

- ca J. J., Meyer J. D., Vu Z., Collins G. J. Electron beam excitation of CW lasers.— In: 34-th Gaseous Electronic Conference. Boston, Massachusetts, October 1981.
70. Rocca J. J., Meyer J. D., Collins G. J. Zn II and CW laser transitions excited by an electron beam.— IEEE J. Quant. Electron., 1982, vol. QE-18, p. 1052.
  71. Rocca J. J., Meyer J. D., Collins G. J. Electron beam pumped CW Se II laser.— Opt. Comm., 1982, vol. 42, p. 125.
  72. Rocca J. J., Meyer J. D., Collins G. J. Electron beam pumped CW Hg ion laser.— Appl. Phys. Lett., 1982, vol. 40, p. 300.
  73. Meyer J. D., Rocca J. J., Yu Z., Collins G. J. CW iodine ion lasers excited by an electron beam.— IEEE J. Quant. Electron., 1982, vol. QE-18, p. 326.
  74. Rocca J. J., Meyer J. D., Collins G. J. CW laser oscillations in Cd II in an electron beam created plasma.— Phys. Lett., 1982, vol. 90A, p. 358.
  75. Rocca J. J., Meyer J. D., Collins G. J. Hollow cathode electron guns for the excitation of CW lasers.— Phys. Lett., 1982, vol. 87A, p. 237.
  76. Rocca J. J., Meyer J. D., Yu Z., Farrell M., Collins G. J. Multikilowatt electron beams for pumping CW ion lasers.— Appl. Phys. Lett., 1982, vol. 41, p. 844.
  77. Yu Z., Rocca J. J., Meyer J. D., Collins G. J. Transverse electron guns for plasma excitation.— J. Appl. Phys., 1982, vol. 53, p. 4704.
  78. Yu Z., Rocca J. J., Collins G. J. Studies of a glow discharge electron beam.— J. Appl. Phys., 1983, vol. 54, p. 131.
  79. Rocca J. J., Meyer J. D., Collins G. J. 1 watt CW Zn II laser (to be published).
  80. Gerstenberger D. C., Solanki R., Collins G. J.— IEEE J. Quant. Electron., 1980, vol. QE-16, p. 8202.

Поступила в редакцию 28 апреля 1983 г.

УДК 621.378.3

И. Г. ИВАНОВ

(Ростов-на-Дону)

## ИОННЫЕ ЛАЗЕРЫ НА ПАРАХ МЕТАЛЛОВ С ПОПЕРЕЧНЫМИ ТИПАМИ РАЗРЯДА

**Введение.** В данном обзоре рассматриваются лазеры, относящиеся к бурно развивающемуся в последние годы подклассу обширного класса газоразрядных лазеров на парах металлов [1]. Использование продольного (тлеющего или дугового) разряда для возбуждения переходов в атомарных ионах позволило значительно расширить набор длин волн, генерируемых лазерами на парах металлов в видимой, ультрафиолетовой и ближней инфракрасной областях спектра в импульсном и, что особенно важно, в непрерывном режимах излучения. Однако ограниченность числа эффективных и пригодных для практики лазеров с продольным разрядом стимулировала поиск других более эффективных способов возбуждения и новых ионных переходов. Результатом таких работ и явилось создание лазеров с поперечными типами разряда — разрядом в полом катоде (РПК) и поперечным высокочастотным разрядом (ПВЧР). Возбуждение активной среды (как правило, смеси буферного инертного газа и паров металла) осуществляется в таком лазере в электрическом поле, направление которого перпендикулярно оптической оси лазера, и происходит для лазеров с РПК в слабоионизованной плазме отрицательного свечения, а для лазеров с ПВЧР в области, по свойствам близкой к отрицательному свечению (ОС). Последнее и определяет сходство характеристик этих двух типов разряда и выходных параметров лазеров, их использующих.

Впервые генерация в лазере с РПК получена на атомарных переходах неона [2], однако затем было установлено, что поперечный разряд наиболее эффективен именно для ионных переходов. К настоящему времени генерация в лазерах с РПК и ПВЧР наблюдалась более чем на 260 линиях 21 иона. Первыми металлами, чьи пары использовались для генерации, были Hg, Cd и Zn [3—11], затем число металлов достигло

18, а число лазерных переходов в них — 239 и было найдено, что возбуждение в ОС наиболее эффективно происходит для тех ионных переходов паров металлов, верхние уровни которых заселяются ударами 2-го рода при столкновениях атомов металла с ионами или возбужденными атомами инертного газа (реакции перезарядки и пеннинг-процесс соответственно).

Исследования ионных лазеров на парах металлов с поперечным разрядом существенно расширили набор длин волн излучения газоразрядных лазеров в наиболее важных для практики областях спектра — видимой и УФ, с мощностью излучения на отдельных линиях до 1 Вт в непрерывном и импульсно-периодическом режимах; привели к созданию сравнительно простых по конструкции непрерывных лазеров милливаттного уровня мощности генерации на УФ-линиях в диапазоне длин волн 0,22—0,32 мкм. Кроме того, в лазере данного типа получено излучение трех основных цветов — синего, зеленого и красного, дающих белый свет. Излучая на линиях атомарных ионов, эти лазеры обладают узкими линиями генерации (порядка  $10^8$ — $10^9$  Гц), а также имеют весьма низкий уровень шумов излучения, связанный с возбуждением их активных сред в ОС разряда [12, 13].

Ниже приведены основные результаты исследований лазеров с РПК и ПВЧР, работающих как в непрерывном и квазинепрерывном режимах, так и в режиме возбуждения микросекундными импульсами; рассмотрены особенности возбуждения и способы создания паров металла; описаны конструкции активных элементов лазеров. Основное внимание, однако, уделено энергетическим характеристикам выходного излучения.

**1. Лазеры с разрядом в полой катод.** Поиск активных сред для лазеров на парах металлов сопровождался непрерывным поиском наиболее эффективного для каждого металла способа создания необходимого давления его паров. В табл. 1 для каждого металла, на ионных переходах которого наблюдалась генерация в лазерах с РПК, приведена температура, соответствующая давлению насыщающих паров 0,1 тор, оптимальному для большинства лазеров с поперечными типами разряда [1].

Для таких веществ, как Hg, Cd, Zn, I, Se, As, Tl и т. д., в большинстве экспериментов использовался наиболее простой метод — испарение (возгонка) вещества при его нагреве [3, 4, 6—32]. Для Cu, Ag, Au, Al, Ni, Sn, рабочие температуры которых превышают  $1100^\circ\text{C}$ , а также для Pb наиболее простым оказалось изготовление катода из рабочего вещества лазера и применение катодного распыления [5, 6, 33—47]. Снижение рабочей температуры достигалось также подбором химического соединения, в состав которого входят атомы данного металла и имеющего меньшую температуру испарения, с последующей диссоциацией этого соединения в разряде [26, 48].

В табл. 2 для лазеров с РПК приведены диапазон длин волн и число ионных линий генерации различных металлов. Отметим, что генерация в РПК наблюдалась также на ионных переходах аргона, криптона и ксенона [1], но ее характеристики (удельная мощность излучения, ненасыщенный коэффициент усиления и другие) значительно уступают характеристикам лучших лазеров на парах металлов. Генерация, за исключением четырех переходов в кадмии и цинке, происходит только в смеси буферный инертный газ — пары металла. Это связано с тем, что буферный газ выполняет несколько функций. Во-первых, возбуждение подавляющего большинства переходов осуществляется в процессе передачи энергии и заряда атомам металла от ионов газа, т. е. путем так называемой нерезонансной перезарядки. Остальные же переходы — 325

Таблица 1

Температура ( $^\circ\text{C}$ ), соответствующая давлению паров 0,1 тор

Металл	Hg	Cd	Zn	I	Se	As	Tl	Ga	Be	Ca	Sr	Cu	Ag	Au	Al	Ni	Sn	Pb
Температура	82	320	408	12	287	317	706	1180	1360	690	620	1419	1163	1574	1293	1255	1412	837

Ионные линии генерации лазеров на парах металлов с РПК

Элемент	Активная среда лазера	Диапазон длин волн излучения, нм	Число линий	Литература
HgII	Hg—He	615,0—1555,4	3	[3, 6, 11]
CdII *	Cd—He	325,0—887,8	13	[4—10]
ZnII *	Zn—He	491,2—758,8	10	[4—10, 12, 17, 18]
II	I—He	448,8—887,7	41	[15, 24, 25]
SeII	Se—He	460,4—649,0	13	[15]
AsII	As—He	538,5—710,2	9	[26]
GaII	Ga—He	633,4—719,8	2	[27]
TlII	{ Tl—He Tl—Ne	473,7—1175,0	8	[27, 49]
		582,9—707,0	4	[27, 28, 49]
BeII	{ Be—He Be—Ne	467,7	1	[29]
		1209,6	1	[29]
CaII	Ca—Kr	1183,9—1195,0	2	[30]
SrII	Sr—Kr	1087,6—1245,0	4	[30]
CuII	{ Cu—Ne Cu—He **	248,5—274,1	12	[33—38]
		450,6—2000,6	34	[34, 35, 37]
AgII	{ Ag—Ne Ag—He **	227,7—502,7	6	[35—37, 39]
		224,3—2079,4	26	[35—37, 39]
AuII	Au—He **	226,4—859,9	24	[35, 36, 38]
AlII	Al—Ne(He)	358,7—1063,9	15	[35, 40, 41]
NiII	Ni—He	796,2—797,5	2	[42]
SnII	Sn—He **	579,9—1074,0	5	[43]
PbII	Pb—He **	537,2—1322,1	4	[44]

\* На линиях 325,0 и 441,6 нм иона кадмия и 589,4 и 747,8 нм иона цинка генерация наблюдалась также без буферного газа при накачке электронным ударом [4].

\*\* Использовались добавки тяжелых инертных газов (Ar, Xe и др.).

и 441,6 нм CdII, 589,4 и 747,8 нм ZnII — и некоторые переходы в ионах олова и свинца заселяются путем пеннинговой ионизации атомов металла при тепловых столкновениях с метастабильными атомами гелия. Во-вторых, наличие буферного газа обеспечивает горение разряда и разогрев лазера до рабочей температуры в пусковом режиме, а также действие катодного распыления как способа создания необходимой концентрации атомов металла у целой группы лазеров на меди, серебре, золоте и других металлах, затрудняет диффузию паров металла из зоны разряда, снижая безвозвратные потери рабочего вещества за счет его конденсации в периферийных частях лазера и т. д.

На всех переходах, перечисленных в табл. 2 и возбуждаемых перезарядкой и пеннинг-процессом, возможен режим непрерывной генерации при стационарном разряде, и для большинства переходов он реализован. Исключение составляют переходы с наиболее высокими пороговыми мощностями накачки.

При термоиспарении легко реализуется и режим возбуждения лазеров с РПК и ПВЧР импульсами тока микросекундной длительности. В этом случае, как показано в [49—51], на ряде переходов можно осуществить генерацию с удельной мощностью до 0,5 Вт/см<sup>3</sup> и при частотах следования импульсов в десятки килогерц легко получить среднюю мощность излучения в сотни милливатт [51].

1.1. *Непрерывные лазеры с РПК и созданием паров за счет термоиспарения металла.* Термоиспарение как способ создания паров металла в разрядном объеме использовалось в первых лазерах с РПК и применяется до сих пор для веществ с рабочей температурой до 1100°C. К таким веществам относятся Hg, Cd, Zn, I, Se, As, Tl. Этот способ достаточно прост, позволяет независимо регулировать и оптимизировать как давление паров металла, так и мощность накачки. Остановимся на

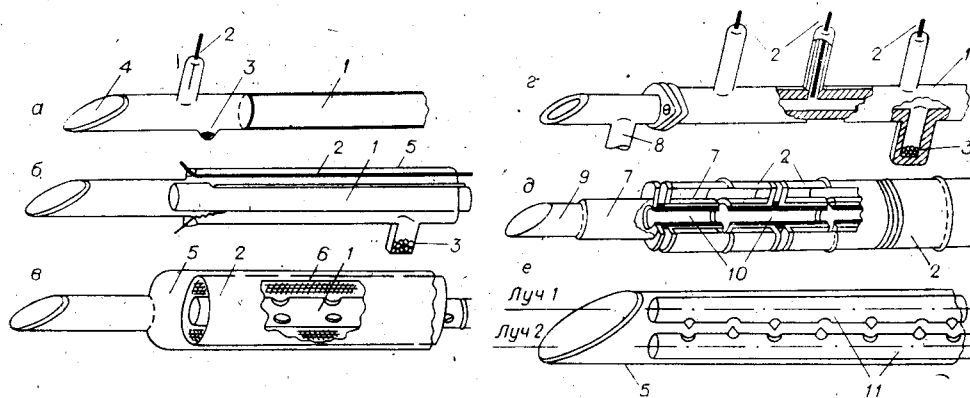


Рис. 1. Конструкция лазеров с РПК и термоиспарением металла (здесь, а также на других рисунках отсутствуют элементы оптического резонатора и устройства питания лазера).

1 — катод, 2 — анод, 3 — испаритель с гранулами металла, 4 — выходное окно под углом Брюстера, 5 — стеклянный баллон, 6 — сетка, 7 — керамическая трубка, 8 — штенгель для откочки, 9 — дополнительный анод, 10 — секции катода, 11 — электроды.

конструктивных особенностях лазеров с РПК и термоиспарением металла.

Первый лазер с РПК на парах металла — ртути [3] — содержал катод в виде полого цилиндра и два расположенных у его торцов анода (рис. 1, а). Между каждым анодом и катодом помещались испарители с ртутью, нагреваемые разрядным током. Лазеры с таким расположением электродов обладают хорошей стабильностью в работе, однако продольная однородность разряда сохраняется удовлетворительной лишь при сравнительно небольшой длине катода ( $\sim 5 \dots 10d$ , где  $d$  — диаметр полости).

Стремление к увеличению активной длины лазера привело в дальнейшем к применению протяженного анода и полого цилиндрического катода с продольной щелью, предназначенной для проникновения разряда внутрь полости (рис. 1, б) [4, 8, 27, 28]. Анод при этом либо охватывал катод в виде коаксиального цилиндра [8, 27], либо в виде стержня располагался вдоль щели (см. рис. 1, б) [4]. Ширина щели является критичной в том смысле, что она не должна быть малой с тем, чтобы при данном давлении газа полость катода не была «закрыта» для проникновения в нее разряда, а это происходит, если между краями щели возникает разряд с эффектом полого катода. В то же время она не должна быть и велика, поскольку при ширине щели, сравнимой с диаметром полости, эффект полого катода резко снижается. Очевидно, что эти условия ограничивают снизу возможный диаметр полости.

В лазерах с коаксиальным анодом применялся также перфорированный катод с отверстиями в его боковой поверхности (рис. 1, в) [14, 20], диаметр которых выбирался из тех же соображений, что и ширина щели. С целью предотвращения пульсаций плотности тока по длине щелевых или перфорированных катодов, особенно существенных в катодах длиной в несколько десятков сантиметров, были предложены конструкции лазеров типа «флейты» (рис. 1, г) [9, 15, 21, 25] и с секционированным катодом (рис. 1, д) [16], при этом каждый анод подключался к источнику тока через отдельное балластное сопротивление. Отметим, что «флейтовую» конструкцию имели первые лазеры с РПК на смеси гелий — неон [2].

Катоды и аноды лазеров с РПК, как правило, изготавливались из молибдена, тантала, нержавеющей стали, кобальта, реже из меди и других металлов. Специальные меры предпринимались для предотвращения горения разряда на наружной поверхности катода, для чего она покрывалась керамикой (см. рис. 1, д) [16] либо расстояние от нее до анода выбиралось соизмеримым с шириной катодного темного пространства [8].

В лазерах с термоиспарением рабочий металл помещался в один или несколько испарителей [3, 4, 15] либо находился в виде проволоки или гранул внутри анода, реже катода [16, 27, 28], где нагревался за счет тепловыделения разряда. По мнению авторов работы [31], перфорированный катод не обеспечивает необходимой скорости диффузии паров металла внутрь катода, поэтому авторами [31] в катодной трубке, наряду с системой отверстий для разряда, было сделано большое число отверстий меньшего диаметра для увеличения поступления паров. Введению паров из испарителя в полость катода зачастую способствовало явление катафореза. Катафорез использовался также для «запирания» паров металла внутри катода, что достигалось зажиганием разряда между крайней катодной секцией и дополнительным анодом, расположенным вблизи от окошка, которое предохранялось таким образом от конденсации на его поверхности пленки металла, увеличивающей потери света [16]. Тем не менее, при работе большинства известных лазеров с РПК (и ПВЧР) пары металла диффундируют из более нагретой зоны разряда в периферийные части лазера и таким образом безвозвратно теряются, что требует создания в лазере больших запасов рабочего металла. Попытка уменьшить расход металла сделана в [14]. С этой целью осуществлялась циркуляция металла в лазере на парах кадмия, работающем в режиме тепловой трубы. Кадмий конденсировался на концах анодного цилиндра, где температура превышала  $320^{\circ}\text{C}$  (точка плавления кадмия). Возврат этого металла в жидкой фазе к середине катода осуществлялся за счет капиллярных сил по мелкой (40 ячеек/см) сетке из нержавеющей стали, которая в пять слоев покрывала анодный цилиндр изнутри (см. рис. 1, в).

Распыление материала катода, успешно используемое для создания паров труднолетучих металлов, негативно влияет на срок службы рассматриваемых в данном разделе лазеров, приводя к дугообразованию и нестабильности разряда. В лазере на парах кадмия [24] с катодами двух модификаций: одиночным цилиндрическим (типа приведенного на рис. 1, а) и «флейтовым» (типа показанного на рис. 1, г) — полость катода покрывалась пленкой кадмия и в процессе работы осуществлялся тщательный контроль за температурой пленки и распределением температуры по длине катода. Пары кадмия были «заперты» в катоде разрядом с его торцов, что сохраняло толщину пленки неизменной. Все эти меры исключали распыление катода при плотности тока до  $40\text{ мА/см}^2$  и обеспечивали ресурс работы лазера свыше 1000 ч с выходной мощностью до 5 мВт на линии 441,6 нм иона кадмия.

Наряду с оптимизацией конструкции лазеров осуществлялись и эксперименты по оптимизации условий разряда и мощности накачки с целью достижения максимальной мощности генерации. В непрерывном режиме ток разряда и вводимая мощность ограничивались различными факторами (наиболее часто — перегревом активной среды, нестабильностями, склонностью разряда к дугообразованию и т. д. либо возможностями источника питания) и были ниже оптимальных. С целью повышения вводимой мощности во многих работах использовался режим питания трубки «длинными» (обычно с длительностью 0,1–10 мс) импульсами тока при малой частоте их повторения (100 Гц и менее) — так называемый квазинепрерывный режим. Амплитуда импульса при этом могла быть сделана большей, чем в непрерывном режиме, а условия возбуждения переходов в течении импульса соответствовали непрерывному режиму. Однако в таких экспериментах даже при максимальных плотностях тока (до  $300\text{ мА/см}^2$  [25]) лишь для некоторых переходов удалось достичь тока насыщения, мощность же излучения остальных продолжала возрастать при увеличении тока.

В табл. 3 приведены энергетические характеристики (для непрерывного и квазинепрерывного режимов) наиболее интенсивных ионных линий лазеров с РПК на парах Hg, Cd, Zn и I. В качестве параметра, характеризующего мощность накачки, дана величина плотности разряд-

Таблица 3

## Энергетические характеристики излучения ионных лазеров на парах металлов с РПК

Длина волны, нм	Давление гелия, тор	Непрерывный режим		Квазинепрерывный режим		Литература			
		Мощность, мВт (удельная мощность, мВт/см <sup>3</sup> )	Плотность тока, мА/см <sup>2</sup>	Мощность, мВт (удельная мощность, мВт/см <sup>3</sup> )	Плотность тока, мА/см <sup>2</sup>				
Hg <sup>+</sup> { 615,0 794,5	8	20 (5,7) 4 (33)	7,5 250	80 (23)	200	[19] [32]			
	10	—	—	5 (1,5)	200	[19]			
Cd <sup>+</sup> { 441,6 533,7 537,8 636,0 723,7—887,8	12	5 (62) 102 (14)	40 * 47 *	} 145 (42)	120	[21] [23]			
	} 30	} 9,5 (1,8) } 97 (13)	22 47 *			[16] [23]			
						8	10 (1,7) 25 (4,2)	22 22	[16] [16]
	Zn <sup>+</sup> { 491,2 492,4 589,4 747,9 758,8	30	15 (4,3) 25 (7,2)			50 50	} 145 (42)	120	[18]
		} 30	10 (2,9) 35 (10) 12 (3,5)			50 50 50			
60 (17)				80 *					
25 (7)				80					
I <sup>+</sup> { 576,1 467,5—887,7	20	7 (2)	60	100 (20)	275	[24, 25]			
	20	33 (9,5)	60	1000 (200)	275				

\* Плотность тока разряда с поверхности катода является оптимальной (удельная мощность излучения при этом для данной линии максимальна).

ного тока с единицы поверхности катода, поскольку значения напряжения на разряде изменялись от эксперимента к эксперименту незначительно и составляли 300 В.

Возбуждение большинства линий осуществляется в плазме ОС РПК путем перезарядки ионов гелия на атомах металлов, верхний лазерный уровень заселяется перезарядкой либо непосредственно, либо путем передачи возбуждения с других заселяемых перезарядкой ионных уровней металла посредством оптических переходов или переходов при тушащих столкновениях с электронами. Переходы с длинами волн 441,6 нм CdII, 589,4 и 747,8 нм ZnII возбуждаются путем пеннинговой ионизации атомов металла при их столкновениях с метастабильными атомами гелия.

Из табл. 3 видно, что наибольшая удельная мощность на одной линии — 33 мВт/см<sup>3</sup> — зарегистрирована на линии 615 нм HgII [32], причем оптимальная мощность накачки при этом не была достигнута. Оптимальное давление гелия для различных линий, приведенное в таблице и пересчитанное для диаметра катода 3 мм, составляет 8—30 тор. Наибольшие значения, как правило, относятся к линиям, возбуждаемым перезарядкой (30 тор для дублетов 0,49 мкм ZnII и 0,53 мкм CdII, 20 тор для линий иона йода). Оптимальная температура испарителя с металлом для ртути составляла 80—110°C, для кадмия — 250—330°C, цинка — 420—470°C и йода — около 10°C, что соответствовало давлению паров ~0,1 тор, причем в кадмии и цинке для линий, возбуждаемых пеннинг-процессом, требовались меньшие температуры (и давления паров), для «перезарядочных» линий — большие. Отметим, что давлению 0,1 тор соответствует плотность атомов металла около  $3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, что более чем на порядок превосходит ту же плотность в лазерах с возбуждением в положительном столбе (ПС) разряда.

Из табл. 3 следует, что применение каждого из металлов обеспечивает генерацию на нескольких длинах волн в широком спектральном диапазоне с мощностями излучения одного порядка. Это замечательное свойство было использовано при разработке многоцветных лазеров непрерывного действия. Так, в [22] сообщается о создании двухцветного лазера на парах кадмия, который включал два параллельно расположенных в одной оболочке перфорированных катода (рис. 1, e), подключаемых

к источнику переменного тока с частотой 50 Гц. Используя для каждого катода свой оптический резонатор, авторы получили два пучка излучения, попеременно пульсирующих с частотой 50 Гц: один на синей (441,6 нм), другой на зеленых (533,7 и 537,8 нм) линиях.

В работах [20, 31] в лазере с перфорированным катодом осуществлена одновременная непрерывная генерация на синей (441,6 нм), зеленых (0,53 мкм) и красной (636 нм) линиях иона кадмия. Однако сравнительно малая удельная мощность на красной линии (см. табл. 3) потребовала слишком большой активной длины лазера (80 см). Кроме того, в таком лазере отсутствует возможность регулировки в широких пределах относительных мощностей излучения линий. В [32] в трехцветном лазере, использовавшем пары кадмия и ртути в смеси с гелием, генерировалось излучение на синей и зеленых линиях иона кадмия и на красной (615 нм) — иона ртути. Поскольку красная линия иона ртути имеет на порядок более высокую удельную мощность, чем красная линия иона кадмия, то это позволяет значительно уменьшить габариты лазера и, кроме того, в широких пределах осуществлять регулировку соотношения мощностей на красной и сине-зеленых линиях путем изменения давления ртути.

Для металлов, пары которых создаются термоиспарением, проводилось сравнение их характеристик при возбуждении в ОС РПК и в положительном столбе продольного разряда [6, 27] и было показано, что РПК наиболее эффективен для тех переходов, на которых инверсная заселенность создается при перезарядке ионов буферного газа на атомах металла. Большинство таких переходов, работающих в РПК, в ПС имеют либо меньшую мощность (например, для линии 615 нм HgII в РПК — 33 мВт/см<sup>3</sup>, в ПС — 4 мВт/см<sup>3</sup>), либо генерация на них отсутствует. Причины этого выявлены в [52, 53] и их можно понять, лишь остановившись на особенностях ионизации буферного газа в РПК. В самом деле, лазерная мощность связана со скоростью перезарядки ионов газа (например, гелия на атомах металла), т. е. оказывается пропорциональной произведению плотности ионов гелия и плотности атомов металла. Скорость же ионизации гелия обусловлена количеством электронов с энергией, превышающей его потенциал ионизации (24,56 эВ). Найденные в [52, 53] функции распределения по энергиям электронов в ОС аномального РПК показывают, что концентрация электронов, способных ионизовать гелий, т. е. электронов с энергией 24,56 эВ и выше (вплоть до энергии ~200—300 эВ, соответствующей потенциалу катодного темного пространства), существенно превышает концентрацию, даваемую распределением Максвелла. Эти электроны, называемые вторичными, возникают в результате прихода в ОС первичных электронов, эмиттированных катодом и ускоренных при прохождении ими катодного темного пространства. Количество вторичных электронов сохраняется в ОС РПК большим, даже когда плотность атомов металла достигает 5—10% от плотности атомов гелия (в ПС предельная концентрация паров металла не превышает 0,1%). При этом существенно, что повышение концентрации металла в ОС РПК приводит к росту потенциала катодного темного пространства и в результате — к росту энергии группы первичных электронов (в ПС, наоборот, градиент электрического поля снижается при введении паров металла). Таким образом, на порядок более высокая плотность атомов металла в РПК по сравнению с ПС при примерно одинаковой концентрации ионов гелия и обеспечивает большую скорость возбуждения лазерного перехода и соответственно высокую мощность генерации. В работе [54] найдено, что скорость возбуждения можно дополнительно повысить подбором материала катода с повышенным напряжением горения, т. е. повышенным потенциалом катодного темного пространства. Так, применение графитового катода в лазере на парах ртути привело к ожидаемому увеличению.

Таким образом, в результате большого числа исследований непрерывной генерации на ионных переходах металлов РПК при создании их

паров термодиспарением генерация в видимой части спектра получена на значительном числе длин волн и с большей эффективностью, чем в ПС продольного разряда, и показано, что мощность излучения на отдельных линиях может достигать 100 мВт при удельной мощности в нескольких десятках милливольт с кубического сантиметра. При этом потенциальные возможности описанных систем еще далеко не исчерпаны и мощность на линиях может быть значительно поднята до десятков и даже сотен милливольт с кубического сантиметра. В практическом плане создан компактный и долговечный гелий-кадмиевый лазер с РПК [21], трехцветные лазерные системы на смеси He—Cd с излучением на синей, зеленых и красной линиях иона кадмия и на смеси He—Cd—Hg с излучением на синей и зеленых линиях иона кадмия и красной линии иона ртути [31, 32].

1.2. *Непрерывные лазеры с РПК и катодным распылением.* Как впервые было показано в [5, 6] на примере кадмия и цинка, распыленный материал катода может служить активным веществом лазеров с РПК. В дальнейшем в работах [33—47] катодное распыление как механизм создания паров металла в лазерах с РПК было успешно использовано для таких металлов, как Cu, Ag, Au, Al, Ni, Sn и Pb, которые требуют слишком высокой температуры (более 1000°С) при термическом способе создания их паров.

В работе [5] лазер имел охлаждаемый водой (во избежание перегрева и деформации) цилиндрический полый катод с вкладышем из распыляемого материала (кадмия или цинка) и стержневой анод, расположенный внутри полости катода (рис. 2, а). В дальнейшем усилия исследователей были направлены на создание лазеров с повышенными плотностью тока и энерговыделением с целью увеличения концентрации атомов металла и достижения оптимальных условий возбуждения. В лазерах [33, 37] полость катода выполнялась в массивном охлаждаемом медном блоке с сечением в виде круга диаметром 2 ÷ 6 мм (рис. 2, б). Как упоминалось выше, дальнейшее уменьшение диаметра полости кругового сечения нецелесообразно из-за снижения эффективности полого катода. В работе [34] эта трудность была преодолена путем изготовления полости в виде прямоугольного паза шириной 2 мм и глубиной 6 мм (рис. 2, в), что способствовало достижению стабильности и пространственной однородности разряда при длине катода до 60 см и плотности тока в полости до 2 А/см<sup>2</sup>, исключало локализацию и выталкивание плазмы. Применяемое охлаждение катода предотвращало его перегрев и деформацию. Катод либо целиком изготовлялся из рабочего металла (меди, алюминия, никеля), либо имел продольную вставку из серебра, золота или других металлов в охлаждаемом медном блоке, в которой выполнялся паз.

Лазеры описанных конструкций использовались в основном при поиске новых лазерных переходов в парах перечисленных выше металлов.

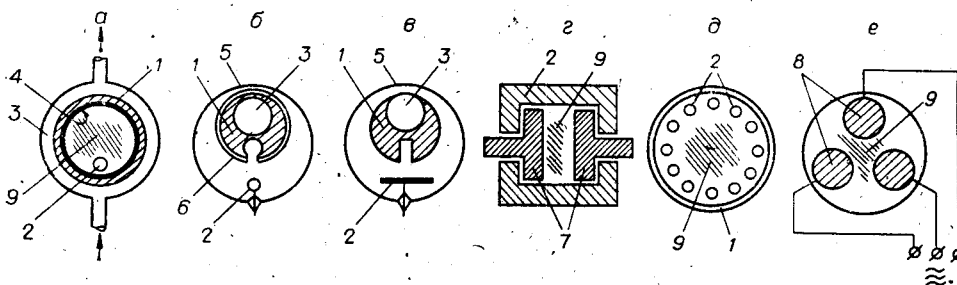


Рис. 2. Лазеры с РПК и катодным распылением (показано сечение разрядных трубок):

1 — катод, 2 — анод, 3 — рубашка водяного охлаждения, 4 — вкладыш катода, 5 — стеклянная или кварцевая оболочка лазера, 6 — кварцевая оболочка катода, 7 — катодные пластины, 8 — электроды, 9 — зона ОС.



Для мощных лазеров на парах меди с выходной непрерывной мощностью до 1 Вт применялись разрядные трубки с секционированным охлаждаемым цилиндрическим медным катодом [35, 46] и с прямоугольной активной зоной сечением  $4 \times 12$  мм и полной длиной 120 см [45]. Последний лазер состоял из 12 секций длиной 10 см каждая, сечение которых показано на рис. 2, г. Каждая секция имела две охлаждаемые водой медные катодные пластины, которые подключались к выпрямителю через отдельные балластные сопротивления, и специальные ловушки, препятствующие замыканию катодных пластин на анод при конденсации распыленных атомов меди.

Как будет видно из дальнейшего, плотность распыленных атомов в разряде не достигает оптимального для генерации значения даже при максимальных плотностях тока, поэтому постоянно предпринимались попытки ее увеличения. Один из наиболее интересных способов увеличения плотности был описан в [40, 55]. В лазере, получившем название полой анод — катод, внутри катода располагалась система анодных стержней типа «беличье колесо» (рис. 2, д). Уменьшая расстояние между катодом и анодами и наращивая число стержней, а также ток разряда, можно увеличить напряжение горения, следовательно, и потенциал катодного темного пространства до 1000—1500 В (против 200—400 В во всех предыдущих конструкциях), что приводит к повышению концентрации и энергии ионов, бомбардирующих катод, и увеличению скорости распыления. Поскольку скорость распыления сильно зависит от массы буферного газа и минимальна для гелия, в последний приходилось вводить небольшие (до 5%) добавки тяжелых инертных газов — Ar, Kr или Xe.

В описанных конструкциях лазеров распыление катода приводит к сильной его эрозии, искажающей форму щели и вызывающей нестабильную работу. С целью уменьшения эрозии в работе [47] предложена конструкция лазера (рис. 2, е), питаемого от трехфазной сети и состоящего из трех параллельных медных стержней-электродов, в пространстве между которыми возникает разряд. В процессе работы лазера происходит последовательное с частотой сети переключение полярности, и разрушение поверхности стержней поэтому становится более равномерным.

Энергетические характеристики лазеров с РПК и катодным распылением для наиболее интенсивных ионных переходов меди, серебра и золота собраны в табл. 4. Для сравнения условий разряда, соответствующих характеристикам различных линий, приведены также величины поверхностной плотности тока. Здесь следует заметить, что поскольку скорость распыления непосредственно зависит от плотности тока, ток и концентрация атомов металла оказываются связанными параметрами, и поэтому оптимизация мощности излучения в лазерах с катодным распылением затруднена.

Наибольшая мощность излучения в УФ-области как в непрерывном, так и в квазинепрерывном режиме достигалась на ионных линиях меди: на линии 270,3 нм — 34 мВт при удельной мощности  $5 \text{ мВт/см}^2$  в непрерывном режиме и  $0,5 \text{ Вт}$  при  $56 \text{ мВт/см}^2$  в квазинепрерывном; а на семи линиях в диапазоне 248,5—270,3 нм — 1,25 Вт при удельной мощности  $140 \text{ мВт/см}^2$  в квазинепрерывном режиме. В то же время самой коротковолновой УФ-линией, на которой получена непрерывная генерация, является линия 224,3 нм иона серебра. Наибольший ненасыщенный коэффициент усиления имела линия 248,5 нм CuII в квазинепрерывном режиме при токе  $2 \text{ А/см}^2$  —  $8,3\%/м$ , пороговый ток для нее равнялся  $200 \text{ мА/см}^2$ .

Наибольшая мощность среди линий видимого и ближнего ИК-диапазонов 1 Вт, в непрерывном и 5 Вт в квазинепрерывном режимах и наименьший пороговый ток  $20 \text{ мА/см}^2$  зарегистрированы на линии 780,8 нм CuII. Максимальная же удельная мощность в непрерывном режиме на этой линии соответствует плотности тока  $0,3 \text{ А/см}^2$ .

Таблица 4

Энергетические характеристики излучения ионных лазеров с РПК на парах меди, серебра и золота

Длина волны, нм	Давление буферного газа, тор	Непрерывный режим		Квазинепрерывный режим		Литература
		Мощность, мВт (удельная мощность, мВт/см <sup>2</sup> )	Плотность тока, А/см <sup>2</sup>	Мощность, Вт (удельная мощность, мВт/см <sup>2</sup> )	Плотность тока, А/см <sup>2</sup>	
Cu <sup>+</sup> { 248,5 259,1 259,9 270,3 780,8	12(Ne)	—	—	0,5 (56)	1,1	[37]
		21 (3) 5 (0,7)	0,25 0,25	0,25 (28)	1,1	[37, 63]
	15(He)+0,5(Ar)	34 (5)	0,25	0,5 (56)	1,1	[37, 63]
		1000 (17,4)	0,1	5,2 (250)	0,7	[37, 45]
		400 (106)	0,3			[46]
20(He) + 0,2(Ar)	1,46 (0,5)	0,14	0,05 (17) 0,065 (7,5)	1,1 1,3	[39] [37]	
Ag <sup>+</sup> { 318,1 408,5 478,8 800,5— —840,3	12(Ne)	—	—	1,3 (140)	1,3	[37]
		—	—	0,83 (90)	1,3	[37]
		—	—	2,3 (250)	1,3	[37]
	12(He) + 0,1(Xe)	—	—	2,0 (95)	0,7	[37]
Au <sup>+</sup> { 282,3 284,7 289,3 291,8	22(He) + 0,2(Ar)	19,2 (4)	0,11			[36] [38]
				0,6 (20)	1,1	

Для сравнения эффективности лазеров на линии 780,8 нм иона меди, использующих катодное распыление и термоиспарение, в работе [45] изучались характеристики лазера с саморазогревом. Молибденовый катод лазера с полостью длиной 13 см и диаметром 9,5 мм разогревался током 3,8 А при напряжении 440 В до температуры 1350—1500°C, которая соответствовала оптимальному давлению паров меди в разряде (около 0,4 тор). Мощность на линии 780,8 нм составила 0,5 Вт (55 мВт/см<sup>2</sup>) при КПД, на порядок более высоком, чем в лазерах с распылением реалίζεται плотность атомов металла (около 10<sup>14</sup> см<sup>-3</sup>), на порядок меньшая оптимальной. Эта цифра была в дальнейшем подтверждена при измерениях плотности распыленных атомов меди методом поглощения [35]. Исследования генерации на линии 780,8 нм выполнялись также в лазере типа полый анод — катод [55] и при создании атомов меди путем диссоциации ее галогенидов [48].

1.3. Ионные лазеры с РПК, возбуждаемые импульсами тока микросекундной длительности. Из вышеизложенного становится ясно, что в стационарном режиме серьезной проблемой на пути повышения удельной мощности лазеров с РПК являются возникновение пространственной неоднородности в разряде и дугообразование. По этим причинам, а также из-за невозможности обеспечить необходимый теплоотвод лишь для малого числа переходов осуществлен режим с оптимальной мощностью накачки, на остальных же линиях, как показывают эксперименты в квазинепрерывном режиме, мощность излучения далеко не достигает максимально возможных значений. В то же время в режиме возбуждения лазеров короткими импульсами (длительностью порядка микросекунды), в течение которых неоднородности разряда не успевают развиться, можно сообщить активной среде оптимальный уровень накачки, а изменением частоты следования импульсов регулировать среднее значение вкладываемой мощности и, следовательно, мощности излучения.

Несмотря на то что микросекундными импульсами возбуждались первые лазеры с РПК на парах Hg, Cd и Zn [3, 4], этот режим долгое время применялся лишь в работах поискового характера с парами таллия [27, 49], бериллия [29], кальция и стронция [30], однако энерге-

Таблица 5

Энергетические характеристики лазеров с РПК на парах ртути, кадмия, цинка и таллия, возбуждаемых микросекундными импульсами

Ион	Длина волны, нм	Буферный газ	Плотность тока разряда, мА/см <sup>2</sup>	Ненасыщенный коэффициент усиления, дБ/м	Удельная пиковая мощность излучения, мВт/см <sup>2</sup>
HgII	615,0	He	900	30	500
	794,5	He	900	35	...
CdII	441,6	He	200	5	250
	533,7	He	150	4,5	40
	537,8	He	150	4,5	
	636,0	He	95	2,5	...
	728,4	He	150	6	...
	806,7	He	150	7,5	...
ZnII	491,2	He	430	7	150
	492,4	He	430	7,5	
	589,4	He	540	3,5	...
	610,2	He	220	2	...
	747,9	He	540	5	...
TlII	758,8	He	280	5	17
	595,0	Ne	340	15	500
	695,0	Ne	340	9	100
	707,0	Ne	340	3,8	50

тические характеристики таких лазеров практически не изучались. Отметим, что в этом режиме в РПК наблюдалась генерация на переходах CdII (325 и 441,6 нм) и ZnII (589,4 и 747,8 нм) без буферного газа, т. е. в «чистых» парах металлов, с коэффициентами усиления, значительно превосходящими усиление на тех же переходах в смеси с гелием [4].

Лишь недавно в работах [49—51, 54] было проведено детальное изучение энергетических и плазменных характеристик наиболее эффективных лазеров с РПК и термоиспарением ртути, кадмия, цинка, таллия в смеси с гелием при микросекундном возбуждении.

Эксперименты проводились с лазерами, подобными изображенному на рис. 1, а, б. С точки зрения получения максимальной импульсной и средней мощностей излучения оптимизировались условия возбуждения (амплитуда, длительность и частота следования импульсов тока), а также диаметр полости катода. Было найдено, что импульсная мощность излучения максимальна при длительности импульса тока  $\tau$ , равной 1—2 мкс. Параметры лазеров с парами Hg, Cd, Zn и Tl измерялись при оптимальной длительности импульса тока  $\tau = 1$  мкс. В табл. 5 приведены эти данные для целевого катода диаметром 6 мм и длиной 40 см. В экспериментах легко достигался оптимальный ток разряда, плотность которого не превышала 0,9 А/см<sup>2</sup>, соответствующий максимальной импульсной мощности. Дальнейшему увеличению мощности при увеличении тока для большинства линий, возбуждаемых перезарядкой, препятствует рост скоростей возбуждения нижнего и дезактивации верхнего лазерных уровней из-за столкновений ионов с тепловыми электронами, а для линий, возбуждаемых пеннинг-процессом, — столкновения с электронами и падение концентрации атомов гелия в метастабильных состояниях.

Как видно из табл. 5, наибольшие усиление и удельная мощность зарегистрированы на линиях 615 нм HgII, 441,6 нм CdII и 595 нм TlII. Отметим, что эти результаты могут быть еще улучшены использованием четных изотопов металлов, поскольку первые две линии подвергаются изотопическому, а линия таллия — еще и сверхтонкому расщеплению [3, 6, 49]. Высокое усиление (до 0,3 дБ/см) в сочетании с медленным падением импульсной мощности и монотонным ростом средней мощности излучения при увеличении диаметра полости катода позволяют успешно конструировать лазеры с большим (до 40 мм) диаметром полости катода при малой (порядка 10—20 см) длине, т. е. с малым отношением  $L/d \sim 3 \div 4$ , что может оказаться полезным на практике.

Сравнение данных табл. 3 и 5 свидетельствует о том, что для разных линий удельный энергосъем при микросекундной накачке в 4—15 раз выше, чем в квазинепрерывном режиме, а этот факт лишь частично может быть объяснен более высокой плотностью тока. Как показали детальные исследования плазмы таких лазеров и анализ процессов, при-

водящих к возбуждению линий, при малых  $t$ , во-первых, не успевает образоваться большое число низкоэнергетических тепловых электронов с энергией порядка долей и единиц электрон-вольт, поэтому электронное девозбуждение в такие интервалы времени малоэффективно и мощность накачки с наибольшей эффективностью преобразуется в лазерное излучение. Во-вторых, поскольку скорость возбуждения ионных переходов металлов обусловлена в конечном счете энергией и концентрацией первичных электронов, прошедших катодное темное пространство, потенциал которого при микросекундном возбуждении достигает 1,2—1,5 кВ, т. е. в несколько раз превосходит стационарное значение, то скорость возбуждения при коротких импульсах оказывается еще более высокой. И, в-третьих, обнаруженный в [50, 54] большой градиент электрического поля в ОС (достигающий 100 В/см) приводит к дополнительному увеличению энергии вторичных электронов и скорости возбуждения.

В работе [51] измерены характеристики генерации на различных переходах при высоких (до 100 кГц) частотах следования импульсов и найдено, что при малых частотах импульсная мощность максимальна, а средняя мощность растет с ростом частоты вначале по линейному закону, затем насыщается (при оптимальной частоте) и при дальнейшем росте частоты снижается. Отмеченное снижение, как показали эксперименты, вызвано монотонным падением импульсной мощности с ростом частоты. Оптимальная частота уменьшалась при увеличении диаметра катода (например, для линии 615 нм HgII — 41 кГц при диаметре 9 мм и 34 кГц при 20 мм). Для этих же диаметров средняя мощность при длине катода 13,5 см составила 72 и 205 мВт соответственно (удельная средняя мощность 8,7 и 5 мВт/см<sup>3</sup>).

Таким образом, эксперименты показали, что лазеры с возбуждением микросекундными импульсами тока обладают высокой как импульсной, так и средней мощностью излучения при частотах повторения импульсов в несколько десятков килогерц. Средняя мощность излучения таких лазеров, имеющих сравнительно небольшие размеры, может достигать десятых долей ватта, а при соответствующем увеличении объема активной среды — полости катода — нескольких ватт.

**2. Лазеры на парах металлов с поперечным ВЧ-разрядом.** Как отмечалось выше (см. п. 1.1), высокая эффективность разряда с полым катодом для возбуждения ионных линий металлов связана с присутствием в плазме большого количества вторичных электронов с энергией, превышающей потенциал ионизации буферного газа. Вторичные электроны с высокой энергией возникают в результате прихода в ОС первичных электронов, ускоренных при прохождении ими потенциала катодного темного пространства. В работах [56, 57] было показано, что при определенных условиях в приэлектродных областях высокочастотного разряда также создаются большие стационарные электрические поля, ориентированные в направлении электрода. Ускоренные в данном поле ионы вызывают эмиссию электронов с поверхности электрода и последующее их ускорение в этом поле. Претерпевая столкновения с атомами газа, эти высокоэнергетические электроны (по аналогии с РПК их также можно назвать первичными) приводят к образованию вторичных электронов в области разряда, по свойствам близкой к ОС РПК. При этом, поскольку поле составляет несколько сотен вольт, эмиссия сохраняется, даже если электрод будет покрыт диэлектриком.

О реализации первых лазеров на парах металлов с ПВЧР сообщалось в работе [58]. Лазер, показанный на рис. 3, а, имел весьма простую конструкцию. Вдоль внешней поверхности кварцевой разрядной трубки параллельно друг другу располагались два электрода из никеля (в более поздних работах электроды образовывались вжиганием серебра в поверхность кварца). Гранулы металла помещались либо непосредственно на внутреннюю поверхность кварцевой трубки, либо в один или несколько испарителей, выполненных в виде отростков трубки. В процессе работы трубка и вместе с ней металл разогревались до рабочей температуры.

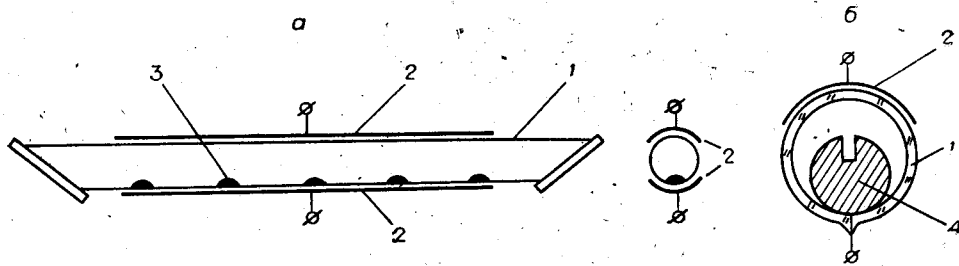


Рис. 3. Лазеры с ПВХР:

1 — кварцевая трубка, 2 — электроды, 3 — гранулы металла, 4 — медный электрод.

Поступлению атомов металла в разряд способствовала также ионная бомбардировка их поверхности в разряде. В [59] было показано, что в лазерах с ПВХР пары труднолетучих веществ так же, как и в РПК, могут быть созданы за счет катодного распыления одного из электродов, изготовленного из рабочего материала. Сечение работающего на парах меди лазера показано на рис. 3, б. Один из электродов, представляющий собой массивный медный стержень с полостью в виде паза сечением  $1,5 \times 4$  мм<sup>2</sup>, помещался внутри кварцевой оболочки, на наружную поверхность которой наносился в виде полоски второй электрод. Лазеры заполнялись буферным газом, который выполнял ту же роль, что и в РПК, а электроды подключались к источнику ВЧ-напряжения с частотой, равной в большинстве экспериментов 13,56 МГц. К настоящему времени непрерывный и квазинепрерывный режимы генерации в лазерах с ПВХР зарегистрированы на 19 ионных переходах пяти металлов (см. табл. 6), в случае четырех из них — Hg, Cd, Zn и Tl [58, 60] — пары создавались в основном термоиспарением, а в случае меди — за счет распыления медного электрода в ВЧ-разряде. Как и ожидалось, характеристики генерации были подобны характеристикам лазеров с РПК. К линиям с наибольшей мощностью излучения относятся линия 441,6 нм и дублеты 533,7 и 537,8 нм иона кадмия, а также дублеты 491,2 и 492,4 нм иона цинка. Поскольку рабочая температура для кадмия (около 320°C) близка к наиболее оптимальной температуре эксплуатации лазеров с ПВХР, а синяя и зеленые линии иона кадмия являются одними из наиболее интенсивных в таких лазерах, подавляющее большинство дальнейших исследований было проведено с кадмием. Возбуждение указанных переходов CdII, как и во всех других типах разряда в смеси кадмий — гелий, осуществлялось соответственно пеннинг-процессом и перезарядкой. Высокая эффективность протекания этих процессов в ПВХР так же, как и в РПК, определяется тем, что в разряде происходят эффективная ионизация и возбуждение буферного газа в присутствии достаточно большой концентрации атомов металла (более  $10^{15}$  см<sup>-3</sup>, что соответствует давлению около 0,1 тор).

Таблица 6

Линии генерации лазеров на парах металлов с ПВХР

Ион	Длина волны, нм	Литература	Ион	Длина волны, нм	Литература
HgII	{ 615,0 794,5	[58]	ZnII	{ 491,2 492,4 589,4	[58]
	{ 325,0 441,6 533,7 537,8	[58, 60]		TlII	{ 515,2 595,0 695,0
CdII	{ 646,5 672,6 806,6		SeII		{ 506,8 517,5 522,7 530,5
	CuII	780,8		[59]	

В работе [61] в квазинепрерывном режиме разряда при длительности радиочастотного импульса накачки 1 мс были оптимизированы условия разряда для ионных линий кадмия в трубках различного диаметра (1,7—5,7 мм). Оказалось, что максимум мощности на линии 441,6 нм и на зеленом дублете (533,7 и 537,8 нм) достигается при определенном соотношении диаметра разрядной трубки и давления гелия, а именно произведение давления гелия на диаметр трубки должно быть равно 40, 80 и 60 тор·мм соответственно. Оптимальная величина вкладываемой мощности на 1 см длины трубки для линии 441,6 нм не зависит от диаметра трубки и составляет около 20 Вт. Для линий 533,7 и 537,8 нм эта мощность пропорциональна диаметру как  $125d$  и  $95d$  соответственно ( $d$  выражено в сантиметрах). Максимальная удельная мощность излучения 43 мВт/см<sup>3</sup>, зарегистрированная на линии 441,6 нм, соответствовала минимальному диаметру трубки, в то же время максимальная мощность на линии 537,8 нм — 4,5 мВт/см<sup>3</sup> достигалась в трубке большого диаметра (3,8 мм). Обнаружено также, что мощность излучения слабо зависит от частоты возбуждающего поля в диапазоне частот 2—30 МГц, однако при увеличении частоты одна и та же энергия вводится в разряд при меньшем напряжении на электродах.

Найдено, что подобно лазерам с РПК [12] в лазере на парах кадмия с ПВЧР [13] легко реализуется одночастотный режим генерации на зеленых линиях с весьма низким уровнем шумов излучения.

Режим возбуждения лазеров с ПВЧР импульсами ВЧ-напряжения микросекундной длительности так же, как и в лазерах с РПК, привел по сравнению с непрерывным возбуждением к росту удельной мощности до значений 110 мВт/см<sup>3</sup> (на сине-зеленых линиях иона кадмия) при удельной вводимой мощности 290 Вт/см<sup>3</sup> [62]. Оптимальная частота следования возбуждающих радиоимпульсов составляет десятки килогерц, и в таком режиме при соответствующем теплоотводе легко может быть получена средняя мощность излучения на отдельных линиях до 5 мВт/см<sup>3</sup>.

Таким образом, использование ПВЧР для возбуждения ионных переходов паров металлов привело к получению интересных, в смысле значительного упрощения конструкции лазера, и многообещающих результатов. В самом деле, не уступая лазерам с РПК в эффективности возбуждения ионных уровней, лазеры с ПВЧР в значительно меньшей степени подвержены наблюдающемуся в РПК дугообразованию, вредному распылению электродов и поэтому представляются перспективными для многих применений.

**Заключение.** Вышеизложенное позволяет нам сделать вывод о том, что к настоящему времени для лазеров с РПК и ПВЧР можно считать завершенным поиск активных сред и способов создания паров металлов, проведена также частичная оптимизация режимов возбуждения лазеров. Этот поиск привел к существенному увеличению набора линий генерации газоразрядных лазеров в видимом диапазоне и, что особенно существенно, дал ряд источников непрерывного лазерного излучения в УФ-диапазоне с длинами волн, почти достигающими границы вакуумного УФ-излучения. Так, линия иона серебра 224,3 нм является сейчас самой коротковолновой линией, на которой зарегистрировано непрерывное лазерное излучение.

Мощность в непрерывном режиме на ряде линий может достигать и уже достигает долей и единиц ватт с удельной мощностью в десятки милливатт с кубического сантиметра. Режим возбуждения лазеров с РПК и ПВЧР импульсами микросекундной длительности позволил оптимизировать уровень накачки, избежав ряда технических трудностей, присущих непрерывному режиму, и при средней мощности в десятки и сотни милливатт достигнуть достаточно высоких пиковых значений мощности с удельной пиковой мощностью в сотни милливатт с кубического сантиметра при большой апертуре светового луча.

К потенциальным областям применения лазеров с поперечным разрядом можно отнести накачку лазеров на красителях, генерацию пере-

страиваемого УФ-излучения путем суммирования частоты, например при смешении излучений лазера на красителе и какого-либо УФ-лазера с РПК, флуоресцентный активационный анализ, спектроскопию комбинационного рассеяния, фотолитографию, в том числе УФ-фотолитографию, медико-биологические эксперименты, устройства обработки информации и др.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Справочник по лазерам/Под ред. А. М. Прохорова.**— М.: Сов. радио, 1978, т. 1.
2. **Чоботаев В. П., Покасов В. В.** Работа оптического квантового генератора на смеси гелий—неон с разрядом в полом катоде.— *Радиотехника и электроника*, 1965, т. 10, № 5.
3. **Byer R. L. et al.** Laser emission in ionized mercury.— *JOSA*, 1965, vol. 55, N 12.
4. **Сэм М. Ф., Михалевский В. С.** Импульсная генерация на переходах цинка и кадмия.— *Журн. прикл. спектр.*, 1967, т. 6, вып. 5.
5. **Карабут Э. К., Михалевский В. С., Панакин В. Ф., Сэм М. Ф.** Непрерывная генерация в парах цинка и кадмия, полученных катодным распылением.— *ЖТФ*, 1969, т. 39, № 10.
6. **Карабут Э. К., Кейдан В. Ф., Михалевский В. С., Сэм М. Ф.** Непрерывная генерация на переходах в спектрах ионов цинка, кадмия и ртути.— *Электрон. техника*. Сер. 1, 1969, № 9.
7. **Schuebel W. K.** New CW Cd vapor laser transitions in a hollow cathode structure.— *Appl. Phys. Lett.*, 1970, vol. 16, N 11.
8. **Schuebel W. K.** Transverse discharge slotted hollow cathode laser.— *IEEE J. Quant. Electron.*, 1970, vol. QE-6, N 9.
9. **Sugawara Y., Tokiwa Y.** CW laser oscillations in ZnII and CdII in hollow cathode discharge.— *Japn. J. Appl. Phys.*, 1970, vol. 9, N 5.
10. **Sugawara Y. et al.** New CW laser oscillation in He—Cd and He—Zn hollow cathode lasers.— *Japn. J. Appl. Phys.*, 1970, vol. 9, N 12.
11. **Schuebel W. K.** Continuous visible and near-infrared laser action in HgII.— *IEEE J. Quant. Electron.*, 1971, vol. QE-7, N 1.
12. **Jensen R. C. et al.** Low-noise CW hollow cathode zinc ion laser.— *Appl. Phys. Lett.*, 1971, vol. 18, N 2.
13. **Корольков А. Н.** ВЧ-возбуждение гелий-кадмиевого лазера.— *Электрон. техника*. Сер. 4, 1977, № 9.
14. **Wang S. C., Siegman A. E.** Hollow cathode transverse discharge He—Ne and He—Cd<sup>+</sup> laser.— *Appl. Phys.*, 1973, vol. 2, N 3.
15. **Piper J. A., Webb C. E.** A hollow cathode device for CW He-metal vapor laser systems.— *J. Phys. D*, 1973, vol. D6, N 4.
16. **Fukuda Sh., Mija M.** A metal-ceramic He—Cd II laser with sectional hollow cathode and output power characteristics of simultaneous oscillation.— *Japn. J. Appl. Phys.*, 1974, vol. 13, N 4.
17. **Iijima T., Sugawara Y.** New CW laser oscillation in He—Zn hollow cathode laser.— *J. Appl. Phys.*, 1974, vol. 45, N 11.
18. **Piper J. A., Gill P.** Output characteristics of the He—Zn laser.— *J. Phys. D*. 1975, vol. D8, N 2.
19. **Piper J. A., Webb C. E.** Power limitation of the CW He—Hg laser.— *Opt. Comm.*, 1975, vol. 13, N 2.
20. **Fujii K.** Hollow cathode type CW whitelight laser.— *IEEE J. Quant. Electron.*, 1975, vol. QE-11, N 3.
21. **Hernqvist K. G.** Long life hollow cathode laser.— *IEEE J. Quant. Electron.*, 1978, vol. QE-14, N 2.
22. **Сьботинов Н. В. и др.** Двупольный гелий-кадмиевый лазер с полым катодом.— *Квант. электроника*, 1978, т. 5, № 7.
23. **Grace J. R., McIntosh A. J.** Design and performance of an improved hollow cathode He—Cd<sup>+</sup> laser.— *J. Phys. D*, 1979, vol. D12, N 11.
24. **Piper J. A.** Increased efficiency and new CW transitions in the He—I laser system.— *J. Phys. D*, 1974, vol. D7, N 2.
25. **Piper J. A., Webb C. E.** High current characteristics of the CW hollow cathode He—I<sub>2</sub> laser.— *IEEE J. Quant. Electron.*, 1976, vol. QE-12, N 1.
26. **Piper J. A.** CW laser oscillation on transitions of As<sup>+</sup> in He—AsH<sub>3</sub> gas discharge.— *Opt. Comm.*, 1979, vol. 31, N 3.
27. **Иванов И. Г., Сэм М. Ф.** Генерация на ионных переходах таллия и галлия.— *Электрон. техника*. Сер. 4, 1974, № 2.
28. **Grozeva M. G., Sabotinov N. V., Vuchkov N.** CW laser oscillation on Tl II a hollow cathode Ne—Tl discharge.— *Opt. Comm.*, 1979, vol. 29, N 3.
29. **Жуков В. В., Латуш Е. Л., Сэм М. Ф.** Импульсная генерация в парах бериллия.— *Квант. электроника*, 1975, т. 2, № 7.
30. **Жуков В. В., Латуш Е. Л., Сэм М. Ф.** Генерация в смесях Ca—Kr и Sr—Kr за счет перезарядки.— *Журн. прикл. спектр.*, 1980, т. 32, № 4.
31. **Fujii K. et al.** A new hollow cathode white light laser.— *In: Proc. of the II Int. Conf. on LASERS'79. USA, Orlando, 1980, p. 454.*

32. Вайнер В. В., Иванов И. Г., Михалевский В. С., Сэм М. Ф. Характеристики непрерывного лазера с полым катодом на смеси гелий — кадмий — ртуть. — Квант. электроника, 1983, т. 10, № 4.
33. Csillag L. et al. Near infrared CW laser oscillation in CuII.— Phys. Lett., 1974, vol. 50A, N 1.
34. McNeil J. R. et al. Continuous wave laser oscillations on Cu ion transitions.— Appl. Phys. Lett., 1975, vol. 27, N 11.
35. Gerstenberger D. C. et al. Hollow cathode metal ion lasers.— IEEE J. Quant. Electron., 1980, QE-16, N 8.
36. Jain K. New ion laser transitions in Cu, Ag and Au.— Appl. Phys. Lett., 1979, vol. 34, N 6.
37. Solanky R. et al. Multiwatt operation of Cu II and Ag II hollow cathode lasers.— IEEE J. Quant. Electron., 1980, vol. QE-16, N 12.
38. Jain K. New UV and IR transitions in Au, Cu and Cd hollow cathode lasers.— IEEE J. Quant. Electron., 1980, vol. QE-16, N 4.
39. Jain K. A milliwatt-level CW laser source at 224 nm.— Appl. Phys. Lett., 1980, vol. 36, N 1.
40. Rosza K., Janossy M., Csillag L. CW aluminium ion laser in high voltage hollow anode discharge.— Phys. Lett., 1977, vol. 63A, N 3.
41. Schuebel W. K. Laser action in AlII and HeI in a slot cathode discharge.— Appl. Phys. Lett., 1977, vol. 30, N 10.
42. Jain K. A nikel ion laser.— Appl. Phys. Lett., 1979, vol. 34, N 12.
43. Gnadig K., Fu-Cheng Lin. A hollow cathode tin laser.— Opt. Comm., 1980, vol. 34, N 2.
44. Gnadig K. CW laser oscillation observed on visible and near IR Pb II transitions.— Opt. Comm., 1980, vol. 35, N 3.
45. Warner B. E. et al. 1 watt operation of singly ionised silver and copper lasers.— IEEE J. Quant. Electron., 1978, vol. QE-14, N 8.
46. Eichler H. J., Koch H. Kupfer-ionenlaser.— In: Proc. of the Int. Conf. "LASER-79 Optoelectronics". Guildford: IPC Science and Technology Press, 1979, p. 83—88.
47. Reid R. D. et al. Three phase excitation of a hollow cathode laser.— IEEE J. Quant. Electron., 1980, vol. QE-16, N 1.
48. Piper J. A., Neely D. F. CW laser oscillation on transitions of Cu<sup>+</sup> in He — Cu halide gas discharge.— Appl. Phys. Lett., 1978, vol. 33, N 7.
49. Вайнер В. В., Зинченко С. П., Иванов И. Г., Сэм М. Ф. Характеристики излучения импульсного лазера на парах таллия.— Журн. прикл. спектр., 1979, т. 31, № 5.
50. Вайнер В. В., Зинченко С. П., Иванов И. Г., Сэм М. Ф. Импульсные полные лазеры на парах металлов с полым катодом.— Квант. электроника, 1980, т. 7, № 5.
51. Зинченко С. П., Иванов И. Г., Сэм М. Ф. Оптимальная частота следования импульсов генерации в ионных лазерах с полым катодом.— Квант. электроника, 1980, т. 7, № 8.
52. Gill P., Webb C. E. Electron energy distributions in the negative glow and their relevance to HC lasers.— J. Phys. D., 1977, vol. D10, N 3.
53. Вайнер В. В., Иванов И. Г., Сэм М. Ф. Особенности возбуждения смеси гелий — кадмий в разряде с полым катодом.— ЖТФ, 1979, т. 49, № 8.
54. Vainer V. V., Ivanov I. G., Sem M. F. Electron energy distribution in hollow cathode discharge and rare gas — metal vapor mixture excitation.— In: Proc. of the Int. Conf. "ICPIG-15". USSR, Minsk, 1981, P. 2.
55. Rosza K. CW Cu II laser in a hollow cathode-anode discharge.— Opt. Comm., 1977, vol. 23, N 2.
56. Левитский С. М. Потенциалы пространства и распыление электродов в ВЧ-разряде.— ЖТФ, 1957, т. 27, № 5.
57. Хасилев В. Я., Михалевский В. С., Толмачев Г. Н. О быстрых электронах в поперечном ВЧ-разряде.— Физика плазмы, 1980, т. 6, № 2.
58. Латуш Е. Л. и др. Генерация на ионных переходах металлов при поперечном ВЧ-возбуждении.— Письма ЖЭТФ, 1976, т. 24, № 2.
59. Михалевский В. С., Толмачев Г. Н., Хасилев В. Я. Генерация на ионных переходах меди в высокочастотном разряде.— Журн. прикл. спектр., 1980, т. 32, № 4.
60. Александров А. А., Елагин В. В., Фотиади А. Э. Новые лазерные переходы в He—Cd<sup>+</sup>-лазере с поперечной накачкой.— Письма ЖТФ, 1980, т. 6, № 3.
61. Михалевский В. С., Строкань Г. П., Толмачев Г. Н., Хасилев В. Я. Оптимизация условий возбуждения Cd — He-лазера с ПВЧР.— Квант. электроника, 1980, т. 7, № 7.
62. Михалевский В. С., Толмачев Г. Н., Хасилев В. Я. Генератор радиопульсов для лазеров с поперечным ВЧ-разрядом.— ПТЭ, 1980, № 5.
63. Hernqvist K. G. CW oscillation at 2703 Å in copper ion.— IEEE J. Quant. Electron., 1977, vol. QE-13, N 11.

*Поступила в редакцию 8 февраля 1983 г.;  
окончательный вариант — 20 июня 1983 г.*