

Физические установки и аппаратура

УДК 535.21:373.8

Жидкостные теплоносители для лазеров

В. М. Подгаецкий

Московский государственный институт электронной техники (Технический университет),
Москва, Россия

В. М. Волынкин

Государственный оптический институт, С.-Петербург, Россия

И. В. Комлев, А. В. Резниченко

Научно-производственная фирма ООО «НПФ «АЛЬФА-АКОНИС»»,
г. Долгопрудный, Московская обл., Россия

Дано представление о составе и свойствах жидкостных теплоносителей для лазерной, световой и телевизионной техники. Приведены результаты исследований оптотермодинамических и физико-химических процессов в жидкостях, находящихся под действием мощного широкополосного излучения, которые позволили предложить новый метод диагностики критического состояния жидкостей и растворов. Исследования спектрально-люминесцентных явлений в жидкостях, работающих в лазерных системах, позволили значительно увеличить КПД и ресурс неодимовых лазеров.

Применение лазерных приборов в различных отраслях науки и техники сопровождалось ростом интереса к возможностям жидкостного охлаждения лазеров для стабилизации их характеристик. Такого рода охлаждение оказалось эффективнее и удобнее, чем альтернативные контактные и воздушные (газовые) методы при больших удельных тепловых нагрузках на элементах приборов. Использование жидкостей должно было осуществляться в отсутствие их кипения, так как в двухфазной среде нарушается нормальная работа систем накачки лазеров из-за рассеяния излучения.

Применение жидкостных теплоносителей (ЖТ) заметно увеличивает ресурс и эффективность лазерных изделий. Интенсивный теплоотвод от нагреваемых частей приборов способствует снижению искажений в активных элементах лазеров; более того, регулирование температуры теплоносителей позволяет выбрать оптимальные характеристики термической линзы в этих элементах. Иммерсионные свойства жидкостей (близость их показателя преломления к показателю преломления активных сред и оболочки ламп) улучшают светопропускание в лазерных квантронах. Все это было особенно важно при создании твердотельных лазеров с высоким КПД, представляющих наибольший интерес для практики [1, 2].

Вопросы увеличения надежности и повышения эффективности лазеров, связанные с использованием ЖТ, находятся в центре внимания

исследователей и разработчиков таких приборов на всех стадиях развития лазерной техники.

В лазерах, работающих в помещении, наиболее целесообразно использовать экологически чистое водяное охлаждение. К тому же, вода обладает самыми выгодными теплофизическими характеристиками среди всех диэлектрических растворителей. Однако температурный интервал существования водной фазы ограничен снизу, что не позволяет использовать лазеры с водяным охлаждением вне помещений при низких температурах ($< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$); не всегда удобно и ограничение диапазона рабочих температур сверху точкой кипения воды. Коррозионные свойства воды также не слишком хороши, но могут быть улучшены путем дистилляции и обезгаживания жидкости, хотя эти улучшения трудно сохраняемы в реальных условиях эксплуатации лазеров.

Переход к водным растворам неорганических солей дает возможность снизить температуру замерзания теплоносителей до $-40\div-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, но зато заметно сужает спектр подходящих конструкционных материалов тракта охлаждения [3]. Введение ингибиторов коррозии несколько улучшает ситуацию, однако широкое использование дешевых и легкообрабатываемых конструкционных материалов в технике лазеров возможно только с органическими ЖТ, обладающими в большинстве случаев широким температурным диапазоном эксплуатации [4–12].

Выбор органических ЖТ и жидкостных теплоносителей-светофильтров (ЖТС) для охлажде-

ния лазеров универсального применения оказался довольно ограниченным из-за необходимости удовлетворения целому ряду специфических требований, а именно:

прозрачность в области накачки активной среды;

фiltrация вредной части излучения накачки лазеров или ее переизлучение в область полезных длин волн (в случае необходимости);

приемлемые значения и незначительное изменение теплофизических характеристик во всем интервале рабочих температур;

стабильность к действию нагрева и излучения;

пожаро- и взрывобезопасность;

малая токсичность и удобство эксплуатации;

совместимость с распространенными конструкционными материалами трактов охлаждения лазеров.

Органические жидкостные теплоносители и теплоносители-светофильтры

К моменту начала отечественных исследований в области жидкостных теплоносителей для лазерных приборов специального применения было известно использование в этих целях растворов неорганических солей [3], водных растворов низших спиртов (метанола, этанола) [4], полисилоксанов [5, 7], фторорганических жидкостей [6], смесей эфиров гликолей с водой [9, 10, 12] и т. д. Анализ свойств указанных ЖТ показал, что растворы неорганических солей имеют низкую температуру кипения, и их применение резко сужает спектр подходящих конструкционных материалов тракта охлаждения лазеров. Водно-спиртовые ЖТ пожаро- и взрывоопасны даже при комнатной температуре. Полисилоксановые жидкости, в том числе применяемые в США, вполне пожаробезопасны, но характеризуются большой вязкостью и недостаточно стойки к действию излучения. Безопасные к возгоранию и малотоксичные фторорганические ЖТ, представителем которых служит жидкость FC-104 для лазеров с ламповой накачкой, входящих в состав дальномеров и целеуказателей ВВС США, обладают высокой плотностью при низкой теплоемкости и теплопроводности, а также крайне чувствительны к чистоте тракта охлаждения. Пожаробезопасные водно-гликолевые растворы, применяемые в США, склонны к окислению, более коррозионно активны в отсутствие ингибиторов, чем другие описанные выше жидкости, и имеют заметную вязкость в области низких температур.

В результате комплексного анализа свойств ранее известных ЖТ нами был сделан вывод о необходимости последовательного изучения физико-химических свойств различных классов

органических растворителей в целях нахождения наиболее пригодных из них в качестве основы теплоносителей для лазеров.

Поиск перспективных органических растворителей

Анализ характеристик различных органических растворителей, потенциально пригодных в качестве основы теплоносителей для лазеров, привел к выводу о перспективности ряда ранее невыявленных классов соединений: предельных углеводородов, элементоорганических жидкостей и эфиров. При проведении комплекса исследований было синтезировано более пятисот новых веществ.

Спиртоалкановые составы. Известно применение в электротехнике и атомной энергетике многих предельных и ароматических углеводородов [13, 14]. Они широко используются в качестве органических теплоносителей, среди которых наиболее употребимы дифениловые эфиры, продукты хлорирования дифенила и углеводороды дифенил-метанового ряда [15]. Отмечается их инертность к конструкционным материалам. Вместе с тем этим соединениям обычно присущи высокая температура плавления и большая вязкость, к тому же они, как правило, бывают высокотоксичны [16].

Анализ свойств систем на основе предельных углеводородов (алканов) показал возможность снижения температуры плавления, вязкости и токсичности составов при сохранении их выгодных теплофизических характеристик при использовании смесей алканов C_nH_{2n+2} с одноатомными спиртами ROH, где R — алкил (метил, этил, пропил, изопропил, β -хлорэтил, бутил и др.). В результате проведенных исследований вязкостно-температурных свойств этих смесей был отобран состав ЖТ, содержащий октан C_8H_{18} и бутиловый спирт C_4H_9OH . Его преимуществами являются низкая температура плавления (< -60 °C) и вязкость ~ 17 мм²/с. На его основе был разработан ЖТ типа ВМ — СХЖ 8А, токсикологические характеристики которых относятся к четвертому классу опасности по ГОСТ 12.1.007.

Элементоорганические соединения. Среди исследованных на первой стадии работ соединений наше внимание было привлечено к полным эфирам ортофосфорной кислоты — триалкилфосфатам $(RO)_3P=O$, где R — алкил, которые достаточно широко использовались в промышленности. Эти вещества применялись в качестве добавок для модификации пластмасс (как пластификаторы и вещества для повышения их огнестойкости); флотореагентов и экстрагентов радиоактивных, в том числе трансураниевых, элементов из отработанного ядерного горючего. Они были известны так же как экстрагенты ред-

коземельных элементов из минерального сырья. Известно было и применение триалкилфосфатов в качестве теплоносителей, например при изучении кинетики высокотемпературных реакций [17–21].

По литературным данным, триалкилфосфаты отличаются высокой термостойкостью, широким диапазоном жидкого агрегатного состояния, большой химической инертностью, фото- и радиационной устойчивостью. Низшие члены ряда этих соединений — маловязкие прозрачные жидкости со сравнительно малой токсичностью.

При детальном изучении токсикологических характеристик образцов таких соединений, изготовленных по разным технологиям, в том числе отечественных и зарубежных фирм, было установлено, что они сильно отличаются по параметрам вредного воздействия на организм. Такое их свойство присуще практически всем триалкилфосфатам, являющимся достаточно сильными алкилирующими агентами, причем эта их способность возрастает с уменьшением объема алкильного радикала.

В результате проведенных исследований установлено, что усиление токсических свойств соединений, как правило, происходит из-за наличия в образцах следовых (10^{-2} – 10^{-7}) % количеств химически активной микропримеси тетраалкилпирофосфата (ТАПФ). ТАПФ, обуславливающий токсичность многих фосфорорганических соединений, является сильным ингибитором фермента ацетилхолинэстеразы [22].

На основе этого факта была разработана оригинальная биохимическая методика, позволяющая контролировать содержание микроколичеств ТАПФ в жидкостях при их промышленном производстве и установить параметры токсичности чистых триалкилфосфатов.

Токсикологические характеристики выбранного нами триалкилфосфата, очищенного от ТАПФ, соответствовали параметрам $ЛД_{50} = 1,3$ г/кг и ПДК (в воздухе рабочей зоны) = $0,5$ мг/м³, что обусловило отнесение ЖТ (ЖТС) для лазеров типа АМ, основой которых он является, ко второму классу опасности.

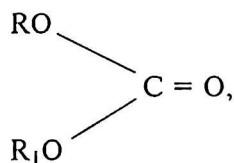
В результате изучения свойств ЖТ (ЖТС) типа АМ было освоено промышленное производство таких теплоносителей.

Среди различных групп элементоорганических соединений по многим своим свойствам особняком стоят органические соединения германия, особенно тетраалкилгерманы [14, 23–25]. Сделанные на их основе опытные ЖТ типа ЦМ были прозрачны в видимой области спектра, имели хорошие термические характеристики и низкую токсичность (на уровне четвертого класса опасности), а также были высоко термо- и фотостабильны. Вместе с тем ограниченность

сырьевой базы и высокая себестоимость производства не позволили рекомендовать этот класс ЖТ для практического использования в лазерах. Аналогичный вывод был сделан относительно изученных нами малотоксичных ЖТ на основе органических соединений индия.

В процессе работы над созданием ЖТ на основе фосфор-, германий- и индийорганических соединений был решен ряд важных задач физико-химического характера: предложены изобарные смеси растворителей для хроматографического контроля примесей в фосфорорганических жидкостях [26, 27] и создан универсальный высокочувствительный проявитель для тонкослойной хроматографии германийорганических соединений [28].

Производные карбоновых кислот. На следующем этапе работы было обращено внимание на большой класс органических производных карбоновых кислот, в особенности на эфиры этих кислот. Среди них особый интерес вызывал ряд сложных эфиров угольной кислоты — жидкие органические карбонаты общей структурной формулы (1)



где R, R₁ — алкилы.

Известно довольно много применений таких соединений: в качестве растворителей полимеров в химической и текстильной промышленности; как исходные вещества для синтеза мономеров, полимеров и пластификаторов; как абсорбенты компонентов природных и синтетических газов, таких как CO₂ и H₂S; в качестве осушителей газообразного формальдегида, а также составной части формовочных смесей в литейной промышленности [14, 29–31].

При детальном рассмотрении и проверке физико-химических свойств этих соединений был отобран циклический эфир угольной кислоты, представляющий собой бесцветную жидкость, имеющую низкую температуру плавления и высокие температуры кипения, вспышки, а также самовоспламенения (~400 °C).

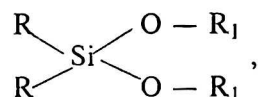
Эта жидкость выгодно отличалась от прочих сложных эфиров карбоновых кислот широким температурным диапазоном эксплуатации, хорошими вязкостно-температурными характеристиками и доступной сырьевой базой при синтезе на основе окиси пропилена и углекислого газа.

Высокая растворимость органических красителей в циклическом эфире угольной кислоты,

связанная с его уникальными электрическими свойствами (диэлектрическая проницаемость $\epsilon_d \approx 50$, что близко к уровню воды) [20], позволила в процессе нашей работы создать не только охлаждающую жидкость, но и фильтрующие и люминесцирующие ЖТС для твердотельных лазеров на его основе. Такие жидкости типа ПМ не вызывали коррозию многих металлов и были малотоксичны (четвертый класс опасности).

В результате исследований свойств ЖТ (ЖТС) типа ПМ было освоено их промышленное производство для применения в лазерной и других отраслях техники.

Кремнийорганические соединения. На следующем этапе поиска органических растворителей для лазерных ЖТ мы обратились к изучению обширного класса кремнийорганических соединений, включающего органосиланы $R_{4n}Si(OR)_n$ общей структурной формулы



где R, R_1 — алкилы и алкилены линейной и разветвленной структур и циклические производные.

Такие бесцветные жидкости характеризуются гидрофобностью, низкой температурой застывания, высокой сжимаемостью, химической инертностью, малым изменением вязкости с температурой, высокой термической, термоокислительной и фотостабильностью. Эти соединения являются хорошими диэлектриками. По этим причинам кремнийорганические соединения находят широкое применение в промышленности в качестве гидравлических — жидкостей и теплоносителей, пеногасителей, гидрофобизаторов, смазочных масел и консистентных смазок, способных длительно работать в интервале температур $(-100 \div 250)^\circ C$ [32—36].

Отбор соединений, проведенный по комплексу параметров (спектральные и вязкостно-температурные характеристики, фото- и термостойкость, токсичность, сырьевая база и др.) на основании данных научно-технической литературы и собственных экспериментов, позволил остановиться на диметилдиалкилоксисилане (ДМДАОС).

Высокая химическая прочность связей $Si-CH_3$ (314 кДж/моль) этого соединения [36] обуславливает стойкость ЖТ, созданных на его основе, к действию длительного нагрева и мощного облучения. ДМДАОС малотоксичен: $LD_{50} > 10$ г/кг, ПДК в воздухе рабочей зоны 10 мг/м³, что обуславливает его отнесение к четвертому классу опасности.

Нами разработана технология синтеза особо качественного ДМДАОС с высоким выходом

продукта ($> 90\%$), освоено его производство. На его основе были созданы ЖТ (в том числе фильтрующие и люминесцирующие) типа РМ.

Светофильтрующие и люминесцирующие компоненты жидкостных теплоносителей

Универсальность применения ЖТ в лазерной технике определяется, помимо эффективного охлаждения элементов лазера, возможностью фильтрации в них паразитной части излучения накачки, а также более выгодной возможностью преобразования этой части накачки за счет люминесценции ЖТ в область поглощения активных сред. Использование в целях фильтрации излучения накачки ЖТ на основе растворов неорганических солей имеет ряд недостатков:

необходимость использования в качестве растворителя воды или водных смесей, что ограничивает диапазон рабочих температур;

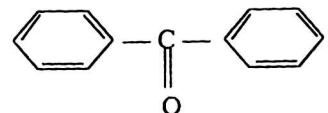
низкий коэффициент молекулярной экстинкции ϵ неорганических солей, что имеет следствием большие концентрации добавок для неорганических ЖТС и в конечном счете приводит к росту коррозионной активности жидкостей.

Еще более значительны трудности нахождения эффективных люминесцирующих добавок к таким ЖТС.

По этим причинам нами был проведен поиск фильтрующих и люминесцирующих добавок для органических и элементоорганических растворителей для использования их в ЖТС.

Фильтрующие добавки. Основные требования, предъявляемые к органическим соединениям для фильтрации УФ-части излучения-ламп накачки, сводятся к обеспечению высоких значений молярной экстинкции ϵ в области $\lambda < 400$ нм при прозрачности в видимой области спектра и высокой растворимости в применяемых растворителях. Большое значение имеет и стойкость соединений к действию нагрева и мощного широкополосного излучения ламп накачки лазеров. Вопросы фотостойчивости соединений могут быть рассмотрены с точки зрения химии возбужденных состояний, т. е. их реакционной способности.

В фотохимических реакциях важную роль играет донорно-акцепторное взаимодействие между молекулами растворенного вещества и молекулами растворителя. Так, в молекулах абсорбера УФ-излучения — бензофенона общей структурной формулы



помещенных в протонсодержащую среду, под действием коротковолнового излучения протека-

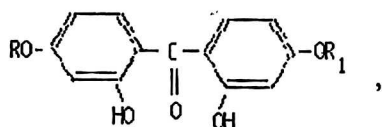
ет деструктивная реакция элиминирования, связанная с отрывом протона от молекул растворителя. При создании квазиароматического цикла с внутримолекулярным переносом протона такая реакция становится невозможной. По этой причине нами были исследованы имеющие вышеуказанную структуру соединения из класса *o*-оксибензофенонов.

В спектре этих соединений имеются две интенсивные полосы поглощения в ближней УФ-области длин волн, отвечающие *n*- и *o*-переносам заряда. Полоса поглощения, связанная с *n*-переносом заряда, соответствует $\lambda = 280\text{--}300$ нм. На положение и интенсивность этой полосы сильно влияют заместители в *n*-положении к карбонильной группе. Полоса поглощения, связанная с *o*-переносом заряда, соответствует $\lambda = 340\text{--}360$ нм. В этом случае мало сказываются заместители в фенильных кольцах [37].

Под действием света в *o*-оксибензофенонах происходит перераспределение электронной плотности, и за счет переноса протона в них образуется хиноидная структура. После прекращения действия света с высокой степенью обратимости происходит переход в основное состояние, т. е. не происходит распада соединений, поэтому последние высокофотостабильны.

Увеличения растворимости *o*-оксибензофенонов в органических растворителях можно было добиться введением соответствующих заместителей, которые мало влияют на положение и интенсивность полос поглощения, например в случае различных алкильных остатков в эфирах 2,4-диоксибензофенона. Подбирая структуру и концентрацию соединений в определенном растворителе, можно добиться перекрытия всей УФ-области спектра (вплоть до $\lambda < 400$ нм).

В результате проведенных исследований были отобраны фильтрующие добавки из класса *o*-бензофенонов общей структурной формулы



где R, R₁ — алкилы.

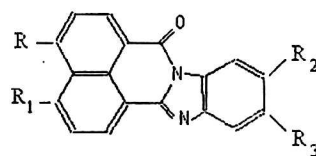
Оптимальная концентрация добавок C_д была $\sim 10^{-3}$ моль/л. Соединения обеспечивали прозрачность ЖТС на их основе во всей видимой и в коротковолновой части ближней ИК-области спектра.

Люминесцирующие добавки. Среди люминесцирующих компонент ЖТ наиболее важны соединения, излучающие в области основных полос поглощения неодимовых активных сред (530, 580, 750, 810, 880 нм). Практическое значение среди них имеют люминофоры для желто-зеленой области спектра, так как ИК-люми-

нофоры не обладают высокой интенсивностью флюоресценции. Как и для фильтрующих добавок, люминесцирующие компоненты ЖТ должны обладать значительной растворимостью в органических растворителях при высокой термодинамической и фотостабильности. Помимо этого, они должны иметь высокий квантовый выход флюоресценции $\eta_{фл}$ (на практике $\eta_{фл} \leq 0,7$). Большое значение имеет соответствие области люминесценции с областью поглощения активных сред. Наиболее выгодны люминофоры с большим стоксовым сдвигом между длинноволновой полосой поглощения и полосой люминесценции (уменьшается роль реабсорбции излучения люминесценции) и малыми стоксовыми потерями при переизлучении в полосу поглощения активной среды.

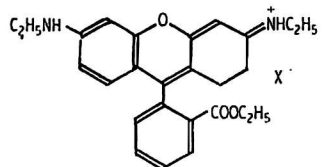
В результате проведенных исследований люминофоров, принадлежащих к различным классам химических соединений, наиболее перспективными оказались родамины, нафталимиды, кумарины, бензантроны и бензимидазолы [38].

Спектры поглощения и флюоресценции растворов ряда исследованных люминофоров, наряду со спектром поглощения неодимового стекла ГЛС-1, показаны на рис. 1. В люминесцирующих ЖТ (ФЛЖ) на основе жидкости типа АМ были использованы желто-зеленые люминофоры — производные 1,8-нафтоилен-1',2'-бензимидазола структурной формулы



где R, R₁, R₂, R₃ — алкилы. Такие соединения имеют чрезвычайно большой стоксов сдвиг (~ 100 нм).

Из группы этих люминофоров было выбрано соединение — люминофор 2, который применялся в ФЛЖ на основе жидкости РМ. Здесь важна достаточно хорошая растворимость люминофора 2 в слабом растворителе РМ, обладающем весьма низким значением диэлектрической проницаемости $\epsilon_d \approx 2$. В ФЛЖ на основе ПМ (сильном растворителе с $\epsilon_d \approx 50$) мог быть применен высокоэффективный люминофор родамин 6Ж структурной формулы



в молекуле которого имеется противоион X⁻ (обычно это Cl⁻).

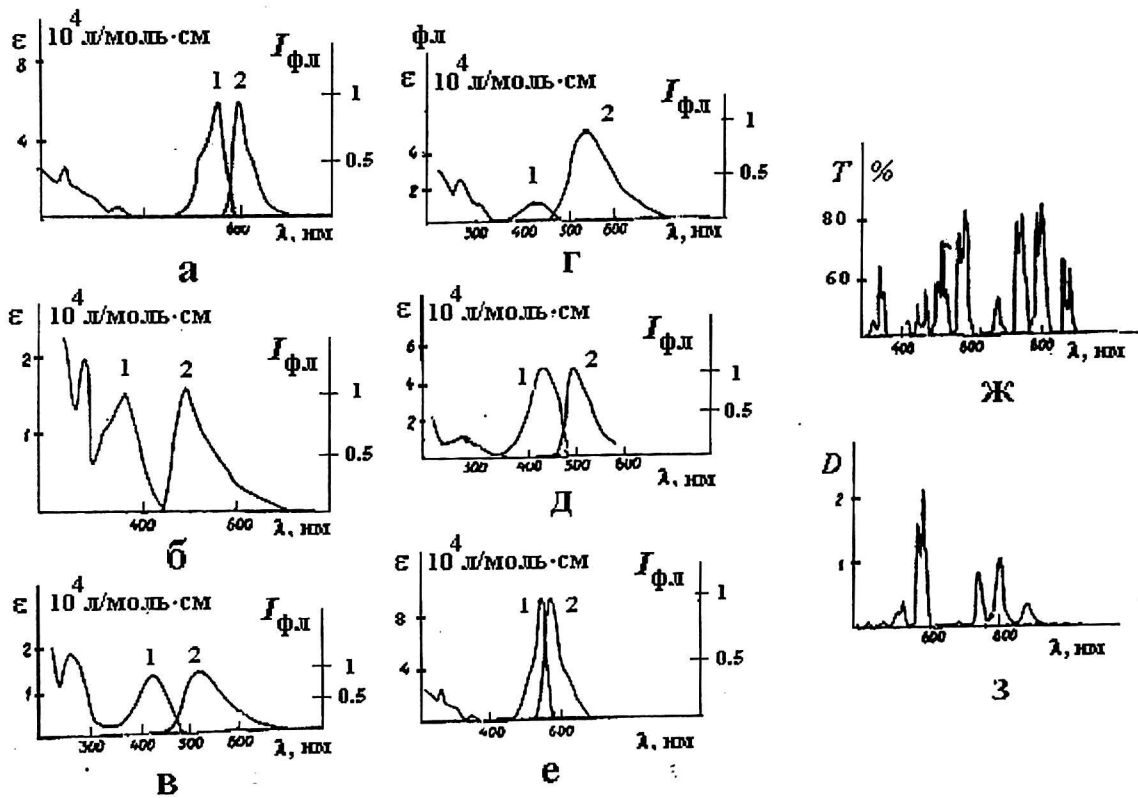


Рис. 1. Спектры поглощения $\epsilon(\lambda)$ (1) и флюоресценции $I_{\text{фл}}(\lambda)$ растворов (2) для слоя толщиной 1 см :
 а — родамина В в спирте; б — люминора 2 в РМ; в — люминора 5 в АМ; г — люминора 1 в метилкарбитоле;
 д — кумарина 7 в ПМ; е — родамина 6Ж в спирте; ж — спектры пропускания $T(\lambda)$ неодимового граната АИГ:Nd;
 з — поглощения $D(\lambda)$ неодимового стекла ГЛС-1.
 Квантовый выход флюоресценции растворов люминофоров $\eta_{\text{фл}} = 0,5$ (а); 0,7 (б); 0,65 (в, г); 0,8 (д); 0,95 (е)

Люминесцирующие жидкости на основе родамина В, люминофоров 1 и 5, кумарина-7 (рис. 1) оказались недостаточно флоростабильными либо менее эффективными для практического применения, чем ФЛЖ с люминором 2 и родамином 6Ж.

Свойства жидкостных теплоносителей и теплоносителей-светофильтров

Поиск органических растворителей, пригодных в качестве основы теплоносителей для лазеров, привел нас к выводу о перспективности ряда ранее не использованных соединений. Вполне приемлемыми и доступными для промышленного производства, обеспечивающего оптическое качество жидкостей, оказались ЖТ на основе алкано-спиртовых композиций — ЖТ типа СХЖ и эфиров элементоорганических и органических кислот, а именно фосфорсодержащих эфиров (ЖТ типа АМ), эфиров угольной кислоты (ЖТ типа ПМ), низкотемпературных алкилсиланов (ЖТ типа РМ). В табл. 1 приведены теплофизические характеристики: плотность ρ , изобарная теплоемкость C_p и теплопроводность λ (при нормальных условиях); температу-

ры замерзания T_z , кипения T_k и вспышки T_v , кинематическая вязкость ν_k при комнатной и пониженной температуре (-50°C) типов и марок промышленно выпускаемых ЖТ [11].

Как видно из табл. 1, жидкости типа ПМ обладают наибольшей плотностью, теплопроводностью, температурой вспышки и характеризуются наибольшим интервалом существования жидкой фазы: разностью температур кипения и замерзания. Вместе с тем жидкости ПМ более вязки, чем все другие ЖТ. Важный для практики фактор — изменение вязкости в диапазоне температур от -50°C до комнатной, составляющее 10–20 раз для всех ЖТ, ниже всего — для жидкостей типа АМ, теплоемкость — выше для жидкостей РМ. Наименее вязки среди рассмотренных ЖТ жидкости типа ВМ и РМ, хотя им присуща наименьшая температура вспышки. Несмотря на это, значения T_v для большинства рассмотренных ЖТ достаточно высоки, чтобы обеспечить их взрывобезопасность в обычных условиях эксплуатации.

В табл. 2 приведены спектральные и эксплуатационные характеристики различных видов и марок промышленно выпускаемых ЖТ и ЖТС [11].

Таблица 1

Теплофизические характеристики ЖТ

Тип ЖТ	Марка ЖТ	ρ^* , г/см ³	C_p^* , Дж/г·К	λ^* , Дж/м·К	T_3 , °С	T_k , °С	T_b , °С	ν_k , мм ² /с	
								20 °С	-50 °С
ВМ	СХЖ 8А	0,78	1,97	0,16	<-60	120	36	0,8	11
АМ	ОЖ АМ2-00Р	1,07	1,72	0,18	<-60	217	105	1,3	13
	ФХЖ АМ2-13Н								
	ФЛЖ АМ2-9Н2								
РМ	ОЖ 1ЭО-1	0,85	2,9	0,12	<-60	225	85	1,0	12
	ФХЖ РМ11-12Н								
	ФЛЖ РМ11-9Н2								
ПМ	ОЭ ПМ1-00Р	1,20	1,65	0,21	<-60	240	125	2,3	40
	ФЛЖ 20-1								
	ИЖТ ПМ1-4								
	ИЖТ ПМ1-6								

* Значения при нормальных условиях.

Таблица 2

Спектральные и эксплуатационные характеристики ЖТ

Вид ЖТ	Марка ЖТ	Длина волны			Режим эксплуатации	
		пропускание	поглощение	переизлучение	плотность энергии (мощности) накачки, W/S (P/S), Дж/см ² (Вт/см ²)	Ресурс $N_{уд}$, МДж/л
Импульсный режим накачки						
ОЖ	ОЖ АМ2-00Р	300—1500	< 220	—	3 25	200 10
	ОЖ 1-ЭО-1	300—1500	< 220	—	3	50
	ОЖ ПМ1-00Р	300—1500	< 220	—	3 25	80 3
ФХЖ	ФХЖ АМ2-13Н	420—1500	< 360	—	25	10
	СХЖ 8А	420—1800	< 370	—	5 (300)	10 100
	ФХЖ РМ11-12Н	420—1500	< 360	—	5	50
ФЛЖ	ФЛЖ АМ2-9Н2	450—1500	< 400	480—540	5	50
	ФЛЖ РМ11-9Н2	450—1500	< 400	480—540	5	20
	ФЛЖ 20-1	580—1500	< 550	560—600	5	45
Непрерывный режим облучения						
ИЖТ	ИЖТ ПМ1-4	900—1500	< 760	—	(0,7)	850* (150 °С)
Импульсный неодимовый лазер ($\tau = 30$ нс)						
ИЖТ	ИЖТ ПМ1-6	1000—1500	< 840	—	(30)	60*

* Без прокачки жидкости.

Примечания:

1. Ресурс ЖТ и ЖТС характеризуется удельной нагрузкой на жидкость $N_{уд} = mW/V$, где m — общее количество импульсов разряда лампы накачки; W — энергия вспышки лампы; V — объем ЖТ в системе.

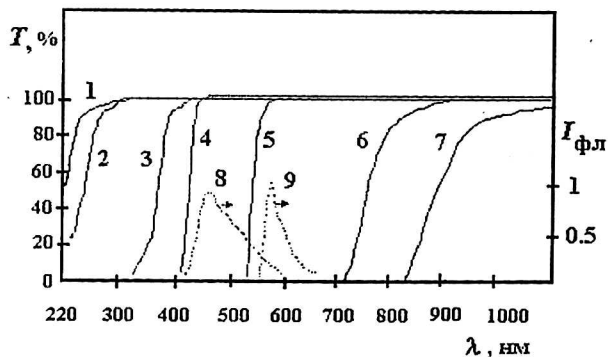
2. P — мощность лампы накачки; S — площадь внешней поверхности лампы; τ — длительность вспышки.

Спектры пропускания и флюоресценции этих жидкостей показаны на рис. 2, а. Как видно из табл. 2 и рис. 2, охлаждающие жидкости ОЖ прозрачны в видимой и ближних УФ- и ИК-областях спектра, перекрывающих диапазоны накачки наиболее употребляемых твердотельных (в том числе неодимовых, рубиновых и сапфир-титановых) лазеров.

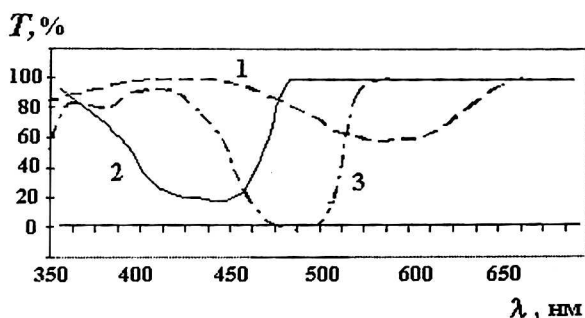
Фильтроохлаждающие жидкости вида ФХЖ прозрачны только в видимой и ближней ИК-областях длин волн. В то время как они, аналогично жидкостям вида ОЖ, не поглощают излучение ламп накачки в области поглощения большинства активных сред, ФХЖ обеспечивают

фильтрацию (поглощение) вредной УФ-части излучения ламп. Для этого в их состав вводятся описанные выше высокостабильные красители — абсорберы УФ-излучения.

Фильтрующие свойства рассмотренных ФХЖ близки друг к другу, хотя СХЖ 8А имеет более длинноволновую границу пропускания в ближней ИК-области спектра. Спектральные характеристики ФХЖ близки к достигаемым в водных теплоносителях [39], которые находят применение в медицинских лазерах. Следует иметь в виду невозможность использования водных ЖТ в лазерах, работающих в полевых условиях.



а



б

Рис. 2. Спектры пропускания:

а — $T(\lambda)$ (1–7) и флюоресценции $I_{\text{фл}}(\lambda)$ (8, 9) жидкостных теплоносителей и жидкостных теплоносителей-светофильтров: 1 — ОЖ-1-ЭО-1; 2 — ОЖ ПМ1-00Р; 3 — ФХЖ РМ11-12Н; 4, 8 — ФЛЖ РМ11-9Н2; 5, 9 — ФЛЖ 20-1; 6 — ИЖТ ПМ1-4; 7 — ИЖТ ПМ1-6; б — $T(\lambda)$ жидкостных теплоносителей для телевизионной техники: 1 — ЖТ-1; 2 — ЖТ-2; 3 — ЖТ-3

Особое внимание при применении ЖТ на практике следует обратить на возможность снижения их поглощающей способности в части вакуумного УФ-спектра (180–220 нм), что приводит к необходимости введения в состав ЖТ добавочных компонент. Ими могут служить соли карбоновых кислот, имеющие интенсивные $n-\sigma^*$ -переходы в этой области спектра [40].

В случае использования жидкостей ФХЖ снижается нагрев активных сред, уменьшается наведенная анизотропия и практически устраняются двулучепреломление и возникновение центров окраски в неодимовых лазерах [41, 42]. В случае рубиновых лазеров становятся малосущественными каскадные переходы в активной среде. Все это позволяет повысить КПД и значительно увеличить ресурс таких лазеров [43, 44].

Фильтр-люминесцирующие жидкости вида ФЛЖ, помимо фильтрации излучения накачки, обеспечивают трансформацию (переизлучение) вредной части излучения ламп в область накачки активных сред. Так, с помощью ФЛЖ РМ11-9Н2 происходит дополнительная накачка I полосы поглощения ионов Nd^{3+} (вблизи 530 нм), а с

помощью ФЛЖ 20-1 — накачка II полосы поглощения этих ионов (около 580 нм). В состав ФЛЖ входят описанные выше свето- и термостабильные люминофоры, имеющие высокий квантовый выход излучения. Их применение способно обеспечить значительное (на 50–150 %) увеличение КПД и снижение порога генерации неодимовых лазеров [45], что, в свою очередь, позволяет улучшить массогабаритные характеристики изделий.

Фильтрация видимого излучения в ИК-светофильтрах-теплоносителях вида ИЖТ способствует выделению полезного ИК-излучения на фоне помех от остальной части излучения ламп накачки лазеров и световых прожекторных приборов, могущих носить демаскирующий характер. Глубина фильтрации видимого излучения выше в ИЖТ ПМ1-6, чем в ИЖТ ПМ1-4, что практически делает невидимым для наблюдателя свечение мощного прожектора даже в ночных условиях.

Все ЖТ (ЖТС), указанные в табл. 2, выдерживают длительный (в течение сотен и тысяч часов) нагрев до 120–140 °С и стойки к излучению ламп накачки, причем в особо жестких режимах накачки (плотность энергии разряда W/S до ~25 Дж/см²) наиболее подходят жидкости типа АМ, а при средних режимах разряда ($W/S = 3-5$ Дж/см²) — типа ВМ, ПМ и РМ. Следует отметить приспособленность жидкостей вида ИЖТ к эксплуатации при отсутствии их прокачки.

Промышленно выпускаемые ЖТ (ЖТС) мало чувствительны к воздействию ионизирующего излучения, вибрации, тряски и другим факторам. Список конструкционных материалов, допущенных к контакту с теплоносителями в трактах охлаждения лазеров, достаточно широк. В него входят различные нержавеющие стали (желательно с большим содержанием никеля), титан, никель, фторопласты, фторсиликоновые резины, ряд герметиков и др. Для жидкостей типа ВМ и РМ допустимы алюмомагниевого сплавы (желательно с большим содержанием магния). Применение алюминиевых сплавов ДТ возможно с жидкостями ВМ. В контакте со всеми этими жидкостями используются разнообразные оптические стекла, кварц, активные элементы на основе неодимовых стекол и гранатов, сапфир-титана и рубина.

При эксплуатации и подготовке к эксплуатации изделий, включающих лазеры с жидкостным охлаждением, существенны токсикологические характеристики жидкостей. ЖТ (ЖТС) типа АМ соответствуют второму классу опасности жидкости; типа ВМ — третьему классу опасности; типа РМ и ПМ — четвертому классу. Как правило,

эксплуатация теплоносителей не требует специальных мер предосторожности: нейтрализация и утилизация их достаточно просты.

Модифицированные жидкостные теплоносители для лазеров оказываются полезными для охлаждения экранов кинескопов и улучшения цветного восприятия в проекционных телевизорах [46]. Спектры пропускания ЖТ для телевизионной техники показаны на рис. 2, б. Применение органических ЖТ в этих изделиях вызвано, с одной стороны, значительным нагревом экранов трубок, а с другой стороны — существованием побочных линий свечения нанесенных на них неорганических люминофоров. Так, в кинескопах синего свечения применение жидкости ЖТ-1 сдвигает цветовые координаты с (0,17; 0,11) до (0,155; 0,09); в кинескопах зеленого свечения с ЖТ-2 — с (0,33; 0,555) до (0,33; 0,575); в кинескопах красного свечения с ЖТ-3 — с (0,59; 0,425) до (0,655; 0,345). Это заметно улучшает цветопередачу в телевизорах [47, 48].

Одно из возможных применений ранее описанных жидкостей связано с использованием их в апохроматических объективах высокого разрешения. Они применяются для повышения эффективности аппаратуры наблюдения и различных оптических систем наведения и фотографирования. Обычно это осуществляется с объективами, в которые входят стекла с ходом дисперсии, существенно отличным от обычных оптических стекол [49, 50].

Ход дисперсии в видимом диапазоне длин волн связан с поглощением в ИК-области спектра, где проявляются валентные колебания С-Н-, N-H, O-H- и их обертона. В связи с этим может быть выгодна замена дорогостоящих стекол с особым ходом дисперсии на прозрачные в видимой части спектра жидкости, которым присуще значительное поглощение ИК-излучения.

Для создания эффективных апохроматических объективов нами были предложены алкановые соединения и водно-гликолевые растворы, которым был свойствен аномальный ход дисперсии. Состав этих жидкостей близок к аналогичным ЖТ.

Вклад жидкостного оптического элемента в термооптическую аберрацию положения (расфокусировку) пропорционален коэффициенту

$$\gamma = F\beta/(n - 1),$$

где F — оптическая сила элемента; β — температурный коэффициент показателя преломления n .

При использовании жидкостных элементов удается уменьшить расфокусировку и повысить разность коэффициентов Аббе по сравнению с системами с обычным ходом дисперсии [51].

При замене одной из линз из особого флинта ОФ4 многолинзового стеклянного объектива Апо-Телезенитар 4,5/300 К на жидкостную линзу (рис. 3) удалось повысить фотографическую разрешающую способность с 45 до 65 линий/мм для фотоматериала КН-1, который широко используется в аэро- и космической фотосъемке и при создании оптического оружия [52].

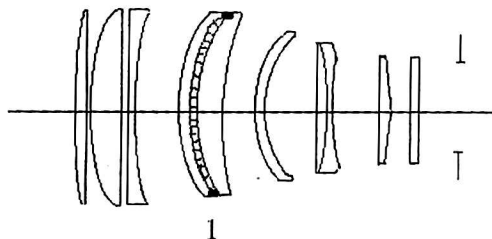


Рис. 3. Вид стеклянного апохроматического объектива. Пространство внутри жидкостной линзы 1 заполнено водно-гликолевым раствором с аномальным ходом дисперсии

В результате описанного выше поиска и исследования физико-химических свойств органических соединений разработан ассортимент наиболее эффективных составов ЖТ (ЖТС) для лазеров специального применения. Созданные жидкости находят также применение в световой, телевизионной и фотографической технике.

Исследования физических явлений в жидкости, поглощающей мощное широкополосное излучение

Широкое практическое использование ЖТ (ЖТС) в лазерных приборах привлекло наше внимание к сложным физическим и физико-химическим явлениям, происходящим в жидкостях во время работы импульсных лазеров. Нерезонансное оптотермодинамическое взаимодействие мощного широкополосного излучения ламп накачки с ЖТ оказывает значительное влияние на условия работы ламп, определяя, в частности, энергетический диапазон эксплуатации ламп в поглощающей жидкости. Резонансное взаимодействие излучения с ЖТ проявляет себя в процессе изменения спектрального состава излучения импульсных ламп накачки, который может быть осуществлен с помощью люминесцирующих жидкостей, а также спектрального состава источников излучения мощных световых приборов при использовании маскирующих жидкостных ИК-светофильтров.

Исследование процессов, протекающих при взаимодействии мощного широкополосного излучения с жидкостью, требует привлечения теоретического аппарата и методов эксперимента, развитых в квантовой электронике, термодинамике, спектроскопии и других областях физики.

Таким образом, рассматриваемые проблемы находятся на стыке различных разделов науки, что, хотя и обуславливает ряд трудностей проводимых исследований, в то же время способствует получению научных результатов, практически значимых для разработки ЖТ и лазеров с жидкостным охлаждением. Тем самым обеспечивается получение данных, облегчающих создание наиболее эффективных ЖТ (ЖТС) для приборов лазерной и световой техники, а также выработку рекомендаций по созданию надежных лазерных квантронов и нахождению режимов их работы, в которых наиболее полезным образом реализуются свойства органических жидкостей в составе ЖТ.

Взаимодействие мощного излучения ламп накачки с поглощающей жидкостью в лазерных квантронах

Оптотермодинамические явления, происходящие в реальных системах накачки лазеров во время вспышки лампы, оказываются сложными для адекватного количественного описания. Поэтому нами была рассмотрена модельная задача о реакции ЖТ на действие мощного излучения, которая, однако, отражала все существенные стороны количественного подхода. В этом случае кювета, полностью заполненная поглощающей жидкостью, предполагалась абсолютно жесткой, а система лампа—жидкость — консервативной. Это исключало перемещение жидкости вдоль оси системы; так что все величины, входящие в задачу, не зависели от продольной координаты. Роль теплопроводности жидкости также могла считаться несущественной.

Анализ явлений в системе лампа—жидкость показывает, что основное энерговыделение в среде ограничивается слоем ЖТ, прилегающим к внешней поверхности ламп накачки, толщина которого $\sim k^{-1}$, где k — показатель поглощения ЖТ. Жидкость внутри этого слоя сильно разогревается и, расширяясь, давит как поршень на остальную массу ЖТ, которая сжимается адиабатически. Поэтому вне этого слоя градиентами всех величин, описывающих состояние ЖТ, можно пренебречь, т. е. вне светопоглощающего слоя все эти величины зависят только от времени и не зависят от пространственных координат. Именно поэтому становится несущественной конкретная форма внутренней полости кюветы с ЖТ.

В условиях значительного превышения длительности вспышки лампы над временем выравнивания давления P градиенты давления становятся пренебрежимо малыми, и P является функцией только от времени. Наоборот, градиенты остальных термодинамических величин внутри светопоглощающего слоя велики, и координатная зависимость существенна.

Таким образом, давление как внутри, так и вне светопоглощающего слоя остается постоянным для фиксированного момента времени. Вследствие практической замкнутости объема квантрона в жидкости возникают импульсы давления, несколько сдвинутые во времени по отношению к импульсу накачки.

Давление P в линейном приближении в отсутствие кипения в ЖТ прямо пропорционально объемной плотности энергии ϵ_n , поглощенной в жидкости

$$P(t) = \Gamma \epsilon_n(t), \quad (1)$$

где безразмерный коэффициент Грюнайзена Γ для органических жидкостей близок к 1 (например, он равен 0,66 для этилового спирта и $\sim 0,8$ для триалкилфосфата). Вскипание жидкости приводит к дополнительному росту давления (на практике кипения ЖТ стараются избежать также из-за нежелательности рассеяния излучения накачки в квантроне на пузырьках пара).

В общем случае задача о реакции жидкости на вспышку импульсной лампы достаточно сложна и решалась нами различными методами. Здесь могут быть применены методы теории подобия; в нелинейном приближении связь $P(t)$ с $\epsilon_n(t)$ представима в явном аналитическом виде для ЖТ на основе спирта с применением эмпирического уравнения состояния спирта; для ЖТ на основе воды и спирта решение было найдено численными методами [53, 54].

Большое практическое значение имеет выяснение влияния давления в ЖТ на предельные нагрузки работающих в них ламп накачки. Так как температура ЖТ гораздо ниже температуры газоразрядной плазмы, контактирующей с их внутренней оболочкой, роль термических эффектов в жидкости невелика. В отличие от этого амплитуда давления в ЖТ может стать существенно выше внутреннего давления в лампах. С этим было связано не объясненное до наших работ снижение предельной энергии импульсных ламп в жидкости $W_{пр}$ [55].

Для понимания этого явления необходимо учесть, что к оболочке ламп, находящихся в ЖТ, приложено как внешнее, так и внутреннее (из-за нагрева газа-наполнителя ламп и испарения кварцевой оболочки ламп) давление, так что значение напряжений, возникающих в материале оболочки, зависит от величины и соотношения этих давлений. Сделанные нами оценки и проведенные эксперименты показали, что особо опасны напряжения изгиба в месте заделки электродов в колбу ламп, которые могут превышать предельные значения напряжений для материала колбы ламп — плавленного кварца [56].

Компенсация этих напряжений при закреплении лампы в камере, обладающей высокой степенью жесткости, позволила бы снизить за счет приложенного к лампе продольного усилия эквивалентное напряжение в

$$\frac{K\sqrt{3} + (K + 1)v}{Kv(2\sqrt{3} + 1)} \approx$$

$(2v)^{-1}$ раз и, соответственно, повысить значение внешнего разрушающего давления P_p . Здесь $K = 2h/\bar{d}$; v — коэффициент Пуассона; h — толщина стенки колбы лампы; \bar{d} — средний диаметр колбы.

В отсутствие кипения ЖТ было получено выражение, связывающее $W_{пр}$ и P_p , которое имеет вид

$$W_{пр} = P_p S \delta / G \eta_a \xi, \quad (2)$$

где S — площадь внешней поверхности колбы лампы; δ — толщина слоя ЖТ в камере (квантроне); η_a — КПД лампы в полосе поглощения ЖТ; ξ — фактор, учитывающий временную зависимость давления и показывающий, какая часть энергии вспышки выделяется к моменту разрушения лампы (моменту достижения максимума давления в ЖТ).

Согласно (2), для роста предельной энергии лампы в жидкости следует стремиться к увеличению параметров S , δ и снижению η_a , ξ , что было подтверждено в серии опытов. Однако варьирование в нужную сторону указанных параметров затрудняется их заданностью в конструкции квантрона и выбранном режиме разряда лампы накачки. Поэтому в первую очередь целесообразно повысить значение разрушающего давления P_p , т. е. увеличить прочность колбы лампы (например, за счет роста отношения h/\bar{d}).

Так как для плавленого кварца $v = 0,17$, ожидаемый рост P_p близок к 3. Это было подтверждено в экспериментах, в которых получено увеличение в $\sim 2,5$ —3 раза внешнего разрушающего давления импульсных ламп типа ИФП 5000-2, размещенных в жесткой камере с фланцами, стянутыми продольными штангами. Рост значений $W_{пр}$ в этом случае был ниже (в $\sim 1,5$ раза), что объяснялось соответствующим изменением значений фактора ξ . Аналогичные результаты были получены в специальном жестком лазерном квантроне, в котором были введены демпфирующие объемы, снижающие действующее значение давления в ЖТ.

Еще один способ повышения внешнего разрушающего давления и предельной энергии ламп состоял в использовании режимов разряда с увеличенной длительностью вспышки, при которых могли быть достигнуты квазистационарные условия нагружения места заземления оболочки лампы [57].

Значительное влияние оптотермодинамических процессов, происходящих в ЖТ, на предельные нагрузки источников накачки должно иметь следствием зависимость долговечности ламп от термодинамических факторов. Это вытекает из присущей импульсным лампам тесной связи долговечности с предельной энергией разряда, а также из общих соображений об усталостной прочности изделий. По этим представлениям наработка изделия, находящегося под действием растягивающего напряжения, экспоненциально зависит от величины этого напряжения. Так как эквивалентное напряжение растяжения, возникающего в оболочке лампы под действием внешнего давления, пропорционально величине этого давления, а давление в ЖТ (в линейном приближении) пропорционально плотности энергии вспышки W (формула (1)), то можно ожидать, что наработка ламп в ЖТ

$$N \sim \exp(-AW/S), \quad (3)$$

где A — постоянная задачи.

К началу наших исследований литературные сведения о долговечности ламп накачки в ЖТ практически отсутствовали. Исходной точкой в анализе особенностей работы импульсных ламп в ЖТ являлось представление о том, что работоспособность ламп в ЖТ определяется комплексными параметрами системы лампа—жидкость. Известно, что распространенная причина отказов при работе твердотельных лазеров с жидкостным охлаждением состоит в появлении графитообразных налетов на внешней поверхности колбы мощных импульсных ламп накачки по мере наработки лазеров, что может сопровождаться появлением осадка при возникновении сажевых фрагментов (сажеобразовании) в объеме ЖТ. Возникновение осадка в ЖТ могло сопровождаться травлением оболочки лампы, обесцвечиванием жидкости под действием коротковолновой части излучения накачки и ростом коррозионной активности ЖТ при фотохимических процессах в облучаемой жидкости [58].

Таким образом, все эти явления вызывали изменение спектрального состава и интенсивности излучения, попадающего на активный элемент лазера, что приводило к снижению ресурса изделий. Помимо этого, оптотермодинамические процессы в ЖТ приводили к износу и разрушению оболочки источников накачки.

В экспериментах, проведенных с рядом ЖТ и других органических растворителей, было установлено, что долговечность импульсных ламп N в ЖТ растет по мере уменьшения плотности энергии разряда W/S , причем зависимость N от отношений W/W_e и W/S близка к линейной в соответствии с выражением (3). Была отмечена

целесообразность применения в качестве оболочки ламп колб из легированного кварцевого стекла, в котором отсекалась значительная часть излучения накачки. Так, наработка в ФХЖ АМ2-00Р до появления налетов на оболочке ламп ИФП-3000-2, легированных церием, при $W/S = 25$ Дж/см² в 2—3 раза превышала наработку в ФХЖ АМ2-00Р аналогичных ламп ИФП-5000 из прозрачного кварцевого стекла и была близка к достигаемой на воздухе и при нахождении ламп ИФП-5000 и ИФП-3000-2 в дистиллированной воде [59].

Ряд особенностей механизма объемного сажеобразования в органических жидкостях, подвергаемых воздействию излучения импульсных ламп, был изучен в работе [60]. Показано наличие порога сажеобразования, который ниже порога самопробоя в жидкостях. Это явление объяснялось крекингом паров жидкости в окрестности инородных включений, взвешенных в жидкости и нагреваемых до достаточно высоких температур под действием излучения. Порог объемного сажеобразования мог быть увеличен при введении ингибиторов процесса крекинга либо снижен при добавлении в жидкость катализаторов этого процесса.

Исходя из возможной аналогии процесса появления налетов на оболочке ламп с объемным сажеобразованием в ЖТ, нами было предложено для увеличения ресурса лазеров с ламповой накачкой введение специальных добавок (в том числе малого количества воды) в состав ЖТ (ЖТС). Повышение ресурса таких лазеров могло быть получено при ограничении концентрации фильтрующего компонента в ФХЖ, которое приводило к снижению температуры ЖТ в случае воздействия на него широкополосного излучения ламп накачки [59].

Оптермодинамические явления в жидкости, поглощающей мощное излучение

Один из важных фундаментальных результатов, полученных нами при исследовании нерезонансного взаимодействия мощного излучения с жидкостью, состоит в создании нового метода диагностики критического состояния жидкости. Его преимуществом является отсутствие необходимости размещения жидкости в специальной сверхпрочной камере, а также в ее внешнем нагреве и повышении давления, так как критические условия могут быть достигнуты во время импульсного облучения жидкости.

Оптермодинамические процессы в жидкости, расположенной в замкнутом объеме, позволяют осуществить ее последовательный переход через всевозможные области фазовой неустойчи-

вости: стабильную, метастабильную, лабильную и закритическую области. Моменты достижения этих фазовых состояний определяются по характерным качественным изменениям в процессе протекания неравновесного фазового перехода парообразования. Визуально наблюдаются эффекты светорассеяния в результате гетерогенной нуклеации в метастабильной области, взрывного гомогенного вскипания в лабильной области, стабилизации системы жидкость—пар в окрестности критической точки и подавления гетерофазных неоднородностей в закритическом состоянии. Положение максимума рассеяния при этом жестко связано с моментом достижения критического давления вне зависимости от вида фазовой траектории, по которой система с жидкостью переводится в окрестность критической точки [61].

Данные экспериментальных исследований зависимости интенсивности рассеянного света $I(t)$ и давления $P(t)$ в жидкости во время расположенной в ней вспышки импульсной лампы показаны на рис. 4. В этих опытах использовались органические растворители из различных классов органических соединений, в том числе применявшиеся в составе ЖТ: этанол, октан, диэтиловый эфир и ацетон. Жидкости заливались в герметизированную цилиндрическую камеру, по оси которой размещался источник оптического излучения — импульсная ксеноновая лампа. Варьирование показателя поглощения жидкости достигалось путем изменения концентрации красителя, поглощающего излучение в УФ-части спектра. Как видно из рис. 4, интенсивность рассеяния резко возрастала в моменты достижения критического давления: соответственно, 63,8; 25,0; 36,1 и 47,0 бар для перечисленных выше жидкостей. Определение температуры жидкости в слое, прилегающем к лампе, проводилось по измерению рефракционных искажений хода оптического излучения в результате изменения показателя преломления жидкости. В результате этих измерений была показана близость значений температуры в момент достижения максимума рассеяния света к критическим значениям для исследованных жидкостей [62]. Таким образом, нами было предсказано и впервые экспериментально обнаружено явление светоиндуцированной критической опалесценции.

Предложенный нами бесконтактный метод диагностики критического состояния позволяет за одно измерение определить критические параметры жидкостей с точностью ~10 %. К достоинствам метода относится его применимость к жидкостям, склонным к разложению или полимеризации в области больших температур и давлений, а также к токсичным и радиоактивным

жидкостям. В частности, это касается триалкилфосфата, применяемого в ЖТ (ЖТС) типа АМ, который образует высокомолекулярные продукты вблизи критической точки. Оптотермодинамический метод позволил найти критические параметры этого соединения без каких-либо осложнений: критическое давление триалкилфосфата равнялось ~50 бар.

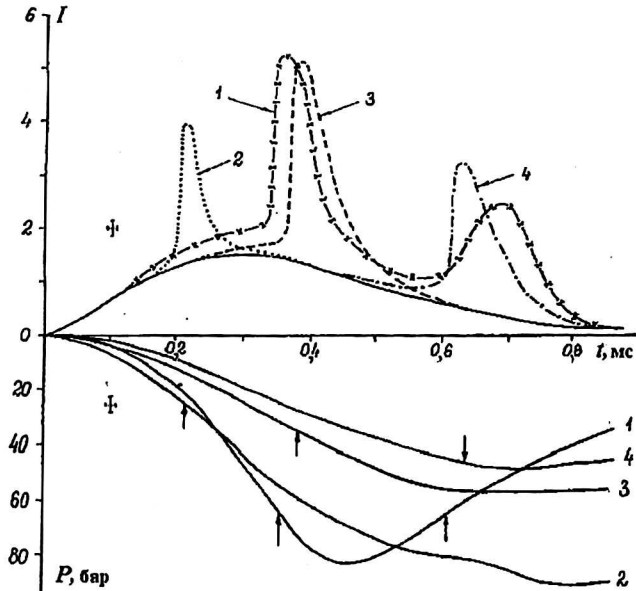


Рис. 4. Зависимости интенсивности рассеянного излучения I и давления P от времени действия излучения лампы-спышки, находящейся в поглощающей жидкости на основе:

- 1 — этилового спирта; 2 — октана;
- 3 — диэтилового эфира; 4 — ацетона.

Показатели поглощения жидкостей $k = 90$ (1), 170 (2), 80 (3), 40 (4) см^{-1} (см. нижнюю часть рисунка). Плотность поглощенной энергии излучения $\epsilon_n(t) = 10,0$ (1); $11,7$ (2); $7,8$ (3); $4,7$ (4) $\text{Дж}/\text{см}^3$; \uparrow — моменты времени достижения критического давления

К достоинствам метода относится также возможность прямого определения значений критической энтальпии однокомпонентных жидкостей. Так, для триалкилфосфата (АМ) критическая энтальпия, найденная по значению энергии, вложенной в жидкость к моменту достижения максимума рассеяния, составляла ~800 кДж/кг.

Возможности описываемого способа исследования жидкостей могут быть расширены при исследовании многокомпонентных систем. Так, в расслаивающемся растворе с нижней критической точкой расслоения вода-бутилцеллозольв (критическая температура $T_{кр} = 48,3$ °С, критическая концентрация $C_{кр} = 30,14$ %) впервые был обнаружен светоиндуцированный спиноподобный распад [63]. Оптотермодинамический перевод раствора через критическую точку приводил к созданию в нем лабильного состояния, релакса-

ция которого в устойчивое состояние происходила с образованием микрогетерофазных неоднородностей концентрации и последующим расслоением. Объемный рост новой фазы сопровождался появлением неоднородностей показателя преломления, что вызывало усиление рассеяния излучения вблизи критической температуры (см. рис. 5, а). На поздних стадиях спиноподобного распада в результате коалесценции одноименных микрогетерофазных неоднородностей наблюдалось образование мелкомасштабных (до 5 мкм) зерен каждой из фаз, которые группируются в крупномасштабные агрегации (см. рис. 5, б). Такая многоярусная самоорганизация расслаивающихся фаз могла быть получена только благодаря использованию оптотермодинамического метода, при котором система так быстро переводится далеко за критическую точку в лабильную область, что неустойчивая образованная структура не успевает разрушиться в поле тяжести.

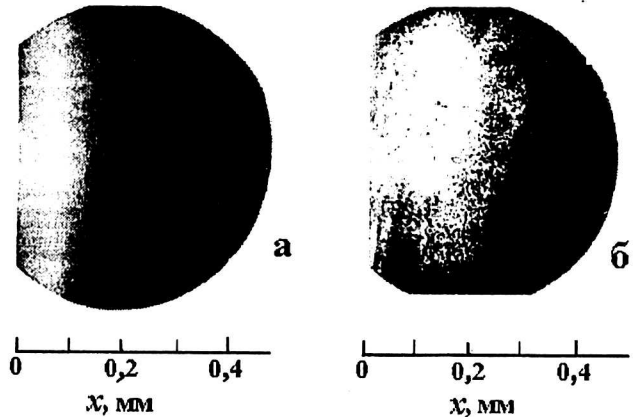


Рис. 5. Светоиндуцированная критическая опалесценция в расслаивающемся водном растворе бутилцеллозолява критической концентрации вблизи поверхности импульсной лампы. Плотность поглощенной энергии $W_n/S = 15,6$ $\text{Дж}/\text{см}^2$:

а — слой опалесценции при отклонении начальной температуры раствора от критической $\Delta T_{кр} = 19,2$ °С; б — зернисто-ячеистая структура расслаивающегося раствора на поздней стадии процесса при $\Delta T_{кр} = 2,8$ °С

Подобный светоиндуцированный термокапиллярный эффект выталкивания дисперсной фазы, содержащей органический компонент водного дисперсно-расслоенного раствора, может быть причиной указанного выше блокирования возникновения графитообразных налетов на поверхности колбы импульсных ламп, работающих в ЖТ, при добавлении в них малого количества воды [64]. В этом случае у поверхности импульсной лампы, работающей в жидкости, возникает кратковременная защитная водная пленка. Так как высаживание сажевых частиц на внешнюю поверхность ламп становится маловероятным, ресурс работы ламп в таких ЖТ, а зна-

чит, и долговечность лазеров с жидкостным охлаждением, заметно возрастают [59].

Резонансное взаимодействие мощного излучения ламп накачки с жидкостью

Широкое применение органических жидкостей в приборах с мощными источниками излучения обусловлено, помимо удобства жидкостного охлаждения, возможностью многоцелевого использования ЖТ за счет выбора добавочных компонентов в их составе. Разнообразные явления, вызываемые резонансным взаимодействием мощного широкополосного излучения с жидкостью в приборах с органическими жидкостями, в основном исследовались в случае их непосредственного влияния на работу лазеров с растворами красителей. Значительно меньше изучены процессы резонансного взаимодействия излучения с жидкостью, не так тесно связанные с непосредственной генерацией когерентного излучения. Особенностью целого ряда таких явлений служит комплексный характер влияния на их протекание всех составляющих системы лампа накачки—жидкость в лазерном квантоне. Так, в случае преобразования спектрального состава излучения ламп накачки в люминесцирующей жидкости ФЛЖ эффективность преобразования зависит как от спектрально-люминесцентных свойств жидкостей, так и от режима работы лампы накачки и геометрии лазерного осветителя. Важная часть задачи состоит в точном согласовании спектра люминесценции ФЛЖ с основными полосами поглощения активных сред.

В случае фильтрации излучения лампы в ЖТ, применяемых в ИК-прожекторах, где отсекается видимая часть излучения ламп, оказывается необходимым получить максимальный выход полезного излучения при маскировке светового прибора. Оптимизация условий работы таких ИЖТ в мощных приборах рассматриваемого типа, как и в случае ФЛЖ, требует точного согласования длинноволнового края полосы поглощения ИЖТ со спектром излучения ламп.

Применение флуоресцентных светофильтров в целях преобразования спектрального состава излучения накачки вызывало интерес многочисленных исследователей еще со времени проведения работы [65] ввиду очевидного преимущества совмещения функций охлаждения, фильтрации и трансформации излучения ламп накачки при простоте реализации. Вместе с тем экспериментальные результаты, полученные в этой области, сводились лишь к незначительному увеличению эффективности лазеров с люминесцирующими жидкостями, а также отличались плохой воспроизводимостью результатов применения ФЛЖ. Причиной этому служило отсут-

ствие достаточно полной теоретической модели преобразования излучения ламп накачки в ФЛЖ, что не позволяло не только оптимизировать, но даже примерно поставить условия эффективного применения ФЛЖ. Отсутствовали сведения о составе этих жидкостей, способных работать в условиях применения в лазерных изделиях.

Решение проблемы создания принципов отбора ФЛЖ, обеспечивающих ощутимое увеличение КПД лазеров и надежное функционирование систем в жестких условиях практического использования, потребовало от нас прежде всего создания методики расчета эффективности θ ФЛЖ, которая позволила бы в сжатые сроки, по данным измерений, осуществимых с малыми количествами дефицитных, только что синтезированных люминофоров, оценить перспективность ФЛЖ [66]. Помимо этого, потребовалось разработать экспресс-методику оценки эффективности жидкости θ , отобранной по теоретическим соображениям, так как не все условия эксперимента могли моделироваться данными расчета (например, трудно было моделировать влияние фотореакций в системе возбужденных уровней ФЛЖ). Качество ФЛЖ при этом оценивалось по измерениям с помощью импульсного фотометра эффективной суммарной энергии излучения в спектральных участках, соответствующих полосам поглощения активной среды лазеров, которые выделялись с помощью набора широкополосных интерференционных светофильтров [67].

Такая методика измерений была полезна для оценки эффективности и фотостойкости ФЛЖ в условиях опыта, приближенных к практике. Ее преимуществом по сравнению с непосредственным измерением в лазерных системах являлись снижение трудоемкости и сложности измерений, а также возможность расхода меньшего количества ФЛЖ и, следовательно, количества используемого люминофора.

Теоретический расчет эффективности θ применения ФЛЖ в лазерах выполнялся с помощью расчета относительного увеличения количества поглощенных в активном теле квантов излучения накачки при замене ФЛЖ на жидкость сравнения, в качестве которой может быть взят ФХЖ с границей поглощения ~ 360 нм (см. табл. 2). Согласно [68],

$$\theta = [\beta + G'(1+R)\eta_{\text{ФЛЖ}}\alpha\gamma]/\beta',$$

где спектральные параметры α , β и γ определяют, соответственно, средние по спектру величины поглощения излучения ламп в ФЛЖ и активном теле; β' — средняя величина поглощения излучения ламп в жидкости сравнения;

G' — величина, характеризующая относительную геометрическую эффективность светопередачи от ФЛЖ и ламп на активное тело; $\eta_{\text{фл}}$ — квантовый выход флюоресценции ФЛЖ.

Множитель $(1 + R)$ учитывает увеличение интенсивности флюоресцентного излучения, вызванное реабсорбцией излучения в ФЛЖ в условиях перекрытия полос поглощения и флюоресценции. Его величина ограничена следующим образом:

$$1 - \sigma_p \eta_{\text{фл}} \leq 1 + R \leq (1 - \sigma_p \eta_{\text{фл}})^{-1},$$

где σ_p — коэффициент реабсорбции излучения.

При расчете эффективности θ могут быть учтены поглощение части излучения ФЛЖ в плазме лампы накачки и влияние особенностей конструкции лазерного квантрона и расположения в нем слоя ФЛЖ. Так, эффективность оказывается выше в моноблочных отражателях с диффузным покрытием. Она падает с увеличением оптической толщины активных элементов и растет с повышением оптической толщины слоя ЖТ между лампой и активным элементом в квантроне (с последующим насыщением) [69].

Данные расчета зависимости θ от средней удельной мощности разряда $P_{\text{уд}} = W/V\tau$, где V — объем разрядного промежутка лампы; τ — длительность вспышки, приведены на рис. 6.

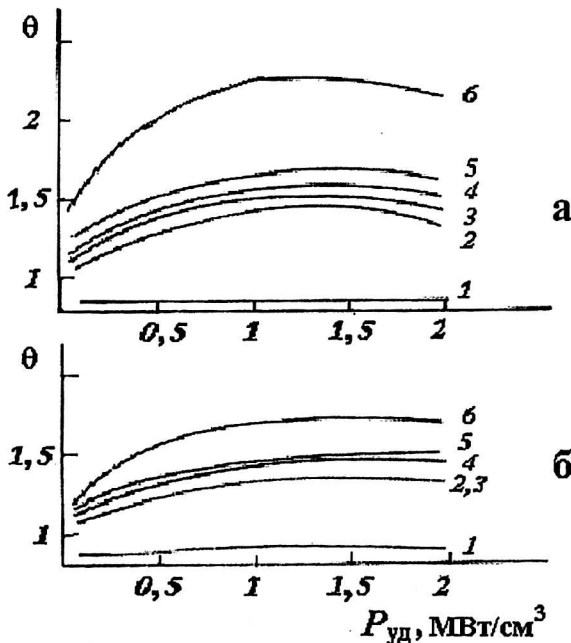


Рис. 6. Теоретические зависимости эффективности люминесцирующих жидкостей от средней удельной мощности разряда лампы накачки $P_{\text{уд}}$, рассчитанные без учета реабсорбции (1, 4) и с учетом реабсорбции накачки при многократном поглощении излучения (5, 6) для:

а — неодимового стекла ГЛС-1; б — неодимового граната АИГ:Nd: 1 — родамин В в спирте; 2 — люминор 2 в РМ; 3 — люминор 5 в АМ; 4 — люминор 1 в метилкарбитоле; 5 — кумарин 7 в ПМ; 6 — родамин 6Ж в спирте

Они относятся к случаю неодиловых активных элементов ГЛС-1 и АИГ:Nd для спиртовых растворов, указанных выше люминофоров родаминов 6Ж и В, а также кумарина 7 в ПМ, люминора 2 в РМ, люминора 5 в АМ и люминора 1 в метилкарбитоле. Данные рис. 6, относящиеся к кумарину 7 и родамину 6Ж, получены при учете реабсорбции излучения накачки при многократном поглощении излучения. От величины $P_{\text{уд}}$ зависит спектральный состав излучения лампы накачки.

Как видно из рис. 6, в исследованном диапазоне $P_{\text{уд}} = 0,07-1,9$ МДж/см³ наиболее выгоден раствор родамина 6Ж в спирте и наименее выгоден спиртовый раствор родамина В, что коррелируется со значениями $\eta_{\text{фл}}$ для этих составов (влияют также спектральные характеристики растворов). Промежуточное положение занимает раствор люминора 2 в РМ, представляющий собой состав ФЛЖ РМ11-9Н. Для рис. 6 имеем: $d_n = 5$ (АИГ:Nd) и 7,5 (ГЛС-1) мм; параметр оптической плотности слоя растворов люминофоров $C_d \delta = 0,02(1); 1,0(2); 0,3(3); 3,0(4); 1,0(5); 0,6(6)$ ммоль/л; C_d — концентрация раствора; δ — толщина слоя жидкости.

Так как значение эффективности θ пропорционально дифференциальному КПД лазера ϕ , по изменению θ можно оценить ожидаемое изменение КПД, что было экспериментально обосновано в [45], где нами были получены наибольшие из известных в литературе значений увеличения ϕ в неодиловых лазерах (на 50—130 %) и снижение порога генерации (на 10—25 %) со спиртовым раствором родамина 6Ж. Теоретически и экспериментально были найдены оптимальные для использования ФЛЖ режимы разряда ксеноновых ламп накачки, которые относятся к средней удельной мощности разряда $P_{\text{уд}} \approx 1$ МДж/см³ (рис. 7).

Как видно из рис. 7, где сопоставлены теоретические зависимости в случае ФЛЖ на основе спиртового раствора родамина 6Ж для различных неодиловых стекол (ГЛС-1, ГЛС-6, ГЛС-8, ГЛС-24) и неодилового граната АИГ:Nd, а также экспериментальные величины относительного увеличения ϕ (вертикальные отрезки при доверительной вероятности 0,9) для неодилового стекла ГЛС-8, наблюдается хорошее согласие данных расчета $\theta(P_{\text{уд}})$ с экспериментом (ϕ для разных $P_{\text{уд}}$). Кроме того, имеем: параметр оптической плотности слоя растворов люминофоров $C_d \delta = 0,02(3)$ и 0,6 ммоль/л (1, 2, 4, 5); C_d — концентрация раствора; δ — толщина слоя жидкости. Доверительные величины экспериментальных значений θ (относительного увеличения дифференциального КПД генерации) соответст-

вуют доверительной вероятности 0,9. Диаметр активных элементов $d_a = 5-6$ мм. Длительность вспышки лампы накачки $\tau = 100$ (б, в, г) и 250 (а) мкс.

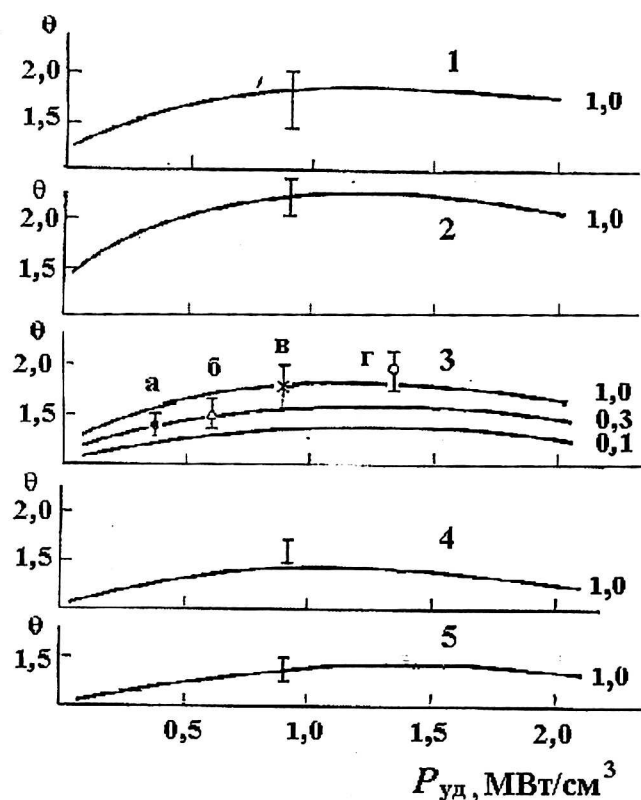


Рис. 7. Зависимости эффективности θ люминесцирующей жидкости на основе родамина 6Ж от средней удельной мощности разряда лампы накачки $P_{уд}$ в случае неодимовых стеклянных активных элементов ГЛС-1 (1); ГЛС-6 (2); ГЛС-8 (3); ГЛС-24 (4) и активного элемента из неодимового граната АИГ:Nd (5). Цифры 1—5 у кривых — концентрации люминофора (в ммоль/л)

Предельные возможности повышения эффективности накачки с люминесцентными преобразователями были установлены в работах [68, 69]. Было показано, что в области малых значений коэффициента преобразования излучения, зависящего от квантового выхода флюоресценции $\eta_{фл}$ и параметра светопередачи G , эффективны преобразователи, излучающие в зеленой области спектра (типично для разработанных ФЛЖ), а для больших коэффициентов преобразования более выгодны преобразователи для ИК-части спектра, которые пока не разработаны.

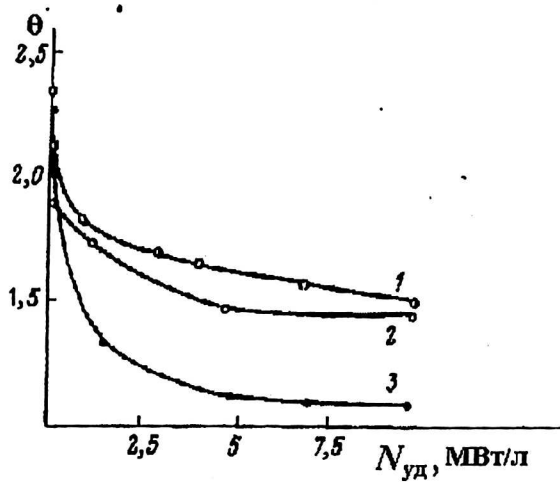
Применение ФЛЖ по сравнению с употреблением ФХЖ с той же длинноволновой границей поглощения излучения накачки снижает тепловую нагрузку на жидкость из-за того, что часть ее сбрасывается при переизлучении. Однако большинство люминофоров с высокими значениями $\eta_{фл}$ менее стойки к действию тела и света, чем абсорберы УФ-излучения. В связи с

этим также важна задача повышения стабильности люминесцирующих жидкостных теплоносителей. Эта задача особенно актуальна в случае самых эффективных ФЛЖ для неодимовых лазеров, в которых используется родамин 6Ж. В качестве растворителя родамина 6Ж среди ЖТ, указанных в табл. 1, наиболее подходит ПМ. Квантовый выход флюоресценции этого красителя ($\eta_{фл} = 0,9$) в ПМ только немного меньше, чем у родамина 6Ж в этиловом спирте ($\eta_{фл} = 0,95$). Зато ЖТС на основе ПМ — пожаро- и взрывобезопасен и имеет значительно больший интервал рабочих температур, чем спирт.

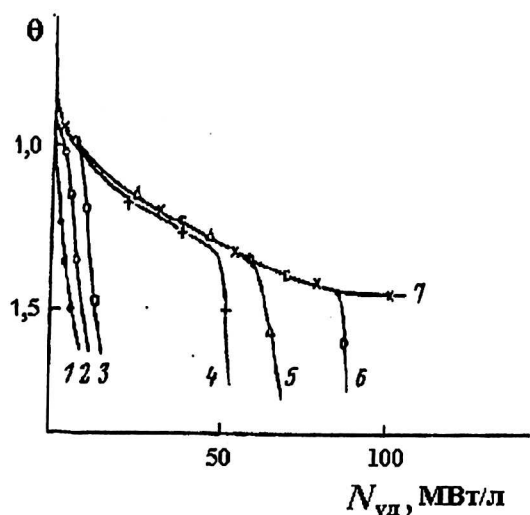
Исследования возможности повышения фотостойкости жидкостей выполнялись с помощью описанной выше экспресс-методики оценки эффективности θ с выделением спектрального участка, соответствующего II желтой полосе поглощения неодимовой активной среды. К этой области спектра, которая вырезалась с использованием интерференционного светофильтра с максимумом пропускания на длине волны ~ 585 нм, относится область флюоресценции родамина 6Ж. С ФЛЖ на основе ПМ было получено увеличение на 120—150 % выхода излучения по отношению к случаю применения прозрачного для света ЖТ типа ОЖ ПМ1-00Р. В исследованиях изменения θ при длительном облучении использовалась импульсная ксеноновая лампа ИНП-75А, а жидкости размещались в кварцевой цилиндрической кювете, по оси которой коаксиально размещалась лампа. В качестве параметра, характеризующего ресурс ФЛЖ, была взята удельная нагрузка на жидкость $N_{уд}$ (см. табл. 2).

В результате изучения фотохимических процессов в ФЛЖ на основе ПМ было установлено, что снижение θ по мере наработки жидкости в основном вызвано образованием продуктов, поглощающих излучение в области флюоресценции родамина 6Ж, причем их количество растет параллельно с обесцвечиванием ФЛЖ (уменьшением оптической плотности слоя раствора в максимуме длинноволновой полосы поглощения — 530 нм). Так как родамин 6Ж является ионным красителем с положительно заряженным органическим фрагментом, который в качестве противоиона может содержать различные органические и неорганические анионы, состав противоиона оказывает значительное влияние на фотофизические и фотохимические процессы, протекающие при облучении жидкости. Как следует из рис. 8, а, где показана зависимость $\theta(N_{уд})$ для ФЛЖ с родамином 6Ж, содержащим разные противоионы Cl^- , NO_2^- и I^- , фотостабильность жидкости заметно растет при замене аниона Cl^- присущего обычно используемой

модификации родамина 6Ж, на NO_2^- и особенно I^- . В последнем случае происходит тушение реакционно способных триплетных возбужденных состояний молекулы и ингибируется образование первичных радикалов красителя [70].



a



b

Рис. 8. Зависимости эффективности θ люминесцирующей жидкости на основе родамина 6Ж в ПМ от удельной нагрузки на жидкость $N_{уд}$:

a — противоионы в молекуле родамина 6Ж: I^- (1); NO_2^- (2); Cl^- (3); б — концентрация щавелевой кислоты в растворе родамина 6Ж иодида в ПМ C_d : 0 (1); 0,65 (2); 1,3 (3); 5 (4); 8 (5); 10 (6); 20 (7) ммоль/л

При исследованиях термостабильности ФЛЖ на основе иодида родамина 6Ж были установлены заметное обесцвечивание раствора красителя и рост поглощения в длинноволновой (550—850 нм) области спектра. Вторым из этих процессов приводил к значительному снижению эффективности ФЛЖ θ . Для увеличения термостабильности раствора в его состав вводились различные стабилизаторы, наиболее эффектив-

ные из которых представляли собой органические кислоты, например щавелевую кислоту.

Сравнивая данные рис. 8, а и 8, б, где показана зависимость $\theta(N_{уд})$ для разных концентраций C_d этой добавки в ФЛЖ, можно увидеть значительное увеличение фотостабильности жидкости по мере роста C_d вплоть до значения $2 \cdot 10^{-2}$ моль/л. Увеличение концентрации добавки выше этого уровня ухудшало фотостабильность жидкости [70].

В результате исследований был оптимизирован состав фильтрующего люминесцирующего ЖТ ФЛЖ 20-1, теплофизические и спектрально-люминесцентные свойства которого показаны в табл. 1 и 2.

Длинноволновые фильтрующие ЖТ находят применение в световых приборах с целью отсечки демаскирующей части видимого и ближнего ИК-излучений. Удобство использования таких ИК-светофильтров типа ИЖТ объясняется тем, что их спектральные характеристики могут быть довольно просто оптимизированы в применении к конкретным источникам излучения путем подбора толщины слоя ИЖТ или концентрации входящих в него красителей. Кроме того, использование ИЖТ позволяет дистанционно переключать режим работы приборов посредством перекачки жидкости, а также охлаждать источники света и другие нагреваемые части приборов. Общие черты рассматриваемого применения ИЖТ определяет сходность требований к параметрам жидкостей (см. табл. 1 и 2) с указанными выше требованиями к ЖТ.

В качестве растворителя ИЖТ, указанных в табл. 1 и 2, был выбран ПМ, обладающий высокой растворимостью целого ряда красителей, которые используются для перекрытия широкой области видимого и ближнего ИК-излучений. Большое значение имело обеспечение химической совместимости этих соединений в многокомпонентном растворе.

Одним из важнейших свойств красителей, которые могут быть использованы в качестве компонентов ИЖТ, является стойкость к действию света и нагрева. В УФ-области спектра, как указано выше, наиболее пригодны соединения из класса о-оксибензофенонов, деградация энергии в которых происходит при переносе протона в возбужденном состоянии красителя. Спектр поглощения этих соединений показан на рис. 9 (кривая 1). В видимой области спектра можно использовать светостойкие диокси- и диаминоантрахиноновые красители, положение полос поглощения в спектрах которых зависит от структуры соединений и природы растворителя (см. рис. 9, кривые 2, 3, 5, 6). Для обеспечения поглощения света в области 400—550 нм, где

трудно подобрать эффективно поглощающие антрахиноновые красители, в состав ИЖТ целесообразно ввести азокрасители (см. рис. 9, кривая 4).

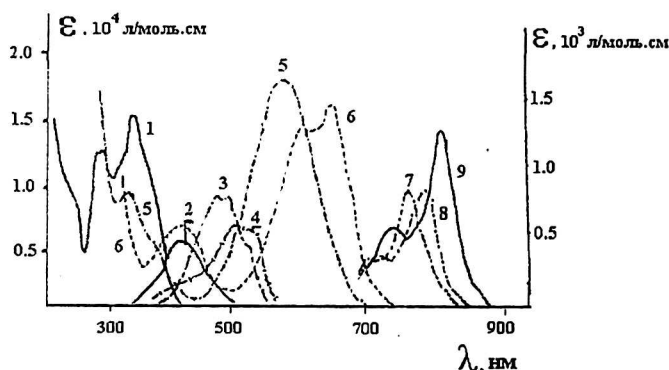


Рис. 9. Спектры поглощения $\varepsilon(\lambda)$ фильтрующих компонентов ИК-светофильтров ИЖТ на основе ПМ:

1 — бензофенон ДОДМБФ; 2 — антрахинон ЖЖЖ; 3 — хинизарин; 4 — азокраситель ЖКС; 5 — антрахинон ЖФАК; 6 — антрахинон ЖЗАК; 7 — полиметиновый краситель № 4455; 8 — полиметиновый краситель № 3948; 9 — полиметиновый краситель № 4499. Обозначения на оси ординат: слева — для компонентов 1—6; справа — для компонентов 7—9

Выбор соединений, поглощающих в области 700—900 нм, является гораздо более серьезной задачей. Здесь были использованы полиметиновые красители из класса бенз[с,д]индолов (см. рис. 9 кривые 7—9), которые при минимальной длине полиметиновой цепи обладают самым длинноволновым поглощением [71].

Как видно из рис. 9, приведенный набор красителей позволяет обеспечить фильтрацию излучения в области 800—900 нм. Высокие значения экстинкции фильтрующих компонентов ИЖТ и их большая растворимость в ПМ позволили получить значительное ослабление интенсивности фильтруемого излучения в сравнительно узком слое фильтра: до 20 и более порядков при толщине слоя 6 мм для ИЖТ ПМ1-6, в составе которого использовались полиметиновые красители.

Как следует из данных табл. 2, ИК-теплоносители-светофильтры ИЖТ способны функционировать на выходе прожектора с мощной дуговой ксеноновой лампой. Ресурс ИЖТ ПМ1-6 (с полиметиновыми красителями) составлял более 100 ч при температуре ~160 °С (без прокачки жидкости).

Таким образом, в ходе исследований физических явлений в жидкости, поглощающей мощное широкополосное излучение, был получен ряд важных научных и научно-технических результатов. Анализ причин выхода из строя ламп накачки лазеров, работающих в жидкости, позволил предложить эффективные способы увеличения эффективности и повышения ресурса

мощных твердотельных лазеров с жидкостным охлаждением. Исследования физических явлений в жидкостях, находящихся в системе накачки лазеров, позволили выяснить природу опто-термодинамических явлений в критической области жидкостей. В результате обнаружения ранее неизвестных явлений светоиндуцированной критической опалесценции в однокомпонентных жидкостях и светоиндуцированного спиноподобного распада в расслаивающихся растворах была предложена принципиально новая экспресс-методика диагностики критической точки неустойчивых, токсичных и радиоактивных жидкостей.

В итоге исследований особенностей процессов резонансного взаимодействия мощного широкополосного излучения с жидкостью были установлены оптимальные условия применения ФЛЖ, преобразующих излучение накачки твердотельных лазеров и получены наиболее высокие значения увеличения эффективности твердотельных лазеров с люминесцентными преобразователями излучения. Найдены оптимальные составы жидкостных ИК-светофильтров для отсечки видимого и части ближнего ИК-излучения световых и лазерных приборов, работающих в ИК-области спектра.

Заключение

Широкое применение мощных твердотельных лазеров во многих областях промышленности и специальной техники вызвало необходимость интенсивного отвода тепла от нагретых частей приборов и оптимизации светового баланса и состава излучения лазерных изделий. Использование в этих целях жидкостных теплоносителей и жидкостных теплоносителей-светофильтров снижает тепловые деформации и наведенную анизотропию в активных элементах лазеров, увеличивает ресурс и эффективность приборов.

Выбор состава ЖТ (ЖТС) определяется рядом их характеристик: прозрачностью в спектральном диапазоне накачки лазеров и фильтрацией вредной части излучения накачки или ее переизлучением в область полезных длин; устойчивостью к действию тепла и света; экологичностью; пожаро- и взрывобезопасностью, а также физико-химическими и теплофизическими параметрами жидкостей.

Самые простые требования предъявляются к ЖТ (ЖТС) на основе воды, работающим при комнатной температуре. В отличие от этого компоненты систем специального назначения, в том числе ЖТ, применяемые в трактах охлаждения и терморегулирования лазерных систем,

должны удовлетворять целому комплексу специфических, в том числе эксплуатационных требований. Вследствие этого ассортимент перспективных ЖТ весьма ограничен.

Отечественной промышленностью разработаны и освоены четыре поколения ЖТ (ЖТС) для лазерной техники. К первому поколению (1965—1970 гг.) относятся вода и составы на ее основе. Все они имеют зарубежные аналоги. Ко второму поколению (1970—1980 гг.) относятся этиленгликолевые растворы и созданные в рамках настоящей работы спиртооктановые, и фосфорорганические жидкости, зарубежные аналоги здесь существуют только для этиленгликолевых ЖТ; в третьем поколении (1980—1990 гг.) использовались кремнийорганические и фторорганические жидкости, а также эфиры угольной кислоты, зарубежные аналоги существуют лишь для фторорганических ЖТ; четвертое поколение — жидкостные теплоносители, представляющие собой ряд ФЛЖ на основе кремнийорганических жидкостей и эфиров угольной кислоты. С такими жидкостями получено заметное увеличение КПД и снижение порога генерации неодимовых лазеров. Эти ЖТ не имеют зарубежных аналогов.

Комплексные исследования ототермодинамических и физико-химических процессов в поглощающих жидкостях, находящихся под действием мощного широкополосного излучения, позволили надежно установить причины выхода из строя ламп накачки лазеров, работающих в жидкости. В результате исследований значительно повышен срок службы мощных твердотельных лазеров с ЖТ (ЖТС) второго и третьего поколений.

Исследования спектрально-люминесцентных явлений в жидкостях, работающих в лазерных системах, выявили возможность фильтрации и преобразования вредной части излучения накачки в область поглощения активных сред. В итоге исследований увеличен КПД неодимовых лазеров и снижен порог их генерации, что позволило улучшить характеристики лазерных изделий с ЖТ (ЖТС) четвертого поколения. Комплекс проведенных исследований явился научным обоснованием эффективного использования ЖТ (ЖТС) в лазерной, световой, телевизионной и фотографической технике.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 00-02-16085, № 01-01-00065) и Министерства образования РФ (проект № Е00-1.0-188).

Литература

1. Ахманов С. А., Жаботинский М. Е., Клышко Д. Н. и др. Квантовая электроника. Малая энциклопедия. — М.: СЭ, 1969.
2. Мезенов А. В., Солс Л. Н., Степанов А. И. Термооптика твердотельных лазеров. — Л.: Машиностроение, 1986.
3. Волынкин В. М., Погодаев А. К. // Квантовая электроника. 1971. № 3. С. 115.
4. Волынкин В. М., Мак А. А., Михайлов Ю. Н. и др. // Оптико-механическая промышленность. 1968. № 3. С. 65.
5. Байбородин Ю. В., Шапошников Б. В. // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. 1969. № 3. С. 131.
6. Laser Focus. 1975. V. 11. P. 31.
7. Ferguson G. D. US Patent 4150341. 1976.
8. Сухотин А. М. Негорючие теплоносители и гидравлические жидкости. — Л.: Химия, 1979.
9. Acharekar M. A., Kaplan M. M.: US Patent 4445217, 1981.
10. Acharekar M. A., Kaplan M. M. // Opt. Eng. 1982. V. 21. 1057.
11. Подгаецкий В. М. // Известия РАН. Сер. физич. 1994. Т. 58. № 6. С. 94.
12. Phillips P. E., Strattan L. A., Desai V. D.: US Patent 5471491, 1994.
13. Химическая энциклопедия. — М.: БРЭ, 1998, Т. 1.
14. То же. 1995. Т. 4.
15. Сухотин А. М., Беренблит В. М. Коррозионная активность теплоносителей, хладагентов и рабочих тел: Справочное руководство. — Л.: Химия, 1988.
16. Лазарев Н. В., Левина Э. Н. Вредные вещества в промышленности: Справочник для химиков, инженеров и врачей. Т. 2. Органические вещества. — Л.: Химия, 1976.
17. Нифантьев Э. Е. Химия фосфорорганических соединений. — М.: МГУ, 1971.
18. Пурдела Д., Вылчану Р. Химия органических соединений фосфора. — М.: Мир, 1972.
19. Eds. Kosolapoff G. M., Maier L. Organic Phosphorous Compounds. — N.Y.: Wiley, 1973. V. 6.
20. Химический энциклопедический словарь. — М.: СЭ, 1983.
21. Химическая энциклопедия. — М.: БРЭ, 1998. Т. 5.
22. Колле И. В., Кувшинова Н. Н. // Гигиена труда и профессиональных заболеваний. 1979. № 11. С. 54.
23. Миронов В. Ф., Гар Т. К. Органические соединения германия. — М.: Наука, 1967.
24. Лебр М., Мирезоль П., Сатже Т. Органические соединения германия. — М.: Мир, 1974.
25. Гар Т. К., Миронов В. Ф. Биологическая активность соединений германия. — М.: Химия, 1982.
26. Колле И. В., Дахнов П. П., Троицкая Л. М. // Журнал аналитической химии. 1978. Т. 33. № 10. С. 2046.
27. Колле И. В., Троицкая Л. М., Кувшинова Н. Н. и др. // Изв. вузов. Сер. Химия и химическая технология. 1983. Т. 26. № 3. С. 278.
28. Колле И. В., Дахнов П. П. // Журнал аналитической химии. 1980. Т. 35. № 2. С. 398.
29. Кореньков О. П., Кваша В. Б. // Химическая промышленность. 1961. № 9. С. 625.
30. Шапиро А. Л., Левин С. З., Любовский И. С. // Химия топлив и масел. 1971. № 5. С. 14.
31. Алкиленкарбонаты. — Л.: ВНИИ Нефтехим., 1975.
32. Peppel W. I. // Ind. Eng. Chem. 1958. V. 50. P. 767.
33. Алексеев П. Г., Скороходов И. И., Поварник П. И. Свойства кремнийорганических жидкостей. — М.: Энергоатомиздат, 1967.
34. Воронков М. Г., Зелчан Г. И., Лукевиц Э. Я. Кремний и жизнь. — Рига: Зинатне, 1978.
35. Соболевский М. В., Музовская О. А., Попелева Г. С. Свойства и области применения кремнийорганических продуктов. — М.: Химия, 1995.

36. Химическая энциклопедия. — М.: БСЭ, 1998, Т. 2.
 37. Шляпникох В. Я. Фотохимические превращения и стабилизация полимеров. — Л.: Химия, 1979.
 38. Болотин Б. М., Красовицкий Б. М. Органические люминофоры. — Л.: Химия, 1976.
 39. Tittel K. F.//Rev. Sci. Instr. 1964. V. 35. P. 522.
 40. Волюнкин В. М., Михайлов Ю. Н., Погодаев А. К.// Квантовая электроника. 1971. № 3. С. 117.
 41. Мак А. А., Соис Л. Н., Степанов А. И. и др.//Оптика и спектроскопия. 1971. Т. 30. № 6. С. 1081.
 42. Евдокимова В. Г., Мак А. А., Соис Л. Н. и др.// Квантовая электроника. 1975. Т. 2. № 9. С. 1915.
 43. Подгаецкий В. М.//Там же. — Киев: Наукова думка. 1977. № 12. С. 93.
 44. Подгаецкий В. М.//Там же. № 13. С. 100.
 45. Водопьянов К. Л., Ильичев Н. И., Малютин А. А. и др.// Квантовая электроника. 1979. Т. 6. № 8. С. 1795.
 46. Долгих Е. А., Подгаецкий В. М.//Техника кино и телевидения, 1990, № 8. С. 41.
 47. Dolgikh E. A., Kazakov A. A., Podgaetsky V. M. et al.// Proc. Y Conf. Television techniques (Budapest). 1990. V. 2. P. 41.
 48. Dolgikh E. A., Kovshev E. I., Khrolova O. R. et al.//Ibid. P. 47.
 49. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. — М.: Искусство, 1978.
 50. Петровский Г. Т., Лейдторп Р. А.//ДАН. 1980. Т. 251. № 2. С. 343.
 51. Петровский Г. Т., Токарев А. А., Волюнкин В. М. и др.// Там же. 1988. Т. 302, № 1. С. 95.
 52. Petrova M. V., Petrovskij G. T., Tolstoy M. N. et al.//Opt. Eng. 1992. № 4. P. 664.
 53. Гольберг С. М., Подгаецкий В. М., Трибельский М. И.// Инженерно-физический журнал. 1983. Т. 45. № 1. С. 123.
 54. Гольберг С. М., Подгаецкий В. М., Покровская И. Е. и др.// Там же. 1986. Т. 50. № 1. С. 104.
 55. Подгаецкий В. М.//Там же. 1974. Т. 20. № 1. С. 48.
 56. Бялко Н. Г., Кошелев А. А., Подгаецкий В. М.// Светотехника 1983. № 7. С. 18.
 57. Бялко Н. Г., Матюшин Г. А., Мельников Л. С. и др.// Журнал прикладной спектроскопии. 1978. Т. 28. № 5. С. 791.
 58. Laser Focus. 1967. V. 3. P. 35.
 59. Бялко Н. Г., Константинов Б. А., Матюшин Г. А. и др.//Журнал прикладной спектроскопии. 1979. Т. 31. № 2. С. 232.
 60. Галаган Б. И., Дахлюв П. П., Дюмаев К. М. и др.// Квантовая электроника. 1982. Т. 9. № 2. С. 291.
 61. Бункин Ф. В., Подгаецкий В. М., Трибельский М. И.// ЖЭТФ. 1978. Т. 75, № 6(12). С. 2309.
 62. Бункин Ф. В., Подгаецкий В. М., Семин В. Н. и др.// Там же. 1989. Т. 59. № 7. С. 117.
 63. Бункин Ф. В., Подгаецкий В. М., Семин В. Н.//Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. № 2. С. 162.
 64. Пащинин П. П., Семин В. Н., Суходольский А. Т.// Квантовая электроника. 1988. Т. 14. С. 162.
 65. Holstrom D., Stening B.//Photochem. Photobiol. 1964. V. 3. P. 55.
 66. Левин М. Б., Лецигер М. Е., Матюшин Г. А. и др.// Оптика и спектроскопия. 1979. Т. 46. № 3. С. 543.
 67. Алехин О. Г., Беличенко А. С., Иванов В. И. и др.// Люминесцентный анализ в медико-биологических исследованиях. — Рига: РМИ. 1983. С. 89.
 68. Пащинин П. П., Подгаецкий В. М.//Известия АН СССР. Сер. физич. 1980. Т. 44. № 8. С. 1691.
 69. Дюмаев К. М., Левин М. Б., Подгаецкий В. М. и др.// ЖТФ. 1981. Т. 60. № 2. С. 347.
 70. Сливка Л. К., Кузнецова Н. А., Калия О. Л. и др.// Журнал прикладной химии. 1993. Т. 66. № 3. С. 590.
 71. Михайленко Ф. А., Василенко Н. П., Качковский А. Д. и др.// Журнал органической химии. 1982. Т. 18. № 2. С. 435.

Liquid cooling agents for lasers

V. M. Podgaetsky

Moscow State Institute Electronic Technology (Technical University), Moscow, Russia

V. M. Volynkin

State Optical Institute, S.-Petersburg, Russia

I. V. Komlev, A. V. Reznichenko

Scientific Production Company "ALFA-AKONIS", Ltd. Moscow region,
Dolgoprudny town, Russia

The review data give the insight to composition and properties of liquid cooling agents for laser, light and TV techniques. The results of investigation into optothermodynamical and physico-chemical processes into liquids absorbing the power broadband radiation are presented. The new method of critical state diagnostics of such liquids and solutions is described too. The researches of spectral-luminescent phenomena in liquids operating into laser systems allow to markedly increase the efficiency and service life of Nd lasers.