

В.М. Климкин¹, А.Н. Солдатов²

Развитие лазеров на парах металлов в СО РАН

¹ *Институт оптики атмосферы СО РАН, г.Томск*

² *Томский государственный университет*

Поступила в редакцию 15.03.2007 г.

Представлены история развития и наиболее важные результаты физических исследований институтов СО РАН в области лазеров на парах металлов (ЛПМ), включая процессы, определяющие инверсию и энергетические характеристики, свойства плазмы импульсно-периодических разрядов, результаты возбуждения активных сред электронными пучками, конструкторские и технологические проблемы приборной реализации ЛПМ. Дана краткая информация об уже известных и возможных будущих приложениях лазеров на парах металлов, представлены задачи сегодняшнего дня.

Введение

С момента открытия во второй половине XX в. оптических квантовых генераторов начался бурный период изучения активных сред различного типа, обусловленный тем, что с лазерной техникой исследователи связывали возможность получения источников излучения большой мощности. При этом довольно быстро было установлено, что энергетические параметры лазерных сред — эффективность, достижимая мощность, спектральный состав и ряд других характеристик лазеров — определяются, в числе прочих условий, структурой рабочих частиц — электронной для атомов и ионов, колебательно-вращательной — для молекул. Начался этап изучения перспектив использования практически всех элементов Периодической таблицы Д.И. Менделеева, огромного списка молекул в качестве рабочих частиц активных сред. Одними из первых в поле зрения исследователей попали атомы и ионы металлов, так как пары металлов являлись традиционной рабочей средой мощных высокоэффективных различного типа бытовых и промышленных ламп.

Первые лазеры на парах металлов в большей или меньшей степени воспроизводили схему газоразрядного He–Ne-лазера и в их физических схемах обнаруживались конкретные трудности, приводившие к ограничению энергетических характеристик на сравнительно скромном уровне.

Важную роль в развитии лазеров на парах металлов сыграли идеи использования в лазерных системах первых возбужденных состояний атомов металлов, впервые сформулированные в статьях Беннетта [1] и Гулда [2]. Принципиальными особенностями физических схем создания инверсии, рассмотренных этими исследователями, являлись высокая квантовая эффективность лазерного перехода (50% и более) и очистка нижних рабочих

состояний атомных частиц не радиационными, а столкновительными процессами.

В этот период времени исследования в области лазеров на парах металлов (ЛПМ) сосредоточились в ФИАНе (группа Г.Г. Петраша), Ростовском государственном университете (В.С. Михайлевский, затем М.Ф. Сэм с коллегами), Институте оптики атмосферы СО РАН (группа П.А. Бохана).

Наиболее важным результатом этих работ стало наблюдение большого числа линий генерации в атомах и ионах металлов, возбуждаемых в импульсных газовых разрядах. Эти лазерные переходы характеризовались гигантским усилением на единицу длины активной среды.

Другим переломным моментом в развитии лазеров на парах металлов явились открытие импульсно-периодического режима возбуждения лазеров на парах металлов, работающих на переходах с резонансных на метастабильные состояния атомных частиц на фронте импульсов тока, и достижение мегаваттных средних мощностей генерации [3]. Начиная с этого времени к исследованиям физических процессов в лазерах на парах металлов, опытно-конструкторским работам и изучению перспектив использования ЛПМ в различных областях науки и промышленности подключились большие коллективы как в СССР, так и за рубежом. Аналогичный импульсно-периодический режим возбуждения был реализован для многих активных сред ЛПМ, в том числе и рекомбинационных ЛПМ, генерирующих в послесвечении разряда [4].

В настоящей статье дана краткая история развития лазеров на парах металлов в СО РАН, представлены наиболее важные результаты физических исследований активных сред, конструкторские и технологические проблемы приборной реализации ЛПМ и очерчен круг известных и возможных будущих приложений лазеров на парах металлов.

1. Историческая справка

Исследования по проблемам лазеров на парах металлов проводятся в Институте оптики атмосферы СО РАН в течение почти сорокалетнего периода развития данного направления квантовой электроники. В Институте физики полупроводников СО РАН это направление развивается с 1980 г., в Институте мониторинга климатических и экологических систем (ранее СКБ «Оптика») — с 1974 г. В настоящее время исследования в области лазеров на парах металлов осуществляются также в Томском государственном университете (группа А.Н. Солдатова) и Томском политехническом университете (группа Г.С. Евтушенко).

Рассматривая прошедший период как этап развития лазеров на парах металлов, следует сказать, что в это время научно-исследовательские работы в области ЛПМ предусматривали теоретические и экспериментальные исследования, направленные на получение новых знаний о природе различных явлений, наблюдаемых в ЛПМ, опытно-конструкторские работы, имеющие целью создание лабораторных образцов различных ЛПМ, изучение перспектив их использования в науке и практике.

По данной проблеме сотрудниками институтов СО РАН опубликовано более 600 статей в отечественных и зарубежных изданиях, защищены 4 докторские диссертации, материалы исследований систематизированы в 2 монографиях [5, 6].

Характеризуя состояние работ на сегодняшний день, следует отметить существенное расширение фундаментальных исследований, в то время как перечень исследуемых направлений практического использования ЛПМ существенно сократился. Последнее связано как с высокой стоимостью самих приборов на основе ЛПМ, так и с высокими эксплуатационными затратами. В ИОА СО РАН исследования под руководством В.О. Троицкого сосредоточились на изучении активных сред на основе галогенидов металлов, как перспективного направления создания лазеров существенно меньшей стоимости, и гибридных лазеров. Группа П.А. Бохана в ИФП СО РАН изучает возможности расширения условий возбуждения ЛПМ (электронные пучки, высокие давления) и проводит масштабные работы по проблеме AVLIS (Atomic Vapour Laser Isotope Separation). Группа А.Н. Солдатова в Томском государственном университете продвинулась в получении значительных мощностей в среднем ИК-диапазоне и в исследованиях взаимодействия этого излучения с биологическими тканями. Группа В.В. Татура в Институте мониторинга климатических и экологических систем СО РАН исследует вопросы построения блоков питания ЛПМ, не имеющих тирионов в схемах коммутации разряда.

Ограниченный объем данной статьи не позволяет представить даже в тезисном виде всего объема выполненных исследований. Ниже представлены наиболее интересные, на взгляд авторов, результаты теоретических и экспериментальных работ в области ЛПМ, выполненных на предприятиях СО РАН. Заинтересованным читателям мы рекомендуем обратиться к монографиям [5–9].

2. Конструкторские, материаловедческие и технологические проблемы активных элементов лазеров на парах металлов

Основные конструкторские, материаловедческие и технологические проблемы лазеров на парах металлов связаны с введением паров металлов в низкотемпературную неравновесную плазму. Кратко эти проблемы выглядят следующим образом.

2.1. Выбор материала разрядного канала

Давление паров большинства элементов достаточно низкое, следовательно, разрядный канал должен находиться при повышенной температуре. Однако электропроводность диэлектрических материалов, из которых можно изготовить разрядный канал, увеличивается с ростом температуры. Разрядный канал, изготовленный из материала с высокой проводимостью стенки, шунтирует разрядный промежуток. Таким образом, важнейшее свойство материала канала — низкая электропроводность при высокой температуре. Очевидно, что плотность паров материала, из которого изготовлен канал, и его температурных модификаций должна быть много меньше плотности паров рабочего металла. Материал канала не должен образовывать эвтектические смеси с другими материалами, с которыми он входит в контакт при рабочих температурах в силу конструктивных условий изготовления канала. Температурное расширение материала канала не должно быть велико, процессы рекристаллизации и перекристаллизации материала не должны катастрофически влиять на его температурное расширение. Анализ известных в настоящее время материалов показал, что только керамики из Al_2O_3 и BeO удовлетворяют этим требованиям.

2.2. Удержание паров в разрядном канале

Значительную плотность паров металлов в разрядном канале можно создать либо путем поддержания всех стенок канала, включая окна, при рабочей температуре, либо наполняя канал буферным газом при давлении, обеспечивающем диффузионный режим движения паров от их источника до холодных частей канала. В лазерах на парах металлов используется удержание паров в канале путем наполнения разрядного канала инертным газом. Для саморазогреваемых активных элементов разряд в инертном газе является источником тепла, необходимого для начального разогрева канала.

2.3. Температурное расширение канала

Разрядный канал из керамики BeO длиной 1 м при нагревании от комнатной температуры до $1500\text{ }^\circ\text{C}$ (рабочая температура канала медного лазера)

удлиняется примерно на 1 см. Значительное температурное перемещение канала из-за его расширения создает трудности с механическим креплением и сочленением канала с другими элементами конструкции, возрастающие по мере роста длины канала.

2.4. Теплоизоляция

Теплоизоляционные материалы должны обеспечивать сохранение своих свойств при рабочей температуре, не образовывать с материалом канала эвтектики. Выбор материалов теплоизолятора ограничен: для канала из керамики Al_2O_3 – это порошки на основе Al_2O_3 , для керамики BeO – порошки на основе ZrO_2 .

На рис. 1 представлена упрощенная схема отпаянного саморазогревного активного элемента медного лазера производства СКБ НП «Оптика» СО РАН с ресурсом порядка 500 ч (1974–1980 гг.), при разработке которого найдены удовлетворительные решения перечисленных выше проблем.

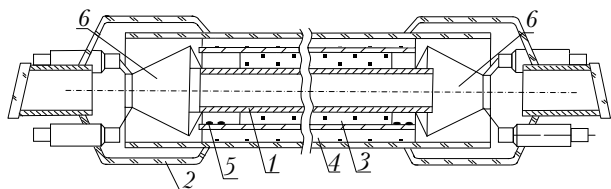


Рис. 1. Активный элемент лазера на парах меди разработки СКБ НП «Оптика»: 1 – разрядный канал; 2 – кварцевая вакуумная оболочка; 3 – порошок ZrO_2 ; 4 – волокнистый теплоизолятор; 5 – контейнеры с металлом; 6 – электроды

Особенностью конструкции является внутривакуумное размещение двухслойного теплоизолятора. Внутривакуумное размещение пористого теплоизолятора широко применяется в электронной технике как способ эффективной теплоизоляции катодных узлов электровакуумных приборов.

Эти активные элементы являлись комплектующими компонентами первых приборных вариантов медных лазеров «Милан» производства СКБ НП «Оптика» [10, 11].

Опыт ИОА СО РАН и СКБ НП «Оптика» СО РАН в создании активных элементов ЛПМ был учтен при разработке ФГУП «НПП «Исток»» (г. Фрязино) промышленных отпаянных элементов ЛПМ, не имеющих мировых аналогов.

2.5. Многоцветные лазеры

Особенностью ЛПМ на атомных переходах с резонансных на метастабильные состояния является единообразный механизм создания инверсной населенности, при этом условия возбуждения лазерных переходов по параметрам импульсов возбуждения и характеристикам разряда практически идентичны. Газоразрядная плазма в парах одних элементов не поглощает лазерное излучение, гене-

рируемое другими элементами; лазерные среды характеризуются большими коэффициентами усиления. Все это позволило рассмотреть возможности разработки лазера с широким спектром излучения, работающего в одном разрядном канале на парах нескольких металлов.

Исследования показали, что из-за различия потенциалов возбуждения и ионизации, а также температур, при которых концентрация нормальных атомов каждого элемента оптимальна, активные среды, полученные путем смешения в одном объеме паров нескольких металлов, не эффективны. В работе [12] предложен способ создания многоцветной мультиэлементной генерации, основанной на пространственном разнесении активных сред на парах различных металлов в объеме одного разрядного канала.

В таблице для примера представлены характеристики лазера с активными средами на парах Cu и Au , созданными на разных участках одного разрядного канала [5].

Характеристики трехцветного лазера на парах Cu и Au

Активный объем, $см^3$	p_{Ne} , торр	f , кГц	C , пФ	P_{λ_1} , Вт	P_{λ_2} , Вт	P_{λ_3} , Вт	P_{Σ} , Вт
94	9	15	3,2	2,20	1,04	0,72	3,95
	33	15	3,2	1,52	0,98	0,23	2,73

Примечание. $\lambda_1 = 510$ нм, $\lambda_2 = 578$ нм, $\lambda_3 = 628$ нм; p_{Ne} – плотность буферного газа; P – средняя мощность излучения.

В лазере с тремя активными зонами, образованными парами Cu , Va и Pb , получена устойчивая генерация одновременно на семи спектральных линиях. Разработки институтов СО РАН в области многоцветных лазеров на парах меди и золота были использованы для изучения их перспектив в медицине, навигации (см. ниже) и учтены при разработке промышленных образцов лазеров этого типа.

2.6. Лазеры с модифицированной кинетикой

Одним из направлений развития ЛПМ в СО РАН является изучение активных сред с введением в них различных добавок. Такие примеси изменяют физические и химические процессы, протекающие в активной среде лазера. Определение условий, при которых примеси в активной среде приводят к возрастанию мощности и эффективности генерации, является целью этих исследований. Теоретическое обоснование возможного положительного влияния примесей на процессы в активной среде выполнено в [13]. Такие ЛПМ получили название лазеров с модифицированной кинетикой (ЛПМ-МК). Первым ЛПМ-МК стал лазер на смеси паров меди с неоном с добавкой в активный объем водорода [14].

Класс лазеров на парах металлов с модифицированной кинетикой интенсивно развивается [15]

и включает в себя группу лазеров на парах металлов с улучшенной кинетикой (Kinetically Enhanced Lasers), гибридные лазеры (HyDBrID-Laser) и лазеры на галогенидах паров металлов с добавками H_2 , HCl , HBr . На сегодняшний день считается, что активные среды с введением добавок достаточно технологичны для создания отпаянных образцов активных элементов ЛПМ.

ЛПМ на смесях паров металлов с инертными газами, в частности ЛПМ на парах меди, требуют высокой температуры стенок разрядных трубок, в то время как хорошо известны газоразрядные лампы, излучающие спектры атомов и ионов металлов, в которых атомы металлов создаются в рабочем объеме за счет диссоциации паров химических соединений. Исследования активных сред ЛПМ с введением в разряд паров металлов за счет диссоциации соединений (ЛППМ) являются приоритетным направлением работ почти всех перечисленных выше исследовательских групп. Эти исследования направлены на выявление процессов интенсивного расхода рабочего соединения, разработку технологии стабилизации газового состава активной среды, увеличение удельного энергосъема и т.д. [15]. В результате этих исследований созданы лабораторные отпаянные образцы одноканальных активных элементов на среднюю мощность от 3 до 30 Вт (рис. 2). В стендовом варианте аналогичные активные элементы излучают до 100 Вт [16].

2.7. Лазеры с управляемыми параметрами

Анализируя преимущества и недостатки саморазогревного режима генерации лазеров на парах металлов, легко обнаружить проблему поддержания заданной температуры активной среды и, следовательно, энергии и мощности лазера при изменении частоты следования импульсов возбуждения. Решением этой проблемы является раздельная оптимизация термического нагрева стенки и процесса возбуждения активной среды. Для саморазогревных лазеров, активные элементы которых характеризуются большой тепловой инерцией, такая оптимизация может быть осуществлена с помощью наложения на активный объем двух импульсно-периодических разрядов. Один разряд обеспечивает оптимальное возбуждение генерации в каждом токовом импульсе, другой — стабилизирует ввод энергии в активный объем при вариациях частоты следования импульсов первого разряда.

Для реализации этой идеи был выполнен большой объем экспериментальных исследований. На рис. 3 представлены осциллограммы, иллюстрирующие вариант наложения на разрядный промежуток ЛПМ дополнительной последовательности импульсов с целью управления мощностью и цветностью излучения.

Экспериментальные исследования лазеров с использованием схем наложения двух разрядов позволили установить, что этот способ позволяет ста-

билизовать тепловой баланс активной среды, изменять длину волны излучения лазера, формировать излучение с малой расходимостью, регулировать в определенных пределах форму и длительность импульсов излучения [17–19]. Промышленное производство таких лазеров пока не освоено.

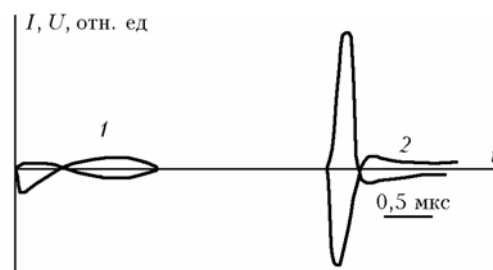


Рис. 3. Осциллограммы разрядного тока (положительная полярность сигнала) и напряжения на электродах активного элемента при наложении дополнительного (1) и основного возбуждающего (2) импульсов для задач управления мощностью и цветностью излучения

3. Исследования физических процессов, определяющих инверсию и мощность в лазерах на парах металлов

Высокие выходные характеристики и наблюдаемые гигантские величины усиления в активной среде ЛПМ, в том числе лазера на парах меди, длительное время позволяли считать, что на лазерных переходах ЛПМ в момент возбуждения имеет место значительная инверсия населенностей. Однако оставалось «маленькое облачко» — попытки получения генерации на переходе $P_{3/2}^0 - D_{3/2}$ (длина волны $\lambda = 570$ нм) меди не имели успеха. Для снятия этого противоречия привлекались различные объяснения, такие, например, как конкуренция переходов.

Для изучения указанного противоречия и оценки величины инверсии на лазерных переходах в работе [20] был предложен метод резонансного оптического воздействия. Отличие подхода, развитого в [20], от традиционных заключается в том, что величины возмущений населенностей рабочих состояний лазерным полем находились из решений кинетических уравнений, а не балансных. Этот метод исследований активных сред не требует привлечения атомных констант, определенных с малой точностью, таких как вероятности переходов.

Сопоставление результатов расчетов возмущений населенностей рабочих уровней атома меди для различных моделей процессов возбуждения, при наличии и отсутствии насыщающего светового поля, с результатами экспериментов показало, что при газоразрядном возбуждении населенности метастабильных состояний атома меди превышают населенности резонансных. На переходах $P_{1/2}^0 - D_{3/2}$ и $P_{3/2}^0 - D_{5/2}$ инверсия относительно невелика — она

определяется только благоприятным отношением статвесов резонансных и метастабильных состояний, а на переходе $P_{3/2}^0 - D_{3/2}$ ($\lambda = 570$ нм) атома меди с равными статвесами рабочих состояний инверсия не достигается. Отметим, что степень приближения населенностей к состоянию инверсии на спектральном переходе с равными статвесами уровней может служить мерой оптимальности условий возбуждения активной среды лазера.

Результаты этих исследований позволили понять свойства активных сред ЛПМ и систематизировать химические элементы по их принципиальной перспективности, принимая за основу необычный критерий — величины моментов количества движения атомов и ионов в их основных состояниях [21].

Аналогичный подход, основанный на резонансных оптических воздействиях, был использован для изучения оптогальванического эффекта в лазерах на парах металлов [22]. Установлено, что оптогальванический эффект в лазере на парах меди имеет малую амплитуду — менее 1%. Его использование в задачах управления лазерным излучением проблематично.

Многокиловаттные вводимые мощности в разрядные каналы ЛПМ при их диаметрах до 8 см создают значительные перепады газовых температур между осевыми частями разряда и стенкой. Эти перепады приводят к радиальной неоднородности возбуждения среды и даже к ее перегреву на оси. Импульсно-периодический характер ввода энергии в газ при высокой частоте импульсов возбуждения позволяет решать задачу о газовой температуре активной среды в приближении усредненного по времени энерговода. Однако это приближение не описывает температуру среды при малых частотах импульсов возбуждения. В работах А.Н. Мальцева развиты способ расчета температуры газа в приближении импульсно-периодического ввода энергии в газ в виде короткого импульса и авторемодельное решение уравнения диффузии [13]. Этот подход позволил связать частоту возбуждающих импульсов с характерными частотами тепловых процессов, такими как время полного охлаждения цилиндрического газового столба.

Одним из направлений физических исследований и технического развития импульсных лазеров на парах металлов в СО РАН является достижение высоких частот следования импульсов (ЧСИ) излучения. Стремление к высоким частотам следования продиктовано рядом соображений. Во-первых, в этом случае расширяются области приложений ЛПМ, во-вторых, на этом пути есть не использованные резервы повышения мощности и кпд. Согласно физической модели ЛПМ физический предел ЧСИ определяется суммой обратных времен нагрева и охлаждения электронного газа. Однако вопрос о том, какой из многочисленных физических явлений, протекающих в конкретной активной среде, является определяющим в ограничении частот следования импульсов генерации, до конца не ясен. Дискуссии по этому вопросу имеют место в течение всех 40 лет развития лазеров на парах металлов. В классиче-

ском понимании причина ограничения частоты — высокая остаточная плотность нижних (метастабильных) рабочих состояний, затрудняющая создание инверсии населенностей. Более поздняя гипотеза П.А. Бохана основана на факте существования высокой предимпульсной плотности электронов в плазме разряда, при этом теплоемкость электронного газа, при ограниченной скорости ввода энергии, препятствует быстрому разогреву электронов и снижает относительную эффективность накачки рабочих состояний [23].

На сегодняшний день экспериментально реализованы частоты повторения регулярных импульсов лазера на парах меди до 230 кГц, на парах золота до 150 кГц и до 300 кГц в лазере на парах бромида меди. Измерения, выполненные методом сдвоенных импульсов, свидетельствуют о том, что в ЛПМ, и тем более в ЛПГМ, можно достичь 500–1000 кГц [24–26], что близко к физическому пределу. В связи с тем что за межимпульсный интервал, равный 10^{-6} с, плазма практически не рекомбинирует, при изучении высоких ЧСИ можно ожидать новых данных о кпд и мощности ЛПМ.

Таким образом, результаты исследований ЛПМ и ЛПГМ при высоких частотах следования лазерных импульсов иллюстрируют их интересные свойства, могущие служить основой новых областей применения лазеров.

4. Исследования плазмы импульсно-периодических лазеров

Потребности лазерной физики явились мощным стимулом для изучения низкотемпературной плазмы. Это относится и к плазме импульсно-периодических разрядов в смесях паров металлов с инертными газами. Работы в этом направлении выполнялись всеми перечисленными выше исследовательскими группами.

На рис. 4 приведены результаты исследований пространственного распределения плотности атомов меди в основном состоянии, а также временного распределения плотности атомов меди по возбужденным состояниям, выполненных спектроскопическими методами А.Н. Солдатовым с коллегами [27–31]. Видно, что в условиях разряда основное состояние меди обедняется на 20–40% за счет процессов возбуждения и ионизации.

Результаты наблюдений временного поведения разрядного тока, напряжения на электродах активного элемента, температуры T_e и концентрации электронов N_e представлены на рис. 5.

Временная привязка осциллограмм и результатов измерений показывает быстрое нарастание T_e на переднем фронте процесса ввода энергии в разряд. Спад T_e после 100 нс развития разряда соответствует закономерности спада напряженности поля. Временное поведение N_e по мере развития разряда отражает нарастание скоростей прямой, а спустя 30–50 нс — ступенчатой ионизации атомов меди.

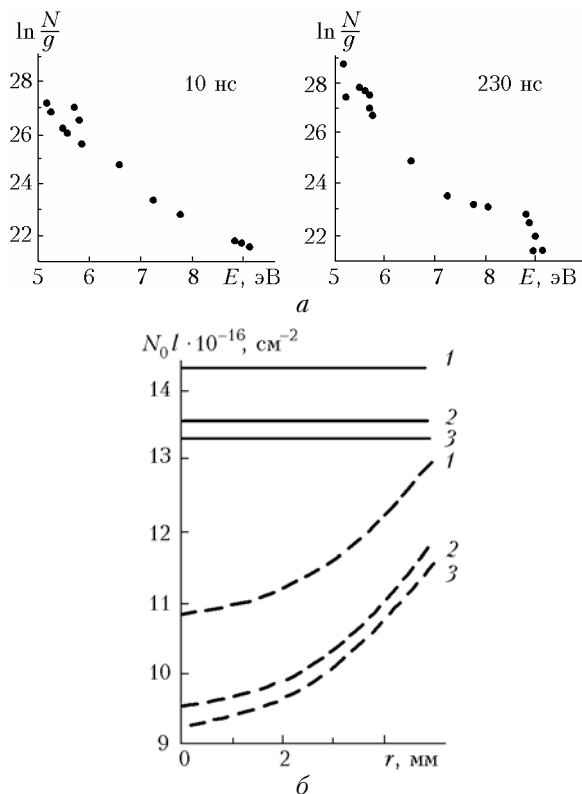


Рис. 4. Распределение плотности атомов меди по возбужденным состояниям как функция времени развития импульса возбуждения (а). Распределение плотности атомов меди по сечению ГРТ (б) для трех значений температур стенки ГРТ: 1 — 1570 °С; 2 — 1540 °С; 3 — 1530 °С; сплошные кривые — распределение плотности атомов меди по сечению ГРТ без разряда; g — статвес; l — длина основной зоны, см; N_0 — плотность атомов меди, см^{-3}

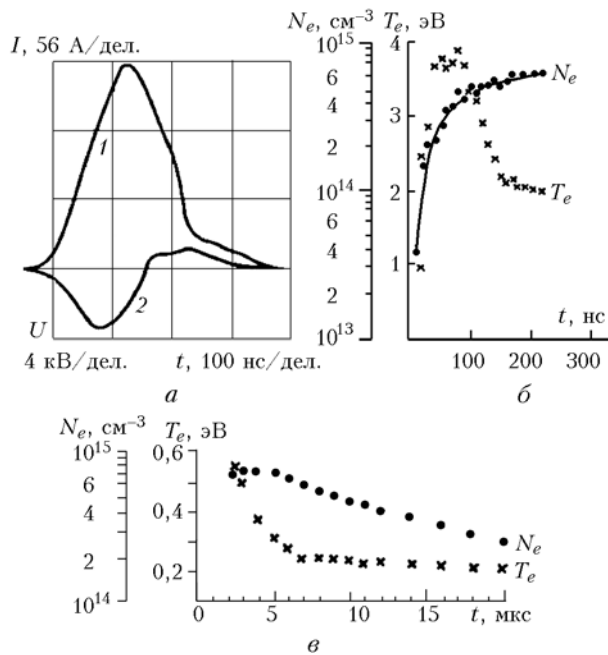


Рис. 5. Осциллограммы импульсов тока (1) и напряжения (2) (а) и соответствующий им временной ход концентрации N_e и температуры T_e электронов (б); N_e и T_e в межпериодный период в активной среде Си-лазера [27] (в)

Представленный фрагмент результатов измерений параметров плазмы дает калибровочные величины физических параметров активной среды при математическом моделировании активных сред ЛПМ, в частности определяет начальные условия для восстановления параметров активной среды перед последующим импульсом возбуждения. В результате экспериментов была также установлена существенная радиальная неоднородность как излучения плазмы, так и генерации [30].

Инициированные потребностями лазерной физики обширные исследования многих видов неравновесных электрических разрядов в газах и газовых смесях показали, что основной проблемой создания мощных газоразрядных лазеров является неустойчивость плазмы разрядов.

В 1971 г. группой Г.Г. Петраша в ФИАН одновременно с достижением многоваттного частотного режима генерации медного лазера было продемонстрировано уникальное достижение в области физики неравновесной низкотемпературной плазмы — введение в разряд в смеси паров металлов с инертными газами гигантской по тем временам средней мощности — около 2 кВт/м газоразрядного промежутка [3]. Введение такой мощности обеспечивалось без прокачки газовой смеси.

Несмотря на последовавшие за работой [3] многочисленные исследования физических процессов, протекающих в плазме импульсно-периодического газового разряда в смесях газов и паров, его основное свойство — глубокая контракция разряда в чистых инертных газах и автоматическая расконтракция разряда при введении паров в газ, долгое время не было обнаружено исследователями и технологами. Первое описание эффекта автоматической расконтракции энергонапряженного импульсно-периодического разряда в смеси паров металлов с инертными газами выполнено в 1978 г. В.М. Климкиным [31]. Фотография импульсно-периодического разряда, иллюстрирующая эффект расконтракции, полученная с помощью прозрачной трубки, приведена на рис. 6. Разряд возбуждался в чистом Не при давлении 150 торр импульсами тока длительностью 1 мкс амплитудой 5 А с частотой следования 10 кГц. Автоматическая расконтракция является следствием поступления в контрагированный разряд в чистом Не паров металла (кусочек металлического Еu помещен в центральную зону разрядного канала, подогретую газовой горелкой).

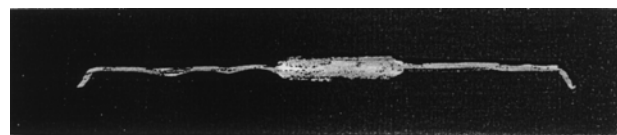


Рис. 6. Свечение импульсно-периодического разряда в трубке $\varnothing 1$ см, иллюстрирующее контракцию в чистом Не и начальную фазу процесса автоматической расконтракции разряда

Начиная с этого момента, стало очевидным, что физическим фундаментом уникальных свойств

продольного импульсно-периодического разряда и самих лазеров на парах металлов с возбуждением продольным разрядом является эффект автоматической расконтракции разряда.

Энергоемкость и устойчивость импульсно-периодического газового разряда в смесях инертного газа с легкоионизируемой примесью иллюстрируются следующими экспериментально достигнутыми (по опубликованным данным) параметрами разряда: диаметр трубки — 8 см, средняя мощность, вводимая в разряд на 1 м длины одного активного элемента, — 15 кВт. Автоматическая расконтракция обеспечивала среднюю мощность лазерного излучения с одного активного элемента — 450 Вт без прокачки газовой смеси [32]. Очевидно, что на сегодняшний день импульсно-периодические разряды в смесях паров металлов с инертными газами являются, по-видимому, наиболее энергоемкими и устойчивыми.

Открытие эффекта автоматической расконтракции импульсно-периодического разряда в смесях инертного газа с легко ионизируемой добавкой (эффект Петраша) является, по-видимому, наиболее важным для науки и практики результатом изучения свойств плазмы импульсно-периодических лазеров на парах металлов.

Разные точки зрения на процессы и явления, вызывающие контракцию, расконтракцию и повторную контракцию разряда этого типа, представлены в [33–35].

5. Пучковые методы возбуждения

Электронно-пучковые методы возбуждения газовых сред занимают заметное место в физике газовых лазеров. Физической основой использования пучков электронов в данном случае является возможность полного поглощения энергии пучка релятивистских электронов при условиях, оптимальных для инверсии среды. Для лазеров на парах металлов плотность рабочих частиц, обеспечивающая эффективное поглощение энергии релятивистских электронов, практически не достижима. Этот факт привлек внимание к проблемам генерации пучков электронов с энергией порядка 1–10 кэВ и ввода их в газ.

Одним из возможных вариантов возбуждения паров металлов пучками электронов является использование эффекта убления электронов и генерации пучков непосредственно в рабочей кювете [36]. Генерация пучков непосредственно в газовой среде требует постановки в кюветы дополнительных довольно сложных электродных систем. Следует отметить, что введение в газовую среду электронных пучков в виде импульсов наносекундной длительности с периодом следования, меньшим времени деионизации плазмы, является малоисследованной областью физики [37].

Первое наблюдение Г.В. Колбычевым генерации лазерного излучения при накачке смеси Не–Хе-пучком низкоэнергетичных электронов [38] яви-

лось следствием длительных и интенсивных теоретических и экспериментальных исследований. Генерация на самоограниченных переходах атомов свинца и марганца при пучковой накачке с энергетическими и частотными характеристиками, более высокими по сравнению с аналогичными характеристиками лазеров, возбуждаемых продольным разрядом, наблюдалась в работах [24, 26]. В этих работах активная среда возбуждалась внутри сетчатого анода радиальными встречными потоками электронов. Использовались два варианта кювет. Одна из кювет являлась, по сути, известным вариантом протяженного полого катода с полым анодом [39], созданная в конце 60-х гг. И.И. Муравьевым. Другая кювета содержала дополнительный элемент — керамический трубчатый изолятор в зазоре между катодом и сетчатым анодом. Трубчатый изолятор при температуре более 1000 °С выполнял роль резистора, распределенного по внутренней поверхности катода. Результаты [24, 26] требуют всестороннего осмысления, так как в определенной мере находятся в противоречии с установившимися представлениями о характере диссипации энергии пучка в газовой среде.

Таким образом, работы П.А. Бохана, Г.В. Колбычева сформировали новое физически интересное направление исследований: генерацию пучков электронов малых энергий, воздействие таких пучков на газ и плазму, и показали существование новых возможностей возбуждения лазеров на парах металлов. Реальные применения электронно-пучкового возбуждения паров металлов требуют решения ряда новых проблем технологического, технического и физического характера. Назовем две из них — это коммутация импульсных токов амплитудой порядка 10^5 А с рабочей частотой 10^4 Гц и баланс энергозклада в активную среду и электродную систему с ростом частоты следования импульсов.

6. Непрерывные и квазинепрерывные лазерные системы

По инициативе П.А. Бохана значительное место в программах работ по созданию лазеров на парах металлов в СО РАН занимают развитие концепции и исследования возможности экспериментальной реализации непрерывных или квазинепрерывных лазеров на парах металлов с релаксацией нижнего рабочего состояния в атом-атомных столкновениях. Развитие концепции предусматривало проведение анализа возможных схем и механизмов создания инверсии в газоразрядной плазме и исследование сечений процессов релаксации. По данной программе значимые лазерные эффекты (мощности лазерного излучения — от долей ватт до 10–15 Вт) получены в смеси Ca + H₂ [40] и Eu + He [41]. Лазерная система на смеси Eu + He была первой активной средой на парах металлов, в которой наблюдались переход из режима самоограниченной генерации к квазинепрерывной путем изменения

условий возбуждения [41] и генерация в импульсно-периодическом режиме возбуждения при давлении газа 5 атм [42].

Физически весьма интересными являются наблюдения лазерных эффектов в системах первых возбужденных состояний в разряде в парах иттербия, тулия, стронция в отсутствие очевидного канала электронного возбуждения верхнего рабочего состояния [43–45].

7. Лазеры в научных и прикладных исследованиях СО РАН

7.1. Лазеры на парах металлов в атмосферной оптике

Одной из перспективных областей использования лазеров на парах металлов является атмосферная оптика: спектроскопия и газоанализ атмосферных и примесных газов, распространение излучения, дистанционное зондирование реальной атмосферы с целью определения ее газового состава, термодинамических, метеорологических и оптических параметров.

Примерами применения ЛПМ в лидарной технике являются стационарные и мобильные лидары комбинационного рассеяния с медным лазером в качестве источника излучения [46]. Имеются положительные примеры использования ЛПМ для изучения переноса излучения через плотные рассеивающие среды [47].

Примером использования ЛПМ в навигации являются лазерные навигационные устройства (ЛНУ), предназначенные для решения задач ориентирования движущихся объектов в пространстве в условиях ограниченной видимости. В ИОА СО РАН и СКБ НП «Оптика» СО РАН были изготовлены ЛНУ «Радуга» и «Лиман» с лазерами «Милан-02» и «Милан-СМ» на парах меди и золота как источниками излучения [48]. Навигационное устройство «Радуга» прошло опытную годовичную эксплуатацию в морском порту Вентспилс, обеспечивая проход судов по узкому подходному каналу длиной 11,4 км и шириной 130 м в условиях ограниченной видимости.

7.2. Лазеры в разделении изотопов

ЛПМ, в частности лазеры на парах меди, обладают наибольшей средней мощностью излучения в видимой области спектра. Во всех развитых странах они используются для изучения перспектив AVLIS и практического разделения изотопов по этому методу. Масштабные работы по этой проблеме проводятся в ИФП СО РАН под руководством П.А. Бохана. Результаты этих работ систематизированы в монографии [6].

7.3. Лазеры в медицине

Одной из перспективных областей применения лазеров на парах металлов является медицина, в ча-

стности онкология. Примеры исследований перспектив применения лазеров на парах металлов в онкологии, выполненных сотрудниками СО РАН и НИИ онкологии ТНЦ АМН, представлены в [49–52] и систематизированы в [53].

8. Перспективы развития исследований ЛПМ и лазерных систем

1. Экспериментальное и теоретическое исследование эффекта повышенной энергоемкости и устойчивости импульсно-периодических разрядов и оценка перспектив его использования для продольного газоразрядного возбуждения других сред.

2. Детальные исследования активных сред, включающие в себя изучение механизмов ограничения вводимой мощности, поиск путей и условий повышения уровня инверсии, получение значительных выходных мощностей излучения (десятки Вт), при частотах следования 100 кГц и выше, исследование физики и химии малых примесей в активной среде ЛПМ.

3. Проведение работ, направленных на решение конструкторско-технологических и материаловедческих проблем активных элементов ЛПМ, технико-экономическое обоснование замены паровых активных элементов на солевые. Разработка источников питания ЛПМ на современной элементной базе, в том числе без использования тиратронов.

4. Решение проблем технологического, технического и физического характера электронно-пучкового возбуждения лазеров на парах металлов. Поиск новых физически интересных направлений исследований лазеров на парах металлов.

Авторы считают своим долгом отметить значительный вклад в развитие лазеров на парах металлов в СО РАН, дополнительно к упомянутым в тексте, следующих своих коллег: Г.С. Евтушенко, Д.Э. Закревского, В.Ф. Елаева, В.А. Герасимова, В.Н. Николаева, А.Е. Кирилова, В.П. Пеленкова, В.Е. Прокопьева, Ю.П. Полунина, В.И. Соломонова, В.Г. Соковинова, А.Р. Сорокина, В.Б. Суханова, В.Ф. Федорова, Н.А. Юдина.

1. *Bennett W.R.* Inversion Mechanisms in Gas Lasers // Appl. Opt. Suppl. 2. Chem. Lasers. 1965. P. 3–33. Пер.: *Беннетт В.М.* Механизмы возбуждения газовых лазеров // Газовые лазеры / Под ред. Н.Н. Соболева. М.: Мир, 1968. С. 27–136.
2. *Gould G.* Collision lasers // Appl. Opt. Suppl. 2. Chem. Lasers. 1965. P. 59–67. Пер.: *Гулд Г.* Столкновительные лазеры // Газовые лазеры / Под ред. Н.Н. Соболева. М.: Мир, 1968. С. 137–158.
3. *Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г.* Эффективный импульсный лазер на парах меди // Письма в ЖЭТФ. 1972. Т. 16. Вып. 1. С. 40–42.
4. *Иванов Г.И., Латуш Е.Л., Сэм М.Ф.* Ионные лазеры на парах металлов. М.: Энергоатомиздат, 1990. 256 с.

5. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 149 с.
6. Бохан П.А., Бучанов В.В., Закревский Д.Э., Казарян М.А., Калугин М.М., Прохоров А.М., Фатеев Н.В. Лазерное разделение изотопов в атомарных парах. М.: Физматлит, 2004. 208 с.
7. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди. М.: Физматлит, 2005. 304 с.
8. Little С.Е. Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering & Applications. UK, Chichester: John Wiley & Sons Ltd., 1998. 620 p.
9. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Науч. книга, 1998. 544 с.
10. Бохан П.А., Николаев В.И., Соломонов В.И. Отпаянный лазер на парах меди // Квант. электрон. 1975. Т. 2. С. 159.
11. Бохан П.А., Солдатов А.Н., Соломонов В.И., Владов Г.Я., Горохов А.М., Кирилов А.И., Ковалев М.Е., Николаев В.Н., Платонов А.В. Лазер на парах меди «Милан-1» // Квант. электрон. 1977. Т. 4. № 6. С. 1935.
12. Кирилов А.Е., Полушин Ю.П., Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. Многоцветный импульсный лазер // Тез. докл. 5-го Всесоюз. симпоз. по распространению лазерного излучения в атмосфере. Томск: ИОА СО АН СССР, 1979. С. 101–105.
13. Мальцев А.Н. Теоретическое обоснование некоторых вопросов кинетики импульсно-периодических лазеров на парах металлов: Дис. ... к.ф.-м.н. Томск, 1983. 200 с.
14. Бохан П.А., Герасимов В.А., Соломонов В.И., Щеголов В.Б. О механизме генерации лазера на парах меди // Квант. электрон. 1978. Т. 5. № 6. С. 1262–1265.
15. Andrienko O.S., Dimaki V.A., Evtushenko G.S., Sukhanov V.B., Troitskiy V.O., Shiyonov D.V. Metal and Metal Halide Vapor Lasers: New Opportunities // Opt. Eng. 2005. V. 44. N 7. P. 62630C-1–62630C-8.
16. Елаев В.Ф., Лях Г.Д., Пеленков В.П. CuBr-лазер со средней мощностью до 100 Вт // Оптика атмосф. 1989. Т. 2. № 11. С. 1228–1229.
17. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. Лазер на парах меди со стабилизированными выходными параметрами // Квант. электрон. 1983. Т. 10. № 5. С. 974–980.
18. Евтушенко Г.С., Кирилов А.Е., Солдатов А.Н., Полушин Ю.П., Федоров В.Ф. Исследование лазера на парах меди и золота с пространственно-разнесенными активными средами // Ж. прикл. спектроскопии. 1983. Т. 39. № 6. С. 939–942.
19. Солдатов А.Н. Физика и техника лазеров на парах меди с управляемыми параметрами // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 650–658.
20. Клишкин В.М. Диагностика импульсных лазеров методами модуляционной лазерной спектроскопии // Теплофиз. высок. температур. 1985. Т. XXIII. № 3. С. 568–571.
21. Клишкин В.М. Момент количества движения – мера инверсии в импульсных лазерах на парах химических элементов // Оптика атмосф. и океана. 2002. Т. 14. № 11. С. 1030–1032.
22. Юдин Н.А., Клишкин В.М., Прокопьев В.Е. Оптогальванический эффект в лазере на самоограниченных переходах атома меди // Квант. электрон. 1999. Т. 28. № 3. С. 273–276.
23. Бохан П.А., Силантьев В.Н., Соломонов В.И. О механизме ограничения частоты следования импульсов генерации в лазере на парах меди // Квант. электрон. 1980. Т. 7. № 6. С. 1264–1269.
24. Бохан П.А. О механизме ограничения оптимальной частоты следования импульсов генерации в лазерах на самоограниченных переходах паров металлов // Квант. электрон. 1985. Т. 12. № 5. С. 945–952.
25. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. Лазер на парах бромида меди с высокой частотой следования импульсов // Квант. электрон. 2002. Т. 32. № 8. С. 680–682.
26. Бохан П.А. Процессы релаксации и влияние метастабильных состояний атомов и ионов металлов на механизм генерации и энергетические характеристики лазеров // Квант. электрон. 1986. Т. 13. № 9. С. 1837–1847.
27. Солдатов А.Н., Гриднев А.Г., Горбунова Т.М., Елаев В.Ф., Осипова Н.В., Евтушенко Г.С. Спектроскопическое исследование газоразрядной импульсной плазмы Cu-лазера // Квант. электрон. 1978. Т. 5. № 5. С. 1147–1151.
28. Елаев В.Ф., Мельченко В.С., Поздеев В.В., Солдатов А.Н. Временной ход концентрации электронов в послесвечении разряда в лазере на парах меди // Эффективные лазеры на парах металлов. Томск: Изд. ИОА СО РАН, 1978. С. 179–188.
29. Солдатов А.Н. Лазеры на парах металлов // Современные проблемы оптики и спектроскопии / Ред. Ю.С. Макушкин, Г.В. Майер, А.М. Янчарина. Томск: Томск. гос. ун-т, 2001. С. 227–272.
30. Елаев В.Ф., Поздеев В.В., Солдатов А.Н. Радиальная неоднородность газоразрядной плазмы медного лазера // Измерительные приборы для исследования приземных слоев атмосферы. Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1977. С. 94–97.
31. Клишкин В.М., Мальцев А.Н., Фадин Л.В. Исследование границ устойчивости импульсного газового разряда с высокой частотой следования импульсов тока // Эффективные газоразрядные лазеры на парах металлов. Томск: Изд. ИОА СО АН СССР, 1978. С. 116–132.
32. Kanagai C., Auki N., Kobayashi N., Kimura H. Copper Vapor Laser System Development // Proc. 6th Int. Sympos. an Advanced Nuclear Energy Research. 1994. P. 673.
33. Бохан П.А., Закревский Д.Э. Исследование продольного импульсно-периодического разряда в парогазовых смесях высокого давления // Ж. техн. физ. 1997. Т. 67. Вып. 4. С. 25–31.
34. Букишун Л.М., Латуш Е.Л., Сэм М.Ф. Влияние температуры активной среды на характеристики генерации рекомбинационного Sr–He-лазера // Квант. электрон. 1988. Т. 15. № 9. С. 1762–1764.
35. Клишкин В.М. Повторная контракция энергонапряженных импульсно-периодических разрядов // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. Вып. 18. С. 16–21.
36. Бохан П.А., Колбычев Г.В. Генерация сильноточных импульсных электронных пучков в газе среднего давления // Ж. техн. физ. 1981. Т. 51. Вып. 9. С. 1823–1831.
37. Колбычев Г.В. Генерация пучков убегающих электронов и накачка ими лазеров на парах металлов // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 635–648.
38. Колбычев Г.В., Самышкин Е.А. Лазерная генерация в ксеноне при накачке импульсными пучками убегающих электронов // Квант. электрон. 1983. Т. 10. № 2. С. 437–438.
39. Клишкин В.М., Мельченко В.С., Муравьев И.И., Солдатов А.Н., Янчарина А.М. Гелий-неоновый ОКГ на длине волны 1,15 мкм с разрядом в полом катоде // Тр. конф. по электронной технике. Газовые оптические квантовые генераторы. 1970. № 2 (18). С. 29.

40. Климкин В.М., Монастырев С.С., Прокопьев В.Е. Селективная релаксация долгоживущих состояний атомов металлов в газоразрядной плазме. Стационарная генерация на переходах $^1P_1^0-^1D_2$ кальция и стронция // Письма в ЖЭТФ. 1974. Т. 20. Вып. 4. С. 251–253.
41. Бохан П.А., Климкин В.М., Прокопьев В.Е. Газовый лазер на ионизированном европии // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. № 2. С. 80–82.
42. Bokhan P.A., Zayrevsky D.E. Investigations on the collisional He–Eu-laser with longitudinal gas discharge excitation of pressure up to 5 atm // Proc. SPIE. 1994. V. 2110. P. 220–234.
43. Климкин В.М. Исследование газового лазера на парах иттербия // Квант. электрон. 1975. Т. 2. № 3. С. 579–584.
44. Солдатов А.Н., Филонов А.Г., Васильева А.В. Экспериментальное исследование лазера на парах стронция с высокой частотой импульсов возбуждения // Оптика атмосфер. и океана. 2006. Т. 19. № 2–3. С. 224–227.
45. Герасимов В.А., Юнжаков Б.П. Исследование лазера на парах тудия // Квант. электрон. 1989. Т. 16. № 12. С. 2386–2393.
46. Аршинов Ю.Ф., Бобровников С.М., Шумский В.К., Попов А.Г., Сериков И.Б. Дистанционное определение состава, скорости истечения и температуры выбросов из труб предприятий КР-лидаром // Оптика атмосфер. и океана. 1992. Т. 5. № 7. С. 728–734.
47. Ештушенко Г.С., Климкин В.М. Лазеры на парах металлов. Применения в атмосферной оптике // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12. № 9. С. 875–884.
48. Arshinov Yu.F., Zuev V.E., Naats I.E., Soldatov A.N., Fadeev V.Ya. Metal vapor lasers and their application to atmospheric optics // Proc. of the Int. Conf. on Lasers'82, STS. Press McLean. 1982. P. 486–492.
49. Ештушенко В.А., Бычков И.А., Солдатов А.Н., Зырянов В.Н. Влияние лазера на парах меди на рост и метастазирование опухоли в эксперименте // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 746–749.
50. Ештушенко В.А., Солдатов А.Н., Вусик М.В., Дикович В.А., Шумейко А.С. Лечение и профилактика послеоперационных осложнений у онкологических больных на лазерной установке «Малахит» // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 743–745.
51. Ештушенко В.А., Попович В.И., Солдатов А.Н., Куцманюк Э.Д. Профилактика лучевых осложнений у больных опухолями головы и шеи лазером на парах меди // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 750–753.
52. Zyryanov B.N., Evtysenko V.A., Evtysenko G.S., Soldatov A.N., Musabaeva L.I., Udalyi I.F., Tarasenko T.I., Cherdyntseva N.V., Vusik M.V., Popovich V.I., Petrakova V.S., Dikovich V.A. Copper-vapor low-intensity laser therapy // Laser Use in Oncology: Proc. SPIE. 1996. V. 2728. N 9. P. 100–107.
53. Ештушенко В.А., Зырянов В.Н., Солдатов А.Н. Опыт клинического применения лазерной установки «Малахит» // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 2. С. 273–276.

V.M. Klimkin, A.N. Soldatov. Development of vapor-metal lasers at the Siberian Branch of RAS.

The history of development and most important results of physical investigations at SB RAS institutes in the field of vapor-metal lasers (VML) are presented. The processes determining the inversion and energy characteristics, plasma properties of the pulse-periodic charges, active media excitation by electron beams, constructional and technological problems of VML realization are described. Brief information on the known and possible in future VML applications is given.



Рис. 2. Активные элементы лазеров на парах галогенидов металлов