

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОЙ СРЕДЫ ЛАЗЕРНОГО ИСТОЧНИКА С ОПТИЧЕСКОЙ НАКАЧКОЙ НА СМЕСИ ИНЕРТНЫХ ГАЗОВ В УСЛОВИЯХ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА ПРОКАЧКИ СРЕДЫ

*Юрьев Алексей Валентинович (oefimova@otd13.vniief.ru), Адаменков Юрий Анатольевич,
Горбунов Михаил Александрович, Калачева Анна Андреевна, Шайдулина Валентина Александровна*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

На экспериментальной установке была организована прокачка газовой среды по замкнутому циклу и проведены исследования активной среды. В качестве газовой среды использовалась смесь гелия с аргоном. Исследуется возможность использования лазера с оптической накачкой на метастабильных атомах аргона в условиях замкнутого цикла прокачки среды. Проведены измерения мощности лазерной генерации на длине волны 912 нм в непрерывном режиме с течением времени. Методом диодной лазерной спектроскопии были определены концентрация и время жизни метастабильных атомов аргона на нижнем лазерном уровне. Показано влияние примесей в газовой системе на величину генерации лазерного излучения.

Ключевые слова: лазер с оптической накачкой, лазер с оптической накачкой на инертных газах (ЛОНИГ), инертные газы, лазер на благородных газах, метастабильные атомы, лазерные технологии.

INVESTIGATION OF THE ACTIVE MEDIUM OF AN OPTICALLY PUMPED LASER SOURCE ON A MIXTURE OF INERT GASES UNDER CONDITIONS OF A CLOSED CYCLE OF MEDIUM PUMPING

*Yuriev Aleksei Valentinovich (oefimova@otd13.vniief.ru), Adamenkov Yura Anatol'evich,
Gorbunov Mihail Aleksandrovich, Kalacheva Anna Andreevna, Shaidulina Valentina Aleksandrovna*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The pumping of a gaseous medium in a closed cycle has been organized at the experimental facility and the studies of the active medium have been carried out. A mixture of helium and argon has been used. The possibility of using a laser with an optical pumping on metastable argon atoms under conditions of a closed system is studied. The lasing power at a wavelength of 912 nm has been measured continuously over time. The diode laser spectroscopy has been used to determine the concentration and lifetime of metastable atoms at the lower level. The effect of the impurities in a gaseous system on the amount of laser radiation generation is demonstrated.

Key words: optically pumped laser, optically pumped inert gas laser (OPIGL), inert gas, rare gas laser, metastable atoms, laser technology.

Введение

Одной из актуальных проблем лазерной физики является создание непрерывного мощного лазера с высоким качеством выходного излучения. В последнее время особое внимание исследователей и разработчиков лазерных систем обращено к газовым лазе-

рам видимого и ближнего инфракрасного диапазона с оптической накачкой. Таковым, например, является лазер на парах щелочных металлов с диодной накачкой.

Лазер с оптической накачкой на инертных газах (ЛОНИГ) относится к новым перспективным лазерам настоящего времени. ЛОНИГ – это прототип с высо-

кой квантовой эффективностью, мощностью и высоким качеством излучения. Преимущество ЛОНИГ заключается в том, что в качестве активной среды в нем для получения генерации лазерного излучения используются метастабильные атомы инертных газов (аргон, криптон, неон, ксенон), что снимает ряд ограничений на материалы конструкции. Данный лазер предполагается применять для преобразования мощного диодного излучения с низким качеством пучка в мощное излучение с высоким качеством пучка.

Теоретические оценки демонстрируют возможность получения сотен ватт лазерной мощности в непрерывном режиме с кубического сантиметра активной среды. В настоящее время достигнутый уровень выходной мощности составляет 4 Вт в условиях продольной накачки в открытом режиме на атомах Ar (912 нм) [1, 2]. Создание ЛОНИГ также расширило бы спектральный диапазон длин волн накачки и лазерной генерации мощных лазеров непрерывного действия, востребованных в настоящее время.

На данный момент сотрудниками ВНИИЭФ собрана экспериментальная установка ЛОНИГ, на которой была получена лазерная генерация при прокачке газовой среды по открытому и замкнутому циклу [3]. Большинство результатов исследований активной среды представлены для открытого цикла [4, 5], однако с многих точек зрения значительно более привлекательным является замкнутый режим работы ЛОНИГ.

На рис. 1 представлены энергетические уровни атомов аргона, участвующие в лазерном цикле, и кинетика переходов между ними [4]. В первом приближении данная модель упрощается до трех уровней – нижнего лазерного уровня, уровня накачки и верхнего лазерного уровня.

Нижним лазерным уровнем служит низшее по энергии метастабильное состояние аргона $1s_5$, заселение которого происходит при использовании электрического разряда. Лазерный цикл ЛОНИГ включает в себя оптическое возбуждение перехода между $1s_5$ и $2p_9$, столкновительную релаксацию на уровень $2p_{10}$ и лазерную генерацию на переходе между $2p_{10}$ и $1s_5$.

Ключевым моментом в работе ЛОНИГ является наработка в электрическом разряде метастабильных атомов аргона, заселяющих нижний лазерный уровень $1s_5$. Достижение концентрации метастабильных атомов выше определенного уровня является необходимым условием получения генерации, а увеличение значения концентрации является важным условием масштабирования ЛОНИГ.

Время жизни возбужденных атомов аргона на нижнем лазерном уровне также является важным параметром активной среды. Радиационное время жизни метастабильного лазерного уровня составляет 50 с, но из-за столкновительной релаксации время жизни уровня сокращается до величин, средние значения которых находятся в пределах 1–10 мкс, что является определяющим фактором в выборе периода следования импульсов разряда.

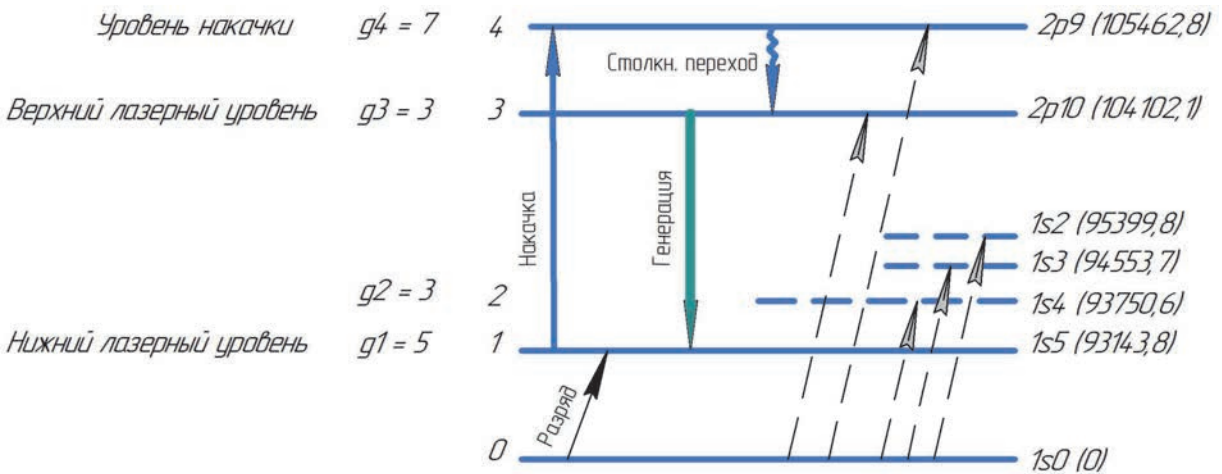


Рис. 1. Уровни атома аргона, принимающие участие в лазерном цикле

На рис. 2 представлена схема эксперимента по измерению мощности излучения генерации. Мощность излучения накачки и лазерной генерации измерялась с помощью оптического калориметра UP25-N (GENTEC-EO).

Были проведены эксперименты по измерению мощности генерации ЛОНИГ в замкнутом цикле в зависимости от времени. На рис. 3 представлена данная зависимость. Первой точкой является мощность в момент после перехода от открытого режима прокачки среды к замкнутому.

График на рис. 3 демонстрирует, что за 8 минут работы ЛОНИГ в замкнутом режиме произошло падение мощности лазерного излучения на 70 %. Было выдвинуто предположение, что это связано с загрязненностью стенок газового тракта, приводящей к деградации газовой смеси. Данное предположение можно проверить, определив значения концентрации и времени жизни метастабильных атомов на нижнем лазерном уровне методом диодной лазерной спектроскопии в различных режимах работы ЛОНИГ.

Для минимизации влияния примесей в газовую систему перед входом в кювету была добавлена ловушка с жидким азотом.

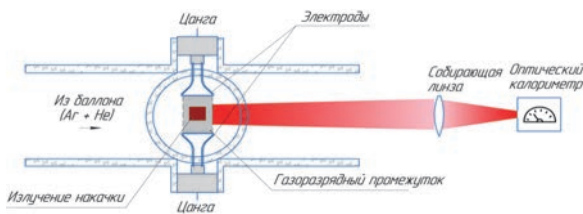


Рис. 2. Схема эксперимента по измерению мощности излучения генерации

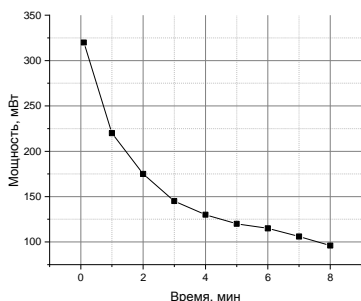


Рис. 3. Изменение мощности лазерной генерации с течением времени

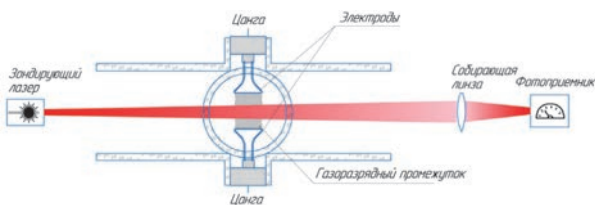


Рис. 4. Схема эксперимента измерения концентрации и времени жизни метастабильных атомов по измерению прошедшего излучения зондирующего лазера

Измерение концентрации и времени жизни метастабильных атомов проводилось на экспериментальном макете ЛОНИГ методом диодной лазерной спектроскопии. Схема эксперимента представлена на рис. 4.

В качестве зондирующего лазера используется Nolatech TLD-912,4-14BF с источником питания MBL1500A. Мощность излучения зондирующего лазера измерялась с помощью фотоприемника PDA36A2.

Питание электродов осуществлялось от высоко-частотного источника, который генерировал импульсы длительностью 60–80 нс с периодом 9–10 мкс. Амплитуда напряжения разряда достигала 1,5 кВ.

Излучение зондирующего лазера пропускать через активную среду и фокусировалось на фотоприемнике. В ходе проведения экспериментов проводились три измерения – измерение интенсивности ЛИ при включенном разряде, измерение интенсивности лазерного излучения при выключенном разряде и измерение фонового излучения. Для краткости данные значения далее будут обозначаться «поглощение», «лазер» и «ноль» соответственно.

Численное моделирование

Перед проведением экспериментов необходимо составить математическую модель, описывающую изменение интенсивности лазерного излучения при прохождении через активную среду. Основой модели является закон Бугера – Ламберта – Бера.

Суть метода диодной лазерной спектроскопии заключается в том, что при пропускании излучения зондирующего лазера величина поглощения зависит от концентрации N_0 и времени жизни τ_b метастабильных атомов на нижнем лазерном уровне.

В первом приближении максимум поглощения излучения должен наступать в момент после прохождения разряда длительностью 60–80 нс, когда количество возбужденных атомов на нижнем лазерном уровне максимально. Однако проведенные измерения продемонстрировали, что максимум поглощения значительно смещается и наступает через 1–2 мкс после прохождения разряда. Поскольку электроны в разряде имеют достаточно широкий спектр энергии, было выдвинуто предположение, что при прохождении разряда атомы аргона возбуждаются не только на нижний лазерный уровень $1s_5$, но и на все уровни мультиплета s- и некоторые уровни мультиплета p-. Возбужденные атомы с этих уровней каскадно спускаются до уровня $1s_5$, вызывая задержку в наступлении максимума поглощения.

Для введения данного предположения в математическую модель все заполняемые в разряде энергетические уровни аргона, кроме $1s_5$, объединялись в общий уровень с некоторым усредненным временем жизни τ_b .

Общая концентрация возбужденных атомов N_0 , участвующих в лазерном цикле, складывается из трех слагаемых – концентрации метастабильных атомов N_r , забрасываемых на нижний лазерный уровень $1s_5$; концентрации атомов N_h , забрасываемых на усредненный уровень, характеризующий уровни s - и p -, и минимальной концентрации возбужденных атомов N_m :

$$N_0 = N_m + N_r + N_h. \quad (1)$$

Минимальная концентрация возбужденных атомов N_m равна концентрации в лазерном цикле в момент времени перед прохождением разрядного импульса:

$$N_m = N_0 e^{-\frac{T}{\tau_b}} = (N_m + N_r + N_h) e^{-\frac{T}{\tau_b}}, \quad (2)$$

где T – период разряда.

Концентрацию метастабильных атомов N_r на уровне $1s_5$ и концентрацию метастабильных атомов N_h на усредненном уровне можно связать соотношением

$$N_h = kN_r, \quad (3)$$

где k – коэффициент пропорциональности. В проводимых расчетах $k = 3$.

После учета уравнений (1)–(3) и ряда математических преобразований было получено основное соотношение, позволяющее определять интенсивность излучения зондирующего лазера $I(t)$ при прохождении через активную среду:

$$I(t) = -\sigma_{ul} \frac{g_u N_r}{g_l} \left[1 + k e^{-\frac{t}{\tau_b}} + (1+k) e^{-\frac{T}{\tau_b}} e^{-\frac{t}{\tau_a}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_p}} \right) L \right] + I_F, \quad (4)$$

где τ_a – время жизни уровня $1s_5$; τ_b – время жизни усредненного уровня; N_r – концентрация метастабильных атомов на нижнем лазерном уровне; k – коэффициент пропорциональности между концентрацией атомов на уровне $1s_5$ и концентрацией атомов на усредненном уровне; L – длина активной среды; I_0 – интенсивность излучения зондирующего лазера, проходящего через активную среду при отсутствии поглощения; I_F – интенсивность фонового излучения; σ_{ul} – сечение поглощения; t_p – время нарастания фотодатчика; T – период разряда; g_u и g_l – кратности вырождения.

Данное соотношение справедливо для случая совпадения центров линий поглощения аргона и излучения зондирующего лазера.

Уравнение (4) является опорным для определения параметров активной среды. В каждом из проводимых экспериментов остаются неизвестными три параметра активной среды – N_0 , τ_a и τ_b . Для их опре-

деления по измеренным значениям выбирались три значения интенсивности в различные моменты времени (I_1, t_1) , (I_2, t_2) и (I_3, t_3) и составлялась система из трех уравнений. Для обработки результатов эксперимента и получения решения системы была создана расчетная программа.

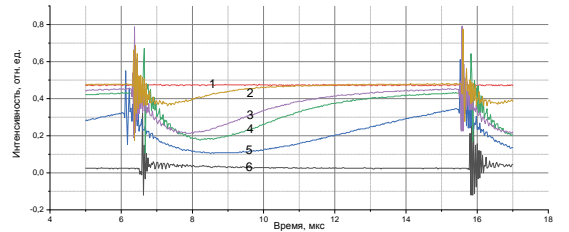
Результаты измерений

Эксперименты были проведены для двух электродов различной длины – 10 и 15 мм. Зондирование производилось при продольном режиме расположения электродов. Температура газа в кювете предполагалась равной 700 К.

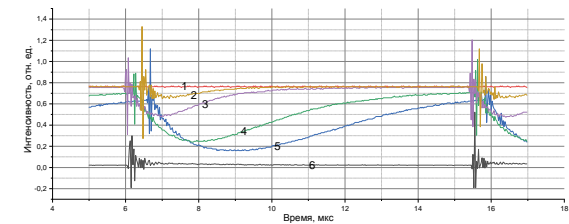
На рис. 5 представлены зависимости интенсивности ЛИ зондирующего лазера от времени, полученные экспериментально в течение одного периода, для четырех режимов работы ЛОНИГ – как в открытом цикле, так и в замкнутом; как при использовании азотной ловушки, так и при ее отсутствии.

В таблице приведены значения концентрации и времен жизни метастабильных атомов для электродов 10 и 15 мм.

Результаты, представленные на рис. 5, демонстрируют значительное уменьшение поглощения лазерного излучения при переходе к замкнутому режиму и при отказе от охлаждения, что объясняется уменьшением концентрации и времени жизни метастабильных атомов аргона, как видно из таблицы. Данный факт подтверждает предположение о наличии во время проведения эксперимента в газовом тракте примесей, приводящих к тушению возбужденных атомов аргона, и, соответственно, к снижению значения концентрации и времени жизни метастабильных атомов.



а



б

Рис. 5. Интенсивность лазерного излучения для электродов различной длины: а – 15 мм, б – 10 мм; 1 – ноль, 2 – замкнутый цикл без охлаждения, 3 – замкнутый цикл с охлаждением, 4 – открытый цикл без охлаждения, 5 – открытый цикл с охлаждением, 6 – ноль

| | Концентрация метастабильных атомов N_0 , $10^{12} \cdot \text{см}^{-3}$ | | Время жизни на нижнем лазерном уровне τ_a , мкс | | Время жизни на усредненном уровне τ_b , мкс | |
|--------------------------|---|-----|--|-----|--|-----------|
| | | | | | | |
| Открытый с охлаждением | 10 | 7,1 | 3,5 | 2,9 | 0,30–0,33 | 0,30–0,33 |
| Открытый без охлаждения | 6,5 | 5,6 | 2,95 | 2,7 | 0,30–0,33 | 0,30–0,33 |
| Замкнутый с охлаждением | 5,5 | 2,3 | 2,5 | 1,8 | 0,30–0,33 | 0,30–0,33 |
| Замкнутый без охлаждения | 2,8 | 0,9 | 1,1 | 1,1 | 0,30–0,33 | 0,30–0,33 |
| Длина электродов, мм | 10 | 15 | 10 | 15 | 10 | 15 |

Заключение

В рамках данной работе на экспериментальной установке ЛОНИГ была организована прокачка газовой среды по замкнутому циклу. В проводимых экспериментах обнаружено уменьшение мощности лазерной генерации при переходе к замкнутому циклу. Для исследования активной среды создана математическая модель, которая позволяет определять значение интенсивности излучения зондирующего лазера после прохождения через активную среду ЛОНИГ при наличии поглощения. Проведены эксперименты, в которых с помощью созданной модели определялись основные параметры активной среды – концентрация и время жизни метастабильных атомов аргона на нижнем лазерном уровне. Продемонстрировано уменьшение данных параметров при переходе от открытого цикла к замкнутому и при отказе от охлаждения газовой системы жидким азотом.

Проведенная работа позволяет сделать вывод о необходимости существенного увеличения чистоты используемого газа и газовой системы для эффективного использования ЛОНИГ в замкнутом режиме.

Список литературы

1. Han J., Heaven M. C., Moran P. J. Demonstration of a CW diode-pumped Ar metastable laser operating at 4 W // *Optics Letters*. 2017. Vol. 42, N 22, P. 4627–4630.
2. Sun P., Zuo D., Mikheyev P.A., Han J., Heaven M.C. Time-dependent simulations of a CW pumped, pulsed DC discharge Ar metastable laser system // *Opt. Express*. 2019. Vol. 27, N 16.
3. Адаменков Ю. А., Горбунов М. А., Калачева А. А., Шайдулина В. А. Генерация на метастабильных атомах аргона на длине волны 912 нм с оптической накачкой / XXVI Нижегородская сессия молодых ученых // *Сборник тезисов*. М.: Издательство «Перо», 2021, С. 261 [Электронное издание], 249–251, ISBN 978-5-00189-421-6.
4. Chen H. Modeling of scaling of a diode longitudinally pumped metastable rare gas with a master oscillator power amplifier // *Optics Express*. 2019. Vol. 27, N 9.
5. Demyanov A. V., Kochetov I. V., Mikheyev P. A. Kinetic study of a cw optically pumped laser with metastable rare gas atoms produced in an electric discharge // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2013. Vol. 46. P. 375202.