной потенциал проведенных исследований, поскольку они дают новую методологию построения материалов для супрамолекулярной и нанофотоники, что было продемонстрировано, прежде всего, на примере создания фотопереключаемых супра-

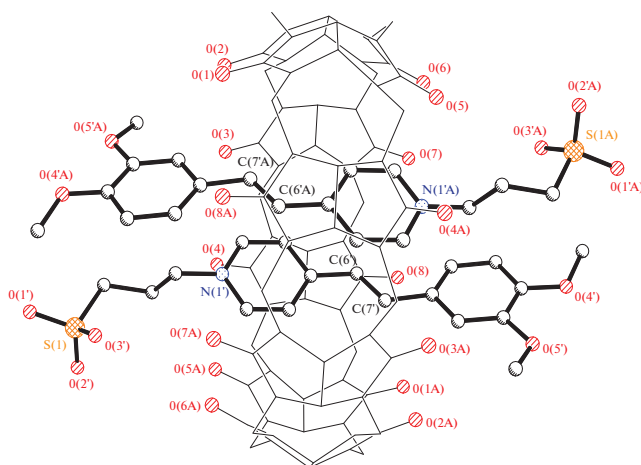


Рис. 4. Расположение двух молекул стирилового красителя в полости кукурбит[8]урилы в псевдоротационном комплексе включения.

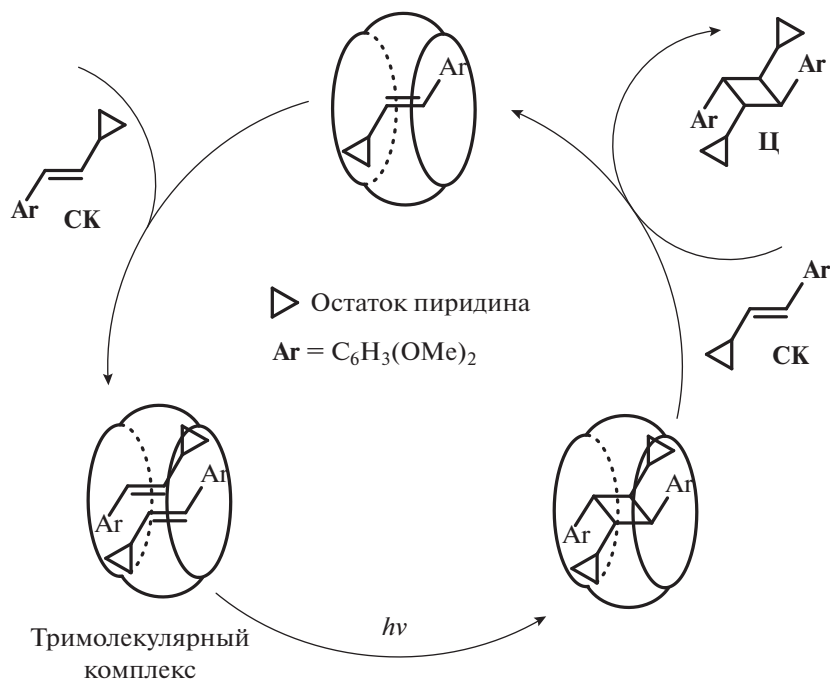


Рис. 5. Фотоуправляемый мультихромофорный супрамолекулярный ассемблер на основе кукурбит[8]урилы для сборки производных циклобутана из стироловых красителей.

молекулярных устройств, фотоуправляемых супрамолекулярных машин, супрамолекулярных переключателей, оптических хемосенсорных материалов, сред для оптической записи и хранения информации [8, 20].

Результаты представленные в обзоре были получены главным образом в Центре фотохимии РАН. В то же время в этих исследованиях приняло участие целый ряд Российских научно-исследовательских организаций и университетов Великобритании, Германии, США, Швеции и Италии.

Исследования проводились при финансовой поддержке Российского научного фонда, Министерства образования и науки РФ, РФФИ, Российской академии наук, Московского правительства, фондов Royal Society, INTAS, CRDF, DFG и фонда Сороса.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают также глубокую признательность за присуждение им в 2018 г. Государственной премии РФ по науке и технологиям за разработку фотоактивных супрамолекулярных устройств и машин.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Обзор подготовлен при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ “Кристаллография и фотоника” РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лен Ж.-М. Супрамолекулярная химия. Концепции и перспективы. Новосибирск: Наука, 1998. 334 с.
2. Брень В.А. // Успехи химии. 2001. Т. 70. № 12. С. 1152.
3. Минкин В.И. // Изв. АН. Сер. хим. 2008. Т. 57. № 4. С. 673.
4. Будыка М.Ф. // Изв. АН. Сер. хим. 2014. Т. 63. № 8. Р. 1656.
5. Мартынов А.Г., Сафонова Е.А., Тсivadze А.Ю., Горбунова Ю.Г. // Coordination Chem. Rev. 2019. V. 387. Р. 325.
6. Минкин В.И. // Успехи химии. 2013. Т. 82. № 1. С. 1.
7. Химия комплексов “гость-хозяин”. Синтез, структуры и применения. / Под ред. Фёггле Ф., Вебер Э. М.: Мир, 1988. 511 с.
8. Громов С.П. // Изв. АН. Сер. хим. 2008. Т. 57. № 7. С. 1299.
9. Герасько О.А., Коваленко Е.А., Федин В.П. // Успехи химии. 2016. Т. 85. № 8. С. 795.
10. Громов С.П., Алфимов М.В. // Изв. РАН. Сер. хим. 1997. Т. 46. № 4. С. 641.
11. Ушаков Е.Н., Алфимов М.В., Громов С.П. // Успехи химии. 2008. Т. 77. № 1. С. 39.
12. Alfimov M.V., Fedorova O.A., Gromov S.P. // J. Photochem. Photobiol., A. 2003. V. 158. P. 183.
13. Громов С.П., Федорова О.А., Ушаков Е.Н., Станиславский О.Б., Леднев И.К., Алфимов М.В. // ДАН СССР. 1991. Т. 317. № 5. С. 1134.
14. Громов С.П., Федорова О.А., Ушаков Е.Н., Станиславский О.Б., Алфимов М.В. // ДАН СССР. 1991. Т. 321. № 1. С. 104.
15. Громов С.П., Ушаков Е.Н., Федорова О.А., Солдатенкова В.А., Алфимов М.В. // Изв. АН. Сер. хим. 1997. Т. 46. № 6. С. 1192.
16. Громов С.П. // Обзорный журн. по химии. 2011. Т. 1. № 1. С. 3.
17. Алфимов М.В., Громов С.П., Станиславский О.Б., Ушаков Е.Н., Федорова О.А. // Изв. РАН. Сер. хим. 1993. Т. 42. № 8. С. 1449.
18. Громов С.П., Федорова О.А., Ушаков Е.Н., Бувевич А.В., Алфимов М.В. // Изв. РАН. Сер. хим. 1995. Т. 44. № 11. С. 2225.
19. Ushakov E.N., Gromov S.P., Buevich A.V., Baskin I.I., Fedorova O.A., Vedernikov A.I., Alfimov M.V., Eliasson B., Edlund U. // J. Chem. Soc., Perkin Trans. 2. 1999. № 3. P. 601.
20. Ушаков Е.Н., Громов С.П. // Успехи химии. 2015. Т. 84. № 8. С. 787.
21. Gromov S.P., Vedernikov A.I., Lobova N.A., Kuz'mina L.G., Basok S.S., Strelenko Y.A., Alfimov M.V., Howard J.A.K. // New J. Chem. 2011 V. 35. P. 724.
22. Громов С.П., Сергеев С.А., Дружинин С.И., Русалов М.В., Ужинов Б.М., Кузьмина Л.Г., Чураков А.В., Ховард Дж.А.К., Алфимов М.В. // Изв. АН. Сер. хим. 1999. Т. 48. № 3. С. 530.
23. Русалов М.В., Ужинов Б.М., Алфимов М.В., Громов С.П. // Успехи химии. 2010. Т. 79. № 12. С. 1193.
24. Ushakov E.N., Vedernikov A.I., Alfimov M.V., Gromov S.P. // Photochem. Photobiol. Sci. 2011. V. 10. № 1. P. 15.
25. Vedernikov A.I., Kondratuk D.V., Lobova N.A., Valova T.M., Barachevsky V.A., Alfimov M.V., Gromov S.P. // Mendeleev Commun. 2007. V. 17. № 5. P. 264.
26. Gromov S.P., Vedernikov A.I., Lobova N.A., Kuz'mina L.G., Dmitrieva S.N., Strelenko Yu.A., Howard J.A.K. // J. Org. Chem. 2014. V. 79. № 23. P. 11416.
27. Ushakov E.N., Vedernikov A.I., Lobova N.A., Dmitrieva S.N., Kuz'mina L.G., Moiseeva A.A., Howard J.A.K., Alfimov M.V., Gromov S.P. // J. Phys. Chem. A. 2015. V. 119. № 52. P. 13025.
28. Gromov S.P., Nazarov V.B., Avakyan V.G., Fomina M.V., Vedernikov A.I., Kuz'mina L.G., Vershinnikova T.G., Lobova N.A., Rudyak V.Yu., Alfimov M.V., Howard J.A.K. // J. Photochem. Photobiol. A. 2011. V. 217. P. 87.
29. Ivanov D.A., Petrov N.Kh., Nikitina E.A., Basilevsky M.V., Vedernikov A.V., Gromov S.P., Alfimov M.V. // J. Phys. Chem. A. 2011. V. 115. № 17. P. 4505.

30. *Petrov N.Kh., Ivanov D.A., Shandarov Yu.A., Kryukov I.V., Ivanov A.A., Alfimov M.V., Lobova N.A., Gromov S.P.* // Chem. Phys. Lett. 2016. V. 647. P. 157.
31. *Kuz'mina L.G., Vedernikov A.I., Lobova N.A., Howard J.A.K., Strelenko Y.A., Fedin V.P., Alfimov M.V., Gromov S.P.* // New J. Chem. 2006. V. 30. № 3. P. 458.
32. *Gromov S.P., Vedernikov A.I., Kuz'mina L.G., Kondratuk D.V., Sazonov S.K., Strelenko Y.A., Alfimov M.V., Howard J.A.K.* // Eur. J. Org. Chem. 2010. № 13. P. 2587.
33. *Kuz'mina L.G., Vedernikov A.I., Lobova N.A., Churakov A.V., Howard J.A.K., Alfimov M.V., Gromov S.P.* // New J. Chem. 2007. V. 31. № 5. P. 980.
34. *Chibisov A.K., Shvedov S.V., Goerner H.J.* // J. Photochem. Photobiol. A. 2001. V. 141. № 1. P. 39.
35. *Chibisov A.K., Zakharova G.V.* // Photochem. Photobiol. Sci. 2012. V. 11. № 6. P. 893.