

Влияние реакторного излучения на работу неодимового лазера на неорганической жидкости

А.Ф.Добровольский, Д.В.Кабаков, А.А.Серёгин, Е.А.Серёгина, Г.В.Тихонов

При облучении лазерной среды нейтронами и гамма-квантами двухзонного реактора БАРС-6 измерены характеристики излучения жидкостного неодимового лазера на основе оксихлорида фосфора. При таком облучении энергия генерации возрастала на 20 % – 30 % по сравнению с энергией генерации в отсутствие облучения. С увеличением дозы облучения лазерной среды наблюдалась тенденция к снижению порога генерации. При одновременной накачке лазерной среды оптическим и радиационным излучением наблюдался переход от режима свободной генерации к режиму генерации мощных импульсов.

Ключевые слова: лазер на основе неорганической жидкости, неодим, облучение, импульсный реактор.

1. Введение

В настоящее время ведутся работы по созданию лазеров с ядерно-оптической накачкой [1 – 3], в которых области, где происходят ядерная накачка и лазерная генерация, пространственно разделены. При этом область ядерной накачки (конвертор) играет роль «ядерной лампы», преобразующей энергию деления ядер в световую энергию, которой затем накачивается активная среда обычного лазера. Поскольку активная среда лазера, как правило, будет находиться в поле мощного реакторного излучения, то понятен интерес к изучению влияния радиационного облучения на работу лазеров на основе конденсированных сред, которые предполагается использовать в лазерах с ядерно-оптической накачкой.

К настоящему времени опубликованы результаты исследований влияния радиационного облучения на работу лазеров на рубине, кристалле ИАГ: Nd³⁺, стеклах, активированных ионами Nd³⁺ [4, 5], а также полупроводниковых лазеров [6]. Эти исследования показали, что наиболее чувствительными к облучению являются полупроводниковые лазеры. Их характеристики начинали ухудшаться при флюенсе нейтронов 10¹³ нейтр./см² [6]. Снижение энергии генерации и рост пороговой энергии накачки для лазера на рубине начинались после облучения рубина излучением с флюенсом 10¹⁵ нейтр./см². При облучении лазерных сред ИАГ: Nd³⁺ и стекла, активированного Nd³⁺, снижение энергии генерации и возрастание порога генерации начинались также при флюенсе 10¹⁵ нейтр./см², но скорость этих изменений была меньше, чем в лазерах на рубине [4, 5]. Достаточно высокая радиационная стойкость стекла с ионами Nd³⁺ позволила использовать его в качестве лазерной среды для лазеров с ядерно-оптической накачкой [2, 3]. В то же время твердо-

тельные лазерные среды при облучении ионизирующим излучением накапливают радиационно-индуцированные дефекты, которые существенно уменьшают время работы этих лазеров. Поэтому более перспективным, на наш взгляд, является использование в ядерно-оптических лазерах конденсированных сред на основе неорганических жидкостей, которые сочетают в себе высокие концентрации активатора и возможность прокачки лазерной среды для удаления продуктов радиолиза [7]. По своим энергетическим характеристикам лазеры на неорганических жидкостях превосходят лазеры на неодимовых стеклах. Однако поведение таких жидкостных лазеров в условиях облучения ионизирующим излучением до сих пор не исследовалось.

В настоящей работе изучается влияние на параметры неодимового лазера на неорганической жидкости POCl₃ – SnCl₄ – Nd³⁺ воздействия на его активную среду мощного реакторного излучения.

2. Методика эксперимента

Экспериментальные исследования были выполнены при облучении лазерной среды нейтронами и γ -квантами двухзонного импульсного реактора БАРС-6 (ГНЦ РФ – ФЭИ). Схема эксперимента представлена на рис.1. В середине между зонами реактора 5 устанавливался жидкостный лазер 1, который состоял из квантрона 2, помещенного в цилиндрический полиэтиленовый замедлитель нейтронов, и зеркал резонатора 3 и 4. Блок питания ксеноновой лампы накачки находился в измерительном зале, отделенном от реакторного зала биологической защитой 14. Зеркала резонатора 3 и 4 имели коэффициенты отражения 0.99 и 0.75 и радиусы кривизны, равные 3 м и бесконечности соответственно. Длина резонатора составляла 40 см. Энергию генерации измеряли калориметром 13. Часть излучения отражалась от диэлектрического зеркала 6 с коэффициентом отражения $R = 0.13$ на длине волны $\lambda = 1.06$ мкм и направлялась зеркалами 8 в измерительный зал. Далее излучение проходило через длиннофокусную линзу 15, отражалось от диэлектрического зеркала 7 ($R = 0.99$ на $\lambda = 1.06$ мкм) и через светофильтр

А.Ф.Добровольский, Д.В.Кабаков, А.А.Серёгин, Е.А.Серёгина, Г.В.Тихонов. ФГУП «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт им. А.И.Лейпунского», Россия, Калужская обл., 249033 Обнинск, пл. Бондаренко, 1; e-mail: seregina@ipre.ru

Поступила в редакцию 14 февраля 2008 г., после доработки – 1 июля 2008 г.

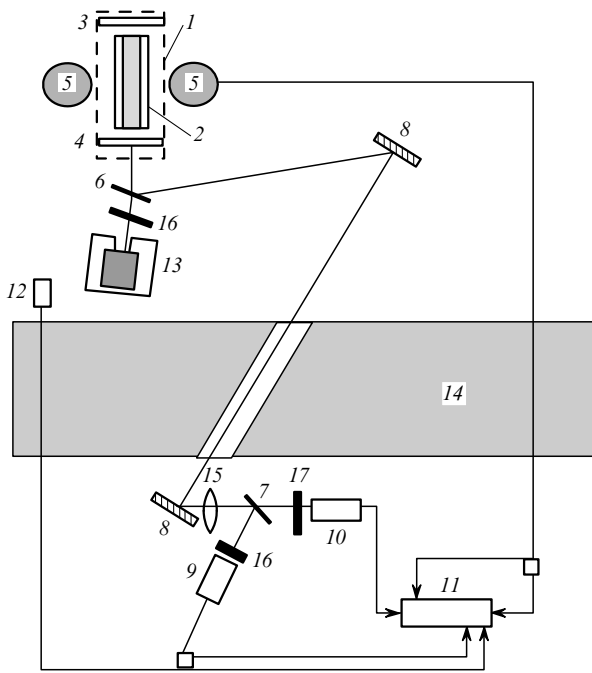


Рис.1. Схема эксперимента в случае, когда жидкостный лазер расположен между активными зонами реактора:

1 – лазер; 2 – квантрон, окруженный полиэтиленовым замедлителем нейтронов; 3, 4 – зеркала резонатора; 5 – активные зоны реактора; 6, 7 – диэлектрические зеркала с $R = 0.13$ и 0.99 соответственно на $\lambda = 1.06$ мкм; 8 – металлические зеркала; 9 – рпн-фотодиод; 10 – фотодиод ФД-24; 11 – запоминающий осциллограф Tektronix TDS 1012; 12 – камера деления; 13 – калориметр ИМО-2Н; 14 – биологическая защита; 15 – линза ($f = 42$ см); 16 – светофильтр ИКС-5; 17 – полосо́вый фильтр с полосой пропускания 360–580 нм.

ИКС-5 фокусировалось на входное окно рпн-фотодиода 9. Фотодиод ФД-24 10 служил для регистрации интенсивности излучения лампы накачки. Интенсивность реакторного излучения регистрировалась с помощью камеры деления 12, которая устанавливалась в такой же полиэтиленовый замедлитель нейтронов, как и квантрон лазера. Импульсы с фотодиодов 9, 10 и камеры деления 12 поступали на входные каналы запоминающего осциллографа Tektronix TDS 1012, который работал в режиме online с персональным компьютером. Запуск системы регистрации осуществлялся с помощью низкопорогового поверхностно-барьерного детектора быстрых нейтронов и γ -квантов, испускаемых реактором.

Остановимся более подробно на устройстве квантрона жидкостного лазера, схема которого показана на рис.2. Внутри керамического посеребренного отражателя 3 цилиндрической формы размещались лазерная кювета с жидкостью 1, ксеноновая лампа накачки 2, окруженная фильтром, и зеркало 4 для вывода излучения лампы на регистрирующую аппаратуру через отверстие во фторопластовом креплении 5. В наших экспериментах использовалась импульсная ксеноновая лампа ИНП-3-7/80А. Для подавления коротковолнового излучения и уменьшения нагрева лазерной матрицы ксеноновая лампа была окружена фильтром из 1%-ного водного раствора K_2CrO_4 , толщина которого составляла 1.5 мм. Изменение интенсивности излучения лампы накачки в зависимости от времени фиксировали с помощью фотодиода ФД-24, подключенного к многоканальному запоминающему осциллографу. Дополнительно изучалось влияние напряжения

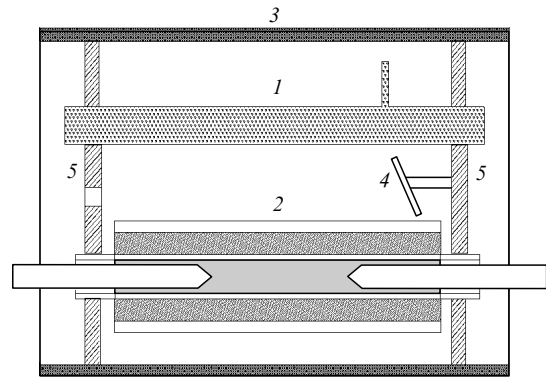


Рис.2. Схема квантрона:

1 – кварцевая кювета с лазерной жидкостью; 2 – ксеноновая лампа с жидкостным фильтром (1%-ный водный раствор K_2CrO_4); 3 – цилиндрический отражатель; 4 – зеркало; 5 – фторопластовое крепление.

на лампе и потока нейтронов на спектр и интенсивность свечения ксеноновой лампы с фильтром. Спектр излучения указанной лампы регистрировался спектрометром AvaSpec 2048FT.

На рис.3 показаны спектры излучения лампы накачки с фильтром из K_2CrO_4 , зарегистрированные в отсутствие кюветы с лазерной жидкостью. Видно, что при одном и том же напряжении на лампе интенсивность её свечения уменьшается в момент действия реакторного импульса, при этом спектр излучения ксенона в области пропускания фильтра меняется мало. Одновременно со спектром измерялись временные зависимости интенсивности свечения лампы с использованием фотодиода ФД-24, при этом также регистрировалось заметное уменьшение интенсивности свечения лампы во время реакторного импульса. Такое же изменение спектра свечения и его интенсивности наблюдалось при уменьшении напряжения на лампе с 1.9 до 1.7 кВ. В результате этих методических исследований было обнаружено, что мощное радиационное облучение импульсной ксеноновой лампы высокого давления ИНП-3-7/80А приводит к снижению интенсивности её свечения. Поэтому в процессе экспериментов наряду с измерением энергии и регистрацией осциллограммы импульса генерации лазера одновременно регистрировали осциллограмму интенсивности свечения ксеноно-

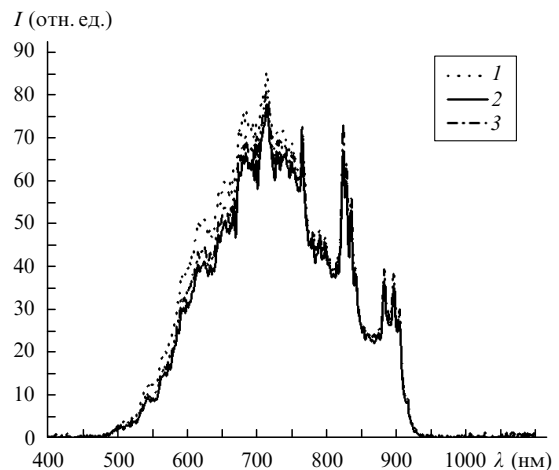


Рис.3. Спектры излучения ксеноновой лампы накачки с фильтром из 1%-ного водного раствора K_2CrO_4 , зарегистрированные до реакторного импульса (1), синхронно с ним (2) и через час после него (3).

вой лампы накачки. Во всех экспериментах расстояние между центрами активных зон реактора было равно 700 мм. В месте расположения активного элемента лазера плотность потока нейтронов составляла $(1.8 \pm 0.1) \times 10^{17}$ нейтр.·см⁻²·с⁻¹, а длительность нейтронного импульса – 180 мкс.

Активный элемент лазера представлял собой кварцевую кювету с плоскопараллельными торцевыми окнами, в которую через специальный патрубок заливалась лазерная жидкость POCl₃–SnCl₄–Nd³⁺. Эта жидкость была приготовлена нами по ранее разработанной методике [8] и имела следующие характеристики: концентрация неодима 1.8×10^{20} см⁻³, время жизни верхнего лазерного уровня иона неодима 250 мкс, линейный коэффициент неактивных потерь не более 10⁻² см⁻¹. Лазерная кювета имела длину 15 см и внутренний диаметр 7 мм. Рабочая длина области активного элемента, засвечиваемая лампой накачки, составляла 10 см.

Дополнительно как перед началом экспериментов, так и несколько раз в процессе их проведения, измерялся уровень фона, наводимого реакторным излучением на калориметр ИМО-2Н, который составил 2.5 ± 0.5 мДж при работе обеих зон реактора. Поправку на фон делали при обработке результатов измерения энергии генерации лазера в момент воздействия ионизирующего излучения.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

При исследованиях, проводимых на реакторе, активной среда жидкостного лазера POCl₃–SnCl₄–Nd³⁺ облучалась нейтронами и γ-квантами. Поскольку в лазерах с ядерно-оптической накачкой предполагается использовать замедленные до тепловых энергий нейтроны, то и в настоящей работе исследования проводились с потоком таких же нейтронов. Именно с этой целью квантрон с жидкостным активным элементом окружали полиэтиленовым замедлителем. Как показали оценки, основной вклад в возбуждение лазерной среды POCl₃–SnCl₄–Nd³⁺ вносят γ-кванты и ядра отдачи реакции ³⁵Cl(n,γ)³⁶Cl. Здесь и далее под возбуждением среды нейтронами или γ-квантами понимается первичное облучение этим излучением. В данных экспериментах энерговыделение в активной среде лазера за один реакторный импульс составляло 2.7 ± 0.1 Дж/см³, что соответствовало поглощенной дозе 1.6×10^3 Гр.

Таким образом, при работе лазера активная среда накачивалась излучением ксеноновой лампы при одновременном воздействии на неё излучения импульсного реактора. В табл.1 представлены результаты измерения энергии генерации E_г лазера на POCl₃–SnCl₄–Nd³⁺, усредненные по шести импульсам облучения лазерной среды реакторным излучением, и результаты измерения E_г при задержке на 200 мкс импульса оптической накачки относительно реакторного импульса, усредненные по

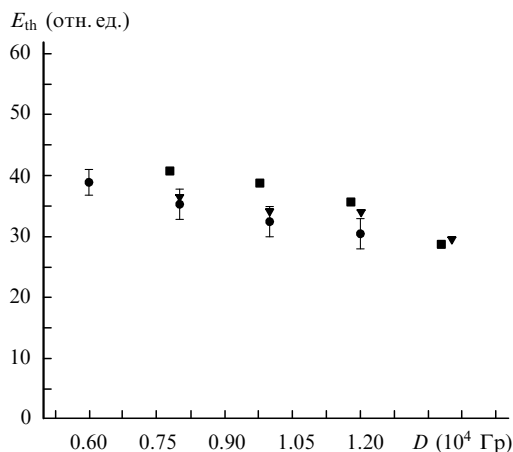


Рис.4. Зависимости пороговой энергии накачки лазера E_{th} от дозы облучения D, полученные до реакторного импульса (●), во время импульса (■) и через час после него (▼).

двум импульсам реактора. Измерения были выполнены до, во время и через час после реакторного импульса. Из табл.1 видно, что энергия генерации во время реакторного импульса была несколько больше, чем до импульса, и существенно больше, чем через час после него. В среднем при одинаковых энергиях накачки это превышение составило 20 % относительно энергии генерации до реакторного импульса и 35 % относительно энергии, измеренной через час после него.

На рис.4 показана зависимость пороговой энергии накачки лазера от поглощенной лазерной жидкостью дозы ионизирующего излучения. Перед каждым реакторным импульсом проводили серию измерений энергии генерации лазера и энергии накачки. На рис.4 приведены также погрешности измерения порога генерации, полученные из разброса результатов измерений перед каждым реакторным импульсом. Наблюдается тенденция к снижению пороговой энергии накачки E_{th} с ростом поглощенной дозы излучения. Эта тенденция указывает, во-первых, на высокую радиационную стойкость активной среды лазера на основе оксихлорида фосфора и, во-вторых, на возможное появление дополнительных источников возбуждения активной среды в облученной жидкости. Такими источниками могут быть долгоживущие нестабильные изотопы, образующиеся в среде в результате радиационного захвата нейтронов, например ³⁶Cl, ¹²¹Sn, ¹⁴⁷Nd, а также продукты радиолиза.

На рис.5,а и б приведены типичные осциллограммы импульсов генерации и накачки до реакторного импульса и во время него. При радиационном облучении среды меняется характер генерации лазера. Из режима свободной генерации при оптической накачке, которая имеет в нашем случае пиковый характер (рис.5,а), лазер переходит в режим генерации отдельных мощных импульсов (рис.5,б). Генерация имела такой характер во всех случаях, когда реакторный импульс совпадал по времени с

Табл.1. Энергия генерации E_г и энергия накачки E_п лазера на POCl₃–SnCl₄–Nd³⁺.

Задержка импульса оптической накачки относительно реакторного импульса (мкс)	E _г (мДж)			E _п (мДж)		
	До реакторного импульса	Во время реакторного импульса	Через час после реакторного импульса	До реакторного импульса	Во время реакторного импульса	Через час после реакторного импульса
0	33.4 ± 1.0	41.7 ± 4.7	25.9 ± 0.3	112.4 ± 12.0	115.7 ± 10.7	97.2 ± 8.4
200	31.5 ± 2.2	36.0 ± 2.5	25.5 ± 1.8	99.0 ± 7.0	98.6 ± 6.8	84.5 ± 5.9

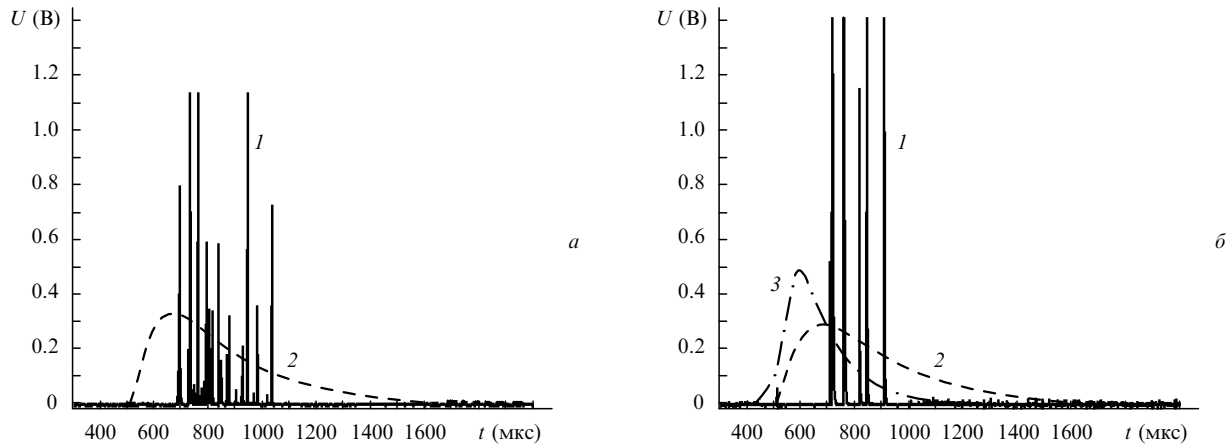


Рис.5. Осциллограммы импульсов генерации лазера на $\text{POCl}_3\text{--SnCl}_4\text{--Nd}^{3+}$ (1) и накачки (2) до (а) и во время радиационного облучения (б); 3 – импульс с камеры деления.

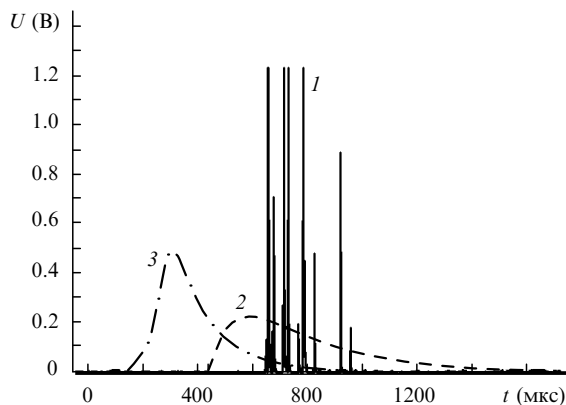


Рис.6. Осциллограммы импульсов генерации (1), накачки (2) и реакторного импульса (3) при задержке на 200 мкс импульса накачки относительно реакторного импульса.

импульсом накачки. Если импульс оптической накачки был задержан относительно реакторного импульса на 200 мкс, то характер генерации менялся (рис.6). Сравнивая рис.5,а и б, можно отметить, что в этом случае режим генерации во время реакторного импульса оказался больше похож на режим свободной генерации, чем на режим генерации отдельных мощных импульсов. Такой характер генерации при облучении среды излучением импульсного реактора качественно можно объяснить появлением в активной среде наведённого радиацией поглотителя излучения со специфическим свойством пассивного модулятора добротности – способностью насыщаться и просветляться.

4. Заключение

Итак, в настоящей работе получены следующие результаты. При синхронном облучении жидкостного лазера оптическим и реакторным излучением энергия лазерной генерации увеличивается на 20 % – 30%. При этом пороговая энергия накачки меняется мало и имеет место

тенденция к её снижению с ростом поглощенной дозы реакторного излучения. Наблюдается переход из режима свободной генерации лазера в режим генерации отдельных мощных импульсов. И наконец, ни в одном эксперименте не наблюдалось срыва генерации из-за воздействия реакторного излучения.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- Лазеры на неорганической жидкости стабильно работают при облучении мощным реакторным излучением без ухудшения генерационных параметров, что указывает на высокую радиационную стойкость лазеров на основе оксихлорида фосфора;

- В условиях мощного реакторного облучения повышается КПД жидкостного лазера;

- Жидкую лазерную среду $\text{POCl}_3\text{--SnCl}_4\text{--Nd}^{3+}$ можно рекомендовать как перспективную среду для создания лазеров и усилителей с ядерно-оптической накачкой.

В заключение авторы выражают благодарность персоналу реактора БАРС-6 за помощь в проведении экспериментов и П.П.Дьяченко за интерес к работе и полезные замечания.

1. Серёгин А.А., Дьяченко П.П., Серёгина Е.А. *Квантовая электроника*, **33**, 503 (2003).
2. Воинов А.М., Довбыш Л.Е., Кривоносов В.Н. и др. *Труды отраслевой конф. «Физика ядерно-возбуждаемой плазмы и проблемы лазеров с ядерной накачкой» (ЛЯН-92)* (Обнинск, 1993, т. 3, с. 224).
3. Voinov F.V., Dovbysh L.E., Krivonosov V.N., et. al. *Proc. VIII Int. Conf. «Energy Nucl. Energy Syst.» (ICENES'96)* (Obninsk, 1997, v. 1, p. 310).
4. Бедиллов М.Р., Хабибулаев П.К., Бейсембаева Х.Б. *ЖТФ*, **51**, 2436 (1981).
5. Бедиллов М.Р., Бейсембаева Х.Б., Саидов Р.П., Хабибулаев П.К. *Укр. физ. журн.*, **26**, 1904 (1986).
6. Журавлева О.В., Курносков В.Д., Швейкин В.И. *Квантовая электроника*, **24**, 773 (1997).
7. Аникиев Ю.Г., Жаботинский М.Е., Кравченко В.Б. *Лазеры на неорганических жидкостях* (М.: Наука, 1986).
8. Серёгина Е.А., Тихонов Г.В. *Химическая физика*, **15**, 116 (1996).