

Особенности работы CuBr-лазера с накачкой продольным емкостным разрядом

Ф.А.Губарев, В.Б.Суханов, Г.С.Евтушенко, Д.В.Шиянов

Представлены результаты исследования частотных и энергетических характеристик CuBr-лазера с накачкой емкостным разрядом. Проведен анализ процессов в разрядном контуре лазера с таким типом накачки, в том числе с накачкой без внешней накопительной емкости. Показано, что в зависимости от схемы накачки возбуждение лазерных уровней происходит во время протекания тока заряда или разряда электродных емкостей. Выявлены отличия влияния активной добавки HBr на характеристики разряда и генерации по сравнению со случаем обычного импульсно-периодического сильноточного разряда с внутренними электродами.

Ключевые слова: лазер на парах бромида меди, емкостный разряд, возбуждение, модифицированная кинетика, активные добавки.

1. Введение

Одним из перспективных направлений в исследовании лазеров на парах металлов является поиск новых способов создания активной среды, в частности новых схем накачки. Для накачки лазеров на самоограниченных переходах в парах металлов традиционно применяется сильноточный тлеющий разряд, при этом электроды располагаются внутри газоразрядной трубки (ГРТ) [1, 2]. Для накачки ионных лазеров на парах металлов применяется также поперечный емкостный разряд с внешними электродами [3, 4]. Использование емкостных разрядов позволяет значительно упростить конструкцию ГРТ, а также исключить непосредственный контакт материала электродов с газовой средой. Последнее может быть полезным при работе с активными средами, содержащими химически агрессивные вещества. В частности, использование барьерного и емкостного разрядов позволило существенно увеличить срок службы эксиламп [5]. Преимущества использования емкостного разряда для накачки CuBr – HBr-лазеров отмечаются в работе [6], где впервые сообщается о создании лазера на самоограниченных переходах в парах металлов, возбуждаемого продольным емкостным разрядом.

Целью настоящей работы являлось исследование частотных и энергетических характеристик CuBr-лазеров, в том числе с добавкой HBr, при накачке емкостным разрядом, достижение практически значимых мощностей генерации и КПД, а также исследование с помощью зон-

дов, помещенных в электродные зоны ГРТ, процессов в разрядном контуре лазера и особенностей накачки лазеров на парах галогенидов металлов емкостным разрядом.

2. Техника эксперимента

Схема эксперимента по исследованию энергетических характеристик CuBr-лазеров с емкостной накачкой представлена на рис.1. При исследовании зонды не применялись. Для наглядности стенка ГРТ в электродной области на рис.1 показана двойной линией. Использовались две кварцевые ГРТ с длиной разрядного канала 38 см и внутренними диаметрами 1.0 и 2.7 см. Электроды были изготовлены из танталовой фольги и имели ширину 10 см и диаметр 5 см. Они располагались на внешней стенке трубки на расстоянии 44 см друг от друга. Поскольку электрическая связь плазмы с электродами, расположенными на внешней стенке, имеет емкостный характер и расстояние между электродами существенно больше ширины электродов, мы называем такой разряд продольным емкостным. В отличие от конструкции, применяе-

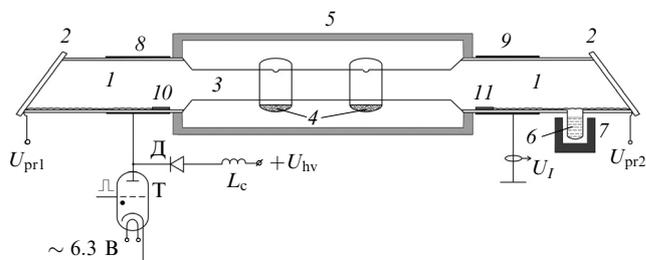


Рис.1. Схема эксперимента:

1 – электродная область ГРТ; 2 – окна; 3 – разрядный канал; 4 – порошок бромида меди; 5 – внешний нагреватель; 6 – генератор HBr; 7 – нагревательный элемент; 8 и 9 – цилиндрические электроды; 10 и 11 – металлические пластины (зонды); Т – таситрон; L_c и Д – зарядные дроссель и диод (схема без внешней накопительной емкости); U_I – сигнал с датчика тока; U_{pr1} и U_{pr2} – напряжения на зондах; U_{hv} – напряжение на выходе высоковольтного выпрямителя.

Ф.А.Губарев. Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, Россия, 634021 Томск, пл. Акад. Зуева, 1; Томский политехнический университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 30

Г.С.Евтушенко. Томский политехнический университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 30; e-mail: ime@tpu.ru

В.Б.Суханов, Д.В.Шиянов. Институт оптики атмосферы им. В.Е.Зуева СО РАН, Россия, 634021 Томск, пл. Акад. Зуева, 1; e-mail: qel@asd.iao.ru

Поступила в редакцию 17 декабря 2008 г., после доработки – 21 августа 2009 г.

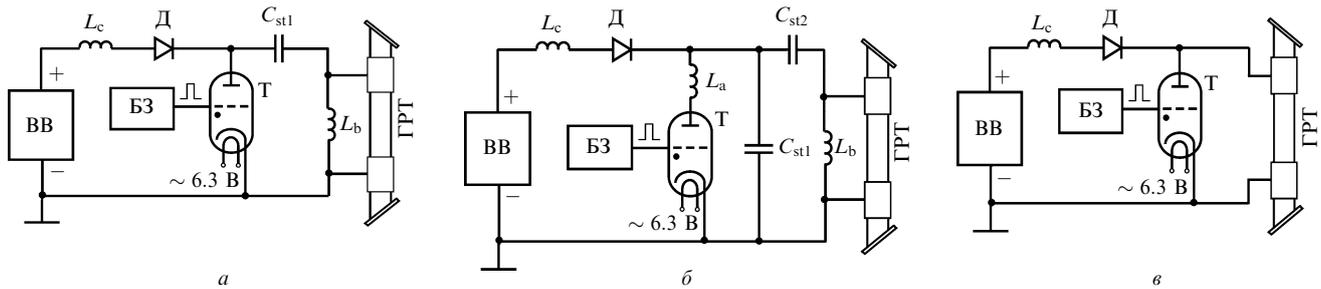


Рис.2. Схемы накачки: схема прямого разряда накопительного конденсатора (прямая схема) (а), схема удвоения напряжения Блюмляйна (б) и схема без внешней накопительной емкости (в):

ВВ – высоковольтный выпрямитель; БЗ – блок запуска; L_c и Д – зарядные дроссель и диод; C_{st1} и C_{st2} – накопительные конденсаторы; L_b – шунтирующая индуктивность; L_a – вспомогательный дроссель; Т – таситрон ТГУ1-1000/25.

мой в работе [6], диаметр трубки в области электродов был больше диаметра разрядного канала, что обеспечивало увеличение энерговклада в разряд. Использовались три схемы накачки: схема прямого разряда накопительного конденсатора (рис.2,а), схема удвоения напряжения Блюмляйна (рис.2,б) и схема без внешней накопительной емкости (рис.2,в). В последней схеме отсутствуют накопительный конденсатор и шунтирующая индуктивность, а роль накопителя энергии выполняет собственная емкость ГРТ (эквивалентная емкость электродов). Это позволяет упростить схему накачки, а также исключить из разрядной цепи лазера контур, образуемый шунтирующей индуктивностью и ГРТ. Оптимальные емкости накопительных конденсаторов C_1 и C_2 экспериментально подбирались такими, чтобы средняя мощность генерации была максимальной, и составляли: $C_1 = 110$ пФ для схемы прямого разряда накопительного конденсатора и $C_1 = 110$ пФ, $C_2 = 235$ пФ для схемы удвоения напряжения Блюмляйна. Из-за малой величины оптимальной рабочей емкости при использовании емкостного разряда потери энергии в схеме накачки могут снижать эффективность работы лазера в большей степени, чем в традиционной схеме. Это особенно актуально при повышенных частотах следования импульсов (ЧСИ), когда потери энергии в коммутаторе (таситрон ТГУ1-1000/25) возрастают [7].

Для поддержания требуемой температуры разрядного канала применялся внешний нагрев активной зоны ГРТ. Температурный режим ГРТ, в частности температура контейнеров с бромидом меди и температурный профиль внутри ГРТ, при используемой конструкции ГРТ определяется как энергией внешнего нагрева, так и выделяющейся в разряде энергией, которая зависит от эффективности схемы накачки. Поэтому для разных схем оптимальная температура нагревателя была разной и находилась в диапазоне 720–770 К. Оптимальное давление буферного газа неона, при котором проводились эксперименты, составляло 30 Тор. В диапазоне давлений буферного газа 10–30 Тор средняя мощность генерации изменяется незначительно. Существенное снижение выходной мощности начиналось при давлении, превышающем 30 Тор. Введение молекул HBr осуществлялось с помощью реверсивного генератора HBr [8]. Давление HBr регулировалось температурой нагревателя в пределах 0.1–0.3 Тор, а его оптимальное значение определялось по максимуму мощности излучения.

Регистрация импульсов напряжения, тока и генерации проводилась с помощью пробника напряжения Tektronix P6015A, датчика тока Pearson Current Monitor

8450 и коаксиального фотоэлемента ФК-22 соответственно. Средняя мощность излучения измерялась измерителем мощности Ophir 20C-SH. Регистрируемые датчиками сигналы подавались на четырехканальный цифровой осциллограф LeCroy WJ-324. Синхронизация осциллографа осуществлялась по току через ГРТ, который начинает течь в момент включения таситрона. Все остальные осциллограммы регистрировались относительно осциллограммы тока. Начало отсчета времени на приведенных ниже рисунках соответствует началу развертки осциллографа, которая устанавливалась таким образом, чтобы достигалась наибольшая информативность регистрируемых осциллограмм.

3. Энергетические характеристики CuBr-лазеров с накачкой емкостным разрядом

Особенностью CuBr-лазера по сравнению с обычным лазером на парах меди является возможность работы при более высоких ЧСИ, как оптимальных, так и максимальных [9, 10]. При этом введение активных добавок, в частности молекул H_2 и HBr, расширяет диапазон рабочих частот. Возможность повышения ЧСИ связана со снижением энерговклада в разряд, что при использовании традиционных схем накачки предполагает уменьшение емкости накопительного конденсатора. При накачке емкостным разрядом энерговклад в разряд ограничен величинами барьерных емкостей, которые составляют $\sim 100 - 200$ пФ для используемых в настоящей работе ГРТ, т.е. имеет место режим пониженных энерговкладов. Таким образом, существуют предпосылки для получения практически значимых мощности генерации и КПД CuBr-лазера с емкостной накачкой в режимах с высокими ЧСИ, особенно при введении активных добавок.

На рис.3 представлены зависимости средней мощности генерации P_{av} (суммарной по двум длинам волн – 510.6 и 578.2 нм) от ЧСИ f для CuBr-лазера с добавкой HBr при использовании разных схем накачки. Видно, что CuBr–HBr-лазеры с емкостной накачкой имеют частотный диапазон работы, аналогичный CuBr– H_2 (HBr)-лазерам с традиционной накачкой [11]. При этом из рассмотренных схем накачки лучшими частотными характеристиками обладает схема без внешней накопительной емкости. После оптимизации условий накачки по давлению паров CuBr и HBr для данной схемы накачки и ГРТ получены более высокие средние мощности генерации (рис.4), чем представленные на рис.3.

В табл.1 приведены средние мощности генерации и КПД, достигнутые при использовании разных схем на-

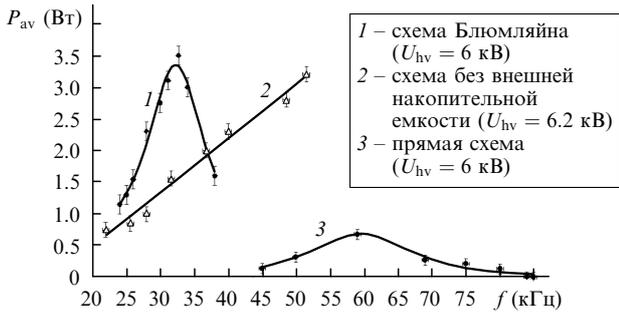


Рис.3. Зависимости средней мощности генерации CuVg – NVg-лазера от ЧСИ при использовании различных схем накачки для ГРТ диаметром 2.7 см; U_{hv} – напряжение на выходе высоковольтного выпрямителя.

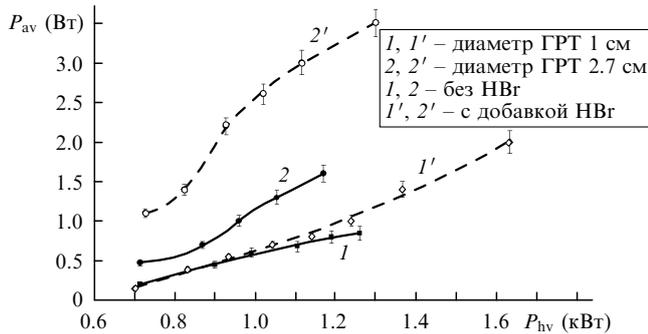


Рис.4. Зависимости средней мощности генерации от мощности, потребляемой от высоковольтного выпрямителя. Схема накачки без внешней накопительной емкости; $f = 37$ кГц, $p_{Ne} = 30$ Тор.

качки. КПД рассчитывался по мощности, потребляемой от высоковольтного выпрямителя. Максимальная средняя мощность генерации 3.7 Вт при КПД 0.27 % получена в ГРТ диаметром 2.7 см с добавкой NVg при использовании схемы удвоения Блюмляйна (1.25 Вт без добавки NVg). Аналогичные результаты достигнуты при использовании схемы без внешней накопительной емкости (3.5 Вт при КПД 0.27 % с добавкой NVg и 1.4 Вт без добавки NVg). В ГРТ диаметром 1.0 см максимальная средняя мощность генерации составила 2 Вт. Таким образом, предложенная схема без внешней накопительной емкости по эффективности не уступает схемам, традиционно применяемым для накачки лазеров на парах металлов. Вместе с тем она является более простой и, на наш взгляд, более предпочтительной, т. к. содержит один контур накачки (если пренебречь паразитными параметрами).

Табл.1. Характеристики CuVg-лазеров с емкостной накачкой.

Диаметр ГРТ (см)	Схема накачки	Наличие NVg	ЧСИ (кГц)	P_g (Вт)	КПД (%)
2.7	прямая	нет	57	1.1	0.09
2.7	прямая	есть	57	0.68	0.06
2.7	Блюмляйна	нет	29	1.25	0.09
2.7	Блюмляйна	есть	29	3.7	0.27
2.7	без C_{st}	нет	37	1.6	0.14
2.7	без C_{st}	есть	37	3.5	0.27
1.0	прямая	нет	57	1.0	0.07
1.0	прямая	есть	57	0.29	0.02
1.0	Блюмляйна	нет	29	1.1	0.085
1.0	Блюмляйна	есть	29	1.32	0.105
1.0	без C_{st}	нет	37	0.85	0.067
1.0	без C_{st}	есть	57	2.0	0.125

В работе [12] отмечается, что в CuVg-лазерах с традиционной накачкой введение малых добавок NVg в активные элементы CuVg-лазера аналогично введению в них добавок водорода и существенно улучшает параметры генерации. При этом наиболее заметно влияние добавок в активные элементы малого объема (увеличение выходной мощности примерно в пять раз) и менее заметно (увеличение примерно в два раза) – в активные элементы большого объема (ГРТ диаметром свыше 2 см). По аналогии с работой [12] мы провели исследование влияния добавки NVg на характеристики CuVg-лазера с емкостной накачкой. Эксперименты показали, что в трубках малого диаметра (~1 см) добавка NVg практически не оказывает положительного влияния на среднюю мощность генерации при мощностях накачки менее 1 кВт, влияние добавки проявляется главным образом в возможности работы при больших мощностях накачки (более 1.3 кВт). Положительное влияние добавки NVg при емкостной накачке проявляется в явном виде в ГРТ с большим диаметром разрядного канала (рис.4). Для ГРТ диаметром 2.7 см увеличение средней мощности генерации при добавке NVg происходит во всем диапазоне мощностей накачки. Тем не менее имеется также некоторое пороговое значение вводимой мощности (~0.9 кВт в условиях нашего эксперимента), при котором влияние добавки становится более существенным.

На рис.5 приведены типичные осциллограммы для схемы без внешней накопительной емкости. В отличие от накачки тлеющим разрядом при добавке NVg практически не происходит уменьшения амплитуды тока, его длительность также меняется незначительно. В то же время существенно увеличивается скорость нарастания тока на начальной стадии развития разряда (в первые 20 нс). Это

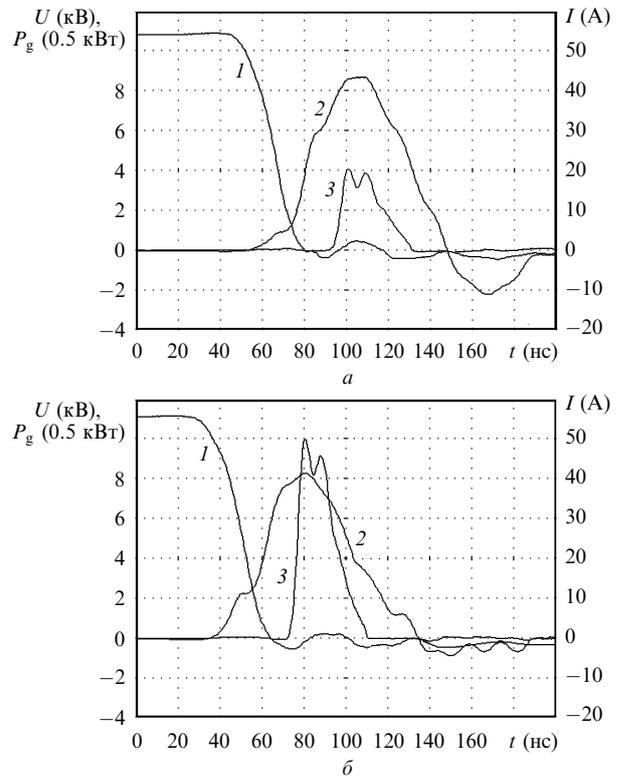


Рис.5. Осциллограммы импульсов напряжения (1) и тока (2) накачки, а также импульса генерации CuVg-лазера (3), полученные при использовании схемы без внешней накопительной емкости: без добавки NVg ($P_{av} = 1.4$ Вт) (а) и с добавкой NVg ($P_{av} = 3.5$ Вт) (б); $U_{hv} = 6$ кВ.

должно приводить к более быстрому нарастанию напряжения на активном сопротивлении плазмы. В результате возрастает эффективность накачки.

Важно отметить еще одну особенность влияния добавки НВг. При введении НВг в активную среду CuVr-лазера в случае традиционной накачки происходит существенное увеличение длительности импульса генерации [12]. В случае накачки емкостным разрядом увеличение энергии в импульсе достигается главным образом за счет увеличения пиковой мощности более чем в два раза (рис.5). Это свойство может быть полезным в приложениях, где предпочтительно использовать импульсы излучения малой длительности с высокой пиковой мощностью.

4. Анализ процессов в разрядном контуре лазера

В схеме без внешней накопительной емкости напряжение на аноде ГРТ равно напряжению на аноде таситрона, т. е. на полном сопротивлении ГРТ согласно эквивалентной схеме (рис.6,а). В схемах с внешней накопительной емкостью мы также регистрируем напряжение на полном сопротивлении ГРТ (рис.6,б). И в том и в другом случае отсутствует возможность измерять напряжения непосредственно на активном сопротивлении плазмы и электродных емкостях. Для решения этой задачи в электродные области ГРТ были помещены металлические (медные) зонды, которые располагались на внутренней стенке ГРТ вблизи активной зоны (рис.1). Такое расположение зондов позволяет регистрировать, по сути, напряжения на внутренних обкладках электродных емкостей C_{e1} и C_{e2} . Поскольку определить структуру приэлектродных слоев и, следовательно, их емкости и активные сопротивления в условиях эксперимента не представляется возможным, то под активным сопротивлением плазмы R_a понимается активное сопротивление всей плазмы внутри ГРТ (эквивалентное сопротивление плазменного столба и приэлектродных слоев). На наш взгляд,

данное допущение не искажает сущности процессов, происходящих в разрядном контуре лазера. Зная напряжения на зондах (U_{pr1} , U_{pr2}) и на аноде ГРТ (U_{gdt}), можно определить напряжения на остальных компонентах эквивалентной схемы (рис.6):

$$\begin{aligned}
 U_{C_{e1}} &= U_{gdt} - U_{pr1}, \\
 U_{C_{e2}} &= U_{pr2}, \\
 U_{R_a} &= \Delta U_{pr} = U_{pr2} - U_{pr1}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

На рис.7 представлены осциллограммы напряжений на зондах и на аноде ГРТ, тока через ГРТ и импульса генерации для схемы без внешней накопительной емкости, а также рассчитанные с использованием формул (1) временные зависимости U_{R_a} и $U_{C_{e1}}$. Проанализируем полученные результаты в случае, когда напряжение на выходе высоковольтного выпрямителя $U_{hv} = 5.8$ кВ. К моменту включения коммутатора электродные емкости C_{e1} и C_{e2} оказываются заряженными до некоторых напряжений $U_{C_{e1}} = +8$ кВ и $U_{C_{e2}} = +2.5$ кВ, т. е. $U_{C_{e1}}$ существенно превышает $U_{C_{e2}}$. При этом $U_{R_a} = 0$, о чем свидетельствует равенство напряжений: $U_{pr2} = U_{pr1}$ (рис.7, кривые 2, 3). В момент включения коммутатора емкость C_{e1} разряжается до напряжения примерно $+2.5$ кВ, т. е. $\Delta U_{C_{e1}} \approx 5.5$ кВ. В то же время C_{e2} перезаряжается до напряжения $-2.5 \dots -3$ кВ, т. е. $\Delta U_{C_{e2}} \approx 5.5$ кВ. Таким образом, в межимпульсный период вблизи электрода в анодной области накапливается отрицательный заряд, а вблизи электрода в катодной области – положительный. В течение импульса тока происходит перераспределение зарядов и одновременно накачка верхних лазерных уровней.

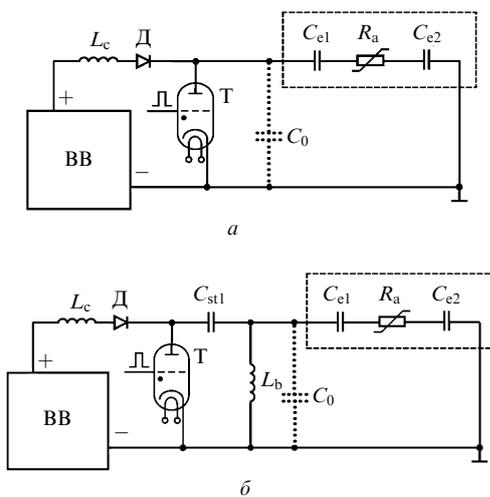


Рис.6. Эквивалентные схемы емкостной накачки лазера: схема без внешней накопительной емкости (а) и схема прямого разряда накопительного конденсатора (б): ВВ – высоковольтный выпрямитель; C_{st1} – накопительная емкость; L_b – шунтирующая индуктивность; L_c и Д – зарядные дроссель и диод; Т – таситрон; C_{e1} и C_{e2} – емкости электродов; R_a – активное сопротивление плазмы; C_0 – паразитная емкость.

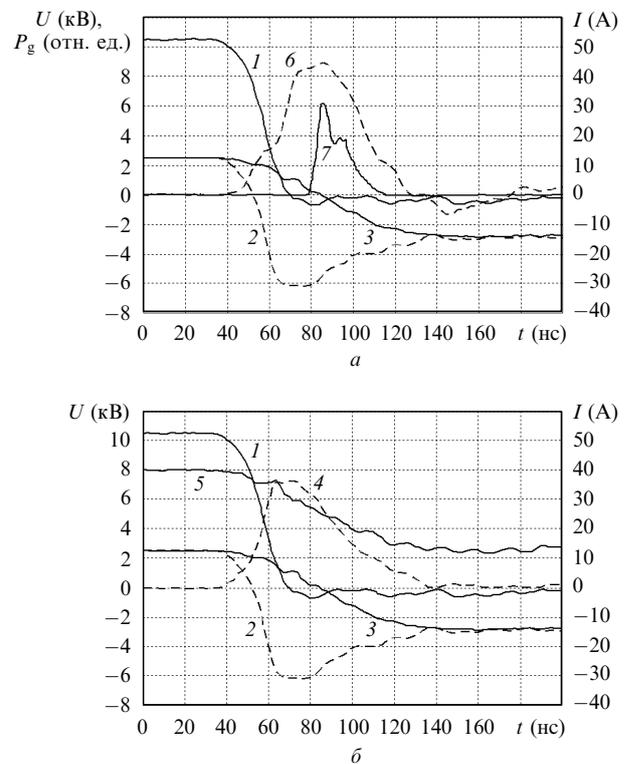


Рис.7. Осциллограммы основных характеристик лазера: U_{gdt} (1), U_{pr1} (2), U_{pr2} (3), U_{R_a} (4), $U_{C_{e1}}$ (5), тока через ГРТ (6) и импульса генерации (7). Схема без внешней накопительной емкости; $U_{hv} = 5.8$ кВ, $f = 37$ кГц, $P_{av} = 1.4$ Вт.

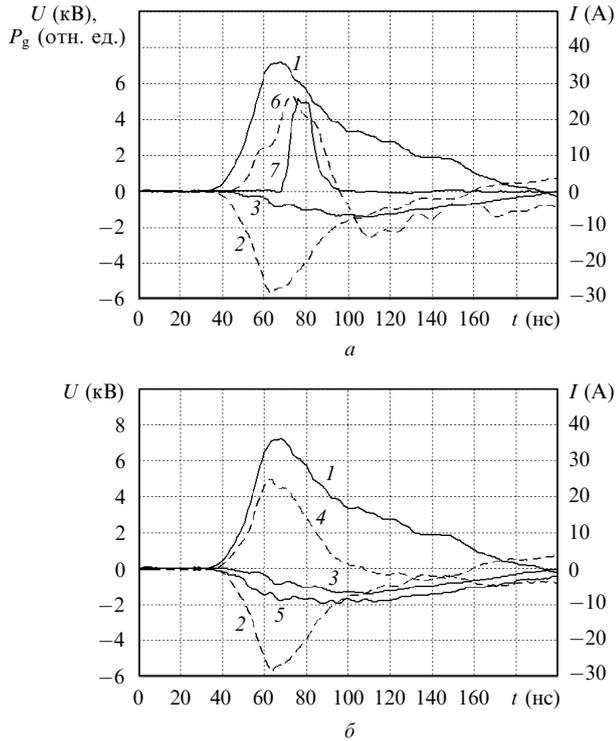


Рис.8. Осциллограммы основных характеристик лазера: U_{gdt} (1), U_{pr1} (2), U_{pr2} (3), U_{R_a} (4), $U_{C_{e1}}$ (5), тока через ГРТ (6) и импульса генерации (7). Схема прямого разряда накопительного конденсатора; $U_{\text{hv}} = 5.8 \text{ кВ}$, $f = 57 \text{ кГц}$, $P_{\text{av}} = 1 \text{ Вт}$.

Осциллограммы напряжений на зондах и на аноде ГРТ, тока через ГРТ и импульса генерации для схемы прямого разряда накопительного конденсатора представлены на рис.8. Там же показаны рассчитанные временные зависимости U_{R_a} и $U_{C_{e1}}$. К концу межимпульсного периода напряжение на электродных емкостях C_{e1} и C_{e2} равно нулю, т.к. индуктивность L_b шунтирует ГРТ во время заряда накопительной емкости C_{st1} (рис.6,б). В момент включения таситрона начинается заряд электродных емкостей (рис.8,б, кривые 3, 5), который продолжается до момента достижения равенства напряжений: $U_{C_{e1}} + U_{C_{e2}} = U_{\text{gdt}}$. Под действием тока, протекающего через активную среду в этот промежуток времени, создается разность потенциалов на активном сопротивлении плазмы (рис.8,б, кривая 4) и осуществляется накачка верхних лазерных уровней. Таким образом, генерация происходит во время протекания тока заряда электродных емкостей.

Как следует из рис.7 и 8, в схеме без внешней накопительной емкости по сравнению с прямой схемой при одинаковой потребляемой мощности достигается большая амплитуда тока разряда и, следовательно, большее напряжение на плазме. Это способствует более эффективному вводу энергии в разряд. Наличие шунтирующей индуктивности L_b в прямой схеме и схеме Блюмляйна приводит к колебаниям тока в межимпульсный период и соответственно к колебаниям напряжений на зондах и на активном сопротивлении плазмы (рис.9,а). С одной стороны, это вызывает дополнительные потери энергии в разрядном контуре, а с другой – дополнительное заселение метастабильных состояний атомов меди. В результате при использовании прямой схемы накачки не достигается пороговый энерговклад в разряд, необходимый для компенсации потерь энергии на возбуждение моле-

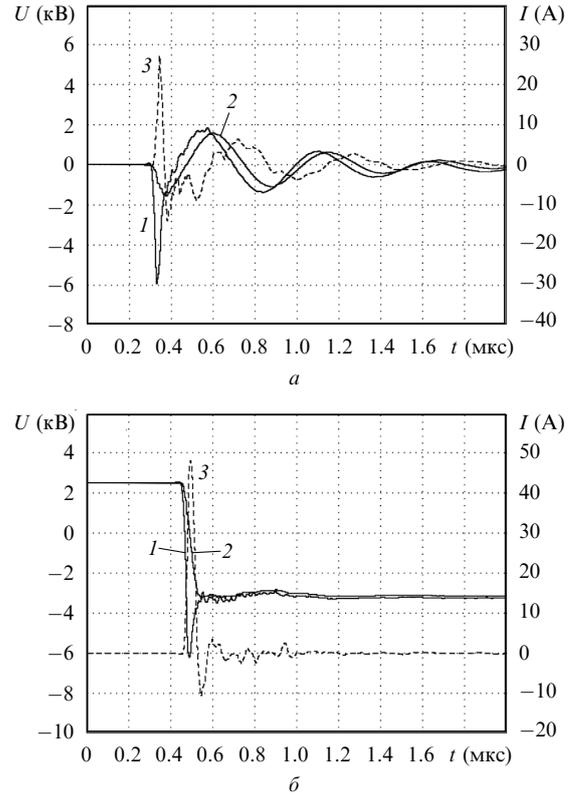


Рис.9. Осциллограммы напряжений на зондах U_{pr1} (1), U_{pr2} (2) и тока через ГРТ (3) для прямой схемы накачки ($U_{\text{hv}} = 5.8 \text{ кВ}$, $P_{\text{hv}} = 1.1 \text{ кВт}$) (а) и схемы без внешней накопительной емкости ($U_{\text{hv}} = 5.8 \text{ кВ}$, $P_{\text{hv}} = 0.9 \text{ кВт}$) (б).

кул NVg, поэтому введение добавки NVg приводит к снижению средней мощности генерации для ГРТ диаметром как 1 см, так и 2 см (см. табл.1).

Колебательный характер временных зависимостей тока разряда и напряжения на ГРТ в межимпульсный период при использовании прямой схемы отмечался и в работе [6]. Эксперименты с различными шунтирующими индуктивностями показали, что частота и скорость затухания этих колебаний определяются параметрами контура, образованного ГРТ и шунтирующей индуктивностью. Величина шунтирующей индуктивности в настоящих экспериментах варьировалась от 0.03 до 0.3 мГн, при этом средняя мощность генерации практически не менялась. В схеме без внешней накопительной емкости, несмотря на то что амплитуда импульса тока накачки существенно больше, чем в прямой схеме, длительный колебательный процесс после импульса накачки отсутствует (рис.9,б). Это должно снизить нежелательное заселение метастабильных уровней в межимпульсный период. Снижение концентрации электронов в этот период в схеме без внешней накопительной емкости также будет более быстрым, чем в прямой схеме. Введение добавки NVg, как и при традиционной накачке, приводит к улучшению электрического согласования схемы накачки и ГРТ, о чем свидетельствует уменьшение амплитуды отрицательного выброса тока после импульса накачки (рис.5).

5. Заключение

При работе с CuVg-лазерами с емкостной накачкой относительно большая величина электродных емкостей

(сравнимая с накопительной емкостью в схеме накачки) позволяет исключить из схемы накопительный конденсатор и шунтирующую индуктивность; роль накопителя энергии при этом выполняет собственная емкость ГРТ, т. е. эквивалентная емкость электродов. Проведенные исследования показали, что схема без внешней накопительной емкости больше всего подходит для накачки CuVg-лазера с внешними электродами. Она является наиболее простой, а по эффективности существенно превосходит широко распространенную на практике схему прямого разряда накопительного конденсатора. Схема без внешней накопительной емкости имеет преимущество и по отношению к схеме Блюмляйна, которое заключается в возможности работы при более высоких ЧСИ.

Введение добавки NVg в активную среду CuVg-лазеров с накачкой емкостным разрядом позволяет в два и более раз повысить среднюю мощность генерации и КПД, однако в отличие от обычного импульсно-периодического сильноточного разряда с внутренними электродами при емкостной накачке наибольший эффект достигается в трубках с большим диаметром разрядного канала. В трубках малого диаметра наличие добавки NVg не приводит к существенному увеличению мощности генерации в рабочем диапазоне мощностей накачки. Влияние добавки проявляется только при повышенной вводимой мощности. Другим отличием является то, что в случае накачки емкостным разрядом увеличение энергии в импульсе генерации происходит за счет увеличения его амплитуды, а не длительности, как при традиционной накачке.

В лазерах на самоограниченных переходах в парах металлов с емкостной накачкой возбуждение верхних лазерных уровней происходит во время заряда электродных емкостей в схемах с внешней накопительной емко-

стью и во время разряда электродных емкостей в схеме без внешней накопительной емкости. Для получения наибольшей эффективности возбуждения лазерных уровней при накачке емкостным разрядом необходимо обеспечить наибольшую скорость заряда (разряда) электродных емкостей.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (проект РНП.2.1.1.5450).

1. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. *Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов* (М.: Научная книга, 1998).
2. Little С.Е. *Metal Vapor Lasers. Physics, Engineering & Applications* (Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd., 1998).
3. Иванов И.Г., Латус Е.Л., Сэм М.Ф. *Ионные лазеры на парах металлов* (М.: Энергоатомиздат, 1990).
4. Grozeva M., Kocik M., Mentel J., Mizeraczyk J., Petrov T., Telbizov P., Teuner D., Sabotinov N., Schulze J. *Eur. Phys. J. D*, **8**, 277 (2000).
5. Ломаев М.И., Скакун В.С., Тарасенко В.Ф. и др. *УФН*, **173**, 201 (2003).
6. Суханов В.Б., Федоров В.Ф., Губарев Ф.А., Троицкий В.О., Евтушенко Г.С. *Квантовая электроника*, **37**, 603 (2007).
7. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. *Квантовая электроника*, **32**, 680 (2002).
8. Андриенко О.С., Суханов В.Б., Троицкий В.О., Шестаков Д.Ю., Шиянов Д.В. Патент РФ № 2295811. Приоритет от 09.11.04.
9. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. *Квантовая электроника*, **28**, 220 (1999).
10. Губарев Ф.А., Федоров В.Ф., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Заикин С.С. *Изв. Томского политехнического ун-та*, **312** (2), 106 (2008).
11. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Бочков В.Д., Кудинов В.Н. *Изв. Томского политехнического ун-та*, **307** (3), 74 (2004).
12. Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Андриенко О.С. *Квантовая электроника*, **34**, 625 (2004).