

СПЕКТРОСКОПИЯ
КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 535.37:541.14

СПЕКТРАЛЬНО-ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ И ГЕНЕРАЦИОННЫЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОИЗВОДНЫХ ПИРИДИЛОКСАЗОЛА
В НЕОРГАНИЧЕСКИХ И ГИБРИДНЫХ ГЕЛЬ-МАТЕРИАЛАХ

© 2008 г. Р. Т. Кузнецова*, Г. В. Майер*, Ю. А. Манекина*, Е. Н. Тельминов*,
С. М. Арабей**, Т. А. Павич**, К. Н. Соловьев**

*Томский государственный университет, 634050 Томск, Россия

**Институт молекулярной и атомной физики НАНБ, 220072 Минск, Белоруссия

Поступила в редакцию 17.05.2007 г.

Изучены спектрально-люминесцентные, генерационные и фотохимические характеристики двух производных пиридилоксазола, внедренных в процессе золь-гель-синтеза в силикатные неорганические и гибридные органо-неорганические ксерогели в виде объемных матриц и тонких пленок. Установлено, что органические молекулы закреплены в нанопорах твердотельных матриц специфическими взаимодействиями протоноакцепторных центров молекул с протонодонорными центрами силикатных матриц и образуют при таком взаимодействии катионные и дикатионные формы. Показано, что фотостабильность пиридилоксазолов в твердотельных ксерогелях превышает фотостабильность этих молекул в растворах.

PACS: 42.62.Fi, 42.70.Hj, 78.60.-b

ВВЕДЕНИЕ

Создание активных сред для перестраиваемых лазеров видимого и УФ диапазонов спектра долгие годы остается одной из важнейших задач. Особенно актуальными становятся такие исследования при создании лазерных сред на основе полимерных матриц с внедренными в них органическими люминофорами, позволяющих получать широкополосную генерацию излучения для разработки перестраиваемых твердотельных лазеров. Возбуждение таких сред, как правило, осуществляется лазером ХеСl, генерирующим УФ излучение, поэтому твердотельные матрицы должны быть прозрачными в области ≈ 300 нм, иметь высокую лазерную прочность и термостойкость. Наиболее подходящими для этих целей являются неорганические силикатные матрицы, полученные золь-гель-методом [1–3]. Использование таких матриц с разным составом исходных реакционных смесей позволяет получать в ряде случаев лазерные среды с улучшенными по сравнению с растворами характеристиками [4, 5]. Однако взаимодействие лазерных красителей, являющихся сложными органическими молекулами, имеющими протонодонорные и протоноакцепторные центры, с поверхностью наноразмерных пор силикатных матриц приводит в ряде случаев к образованию плохо излучающих центров [2, 6]. С другой стороны, существует класс производных пиридилоксазола, в которых многообразные ионные формы и “оптические

центры”, образованные при специфических взаимодействиях с силикатной матрицей, не ухудшают, а, напротив, могут улучшить излучательные свойства за счет расширения области излучения и облегчить создание инверсной населенности, поскольку концентрация некоторых форм и “оптических центров” при возбуждении увеличивается [2, 7–9]. Использование твердотельных тонких (<1 мкм) пленок, содержащих хорошо излучающие заряженные формы молекул, перспективно для создания электролюминесцентных устройств, являющихся основой современных нанотехнологий [10, 11].

В данной работе приведены результаты по исследованию спектрально-люминесцентных, генерационных и фотохимических характеристик двух производных пиридилфенилоксазола, внедренных в неорганические матрицы разного химического состава и геометрической формы, при их оптическом возбуждении.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Метоксипроизводное 2-(4-пиридил)5-фенилоксазола ($4\text{PyOCH}_3\text{PO}$) и его кватернированная соль ($4\text{PyOCH}_3\text{POCH}_2\text{Ph}^+\text{Cl}^-$), образованная при соединении к атому азота пиридинового цикла группы $-\text{CH}_2\text{Ph}^+\text{Cl}^-$ (рис. 1), выбраны для исследования в качестве люминофоров по нескольким соображениям. Во-первых, нейтральная форма молекулы $4\text{PyOCH}_3\text{PO}$ обладает существенным

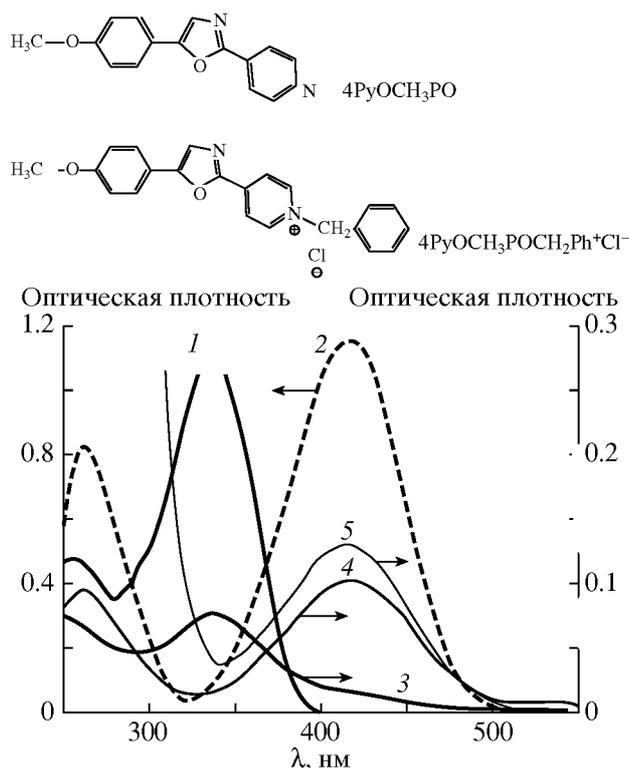


Рис. 1. Структурные формулы изученных молекул и спектры поглощения: $4\text{PyOCH}_3\text{PO}$ в этаноле (1); в пленке ТЭОС, $d_{\text{пл}} = 0.8$ мкм (3); $4\text{PyOCH}_3\text{POCH}_2\text{Ph}^+\text{Cl}^-$ в этаноле (2); в пленке ТЭОС, $d_{\text{пл}} = 1.2$ мкм (4); в пленке ТЭОС + ТЭОТ (4 : 1), $d_{\text{пл}} = 0.2$ мкм (5).

поглощением в области генерации лазера XeCl (308 нм). Кроме того, эта молекула имеет несколько протонакцепторных центров: атомы азота пиридинового и оксазольного циклов, атомы кислорода в оксазольном цикле и метокси-группе, проявляющихся в растворах разной кислотности. Электронная структура кватернированной соли π -изоэлектронна структуре катиона $4\text{PyOCH}_3\text{PO}$ по пиридиновому азоту [7–9], что позволяет достаточно надежно интерпретировать экспериментальные результаты по изменению спектральных свойств красителей в матрице, связывая их с взаимодействием того или иного протонакцепторного центра молекулы с протонодонорными ($\equiv\text{Si}-\text{OH}$) или акцепторными ($\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$) группами матрицы.

Выбранные люминофоры вводились в силикатные матрицы на основе тетраэтоксисилана (ТЭОС) – чистая неорганическая матрица, и его смеси с винилтриэтоксисиланом (ВТЭОС) – гибридная органо-неорганическая матрица ТЭОС + ВТЭОС, в процессе синтеза ксерогелей золь-гель-методом по методикам, описанным в [2, 3]. После окончания стадии поликонденсации и после-

дующей 2–3-недельной сушки образованных гелей были получены твердые ксерогели в форме параллелепипедов с размерами $\approx 0.5 \times 0.5 \times 1.5$ см либо усеченных призм с высотой 0.75–0.85 см (в зависимости от соотношения ТЭОС и ВТЭОС в реакционной смеси) и средним сечением 0.65×0.65 см. Изменение молярного соотношения ТЭОС и ВТЭОС в реакционных смесях позволяет сочетать прозрачность и твердость силикатных матриц с возможностью изменять характер взаимодействия органической молекулы с матрицей в результате изменения соотношения реакционно-способных силанольных ($\equiv\text{Si}-\text{OH}$) и силоксановых ($\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$) групп за счет присутствия центров с винильными группами $\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{CH}=\text{CH}_2$, “выстилающими” вместе с группами $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ поры силикатных матриц, в которых находятся органические молекулы [2–6]. Кроме того, присутствие винильных групп на поверхности может блокировать взаимодействие органических молекул с силанольными и силоксановыми группировками за счет стерических затруднений, что также приводит к изменению соотношения реально возникающих “оптических центров”.

Тонкие пленки наносились методом центрифугирования на кварцевые подложки с заранее измеренным пропусканием на $\lambda_{\text{возб}}$ и подвергались последующей сушке в течение нескольких часов. Следует отметить, что качество силикатных матриц и пленок существенно зависит от состава исходных реакционных смесей и условий синтеза: температурного режима, градиента температур, толщины слоя и т.д. Нередко в силикатных матрицах и пленках возникают механические напряжения, трещины, неоднородности по толщине пленки и т.п., ухудшающие оптические качества. Поэтому в качестве попытки преодоления этих недостатков изучены спектральные свойства тонких гель-пленок, приготовленных золь-гель-способом из смеси ТЭОС и тетраэтоксититана (ТЭОТ) в молярном соотношении 4 : 1 и окрашенных выбранными красителями. Согласно литературным данным, синтез смешанных неорганических гель-пленок ТЭОС + ТЭОТ существенно повышает их механические качества: полностью устраняется растрескивание, существенно уменьшается воздухопроницаемость за счет увеличения плотности материала, т.е. уменьшения размеров пор [12, 13]. Это чрезвычайно важно, например, для герметизации многослойных излучающих и проводящих электролюминесцентных устройств, поскольку установлено, что пленки на основе ТЭОТ обладают заметной фотопроводимостью, которая возрастает на порядки при их вакуумировании [14].

В работе измерялись стационарные спектры поглощения и флуоресценции (спектрофотометр Specord M40, спектрофлуориметр Solar CM2203), а также энергетические (измерители оптической мощности ИМО-2Н, КТП2, Gentec E), спектроскопические (лазерный спектрометр Angstrom) и ресурсные характеристики генерации приготовленных образцов. Спектры генерации на рисунках приведены без поправки на аппаратное уширение лазерного спектрометра, равное 6.5 нм. Для возбуждения генерации объемных твердотельных окрашенных ксерогелей использовался поперечный вариант возбуждения в резонаторе длиной 1.5 см, образованном глухим зеркалом и выходной гранью матрицы. Излучение лазера ХеСl фокусировалось в полосу с размерами 0.05×0.45 см на переднюю грань гель-матрицы. В случае тонких пленок внешний резонатор отсутствовал, генерация развивалась в резонаторе типа “зиг-заг” за счет отражений от оптически менее плотных сред [2, 15], при этом размеры генерирующего объема составляли $V = 0.05 \times 0.9 \times d_{\text{пл}}$. Толщина пленки ($d_{\text{пл}}$) измерялась интерференционным микроскопом МИИ4М с погрешностью 20% и составляла доли микрометра. КПД генерации окрашенных пленок определялся с учетом пропускания излучения накачки, которое измерялось в каждом импульсе для пленочных образцов и доходило в ряде случаев до 95%. На основании уменьшения КПД за счет фотопревращений в результате поглощенной энергии накачки определялся ресурс работы активной среды P_{50} . Ресурс измеряется удельной энергией возбуждения, поглощенной генерирующим объемом (в Дж/см³), в результате чего первоначальный КПД уменьшается на 50%. Подробно методика определения генерирующего объема твердотельных элементов описана в [4], относительная ошибка в определении ресурса твердотельных элементов составляет 25%. Для сравнения ресурса лазерных сред с разными начальными концентрациями молекул значения P_{50} дополнительно приведены в количестве фотонов, поглощенных каждой молекулой в генерирующем объеме, в результате чего начальный КПД уменьшился наполовину. Квантовый выход фотопревращений органических молекул определялся по методике, изложенной в [2, 3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектрально-люминесцентные свойства

На рис. 1 и 2 приведены структурные формулы и спектрально-люминесцентные характеристики изученных соединений в разных средах, из которых видно, что изменение электронной структу-

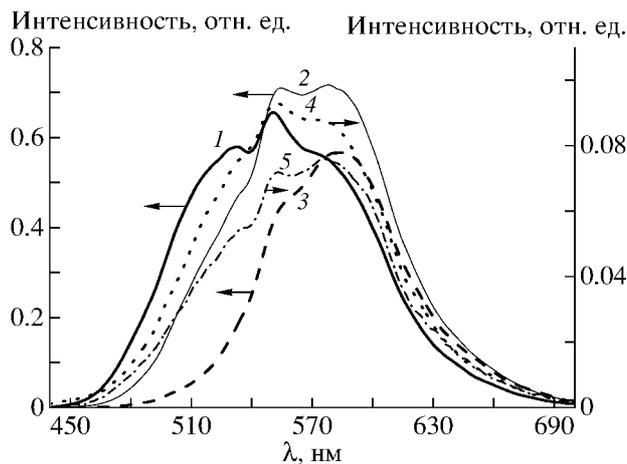


Рис. 2. Спектры флуоресценции: $4\text{RuOCH}_3\text{PO}$ в матрице ТЭОС + ВТЭОС (7 : 3) (1); $4\text{RuOCH}_3\text{POCH}_2\text{Ph}^+\text{Cl}^-$ в матрице ТЭОС + ВТЭОС (7 : 3) (2); в матрице ТЭОС (3); в пленке ТЭОС (4); в пленке ТЭОС + ТЭОТ (4 : 1) (5). $\lambda_{\text{возб}} = 308$ нм.

ры атома азота пиридинового цикла в результате присоединения к нему заместителя $-\text{CH}_2\text{Ph}^+\text{Cl}^-$, т.е. перехода от $4\text{RuOCH}_3\text{PO}$ к его кватернированной соли, вызывает длинноволновый сдвиг в спектре поглощения от 340 до 417 нм (кривые 1 и 2 на рис. 1), аналогичный сдвигу поглощения при образовании одной из катионных форм $4\text{RuOCH}_3\text{PO}$ в подкисленных растворах [7]. Тот факт, что ТЭОС-пленки, окрашенные $4\text{RuOCH}_3\text{PO}$, кроме полосы нейтральной формы с $\lambda_{\text{max}} = 340$ нм, имеют поглощение в области 417 нм (рис. 1, кривая 3), свидетельствует о том, что пиридиллоксазолы в процессе золь-гель-синтеза закрепляются на поверхности наноразмерных пор твердотельных силикатных матриц посредством специфических взаимодействий протоноакцепторных центров с группами $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ матриц. Это может быть как Н-связь, так и ее крайнее проявление – образование катионных и дикатионных форм органических молекул, что наблюдается в данном случае. Уменьшение относительной концентрации групп $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ при формировании гибридной матрицы ТЭОС + ВТЭОС уменьшает эффективность таких взаимодействий, при этом уменьшается поглощение катионной формы, образованной взаимодействием с матрицей по пиридиновому азоту [2].

Поскольку при возбуждении пиридиллоксазолов эффективность взаимодействия с присоединением протона увеличивается [7–9], в спектрах флуоресценции окрашенных ТЭОС-матриц отсутствует излучение нейтральных форм $4\text{RuOCH}_3\text{PO}$ в области 440 нм, что имеет место в нейтральных этанольных растворах. В такой матри-

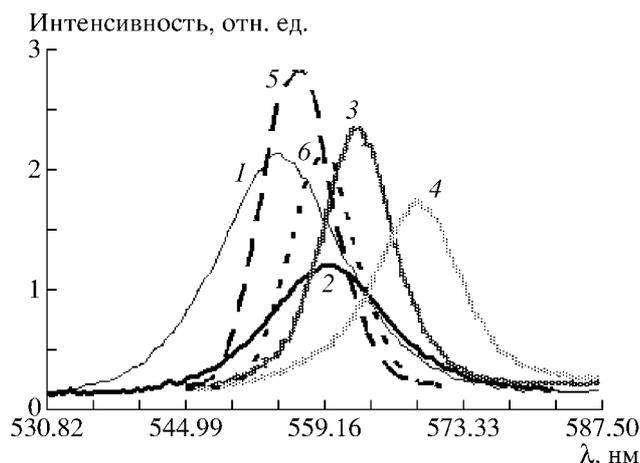


Рис. 3. Спектры генерации: $4\text{RuOCH}_3\text{PO}$ в матрице ТЭОС + ВТЭОС (7 : 3) (1, 2); $4\text{RuOCH}_3\text{POCH}_2\text{Ph}^+\text{Cl}^-$ в матрице ТЭОС + ВТЭОС (7 : 3) (3, 4); в матрице ТЭОС (5, 6). $W = 30 \text{ МВт/см}^2$. До (1, 3, 5) и после (2, 4, 6) облучения лазером ХеСл при измерении ресурса работы.

це наблюдается излучение “оптических центров”, образованных взаимодействием с переносом протона от групп $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ матрицы к пиридиновому и оксазольному азоту молекулы одновременно ($\lambda_{\text{max}} = 580-590 \text{ нм}$). Максимум флуоресценции в области 530 нм связан с взаимодействием только по оксазольному азоту, а в области 550–560 нм – только по пиридиновому (рис. 2). В силикатной матрице, содержащей кроме ТЭОС еще и ВТЭОС, уменьшается концентрация групп $\equiv\text{Si}-\text{OH}$, что приводит к сдвигу спектров флуоресценции в коротковолновую область за счет образования менее закрепленных “оптических центров” с взаимодействием только по одному протонакцепторному центру. Существование одновременно разных “оптических центров” $4\text{RuOCH}_3\text{PO}$ в силикатных матрицах существенно расширяет спектр флуоресценции – $\Delta\lambda_{1/2} > 120 \text{ нм}$ (рис. 2). Возможно, что на первой стадии конденсации гель-матриц эти “центры-сольваты” образуются с участием оставшегося растворителя (этанол, вода с добавлением HCl). В процессе сушки гелей растворитель испаряется, закрепляя органические молекулы непосредственно на протонодонорных ($\equiv\text{Si}-\text{OH}$) и акцепторных ($\equiv\text{Si}-\text{O}-\text{Si}\equiv$) центрах пористых матриц.

Молекула кватернированной соли в возбужденном состоянии взаимодействует с силанольными группами $\equiv\text{Si}-\text{OH}$ ТЭОС-матрицы по оксазольному азоту с переносом протона, обеспечивая флуоресценцию на 580 нм (рис. 2). В основном состоянии “оптический центр” образован Н-связью без переноса протона, так как спектр ТЭОС-

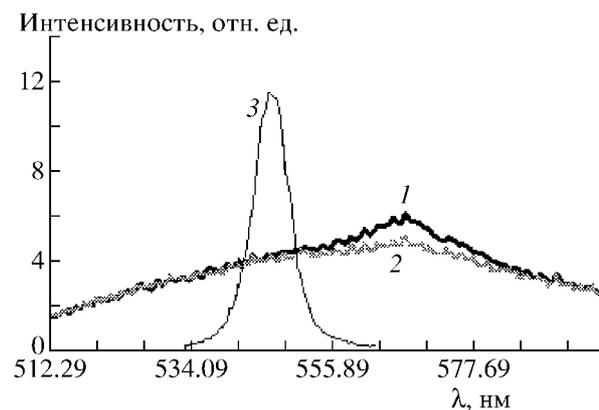


Рис. 4. Спектры излучения $4\text{RuOCH}_3\text{POCH}_2\text{Ph}^+\text{Cl}^-$ в пленках: ТЭОС (1, 2), ТЭОС + ВТЭОС (7 : 3) (3) при возбуждении излучением лазера ХеСл. $W = 30$ (1), 20 МВт/см^2 (2, 3).

пленки, окрашенной $4\text{RuOCH}_3\text{POCH}_2\text{Ph}^+\text{Cl}^-$, соответствует поглощению соли в нейтральном этаноле (рис. 1, кривые 2, 4). Некоторое перераспределение интенсивности в спектре флуоресценции тонкой пленки по сравнению с объемной матрицей, окрашенной кватернированной солью (сравнить кривые 3 и 4 на рис. 2), связано, по-видимому, с изменением соотношения силанольных и силоксановых групп в порах тонкопленочной и объемной матриц, что отмечено в литературе [16, 17], т.е. с изменением соотношения разных “оптических центров”.

В смешанных неорганических пленках ТЭОС + ТЭОТ (4 : 1), т.е. при замене в исходной реакционной смеси компонента ВТЭОС на ТЭОТ, наблюдаются неоднозначные эффекты. Помимо положительных изменений механических качеств, отмеченных выше: улучшения адгезии и отсутствия трещин, существенно уменьшается прозрачность таких пленок в области 308 нм (рис. 1, кривая 5). Оценки показали, что такая пленка без красителя поглощает ~52% падающей энергии лазера ХеСл, что неблагоприятно для создания на их основе лазерно-активных сред при возбуждении лазером ХеСл. С другой стороны, спектры поглощения и излучения кватернированной соли в тонких пленках ТЭОС и ТЭОС + ТЭОТ (4 : 1) практически не отличаются друг от друга (рис. 1, 2), поэтому при использовании более длинноволнового по сравнению с лазером ХеСл возбуждения ($>330 \text{ нм}$) есть возможность получить генерирующие среды на матрицах ТЭОС + ТЭОТ, окрашенных лазерными красителями, в том числе и пиридиллоксазолами. Следует отметить, что для

Генерационные и фотохимические характеристики производных оксазола в различных средах

Образец: краситель, концентрация, среда	W , МВт/см ²	КПД, %	λ_{\max} , нм	$W_{\text{порог}}$, МВт/см ²	P_{50} , кДж/см ³ ; [фотон/молекулу]; (Φ_{phot})
4RuOCH ₃ PO,	6	0.6	556	1.4	
45 ммоль/л,	15	0.75	554		
ТЭОС + ВТЭОС (7 : 3),	25	0.7	554		
объемная матрица	40	0.7			
	55	0.6	554		14; [804]
4RuOCH ₃ PO, 50 ммоль/л,	30	0.5	577	1.8	1.6; [83]
ТЭОС, объемная матрица					
4RuOCH ₃ POCH ₂ Ph ⁺ Cl ⁻ ,	8.5	1.3	563	0.13	
10 ммоль/л, ТЭОС + ВТЭОС (7 : 3),	17	1.3	562		
объемная матрица	35	1.1	562		1.5; [390]
	60	0.9	561		
4RuOCH ₃ POCH ₂ Ph ⁺ Cl ⁻ , 50 ммоль/л,	6	0.6	563	2	
ТЭОС, объемная матрица	13	0.5	561		
	30	0.35	557		
	55	0.3	556		29; [1500]
4RuOCH ₃ POCH ₂ Ph ⁺ Cl ⁻ , 45 ммоль/л,	40	1	547	0.15	28; [1600]; (8×10^{-5})
ТЭОС + ВТЭОС (7 : 3), пленка, толщина 1.8 мкм					
4RuOCH ₃ POCH ₂ Ph ⁺ Cl ⁻ , 35 ммоль/л, ТЭОС, пленка толщина 1.2 мкм	30	начало усиления	567	30	
4RuOCH ₃ PO, 0.8 ммоль/л, этанол	30	0.3	445	1	0.007; [23]; (5×10^{-3})
4RuOCH ₃ POCH ₂ Ph ⁺ Cl ⁻ , 4 ммоль/л, вода	25	4.5	590	0.3	0.004; [3]; (6×10^{-3})

пленок ТЭОС + ТЭОТ с пиридилоксазолами в видимой области спектра (>500 нм) обнаружены малоинтенсивные чередующиеся полосы поглощения (рис. 1). Эти полосы не связаны с поглощением красителя, поскольку такие же полосы обнаружены в [12, 13] для чистых неокрашенных пленок, содержащих ТЭОТ. По-видимому, эти полосы – результат интерференционного эффекта, возникающего при взаимодействии видимого света с неоднородными по толщине слоями, который в дальнейшем может быть использован для контроля толщины пленок.

Генерационные характеристики

На рис. 3 и 4 и в таблице приведены генерационные и фотохимические характеристики изученных молекул в растворах и силикатных матрицах и пленках. Как правило, окрашенные матрицы генерируют излучение в области максимума

и в некоторых случаях ближе к коротковолновому “крылу” полосы флуоресценции соответствующего образца. В нейтральном этаноле соединение 4RuOCH₃PO генерирует в нейтральной форме с $\lambda_{\max} = 445$ нм, в гибридной матрице ТЭОС + ВТЭОС генерируют его “оптические центры”, образованные взаимодействием с матрицей по пиридиновому атому азота ($\lambda_{\max} = 554\text{--}556$ нм), а в матрице ТЭОС – сразу по двум атомам азота: оксазольному и пиридиновому ($\lambda_{\max} = 577$ нм) (рис. 4, таблица).

Для кватернированной соли, у которой пиридин азот занят химическим заместителем, спектры генерации сдвигаются незначительно при переходе от гибридной к чистой матрице ТЭОС, особенно вблизи порога генерации ($\lambda_{\text{ген}} = 564$ нм, таблица). Однако в гибридной матрице порог существенно ниже, а эффективность генерации выше по сравнению с матрицей ТЭОС (таблица).

Это означает, что наиболее низкопороговыми в случае соли являются “оптические центры”, образованные в основном состоянии Н-связью протоноакцепторных центров с протонодонорными центрами силикатной матрицы. При возбуждении “центров”, образованных взаимодействием с переносом протона в порах матрицы ТЭОС, возрастает порог. При этом спектр генерации при увеличении интенсивности возбуждения смещается в коротковолновую сторону за счет включения более высокопороговых “центров” (таблица). Особенно наглядно это видно при сравнении генерационных характеристик соли в тонких пленках: для гибридной пленки ТЭОС + ВТЭОС получена генерация с КПД до 1%, в то время как для пленки ТЭОС наблюдается лишь начало усиления (таблица, рис. 4). Проявление возможности возбуждения разнородных “оптических центров” для производных пиридиллоксазола в матрицах ТЭОС расширяет область генерации в коротковолновую сторону за счет включения более высокопороговых сольватов при оптимальной накачке ($W = 30\text{--}40 \text{ МВт/см}^2$).

Эта особенность проявляется и при изучении характеристик фотостабильности лазерных сред. В сравнении с генерирующими растворами ресурс твердотельных активных сред с пиридиллоксазолами существенно выше, а квантовый выход фотопревращений – меньше (таблица). В процессе генерации по мере уменьшения КПД в результате фотопревращений генерирующих молекул спектр генерации пиридиллоксазолов в растворах незначительно (1–2 нм) смещается в коротковолновую область в сторону максимума спектра флуоресценции, соответствующего равновесным сольватам. В силикатных матрицах наблюдается длинноволновое смещение спектра генерации пиридиллоксазолов (рис. 3). Это происходит за счет “выгорания” в процессе генерации высокопороговых “оптических центров” и перехода к низкопороговым, генерирующим в более длинноволновой области. Меньший ресурс соединения $4\text{RuOCH}_3\text{PO}$ в матрице ТЭОС по сравнению с гибридной ТЭОС + ВТЭОС согласуется с отсутствием длинноволнового смещения спектров генерации в процессе фотопревращений [3]. Получается, что для $4\text{RuOCH}_3\text{PO}$ в матрице ТЭОС невозможен постепенный переход от генерации высокопороговых “центров” к низкопороговым, ресурс определяется генерацией только одного типа “центров”, т.е. наблюдается ситуация, близкая к растворам.

Более высокий ресурс кватернированной соли в объемной матрице ТЭОС и тонкой пленке ТЭОС + ВТЭОС по сравнению с гибридной мат-

рицей ТЭОС + ВТЭОС также согласуется со спектроскопическими и пороговыми особенностями твердотельных образцов. В матрице ТЭОС и тонкой гибридной пленке изначально генерируют коротковолновые более высокопороговые “центры”. Более медленный спад КПД в процессе генерации в этом случае обусловлен переходом к низкопороговым “центрам”, генерирующим в более длинноволновой области (таблица, рис. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты показывают, что производные пиридиллоксазола, внедренные в силикатные матрицы методом прямого золь-гель-синтеза, при оптическом возбуждении хорошо флуоресцируют в широкой спектральной области (460–680 нм) за счет специфических взаимодействий с матрицей и образования разнородных “оптических центров”. Твердотельные образцы, окрашенные метоксипроизводными пиридиллоксазола (объемные матрицы и тонкие пленки), без дополнительной механической обработки при накачке лазером ХеСl могут генерировать лазерное излучение в области 535–580 нм с ресурсом работы, превышающим ресурс этих соединений в растворах, а также ресурс родаминовых красителей, генерирующих в аналогичных матрицах в близкой спектральной области при их возбуждении лазером ХеСl [3]. Использование тонких пленок на основе силикатных (в том числе гибридных) матриц с производными пиридиллоксазола – перспективный путь для создания электролюминесцентных и фоточувствительных устройств, поскольку эти молекулы существуют в силикатных матрицах в виде специфических “оптических центров”, представляющих собой заряженные формы, концентрация которых увеличивается при возбуждении.

Необходимо дальнейшее изучение окрашенных разными красителями неорганических ксерогелей ТЭОС + ТЭОТ с накачкой в области $>330 \text{ нм}$ с целью получения более качественных и долговечных активных сред и излучателей на их основе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 04-02-81002) и ГКПНИ РБ “Электроника” (задание 1.34).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Lam K.S., Lo D.* // *Appl. Phys. B.* 1998. V. 66. P. 427–430.
2. *Шапошников А.А., Кузнецова Р.Т., Копылова Т.Н., Тельминов Е.Н., Майер Г.В., Арабей С.М.,*

- Павич Т.А. // Квант. электрон. 2004. Т. 30. № 8. С. 715–721.
3. Кузнецова Р.Т., Манекина Ю.А., Тельминов Е.Н., Майер Г.В., Арабей С.М., Павич Т.А., Соловьев К.Н. // Опт. атм. и океана. 2006. Т. 19. № 7. С. 653–660.
4. Кузнецова Р.Т., Манекина Ю.А., Тельминов Е.Н., Майер Г.В., Арабей С.М., Павич Т.А., Соловьев К.Н. // Опт. и спектр. 2007. Т. 102. № 2. С. 234–244.
5. Yang Y., Wang M., Qian G., Wang Zh., Fan X. // Opt. Mater. 2004. V. 24. P. 621–628.
6. Кузнецова Р.Т., Павич Т.А. // Опт. атм. и океана. 2002. Т. 15. № 3. С. 263–266.
7. Бреусова Е.Г., Кузнецова Р.Т., Майер Г.В. // Опт. атм. и океана. 1993. Т. 6. № 3. С. 291–296.
8. Бреусова Е.Г., Кузнецова Р.Т., Майер Г.В. // Опт. атм. и океана. 1999. Т. 12. № 11. С. 1041–1044.
9. Галеева А.И., Кузнецова Р.Т., Фофонова Р.М. // Изв. вузов. Физика. 1987. № 8. С. 48–50.
10. Кухто А.В. // ЖПС. 2003. Т. 70. № 2. С. 157–176.
11. Karasz M.A., Wnek G.E. // Electrochim. Acta. 1998. V. 43. № 10–11. P. 1623–1628.
12. Nocun M., Siwulski S., Leja E., Jedlinski J. // Opt. Mater. 2005. V. 27. P. 1523–1528.
13. Lukowiak A., Dylewicz R., Patela S., Strek W., Maruszewski K. // Opt. Mater. 2005. V. 27. P. 1501–1505.
14. Brajsa A., Szaniawska B., Barczynski R.J., Murewski L., Koscielska B., Vomvas A., Pomoni K. // Opt. Mater. 2004. V. 24. P. 151–153.
15. Holzer W., Penzkofer A., Pertch T., Danz H., Brauch A., Kley E., Tillmann H., Bader C., Hornhold H.H. // Appl. Phys. B. 2002. V. 74. P. 339–347.
16. Hungerfold G., Shulbing K., Ferreira J.A. // J. Photochem. Photobiol. A. 1999. V. 129. P. 71–80.
17. Monte F., Levy D. // J. Phys. Chem. B. 1999. V. 103. P. 8080–8086.