
ФИЗИКА

УДК 530.11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗЛУЧЕНИЯ МЕДНОГО ЛАЗЕРА

Савинцев А.П.*, Дышеков А.А., Кяров А.Х.

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

*pnr@kbsu.ru

Изучены некоторые усилительные свойства лазерного активного элемента на парах меди ГЛ-202. Коэффициент усиления излучения в проведенных опытах при оптимальном разогреве активного элемента достигал значения 204 ± 14 единиц.

Ключевые слова: активная среда, активный элемент на парах меди, коэффициент усиления, оптимальный разогрев

DETERMINATION OF SOME CHARACTERISTICS OF COPPER LASER RADIATION

Savintsev A.P., Dyshekov A.A., Kyarov A.Kh.

Kabardino-Balkarian State University

Some amplification properties of the copper vapor laser active element GL-202 were studied. The radiation amplification coefficient in the experiments conducted with optimal heating of the active element reached a value of 204 ± 14 units.

Keywords: active medium, copper vapor active element, gain, optimal heating

Ранее в наших работах [1–2] рассматривались результаты воздействия на ряд диэлектриков индуцированного излучения лазера на парах меди.

Среда, в которой реализовано индуцированное излучение [активная среда (АС)], обладает усилительными свойствами: она способна усиливать проходящий через нее свет [3]. В настоящее время требованиям, предъявляемым к АС, по-видимому, в наибольшей мере отвечают АС на самоограниченных переходах атомов металлов [4–5], в частности, АС на парах меди (АСПМ), которая излучает в видимой области две линии индуцированного излучения. При этом в обычных условиях мощность генерации на зеленой линии 510,5 нм существенно больше, чем на желтой линии 578,2 нм.

Задачей проведенной работы являлось исследование усилительных характеристик медного лазера (АСПМ) для активного элемента (АЭ) ГЛ-202.

Значения усилительных характеристик АСПМ, а также их вариации определяются поведением ряда ее параметров [6]. Например, одним из важнейших параметров АСПМ является температура газа, которая оказывает большое влияние на ее выходные характеристики.

В работе [6] была исследована АСПМ по схеме генератор-усилитель на базе АЭ ГЛ-206Д и ГЛ-206И. Показано, что одной из основных характеристик АСПМ является зависимость выходной мощности излучения $P_{\text{вых}}$ от времени рассинхронизации импульса задающего генератора (ЗГ) относительно импульсов усилителя мощности (УМ). Было найдено, что при временной расстройке импульса ЗГ как в сторону отставания от УМ, так и в сторону его опережения кривая мощности излучения, из-за короткого времени существования инверсии населенностей в АС, падает достаточно резко.

В работе [7] были экспериментально исследованы зависимости коэффициентов усиления АСПМ от мощности входных сигналов. В работе в качестве усилителя использовалась разрядная трубка диаметром 20 мм и длиной 70 см.

На рисунке 1 представлены типичные зависимости коэффициентов однопроходного усиления и плотности мощности излучения на выходе усилителей от плотности мощности входных сигналов. Эти зависимости получены при усилении однородных по распределению интенсивности пучков излучения.

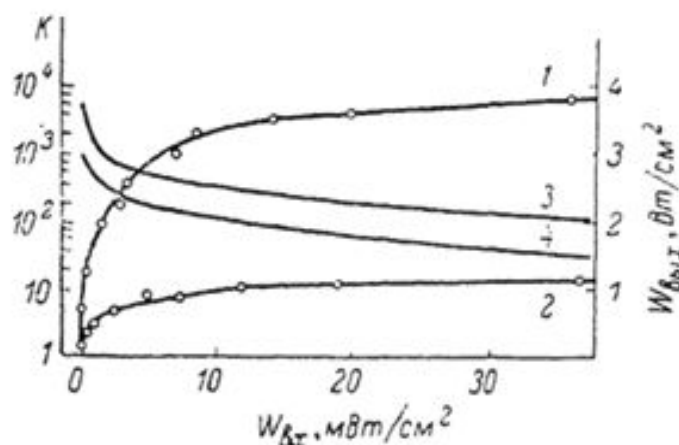


Рисунок 1 – Зависимость плотности мощности на выходе усилителя и коэффициентов однопроходного усиления (K) от плотности мощности входного сигнала для активной среды на парах меди: 1 – выходная плотность мощности излучения для $\lambda = 510,6$ нм, 2 – выходная плотность мощности излучения для $\lambda = 578,2$ нм, 3 – коэффициент усиления для $\lambda = 510,6$ нм, 4 – коэффициент усиления для $\lambda = 578,2$ нм [7]

Наша работа проводилась с АЭ ГЛ-202 [8], который при подаче на него импульсов высокого напряжения (U), примерно через 30 минут после включения, начинал генерировать импульсы индуцированного излучения длительностью 20 нс по полувысоте и около 40 нс по основанию, следовавшие с частотой 8,5–11,5 кГц.

Длина АЭ L_0 составляла 1270 мм, а у нагреваемой части разрядного канала диаметром ($D_{\text{тр}}$) 12 мм длина была $L = 1050$ мм. Тогда $S_{\text{тр}} = 1,13 \text{ см}^2$.

АЭ подключался к стандартному источнику питания ИП-18 [9].

В качестве буферного газа использовался неон. Давление буферного газа в холодном состоянии равняется 25–37 Торр, а в горячем состоянии при температуре около 1600 °С доходит до 145–215 Торр.

Было определено [4, 5, 9], что с увеличением температуры энергосъем АСПМ сначала растет, потом достигает максимума при определенной температуре и определенной концентрации атомов, а затем спадает.

Согласно источнику [10], коэффициент усиления АС (K) прямо зависит от концентрации атомов, поэтому, как видно из работы [11], его поведение определяется разогревом трубки. Но с другой стороны, потенциально возможное возрастание средней мощности ограничивается перегревом активной среды, приводящим к повышенному тепловому заселению нижнего лазерного уровня.

В выполненных экспериментах по изучению усилительных характеристик АЭ обычно использовалась схема, представленная на рисунке 2.

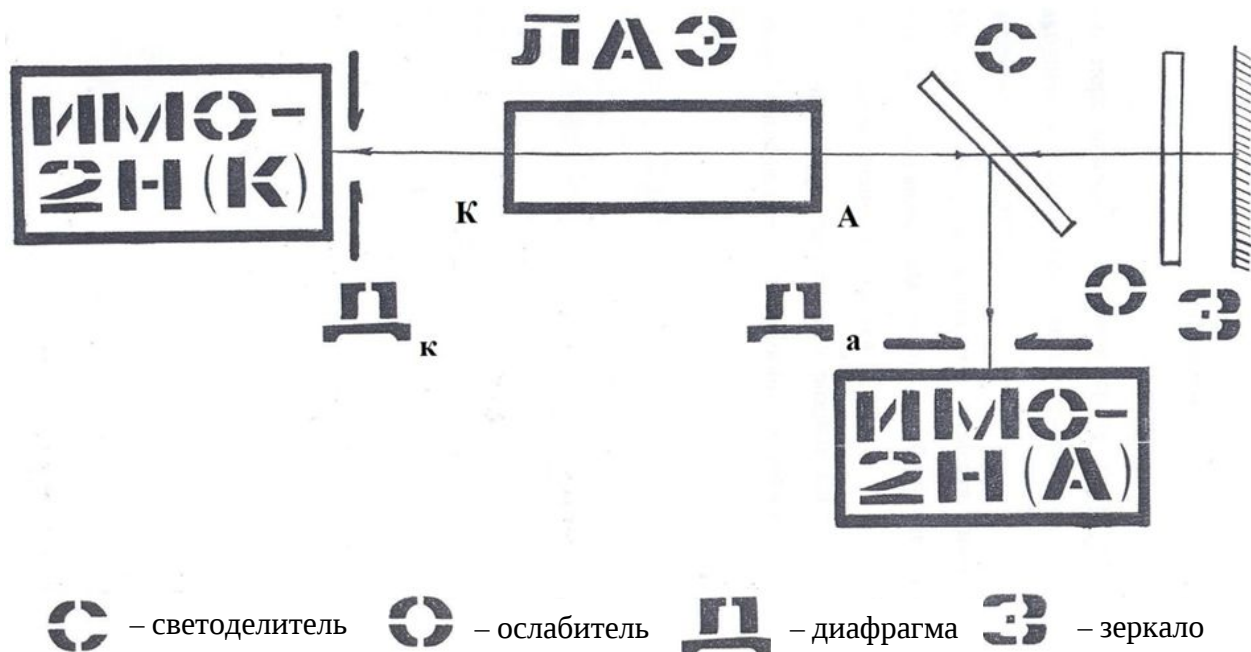


Рисунок 2 – Схема измерений усилительных характеристик лазерного АЭ ГЛ-202

Разрядная трубка посылает вдоль своей оси два (почти) одинаковых световых сигнала: один со стороны анода мощностью (P_a), а другой со стороны катода мощностью (P_k).

Выходящая из АЭ сверхсветимость идет не параллельным пучком, а слегка расходится. Для ГЛ-202, исходя из ее размеров, расходимость сверхсветимости определяется [1] углом

$$\varphi_0 = 2D_{mp} / L \approx 23 \text{ мрад.}$$

Излучение сверхсветимости со стороны катода АЭ попадало на датчик измерителя мощности ИМО (К), расположенный на расстоянии R_k от конца трубки, который замеряет сигнал, идущий со стороны катода.

Излучение сверхсветимости со стороны анода АЭ падало на зеркало, которое располагалось на некотором расстоянии R от ближнего торца трубки, отражалось назад и формировало входящий в АСПМ изучаемый сигнал.

Часть света, идущего на зеркало, отклонялась светоделителем на измеритель мощности ИМО (А) и давала информацию о P_a . Датчик этого измерителя располагался на расстоянии R_a от ближайшего конца трубки. Для упрощения вычислений чаще всего принималось, что $R_k = R_a$.

Изучалось усиление в АС отраженного от зеркала сигнала, т.е. параметры однократно усиленной сверхсветимости (ОУС).

Визуально видно, что пятно сверхсветимости на экране имеет довольно четкие границы, задаваемые φ_0 , поэтому можно считать, что она формируется за счет усиления затравки от дальнего (анодного) конца АЭ и достигает датчика ИМО (К), спустя $[(L + L_0) / 2 + R_k] / c \approx 5,2 \text{ нс}$ после начала формирования P_k (здесь c – скорость света равная $3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$).

Излучение затравки с другого (катодного) конца АЭ достигает зеркала (рисунок 2) за время $[(L + L_0) / 2 + R] / c$, а от него доходит до датчика ИМО (К) за $(L + R_k + R) / c$ (нс), т.е. спустя $[(L + 2L_0) / 2 + 2R + R_k] / c$ (нс) после начала усиления этой (противоположной) затравки.

Таким образом, ОУС поступает на датчик ИМО (К) со сдвигом

$$\Delta t = (L_0 + 2R) / c, \quad (1)$$

относительно соответствующего сигнала сверхсветимости.

Поскольку для ГЛ-202 измеренное время существования активной зоны (время инверсии) достигает 47 нс [12], а в опытах $\Delta t = 6-8 \text{ нс}$, то согласно работам [6] и [13], в выполненных экспериментах ОУС, хоть и со сдвигом (с отставанием), но все же целиком попадает в зону усиления АСПМ ГЛ-202 (рисунок 3).

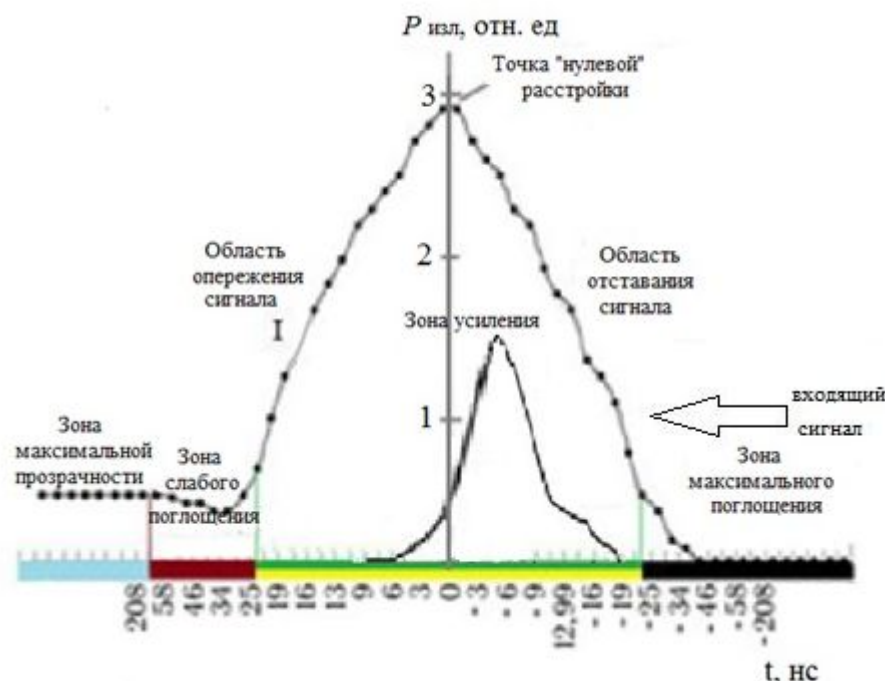


Рисунок 3 – Согласование входного светового импульса и зоны усиления для АСПМ ГЛ-202 в проведенных опытах

Итак, датчик ИМО (К) первые 6–8 нс регистрирует сигнал сверхсветимости, а затем около 40 нс регистрирует сигнал ОУС.

Поэтому при регистрации по измерителю ИМО (К) общего светового сигнала ($P_{об}$) надо учитывать, что он содержит как свечение сверхсветимости, идущее со стороны катода, так и искомый усиленный сигнал.

Вклад небольшого начального «хвоста» сверхсветимости можно оценить, используя результаты точной табуляции сигнала АСПМ, приведенной в источнике [14].

Поскольку размер светового пятна, который уверенно регистрируется измерителем мощности, лежит в пределах от 4 до 12 мм, а у нас более широкие пучки, то перед каждым ИМО устанавливались одинаковые диафрагмы D_a и D_k , размером $D_{диаф} = 10$ мм. При этом диафрагмы имели небольшой наклон для исключения отраженного (паразитного) сигнала, который мог бы исказить результаты измерений.

Прибор ИМО-2Н предназначен для измерения средней мощности лазерного излучения в пределах от $3 \cdot 10^{-4}$ Вт до 100 Вт, в спектральном диапазоне от 0,4 до 10,6 мкм. Предел систематической погрешности измерения мощности согласно паспорту, составляет 5 %.

Светоделитель представляет собой пластину, выполненную из оптического стекла БС-4. Как установлено, она отражает 6–7 % и пропускает 85 % мощности падающего излучения АСПМ.

Интенсивность входного сигнала могла варьироваться постановкой на пути светового пучка того или иного ослабителя мощности.

В качестве ослабителя использовались сочетания БС-4 и неселективных фильтров типа НС толщиной 3 мм из паспортизированного набора стекол. С помощью измерителя ИМО было найдено пропускание каждого из пяти фильтров: НС-1, НС-2, НС-6, НС-7, НС-8.

С этими данными были просчитаны комбинации двойного и тройного сочетаний. В результате был определен набор сочетаний, внутри которого ослабление росло (таблица 1), а пропускание достаточно плавно снижалось от 0,73 до $6,4 \cdot 10^{-3}$. При этом, в таблице 1 учтено двойное прохождение луча через ослабитель.

Таблица 1 – Параметры ослабителей, используемых в опытах

Коэффициент ψ - ослабление (раз)	45	62	70	98	115	125	157
Сочетания фильтров	НС-8	НС-8, БС-4	НС-2, НС-6, БС-4	НС-1, НС-2, БС-4	НС-2, НС-7	НС-1, НС-8	НС-2, НС-7, БС-4

Проводилась градуировка оптической части системы, находилась связь между P_k и P_a при различной температуре разрядного канала. Для этого между светоделителем и ослабителем мощности помещался непрозрачный экран, а затем проводился контрольный разогрев АЭ.

Как было установлено, для любого разогрева трубки $P_k / P_a \approx 1,1$.

Мощности измеряемых сигналов регистрировались после диафрагм датчиками ИМО, как P_k^0 , P_a^0 и $P_{об}^0$. Поскольку $D_{диаф} = 1 \text{ см} = \text{const}$, то можно было легко преобразовать значение мощности сигнала в значение интенсивности излучения по формуле $I = 4P^0 / \pi D_{диаф} = 4P^0 / \pi \text{ (Вт/см}^2\text{)}$.

Отсюда видно, что несложно получить I_k , I_a и $I_{об}$. Из параметра $I_{об}$ с учетом вклада начального «хвоста» сверхсвечивости $\Delta I_{св}$:

$$\Delta I_{св} = \delta \cdot I_k \text{ или } \Delta I_{св} = \delta \cdot I_a, \quad (2)$$

где δ – параметр, получаемый из табулограммы [14], можно найти:

$$I_{вых} = I_{об} - \Delta I_{св}. \quad (3)$$

Были изучены усилительные характеристики ГЛ-202 при вариации параметров, таких как I_k , I_a , $I_{вых}$ и других. При этом $P_{вых} (I_{вых})$ мог формироваться как из P_a (рисунок 2), так и из P_k .

Для расчета эффективного усиления в используемой схеме, согласно источнику [3], с учетом (3), использовались следующие формулы:

$$K = I_{вых} / I_{вх} = (I_{об} - \Delta I_{св}) / \psi I_a \quad (4)$$

или

$$K = (I_{об} - \Delta I_{св}) / \psi I_k. \quad (5)$$

Коэффициент ψ (табл. 1) определяет общее ослабление, за счет которого из I_a или I_k формируется $I_{вых}$.

Параметры P_a (I_a) находились напрямую, P_k (I_k) вычислялся из указанного выше соотношения ($P_k / P_a \approx 1,1$), а параметр $I_{об}$ определялся из соответствующего показания ИМО ($P_{об}^0$).

В проведенных нами экспериментах был изучен коэффициент усиления K в режиме оптимальной температуры АСПМ, когда $\Delta t = 6,0 \text{ нс}$, $U = 7,0 \text{ кВ}$, $I_k = 98 \text{ мВт/см}^2 = \text{const}$, а $I_{вх}$ варьировалось за счет ψ .

Результаты опытов представлены в таблице 2 и на рисунке 4.

Таблица 2 – Характеристики ГЛ-202 в режиме оптимальной температуры АСПМ

ψ	45	98	157
$I_{вых}, \text{ мВт/см}^2$	2,2	1,0	0,56
K	78 ± 5	137 ± 10	204 ± 14

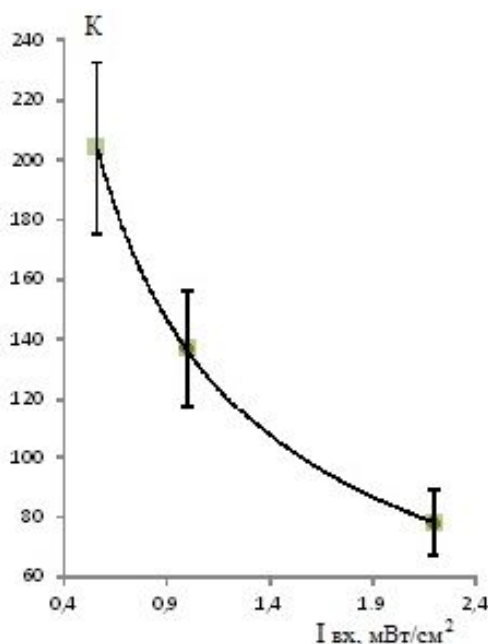


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента усиления от интенсивности входного сигнала для АСПМ ГЛ-202

Согласно *таблицы 2*, в наших опытах максимальное значение $K = 204 \pm 14$.

Как видно, полученные данные хорошо согласуются с источниками [6] и [7] (*рисунок 1*).

По данным работы [9] излишнее повышение температуры T портит разряд, поэтому при росте T разрядного промежутка K будет падать.

Таким образом, в результате экспериментов установлено, что коэффициент усиления излучения может достигать величины 204 ± 14 при оптимальном разогреве активного элемента ГЛ-202.

Библиография

1. Савинцев А.П., Дышеков А.А., Кяров А.Х. Внутривибраторная обработка полиметилметакрилата излучением медного лазера // Известия КБГУ. 2020. Т. 10, № 3. С. 9–18.
2. Савинцев А.П., Дышеков А.А., Кяров А.Х. Тепловое разрушение полиметилметакрилата импульсно-периодическим лазерным излучением // Известия КБГУ. 2020. Т. 10, № 3. С. 28–34.
3. Савинцев А.П., Дышеков А.А. Излучение активных сред и лазеров: учебное пособие. Нальчик: КБГУ, 2024. 70 с.
4. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов-2 / под ред. В.М. Батенина. Т. 1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 544 с.
5. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов-2 / под ред. В.М. Батенина. Т. 2. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. 616 с.
6. Исаев А.А., Леммерман Г.Ю., Петраш Г.Г. Тепловой режим и характеристики генерации саморазогревного лазера на парах меди. // Квантовая электроника. 1986. № 5. С. 1034–1037.
7. Исаков В.К., Калугин М.М., Парфенова Е.Н., Потапов С.Е. Исследование усиления в активных средах на переходах атомов меди и марганца применительно к созданию проекционных систем с усилителями яркости изображения // ЖТФ. 1983. Т. 53, вып. 4. С. 704–714.
8. Беляев В.П., Зубов В.В., Лесной М.А., Лябин Н.А., Чурсин А.Д., Воробьев О.Д. Применение активных элементов импульсных лазеров на парах меди в технологическом оборудовании для контроля изделий электронной техники // Электронная промышленность. 1981. №. 5–6. С. 82–83.
9. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 312 с.
10. Гудзенко Л.И., Яковенко С.И. Плазменные лазеры. М.: Атомиздат, 1978. 256 с.
11. Казарян М.А., Матвеев В.М., Петраш Г.Г. Проекционная система с усилителем яркости // Изв. АН СССР. сер. физ. 1982. Т. 46, № 10. С. 1898–1904.
12. Савинцев А.П., Созаев В.А., Шидов Х.Т. Изучение структуры алмазоподобных пленок на кремнии с использованием лазерного микроскопа // ПЖТФ. 2001. Т. 27, вып. 19. С. 49–52.
13. Лябин Н.А., Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Казарян М.А. Исследование свойств активной среды импульсного лазера на парах меди во времени и разработка на их основе методов оперативного управления параметрами выходного излучения // Наука и образование. 2014. № 7. С. 20–35.
14. Зубов В.В., Лябин Н.А., Чурсин А.Д. Лазер на парах меди с высокостабильным однопучковым излучением и управляемой расходимостью // Квантовая электроника. 1988. Т. 18, № 10. С. 1947–1954.