

## CuBr-лазер с пониженным энерговыделением в разряд

Г.С.Евтушенко\*, Г.Г.Петраш\*\*, В.Б.Суханов\*, В.Ф.Федоров\*, Д.В.Шиянов\*

*Исследована работа CuBr-лазера с малым объемом активной среды при пониженных энерговыделах в разряд. Показано, что при кратковременном переключении коммутатора на меньшую рабочую емкость удается снизить вводимую в разряд мощность в 2.3 раза (относительно типичного режима работы) без снижения мощности генерации. Путем организации дополнительного «диссоциирующего» импульса реализован стационарный (во времени) режим работы лазера, при котором энергия импульса накачки уменьшена в 10 раз без потерь в выходной мощности.*

**Ключевые слова:** лазер на парах металлов, энерговыделен в разряд, частота повторения импульсов, бромид меди, генерация.

### Введение

Типичным режимом работы современных импульсно-периодических лазеров на парах металлов (ЛПМ) является «саморазогрев», при котором нагрев рабочего объема (и металла) осуществляется теми же импульсами накачки. В лазерах на галогенидах металлов при частоте повторения импульсов единицы-десятки килогерц каждый импульс выполняет три функции: диссоциирует молекулы (в частности, бромида меди), нагревает рабочий объем и осуществляет возбуждение.

Оптимизировать эти лазеры по нескольким параметрам одновременно трудно, хотя очевидно, что для увеличения эффективности их работы необходимо либо увеличивать выходную мощность, либо уменьшать вводимую (второй путь наиболее подходит для создания компактных эффективных ЛПМ). Так, в работе [1] в случае лазера на парах меди показано, что быстрое ограничение тока разряда на стадии его нарастания позволяет значительно снизить вводимую в разряд мощность без снижения выходной мощности лазера. При этом «физический» КПД лазера (по накачке) может достигать 9%. Правда, такой режим не является стационарным, т. к. вводимой в разряд мощности оказывается недостаточно для обеспечения требуемой концентрации паров меди.

Переход к высоким частотам повторения импульсов накачки ЛПМ также предполагает снижение энерговыдела в каждом отдельном импульсе, чтобы средняя вводимая мощность в разряд была такой же, как и на низких частотах. Вместе с тем анализ наших и литературных данных по характеристикам генерации лазеров на парах чистых металлов, работающих на высоких частотах следования импульсов (около 100 кГц), показывает, что ВЧ режим реализуется в активных элементах малых диаметров (менее 1 см) и объемов (менее 10 см<sup>3</sup>); при этом вво-

димая в разряд удельная мощность (на единицу объема)  $W_{sp} = 50 - 100$  Вт/см<sup>3</sup>, а КПД не превышает десятых долей процента [2–4]. В то же время в трубках среднего и большого диаметров (более 2 см) при частотах следования импульсов накачки 5–15 кГц КПД лазеров на парах металлов и их соединений достигает 1–3%; при этом  $W_{sp} = 3 - 10$  Вт/см<sup>3</sup> [5–8].

Для лазеров на галогенидах паров металлов требуются более низкие рабочие температуры, чем для лазеров на чистых парах. Это позволяет снизить вводимую в разряд мощность при условии, что она будет достаточной для эффективной диссоциации молекул и накачки рабочих уровней. Используя этот факт, нам удалось реализовать устойчивую генерацию CuBr-лазера при высоких частотах следования импульсов (вплоть до 300 кГц) при  $W_{sp} = 10$  Вт/см<sup>3</sup>. Максимальная частота следования импульсов генерации была получена в газоразрядной трубке (ГРТ) диаметром 1.4 см. С уменьшением диаметра разрядного канала максимальная частота повторения и эффективность лазера снижались. Мы связываем это с резким нарастанием энерговыдела в разряд в узких трубках, что может приводить к удалению условий разряда от оптимальных для генерации, в частности к избыточной ионизации рабочих атомов меди [9].

Естественно было предположить, что дальнейшее повышение частоты следования импульсов генерации ЛПМ малого объема (и их эффективности) связано со снижением  $W_{sp}$ . С этой целью в настоящей работе исследуется возможность работы CuBr-лазера с диаметром разрядного канала менее 1 см при пониженных энерговыделах в разряд.

Под пониженными энерговыделами мы понимаем такие, при которых негативные последствия ввода энергии в разряд (перегрев, излишняя ионизация) максимально ослабляются, а эффективность возбуждения верхних рабочих уровней не ухудшается. Понятие «пониженный энерговыдел» имеет смысл, когда мы говорим об импульсно-периодической накачке активных элементов малого объема короткими импульсами. В трубках же большого диаметра малые энерговыделы (в единицу объема активной среды), как отмечено выше, уже имеют место.

\*Институт оптики атмосферы СО РАН, Россия, 634055 Томск, Академический просп., 1

\*\*Физический институт РАН им. П.Н. Лебедева, Россия, 117924 Москва, Ленинский просп., 53

## 1. Результаты экспериментов и их анализ

Основная часть экспериментов с CuBr-лазером проведена в двух ГРТ: № 1 (диаметр 6 мм, длина активной зоны 20 см), и № 2 (8 мм и 20 см). ГТР выполнены из кварца, и их конструкции отличаются от описанных в [9] лишь тем, что для исследования работы при пониженных энерговыкладах они снабжены дополнительными теплоизоляторами. Для трубки № 1 изготовлен внешний теплоизолятор, а для трубки № 2 – внутренний.

При анализе результатов использовались данные, полученные ранее с Cu-лазером малого объема [1]. Буферным газом служил спектрально-чистый неон при давлении  $p_{Ne} = 30 - 100$  мм рт. ст. Перед загрузкой бромид меди ГРТ предварительно обезгаживалась в атмосфере аргона, а затем неона. После загрузки CuBr трубка «тренировалась» до получения стабильной мощности генерации. Кстати, в процессе «тренировки» средняя мощность генерации возрастала, достигала максимума и затем несколько спадала, выходя на стационарное значение. Такое поведение мы связываем с откачкой большей части водорода, всегда присутствующего в качестве малой неконтролируемой примеси.

Возбуждение разряда осуществлялось по схемам, показанным на рис.1. На рис.1,а показана типичная схема прямого разряда емкости через ГРТ и коммутатор (тиратрон на частотах до 20 кГц и таситрон на более высоких частотах, в настоящей работе – до 100 кГц); в нормальном состоянии ключ  $K_3$  замкнут. В качестве ключа  $K_3$  использовано высоковольтное вакуумное реле ВВ-20. Размыкание ключа  $K_3$  позволяет оперативно переключать разряд на меньшую рабочую емкость и обеспечивает работу в режиме пониженных энерговыкладов.

Схема на рис.1,б призвана наряду с возбуждающим (и частично диссоциирующим) импульсом реализовать дополнительный более мощный импульс, в основном обеспечивающий диссоциацию молекул бромида меди и разогрев рабочего объема ГРТ. Схема рис.1,б позволяет также реализовать обычный поочередный запуск коммутаторов-тиратронов, цель которого – повышение рабочей частоты следования импульсов накачки до 50 кГц без перехода на таситронный генератор.

На рис.2 представлены импульсы тока, напряжения и генерации CuBr-лазера в обычном режиме работы и в режиме пониженного энерговыклада при частоте повторения импульсов накачки 50 кГц в ГРТ с внутренним теплоизолятором (ГРТ № 2). Режим пониженного энерговыклада не является стационарным, при нем ГРТ медленно остывает и мощность генерации падает. Однако важнее

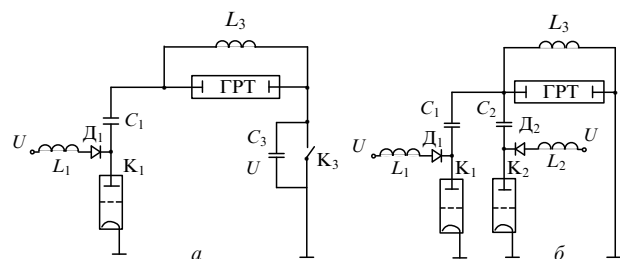


Рис.1. Схемы экспериментальной установки в обычном режиме (ключ  $K_3$  замкнут) и с пониженным энерговыделением (ключ  $K_3$  разомкнут) (а) и при накачке сдвоенными импульсами (б):  $L_1, D_1, L_2, D_2$  – зарядные индуктивности и диоды;  $L_3$  – шунтирующая индуктивность;  $C_1, C_2$  – рабочие емкости;  $C_3$  – добавочная емкость;  $K_1, K_2$  – коммутаторы;  $K_3$  – ключ.

3 Квантовая электроника, т.30, № 5

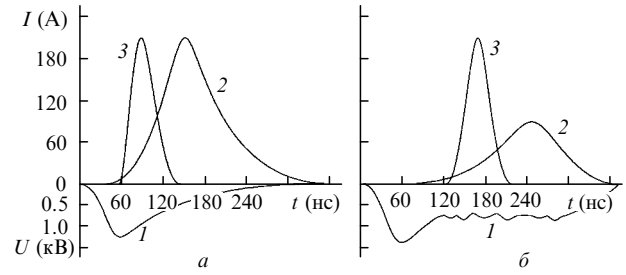


Рис.2. Импульсы напряжения (1), тока (2) и генерации (3) в обычном режиме накачки CuBr-лазера (а) и в режиме пониженного энерговыклада (б) для ГРТ № 2 ( $f = 50$  кГц,  $C_1 = 3.0$  нФ,  $C_3 = 0.47$  нФ,  $p_{Ne} = 30$  мм рт. ст.) при вводимой в ГРТ мощности 252 (а) и 112 Вт (б).

другое: в первые моменты времени после переключения на меньшую рабочую емкость мощность генерации остается прежней при уменьшении вкачиваемой мощности более чем в 2 раза. Дальнейшее снижение энерговыклада в разряд приводит к срыву генерации. Мы связываем это с недостаточной степенью диссоциации молекул бромида меди и, следовательно, с малой концентрацией рабочих атомов перед очередным импульсом накачки.

На рис.3 схематично представлены энерговыклады в разряд, реализуемые в лазере на парах меди и бромида меди аналогичного объема. Режим пониженных (на порядок меньше типичных) энерговыкладов описан в [1]. Аналогичная ситуация имеет место для бромидного лазера, с той лишь разницей, что необходимая концентрация бромида меди задается внешним нагревом контейнеров с галогенидом меди. При значительном снижении энерговыклада в Cu-лазере (рис.3,а (2)) требуемая для эффективной генерации концентрация атомов меди, которая задается температурой внутренней стенки ГРТ, будет обеспечена (непродолжительное время) предшествующим саморазогревом, а оставшейся вводимой в разряд удельной мощности (единицы Вт/см<sup>3</sup>) оказывается вполне достаточно для накачки рабочих состояний [1].

Несколько иная ситуация имеет место в случае CuBr-лазера. На рис.3,б (2) схематично представлен минимальный энерговыклад, который обеспечивает требуемую для генерации концентрацию атомов меди посредством диссоциации молекул бромида меди (при меньших энерговыкладах генерация отсутствует).

Оценим энергию (и мощность), необходимую для диссоциации  $10^{15}$  см<sup>-3</sup> молекул бромида меди (полагаем, что  $N_{0Cu} = 10^{15}$  см<sup>-3</sup> – типичная для генерации плотность числа атомов меди в основном состоянии). Удельная энергия диссоциации  $D_{0CuBr} = 78$  ккал/моль [10], энергия, требуемая для диссоциации одной молекулы,

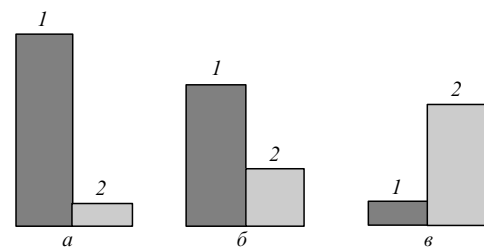


Рис.3. Схематическое представление энерговыклада, вводимого в разряд, для Cu-лазера (а) и CuBr-лазера (б) в обычном режиме (для Cu-лазера – саморазогрев) (1), в режиме пониженного энерговыклада (2), а также в режиме накачки CuBr-лазера сдвоенными импульсами (1 – энерговыклад импульса возбуждения, 2 – энерговыклад «диссоциирующего» импульса) (в).

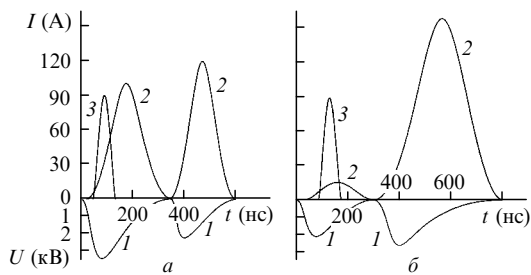


Рис.4. Импульсы напряжения (1), тока (2) и генерации (3) для CuBr-лазера (ГРТ № 2) при накачке сдвоенными импульсами ( $p_{\text{Ne}} = 30$  мм рт. ст.) в режиме, аналогичном режиму саморазогрева при  $C_1 = C_2 = 1.5$  нФ,  $W = 300$  Вт (а), и в режиме с пониженным энергозатратом (относительно возбуждающего импульса) при  $W = 300$  Вт,  $W_1 = 36$  Вт,  $C_1 = 0.22$  нФ,  $C_2 = 3.0$  нФ (б).

$D_{01} = 5 \cdot 10^{-19}$  Дж = 3.2 эВ, а для диссоциации  $10^{15}$  см $^{-3}$  молекул –  $D(N_{\text{CuBr}} = 10^{15}$  см $^{-3}$ ) =  $5 \cdot 10^{-4}$  Дж/см $^3$ . Если же полагать, что основную массу молекул составляют молекулы  $\text{Cu}_3\text{Br}_3$  [11], то энергия, необходимая для создания  $10^{15}$  атомов меди в единице объема, составит  $8 \cdot 10^{-4}$  Дж/см $^3$ . Из приведенных оценок следует, что вводимый в разряд энергозатрат должен превышать некий пороговый энергозатрат ( $5 - 8$ )  $\cdot 10^{-4}$  Дж/см $^3$ , если не принимать в расчет накопление атомов меди от импульса к импульсу.

Проанализировав полученные данные, мы попытались обеспечить требуемую степень диссоциации молекул CuBr с помощью дополнительного «диссоциирующего» импульса (рис.4,б). Это удалось сделать, поочередно разряжая на разрядный промежуток две рабочие емкости с помощью двух параллельных, включаемых с некоторой временной задержкой коммутаторов-тиратронов (см. рис.1,б). На рис.4,б первый импульс – «импульс накачки» (естественно, и частично диссоциирующий), второй – «диссоциирующий» импульс, т. е. обеспечивающий (в основном) требуемую степень диссоциации. Для трубки № 2 вводимая в первом импульсе мощность  $W_1 = 36$  Вт ( $W_{1\text{sp}} = 3.6$  Вт/см $^3$ ). Соответственно энергозатрат, обеспечиваемый возбуждающим импульсом, составляет  $3.6 \cdot 10^{-4}$  Дж/см $^3$ .

Низкая рабочая частота (10 кГц) в этом эксперименте выбрана сознательно из следующих соображений. Чтобы не происходило накопления атомов Cu от одного «диссоциирующего» импульса к другому, время релаксации концентрации атомов меди  $\tau_r$  должно быть меньше времени межимпульсного периода, т. е. меньше  $10^{-4}$  с. Согласно оценкам, представленным в [11], указанное время  $\tau_r$ , обусловленное диффузией к стенке и рекомбинацией, для газоразрядных трубок диаметром менее 1 см, давлений буферного газа неона в десятки мм рт. ст. и оптимальных температур контейнеров с бромидом меди составляет менее  $10^{-4}$  с. Экспериментально же измеренное в работе [12]  $\tau_r$  для близких к нашим экспериментальным условиям составило  $5 \cdot 10^{-5}$  с в предположении, что уход атомов меди из плазмы разряда в межимпульсный период происходит вследствие рекомбинации по схеме



При этом для представленных на рис. 4 данных энергозатрат в разряд, обеспечиваемый «диссоциирующим» импульсом, составляет  $2.6 \cdot 10^{-3}$  Дж/см $^3$ , что с запасом превышает оцененный нами выше пороговый энергозатрат. Такая схема позволяет снизить энергозатрат в пер-

вый (накачивающий) импульс в 10 раз без потери выходной мощности излучения, что означает увеличение физического КПД (КПД по накачке). Общая же вводимая в разряд в такой двухимпульсной схеме мощность для ГРТ № 2 составляет 300 Вт, что обеспечивает стационарную (во времени) импульсно-периодическую генерацию. Модельное представление такого режима представлено на рис.3,в.

Следует отметить, что наши рассуждения верны для времен жизни атомов меди в рабочем объеме (относительно рекомбинации и диффузии к стенке)  $\tau_r \leq 10^{-4}$  с, т. е. в ГРТ малых диаметров (менее 1 см). В трубках большего диаметра эти времена могут быть существенно выше, и тогда при частотах повторения импульсов накачки более 10 кГц возможно достижение требуемых значений концентраций атомов меди в основном состоянии (за счет накопления) при энергозатратах за импульс менее  $10^{-4}$  Дж/см $^3$ .

## Заключение

Таким образом, в CuBr-лазере малого объема может быть реализован режим пониженных энергозатрат. При организации дополнительного («диссоциирующего») импульса реализуется стационарный импульсно-периодический режим работы лазера с высокой эффективностью накачки.

Авторы выражают искреннюю признательность В.М.Климкину за полезные дискуссии при подготовке данной публикации. Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 99-02-17016).

1. Солдатов А.Н., Суханов В.Б., Федоров В.Ф., Юдин Н.А. *Оптика атмосферы и океана*, **8**, 1626 (1995).
2. Солдатов А.Н., Федоров В.Ф. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **26**, № 9, 80 (1983).
3. Евтушенко Г.С., Полунин Ю.П., Федоров В.Ф. *ЖЛС*, **46**, 1009 (1987).
4. Воробьев В.В., Калинин С.В., Климовский И.И. и др. *Квантовая электроника*, **18**, 1178 (1991).
5. Chang J.J., Warner B.E., Boley C.D., Dragon E.P. *Pulsed metal vapour lasers (NATO ASI Series, 1. Disarmament Technologies)* (Dordrecht/Boston/London, Kluwer Academic Publishers, 1996, v.5, p.101).
6. Jones D.R., Maitland A., Little C.E. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 2305 (1994).
7. Astajov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., et al. *IEEE, J. Quantum Electron.*, **33**, 705 (1997).
8. Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Доманов М.С. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **42**, № 8, 68 (1999).
9. Евтушенко Г.С., Петраш Г.Г., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. *Квантовая электроника*, **28**, 220 (1999).
10. *Энергия разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону* (М., Наука, 1974).
11. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. *Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов* (М., РФФИ, 1998).
12. Liu C.S., Feldman D.W., Weaver A. *Proc. of 'Laser's 79'* (Orlando, USA, 1980, 335).

G.S.Evtushenko, G.G.Petrash, V.B.Sukhanov, V.F.Fedorov, D.V.Shiyanov. **CuBr laser with a reduced energy input into a discharge.**

A study was made of the operation of a CuBr laser with a small volume of the active medium for a reduced energy input into a discharge. It is shown that switching the commutator to a smaller operating capacitor for a short time permits a 2.3-fold reduction (relative to the typical operating mode) of the power supplied to the discharge without sacrifice in the output laser power. By the application of an additional dissociating pulse, a stationary mode of laser operation was realised, whereby the pump pulse energy was lowered by a factor of 10 without loss in the output power.