

04; 07; 12

© 1990 г.

Хе ЛАЗЕР ИК ДИАПАЗОНА С СВЧ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

В. А. Ваулин, В. Н. Слинко, С. С. Сулакишин

Экспериментально получена генерация на переходах атомарного ксенона в смесях Ar—Xe, He—Xe, He—Ar—Xe при возбуждении в мощном импульсном СВЧ разряде. Активная лазерная среда формировалась при взаимодействии импульса магнетронного генератора мощностью ~ 500 кВт с газом при давлении до 1 атм. В эксперименте наблюдалась генерация на длинах волн 1.73 и 2.03 мкм по центру газоразрядной трубки вне области скин-слоя. Исследовалась зависимость параметров лазерной генерации от диаметра газоразрядной трубки. Максимальный КПД генерации по мощности составлял 0.25 %.

1. Среди лазеров инфракрасного диапазона перспективным в плане технологических применений рассматривается лазер на переходах атомов ксенона [1]. Генерация получена при возбуждении в электрическом разряде при накачке ионизирующими излучениями и в случае электроионизационного разряда. Соответствующие лазерные КПД составляют 0.1—0.3 % [2, 3], 1.5, 5.5 % [1].

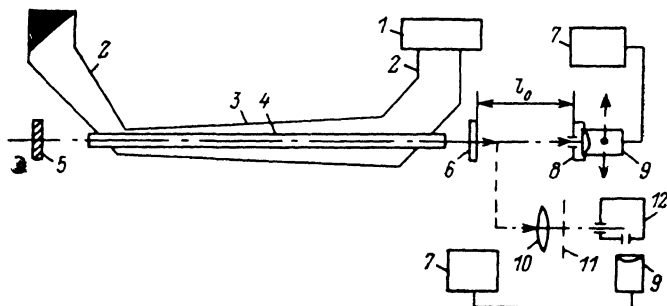


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

1 — СВЧ генератор; 2 — волноводный тракт; 3 — прямоугольный волновод электроразрядной секции; 4 — электроразрядная трубка с рабочей газовой смесью; 5 — плоскопараллельное «глухое» диэлектрическое зеркало; 6 — плоскопараллельная стеклянная пластина с диэлектрическим покрытием или кварцевая пластина; 7 — осциллограф С1-79; 8 — диафрагма; 9 — фотодетектор; 10 — кварцевый конденсор; 11 — сетчатый ослабитель фотопотока; 12 — монохроматор МДР-4.

В данной работе в качестве источника возбуждения активной среды используется мощный импульсный СВЧ разряд. Ранее СВЧ накачка применялась в случае Хе лазера (см., например, [4, 5]). Достигнутый КПД не превышал 0.5 % [4]. Особенность настоящей работы состоит в следующем. В последнее время проводятся исследования возможностей мощного импульсного СВЧ разряда для накачки газовых лазеров. В [6, 7] показано, что вне области скин-слоя в мощном СВЧ разряде формируется переохлажденная плазма, характерная для пучковых разрядов. Так, в [8] вне скин-слоя получена генерация в Ne—H₂ плазменном лазере.

Поскольку в предыдущих работах по Хе лазеру с СВЧ накачкой область скинирования совпадала с объемом рабочего газа, что соответствует условиям ионизационно-неравновесной плазмы, то большой интерес представляет исследование эффективности генерации ИК Хе лазера в мощном СВЧ разряде, когда

могут реализоваться условия возбуждения как для электрического, так и для пучкового разрядов.

2. Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Установка включала СВЧ генератор 1, волноводный тракт 2, электроразрядную секцию и оптический резонатор. Электроразрядная секция, описанная в [9], представляла собой сужающийся по узкой стенке прямоугольный волновод 3, по оси которого располагалась газоразрядная трубка 4, содержащая рабочую газовую смесь. Использовались смеси Ag—Xe, He—Xe и He—Ag—Xe при полном давлении до 1 атм. Применялась электроразрядная секция двух размеров $L=100$ и 38 см. С целью формирования области переохлажденной плазмы диаметр $d_{\text{тр}}$ применяемых газоразрядных трубок превышал область скин-слоя δ : $d_{\text{тр}} > 2\delta$ ($d_{\text{тр}}=10, 6.5, 3.0$ мм). Резонатор состоял из плоскопараллельного

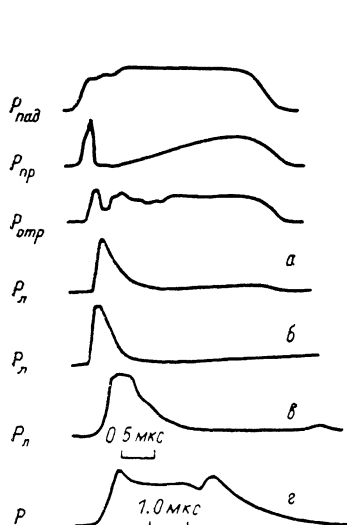


Рис 2. Осциллограммы импульсов падающей $P_{\text{пад}}$, прошедшей $P_{\text{пр}}$ и отраженной $P_{\text{отр}}$ СВЧ мощности и лазерного излучения.

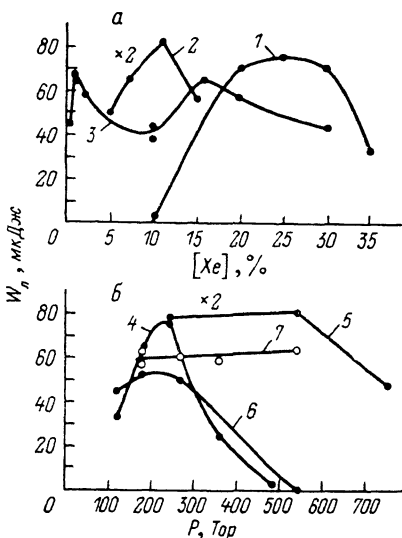
а — $\lambda=1.73$ мкм, Ag : Xe=75 : 25, $P=240$ Тор; б — $\lambda=2.03$ мкм, He : Xe=84 : 16, $P=180$ Тор; в — He : Ag : Xe=56 : 33 : 11, $P=540$ Тор; г — интегральное излучение, $\Delta\lambda=0.5-1.8$ мкм, Ag : Xe=99 : 1, $P=240$ Тор.

Рис. 3. Зависимость интегральной импульсной энергии лазера от состава (а) и полного давления смесей (б) и $d_{\text{тр}}=10$ мм, резонаторе «глухое» зеркало и стеклянная пластина, $P_{\text{пад}}=460$ кВт, $f\approx 50$ Гц.

1 — Ag—Xe, $P=240$ Тор; 2 — He—Ag—Xe, [He] : [Ag]=56 : 33, $P=540$ Тор; 3 — He—Xe, $P=180$ Тор; 4 — Ag : Xe=75 : 25; 5 — He : Ag : Xe=56 : 33 : 11; 6 — He : Xe=99 : 1; 7 — He : Xe=84 : 16.

«глухого» зеркала 5 с диэлектрическим покрытием и плоскопараллельной стеклянной пластины 6 с диэлектрическим покрытием (коэффициент пропускания на $\lambda=1.73$ мкм 80 %, $\lambda=2.03$ мкм — 70 %, $\lambda=2.65$ мкм — 6.7 %; длинноволновая граница обусловлена границей поглощения стекла). В качестве выходного зеркала применялась также плоскопараллельная кварцевая пластина.

Для исключения пробоя в тракте волновод заполнялся SF_6 газом давлением ~ 3 атм. Разряд зажигался внутри трубки в режиме самопробоя СВЧ импульсами с такими параметрами: тип волны H_{10} , длина волны $\lambda_0=10$ см, пиковая мощность $P_{\text{пад}}=200-900$ кВт, длительность на полувысоте $\tau_{0.5}\approx 2.5$ мкс, частота повторения импульсов f до 400 Гц. Падающая $P_{\text{пад}}$, прошедшая $P_{\text{пр}}$ и отраженная $P_{\text{отр}}$ СВЧ мощности измерялись с помощью лампового детектора 6ДЗД и направленных ответвителей, включенных в волноводный тракт. Входящая в разряд СВЧ мощность определялась как $P_{\text{пор}}=P_{\text{пад}}-P_{\text{пр}}-P_{\text{отр}}$. Энергия лазерного излучения регистрировалась калориметром ИМО-2Н ($\Delta\lambda=0.4-10.0$ мкм) непосредственно или через оптический фильтр ИКС-1 ($\Delta\lambda=0.9-3.0$ мкм). Фотопоток регистрировался фотодетекторами ФД-9Г111



($\Delta\lambda=0.5-1.8$ мкм) и ФСГ 22-3А1 ($\Delta\lambda=1.8-8.5$ мкм) и осциллографом С1-79. Постоянная времени схемы регистрации временных параметров излучения ~ 70 нс.

Пространственная структура лазерного луча контролировалась по схеме, приведенной на рис. 1, а. Диафрагма перемещалась совместно с фотодетектором в вертикальной и горизонтальной плоскостях с точностью не хуже 0.5 мм. Отверстие диафрагмы не более 0.5 мм. Спектральные исследования проводились по схеме, приведенной на рис. 1, б, в диапазоне $\Delta\lambda=0.8-2.05$ мкм.

3. В эксперименте наблюдалась лазерная генерация в смесях Ar—Xe ($\lambda_r=1.73$ мкм), He—Xe и He—Ar—Xe ($\Delta\lambda=2.03$ мкм). Исходя из результатов [8] по наблюдению генерации в переохлажденной плазме при аналогичных параметрах СВЧ импульса накачки первоначально использовалась электро-разрядная секция 100 см газоразрядной трубкой 10 мм, как и в [7-9]. Использовался селективный резонатор (со стеклянной выходной пластиной).

На рис. 2 приведены осциллограммы импульсов лазерного излучения и СВЧ импульсов. Как и в [4] для Ar—Xe смеси,

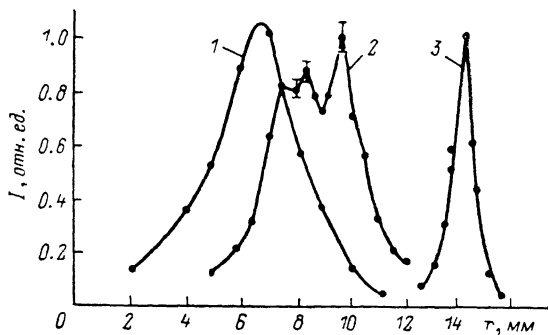


Рис. 4. Радиальное распределение интенсивности излучения лазера Ag : Xe = 75 : 25.

$P=240$ (1, 3), 360 Тор (2) в вертикальной плоскости при $l_0=9$ см при $d_{тр}=10$ (1), 6.5 (2), 3 мм (3). Графики совмещены произвольно.

в данной работе генерация во всех трех смесях наблюдалась в первые сотни наносекунд разряда. Более длительная генерация наблюдалась в He—Ar—Xe смеси с длительностью на полувысоте $\tau_{0.5}=500$ нс. В He : Xe=84 : 16 $\tau_{0.5} \approx 250$ нс; в Ar—Xe $\tau_{0.5}=220-310$ нс, что в 1.5 раза больше, чем в [4].

В оптимальных смесях поглощение энергии СВЧ импульса составляло 65—85 % при эффективности энерговода в пике лазерного излучения от 40 до 90 %.

На рис. 3 приведены результаты оптимизации энергии лазерного излучения по составу смесей и полному давлению. Получено, что оптимальное процентное содержание Xe в смесях на порядок больше, чем в известных работах по исследованию генерации на ИК переходах Xe с различными способами возбуждения [2-5, 10, 11] и составляет для Ar—Xe смеси ~ 25 %, для He—Ar—Xe смеси — ~ 11 % ($[Xe] : [Ar]_{opt}=56 : 33$). Для He—Xe выявлены два оптимальных значения $[Xe]_{opt}$: ~ 16 и 1 % (характерное для известных работ).

Замена резонатора на менее добротный и неселективный (с кварцевой выходной пластиной) существенно не сказалась на оптимальном составе и полном давлении смесей, только для He—Xe уширилась оптимизационная зависимость от $[Xe]$. При этом импульсная лазерная энергия для Ar—Xe упала на 20 %, для He—Xe сохранилась, для He—Ar—Xe возросла в 2 раза. Наблюдалась прямая пропорциональность оптимального давления смесей от мощности импульса накачки. КПД генерации по мощности для смесей оптимального состава и давления при $P_{вд} \approx 460$ кВт, $f \approx 50$ Гц составил ~ 0.2 % для Ar—Xe и He—Xe ($[Xe]=16$ %) смесей, ~ 0.15 % для He—Ar—Xe смеси в случае стеклянного выходного окна резонатора. Наилучшие результаты получены для He—Ar—Xe в случае кварцевой выходной пластины: КПД ~ 0.25 % (по мощности), импульсная энергия равна 0.36 мДж.

В исследованном диапазоне длин волн интенсивность лазерного излучения на $\lambda=1.73$ (Ar : Xe=75 : 25) и 2.03 мкм (He : Xe=84 : 16 и He : Ar : Xe=56 : 33 : 11) более чем в 10^4 раз превышала интенсивность остальных наблюдаемых линий. В эксперименте варьировался спектральный диапазон регистрируемой выходной энергии излучения рабочих смесей путем замены стеклянного выходного окна на кварцевое с применением оптического фильтра ИКС-1.

В результате было определено, что $\sim 75\%$ (1.73 мкм, Ag—Xe), $\sim 90\%$ (2.03 мкм, He—Xe) и $\sim 50\%$ (2.03 мкм, He—Ag—Xe) энергии излучения приходится на наблюдаемые в эксперименте лазерные линии. В последнем случае остальные 50% приходятся, как предполагается, на $\lambda=2.6$ мкм.

Изучение радиального распределения интенсивности излучения He—Xe и He—Ag—Xe лазеров показало следующее. Для обеих смесей более интенсивная генерация была по центру трубки (рис. 4, кривая 1). По свечению СВЧ разряда толщина скин-слоя составила $\delta \approx 1$ мм. От центра к периферии трубки интенсивность генерации монотонно спадала, хотя можно было ожидать вблизи стенки, в области скин-слоя, наличия максимумов или перегибов, исходя из представления о скин-слое как об ионизационно-неравновесной плазме и факта наблюдения эффективной генерации ИК Xe лазера в скин-слое на $\lambda=1.73$ мкм [4]. Поперечный размер (усредненные значения по горизонтальной и вертикальной плоскостям) центральной области генерации на уровне $1/e$ от максимальной интенсивности (на этом уровне из выделенной области излучается более 50% лазерной энергии) для Ag—Xe составляет 4.5 мм, для He—Ag—Xe — 6.5 мм. Для Ag—Xe смеси в центральной области пространства луча $\Delta d \approx 1$ мм (вблизи выходного окна) наблюдалась аномально большая длительность лазерного излучения $\tau_{0.5} \approx 750$ нс, в то время как в остальной области луча $\tau_{0.5} = 310$ нс.

Расходимость лазерного луча на уровне $1/e$ от максимальной интенсивности составляла для Ag—Xe 3 мрад, для He—Ag—Xe — 2.7 мрад.

С целью выяснения влияния области СВЧ разряда вне скин-слоя на генерацию проводилось исследование лазерного излучения Ag—Xe и He—Ag—Xe смесей с селективным резонатором при газоразрядной трубке меньшего диаметра $d_{\text{тр}} = 6.5$ и 3.0 мм и разрядной секции $L = 38$ см. Результаты показали следующее.

Оптимальный состав и полное давление рабочих смесей не изменились с уменьшением диаметра трубки и размера секции, хотя энерговод СВЧ импульса на единицу объема газа увеличивался в 20 раз. Оптимальное давление также пропорционально мощности падающего СВЧ импульса. Длительность генерации сократилась в 1.7 раза для Ag—Xe и 2.4 раза для He—Ag—Xe. При $d_{\text{тр}} = 6.5$ и 3 мм для Ag—Xe и He—Ag—Xe смесей более интенсивная генерация была также по центру трубки (рис. 4, кривые 2, 3). При $d_{\text{тр}} = 6.5$ мм поперечный размер центральной области генерации оказался, как и при $d_{\text{тр}} = 10$ мм, равным 4.5 мм для Ag—Xe и 6.0 мм для He—Ag—Xe. При $d_{\text{тр}} = 3$ мм размер этой области равен ~ 2 мм для Ag—Xe и 2.8 мм для He—Ag—Xe смеси.

Сокращение размеров трубки в случаях $d_{\text{тр}} = 10$; 6.5 мм привело к падению пиковой лазерной мощности в 5 раз для обеих смесей, что, возможно, связано с сокращением активной длины. Сокращение с 6.5 до 3 мм привело к падению пиковой лазерной мощности в ~ 100 раз для обеих смесей, что значительно превышает изменение объема области генерации. Это, по-видимому, связано с изменением термодинамического состояния плазмы в центральной области трубки.

Расходимость лазерного луча для He—Ag—Xe смеси составляла 1 мрад при $d_{\text{тр}} = 6.5$ мм и 0.4 мрад при $d_{\text{тр}} = 3$ мм. Расходимость луча для Ag—Xe смеси не определена из-за слабой интенсивности излучения.

4. Исследования показали, что генерация Xe лазера ИК диапазона при мощном СВЧ возбуждении и с диаметром газоразрядной трубки $> 2\delta$ (условия существования переохлажденной плазмы) идет по центру трубки вне области скин-слоя в первые сотни наносекунд микросекундного СВЧ разряда. С приближением диаметра трубки к 2δ длительность генерации сокращается, КПД генерации по мощности значительно падает, что, по-видимому, связано с изменением термодинамического состояния плазмы в центральной области разряда. Полученное оптимальное процентное содержание Xe в рабочих смесях на порядок больше, чем в известных работах по исследованию генерации на ИК переходах Xe при различных способах возбуждения.

Максимальный КПД генерации по мощности составил 0.25%, средняя мощность 17 мВт. Эти величины не являются предельными для заданного уровня СВЧ мощности, так как не проведена оптимизация по диаметру газоразрядной

трубки, по мощности накачки, по оптическому резонатору и не использована возможность применения фотоподсветки с целью повышения давления рабочего газа.

Список литературы

- [1] Басов Н. Г., Данилычев В. А. // УФН. 1986. Т. 148. № 1. С. 55—100.
- [2] Тарасенко В. Ф. Канд. дис. Томск, 1987.
- [3] Петухов В. О., Точицкий С. Я., Чураков В. В. // Квантовая электрон. 1988. Т. 15. № 3. С. 504—506.
- [4] Gordon C. L., Feldman B., Christensen C. P. // Opt. Lett. 1988. Vol. 13. N 2. P. 114—116.
- [5] Christensen C. P., Powell F. X., Nicholas Djeu. // IEEE. 1980. Vol. QE-16. N 9. P. 949—954.
- [6] Диденко А. Н., Петров В. П., Слинко В. Н. и др. // ДАН СССР. 1987. Т. 292. № 3. С. 601—604.
- [7] Баранов С. В., Ваулин В. А., Ломаев М. И. и др. // Квантовая электрон. 1989. Т. 16. № 3. С. 452—455.
- [8] Ваулин В. А., Держиев В. И., Лапин В. М. и др. // Квантовая электрон. 1989. Т. 16. № 3. С. 486—487.
- [9] Ваулин В. А., Слинко В. Н., Сулакшин С. С. // Квантовая электрон. 1988. Т. 15. № 11. С. 2331—2333.
- [10] Справочник по лазерам / Под ред. А. М. Прохорова. Т. 1. М.: Сов. радио, 1987. 504 с.
- [11] Басов Н. Г., Баранов В. В., Белоглазов А. А. и др. // Квантовая электрон. 1988. Т. 15. № 3. С. 453—454.

Научно-исследовательский институт
ядерной физики при Томском
политехническом институте
им. С. М. Кирова

Поступило в Редакцию
9 февраля 1990 г.