

# Аномальная зависимость генерационных характеристик растворов красителей от спектрального состава возбуждающего излучения при микросекундной когерентной накачке

В.В.Тарковский, В.Ю.Курстак, С.С.Ануфрик

*Обнаружена аномальная зависимость генерационных характеристик этанольных растворов кумариновых, родаминовых, оксазиновых и других классов лазерных красителей от спектрального состава возбуждающего излучения при микросекундной когерентной накачке, связанная со структурой спектров наведенного синглет-синглетного поглощения и спектров поглощения короткоживущих продуктов фотовозбуждения. Выяснение влияния указанных факторов позволяет обеспечить оптимальный подбор спектров накачки, а также повысить эффективность и стабильность спектральных характеристик лазерных систем на красителях микросекундного диапазона длительностей.*

**Ключевые слова:** лазер-преобразователь на красителях, наведенное поглощение, синглет-синглетное поглощение, триплет-триплетное поглощение, продукты фотовозбуждения.

## 1. Введение

В настоящее время для когерентной импульсной накачки растворов красителей используются различные лазерные источники. К наиболее распространенным можно отнести лазеры на  $N_2$ ,  $XeCl$ ,  $KrF$ ,  $XeF$ , лазер на парах меди, а также на  $YAG : Nd^{3+}$ ,  $Al_2O_3 : Cr^{3+}$ ,  $Al_2O_3 : Ti^{3+}$ . Из газовых лазеров наиболее перспективными являются лазеры на галогенидах инертных газов (экимерные лазеры). Они весьма удобны для накачки красителей, т. к. практически все красители имеют дополнительные полосы поглощения в УФ области спектра и вследствие этого могут накачиваться излучением одного лазера [1]. Недостатком данных источников является то, что не все красители обладают достаточной фотостойкостью под действием УФ излучения накачки.

Лазер  $YAG : Nd^{3+}$  с преобразованием частоты вверх обеспечивает более высокие пиковые и средние мощности, чем азотный лазер. Благодаря хорошему качеству пучка, которое удается получить в лазере на  $YAG : Nd^{3+}$ , возможно эффективное смещение частот лазера на красителях и лазера накачки и расширение спектрального диапазона перестраиваемого излучения от 217 до 5000 нм [2]. Однако для получения генерации в широком спектральном диапазоне необходим ряд дорогостоящих и чувствительных к внешним воздействиям устройств преобразования частоты, что создает трудности в производстве и эксплуатации таких систем.

Достоинством лазера на парах меди как источника когерентной накачки растворов красителей является очень большая частота следования импульсов (порядка 10 кГц) и высокая (порядка 100 Вт) средняя мощность [3]. Его недостаток – большая длина волны, ограничивающая ко-

ротковолновую границу перестройки излучения зеленой областью.

Таким образом, из краткого рассмотрения наиболее употребляемых источников когерентной накачки лазеров на красителях можно сделать вывод о том, что источники, применяющиеся при возбуждении растворов красителей, имеют отдельные, далеко разнесенные длины волн [4]. Поэтому авторы работы [4] менее всего обращали внимание на вопрос о зависимости эффективности генерации указанных активных сред от длины волны накачки. Существующие сейчас источники накачки позволяют более детально и систематически изучить вопрос о спектральной эффективности генерации.

Проведенные в последнее время исследования показывают, что для некоторых красителей при накачке импульсами наносекундной длительности наблюдается аномальная зависимость эффективности генерации от длины волны возбуждающего излучения. Ранее считалось, что максимальная эффективность генерации достигается при накачке в максимум основной полосы поглощения раствора красителя [5, 6]; в работах [7–10] показано, что эффективность генерации возрастает на длинноволновом крыле спектра поглощения по мере плавного изменения длины волны накачки, достигает максимума и затем медленно спадает. Выяснено, что указанная закономерность имеет место в высокодобротных резонаторах при больших интенсивностях накачки и больших концентрациях растворов. Однако остается неясным механизм данного явления, а также то, наблюдается ли такая зависимость для других классов красителей и при других временных режимах возбуждения.

Анализ литературных источников показывает, что подобные исследования проводились лишь при возбуждении импульсами наносекундной длительности [8, 9], для чего использовалась вторая гармоника лазера на  $Al_2O_3 : Ti^{3+}$ . Правда, при этом спектральный диапазон накачки был ограничен интервалом 350–450 нм. Авторы [7] вели исследования при накачке раствора ПОПОП в пределах первой полосы поглощения, плавно изменяя длину волны. Позднее подобные исследования были про-

В.В.Тарковский, В.Ю.Курстак, С.С.Ануфрик. Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Белоруссия, 230023 Гродно, ул. Ожешко, 22; e-mail: tarkovsky@grsu.grodno.by

Поступила в редакцию 12 июня 2002 г, после доработки – 8 января 2003 г.

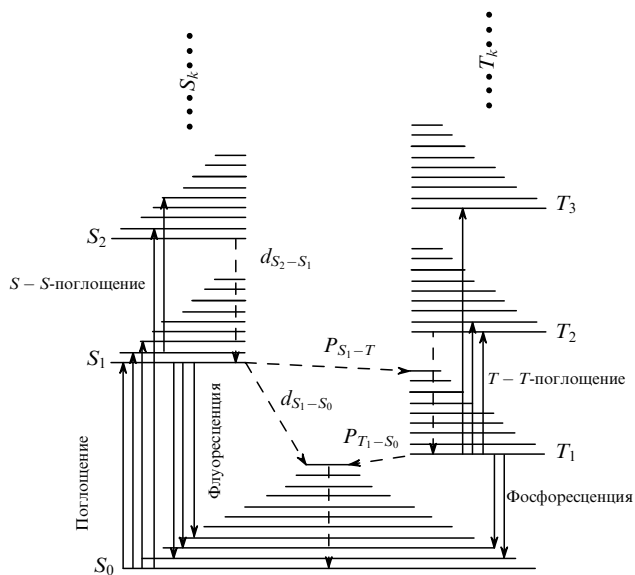


Рис.1. Схема синглетных ( $S_k$ ) и триплетных ( $T_k$ ) уровней энергии молекулы лазерного красителя (штриховыми стрелками показаны безызлучательные переходы).

ведены и для некоторых других органических красителей (кумарин 120, перилен, нафталимиды) [10]. Некоторые авторы утверждают, что значительное влияние на наблюдаемые в экспериментах эффекты оказывают наведенные потери в канале возбужденных триплетных [11] и синглетных [12] уровней (рис. 1). Есть также работы, в которых, наоборот, показано, что влияние поглощения накачки в системе возбужденных синглет-синглетных и триплет-триплетных состояний на поведение зависимости эффективности генерации от длины волны накачки невелико [6].

В более ранних работах [13, 14] были подобраны пары красителей и определены оптимальные условия возбуждения в двухкаскадном лазере, в котором накачка лазера-преобразователя на растворах красителей производится излучением лазера на красителях с ламповой накачкой микросекундной длительности, обеспечивающие перекрытие спектрального диапазона 495–835 нм лазерными импульсами с энергией более 1 Дж при длительности 1 мкс. Пары красителей подбирались с таким расчетом, чтобы максимум длины волны генерации красителя в лазере накачки совпадал с максимумом длины волны поглощения красителя во втором каскаде.

Данная лазерная система имеет преимущество перед традиционным микросекундным лазером на красителях с ламповой накачкой. Вследствие минимальных стоксовых потерь и отсутствия в спектре накачки УФ и ИК составляющих обеспечивается генерация излучения с угловой расходимостью  $\sim 1$  мрад, благодаря чему яркость излучения увеличивается в 140–700 раз. Кроме того, в такой системе существенно возрастает ресурс работы красителя, находящегося во втором каскаде. В [15] показано, что использование задающего генератора с двухкаскадным возбуждением и построенных по этой схеме возбуждения усилителей позволяет получать перестраиваемые по спектру импульсы излучения с длительностью  $\sim 1$  мкс, расходимостью  $\sim 10^{-3}$  рад, спектральной шириной  $\sim 10^{-3}$  нм и энергией  $\sim 0.5$  Дж. Кроме того, как следует из экспериментов, лазер-преобразователь обладает высокой пространственной когерентностью генерируе-

мого излучения, вследствие чего рассматриваемый принцип построения может быть положен в основу установок художественной голографии (например, для получения портретов и съемки кинофильмов). Перспективность применения таких лазеров в этой области связана во многом с требованиями, предъявляемыми к длительности импульса генерации, которая, с одной стороны, должна соответствовать характеристикам фотоматериалов, а с другой – характерным скоростям изменения поверхностной структуры фотографируемых объектов, что приводит к снижению контраста регистрируемых голограмм. В частности, в портретной голографии наиболее быстрым движением является непроизвольное дрожание век и мускулов лица, что, как показывают оценки, требует применения импульсов излучения длительностью  $\sim 1$  мкс [16].

Кроме того, в настоящее время лазеры микросекундного диапазона используются для научных исследований в спектроскопии, нелинейной оптике, фотохимии, биологии и медицине. Например, в области интракорпоральной литотрипсии нашли широкое применение лазеры на красителях с ламповой накачкой микросекундной длительности. Разработкой и выпуском медицинских установок на основе лазеров указанного типа занимаются фирмы Candela (США), Tecnomed (Франция), Telemet Electronic (Германия) [17, 18].

Преимущество этих лазеров состоит, во-первых, в том, что они, являясь плавно перестраиваемыми по частоте источниками излучения, обеспечивают его селективное воздействие на почечный камень конкретного типа [19]. Во-вторых, импульсы излучения микросекундной длительности в сравнении с наносекундными импульсами не приводят к разрушению световода, тогда как после стандартного сеанса литотрипсии в мочеточнике могут оставаться частички кварцевого волокна и полимерной оболочки световода, длина которого составляет  $\sim 50$  см [13]. Кроме того, поскольку эффективность интракорпоральной литотрипсии во многом зависит от успешной световодной транспортировки лазерного излучения, а эффективность ввода излучения в световод – от расходимости излучения, то предлагаемый авторами лазер-преобразователь перспективен и в этой области, т. к. его излучение обладает хорошими пространственно-угловыми характеристиками.

Таким образом, в настоящей работе рассматриваются причины аномального поведения КПД генерации лазера-преобразователя на этанольных растворах кумариновых, родаминовых, оксазиновых и некоторых других классов лазерных красителей в зависимости от спектрального состава возбуждающего излучения, а также определяются условия, обеспечивающие реализацию высоких КПД генерации при когерентной накачке импульсами микросекундной длительности.

## 2. Экспериментальная установка и методика измерений

Экспериментальная установка, схема которой представлена на рис.2, состояла из оптического лазера на красителях с двухступенчатым возбуждением и системы измерения энергетических и спектральных характеристик генерируемого излучения. Источником микросекундной когерентной накачки служил лазер на красителях на основе модернизированного варианта коаксиальной лампы-кюветы конструкции Дзюбенко [20] (рис.3). Разряд-

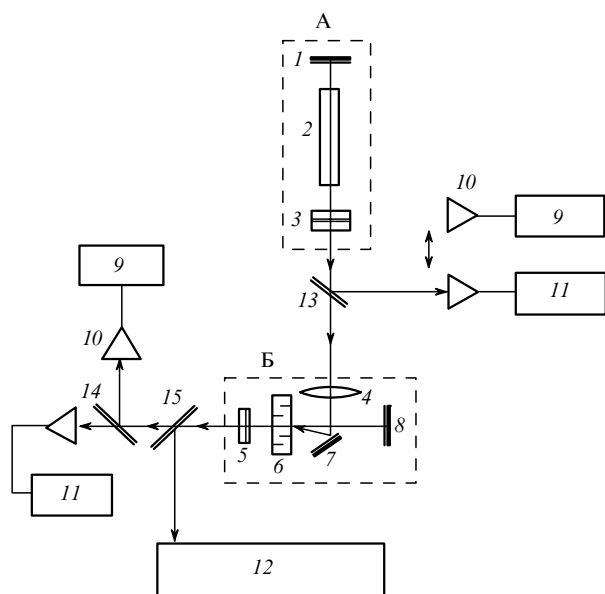


Рис.2. Схема экспериментальной установки (А – лазер на красителях на основе коаксиальной лампы-кюветы, Б – лазер на красителях с когерентной микросекундной накачкой (лазер-преобразователь)):

1 – «глухое» зеркало резонатора лазера на красителях с ламповой накачкой; 2 – коаксиальная лампа-кювета; 3 – выходное зеркало лазера на красителях с ламповой накачкой (стопа); 4 – фокусирующая линза; 5 – выходное зеркало лазера-преобразователя; 6 – кювета с этанольным раствором исследуемого красителя; 7 – поворотное зеркало; 8 – «глухое» зеркало лазера-преобразователя; 9 – двухлучевой запоминающий осциллограф С8-14; 10 – измеритель ФК-22; 11 – измеритель ИМО-2Н; 12 – дифракционный спектрограф ДФС-8; 13, 14, 15 – стеклянные поворотные пластины.

ный канал лампы-кюветы образован двумя коаксиально расположенными кварцевыми трубками 11, 12, зазор между которыми составляет  $\sim 1$  мм. Внутри трубки 12 находится кварцевая кювета 6 с внутренним диаметром 8 мм. Импульсный ток электрического разряда накопительной конденсаторной батареи проходит через корпус лампы-кюветы 2, играющий роль обратного токопровода, электроды лампы 14 и разрядный промежуток лампы 4. Для концентрации излучения накачки кювета между корпусом лампы и кварцевой трубкой 11 заполнена окисью магния. Откачка лампы и заполнение ее ксеноном производится через патрубок 1. Раствор генерирующего красителя прокачивается в кювету через патрубки 10, а раствор охлаждающей жидкости или трансформатора излучения – через патрубки 9. Все уплотняющие

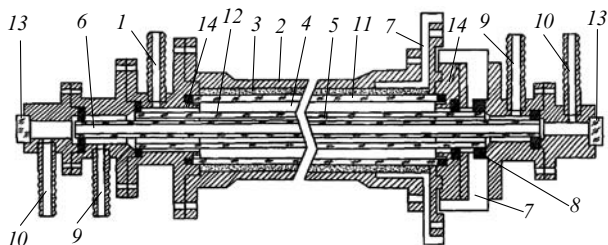


Рис.3. Схема коаксиальной лампы-кюветы:

1 – канал откачки воздуха и напуска ксенона; 2 – корпус лампы-кюветы; 3 – светоотражающее покрытие из MgO; 4 – разрядный промежуток; 5 – рубашка кюветы; 6 – кварцевая кювета; 7 – изоляторы из фторопласта; 8 – уплотнения из силиконовой резины; 9 – канал прокачки охлаждающей жидкости; 10 – канал прокачки красителя; 11 – кварцевая трубка отражателя; 12 – кварцевая трубка рубашки кюветы; 13 – окна кюветы; 14 – электроды лампы.

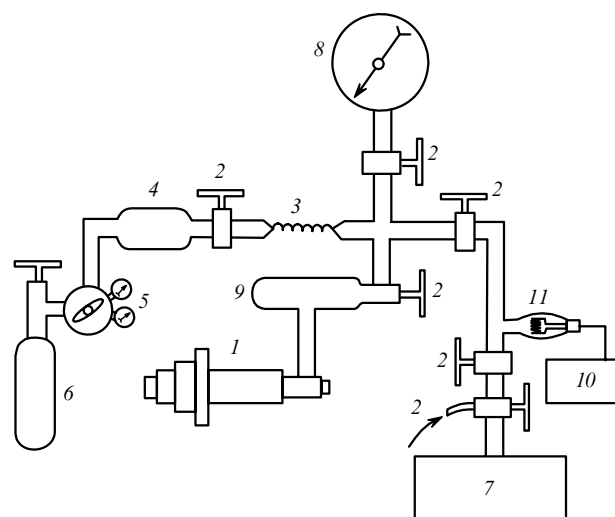


Рис.4. Схема откачки и напуска рабочим газом лампы-кюветы:

1 – лампа-кювета; 2 – вакуумные краны; 3 – капиллярный натекаль; 4 – резервная емкость; 5 – редуктор; 6 – баллон с ксеноном; 7 – форвакуумный насос; 8 – вакуумметр; 9 – балластная емкость; 10 – вакуумметр термопарный; 11 – измерительная лампа.

соединения 8 лампы-кюветы выполнены из силиконовой резины. Кювета имеет вклеенные просветленные окна.

Откачка лампы-кюветы и напуск ксенона осуществляются с помощью газовакуумной системы, схема которой представлена на рис.4. Вначале вся вакуумная система, вплоть до вентиля баллона 6 с ксеноном, при открытых вакуумных кранах откачивается с помощью форвакуумного насоса 7 до давления  $5 \times 10^{-3}$  Тор. Затем с помощью редуктора 5 производится заполнение резервной емкости 4 ксеноном до давления  $\sim 1$  атм (вакуумный пост при этом перекрыт с помощью вакуумного крана). После этого лампа-кювета 1 заполняется ксеноном (контроль осуществляется вакуумметром 8). Для обеспечения стабильности параметров лампы-кюветы по мере необходимости осуществляется перезаполнение лампы газом.

Резонатор ЛК был образован плоским диэлектрическим зеркалом с  $R = 100\%$  и стопой из трех плоскопараллельных пластин из стекла К8, которая в данном случае являлась оптимальным выходным зеркалом. В разрядный контур входили десять соединенных параллельно малоиндуктивных конденсаторов К75-48 общей емкостью 2.2 мкФ и ионитронный разрядник ИРТ-6. Напряжение питания составляло 17 кВ. Разрядный промежуток лампы заполнялся ксеноном при давлении 20–30 Тор. Длительность светового импульса накачки по уровню 0.5 составляла 2 мкс при фронте нарастания 0.8 мкс, электрическая энергия импульса накачки равнялась 300 Дж.

Резонатор лазера-преобразователя второй ступени (лазер Б, см. рис.2) был образован плоским «глухим» зеркалом, а в качестве выходного использовалась стопа. Возбуждение генерации производилось по почти продольной схеме под углом  $5-7^\circ$  к оси резонатора. В качестве активных сред в лазере первой ступени (лазер А) с целью перекрытия широкого спектрального диапазона (в пределах основной полосы поглощения исследуемых красителей) использовались этанольные растворы наиболее эффективных лазерных красителей при концентрации  $1.2 \times 10^{-4}$  моль/л (табл.1). Концентрация исследуемых красителей выбиралась такой, чтобы обеспечить на дли-

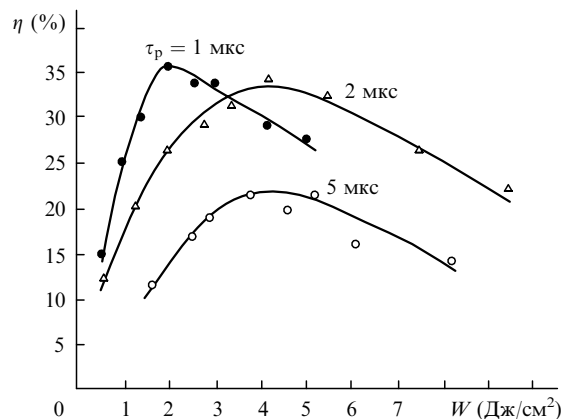
Табл.1. Активные среды на основе красителей, использовавшиеся в лазере накачки.

Активная среда лазера накачки	$\lambda_p^{\max}$ (нм)
Кумарин 120	440
Кумарин 1	460
Кумарин 102	485
Кумарин 30	505
Кумарин 334	520
3-карбаминоюлолидин-2-иминокумарин	525
Кумарин 6	535
2-(7-диэтиламинокумарин-3-ил) бензимидазолий хлорид	550
Родамин 110	560
2-(юлолидинкумарин-3-ил) бензимидазолий хлорид	570
Родамин Ж	590
Родамин С	610
Родамин 4С	630
Оксазин 17	665

не волны накачки коэффициент поглощения  $K \sim 15 - 25 \text{ см}^{-1}$ . Такое поглощение в типичных красителях соответствует концентрации  $10^{-4}$  моль/л ( $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ ) [21]. Растворы исследуемых красителей заливались в плоскопараллельную кювету с активным слоем толщиной 5 мм. Излучение накачки фокусировалось на кювету в пятно размером  $\sim 4$  мм, требуемый уровень интенсивности возбуждения задавался с помощью нейтральных светофильтров. Энергия генерации регистрировалась измерителем ИМО-2Н, а временные характеристики импульсов накачки и генерации – измерителем ФК-22, сигнал с которого подавался на двухлучевой универсальный запоминающий осциллограф С8-14. Чтобы обезопасить измеритель от воздействий мощного лазерного излучения, на его пути устанавливались нейтральные светофильтры; излучение к измерителю подводилось через кварцевый световод. Спектры генерации регистрировались при помощи дифракционного спектрографа ДФС-8. Здесь также использовалась световодная транспортировка излучения. Спектры поглощения растворов красителей измерялись при помощи спектрофотометра Spekord M-40 или СФ-26.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

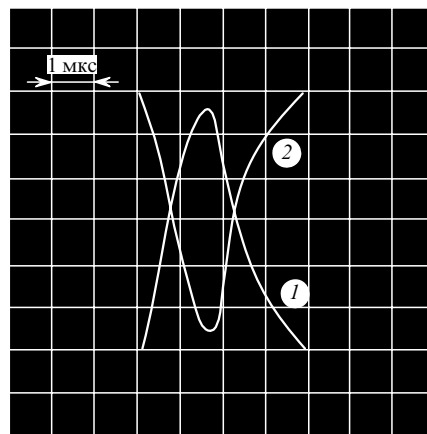
Проведенные ранее эксперименты, результаты которых описаны в работах [13, 14], показали, что при микросекундных импульсах возбуждения, длина волны излучения которых совпадает с максимумом основной полосы поглощения родамина 6Ж ( $\lambda_p^{\max} = 525 \text{ нм}$ ), КПД генерации лазера на исследуемом растворе красителя вначале возрастает с увеличением плотности энергии возбуждения, а затем начинает уменьшаться. На рис.5 приведены зависимости КПД генерации лазера-преобразователя на этанольном растворе родамина 6Ж при возбуждении со стороны выходного зеркала излучением лазера с ламповой накачкой на этанольном растворе кумарина 334 с длиной волны  $\sim 520 \text{ нм}$  от плотности энергии излучения накачки для длительностей 1.0, 2.0 и 5.0 мкс, измеренных на половине интенсивности (длительность импульса излучения накачки изменялась путем изменения парамет-

Рис.5. Зависимости КПД генерации  $\eta$  лазера-преобразователя на этанольном растворе родамина 6Ж от плотности энергии излучения  $W$  при разных длительностях накачки  $\tau_p$ .

ров разрядного контура лазера на красителях с ламповой накачкой, а энергия в зависимости от длительности составляла 1.2–2.2 Дж).

Исследования проводились при оптимальных концентрации красителя и коэффициенте отражения выходного зеркала плоского резонатора [13]. Из приведенных зависимостей видно, что при рассматриваемых длительностях импульса возбуждения КПД генерации с увеличением плотности энергии возбуждения вначале возрастает, а затем начинает уменьшаться. Во всех случаях оптимальная плотность энергии возбуждения составляет  $\sim 2 - 4 \text{ Дж/см}^2$ . При длительности импульса накачки  $\sim 1$  мкс КПД генерации достигает 36 %, а при увеличении длительности до  $\sim 5$  мкс падает до  $\sim 20$  %. Как известно из литературы, максимальный КПД (65 %–68 %) генерации лазера на этанольном растворе родамина 6Ж при возбуждении наносекундными импульсами излучения с  $\lambda = 530 \text{ нм}$  достигается при плотности мощности излучения  $20 - 40 \text{ МВт/см}^2$ ; при этом в оптимальных условиях КПД определяется потерями излучения накачки и генерации в канале возбужденных синглетных уровней [22].

Сравнение экспериментальных данных, полученных при микросекундном и наносекундном возбуждении, показывает, что при оптимальных плотностях энергии на-

Рис.6. Осциллограммы импульса накачки (1) и генерации (2) лазера-преобразователя на этанольном растворе родамина 6Ж, возбуждаемого лазером на этанольном растворе 3-карбаминоюлолидина-2-иминокумарина ( $\lambda_g^{\max} = 525 \text{ нм}$ ) с ламповой накачкой.

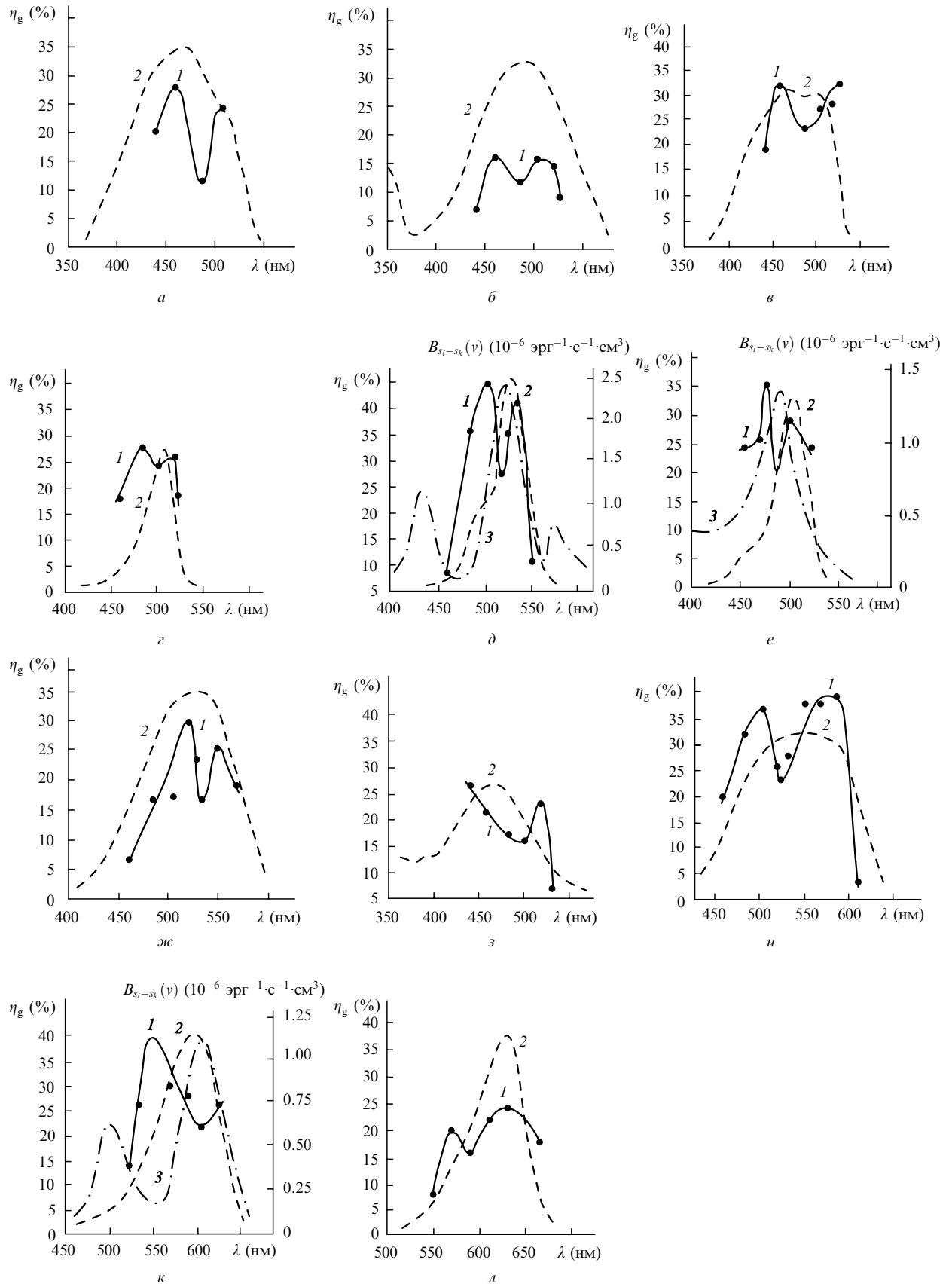


Рис.7. Зависимости КПД генерации (1) этанольных растворов лазерных красителей от длины волны возбуждения для 3-бензмидазол-7-юлолидин иминокумарин перхлората (а), 3-(2-бензимидазо [4,5 v]-пиридил)-7-юлолидино кумарин гидрохлорида (б), 2-(юлолидинкумарин-3 ил) бензимидазол перхлората (в), незамещенного родамина (г), родамина БЖ (д), родамина С (е), фенолемина 160 (ж), ДСМ (з), оксазина 17 (и), оксазина 9 (к) и оксазина 1 (л), а также контуры основных полос поглощения в относительных единицах (2) и спектры коэффициента Эйнштейна для поглощения в канале возбужденных синглетных уровней для родамина БЖ (д), родамина С (е) и оксазина 9 (к) (3).

качки в случае возбуждения импульсами длительностью  $\sim 1$  мкс реализуются практически такие же КПД, как и при наносекундном возбуждении и соответствующих плотностях мощности накачки. Эти данные, а также равенство порогов начала и окончания генерации в лазере-преобразователе на родамине 6Ж при оптимальных условиях накачки показывают (см. рис.6), что за время генерации не появляется дополнительных, зависящих от времени потерь, и это позволяет предположить, что в оптимальных условиях возбуждения генерации импульсами длительностью  $\sim 1$  мкс потери, связанные с поглощением молекулами в канале возбужденных триплетных уровней, играют второстепенную роль по сравнению с потерями в канале возбужденных синглетных уровней. С превышением оптимальных интенсивностей накачки начинают играть существенную роль потери в канале возбужденных триплетных уровней, а также потери, связанные с термооптическими и термоакустическими искажениями активной среды и приводящие к падению КПД.

Подтверждением преобладающего влияния потерь в канале возбужденных синглетных уровней на КПД генерации лазера-преобразователя могут служить результаты исследования зависимости эффективности генерации этанольных растворов основных наиболее эффективных классов красителей от спектрального состава излучения накачки при возбуждении импульсами микросекундной длительности. Как указано выше, возбуждение осуществлялось в пределах основной полосы поглощения исследуемых соединений. Результаты экспериментов представлены на рис.7. Анализ кривых обнаружил аномальную зависимость эффективности генерации и спектральных характеристик этанольных растворов кумариновых, родаминовых, оксазиновых красителей, а также DCM и фенолемина 160 от длины волны накачки. Эта аномальность проявляется в том, что по мере изменения длины волны возбуждающего излучения КПД генерации вначале возрастает, затем вблизи максимума полосы поглощения падает и вновь растет на длинноволновом склоне. Спектры генерации при этом обнаруживают коротковолновое смещение, причем их длинноволновая граница меняется незначительно (как это показано для родамина 6Ж на рис.8).

При увеличении длины волны накачки происходит расширение генерируемой полосы в область коротких длин волн на 10–12 нм, а в области «провала» наблюдается двухполосная генерация. Смещение спектров генерации в коротковолновую область говорит о возрастании в процессе генерации вредных потерь [23]. С целью выяснения природы потерь было исследовано поведение временного хода импульсов накачки и генерации в зависимости от спектрального состава возбуждающего излучения. Установлено, что во всех рассматриваемых слу-

чаях наблюдается равенство порогов начала и окончания генерации в лазере-преобразователе (см. рис.6). Следовательно, за время генерации не появляется дополнительных зависящих от времени потерь, и, как было отмечено выше, потери, связанные с поглощением молекулами в канале возбужденных триплетных уровней, играют второстепенную роль по сравнению с потерями в канале возбужденных синглетных уровней.

Результаты экспериментов показывают, что для полного объяснения наблюдаемого эффекта, в частности природы образующихся фотопродуктов, требуется проведение детальных исследований. Однако имеющиеся данные о спектральных характеристиках поглощения в канале возбужденных синглетных уровней для этанольных растворов некоторых кумариновых, родаминовых и оксазиновых красителей позволяют дать удовлетворительное объяснение наблюдаемым эффектам [24, 25].

На рис.7, д, е, к кривыми 3 представлены спектры коэффициента Эйнштейна для поглощения в канале возбужденных синглетных уровней  $B_{S_1 \rightarrow S_0}(v)$  для растворов родамина 6Ж, родамина С и оксазина 9 соответственно, полученные из экспериментальных данных в работе [24]. Сравнение спектрального хода потерь в канале возбужденных синглетных уровней с зависимостью КПД генерации указанных соединений от длины волны возбуждения позволяет предположить, что при микросекундной когерентной накачке растворов красителей, так же как и в случае наносекундной накачки, в результате поглощения излучения в канале возбужденных синглетных уровней образуются обратимые фотопродукты, которые имеют сильное поглощение в определенной спектральной области усиления, что вызывает падение эффективности генерации [25, 26].

В работе [27] приведены результаты лазерного флеш-фотолиза этанольного раствора родамина 6Ж при разных интенсивностях возбуждения. Получены интегральные спектры поглощения продуктов фотовозбуждения в диапазоне 550–670 нм при зондировании синхронно накачке и с задержкой во времени  $\sim 25$  нс. Сильная структурированность спектра при  $W \geq 1.5$  Дж/см<sup>2</sup> и наблюдаемые различия для обоих вышеуказанных вариантов свидетельствуют о возникновении коротко- и долгоживущих продуктов фотовозбуждения, которые поглощают в широком спектральном интервале, включая область генерации. Оценки, приведенные в [27], показывают, что вероятность фотопревращения для молекулы родамина 6Ж при трехступенчатом возбуждении излучением с  $\lambda = 532$  нм достаточно велика ( $\sim 0.005 - 0.007$ ).

#### 4. Заключение

В результате проделанной работы установлено, что двухступенчатая схема возбуждения, при использовании которой накачка лазера-преобразователя на красителях осуществляется импульсами излучения длительностью  $\sim 1$  мкс лазера на красителях с ламповым возбуждением, позволяет получить такой же КПД преобразования, как и при наносекундном возбуждении с соответствующей плотностью мощности. Это говорит о том, что в общем балансе энергии потери, связанные с поглощением молекулами в канале возбужденных триплетных уровней и с продуктами необратимых фотохимических превращений, играют второстепенную роль по сравнению с потерями в канале возбужденных синглетных уровней.

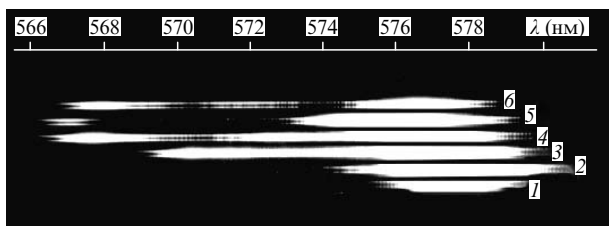


Рис.8. Спектры генерации этанольного раствора родамина 6Ж при изменении спектрального состава возбуждающего излучения:  $\lambda_p^{\max} = 460$  (1), 485 (2), 505 (3), 520 (4), 525 (5) и 535 нм (6).

Исследование основных классов лазерных красителей в лазере-преобразователе показало, что при определенном для каждого конкретного красителя спектральном составе возбуждающего излучения наблюдается падение КПД генерации, что может быть объяснено наличием перепоглощения излучения накачки в системе возбужденных синглетных уровней. Перепоглощение излучения накачки приводит к образованию обратимых фотопродуктов, имеющих сильное поглощение в определенной спектральной области усиления. Подбор оптимального спектрального состава излучения позволяет существенно улучшить энергетические параметры лазера-преобразователя на красителях при накачке импульсами микросекундной длительности.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

1. Великоцкий В.П., Мнускин В.Е., Тринчук Б.Ф. *Перестраиваемые лазеры на красителях с накачкой импульсными газовыми лазерами* (М.: ЦНИИ «Электроника», 1986).
2. Дмитриев В.Г., Стельмах М.Ф., Чередниченко О.Б. *Электронная промышленность*, **5–6**, 19 (1981).
3. Grove R.E. *Laser Focus*, **18**, 45 (1982).
4. Абакумов Г.А., Воробьев С.А., Симонов А.П. *Квантовая электроника*, **4**, 1926 (1977).
5. *Методы расчета оптических квантовых генераторов на органических красителях при монохроматическом возбуждении. Ч.1.* Под ред. Б.И. Степанова (Минск: Наука и техника, 1968).
6. Flamant P. *Opt. Commun.*, **25**, 247 (1978).
7. Грузинский В.В., Кухто А.В., Хон Бен И. *ЖПС*, **58**, 162 (1993).
8. Абакумов Г.А., Воробьев С.А., Подольская Л.С. и др. *Optica Acta*, **23**, 71 (1977).
9. Тихонов Е.А., Шпак М.Т. *Нелинейные оптические явления в органических соединениях* (Киев: Наукова думка, 1979).
10. Kukhto A.V., Galkin V.V., Shakkah G.H. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3573**, 46 (1998).
11. Richard A. Keller. *IEEE J. Quantum Electron.*, **6**, 411 (1970).
12. Иццоки И.Я., Серегин С.Л., Чередниченко О.Б. *ЖПС*, **39**, 390 (1983).
13. Артемьев Н.М., Батище С.А., Борткевич А.В., Тарковский В.В. и др. *ЖПС*, **47**, 719 (1987).
14. Батище С.А., Мостовников В.А., Тарковский В.В. *Квантовая электроника*, **22**, 651 (1995).
15. Батище С.А., Мостовников В.А., Тарковский В.В. *ПТЭ*, № 4, 130 (1995).
16. Стаселько Д.И., Стригун В.Л. *Оптика и спектроскопия*, **39**, 170 (1975).
17. Fleming G., Brinkman R., Strunge C., Endelhardt R. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **1421**, 146 (1991).
18. Кочиев Д.Г., Малютин А.А. *Волоконно-оптические технологии, материалы и устройства*, № 4, 95 (2001).
19. Батище С.А., Тарковский В.В. *Квантовая электроника*, **22**, 751 (1995).
20. Дзюбенко М.И., Науменко И.Г., Пеменков В.П., Солдатенко С.Е. *Письма в ЖЭТФ*, **18**, 43 (1973).
21. Рубинов А.Н., Томин В.И. *Оптические квантовые генераторы на красителях и их применение* (Итоги науки и техники. Сер. «Радиотехника», М.: ВИНТИ, 1976, т. 9).
22. Батище С.А., Ганжа В.А., Мостовников В.А. и др. *ЖПС*, **39**, 934 (1983).
23. Weber M.J., Bass M. *IEEE J. Quantum Electron.*, **5**, 175 (1969).
24. Батище С.А., Ганжа В.А., Мостовников В.А. и др. *Тез. III Всес. конф. «Лазеры на основе сложных органических соединений и их применение»* (Минск: изд-е ИФ АН БССР, 1980, с. 233).
25. Батище С.А., Гурленя В.И., Малевич Н.А., Мостовников В.А. и др. *ЖПС*, **44**, 214 (1986).
26. Малевич Н.А. *Автореф. канд. дис.* (Минск, ИФ НАНБ, 1993).
27. Tarkovsky V., Anufriuk S. *Tech. Dig. XVII Intern. Conf. Coherent and Nonlinear Optics* (Minsk: Institute of Physics NASB, 2001, FS28).