

07;12

## Лазер на красителях на основе полиуретановой матрицы

© В.И. Безродный, Н.А. Дервянко, А.А. Ищенко, Л.В. Карабанова

Институт физики АН Украины,  
252650 Киев, Украина  
e-mail: bezrod@iop.kiev.ua

(Поступило в Редакцию 2 августа 2000 г.)

Приведены результаты исследования лазера на красителях на основе полиуретановой матрицы, отверждаемой методом поликонденсации. Показано увеличение эффективности преобразования, ресурса, фотостойкости и диапазона перестройки в сравнении с активными лазерными средами, изготовленными методом радикальной полимеризации.

Лазеры с перестраиваемой частотой излучения в видимом диапазоне получили широкое распространение при решении научных и прикладных наук. Наиболее привлекательными и доступными источниками мощного, перестраиваемого по частоте света являются лазеры на красителях, в которых часто используются жидкие растворы красителей в качестве активной среды. Во избежание влияния таких недостатков как неустойчивость распространения интенсивного излучения в жидкостях вследствие нелинейных процессов [1], термооптических искажений и деградации красителя для жидких активных сред необходимо изготовление громоздких и сложных систем по прокачке раствора через рабочую зону лазера [2]. По причине утечки возможно загрязнение ближайшего окружения растворителями и красителями, причем растворители часто огнеопасны и токсичны, что создает нежелательные проблемы при работе с жидкими активными средами.

Привлекательной альтернативой жидкостным активным средам являются твердотельные. Однако выбор материалов, пригодных для использования в качестве твердотельных матриц органических красителей и удовлетворяющих жестким эксплуатационным требованиям, ограничен. Среди них можно выделить две основные группы твердотельных матриц: полимерные и неорганические микрокомпозиционные матричные элементы на основе натриевоборосиликатного пористого стекла [3,4] и зольгельные [5]. Генерирующие красители легко вводятся в полимерные матрицы. Доступные исходные вещества для таких матриц и простые процессы их изготовления позволяют получать элементы низкой себестоимости в сравнении с лазерными элементами на кристаллах.

В качестве полимеров для активных сред на основе красителей наиболее широко используются полиметилметакрилат и его модифицированные композиции [6–8], полиуретанакрилат [9,10] и различные эпоксины [11,12]. Отверждение матриц полиметилметакрилата и полиуретанакрилата осуществляется методом радикальной полимеризации. В первом случае в реакционную массу вводятся вещества, инициирующие при нагревании образование свободных радикалов (наиболее часто используются пероксидные соединения), а во втором иници-

рование радикальной реакции полимеризации осуществляется ультрафиолетовым излучением с применением фотоинициаторов. Наличие свободных радикалов в системе приводит к побочным радикальным реакциям с участием молекул красителей, которые являются одной из основных причин деструкции их молекул. Следовательно, уже в методе получения активных сред на основе полиметилметакрилата и полиуретанакрилата заложены факторы нестабильности красителей. Они прогрессируют при облучении в основную полосу поглощения  $S_0 \rightarrow S_1$  как слабыми, так и интенсивными световыми потоками [10].

Отверждение эпоксидных полимеров осуществляется по реакции поликонденсации. Такого типа реакции более предпочтительны, чем радикальные для органических красителей. Однако при получении окрашенных эпоксидов в реакциях поликонденсации используются отвердители, обладающие либо основными, либо кислотными свойствами. Такие свойства отвердителей неприемлемы для многих классов органических красителей, так как вызывают их необратимые химические разрушения. Авторы в предыдущей работе [13] предложили использовать сетчатый полиуретан в качестве полимерной матрицы для пассивных лазерных затворов на основе красителей. Его отверждение, так же как и эпоксидных полимеров, осуществляется по реакции поликонденсации. Однако в отличие от эпоксидных полимеров она протекает в мягких условиях при комнатной температуре в нейтральной среде. Поэтому в такую полимерную среду без разложения (полного и даже частичного) на стадии полимеризации можно вводить красители любых классов. Нам удалось ввести в него даже полиметиновые красители, интенсивно поглощающие свет в спектральной области  $> 1000 \text{ nm}$  [14], тогда как эти же красители на стадии полимеризации полиметилметакрилата разлагаются практически полностью, а в процессе получения полиуретанакрилата претерпевают распад на  $\approx 80\%$  [10].

Целью настоящей работы явилось исследование возможности использования полиуретана в качестве матрицы активных сред, окрашенных органическими красителями, и построения перестраиваемых лазеров на их основе. Следует отметить, что полимерные матрицы в

активных средах испытывают более жесткие лучевые и тепловые нагрузки при взаимодействии с излучением накачки и генерации по сравнению с пассивными лазерными затворами. Это обусловлено тем, что в активных средах используются как минимум на порядок более высокие концентрации красителей, чем в пассивных, что существенно увеличивает вероятность их агрегации. Агрегация красителей является одной из основных причин ухудшения фотостойкости, ресурса работы и спектрально-люминесцентных свойств окрашенных сред [15,16]. Рост концентрации красителя увеличивает также вероятность образования контактных ионных пар, в которых возможен фотоперенос электрона от аниона к катиону с образованием нейтральных радикалов [17]. Их образование вызывает дополнительную деструкцию красителей. Кроме того, для накачки активных лазерных сред используются значительно большие плотности мощности, чем для просветления пассивных лазерных затворов. Это обусловлено тем, что для эффективной генерации необходимо создать как можно большую инверсную населенность уровней, а для модуляции добротности необходимо только достичь равенства в населенности основного и возбужденного уровней. Кроме того, дополнительное увеличение энергетической нагрузки на активные лазерные среды по сравнению с пассивными лазерными затворами происходит по причине наличия двух длин волн: накачки ( $\lambda_p$ ) и генерации, а также того, что  $\lambda_p$  значительно короче длин волн наиболее распространенных пассивно модулируемых лазеров. С уменьшением  $\lambda_p$  снижается лучевая прочность полимера [18].

Большинство лазерных полимерных материалов имеют интенсивные полосы поглощения в области резонансной двухквантовым переходам наиболее употребимых частот накачки. Например, электронный переход в полимере с  $\lambda_{\max} = 266 \text{ nm}$  эквивалентен поглощенной энергии двух фотонов накачки  $\lambda_p = 532 \text{ nm}$ . Поэтому при использовании мощной накачки возможно появление дополнительного канала деградации активных лазерных сред по сравнению с пассивными лазерными затворами за счет двухфотонного поглощения. Исходя из вышеизложенного и практики использования полимерных материалов в лазерных средах на красителях, основным критерием выбора нашей матрицы явилось требования по лучевой прочности, ресурсу работы и фотостойкости.

Необходимая лучевая прочность полимерной матрицы, зависящая от вязкоупругих свойств материала [6,7,19], достигается как применением многократной дистилляции исходных продуктов с последующей ультрафильтрацией мономерных составляющих, так и модификацией полимера. Целенаправленные исследования, выполненные в работах [6,19], по выяснению механизма лазерного разрушения полимерных матриц позволили сделать вывод о необходимости использования эластичных материалов, которые обладают значительными упругими деформациями в широком интервале рабочих температур. Так, введение в полиметилметакрилат низко-

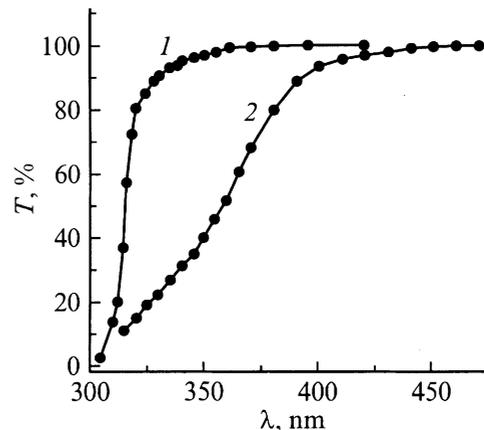


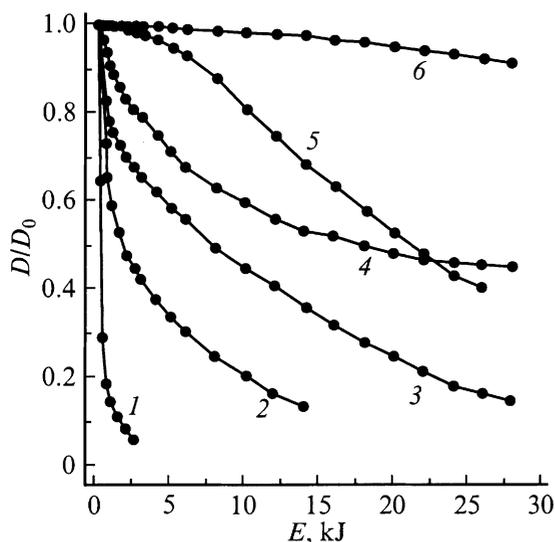
Рис. 1. Коротковолновый край пропускания полимерных матриц: 1 — полиуретан, 2 — полиуретанакрилат.

и высокомолекулярных добавок дало возможность повысить до эксплуатационных параметров лучевую прочность данного полимера [6,7]. Использование сетчатого полиуретанакрилата [9,10] позволило получать активные лазерные среды, у которых матрица обладала высокоэластичными свойствами в широком температурном интервале. Такие элементы могут работать с высокими импульсными нагрузками без применения пластифицирующих добавок к полимеру.

В настоящей работе приведены данные исследования основных эксплуатационных показателей лазера на красителях с использованием активных лазерных сред, изготовленных на основе близких по физическим свойствам полимерных матриц — полиуретана и полиуретанакрилата. Установлено, что полиуретан имеет высокую прозрачность в широком спектральном диапазоне  $0.32 \dots 2.20 \mu\text{m}$ , который охватывает практически всю область, где используются красители. Приведенный на рис. 1 (кривая 1) коротковолновый край поглощения указывает на возможность использования матриц из полиуретана для получения активных лазерных сред с накачкой классическими когерентными источниками от азотного лазера ( $\lambda_p = 337 \text{ nm}$ ) и более длинноволновыми. Наоборот, интенсивное поглощение на этом краю в спектре полиуретанакрилата (рис. 1, кривая 2) свидетельствует о невозможности изготовления активных лазерных сред на его основе в ближней ультрафиолетовой области.

Лучевая прочность полимерной матрицы из полиуретана определялась на длине волны второй гармоники ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) одномодового ИАГ:  $\text{Nd}^{3+}$  лазера, работающего в моноимпульсном режиме. Порог одноимпульсного разрушения при длительности тестируемого импульса  $15 \text{ ns}$  и диаметре зоны облучения  $200 \mu\text{m}$  составил  $\geq 15 \text{ J/cm}^2$ , что в 1.5 раз превышает таковой для полиуретанакрилата [9] в тех же условиях.

Оба типа активных сред, различающихся полимерными матрицами, изготавливались в виде триплексов —

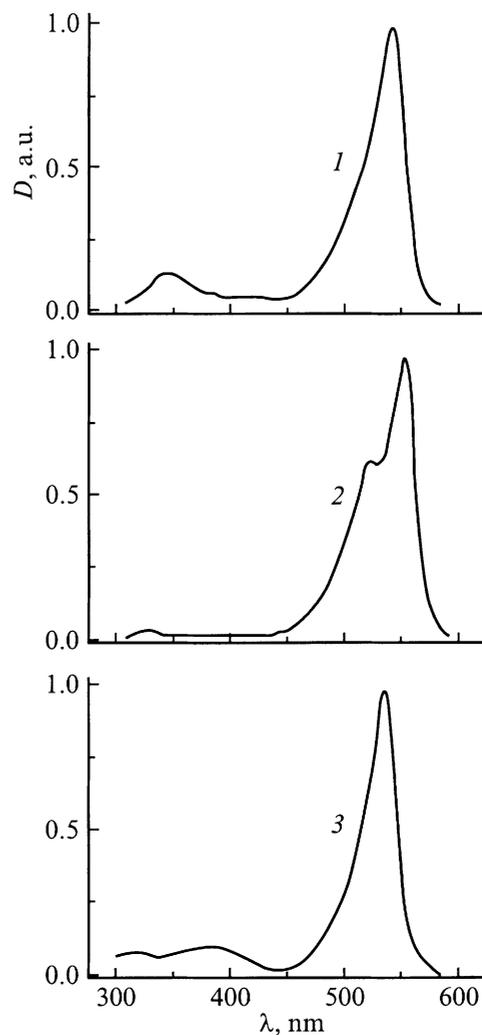


**Рис. 2.** Кинетические кривые фотообесцвечивания полимерных образцов в зависимости от энергетической дозы облучения: 1–3 — полиуретанакрилатная матрица, 4–6 — полиуретановая матрица: 1, 4 — пиррометин 597; 2, 6 — астрафлорксин; 3, 5 — родамин 6Ж.

один полимерный слой заключен между двумя подложками. Элементы из полиуретанакрилата выполнены по технологии, описанной в [9,10]. Основные приемы изготовления полимерных элементов на полиуретане представлены в наших работах [13,14]. Для опытов выбрано по одному органическому красителю из трех наиболее применяемых для генерации классов: ксантенового — родамин 6Ж, полиметинового — астрафлорксин, пиррометинового — пиррометин 597.

Основными эксплуатационными характеристиками лазеров на красителях на основе полимерных активных лазерных сред являются ресурс наработки  $N$  в фиксированную область, эффективность генерации  $\eta$  и фотостойкость. Для исследования фотостойкости изготавливались триплексы, в которых в качестве подложек применялись кварцевые стекла. Толщина активированной красителем полимерной пленки из полиуретана и полиуретанакрилата в опытах по фотостойкости равнялась  $300 \mu\text{m}$ . Оптическая плотность  $D$  в максимуме основного перехода составляла величину порядка единицы. Облучение образцов осуществлялось светом ксеноновой лампы, имеющей непрерывное спектральное распределение излучения в УФ и видимой области, при интенсивности в зоне облучения  $\approx 50 \text{ W/cm}^2$ . Изменение оптической плотности полимерных образцов в зависимости от дозы  $E$  падающего света контролировалось в максимуме полосы поглощения конкретного красителя спектрофотометром Shimadzu UV-3100. На рис. 2 приведены кинетические зависимости фотодеструкции красителей в полимерных матрицах. Приведенные результаты показывают существенное увеличение фотостойкости красителей при переходе от полиуретанакрилата к полиуретану.

Неожиданным явилось то, что краситель с каркасной молекулярной структурой пиррометина 597 оказался наименее фотостойким в обоих полимерах. Наоборот, краситель астрафлорксин с открытой полиметиновой цепью, которая обладает повышенной чувствительностью к фотохимическим реакциям, обнаружил наибольшую фотостойкость в полиуретане. Установлено, что в спектрах поглощения пиррометина 597 и родамина 6Ж в области  $320\text{--}420 \text{ nm}$  имеется довольно интенсивное поглощение, тогда как у астрафлорксина оно отсутствует в этой области (рис. 3). Исходя из этого можно заключить, что в фотохимическом разложении двух первых красителей промотирующую роль играют электронные переходы в высшие возбужденные состояния при облучении ультрафиолетовым излучением. Это обстоятельство необходимо учитывать при создании фотостабильных красителей. Высшие возбужденные электронные состояния красителей могут безызлучательно дезактивироваться в процессе колебательной релаксации и внутренней конверсии через высоковозбужденные колебатель-

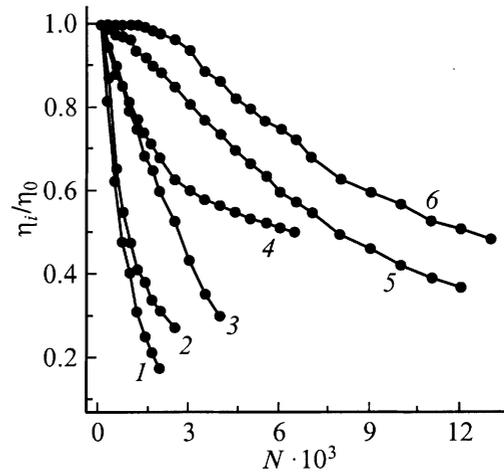


**Рис. 3.** Спектры поглощения красителей в полиуретане: 1 — родамин 6Ж, 2 — астрафлорксин, 3 — пиррометин 597.

ные состояния полимеров с образованием свободных радикалов макромолекул. Поскольку полосы поглощения красителей в ультрафиолетовой области перекрываются с соответствующими полосами полимеров сильнее в полиуретанакрилате, чем в полиуретане, то вероятность образования таких радикалов у первых должна быть выше по сравнению с последними, подтверждением чему являются кривые фотодеструкции на рис. 2.

Для исследования ресурса работы активных лазерных сред и коэффициента преобразования лазера на красителе изготавливались образцы в виде триплекса. Толщина окрашенного полимерного слоя, заключенного между стеклянными подложками, равнялась 2 мм. Оптическая плотность на длине волны накачки составляла  $D(\lambda_p) = 5$ . Генерацию в лазере на красителях получали в не дисперсионном резонаторе длиной 16 см, состоящим из диэлектрических зеркал с коэффициентами отражения  $R_1 = 99.5\%$  и  $R_2 = 30\%$ . Применялся квазипродольный вариант возбуждения. Угол между лучом накачки и генерацией лазера на красителях равнялся  $15^\circ$ . Активные элементы устанавливались вблизи выходного зеркала под углом Брюстера к излучению генерации. Для накачки использовали вторую гармонику ( $\lambda_p = 532$  нм) ИАГ:Nd<sup>3+</sup> лазера, работающего в многомодовом режиме. Импульс накачки имел энергию 35 мДж при длительности 18 нс. Излучение накачки фокусировалось до диаметра 1.75 мм линзой с фокусным расстоянием  $\sim 1$  м. Падающая на полимерный образец плотность энергии накачки составляла, таким образом, 1.45 Дж/см<sup>2</sup>. При частоте следования импульсов 3 Гц, которую мы использовали, средняя мощность накачки была равной 4.35 Вт/см<sup>2</sup>. Известно [8], что ресурс активных лазерных сред зависит от плотности энергии и средней мощности накачки. Мы специально применили жесткие условия по накачке для проверки работоспособности наших элементов при мощном возбуждении и экспрессного получения информации о ресурсе лазерных элементов, выполненных на основе двух полимерных матриц. Именно по этой причине мы делали тонкие окрашенные полимерные слои между стеклами. В толстых полимерных слоях, например, в образцах из полиметилметакрилата [20] ресурсные характеристики существенно улучшаются. Это связано прежде всего с ослаблением, описанных ниже побочных концентрационных эффектов и тепловой разгрузкой полимерного слоя. Высокая лучевая прочность как испытуемого полиуретана, так и сравниваемого полиуретанакрилата позволила применять столь жесткие условия по накачке в одну и ту же локальную область при малой толщине слоя полимера, не прибегая к вращению диска, как это обычно делается для повышения ресурса активной среды.

Ресурсные зависимости  $\eta_0$  как функции преобразования излучения накачки в генерацию от числа импульсов  $N$  приведены на рис. 4. Эффективность преобразования определена как отношение энергии лазера на красителях к энергии накачки. Уменьшение  $\eta_i$  на всех



**Рис. 4.** Ресурсные зависимости эффективности преобразования, нормированные на начальную для красителей: 1, 4 — астрафлюксин; 2, 5 — родамин 6Ж; 3, 6 — пиррометин 597; в полиуретанакрилате (1–3) и полиуретане (4–6).

образцах с ростом  $N$  происходило по причине обесцвечивания красителя без повреждения полимерной матрицы. Для выбранных красителей получено систематическое значительное увеличение ресурса работы активных лазерных сред на полиуретане в сравнении с полиуретанакрилатом. В активных лазерных средах на полиуретане имеет место увеличение исходной эффективности  $\eta_0$  по отношению к элементам из полиуретанакрилата. Значения  $\eta_0$  для трех красителей в двух сравниваемых полимерных матрицах приведены в таблице. Наблюдалось значительное увеличение  $\eta_0$  в лазере при использовании элементов из родамина 6Ж и пиррометина 597 в полиуретане в сравнении с таковыми на полиуретанакрилате. Отмеченная нами в работе [10] на стадии изготовления элементов из полиуретанакрилата деструкция красителей подтверждена позже в [21], где приготавливались среды на основе полиметилметакрилата с использованием радикальной реакции отверждения при помощи термоинициатора бензоилпероксида, и является причиной наблюдаемой разницы в  $\eta_0$ . Деструкция красителей приводит к образованию продуктов распада, которые поглощают в области генерации. Мы обнаружили, что такое поглощение имеет место для красителей родамин 6Ж и пиррометин 597 и совсем мало для астрафлюксина в полиуретанакрилате. Подобное поглощение полностью отсутствует в полиуретане для выбранных красителей. Увеличение исходной эффективности  $\eta_0$  в полиуретане по сравнению с полиуретанакрилате можно объяснить отсутствием разложения красителей в первой матрице еще на этапе изготовления. Причем в активных лазерных средах на основе астрафлюксина в полиуретанакрилате, где имеет место минимальная деструкция красителя, проявляется малое отличие в  $\eta_0$  для этого красителя полиуретана и полиуретанакрилата (см. таблицу).

## Основные эксплуатационные характеристики лазера на красителях

Активный элемент	Доза облучения, при которой $D_0$ уменьшается в 2 раза $\text{kJ/cm}^2$	Число импульсов, при котором $\eta_0$ снижается в два раза, $N \cdot 10^3$	Начальная эффективность преобразования в дисперсионном резонаторе, %	Диапазон перестройки по основанию, nm
Родамин 6Ж в полиуретане	23.0	8.0	34	555–597
Родамин 6Ж в полиуретанакрилате	8.0	0.9	29	558–597
Астрафлорксин в полиуретане	160.0	6.5	32	590–620
Астрафлорксин в полиуретанакрилате	2.0	0.7	30	590–620
Пиррометин 597 в полиуретане	18.5	12.2	75	550–610
Пиррометин 597 в полиуретанакрилате	0.3	2.2	58	553–607

Для определения диапазонов перестройки длины волны генерации лазера на красителях с использованием исследуемых элементов был собран простой дисперсионный резонатор по схеме Литтрова, взаимное расположение составляющих его деталей приведено на рис. 5. В качестве дисперсионного элемента использована нарезная отражательная дифракционная решетка 1 с числом штрихов  $1200 \text{ mm}^{-1}$ . Вспомогательная призма полного внутреннего отражения 2 устанавливалась для сведения к минимальному значению угла ( $6^\circ$ ) между лучами накачки и генерации. Активная лазерная среда 3 устанавливалась под углом Брюстера к излучению лазера на красителях. Коэффициент отражения выходного зеркала 4 составлял 30%. Спектр перестройки, получаемый при вращении решетки 1, определялся при помощи зеркального монохроматора SPM 2, сигнал с выходной щели которого подавался на фотодиод (ФД-24) и далее на осциллограф С1-79. С целью недопущения лучевого разрушения дифракционной решетки (система расширения луча генерации не применялась) энергия накачки была снижена до уровня  $10 \text{ mJ}$  при диаметре в области активной среды, равном  $2 \text{ mm}$ . Перестроечные кривые для трех красителей в полиуретане и полиуретанакрилате представлены на рис. 6. Как видно из перестроечных кривых, максимальное значение эффективности преобразования для лазера на красителях родамин 6Ж (кривая 2) и пиррометин 597 (кривая 4) значительно

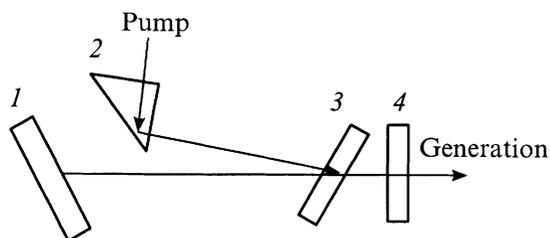
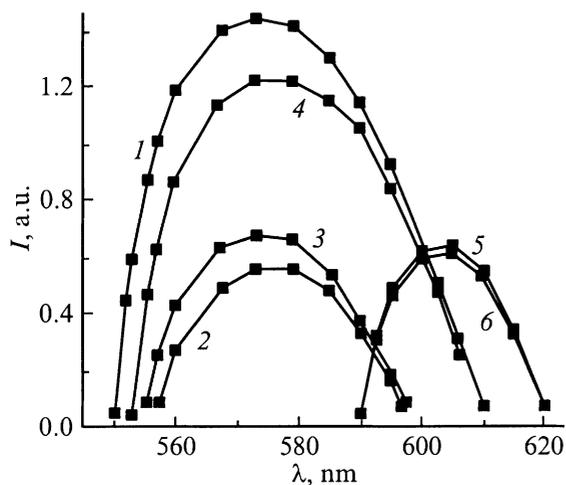


Рис. 5. Оптическая схема перестраиваемого лазера на красителях.

ниже в полиуретанакрилате, чем на аналогичных активных средах в полиуретане (кривые 1 и 3 соответственно). Кроме того, диапазон перестройки для этих красителей в полиуретанакрилате также меньше за счет сдвига вправо коротковолновой части кривых. Уменьшение эффективности преобразования и сужение области перестройки в лазере на красителях с дисперсионным резонатором, с активными средами на основе полиуретанакрилата связаны с наличием поглощения продуктами распада, которые образуются на этапе радикальной полимеризации полиуретанакрилата. Перестроечные кривые (5, 6) на астрафлорксине практически совпали. При изготовлении активной среды на этом красителе в полиуретанакрилате имеет место минимальное разложение  $\approx 5\%$ , в то время как родамин 6Ж и пиррометин 597 разлагаются при фотоотверждении на 14 и 20% соответственно. Среди выбранных красителей астрафлорксин в полиуретанакрилате имеет меньшую фотостойкость, чем родамин 6Ж (рис. 2, кривые 2, 3), однако необходимое время отверждения олигомерной композиции с ним при изготовлении активной лазерной среды в 6–7 раз меньше (вследствие отсутствия поглощения в области  $320\text{--}420 \text{ nm}$  собственно красителем), чем для проведения такой же реакции с родамином 6Ж. Этим и объясняется незначительный распад астрафлорксина в полиуретанакрилате на этапе изготовления и малое отличие в  $\eta_0$  для исследуемых матриц. При изготовлении активных сред на полиуретане красители не претерпевают распада, чем и обусловлено различие с полиуретанакрилатными средами как в эффективности преобразования, так и в диапазоне перестройки.

Спектральный диапазон перестройки для красителя из класса пиррометиновых значительно шире при большей эффективности преобразования, чем у лазера на традиционном родамине 6Ж. Пиррометиновые красители [21–32] в последнее время благодаря высоким значениям преобразования нашли широкое применение для получения генерации в видимом диапазоне. Применение матрицы из полиуретана позволило значительно повысить фотохимическую стойкость пиррометинового



**Рис. 6.** Перестроенные кривые для красителей: 1, 4 — пиррометин 597; 2, 3 — родамин 6Ж; 5, 6 — астрафлксин в полиуретане (1, 3, 5) и полиуретанакрилате (2, 4, 6).

красителя по отношению к радикалсодержащим матрицам из полиуретанакрилата [9,10] и полиметилметакрилата [21], обусловив более стабильную работу лазера на красителях.

Резюмируя полученные результаты, можно заключить, что фотостойкость, ресурс, эффективность преобразования и диапазон перестройки активных лазерных сред на основе полиуретана выше, чем в матрице из полиуретанакрилата. Это обусловлено значительно более сильным разложением красителей у последних по сравнению с первыми. С одной стороны, причиной этого является частичное разложение красителей в полиуретанакрилате уже на стадии полимеризации за счет радикального ее механизма. Такой характер реакции создает благоприятные условия для дальнейшей активации радикальных реакций при взаимодействии активных лазерных сред со световым излучением. С другой стороны, полиуретан обладает преимуществом над полиуретанакрилатом не только в способе полимеризации, но и в том, что он характеризуется довольно высокой полярностью среди полимеров [24]. По величине диэлектрической проницаемости он превосходит полиуретанакрилат, эпоксида и полиметилметакрилат [24]. Поэтому солеобразные красители в нем более диссоциированы, чем в полимерах названных последними. Разъединению противоионов в полиуретане также содействует наличие большого количества функциональных групп с высокой нуклеофильностью в его цепях. Такие группы, подвергая катионы красителей нуклеофильной сольватации, создают вокруг них сольватную оболочку [16]. В результате вероятность образования контактных ионных пар в полиуретане гораздо меньше, чем в полиуретанакрилате, эпоксидах и полиметилметакрилате. Поэтому возможность фотопереноса электрона и ассоциации контактных ионных пар за счет электростатического притяжения их разноименных зарядов в полиуретане в отличие от полиме-

ров, названных последними, сведена к минимуму [16]. Действительно, замена хлорид аниона у астрафлксина тетрафторборатом, обладающим более высокой нуклеофильностью и сродством к электрону, практически не влияет на спектрально-генерационные и ресурсные характеристики красителя в полиуретане, тогда как в полиуретанакрилате наблюдаются небольшое уширение и гипсохромный сдвиг полосы поглощения, а также увеличение фотостойкости. Зависимость этих характеристик от природы противоиона указывает, согласно [16], на образование контактных ионных пар в полиуретанакрилате в отличие от полиуретана. Показательно, что пиррометин 597, обладающий наименьшей фотостойкостью среди исследованных красителей, имеет наибольший ресурс работы (рис. 4, кривые 3, 6; см. таблицу). Этот факт является еще одним подтверждением участия высших возбужденных состояний пиррометина 597 в фотохимических процессах его разложения. Дело в том, что при определении ресурсных характеристик возбуждение осуществлялось только в основную полосу поглощения, тогда как при исследовании фотостойкости облучение велось и в область  $S_0 \rightarrow S_2$  перехода. Внутриионный пиррометин 597 является химически контактной ионной парой, диссоциация которой невозможна ни при какой полярности полимера. Однако заряды в ней достаточно удалены друг от друга. Кроме того, отрицательный заряд весьма локализован на борфторидном мостике вследствие значительной электроотрицательности атомов фтора. Поэтому внутримолекулярный фотоперенос электрона от бора к азоту в пиррометине 597 более затруднен по сравнению с химически несвязанными контактными парами катионных красителей астрафлксина и родамина 6Ж, у которых противоионы могут сближаться и удаляться в зависимости от полярности и сольватирующей способности среды. В результате пиррометин 597 обладает большим ресурсом как в полиуретане, так и в полиуретанакрилате, чем астрафлксин и родамин 6Ж. Электростатическое притяжение между разноименными зарядами внутриионного пиррометина 597, подобно солеобразным катионным красителям, может объединять их молекулы в агрегаты. По изложенным выше причинам эти процессы в полиуретане гораздо менее вероятны, чем в полиуретанакрилате. Это обстоятельство в сочетании с мягким способом полимеризации обеспечивает лучшие ресурсные характеристики пиррометина 597, так же как астрафлксина и родамина 6Ж в полиуретане по сравнению с полиуретанакрилатом.

Таким образом, полиуретановая матрица для активных лазерных сред является перспективным материалом при создании лазеров на основе органических красителей. При этом в нее в отличие от других полимеров могут быть введены красители любых классов без разложения. Лазеры с использованием активных сред на основе полиуретановой матрицы имеют большой потенциал для повышения их стабильной работы вследствие увеличения фотохимических, ресурсных и генерационных характеристик.

## Список литературы

- [1] *Безродный В.И., Ващук В.И., Тихонов Е.А.* ЖТФ. 1978. Т. 48. Вып. 1. С. 151–159.
- [2] *Весничева Г.А., Иванов А.Ю.* // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 1. С. 201–205.
- [3] *Земский В.И., Колесников Ю.Л., Мешковский И.К.* // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 6. С. 331–335.
- [4] *Альтигулер Г.Б., Баханов В.А., Дульнева Е.Г.* // Опт. и спектр. 1987. Вып. 6. С. 1201–1203.
- [5] *Knobbe E.T., Dunn B., Fuqua P.D., Nishida F.* // Appl. Optics. 1990. Vol. 29. N 18. P. 2729–2733.
- [6] *Громов Д.А., Дюмаев К.М., Маненков А.А.* // Изв. АН СССР. Сер. физич. 1984. № 7. С. 1364–1369.
- [7] *Громов Д.А., Дюмаев К.М., Маслоков А.П.* // Изв. АН СССР. Сер. физич. 1985. № 6. С. 1084–1095.
- [8] *Денисов Л.К., Кытина И.Г., Кытин В.Г.* // Квантовая электрон. 1997. Т. 24. № 2. С. 119–122.
- [9] *Безродный В.И., Пржонская О.В., Тихонов Е.А.* // Квантовая электрон. 1982. Т. 9, № 12. С. 2455–2464.
- [10] *Безродный В.И., Бондар М.В., Козак Г.Ю.* // ЖПС. 1989. Т. 50. № 5. С. 711–727.
- [11] *Борткевич А.В., Гейдур С.А., Карапетян О.О.* // ЖПС. 1989. Т. 50. № 2. С. 210–216.
- [12] *Коробкин Ю.В., Сидоров О.И., Студенов В.Б.* // ЖТФ. 1997. Т. 67. Вып. 10. С. 71–76.
- [13] *Безродный В.И., Вовк Л.В., Деревянко Н.А.* // Квантовая электрон. 1995. Т. 22. № 3. С. 245–248.
- [14] *Безродный В.И., Ищенко А.А., Карабанова Л.В., Сломинский Ю.Л.* // Квантовая электрон. 1995. Т. 22. № 8. С. 849–852.
- [15] *Ищенко А.А.* // Квантовая электрон. 1994. Т. 21. № 6. С. 513–534.
- [16] *Ищенко А.А.* Строение и спектрально-люминесцентные свойства полиметиновых красителей. Киев: Наукова думка, 1994. 232 с.
- [17] *Ищенко А.А., Деревянко Н.А., Виноградов А.М.* // ЖОХ. 1997. Т. 67. Вып. 7. С. 1191–1194.
- [18] *Алдошин М.И., Маненков А.А., Нечитайло В.С.* // ЖТФ. 1979. Т. 49. Вып. 11. С. 2498–2499.
- [19] *Алдошин М.И., Герасимов Б.Г., Маненков А.А.* // ЖФТ. 1979. Т. 49. Вып. 11. С. 2496–2497.
- [20] *Anderson R.S., Hermes R.E., Matyushin G.A.* // Proc. SPIE. 1998. Vol. 3265. P. 13–22.
- [21] *Rahn M.D., King T.A., Gorman A.A., Hamblett I.* // Appl. Optics. 1997. Vol. 36. N 24. P. 5862–5871.
- [22] *Pavlopoulos T.G., Boyer J.H., Thangaraj K.* // Appl. Optics. 1992. Vol. 31. N 33. P. 7089–7094.
- [23] *Pavlopoulos T.G., Boyer J.H., Sathyamoorthi G.* // Appl. Optics. 1998. Vol. 37. N 33. P. 7797–7800.
- [24] *Энциклопедия полимеров.* М.: Советская энциклопедия, 1972. Т. 2. 1195 с.