

## Активные лазерные среды на основе окрашенного полиуретана

В.И.Безродный\*, А.А.Ищенко\*\*

*Проанализированы преимущества полиуретановой матрицы по сравнению с другими полимерами, широко используемыми для активных сред лазеров на красителях. Обнаружено, что они превосходят активные среды на основе близкого им по физическим и эксплуатационным свойствам полиуретанакрилата по фотостойкости, ресурсу работы, лучевой прочности, эффективности преобразования и однородности распределения красителя. Показано, что эти преимущества обусловлены не только более мягкими условиями полимеризации, но и меньшей вероятностью образования ионных пар и агрегатов красителей. Существенное подавление данных процессов в полиуретане связано с тем, что он обладает большей полярностью и сольватирующей способностью, чем полиуретанакрилат.*

**Ключевые слова:** лазеры на красителях, полимерные активные среды, органический краситель.

Полимерные активные лазерные среды (ПАЛС) на основе органических красителей обладают рядом эксплуатационных преимуществ по сравнению с соответствующими жидкостными средами [1, 2]. Однако для реализации этих преимуществ необходимо, чтобы фотофизические и фотохимические свойства красителей при переходе от раствора к полимеру по меньшей мере не ухудшались. Прежде всего это касается спектрально-генерационных свойств, фотостабильности и ресурса работы ПАЛС. В качестве полимеров для активных сред на основе красителей наиболее широко используются полиметилметакрилат (ПММА) и его модифицированные композиции [3–6], полиуретанакрилат (ПУА) [2, 7] и различные эпоксида [8, 9].

Отверждение матриц ПММА и ПУА осуществляется методом радикальной полимеризации. Наличие свободных радикалов в системе приводит к побочным радикальным реакциям с участием молекул красителей, что является одной из основных причин деструкции последних. Отверждение эпоксидных полимеров осуществляется вследствие реакции поликонденсации. Однако в этих реакциях используются отвердители, обладающие либо основными либо кислотными свойствами, что неприемлемо для многих классов органических красителей, т. к. вызывают их необратимые химические разрушения.

Авторы настоящей работы предложили в [10] использовать сетчатый полиуретан (ПУ) в качестве полимерной матрицы для пассивных лазерных затворов (ПЛЗ) на основе красителей. Его отверждение, как и отверждение эпоксидных полимеров, осуществляется при поликонденсации. Однако в первом случае она протекает в мягких условиях – при комнатной температуре и в нейтральной среде, поэтому в такую полимерную среду на стадии полимеризации можно вводить красители любых клас-

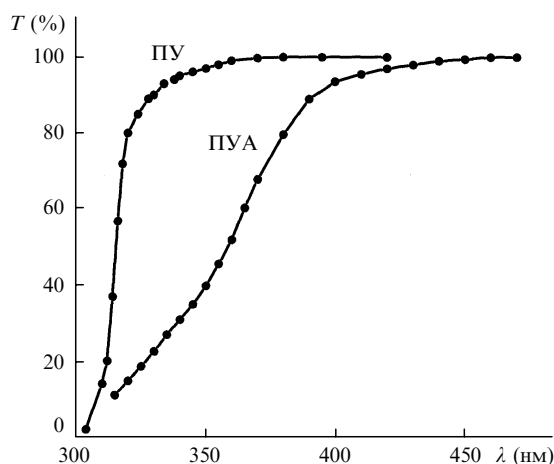


Рис.1. Коротковолновый край спектра пропускания ПУ и ПУА при толщине полимерной матрицы 1 мм.

сов, не опасаясь их разложения (полного и даже частичного).

Цель настоящей работы – исследование возможности использования ПУ в качестве матрицы ПАЛС на основе органических красителей. Для этого рассмотрены главные эксплуатационные характеристики ПАЛС, изготовленных на основе близких по физическим свойствам полимерных матриц – ПУ и ПУА. Установлено, что ПУ имеет высокую прозрачность в широком спектральном диапазоне (0.32–2.20 мкм), который охватывает практически всю область, где используются красители. Приведенный на рис.1 коротковолновый край спектра пропускания указывает на возможность использования матриц из ПУ для получения ПАЛС с накачкой классическими когерентными источниками – как азотным лазером ( $\lambda_p = 337$  нм), так и более длинноволновыми. В свою очередь интенсивное поглощение на этом крае в спектре ПУА свидетельствует о невозможности изготовления ПАЛС на его основе в ближней УФ области. Полиуретановая матрица при вариации соотношения исходных компонентов позволяет получать высокоэластичную компози-

\*Институт физики НАН Украины, 03028 Киев, просп. Науки, 46

\*\*Институт органической химии НАН Украины, 02094 Киев, ул. Мурманская, 5

цию с показателем преломления, который можно изменять в пределах 1.48–1.52. Выравнивание показателей преломления полимера и оптической подложки (стекло, кварц) дает возможность минимизировать пассивные потери при конструкции ПАЛС в виде триплекса.

Лучевая прочность полимерной матрицы из ПУ определялась на длине волны второй гармоники ( $\lambda = 532$  нм) одномодового ИАГ-лазера, работающего в монопериодном режиме. Порог одноимпульсного разрушения  $E_d$  при длительности импульса 15 нс и диаметре зоны облучения 200 мкм составил свыше 15 Дж/см<sup>2</sup>, что в 1.5 раза превышает таковой для ПУА [2] при тех же условиях.

Следует отметить, что полимерные матрицы активных сред испытывают более жесткие лучевые и тепловые нагрузки при взаимодействии с излучением накачки и генерации по сравнению с ПЛЗ. 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 [11]. Увеличение концентрации красителей повышает также вероятность образования ионных пар, в том числе контактных [12], в которых возможен фотоперенос электрона от аниона к катиону [13], приводящий к образованию активных нейтральных радикалов.

При прочих равных условиях для накачки ПАЛС используются значительно большие плотности мощности, чем для просветления ПЛЗ. Это обусловлено тем, что для эффективной генерации необходимо создать как можно большую инверсную населенность уровней, а для модуляции добротности необходимо только достичь равенства населенностей основного и возбужденного уровней. Кроме того, дополнительное увеличение энергетической нагрузки на ПАЛС по сравнению с ПЛЗ происходит вследствие поглощения излучения на двух длинах волн (накачки и генерации). Известно, что лучевая прочность полимерных матриц снижается при уменьшении длины волны накачки [14]. Разработанные нами ПЛЗ на основе ПУ были испытаны в твердотельных лазерах с  $\lambda = 694$  нм [15], 1060, 1079 нм [10, 16] и 1320–1350 нм [17, 18], т. е. при значительно больших длинах волн, чем использованная в настоящей работе  $\lambda_p = 532$  нм.

Большинство лазерных полимерных материалов имеют интенсивные полосы поглощения в области, резонансной двухквантовым переходам наиболее употребимых частот накачки. Например, энергия электронного перехода в полимере с  $\lambda_{\max} = 266$  нм эквивалентна поглощенной энергии двух фотонов накачки с  $\lambda_p = 532$  нм. Поэтому при использовании мощной накачки возможно появление дополнительного канала деградации ПАЛС по сравнению с ПЛЗ вследствие двухфотонного поглощения.

Целенаправленные исследования, выполненные в работах [1, 3, 4] 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 ПММА низко- и высокомолекулярных добавок дало возможность повысить лучевую прочность данного полимера до эксплуатационных параметров [3, 4].

Использование сетчатого ПУА [2, 7, 19, 20], и особенно исследуемого ПУ, позволяет получать ПАЛС, матрица которых обладает высокоэластичными свойствами в широком температурном интервале. Такие элементы могут работать с высокими импульсными нагрузками без применения пластифицирующих добавок к полимеру.

Оба типа активных сред, различающихся полимерными матрицами, изготавливались в виде триплекса – полимерного слоя, заключенного между двумя подложками. Элементы из ПУА выполнены по технологии, описанной в [2, 7, 19]. Основные приемы изготовления полимерных элементов из ПУ представлены в наших работах [10, 17, 21]. Для опытов выбрано по одному органическому красителю из трех наиболее применяемых для генерации классов: ксантенового – родамин 6Ж (R6G), полиметинового – астрафлорин (НІС), пиррометинового – пиррометин 597 (PM597).

Основными эксплуатационными характеристиками ПАЛС являются ресурс наработки  $N$ , эффективность генерации  $\eta$  и фотостойкость. Для исследования фотостойкости изготавливались триплексы, в которых в качестве подложек применялись кварцевые стекла. Толщина активированной красителем полимерной пленки из ПУ и ПУА в опытах по фотостойкости равнялась 300 мкм. Оптическая плотность  $D$  в максимуме основного перехода составляла порядка единицы. Облучение образцов осуществлялось светом ксеноновой лампы, имеющей непрерывное спектральное распределение излучения в УФ и видимой областях, при интенсивности в зоне облучения 50 мВт/см<sup>2</sup>. Изменение оптической плотности полимерных образцов в зависимости от дозы падающего света  $E$  контролировалось в максимуме полосы поглощения конкретного красителя спектрофотометром Shimadzu UV-3100. На рис.2 приведены кинетические зависимости фотодеструкции красителей в полимерных матрицах;

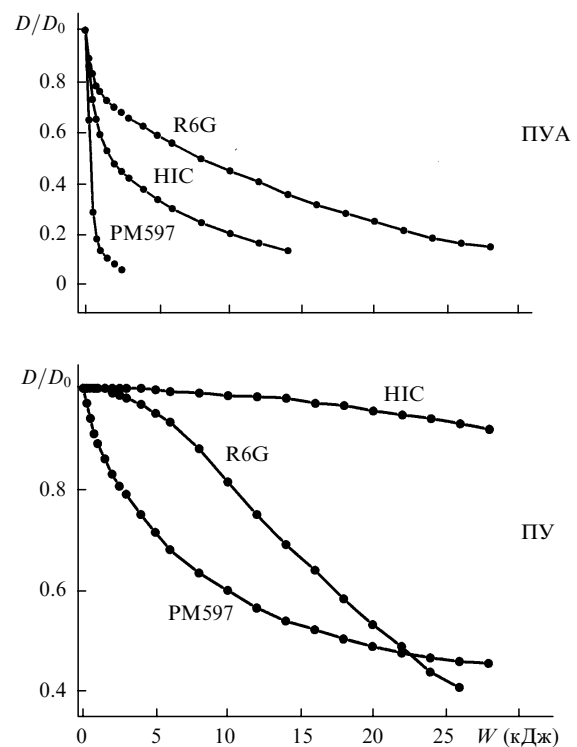


Рис.2. Зависимость нормированной оптической плотности полимерных элементов  $D/D_0$  от энергии облучения  $W$  для красителей R6G, HIC, PM597 в ПУА и ПУ.

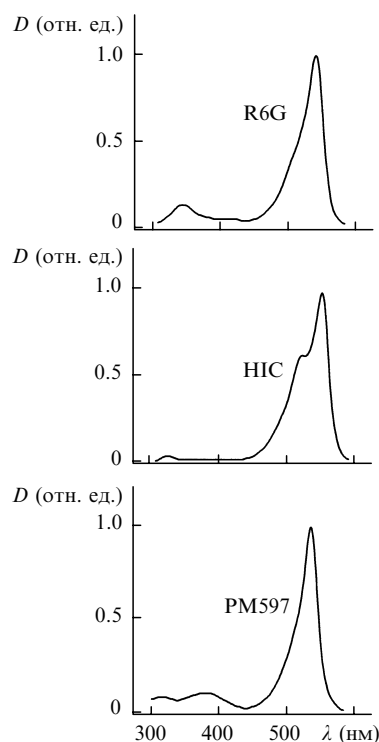


Рис.3. Спектры поглощения R6G, HIC и PM597 в ПУ.

видно существенное увеличение фотостойкости красителей при переходе от ПУА к ПУ.

Неожиданным оказалось то, что краситель с каркасной молекулярной структурой PM597 оказался наименее фотостойким в обоих полимерах. Наоборот, краситель HIC с открытой полиметиновой цепью, которая обладает повышенной чувствительностью к фотохимическим реакциям, обнаружил наибольшую фотостойкость. Установлено, что в спектрах поглощения PM597 в области 320–420 нм имеется довольно интенсивное поглощение, тогда как у HIC оно в этой области отсутствует (рис.3).

Таким образом, можно заключить, что в фотохимическом разложении первого красителя основную роль при облучении УФ излучением играют электронные переходы в высшие возбужденные состояния. 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 колебательные состояния полимеров с образованием свободных радикалов макромолекул. Поскольку полосы поглощения красителей в УФ области перекрываются с соответствующими полосами полимеров сильнее в ПУА, чем в ПУ (рис.1 и 3), то и вероятность образования таких радикалов у них должна быть выше, что подтверждают кривые фотодеструкции на рис.2.

Для исследования ресурса работы ПАЛС 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  $D(\lambda_p) = 5$ . Генерация на ПАЛС осуществлялась в бездисперсионном резонаторе длиной 16 см, состоящем из диэлектрических зеркал с коэффициентами отражения  $R_1 = 99.5\%$  и  $R_2 = 30\%$ . Применялся квазипродольный вариант возбуждения. Угол между

пучками накачки и 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 в пятно  $\varnothing 1.75$  мм линзой с фокусным расстоянием  $\sim 1$  м. Плотность падающей на полимерный образец энергии излучения накачки равнялась, таким образом,  $1.45$  Дж  $\times$  см<sup>-2</sup>. При частоте следования импульсов 3 Гц средняя плотность мощности накачки составляла  $4.35$  Вт/см<sup>2</sup>.

Известно [5], что ресурс ПАЛС зависит от плотности энергии и средней мощности накачки. Мы специально установили такие жесткие условия по накачке для проверки работоспособности наших элементов при мощном возбуждении и получения экспресс-информации о ресурсе лазерных элементов, выполненных на основе двух полимерных матриц. При этом мы использовали тонкие окрашенные полимерные слои, помещенные между стеклами.

В толстых полимерных слоях ресурсные характеристики существенно улучшаются, как, например, в образцах ПММА [22]. Это связано прежде всего с ослаблением описанных выше побочных концентрационных эффектов и с тепловой разгрузкой полимерного слоя. Дело в том, что при уменьшении концентрации красителя толщина полимерного слоя возрастает, в результате чего сохраняется оптимальная оптическая плотность. С увеличением толщины слоя возрастает рабочий объем, а следовательно, повышаются его теплоемкость и теплопроводность. Это обуславливает отсутствие перегрева указанного объема. Так, в работе [22] толщина ПММА равнялась 20–30 мм. Высокая лучевая прочность как испытуемого ПУ, так и сравниваемого с ним ПУА позволила применять столь жесткие условия по накачке в одну и ту же точку поверхности полимера при малой толщине его слоя, не прибегая к сканированию площади ПАЛС.

Ресурсные зависимости  $\eta$  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  $\eta$  на всех образцах с ростом  $N$  происходило вследствие обесцвечивания красителя; при этом полимерная матрица не повреждалась. В исследуемых красителях ресурс работы ПАЛС на ПУ был больше, чем в ПУА.

В ПАЛС на ПУ имеет место увеличение начальной эффективности  $\eta_0$  по отношению к элементам из ПУА. Значения  $\eta_0$  для трех красителей в двух сравниваемых полимерных матрицах приведены в табл.1. Отмеченная

Табл.1. Основные эксплуатационные характеристики ПАЛС.

Тип ПАЛС	$\eta_0$ (%)	$N_{1/2}$	$E_{1/2}$ (кДж/см <sup>2</sup> )
R6G в ПУА	29	900	8.0
R6G в ПУ	34	8000	23.0
HIC в ПУА	30	700	2.0
HIC в ПУ	32	6500	160.0
PM597 в ПУА	58	2200	0.3
PM597 в ПУ	75	12200	18.5

Примечание:  $N_{1/2}$  – число импульсов, при котором  $\eta_0$  падает в 2 раза;  $E_{1/2}$  – энергетическая доза облучения, при которой  $D$  падает в 2 раза.

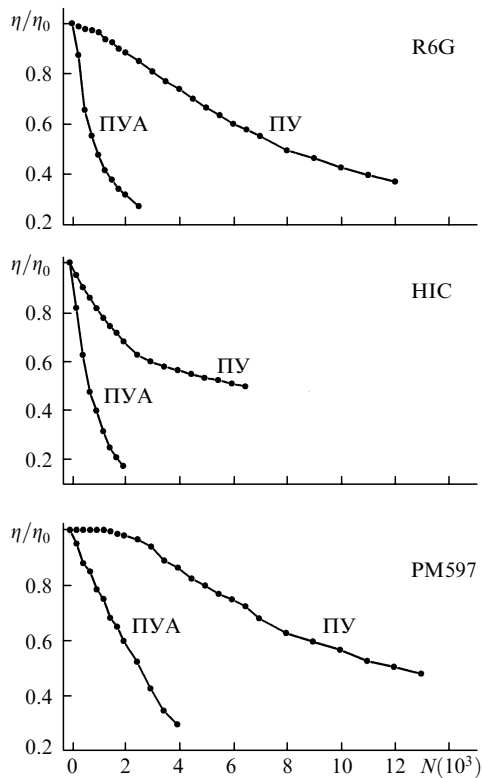


Рис.4. Нормированные ресурсные зависимости эффективности генерации для R6G, H1C и PM597 в ПУА и ПУ.

нами в работе [7] на стадии изготовления элементов из ПУА деструкция красителя подтверждена позже в [23], где среды на основе ПММА приготавливались с использованием радикальной реакции отверждения при помощи бензоил-пероксида. Деструкция красителя приводит к образованию продуктов распада, поглощение которых находится в области генерации.

Для прямого обнаружения поглощения, вызванного продуктами распада красителей, на спектрофотометре были прописаны длинноволновые участки кривых поглощения олигомерных композиций ПАЛС на основе ПУА до начала отверждения (нижние кривые на рис.5) и после его окончания (верхние кривые на рис.5). Виден не только батохромный сдвиг всей кривой, но и заметное поглощение в области генерации, обусловленное продуктами

разложения красителей, что влияет на эффективность преобразования  $\eta$ . Аналогичные участки спектров ПАЛС на основе ПУ до и после отверждения мы не приводим, т. к. после отверждения в спектрах поглощения изменений не наблюдалось.

Увеличение начальной эффективности  $\eta_0$  в ПУ по сравнению с ПУА можно объяснить отсутствием разложения красителей в первой матрице на этапе ее изготовления. Причем в ПАЛС на основе H1C в ПУА имеют место минимальная деструкция красителя и незначительное поглощение в области генерации (см. рис.5), чем и объясняется малое различие в  $\eta_0$  для ПУ и ПУА (см. табл.1).

При изготовлении ПАЛС, используемых для получения излучения с узкой линией генерации, важным параметром является оптическая однородность среды [24] как по коэффициенту преломления, так и по концентрации красителя. Поскольку при изготовлении ПАЛС на основе ПУА методом фотоотверждения имеет место разложение красителей, исследовано распределение концентрации красителя по толщине элемента.

Для этого при изготовлении ПАЛС олигомерная композиция размещалась послойно между тонкими (0.6 мм) кварцевыми подложками. Толщина отдельного полимерного слоя равнялась 200 мкм. Следовательно, ПАЛС имела структуру полиплекса, состоящую из 10 полимерных слоев и одиннадцати подложек. Отверждение проводилось путем облучения лампой ЛУФ-4 со стороны первой подложки, причем время облучения было равным таковому при изготовлении рабочих ПАЛС с одним полимерным слоем толщиной 2 мм. После фотополимеризации весь образец был расчленен на 10 отдельных полимерных слоев, и для каждого слоя измерялась оптическая плотность  $D$  на длине волны накачки ( $\lambda_p = 532$  нм).

На рис.6 представлены гистограммы распределения оптической плотности послойно до и после отверждения красителя PM597 в ПУА. Подобным образом (весьма неоднородно) в рабочем образце с толщиной монослоя 2 мм после отверждения распределяется и концентрация красителя по толщине, т. к.  $D$  и концентрация связаны линейно. Следовательно, в ПАЛС, изготавливаемых методом радикальной фотополимеризации, краситель из-за фотораспада распределяется по толщине неоднородно. При обработке гистограмм выявлено, что в процессе ра-

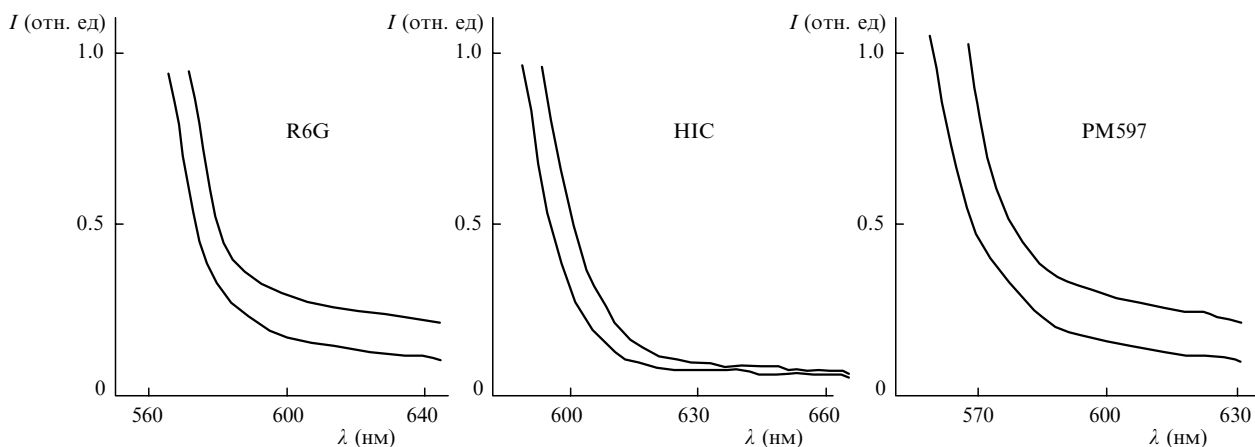


Рис.5. Длинноволновые участки спектра поглощения для красителей R6G, H1C и PM597 в олигомерных композициях ПАЛС на основе ПУА до (нижние кривые) и после (верхние кривые) отверждения.

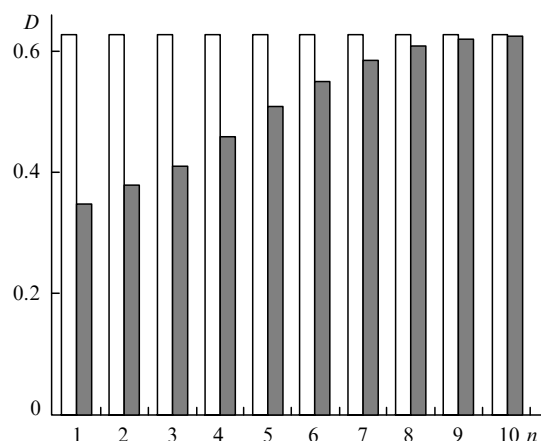


Рис.6. Послойное распределение оптической плотности красителя RM597 до отверждения (светлые столбцы) и после него (заштрихованные столбцы). Облучение ПАЛС осуществлялось со стороны первого слоя; засечки – границы слоев;  $n$  – номер слоя.

дикального фотоотверждения исходное количество красителей R6G, HIC и RM597 в ПУА уменьшается вследствие распада на 13, 6 и 19 % соответственно.

Среди выбранных красителей HIC в ПУА имеет меньшую фотостойкость, чем R6G (см. рис.2); кроме того, необходимое время отверждения олигомерной композиции с ним при изготовлении ПАЛС в 6 раз меньше (вследствие отсутствия поглощения в области 320–420 нм собственно красителем), чем при такой же реакции с R6G. Этим и объясняется незначительный распад HIC в ПУА на этапе изготовления и малое различие начальных эффективностей исследуемых матриц. Деструкции молекул использованных красителей при изготовлении ПАЛС на основе ПУ не происходит, что указывает на их однородное распределение в полимерной матрице.

Таким образом, можно заключить, что фотостойкость, ресурс, эффективность преобразования и оптическая неоднородность концентрации красителя по толщине у ПАЛС на основе ПУА меньше, чем в матрице из ПУ. Это обусловлено значительно более сильным разложением красителей в первом случае. С одной стороны, причиной этого является частичное разложение красителей в ПУА уже на стадии полимеризации за счет радикальной реакции, создающей благоприятные условия для дальнейшей активации радикальных реакций при взаимодействии ПАЛС со световым излучением.

С другой стороны, преимущество ПУ заключается не только в способе полимеризации, но и в его довольно высокой полярности [12]. По величине диэлектрической проницаемости он превосходит ПУА, эпоксида и ПММА [12], поэтому солеобразные красители в ПУ более диссоциированы, чем в упомянутых полимерах. Разъединению противоионов в ПУ 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 [12]. В результате вероятность образования контактных ионных пар в ПУ гораздо меньше, чем в ПУА, эпоксидах и ПММА, а следовательно, возможность фотопереноса электрона и ассоциации контактных ионных пар за счет электростатического притяжения их разноименных зарядов в ПУ, в отличие от перечисленных полимеров, сведена к минимуму [12].

Действительно, замена хлорид аниона у HIC тетрафторборатом, обладающим более высокой нуклеофильностью и сродством к электрону, практически не влияет на спектрально-генерационные и ресурсные характеристики красителя в ПУ, тогда как в ПУА наблюдаются небольшое уширение и гипсохромный сдвиг полосы поглощения, а также увеличение фотостойкости. Зависимость этих характеристик от природы противоиона указывает, согласно [12], на образование контактных ионных пар в ПУА (в отличие от ПУ).

Показательно, что RM597, обладающий наименьшей фотостойкостью среди исследованных красителей, имеет наибольший ресурс работы (см. рис.4 и табл.1). Этот факт является еще одним подтверждением участия высших возбужденных состояний RM597 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 оно велось и в область перехода  $S_0 \rightarrow S_2$ .

Внутриионный краситель RM597 является химически связанной контактной ионной парой, диссоциация которой невозможна ни при какой полярности полимера. Однако заряды в ней достаточно удалены друг от друга. Кроме того, вследствие значительной электроотрицательности атомов фтора отрицательный заряд весьма локализован на борфторидном мостике, поэтому внутримолекулярный фотоперенос электрона от бора к азоту в RM597 более затруднен, чем в химически несвязанных контактных парах катионных красителей HIC и R6G, у которых противоионы могут сближаться и удаляться в зависимости от полярности и сольватирующей способности среды.

В результате этого RM597 обладает большим ресурсом в ПУ и в ПУА, чем HIC и R6G. Как и в солеобразных катионных красителях, электростатическое притяжение между разноименными зарядами внутриионного RM597 может объединять их молекулы в агрегаты. По изложенным выше причинам в ПУ эти процессы гораздо менее вероятны, чем в ПУА. Данное обстоятельство в сочетании с мягким способом полимеризации обеспечивает лучшие ресурсные характеристики RM597, а также HIC и R6G в ПУ.

Таким образом, ПУ является перспективным материалом не только для ПЛЗ, но и для ПАЛС на основе органических красителей. При этом в него, в отличие от других полимеров, могут быть введены без разложения красители любых классов. Согласно критериям, сформулированным для окрашенных полимерных лазерных сред в обзоре [11], ПАЛС на основе ПУ имеют большой потенциал для повышения фотохимических, ресурсных и генерационных характеристик за счет оптимизации окрашенных матриц.

1. Громов Д.А., Дюмаев К.М., Маненков А.А., Маслоков А.П., Матюшин Г.А., Нечитайло В.С., Прохоров А.М. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **46**, 1956 (1982).
2. Безродный В.И., Пржонская О.В., Тихонов Е.А., Бондар М.В., Шпак М.Т. *Квантовая электроника*, **9**, 2455 (1982).
3. Громов Д.А., Дюмаев К.М., Маненков А.А., Маслоков А.П., Матюшин Г.А., Нечитайло В.С., Прохоров А.М. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **48**, 1384 (1984).
4. Дюмаев К.М., Маненков А.А., Маслоков А.П., Матюшин Г.А., Нечитайло В.С., Прохоров А.М. *Изв. АН СССР. Сер. физич.*, **49**, 1084 (1985).
5. Денисов Л.К., Кыгина И.Г., Кытин В.Г., Цагоева С.А., Сапры-

- кин Л.Г., Константинов Б.А. *Квантовая электроника*, **24**, 119 (1997).
6. Кравченко А.А., Маненков А.А., Матюшин Г.А. *Квантовая электроника*, **23**, 1075 (1996).
  7. Безродный В.И., Бондар М.В., Козак Г.Ю., Пржонская О.В., Тихонов Е.А. *ЖПС*, **50**, 711 (1989).
  8. Бермас Т.Б., Зайцев Ю.С., Костенич Ю.В., Пактыр М.К., Парамонов Ю.М., Рубинов А.Н., Смирнов А.Ю., Эффендиев Т.Ш. *ЖПС*, **47**, 569 (1987).
  9. Борткевич А.В., Гейдур С.А., Карапетян О.О., Кузнецов А.Р., Ланькова С.М., Морозов А.Г., Поляков В.Е., Сидякова В.П. *ЖПС*, **50**, 210 (1989).
  10. Безродный В.И., Вовк Л.В., Деревянко Н.А., Ищенко А.А., Карабанова Л.В., Мушкало И.Л. *Квантовая электроника*, **22**, 245 (1995).
  11. Ищенко А.А. *Квантовая электроника*, **21**, 513 (1994).
  12. Ищенко А.А. *Строение и спектрально-люминесцентные свойства полиметиновых красителей* (Киев, Наукова думка, 1994).
  13. Ищенко А.А. *Теоретич. и эксперим. химия*, **34**, 214 (1998).
  14. Алдолшин М.И., Маненков А.А., Нечитайло В.С., Погонин В.И. *ЖТФ*, **49**, 2498 (1979).
  15. Безродный В.И., Деревянко Н.А., Ищенко А.А. *Квантовая электроника*, **23**, 353 (1996).
  16. Безродный В.И., Ищенко А.А., Карабанова Л.В., Сломинский Ю.Л. *Квантовая электроника*, **22**, 849 (1995).
  17. Безродный В.И., Деревянко Н.А., Ищенко А.А., Сломинский Ю.Л. *Квантовая электроника*, **22**, 853 (1995).
  18. Устименко Н.С., Гулин А.В. *Приборы и техника эксперимента*, № 3, 99 (1998).
  19. Безродный В.И., Бондар М.В., Пржонская О.В., Тихонов Е.А. *Изв.АН СССР.Сер.физич.*, **54**, 1476 (1990).
  20. Бондар М.В., Пржонская О.В. *Квантовая электроника*, **25**, 775 (1998).
  21. Безродный В.И., Ищенко А.А. *Квантовая электроника*, **25**, 871 (1998).
  22. Anderson R.S., Hermes R.E., Matyushin G.A., Nechitailo V.S., Picarello S.C. *Proc.SPIE*, **3265**, 13 (1998).
  23. Rahn M.D., King T.A., Gorman A.A., Hamblett I. *Appl.Optics*, **36**, 5862 (1997).
  24. Duarte F.J. *Appl.Optics*, **33**, 3857 (1994).
- V.I.Bezrodnyi, A.A.Ishchenko. Active laser media based on coloured polyurethane.**
- The advantages of a polyurethane matrix over other polymers, which are extensively used as active media for dye lasers, are analysed. This matrix exhibits the photostability, operating life, radiation resistance, conversion efficiency, and homogeneity of the dye distribution that surpass these properties for active media based on polyurethane acrylate, which has close physical and operation properties. These advantages result not only from the milder polymerisation conditions but also by a lower probability of the formation of ion pairs and dye aggregates. A substantial suppression of these processes in polyurethane is explained by its greater polarity and solvation ability compared to polyurethane acrylate.