ГСГГ:Cr, Nd и при частоте 100 Гц для кристаллов ИАГ:Nd, АИ:Nd, приведены в табл. 2. В последнем столбце таблицы указаны соответствующие средние мощности накачки в киловаттах.

1. V. A. Smirnov, I. A. Shcherbakov. *IEEE J.* **QE-24,** 949 (1988).
2. А. М. Прохоров, И. А. Щербаков. *Изв. АН СССР. Сер. физич.,* **51,** 1341 (1987).
3. А. А. Данилов, А. Л. Денисов, Е. В. Жариков, А. И. Загуменный, Г. Б. Лутц, М. Ю. Никольский, В. Б. Цветков, И. А. Щербаков. Препринт ИОФАН, М., 1988, № 41.

Институт общей физики
АН СССР, Москва

Поступило в редакцию
19 апреля 1989 г.

V. G. Ostroumov, I. A. Shcherbakov. **A GSGG:Cr, Nd Laser With the High Specific Output Energy.**

Various laser materials such as GSGG:Cr, Nd:GSAG:Cr, Nd:$YAlO_3$:Nd, YAG:Nd have been compared from the standpoint of the value of the specific output energy per unit volume of the working medium. The best result amounted to 150 W/cm$^3$ and was achieved for the GSGG:Cr, Nd active element the size of which was $\varnothing 3 \times 50$ mm.

«Квантовая электроника»,**16,** № 12 (1989) УДК 621.373.826.038.823

А. С. Камруков, Н. П. Козлов, Ю. С. Протасов, Е. Ю. Ушмаров

# УФ $Br_2$-ЛАЗЕР С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ

*Сообщается о полученной впервые лазерной генерации на молекулярном броме ($D'^3\Pi_{2g} \rightarrow A'^3\Pi_{2u}$, $\lambda_г \sim 292$ нм) при оптической накачке. Возбуждение осуществлялось тепловым ВУФ излучением плазмодинамических разрядов магнитоплазменных компрессоров, формируемых непосредственно в активной среде лазера. В рабочей смеси $Br_2$:Ar ≈ 1:450 при давлении ~4 атм получена энергия генерации ~1,1 Дж в лазерном импульсе длительностью ~5 мкс. В идентичных (по геометрии и энергетике возбуждения) экспериментальных условиях сравниваются выходные параметры $Br_2$-, $I_2$-, и XeF (B—X)-лазеров с оптической накачкой.*

**1.** Гомоядерные молекулы галогенов являются перспективными для лазерной генерации в УФ и ВУФ областях спектра ($\lambda_г = 157$—$342$ нм) [1]. В настоящее время запущены лазеры на молекулах всех устойчивых галогенов, причем преимущественно с использованием электронных методов возбуждения. Исключением является $I_2$-лазер, в котором наряду с электронной осуществлена оптическая накачка узкополосным (лазерным) излучением [2] и широкополосным (тепловым) излучением электроразрядной плазмы [3]. В последнем случае получены рекордные для лазеров рассматриваемого типа энергии ($E_г \approx 27$ Дж) и длительности ($\tau_г \approx 13$ мкс) стимулированного излучения и показана возможность достижения достаточно высоких КПД генерации ($\eta_л \approx 1$ %) [4].

В настоящей работе сообщается о полученной впервые лазерной генерации на молекулярном броме при оптической накачке. Ранее генерация в УФ области на молекуле $Br_2$ была получена при электронно-пучковом ($E_г \leqslant 20$ мДж, $\tau_г \leqslant 1$ мкс) [5] и электроразрядном ($E_г \sim 10$ мкДж, $\tau_г \sim 80$ нс) [6] способах возбуждения.

Возможный механизм фотовозбуждения и генерации паров брома в присутствии буферного газа состоит в следующем [1, 7]. Поглощение излучения накачки в ВУФ области спектра ($\Delta\lambda_{нак} \approx 150$—$170$ нм) приводит к возбуждению молекулы $Br_2$ из основного ковалентного состояния $X^1\Sigma_g^+$ в кулоновское $D^1\Sigma_g^+$. При столкновениях с частицами буферного газа возбужденные молекулы брома релаксируют в нижнее ионное состояние $D'^3\Pi_{2g}$ и излучают

в области $\lambda_г \approx 292$ нм на разрешенном связанно-связанном электронном переходе $D'^3\Pi_{2g} \rightarrow A'^3\Pi_{2u}$ (лазерный переход). Быстрое опустошение нижнего лазерного уровня (слабосвязанное состояние) происходит в результате электронно-колебательной релаксации и, возможно, диссоциации при столкновениях с атомами буферного газа.

**2.** В экспериментах оптическая накачка паров $Br_2$ осуществлялась тепловым ВУФ излучением плазмодинамических разрядов магнитоплазменных компрессоров (МПК), формируемых непосредственно в активной среде лазера. В разрядах такого типа, в отличие от излучающих разрядов с омическим тепловыделением [3, 4], используются динамические методы нагрева плазмы до высоких температур ($T_{пл} \approx 50-100$ кК), основанные на ударно-волновой термализации направленной кинетической энергии высокоскоростных ($v_0 \approx \approx 40$—$60$ км/с) плазменных потоков при их торможении в плотном газе [8]. Плазменные потоки с высоким удельным энергосодержанием $\varepsilon \sim v_0^2/2 \sim \sim 1$ МДж/г формируются в МПК электромагнитными силами, возникающими при взаимодействии разрядных токов с собственными магнитными полями. Физические особенности генерации высокоинтенсивного теплового излучения в таких разрядах и результаты исследования их спектрально-яркостных и энергетических характеристик подробно рассмотрены в [8, 9].

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Лазерная кювета представляла собой цилиндрическую камеру из нержавеющей стали с внутренним диаметром 15 и длиной 170 см, на торцевых фланцах которой с помощью сильфонных развязок устанавливались юстируемые выходные кварцевые окна с отражающими покрытиями. В опытах использовался десятиканальный МПК-разряд, обеспечивающий возбуждение активной среды на длине $\sim 75$ см. МПК с коаксиально-цилиндрической геометрией ускоряющих электродов (диаметр наружного электрода 25 мм, внутреннего — 8 мм, материал электродов — нержавеющая сталь, разделительного изолятора — фторопласт) попарно запитывались от 5 независимых емкостных накопителей энергии ($U_0 \approx 30$ кВ), коммутируемых на нагрузку с помощью управляемых воздушных разрядников тригатронного типа.

Разрядный ток (рис. 2, *б*) имел форму затухающей синусоиды с полупериодом колебаний $\sim 6{,}5$ мкс. Согласно проведенным измерениям суммарная электрическая энергия, вкладываемая в плазму в первом полупериоде разряда, составляла $\sim 6$ кДж при удельной электрической нагрузке на каждый МПК $\sim 40$ МВт/см$^2$. Максимальная яркостная температура $T_{ярк}$ разряда в аргоне при давлении $p_{Ar} = 2$—$4$ атм достигала 35—38 кК в УФ области спектра при длительности светового импульса $\tau_{1/2} \approx 6$—$8$ мкс. Скорость расширения плазмы в указанном диапазоне давлений Ar составляла 3,6—2,8 км/с.

Активная среда лазера состояла из паров $Br_2$ ($p_{Br} = 3$—$20$ мм рт. ст.), сильно разбавленных буферным газом аргоном ($p_{Ar} = 1$—$4$ атм). Рабочая смесь приготавливалась смешением газов непосредственно в лазерной кювете. Перед напуском газов кювета пассивировалась. Резонатор лазера был об-

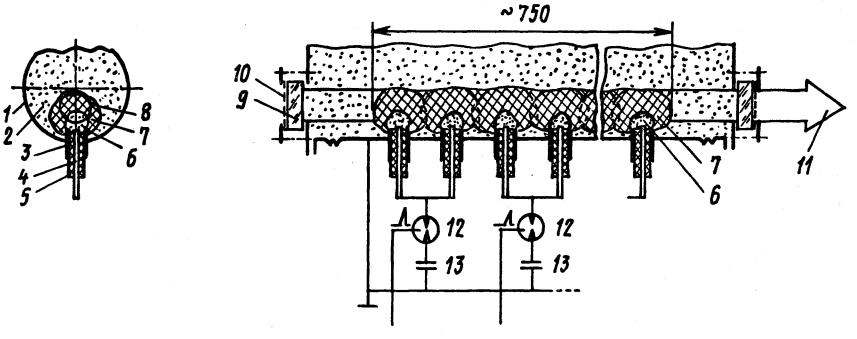


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

*1* — лазерная кювета; *2* — активная среда, *3* — анод МПК; *4* — катод; *5* — разделительный (плазмообразующий) изолятор; *6* — электроразрядная плазма; *7* — возбужденная область активной среды; *8* — апертура резонатора; *9* — кварцевые окна; *10* — отражающие покрытия; *11* — лазерное излучение; *12* — разрядники; *13* — накопители энергии

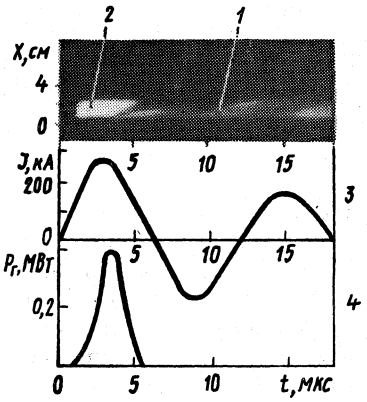


Рис. 2. Характерная фотохронограмма развития МПК-разряда (*1*) и поля генерации $Br_2$-лазера в ближней зоне (*2*) (*а*), разрядный ток (*б*) и импульс лазерной генерации (*в*)

разован плоскими диэлектрическими зеркалами с выходной апертурой ∅ 50 мм и коэффициентами отражения в области $\Delta\lambda = 292 \pm 2$ мм, изменявшимися в диапазоне $R_1R_2 = 0{,}93$—$0{,}995$. Лазерная генерация регистрировалась с помощью скоростного фотохронографа СФР-2М с кварцевой оптикой, спектрографов ИСП-30 и ДФС-452 (дисперсия $\sim 0{,}4$ нм/мм), коаксиального фотоэлемента ФЭК-22 СПУ с набором фильтров, вырезающих спектральную область $\Delta\lambda = 290 \pm 15$ нм, и калориметра ИМО-2.

**3.** Индуцированное излучение (рис. 2) возникало на фронте импульса накачки в области, непосредственно прилегающей к расширяющейся плазме разряда. Генерировал слой активной среды толщиной $\sim 2$—$3$ см. Максимум импульса лазерного излучения (рис. 2, *в*) по времени близок к максимуму мощности накачки, длительность генерации по основанию варьировалась в зависимости от состава среды в диапазоне $\tau_г \approx 2$—$5$ мкс.

Спектр стимулированного излучения (рис. 3, *б*), как правило, состоял из большого числа ( $\sim 20$) частично перекрывающихся линий, сгруппированных вблизи трех основных длин волн: 291,5; 292,0 и 292,5 нм. Генерация осуществлялась на переходах, имеющих максимальную интенсивность в спектрах спонтанной эмиссии молекулярного брома (рис. 3, *а*). Относительная интенсивность компонент спектра генерации варьировалась в зависимости от состава среды и параметров резонатора.

Выходная энергия лазера монотонно увеличивалась с давлением буферного газа Ar вплоть до максимального для данной установки давления $p \approx 4$ атм. Область оптимальных парциальных давлений рабочих молекул составляла $p_{Br}^{opt} = 3$—$10$ мм рт. ст., вне этого диапазона наблюдалось уменьшение как мощности лазерной генерации, так и ее длительности. Максимальная зарегистрированная в экспериментах энергия генерации $E_г \approx 1{,}1$ Дж

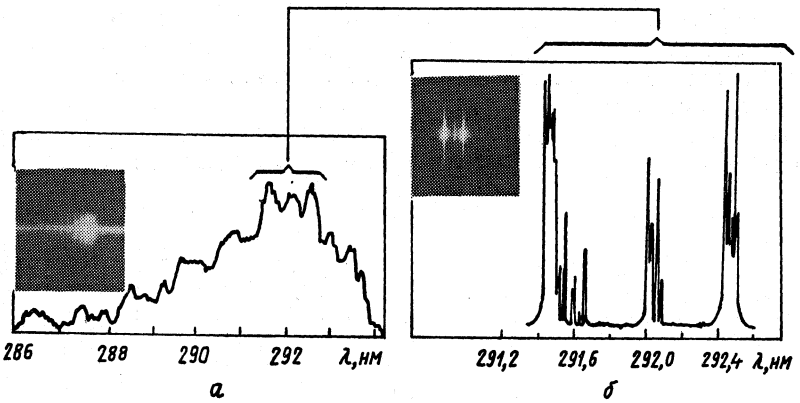


Рис. 3. Фотографии и денситограммы спектров спонтанного (*а*) и индуцированного (*б*) излучения молекулярного брома

при полной длительности лазерного импульса $\tau_г \approx 5$ мкс была получена на рабочей смеси $[Br_2] : [Ar] = 2{,}4 \cdot 10^{17} : 1{,}1 \cdot 10^{20}$ см$^{-3}$ с использованием резонатора $R_1R_2 \approx 0{,}93$. Как показали ожоговые автографы генерации в ближней зоне, в условиях проводимых экспериментов имелось заметное диафрагмирование лазерного излучения выходной апертурой зеркал резонатора (см. рис. 1).

**4.** Для выяснения потенциальных энергетических возможностей исследуемого лазера его характеристики сравнивались с выходными параметрами более изученных в настоящее время УФ лазеров с оптической накачкой — йодного молекулярного лазера и лазера на $B$—$X$-переходе фторида ксенона. Сравнение проводилось на описанной выше установке в идентичных (по геометрии и энергетике возбуждения) экспериментальных условиях. Напуск паров рабочих веществ (йода или дифторида ксенона) производился в предварительно вакуумированную и прогретую до температуры $T_к = 60 \pm 5$ °C лазерную кювету из испарителей, термостатированных при $T_{исп} \approx 100$ °C.

Активной средой йодного лазера служила смесь $[I_2] : [Ar] = 1{,}23 \cdot 10^{17} : 5{,}4 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$. При использовании резонатора с коэффициентами отражения в области $\lambda_г \approx 342$ нм $R_1R_2 \approx 0{,}76$ зарегистрирована энергия генерации $E_г \approx 1{,}0$ Дж при длительности лазерного импульса $\tau_г \approx 4$—$4{,}5$ мкс. Максимальная энергия генерации на электронном $B$—$X$-переходе молекулы XeF ($\lambda_г = 348{,}8$—$353{,}7$ нм), полученная в смеси $[XeF_2] : [Ar] = 2{,}75 \cdot 10^{17} : 2{,}7 \times 10^{17}$ см$^{-3}$ с резонатором $R_1R_2 = 0{,}76$, составляла $E_г \approx 1{,}15$ Дж при $\tau_г \approx 7{,}5$ мкс.

Несмотря на то, что существуют, по-видимому, довольно значительные резервы повышения выходных параметров исследованных лазеров, полученные результаты могут свидетельствовать о близких энергетических возможностях всех рассмотренных лазерно-активных сред. С технической точки зрения, использование молекулярного брома в качестве рабочего компонента активной среды УФ лазера с оптической накачкой, по нашему мнению, предпочтительно, поскольку $Br_2$ является более устойчивым (регенерирующим) и менее химически агрессивным и токсичным веществом, чем дифторид ксенона, и имеет достаточно высокое давление насыщенных паров при комнатной температуре ($p_{Br}^{нас} \approx 200$ мм рт. ст.).

Потенциально эффективность $Br_2$-лазера с широкополосной оптической накачкой может быть довольно высокой. Полный КПД лазера можно представить в виде $\eta_л = \eta_{кв}\eta_{вн}\eta_{нак}$, где $\eta_{кв} = h\nu_г / h\nu_{нак} \approx 0{,}55$ — квантовый КПД, $\eta_{вн}$ — квантовая эффективность преобразования накачки в лазерную генерацию, $\eta_{нак} = \eta_{изл}\eta_{\Delta\nu}$ — КПД источника накачки, $\eta_{изл}$ — эффективность преобразования электрической энергии в излучение, $\eta_{\Delta\nu}$ — доля световой энергии, излучаемая в полосе накачки. Для плазмодинамического МПК-разряда $\eta_{изл} = 0{,}5$ [9]. Если предположить, что эмиссионный спектр разряда в аргоне в области $\lambda \geqslant 90$ нм [9] близок к планковскому с $T = T_{ярк} = 35$ кК, то доля световой энергии, излучаемая в полосе $\Delta\lambda_{нак} \approx 150$—$170$ нм, составит $\eta_{\Delta\nu} \approx 0{,}1$. Тогда, полагая $\eta_{вн} \approx 0{,}5$, получаем $\eta_л \approx 1{,}4$ %. В связи с этим детальное исследование механизмов создания и деградации инверсии в таких лазерах представляет значительный научный и практический интерес.

В заключение авторы выражают благодарность С. М. Игумнову и В. Ф. Суховерхову за приготовление рабочих веществ, а А. Г. Опекану, В. В. Почтареву и В. Г. Чижову за помощь в проведении лазерных экспериментов.

1. Эксимерные лазеры / Под ред. Ч. Роудза.— М.: Мир, 1981.
2. M. J. Shaw, C. B. Edwards et al. *Appl. Phys. Letts*, **37**, 346 (1980).
3. Н. Г. Басов, И. С. Дацкевич, В. С. Зуев и др. *Квантовая электроника*, **4**, 638 (1977).
4. В. С. Зуев, Л. Д. Михеев, А. П. Широких. *Квантовая электроника*, **9**, 573 (1982); **10**, 903 (1983).
5. J. R. Murray, J. C. Swingle, C. E. Turner. *Appl. Phys. Letts*, **28**, 930 (1976).
6. J. J. Ewing, J. H. Jacob, J. A. Mangano, H. A. Brown. *Appl. Phys. Letts*, **28**, 656 (1976).
7. Н. К. Бибинов, И. П. Виноградов. *Химическая физика*, № 12, 1624 (1983).
8. А. С. Камруков, Н. П. Козлов, Ю. С. Протасов. В кн.: Плазменные ускорители и ионные инжекторы.— М.: Наука, 1984.

9. А. С. Камруков, Н. П. Козлов, Ю. С. Протасов, С. Г. Шашаковский. *TBT*, **27**, 552 (1989).

Московское высшее техническое
училище им. Н. Э. Баумана

Поступило в редакцию
3 мая 1989 г.

A. S. Kamrukov, N. P. Kozlov, Yu. S. Protasov, E. Yu. Ushmarov. **An optically pumped ultraviolet $Br_2$ laser.**

It is reported that the laser action has been obtained for the first time in molecular bromine ($D'^3\Pi_{2g} \rightarrow A'^3\Pi_{2u}$, $\lambda_l \sim 292$ nm) under optical pumping. The excitation was carried out by the VUV radiation from plasmodynamic discharges of magnetoplasma compressors formed directly in the laser active medium. In the $Br_2$:Ar$\approx$1:450 working mixture under the pressure of $\sim$4 atm the output energy of $\sim$1.1 J has been obtained in the laser pulse $\sim$5 μs in duration. Output parameters of optically pumped $Br_2$, $I_2$ and XeF(B—X) lasers are compared under identical (by the geometry and energy parameters of the excitation) experimental conditions.

«Квантовая электроника», **16**, № 12 (1989) УДК 621.373.826.038.825.2

А. Я. Гореленко, А. А. Демидович, И. И. Калоша, В. В. Набатов,
Б. К. Севастьянов, А. П. Шкадаревич, К. П. Чиркина, А. П. Чиркин

# ЛАЗЕР НА $Al_2O_3$:$Ti^{3+}$ С МИКРОСЕКУНДНОЙ ЛАМПОВОЙ НАКАЧКОЙ

*Приводятся результаты оптимизации характеристик лазера с ламповой накачкой на $Al_2O_3$:$Ti^{3+}$ с использованием люминесцентных светотрансформаторов. Испытаны два типа трансформаторов — жидкостный и полимерный на основе красителя (кумарин-30). Максимальная энергия генерации лазера составила 130 мДж при дифференциальном КПД 0,4 %. Диапазон перестройки длины волны лазерного излучения 685—920 нм.*

Первый лазер на кристаллах $Al_2O_3$:$Ti^{3+}$ с ламповой накачкой был впервые описан в [1]. Более детальное исследование лазерного процесса с ламповой накачкой проведено в [2, 3], где накачка осуществлялась прямыми трубчатыми и коаксиальными импульсными лампами. Для повышения эффективности лазера использовались жидкостные светотрансформаторы интенсивного УФ излучения в полосу поглощения $Al_2O_3$:$Ti^{3+}$ ($\Delta\lambda \approx 400$—$600$ нм). Поскольку это были первые попытки получить генерацию на кристаллах $Al_2O_3$:$Ti^{3+}$, естественно, что условия генерации не были оптимальными, а качество кристаллов было недостаточно высоким. При этом были получены следующие параметры генерации: длительность импульса накачки $\tau_н = 50$—$300$ мкс, дифференциальный КПД $\eta_{диф} = 0{,}02$ %, пороговая энергия накачки $E_п = 150$ Дж. Позже [4] с использованием кристаллов более высокого качества на серийно выпускаемом осветителе для лазеров на ИАГ: $Nd^{3+}$ эти характеристики составили: $\tau_н = 30$ мкс, $\eta_{диф} = 0{,}05$ %, $E_п = 35$ Дж.

В [5] с ламповой накачкой длительностью $\sim$1 мкс была получена выходная энергия $E_г = 120$ мДж при энергии накачки $E_н = 80$ Дж ($E_п = 20$ Дж), что соответствует дифференциальному КПД 0,2 %. Авторы [5] сообщают, что им удалось достичь $\eta_{диф} = 0{,}5$ %, однако из статьи неясно, какими методами был получен этот результат. Следует отметить, что из результатов [1—5] вытекают два принципиально различных режима работы лазеров на $Al_2O_3$:$Ti^{3+}$ с ламповой накачкой, а именно. когда длительность импульса накачки $\tau_н$ меньше времени высвечивания люминесценции $\tau$ (микросекундная накачка) и когда $\tau_н \gg \tau$ (квазинепрерывная накачка). В лазерах первого типа реализуется энергетический порог, их КПД достигает в настоящее время 0,5 %. КПД лазеров второго типа колеблется от сотых до десятых долей процента, главным образом, в зависимости от длительности импульса накачки.

В настоящей работе приводятся результаты оптимизации лазера на кристалле $Al_2O_3$:$Ti^{3+}$ при микросекундной накачке стандартными лампами. Впервые применен твердотельный полимерный светотрансформатор. Прово-