

Прежде всего это связано с завышением относительной интенсивности полос поглощения в области валентных колебаний СН-связей в О-алкильном и алкилфторфосфонатном фрагментах молекулы ($2700\text{--}3100\text{см}^{-1}$) в расчетных спектрах. Кроме того, необходимо отметить несколько более низкое разрешение пиков в расчетных ИК спектрах, что связано с завышенной шириной спектральных полос, принятой при построении расчетных спектров, что также могло повлиять на общие результаты интерпретации. Эти трудности, однако, успешно преодолеваются при использовании алгоритма Absolute Value.

Заключение

Предложен подход к интерпретации экспериментальных ИК спектров высокотоксичных соединений структурного типа О-алкил-алкилфторфосфонатов, основанный на использовании библиотеки расчетных спектров в качестве банка данных информационно-поисковой системы. Данный подход обеспечивает возможность достоверного получения спектральных характеристик. Расчет спектров осуществляется путем фрагментарных вычислений неэмпирическими квантовохимическими методами. Использование сформированных таким образом банков ИК спектров при проведении химико-аналитического контроля позволяет решить задачу достоверной идентификации токсичных соединений.

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 04-03-08074.

ЛИТЕРАТУРА

1. Конвенция о запрещении разработки, производства, накопления и применения химического оружия и о его уничтожении. GE.92-619266, Париж, 1993 г.
2. Франке З. Химия отравляющих веществ. Том 1. М.: Химия, 1973, 437 с.
3. Guelachvili G., Rao K.N. Handbook of Infrared Standards. London: Academic Press Inc., 1986, 852 p.
4. Dolphin D., Wich A. Tabulation of Infrared Spectral Data. New-York: Wiley & Sons, 1977, 549 p.
5. Socrates G. Infrared Characteristic Group Frequencies. Tables and Charts. New-York: Wiley & Sons. 1994, 59 p.
6. Вершинин В.И., Дерендяев Б.Г., Лебедев К.С. Компьютерная идентификация органических соединений. М.: Наука, 2002.
7. Heller S.R. Chem. Int., 1985, v. 13, № 6, p. 224–231.
8. Эляшберг М.Е. Успехи химии, 1999, т. 69, № 7, с. 579–604.
9. Грибов Л.А., Дементьев В.А. Методы и алгоритмы вычислений в теории колебательных спектров молекул. М.: Наука, 1981, 356 с.
10. Грибов Л.А., Дементьев В.А., Тодоровский А.Т. Интерпретированные колебательные спектры алканов, алкенов и производных бензола. М.: Наука, 1986, 496 с.
11. Мясоедов Б.Ф., Грибов Л.А., Павлючко А.И., Рыбальченко И.В. и др. Фрагментарные методы расчета ИК спектров фосфорорганических соединений. Ж. структ. химии (в печати).
12. OPCW Central Analytical Database, PDF-OCAD v. 8, e-OCAD v. 6, Technical Secretariat of the Organisation for the Prohibition of Chemical Weapons, December 2004.
13. Recommended operating procedures for sampling and analysis in the verification of chemical disarmament. 1994 Edition. Ed. Marjatta Rautio. ISBN 951-724-008-2 Helsinki, 1994.
14. Benecke C., Grund R., Kerber A., Laue R., Wieland T. J. Chem. Inf. Comput. Sci., 1995, v. 72, p. 404.
15. Molodtsov S.G. Commun. Math. Chem. (MATCH), 1998, v. 37, p. 157.
16. Grams 386. Operation Manual. Hewlett Packard. 1994, 365 p.

УДК 772.10

Органические регистрирующие среды для новых информационных фототехнологий

В. А. Барачевский, А. А. Флегонтов, Г. И. Сигейкин

ВАЛЕРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ БАРАЧЕВСКИЙ — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Центра фотохимии РАН. Область научных интересов: фундаментальная и прикладная фотохимия, светочувствительные регистрирующие среды, фотохромизм. Тел. (495)936-72-92, E-mail barva@photonics.ru

АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ ФЛЕГОНТОВ — старший научный сотрудник Межведомственного центра аналитических исследований в области физики, химии и биологии при Президиуме РАН (МЦАИ РАН). Область научных интересов: теоретические и прикладные проблемы светочувствительных регистрирующих сред. Тел. (495)135-89-19, E-mail mzairan@ipiran.ru

ГЕННАДИЙ ИВАНОВИЧ СИГЕЙКИН — доктор химических наук, директор МЦАИ РАН. Область научных интересов: процессы регистрации информации на основе органических сред. Тел. (495)135-20-58, E-mail mzairan@ipiran.ru

119421 Москва, ул. Новаторов, д. 7а, Центр фотохимии РАН.

Введение

В настоящее время в области прикладной фотохимии усиленное внимание уделяется разработке реги-

стрирующих сред для устройств оптической записи и считывания информации [1]. Это обусловлено необходимостью снижения габаритов и повышения информационной емкости носителей данных, регистрации,

обработки и отображения информации в режиме реального времени. Особые требования предъявляются к оптическим запоминающим устройствам, работающим в экстремальных условиях, например в полевых условиях при проведении чрезвычайных мероприятий, в составе космического оборудования.

В данной статье представлен обзор последних достижений в области разработки органических светочувствительных регистрирующих сред для многослойных оптических дисков, обеспечивающих создание трехмерной оптической памяти сверхвысокой информационной емкости, а также рассмотрены термопроявляемые светочувствительные материалы для вывода оптической информации из устройств оптической памяти на твердый носитель.

Светочувствительные регистрирующие среды для оптических дисков

Прогресс информационных технологий в значительной мере связан с существенным повышением информационной емкости носителей данных и скорости их обработки. Хорошо известные для записи и воспроизведения информации оптические диски обеспечивают хранение только 10% информации. Для хранения основного объема информации используются магнитные ленты и диски. Однако предельная плотность записи информации на этих носителях ограничивается значением 25 Гбит/см² [2]. Она может быть увеличена до 40 Гбит/см² при использовании технологии вертикальной записи [3]. В этом случае информационная емкость магнитных дисков может возрасти до 20 Гбайт, а скорость обработки данных может составлять 1 Гбайт/с.

Более высокая плотность записи информации достигается на оптических дисках, поскольку используемое в них лазерное излучение может быть сфокусировано в пятно диаметром менее 1 мкм. В принципе плотность записи ограничивается только дифракцией света. Поверхностная плотность записи может достигать $1/\lambda^2$, где λ — длина волны записывающего излучения. В настоящее время наиболее широкое применение находят однослойные оптические диски типа компакт-дисков, изготовление которых основано на применении фоторезистов. Компакт-диски обеспечивают многократное считывание записанной в студии информации. В практике записи информации используются также оптические диски, осуществляющие однократную запись и считывание информации в компьютере (WORM ОД). Запись информации обеспечивается термоиндуцированными процессами абляции или фототрансформации вакуум-напыленных слоев металлов или органических соединений при воздействии лазерного импульса. Такие оптические диски пригодны для побитовой оптической памяти архивного типа. В меньшей степени используются оптические диски, обеспечивающие многократные фотоиндуцированные процессы записи-стирания-считывания оптической информации (WERM ОД) за счет термоиндуцированного перемагничивания доменов в магнитооптических дисках или фазового превращения сплавов металлов.

Повышение информационной емкости оптических дисков было достигнуто при использовании второй поверхности (DVD ОД). Дальнейшего увеличения

информационной емкости этих носителей данных удалось добиться путем замены активирующего полупроводникового лазера, излучающего свет при 650 нм, на УФ лазер (405 нм) и применением записывающего устройства с числовой апертурой 0,85 [4]. В этом случае плотность записи увеличивается до 2,5 Гбит/см² [5]. Кроме того, для повышения поверхностной информационной емкости до 10^2 – 10^3 Гбит/см² возможно использование микроскопов и технологии микроскопии ближнего поля [6]. Применение матриц кремниевых наконечников позволяет получать однослойные оптические диски с информационной емкостью до 112 Гбайт [7].

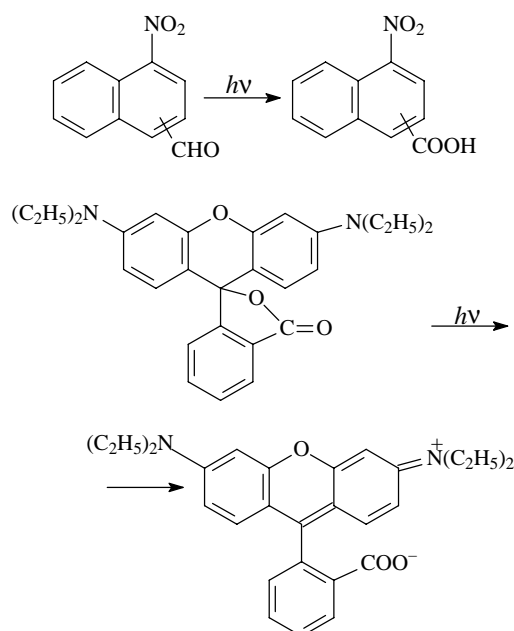
Дальнейшие перспективы увеличения информационной емкости оптических дисков до более 10 Тбит/см³ связывают с разработкой многослойных (более 10 слоев) дисков или голографических оптических устройств, обеспечивающих создание трехмерной (3D) оптической памяти [1].

Органические регистрирующие среды для побитовой записи информации

Обнаружение явления двухфотонного фотохромизма [8] и последующая разработка принципов создания двухфотонной 3D оперативной оптической памяти [9] инициировали исследования по изысканию регистрирующих сред для трехмерной WORM и WERM оптической памяти. Наибольшие усилия были направлены на создание светочувствительных материалов с флуоресцентным методом считывания оптической информации [10].

Необратимые светочувствительные регистрирующие среды

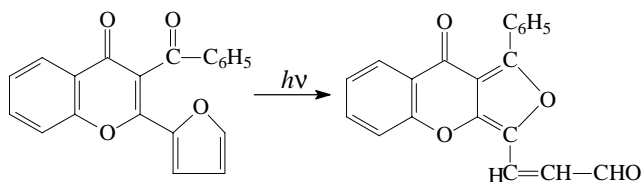
Первоначально для архивной WORM оптической памяти были предложены среды, функционирующие на основе необратимой фотохимической реакции образования 1-нитронафталинкарбоновой кислоты из 1-нитронафталяльдегида и фотохимического преобразования бесцветного лактона в интенсивно флуоресцирующий краситель родамин В [11, 12]:



Ведутся работы по совершенствованию сред этого типа [13–16]. Показано, что люминесцентное считывание оптической информации может быть осуществлено с помощью лазерного излучения с $\lambda = 532$ нм и плотностью энергии излучения менее 4 мДж/см². Записанная информация не изменяется после 10^6 циклов считывания. Запись и считывание данных страницами (отдельный массив, содержащий несколько Мбит информации) обеспечивают высокую скорость обработки оптической информации.

В основе действия светочувствительных регистрирующих сред могут лежать и другие необратимые фотохимические реакции, в частности фотодиссоциация азидов, фотоиндуцированное взаимодействие диариламинов и тетрабромметана или диариламина и галогенсодержащего акридина [17], а также процессы фотосшивки олигомеров [18].

Для создания фотолюминесцирующих сред использовались также процессы необратимого фотохимического превращения 3-бензоил-2-(2'-фурил)-хромона в полимерном связующем [17]:



На рис. 1 представлены спектральные характеристики этого соединения и продукта его фотохимического превращения.

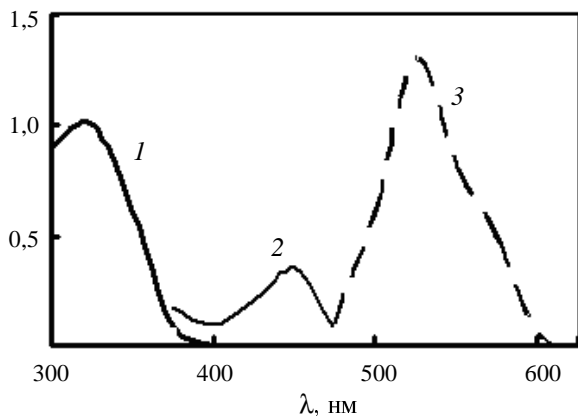
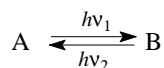


Рис. 1. Спектры поглощения (1, 2) и люминесценции (3) для исходной (1) и фотоиндуцированной (2, 3) форм 3-бензоил-2-(2'-фурил)-хромона в полимерном связующем

Фотохромные регистрирующие среды

Светочувствительными регистрирующими средами могут служить системы, склонные к фотохромным превращениям — обратимым фотофизическим или фотохимическим процессам взаимного перехода между двумя термически стабильными состояниями А и В, сопровождающимся изменением окраски и других свойств реакционной системы:



К фотохромным соединениям, используемым в трехмерной оперативной оптической памяти, предъявляются следующие основные требования [19]:

- большое сечение двухфотонного поглощения;
- высокая эффективность фотохимических превращений;
- термическая стабильность форм А и В;
- высокая устойчивость обеих форм к необратимым фотопревращениям;
- неструктурное и эффективное считывание регистрируемой оптической информации одним из методов (флуоресцентным, рефрактивным, отражательным, поляризационным).

Для разработки первых фотохромных регистрирующих сред для трехмерной оптической памяти были использованы спиропираны, способные подвергаться фотоизомеризации с изменением окраски [18, 20, 21]. Эти среды обеспечивают флуоресцентное считывание оптической информации. Однако они имеют тот недостаток, что их фотоиндуцированная форма В термически нестабильна и число циклов их фотохромных превращений ограничено. Тем не менее на основе этих фотохромных материалов были разработаны устройства трехмерной оптической памяти [20–28]. Недавно в качестве фотохромных регистрирующих сред предложено использовать термически стабильные спирооксазины, отличающиеся от спиропиранов высокой цикличностью фотохромных превращений [29].

Созданы также термически необратимые фотохромные регистрирующие среды на основе обратной фотодимеризации производных антрацена [30–33]:

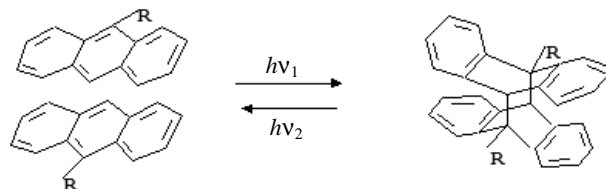


Рис. 2 иллюстрирует фотоиндуцированные спектральные изменения одного из производных антрацена в растворе.

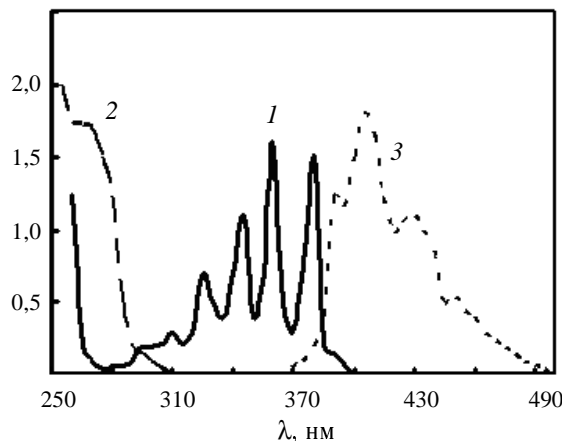


Рис. 2. Спектры поглощения (1, 2) и флуоресценции (3) мономера (1, 2) и фотоиндуцированного димера (3) антрацена в бензоле

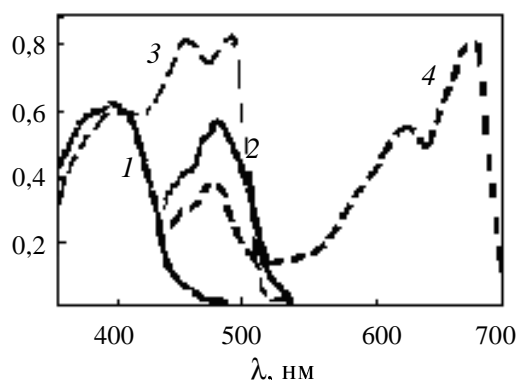
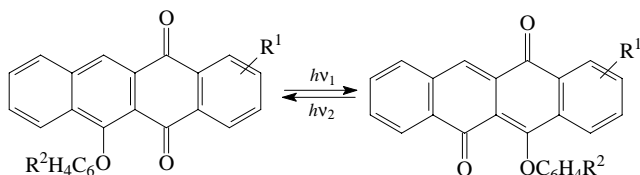


Рис. 3. Спектры поглощения *para*- (1) и *meta*- (3) форм феноксипроизводных фталоилпирена и *para*- (2) и *meta*- (4) форм фталоилпирена

Для той же цели предложено использовать фотохромные соединения из класса тиоиндигоидных красителей [34], термическая стабильность фотоиндуцированной формы которых зависит от температуры стеклования используемого полимерного связующего.

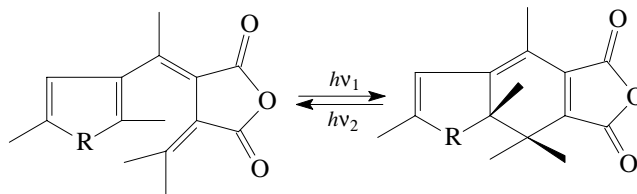
К числу термически необратимых фотохромных систем относятся феноксипроизводные ряда хинонов, в частности феноксиафтаценхиноны, испытывающие *para*-*meta*-хиноидные фотопревращения с резким изменением спектральных характеристик (рис. 3, кривые 1, 3) [35]:



Аналогичные фотопревращения наблюдаются для феноксипроизводных фталоилпиренов, которые, однако, характеризуются длинноволновым сдвигом полос поглощения исходной и фотоиндуцированной форм по сравнению с феноксиафтаценхиноном (рис.3, кривые 2, 4).

Несмотря на то, что эти соединения активно исследовались [36—43] как регистрирующие среды, они не вызвали существенного интереса, возможно, из-за отсутствия фотоиндуцированных флуоресцентных изменений (как известно, флуоресцентный метод считывания информации является более чувствительным, чем абсорбционный). Однако ситуация может измениться в связи с тем, что разработаны нефлуоресцирующие среды на основе тех же фотохромных соединений с фотоиндуцированным изменением показателя преломления, и этот эффект уже используется для считывания оптической информации. Такой способ, в отличие от флуоресцентного метода считывания, обеспечивает неdestructивное воспроизведение оптической информации.

Большинство исследований по разработке фотохромных регистрирующих сред ориентировано на термически необратимые диарилэтены [44], испытывающие обратимую фотоиндуцированную валентную изомеризацию (см. схему внизу). Такому же превращению подвержены и фульгиды [45]:

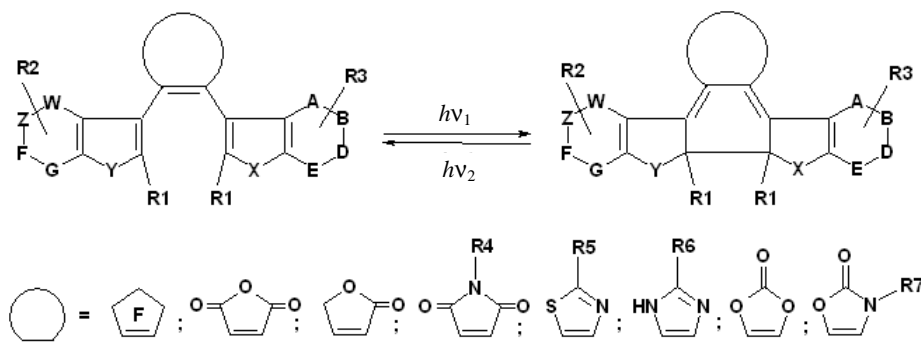


Сравнительное спектрально-кинетическое исследование фотохромных превращений ряда синтезированных тиенилсодержащих диарилэтеней [46—49] позволило установить зависимость этих характеристик, в частности спектров поглощения фотоиндуцированной формы, от строения пятичленных циклических фрагментов (рис. 4). Полученные данные свидетельствуют о возможности реализации не только трехмерной, но и четырехмерной регистрации оптической информации, которая обеспечивается как в произвольно выбранном элементе объема регистрирующей среды под действием лазерного излучения одной частоты, так и в одном и том же элементе путем изменения частоты записывающего излучения. Соединения, проявляющие в фотоиндуцированной циклической форме коротковолновое поглощение, могут быть использованы для однофотонной регистрации коротковолновым лазерным излучением [50, 51].

Показано, что диарилэтены проявляют фотохромные свойства в полимерных связующих [52—54], в аморфном [55—58] и кристаллическом состояниях [59—62]. Особое внимание уделяется фотохромным полимерам на основе диарилэтеней с высоким содержанием фотохромных фрагментов [63].

Под действием света обратимо изменяются не только спектры поглощения диарилэтеней, но и другие их свойства, в частности интенсивность флуоресценции, показатель преломления, молекулярная поляризуемость, электропроводность и магнитные свойства [64]. Эти свойства также могут быть использованы для считывания оптической информации [65].

Как отмечено выше, флуоресцентный метод считывания наиболее приемлем для получения высокой светочувствительности фотохромных фотофлуоресцентных регистрирующих сред [44], но в случае диарилэтеней квантовый выход флуоресценции обычно незначителен. Он может быть увеличен путем измене-



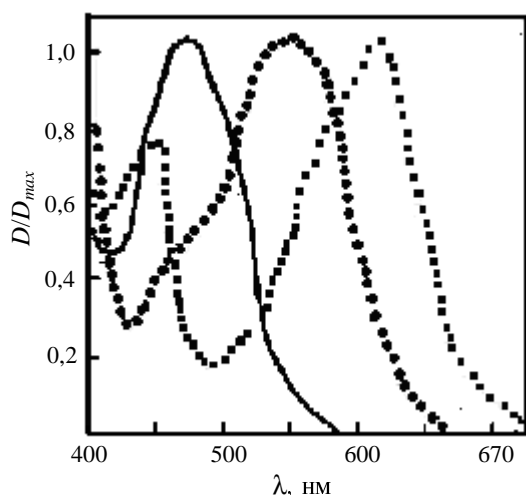


Рис. 4. Спектры поглощения циклических форм диарил-этенев различной структуры в толуоле

ния структуры молекул [66–70]. Однако, как и при использовании других фотофлуоресцирующих фотохромных материалов, возбуждение флуоресценции приводит к разрушению оптической информации. С целью исключения этого недостатка был синтезирован ряд гибридных фотохромных соединений из класса диарилэтенев, функционирование которых обеспечивает неструктивное считывание оптической информации [71–73]. Таким же качеством обладает предложенный бислойный фотохромно-флуоресцирующий материал.

Разработаны также методы неструктивного считывания информации на основе измерения фотоиндуцированного изменения показателя преломления [44, 75, 76], интенсивности ИК полос поглощения [44, 77–79], электропроводности [80–86], оптического эффекта Керра [87, 88] и оптического вращения [89, 90].

Среди фульгидов наибольший интерес представляют индольные производные, обладающие превосходными фотофлуоресцентными свойствами [91–97]. Для них также разработан неструктивный флуоресцентный метод считывания оптической информации с использованием гибридных фотохромных соединений

[98–101]. В качестве фотохромных регистрирующих сред предложены также пирролазамещенные фульгиды [102, 103].

Органические регистрирующие среды для голографической записи информации

Альтернативным двухфотонному способу функционирования 3D носителей данных является голографический метод записи информации в объемной светочувствительной среде [104, 105]. Этот метод позволяет записывать голограммы в толще среды до 5 мм («глубокие» голограммы) и благодаря этому считывать оптическую информацию с большого количества голограмм, зарегистрированных на одном и том же участке светочувствительной среды под различными углами [106]. Голографический способ оптической записи информации отличается высокой светочувствительностью и практически приемлемым динамическим диапазоном среды.

Фотополимеризующиеся регистрирующие среды

Наиболее подходящими и перспективными для создания голографических оптических дисков сверхвысокой информационной емкости являются светочувствительные среды, функционирование которых основано на процессах полимеризации органических соединений под действием света [106]. Такие среды называют фотополимеризующимися или фотополимерными материалами. Они относятся к числу самопроявляющихся сред, обеспечивающих регистрацию и одновременно считывание голограмм в режиме реального времени, что определяет их пригодность для создания устройств оптической памяти.

В разработанных образцах оптических устройств записи информации были зарегистрированы голограммы с дифракционной эффективностью, характеризующей яркость восстановленного изображения, до 70% при плотности активирующего излучения $E = 50$ мДж/см² (рис.5а) с высокой угловой селективностью (рис. 5б) [107].

Для упрощения процесса регистрации «глубоких» голограмм в толстой фотополимеризующейся среде предложено использовать в качестве фотосенсибилизаторов рассмотренные выше термически необратимые фотохромные соединения из классов диарилэтенев и хинонов, а также спиропираны, обесцвечивающиеся

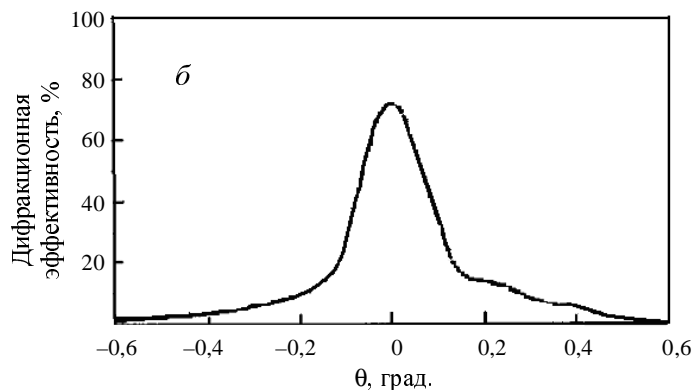
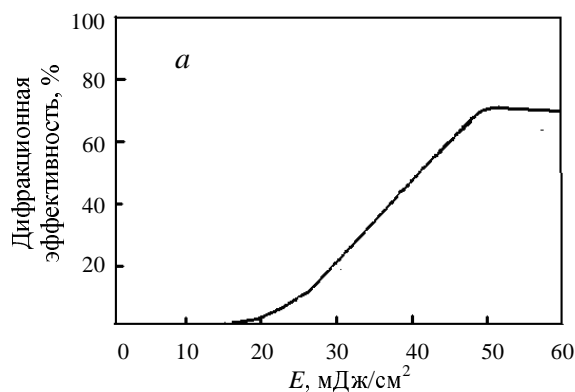


Рис. 5. Характеристическая кривая (а) и угловая чувствительность (б) фотополимеризующегося материала на основе поливинилового спирта и акриламида толщиной 0,8 мм

под действием лазерного излучения [108]. Такие комбинированные среды характеризуются высокой угловой чувствительностью, допускающей регистрацию и восстановление более 100 голограмм на одном и том же участке слоя, и, следовательно, обеспечивают высокую информационную емкость оптических дисков. Кроме того, немаловажна простота процесса десенсибилизации светочувствительного слоя (устранения чувствительности к лазерному излучению) после формирования массива информации в оптических дисках.

Согласно данным [109], в исследованиях, проведенных в последние пять лет в области фотополимеризующихся регистрирующих голографических сред, удовлетворяющих условиям применения в устройствах архивной оптической памяти, основной упор делается на совершенствование их компонентного состава. Созданы композиции для термически стабильной голографической регистрации, допускающие совместную радикальную и катионную фотополимеризацию. Достигнутые голографические характеристики этих сред открывают возможность создания однослойных оптических дисков диаметром 150 мм с информационной емкостью 200 Гбайт вместо 5 Гбайт для современных оптических дисков. Среда с такими свойствами пригодны для коммерческой реализации голографической архивной оптической памяти на оптических дисках со сверхвысокой информационной емкостью [110, 111].

Дальнейшие работы по совершенствованию фотополимеризующихся голографических регистрирующих сред в направлении повышения информационной емкости, светочувствительности, угловой селективности, снижения шумовых характеристик имеют целью создание оптических дисков с информационной емкостью более 1 Тбит/см³.

Фотоанизотропные регистрирующие среды

Голографический метод регистрации оптической информации может быть использован и для создания WERM оптических дисков, обеспечивающих многократные операции записи, стирания и считывания информации [112]. В основе действия таких оптических дисков лежит явление фотоиндуцированной анизотропии преломления (двойного лучепреломления) в полимерных светочувствительных слоях [113, 114].

Применение в реверсивной голографической памяти фотоанизотропных сред, в частности пленок из поливинилового спирта и фотохромных азокрасителей [115], в принципе позволяет увеличить вдвое число голограмм, регистрируемых на одном и том же участке светочувствительного слоя с одной и той же пространственной частотой, по сравнению с другими светочувствительными материалами, функционирующими за счет изменения поляризации записываемого излучения. Преимуществами фотоанизотропных материалов являются также применение только одного лазерного излучения с перпендикулярной поляризацией для записи и стирания голограмм, а также неdestructивное считывание информации вне полосы поглощения. Для поляризационных голограмм, зарегистрированных в слоях на основе азокрасителя и полиметилметакрилата, дифракционная эффективность достигала 35% [116].

С целью улучшения оптических характеристик регистрируемых голограмм молекулы азокрасителей

прививали как боковые гибкие фрагменты к полимерным цепям жидкокристаллических полиэфиров [117—119] и олигопептидов [120]. Оказалось, что такое модифицирование приводит к повышению дифракционной эффективности регистрируемых голограмм при увеличении размеров олигомера и к ее уменьшению с ростом числа метиленовых групп в полимерной цепи. В таких средах возрастает длительность хранения голограмм (до одного года) за счет агрегации молекул фотоиндуцированной формы [121] при сохранении высокой цикличности перезаписи голограмм (более 10⁴ актов) [120, 121]. В случае фотохромных олигопептидов голограммы с дифракционной эффективностью 76% записывались линейно-поляризованным излучением Ar лазера ($\lambda = 488$ нм, плотность лучистого потока $I = 2$ Вт/см²), а считывались циркулярно-поляризованным светом He-Ne лазера ($\lambda = 632,8$ нм, $I = 4,2$ мВт/см²). Стирание голограмм осуществлялось либо путем нагревания, либо облучением лазерным УФ светом ($\lambda = 351$ нм). Оказалось возможным также стирание голограмм циркулярно-поляризованным лазерным излучением [120].

Основные трудности внедрения таких реверсивных регистрирующих сред связаны с отсутствием приемлемого дизайна устройств записи и перезаписи голограмм на оптических дисках непосредственно в персональном компьютере.

Органические термоявляемые регистрирующие среды для устройств вывода информации на твердый носитель

Дальнейшее развитие информационных технологий требует новых технических решений, обеспечивающих отображение информации в режиме реального времени с использованием компактной, простой в эксплуатации и недорогой аппаратуры. Особое значение приобретает оперативный вывод оптической информации в режиме реального времени, что особенно актуально для работы в полевых условиях.

Современные средства электрофотографической и струйной информационной техники, широко используемые для вывода информации из вычислительных устройств, нельзя признать перспективными в силу их конструкционной сложности, больших габаритов и специальных требований, предъявляемых к их эксплуатации. В будущих устройствах этого типа должны использоваться малогабаритные полупроводниковые лазеры и интегрально-оптические схемы. Для реализации таких устройств требуются новые регистрирующие среды с высокой светочувствительностью и сухие методы усиления первичного изображения. При этом следует иметь в виду, что оптическая запись должна быть основана на бесконтактных процессах регистрации информации, когда носитель данных не подвергается механическому воздействию. Применение таких методов регистрации информации обеспечивает значительно более улучшенные параметры выходных устройств: высокую скорость вывода информации из вычислительных устройств и высокое качество получаемого изображения. Именно бесконтактные процессы регистрации нашли наиболее широкое применение в устройствах вывода информации из персональных компьютеров.

Для решения задачи оперативного получения информации несомненный интерес представляют высокочувствительные среды, функционирование которых основано не на фотоиндуцированных термических процессах, а на фотохимических реакциях, принципиально позволяющих повысить разрешающую способность регистрирующих сред и скорость записи информации. Применение фотохимических регистрирующих сред с сухим, в частности термическим проявлением изображения в информационной технологии, открывает возможности создания конструктивно простых оптических устройств, неприхотливых в эксплуатации. Особый интерес представляют системы, в которых оптическая плотность изображения достигается за счет увеличения концентрации продукта фотохимических реакций в процессе усиления первоначального изображения.

Усиление первоначального изображения (увеличение выхода продукта фотохимической реакции) в таких системах достигается за счет использования дополнительной энергии, которая либо выделяется при протекании реакции, либо подводится к системе от внешнего источника. Принципиальная возможность создания систем первого типа экспериментально доказана осуществлением цепных фотохимических реакций, как правило, с участием радикалов, эффективно протекающих в жидкой, но не в твердой, например, в полимерной среде. Осуществление реакций в светочувствительных полимерных слоях сопряжено со значительными трудностями, связанными с ограниченной диффузией реагентов и обрывом цепей в полимерной матрице.

Наиболее перспективными для практического использования представляются системы второго или смешанного типов, в которых концентрация продукта фотореакции, несущего полезную информацию, увеличивается под действием света, тепла, электрического поля и других внешних факторов. К их числу относятся светочувствительные системы, в которых могут осуществляться оптическая автосенсибилизация, фотокаталитическое окисление органических соединений, электроиндуцированное усиление ионизации органических соединений, а также полимеризация мономеров, олигомеров и др. По величине светочувствительности такие системы в принципе приближаются к высокоразрешающим галогенидосеребряным фотоматериалам и несеребряным регистрирующим средам типа электрофотографических слоев и фототермопластических носителей информации, а также фотографических галогенидосеребряных систем с мокрым физическим проявлением.

К числу высокочувствительных термопроявляемых регистрирующих сред относятся слои на основе галогенидов и карбоксилатов серебра (так называемые системы типа «сухое серебро»), их светочувствительность составляет 10^4 – 10^6 см²/Дж [122]. Такие материалы находят все более возрастающее применение в медицинском диагностическом оборудовании [123]. Аналогами этого по существу неорганического светочувствительного материала являются термопроявляемые несеребряные органические регистрирующие среды на основе комплексов с переносом заряда (КПЗ) и металлоорганических светочувствительных веществ.

Светочувствительные среды на основе КПЗ

Интерес к этим системам обусловлен их потенциально высокой светочувствительностью и возможностью создания разнообразных регистрирующих сред с использованием различных компонент [124]. Результаты изыскания таких систем неоднократно анализировались в обзорах (см. например [125, 126]).

В состав светочувствительных сред на основе КПЗ входит несколько компонент: два фотохимически активных реагента, специальные добавки, придающие системе требуемые фотографические и физикохимические свойства, и полимерное связующее. Донорно-акцепторное взаимодействие между фотохимически активными компонентами индуцирует фотофизические и фотохимические превращения и в конечном счете определяет фотографические характеристики регистрирующей среды.

Донорными компонентами могут служить цианиновые красители и их основания, лейкосоединения из классов ксантеновых, антрахиноновых, ди- и триарилметановых, стириловых красителей, а также амины, N-винилкарбазол и его полимеры, спиропираны, металлоорганические соединения. В качестве акцепторов используются соединения типа A-C-X₃, AX₃C-CX₃A (A = H, Cl, Br; X = Cl, Br), а также серосодержащие акцепторы типа ArSH, ArSSAr, галогензамещенные сульфоны, сульффонилгалогениды и др.

Центрами светочувствительности являются КПЗ, образующиеся между лейкокрасителем и галогенсодержащими соединениями (например CBr₄) в растворах или полимерных связующих при больших концентрациях исходных компонент. При фотоллизе светочувствительного комплекса под действием излучения с длиной волны, совпадающей с областью его поглощения (обычно $\lambda \leq 550$ нм), образуется небольшое количество молекул красителя, формирующих скрытое изображение и обеспечивающих локальную оптическую сенсбилизацию слоя, соответствующую длинноволновому излучению ($\lambda \geq 550$ нм). Скрытое изображение усиливается при равномерном облучении пленки светом, спектральный состав которого совпадает с полосой поглощения образовавшегося красителя. Коэффициент усиления может достигать 10^5 . В светочувствительных слоях на основе стириловых и винилиденных лейкокрасителей обнаружено не только оптическое, но и одновременно термическое усиление изображения [127]. Фиксация изображения в регистрирующих средах осуществляется нагреванием слоя до 120–170 °С. Время фиксации колеблется от нескольких секунд до нескольких минут в зависимости от состава среды и режимов ее тепловой обработки. При этом происходит термическое разложение КПЗ, удаление непрореагировавшего галогенпроизводного из слоя и, следовательно, дезактивация его светочувствительности.

Область спектральной чувствительности этих регистрирующих сред зависит от природы электронодонорных компонент (лейкокрасителей) КПЗ и может изменяться в пределах 300–600 нм (рис.6). Область оптического проявления регулируется путем введения в состав регистрирующей среды некоторых гетероциклических соединений, взаимодействующих с продуктами фотореакции с образованием соединений, характеризующихся собственными спектрами поглощения.

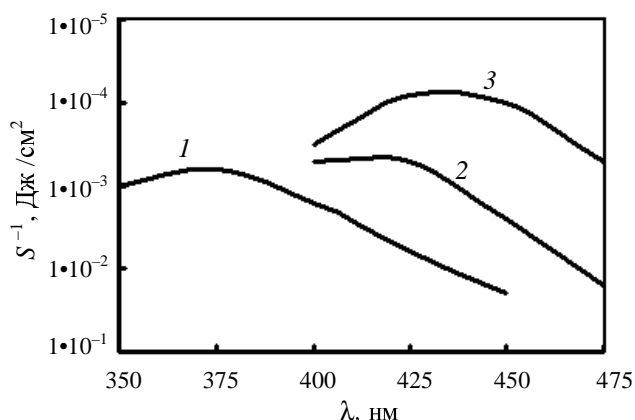


Рис. 6. Спектральная чувствительность S полимерных пленок на основе трифенилметанового (1), винилиденового (2) и стирлового (3) лейкокрасителей и $СВг_4$

На светочувствительность сред на основе КПЗ значительное влияние оказывает кислород, который ингибирует образование радикалов, тушащих свободнорадикальные реакции, и тем самым увеличивает индукционный период появления изображения. Экспериментально установлено, что повышение температуры при экспонировании слоя приводит к увеличению светочувствительности более, чем на порядок. С повышением температуры возрастает также чувствительность к проявляющему излучению. Светочувствительность таких систем может приближаться к $S = 10^5 \text{ см}^2/\text{Дж}$ (рис. 6).

В принципе разрешающая способность материалов на основе КПЗ высокая, так как светочувствительными центрами являются отдельные молекулы. Их концентрация в пленке обычно составляет $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ при среднем расстоянии между молекулами около 18 \AA , поэтому в слое практически отсутствует рассеяние света, а отношение сигнал/шум ограничивается только нелинейностями поглощения света. Разрешающая способность пленок достигает 2300 мм^{-1} .

Есть основания полагать, что высокочувствительные несеребряные слои на основе КПЗ при использовании сухих процессов проявления изображения (оптического и термического) по своей эффективности применения в средствах вывода информации в режиме реального времени значительно превосходят все известные самопроявляющиеся несеребряные регистрирующие среды. Имеющиеся недостатки (нестабильность свойств при хранении, определенная токсичность компонент, выделяющихся при фиксации, и др.) требуют существенной доработки технологии получения материалов и их эксплуатации.

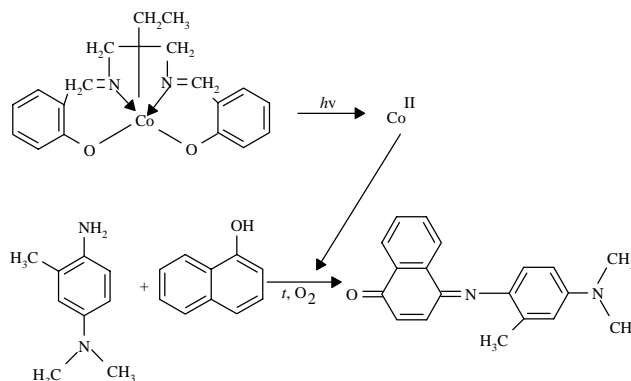
Светочувствительные регистрирующие системы с усилением на основе металлоорганических соединений

Как известно, многие координационные соединения претерпевают фотохимические превращения. В некоторых системах превращения развиваются под действием катализатора, образующегося в результате фотохимической реакции. Важно, что в таких процессах образование катализатора является единственной фотохимической стадией. Далее катализатор иници-

рует вторичные реакции, не требующие воздействия света, в светочувствительном регистрирующем слое. Таким образом, фотокаталитические системы обеспечивают функционирование светочувствительных сред с записью информации в режиме реального времени.

Примером таких регистрирующих сред могут служить светочувствительные полимерные слои на основе ферроцена и $СВг_4$ [124]. Область спектральной чувствительности, определяемая спектром поглощения КПЗ, составляет $350\text{--}550 \text{ нм}$. Выдерживание экспонированного слоя при $70\text{--}100 \text{ }^\circ\text{C}$ вызывает проявление изображения и одновременно его фиксацию. Проведение операции термического усиления для слоя поливинилацетата, содержащего ферроцен и $СВг_4$, позволяет достигать светочувствительности более чем $2 \cdot 10^3 \text{ см}^2/\text{Дж}$. Введение в слой дифенилбензиламина обеспечивает дальнейшее повышение светочувствительности при фотоактивации в спектральном диапазоне $350\text{--}410 \text{ нм}$.

Разработаны также регистрирующие среды, функционирующие за счет термического окисления органических соединений с участием фотоиндуцированного катализатора. Примером может служить система на основе кобальтсодержащего органического соединения, который при фотолизе дает продукты, обеспечивающие термическое каталитическое окисление органических соединений с образованием красителя [128, 129]:



Квантовый выход первичной фотохимической реакции достигает 0,7. Коэффициент усиления 100.

Регистрирующие среды этого типа, разработанные на основе марганецсодержащего органического соединения, характеризуются областью спектральной чувствительности в пределах $300\text{--}460 \text{ нм}$ [127]. В качестве окисляющих веществ используются пероксид водорода, пероксобораты, пероксосиликаты, пероксофосфаты, а также органические пероксиды, в частности бензоилпероксид. Продукты разложения этих или других пероксидных соединений способствуют окислению проявляющих веществ. В качестве цветообразующих могут использоваться производные фенола, нафтола, пиразолона-5, растворимые в полярных растворителях. Связующими могут служить полимеры, допускающие диффузию кислорода в слой, в частности полистирол, сополимер стирола с метилметакрилатом, а также фенолформальдегидная смола. Подложка светочувствительного слоя представляет собой слой бумаги с подслоем из поливинилового спирта или желатины.

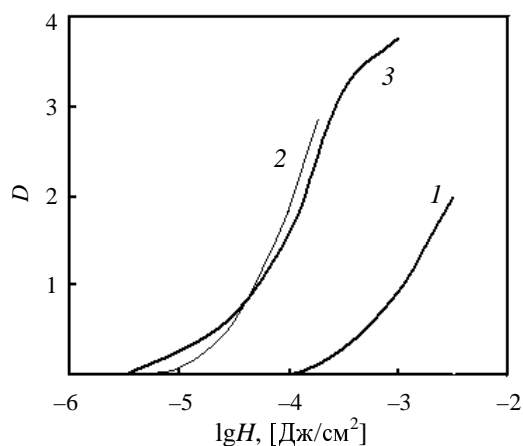


Рис. 7. Характеристические кривые для образцов ФОТМ-1 (3) и ФОТМ-2 (1, 2) при термическом (1) и активированном термическом (2, 3) проявлении.

H — экспозиция

Типичные характеристические кривые для разработанных нами образцов светочувствительных материалов ФОТМ-1 и ФОТМ-2 [127] приведены на рис. 7, из которого видно, что в зависимости от метода проявления величина светочувствительности (S^{-1}) может изменяться от $1,4 \cdot 10^4$ до $5 \cdot 10^5$ Дж/см² [130]. Динамический диапазон может превышать $\Delta D = 2,0$.

К важной эксплуатационной характеристике разработанных материалов относится темновая сохраняемость их до использования. В рассматриваемых материалах она обеспечивается тем, что применяемые цветообразующие компоненты являются сильными антиоксидантами, которые полностью подавляют окисление компонент светочувствительного слоя кислородом воздуха. При рулонном хранении материалов изображение не вуалируется в течение 6—12 месяцев.

Таким образом, фотокаталитические системы на основе металлоорганических соединений обеспечивают создание светочувствительных регистрирующих сред с термическим усилением первоначального изображения и получением его в режиме реального времени. В отличие от регистрирующих сред на основе светочувствительных комплексов с переносом заряда, в данных системах не может быть осуществлено смешанное оптическое и термическое проявление. Фотокаталитические системы только с термическим усилением изображения уступают по светочувствительности системам на основе КПЗ. Реально достигаемые величины светочувствительности не превышают 10^4 см²/Дж. Однако фотокаталитические материалы более устойчивы при хранении и, следовательно, более пригодны для практического использования в оптических устройствах.

Заключение

Анализ результатов разработки органических светочувствительных регистрирующих сред, удовлетворяющих требованиям развивающейся вычислительной техники, показывает, что в настоящее время созданы научно обоснованные технологические основы для разработки оптических дисков сверхвысокой информационной емкости (1—10 Тбит/см³). Эти носители данных способны реализовать трехмерную побитовую

и голографическую архивную и оперативную оптическую память.

Свойства разработанных высокочувствительных систем с оптическим и/или термическим усилением скрытого изображения обеспечивают разработку компактных оптических устройств вывода оптической информации на бумажный носитель в режиме реального времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Барачевский В.А. Химия высоких энергий, 2003, т. 37, с. 8.
2. Zhu J.-G. Materialstoday, July-August, 2003, p. 22.
3. Iwasaki S. IEEE Trans. Magn., 1980, v. 16, p. 71.
4. Dvornikov A.S., Cokgor I., Wang M. e. a. IEEE Trans., Pt A, 1997, v. 20, p. 203—212.
5. Chen D., Chen D., Wang B. Proc. SPIE, 2005, v. 5966, p. 298.
6. Tsujioka T. Mol. Cryst. and Liqid Cryst., 2000, v. 344, p. 51.
7. Shinoda M., Saito K., Ishimoto T. e. a. Jap. J. Appl. Phys., Pt 1, 2005, v. 44, p. 3537.
8. Манджиков В.Ф., Дарманян А.П., Барачевский В.А. и др. Оптика и спектроскопия, 1972, т. 32, с. 412.
9. Parthenopoulos D.A., Rentzepis P.M. Science, 1989, v. 245, p. 843.
10. Barachevsky V.A., Alfimov M.V., Nazarov V.B. Opt. Memory Neur. Networks, 1998, v. 7, p. 205.
11. Dvornikov A.S., Rentzepis P.M. Opt. Communs, 1997, v. 136, p. 1.
12. Dvornikov A.S., Taylor C.M., Liang Y.C. e. a. J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry, 1998, v. 112, p. 39.
13. Tanaka T., Yamaguchi K., Yamamoto S. Opt. Communs, 2002, v. 212, p. 45—50.
14. Li J., Men F.S., Tian H. e. a. Chem. Lett., 2005, v. 34, p. 922—923.
15. Mizuno T., Yamasaki K., Misawa H. Jap. J. Appl. Phys., Pt 1, 2005, v. 44, p. 6593.
16. Belfield K.D., Schafer K.I., Andrasik S. Chromogenic Phenomena in Polymers. ACS Symp. Ser., 2005, v. 888, p. 122—134.
17. Барачевский В.А., Алфимов М.В., Назаров В.Б. Ж. науч. и прикл. фотографии, 1999, т. 44, № 3, с. 66.
18. Liao W.Y., Wang S.S., Yao H.H. e. a. IEEE Trans. Magn., 2005, v. 41, p. 1019—1021.
19. Kawata S, Kawata Y. Chem. Rev., 2000, v. 100, p. 1777.
20. Hunter S., Solomon C., Esner S. e. a. Opt. Mem. & Neur. Networks, 1994, v. 3, p. 151.
21. Dvornikov A.S., Malkin J., Rentzepis P.M. J. Phys. Chem., 1994, v. 98, p. 6746.
22. Piyaket R., Cokgor I., McCormick F.B. e. a. Opt. Lett., 1996, v. 21, p. 1032.
23. Konorov S.O., Fedotov A.B., Zheltikov A.M. Appl. Phys. B, 2003, v. 76, p. 707.
24. Konorov S.O., Sidorov-Birykov D.A., Bugar I. e. a. Chem. Phys. Lett., 2003, v. 381, p. 572.
25. Konorov S.O., Sidorov-Birykov D.A., Bugar I. e. a. Ibid., 2003, v. 378, p. 630.
26. Nagamura T., Naito A., Nagai Y. e. a. Proc. SPIE., 2005, v. 5724, p. 1.
27. Akimov D.A., Zheltikov A.M., Koroteev N.I. e. a. Lser Phys., 1997, v. 7, p. 1242.
28. Akimov D.A., Zheltikov A.M., Koroteev N.I. e. a. Quant. Electr., 1998, v. 28, p. 547.
29. Yuan W.F., Sun L., Tang H.H. e. a. Adv. Mater., 2005, v. 17, p. 156.
30. Dvornikov A.S., Rentzepis P.M. Res. Chem. Intermed., 1996, v. 22, p. 115.
31. Dvornikov A.S., Cokgor I., McCormick F. e. a. Opt. Communs, 1996, v. 128, p. 205.
32. Fan X., Qi G., Xu D. e. a. Proc. SPIE, 2002, v. 4930, p. 240.

33. Yang W.J., Kim D.Y., Jeong M.Y. *e. a.* Chem. Eur. J., 2005, v. 11, p. 4191.
34. Irie M., Ishida H., Tsujioka T. Jap. J. Appl. Phys., 1999, v. 38, p. 6114.
35. Fukaminato T., Kawai T., Irie M. *Ibid.*, 2000, v. 39, p. L633.
36. Barachevsky V.A. In: Organic Photochromic and Thermo-chromic Com-pounds. Eds. J.C. Crano, R.J. Guglielmetti. V. 1. Main Photochromic Families. N. Y.: Plenum Press, 1999, p. 267.
37. Malkin J., Zelichenok A., Krongauz V. *e. a.* J. Am. Chem. Soc., 1994, v. 116, p. 1101.
38. Dvornikov A.S., Rentzepis P.M. Mol. Cryst. and Liqid Cryst., 1994, v. 246, p. 379.
39. Koroteev N.I., Magnitskii S.A., Shubin V.V. *e. a.* Jap. J. Appl. Phys., 1997, v. 36, p. 424.
40. Angelutc A.A., Chikisev A.Yu., Koroteev N.I. *e. a.* Int. Symp. on Optical Memory and Optical Data Storage. Technical Digest Series, 1996, v. 12, p. 178.
41. Angelutc A.A., Koroteev N.I., Magnitskii S.A. *e. a.* Instrum. Experim. Techniq., 1998, v. 41, p. 382.
42. Binyukov V.I., Koroteev N.I., Magnitskii S.A. *e. a.* Jap. J. Appl. Phys., 1998, v. 37, p. 2118.
43. Malakhov D.V., Gostev F.E., Koroteev N.I. *e. a.* Chem. Phys. Rep., 2000, v. 18, p. 1217.
44. Irea M. Chem. Rev., 2000, v. 100, p. 1685.
45. Yokoyama Y. *Ibid.*, 2000, v. 100, p. 1717.
46. Краюшкин М.М. Химия гетероцикл. соед., 2001, №1, p. 19.
47. Barachevsky V.A., Strokach Y.P., Krayushkin M.M. Mol. Cryst. and Liqid Cryst., 2005, v. 430, p. 81.
48. Строкач Ю.П., Валова Т.М., Голотюк З.О. *и др.* Оптика и спектроскопия, 2005, т. 99, с. 779.
49. Строкач Ю.П., Валова Т.М., Голотюк З.О. *и др.* Там же, 2005, т. 99, с. 595.
50. Tsujioka T., Kume M., Irie M. Jap. J. Appl. Phys., Pt 2, 1996, v. 35, p. L1532.
51. Sun F., Zhang F., Guo H. *e. a.* Proc. SPIE, 2003, v. 5060, p. 36.
52. Sun F., Zhang F., Lin X. *e. a.* *Ibid.*, 2002, v. 4930, p. 439.
53. Sekkat Z., Ishitobi H., Kawata S. Opt. Communs, 2003, v. 222, p. 269.
54. Zhou Y., Tang H., Huang W. *e. a.* Opt. Eng., 2005, v. 44, p. 035202.
55. Chen Q.Y., Hiraga T., Men L. *e. a.* Mol. Cryst. and Liqid Cryst., 2001, v. 345, p. 345.
56. Shirota Y., Utsumi H., Ujike T. *e. a.* Opt. Mater., 2002, v. 21, p. 249.
57. Kim M.-S., Kawai T., Irie M. *Ibid.*, 2003, v. 21, p. 271.
58. Pu S., Zhang F., Sun F. *e. a.* Proc. SPIE, 2003, v. 5060, p. 239.
59. Kasatani K., Kambe S., Irie M. J. Photochem. Photobiol. A, 1999, v. 122, p. 1.
60. Kasatani K., Kambe S., Irie M. Mol. Cryst. and Liqid Cryst., 2000, v. 345, p. 369.
61. Fukaminato T., Kobatake S., Kawai T. *e. a.* Proc. Jap. Acad. Ser. B, 2001, v. 77, p. 30.
62. Pu S., Xu J., Shen L. *e. a.* Tetrahedron Lett., 2005, v. 46, p. 871.
63. Wigglesworth T.J., Myles A.J., Branda N.R. Eur. J. Org. Chem., 2005, p. 1233.
64. Matsuda K., Irie M. J. Photochem. Photobiol. C, 2004, v. 5, p. 169.
65. Myles A.J., Branda N. Adv. Funct. Mater., 2002, v. 12, p. 167.
66. Tsvigoulis G.M., Lehn J.-M. Angew. Chem. Int. Ed. Engl., 1995, v. 34, p. 1119.
67. Tsvigoulis G.M., Lehn J.-M. Chem. Eur. J., 1996, v. 2, p. 1399.
68. Kawai T., Sasaki T., Irie M. Chem. Communs, 2001, p. 711.
69. Kawai T., Kim M.-S., Sasaki T. *e. a.* Opt. Mater., 2002, v. 21, p. 275.
70. Yagi K., Irie M. Chem. Lett., 2003, v. 32, p. 848.
71. Norsten T.V., Branda N.R. J. Am. Chem. Soc., 2001, v. 123, p. 1784.
72. Tian H., Chen B., Tu H.Y. *e. a.* Adv. Mater., 2002, v. 14, p. 918.
73. Chen B.Z., Wang M.Z., Luo Q.F. *e. a.* Synth. Metals, 2003, v. 137, p. 985.
74. Tomasulo M., Giordani S., Raymo F.M. Adv. Funct. Mater., 2005, v. 15, p. 787.
75. Cho S.Y., Yoo M., Shin H.-W. *e. a.* Opt. Mater., 2002, v. 21, p. 279.
76. Kim E., Choi Y.-K., Lee M.-H. Macromolecules, 1999, v. 32, p. 4855.
77. Stellacci F., Bertarelli C., Toscano F. *e. a.* Chem. Phys. Lett., 1999, v. 302, p. 563.
78. Uchda K., Saito M., Murakami A. *e. a.* Mol. Cryst. and Liqid Ctyst., 2005, v. 430, p. 31.
79. Bianco A., Bertarelli C., Rabolt J.F. *e. a.* Chem. Mater., 2005, v. 17, p. 869.
80. Koshido T., Kawai T., Yoshino K. Synth. Metals, 1995, v. 73, p. 257.
81. Tsujioka T., Hamada Y., Shibata Y. *e. a.* Appl. Phys. Lett., 2001, v. 78, p. 2282.
82. Tsujioka T., Irie M. J. Opt. Soc. Am. B, 2002, v. 19, p. 297.
83. Huan P., Guo H., Zhang F. Proc. SPIE, 2002, v. 4930, p. 464.
84. Pen Y., Guo H., Zhang F. *Ibid.*, 2003, v. 5060, p. 40.
85. Zhang F., Guo H., Pu S. *e. a.* *Ibid.*, 2002, v. 4930, p. 93.
86. Kawai T., Nakashima Y., Kunitake T. *e. a.* Curr. Appl. Phys., 2005, v. 5, p. 139.
87. Zheltikov A.M., Koroteev N.I., Magnitskii S.A. *e. a.* Quant. Electr., 1998, v. 28, p. 942.
88. Fedotov A.B., Koroteev N.I., Magnitskii S.A. *e. a.* Laser Phys., 1998, v. 8, p. 1081.
89. Murguly E., Norsten T.B., Branda N.R. Angew. Chem. Int. Ed., 2001, v. 40, p. 1752.
90. Myles A.J., Branda N.R. Adv. Funct. Mater., 2002, v. 12, p. 167.
91. Liang Y.C., Dvornikov A.S., Rentzepis P.M. Res. Chem. Inter-med., 1998, v. 24, p. 905.
92. Liang Y.C., Dvornikov A.S., Rentzepis P.M. J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry, 1999, v. 125, p. 79.
93. Liang Y.C., Dvornikov A.S., Rentzepis P.M. J. Mater. Chem., 2000, v. 10, p. 2477.
94. Liang Y.C., Dvornikov A.S., Rentzepis P.M. J. Photochem. Photobiol. A: Chemistry, 2001, v. 146, p. 83.
95. Wolak M.A., Gillespie N.B., Thomas C.J. *e. a.* *Ibid.*, 2001, v. 144, p. 83.
96. Liang Y.C., Dvornikov A.S., Rentzepis P.M. Macromolecules, 2002, v. 35, p. 9377.
97. Liang Y.C., Dvornikov A.S., Rentzepis P.M. Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2003, v. 100, p. 8109.
98. Liang Y.C., Dvornikov A.S., Rentzepis P.M. Opt. Communs, 2003, v. 223, p. 61.
99. Dvornikov A.S., Liang Y.C., Cruse C.S. *e. a.* J. Phys. Chem. B, 2004, v. 108, p. 8652.
100. Liang Y.C., Dvornikov A.S., Rentzepis P.M. J. Mater. Chem., 2005, v. 15, p. 1072.
101. Norsten T.B., Branda N.R. Adv. Mater., 2001, v. 13, p. 347.
102. Liao N., Gong M., Xu D. *e. a.* Chinese Sci. Bull., 2001, v. 46, p. 1856.
103. Lei M., Yao B., Han Y. *e. a.* Proc. SPIE, 2003, v. 5060, p. 28.
104. Hesselink L.H., Orlov S.S., Bashaw M.C. Proc. IEEE, 2004, v. 92, p. 1231.
105. McLeod R.R., Daiber A.J., McDonald M.E. *e. a.* Appl. Opt., 2005, v. 44, p. 3197.
106. Sponsler M.B. The Spectrum, 2000, v. 13, p. 1.
107. Ortuno M., Gallego S., Garcia C. *e. a.* Appl. Phys. B, 2003, v. 76, p. 851.
108. Patent WO 2005/049764.C09K 19/32. 02.06.2005.
109. Барачевский В.А. Химия высоких энергий, 2006, т. 40, с. 1.
110. Curtis K., Anderson K, Fotheringham E. *e. a.* Proc. SPIE, 2005, v. 5939, p. 55.

111. Gallego S., Ortuno M., Neipp C. e. a. *Ibid.*, 2005, v. 5827, p. 107.
112. Барачевский В.А. Ж. научн. и прикл. фотографии, 1998, т. 43, с. 79.
113. Barachevsky V.A. *Proc. SPIE*, 1991, v. 1559, p. 184.
114. Barachevsky V.A. *Ibid.*, 1995, v. 2208, p. 184.
115. Todorov N., Nikolova L., Styanova K. e. a. *Appl. Opt.*, 1985, v. 24, p. 785.
116. Todorov N., Nikolova L., Tomova N. e. a. *IEEE*, 1986, v. QE 22, p. 1262.
117. Hvilsted S., Ramanujam P.S. *Current Trends in Polymer Sci.*, 1996, v. 1, p. 53.
118. Holme N.C. R., Ramanujam P.S., Hvilsted S. *Appl. Opt.*, 1996, v. 35, p. 4622.
119. Holme N.C. R., Ramanujam P.S. *Opt. Lett.*, 1996, v. 21, p. 902.
120. Natanson A., Rochon P. *ACS Symp. Sci.*, 1997, p. 236.
121. Berg R.H., Hvilsted S., Ramanujam P.S. *Nature*, 1996, v. 383, p. 505.
122. Sahyun M.R.V. *J. Imaging Sci. and Techn.*, 1998, v. 42, p. 23.
123. Mitsuhashi T., Suzuki T., Morita K. e. a. 2005 Beijing Int. Conf. on Imaging: technology and Applications for XXIst Century. May 23—26, 2005, Beijing, China. Science Press, 2005, p. 58.
124. Несеребряные фотографические процессы. Под ред. А.Л. Картужанского. Л.: Химия, 1984, с. 146.
125. Будыка М.Ф., Алфимов М.В. *Успехи фотографических наук*, 1989, т. 25, с. 97.
126. Бетхер Х., Энперляйн И., Ельцов А.В. *Современные системы регистрации информации. Основные принципы, процессы, материалы.* Под ред. А.В. Ельцова. С-Пб.: Синтез, 1992, с. 62.
127. Барачевский В.А. *Тр. ГОИ*, 1987, т. 65, с. 114.
128. DoMinh T. *Res. Chem. Intermed.*, 1989, v. 12, p. 251.
129. Georgiou S., Wight C.A. *J. Phys. Chem.*, 1990, v. 94, p. 4935.
130. Barachevsky V.A. *Final Program and Proc. of IS&T NIP15: Int. Conf. on Digital Printing Technologies*, October 17—19, 1999, p. 754—757.