

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР

К.54

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ 38

Б.А.Князев, Б.И.Куликов, С.В.Лебедев,
Е.П.Фокин

МОЩНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА КРАСИТЕЛЯХ С
ПОВЫШЕННЫМ РЕСУРСОМ РАБОТЫ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

ПРЕПРИНТ 80 - 208

БИБЛИОТЕКА
Института ядерной физики
Академии наук СССР
1980 г.



Новосибирск

МОЩНЫЕ ЛАЗЕРЫ НА КРАСИТЕЛЯХ С ПОВЫШЕННЫМ РЕСУРСОМ
РАБОТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Б.А.Князев, Б.И.Куликов, С.В.Лебедев, Е.П.Фокин

А Н Н О Т А Ц И Я

Описаны конструкция и рабочие характеристики трех типов лазеров на красителях с возбуждением импульсными лампами, а также система прокачки активной среды. Исследована фотохимическая устойчивость родамина 6Ж в различных растворителях при фильтрации излучения накачки в разных спектральных диапазонах. Наибольшую устойчивость имеют растворы очищенного родамина 6Ж в изо-пропиловом спирте, помещенные в стеклянную кювету. В этом случае снижение энергии импульса генерации вдвое происходит при интегральном освещении раствора, равном 900 Дж/см^3 , что существенно выше, чем для других мощных лазеров, описанных в литературе. Описан эффективный способ очистки коммерческого родамина 6Ж. Сообщается о длительном применении вышеупомянутых лазеров в различных экспериментах, подтвердившем их высокую надежность и стабильность. Реализован новый количественный метод оперативного измерения пространственного распределения плотности мощности лазерного излучения.

Мощные лазеры на красителях с ламповой накачкой описаны в целом ряде публикаций [1-12]. Наиболее характерными параметрами таких лазеров, определяющимися электрическими и излучательными свойствами импульсных ламп и особенностями фотофизических процессов в растворах красителей, являются: энергия генерации $E_r \sim 1+10$ Дж (при к.п.д. $\sim 0,1-1\%$) и длительность импульса $\tau_r \sim 1+100$ мкс.

Указанные параметры с учетом возможности перестройки длины волны генерации, казалось бы, должны были обеспечить широкое применение лазеров этого типа в самых различных областях. Тем не менее в отличие от маломощных (непрерывных или импульсных) лазеров на красителях, мощные лазеры не получили широкого распространения.

Причина этого очевидна, - всякое устройство может быть практически использовано для каких-либо приложений (то есть в качестве "прибора") лишь в том случае, если его обслуживание не требует, во-первых, слишком большого расхода рабочего времени и высокой квалификации обслуживающего персонала и, во-вторых, если его выходные параметры стабильны в течение длительного времени.

Существующие мощные лазеры на красителях не удовлетворяют этим требованиям, главным образом, вследствие быстрого фотохимического распада активной среды (практически за один импульс), что приводит к непрерывному снижению энергии генерации и к необходимости частой замены дорогостоящей активной среды [13-16]. Поэтому основной проблемой является проблема фотохимической устойчивости, решению которой мы уделили особое внимание.

В течение многолетней эксплуатации лазеров на красителях нами были отработаны несколько простых и надежных их конструкций, удобных в работе и не требующих сколь-нибудь значительных усилий при их обслуживании. Их зеркала не требуют частой вставки, а простая система прокачки позволяет работать с достаточно высокой частотой повторения.

В настоящей работе приводятся характеристики трех типов лазеров. Все эти лазеры в течение длительного времени применя-

лись в различных экспериментах [17-21]. В наши цели не входило получение предельных параметров или рекордных к.п.д. Основное достоинство этих лазеров — возможность длительной работы без изменения их характеристик.

2. Конструкция лазеров

Нами использовались три принципиально различных конструкции лазеров, ниже для простоты обозначаемые Л1, Л2, Л3 (рис.1). Основные характеристики лазеров сведены в Таблицу 1, а некоторые параметрические зависимости приведены в Приложении 1.

Таблица 1. Параметры лазеров при работе на растворах родамина 6Ж в изо-пропиловом спирте

Параметр	Л1	Л2	Л3
Тип лампы	ИФП-1200-2	ИФП-5000	коаксиальная
Кол-во ламп	2	8	1
E_n^{max} , кДж	0,5	10	3
$\tau_n^{(1/2)}$, мкс	13	50	4
E_r^{max} , Дж	1	2,5	8
$\tau_r^{(1/2)}$, мкс	10	8	4
η_r , %	0,20	0,025	0,27
размер кюветы, мм	$\varnothing 7 \times 120$	4x80x250	$\varnothing 8 \times 320$
объем кюветы (см ³)	4,6	80	16
Кэфф. отраж. выходн. зеркала, %	47	40	4
Емкость, мкф	6	800	8
U, кВ	13	5	27
Отражатель	Ag	Ag	MgO

Первый тип лазера (Л1) отличается максимальной простотой геометрии. Источником накачки в нем служат стандартные импульсные лампы ИФП-1200¹⁾. При энергии генерации, достигающей одно-

1) Заметим здесь, что аналогичная конструкция с лампами ИФП-2000 более громоздка и имеет меньший к.п.д.

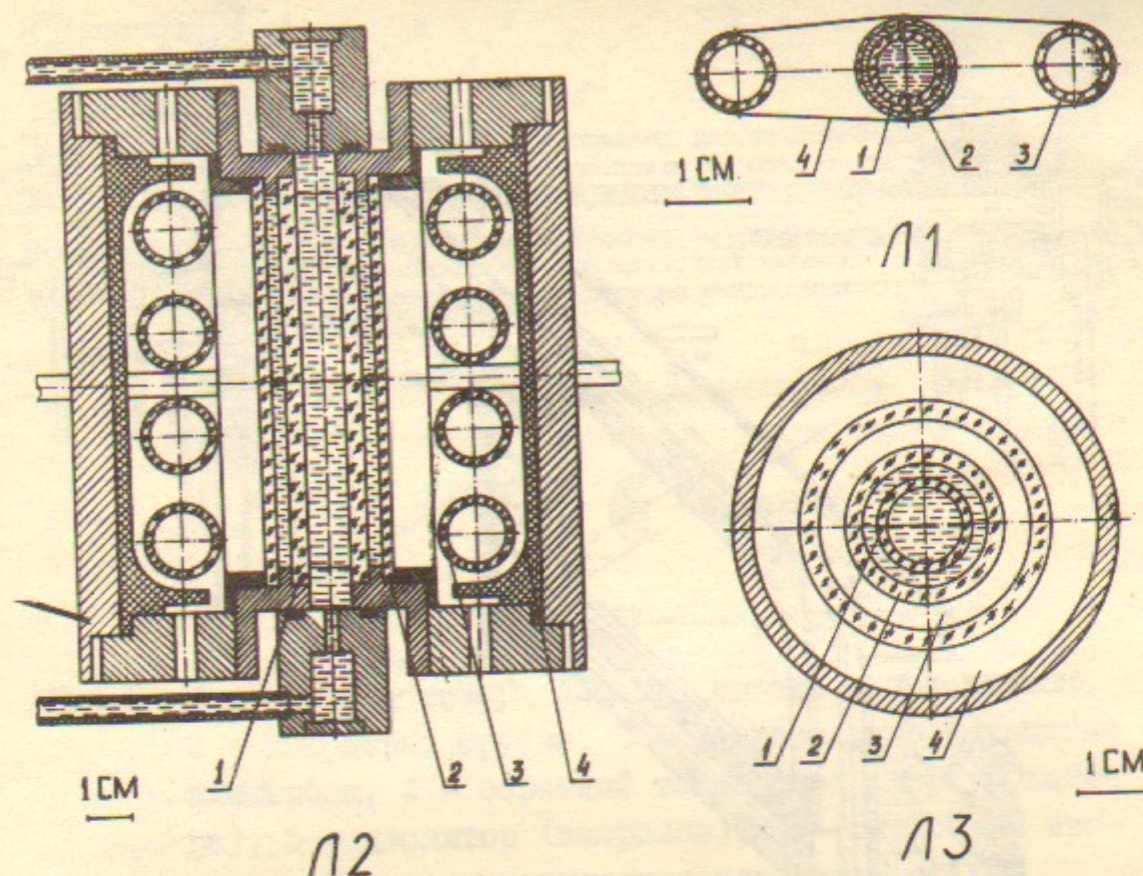


Рис.1. Схема устройства лазеров (поперечные сечения).
1 — кювета с красителем, 2 — жидкостный фильтр, 3 — импульсная лампа, 4 — отражатель

го джоуля, лазер имеет малогабаритную систему питания, не нуждается в вакуумной и газовой системах и поэтому может широко применяться для самых разнообразных целей.

Лазер Л2 имеет плоскую геометрию и большой объем активной среды. Последнее обстоятельство приводит к снижению плотности мощности излучения накачки, чем и обусловлен, повидимому, низкий к.п.д. Применение данного лазера оправдано в тех случаях, когда требуется получить прямоугольный пучок большого сечения.

В лазере Л3 источником излучения накачки служит откачиваемый коаксиальный разрядный промежуток между двумя кварцевыми трубками, окруженный снаружи спрессованным порошком окиси магния. Малая индуктивность промежутка и схемы питания и небольшой объем внутри отражателя из MgO позволяют достичь высо-

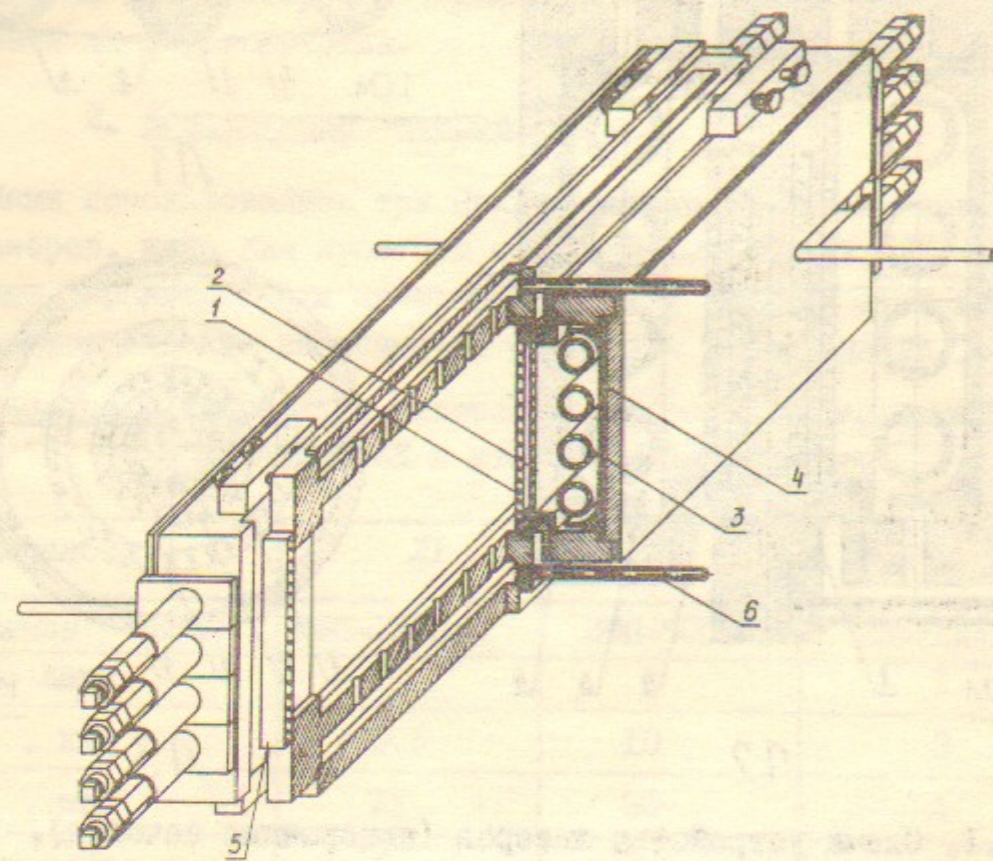


Рис.2. Конструкция лазера Л2. 1 - кювета переменной толщины (0-8мм), 2 - жидкостный фильтр - охладитель, 3 - лампы ИФП-5000, 4 - алюминиевый отражатель, 5 - выходное окно, 6 - трубка для подачи активной среды.

кой плотности мощности накачки, а, следовательно, больших значений энергии генерации при неплохом к.п.д.

Резонаторы всех лазеров образованы плоскими диэлектрическими зеркалами, причем в лазерах Л1 и Л3 зеркала могут одновременно служить и окнами кюветы. Одно из зеркал резонатора - "глухое", а оптимальные коэффициенты отражения выходного зеркала приведены в Таблице I. Максимальная энергия генерации коаксиального лазера достигается, когда выходным "зеркалом" служит плоскопараллельная кварцевая подложка. Используя выносные зеркала и варьируя их коэффициент отражения, можно управлять расходимостью лазерного излучения за счет снижения энергии генерации (см. Приложение I).

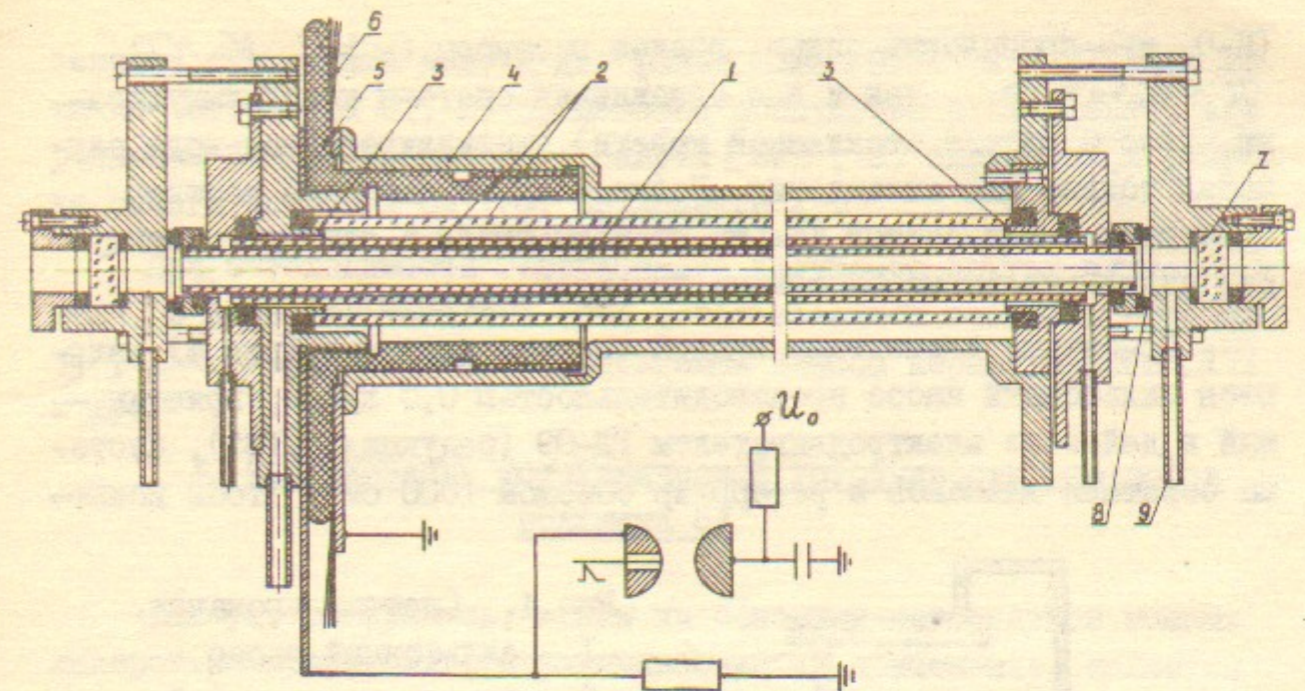


Рис.3. Конструкция лазера Л3. 1 - кювета с красителем, 2 - кварцевые трубки, 3 - коаксиальные кольцевые электроды, 4 - обратный токопровод (корпус лазера), 5 - изолятор (капролон), 6 - пленочный изолятор, 7 - диэлектрическое зеркало $R \approx 100\%$, 8 - уплотнение из силиконовой резины, одновременно служащее упругим элементом юстировочного устройства, 9 - трубка для прокачки раствора красителя, 10 - токоподводящие медные шины.

Оперативный контроль расходимости и пространственного распределения плотности мощности генерируемого излучения осуществлялся новым методом с помощью "сэндвичей" из алюминированного лавсана. Подробности метода приведены в Приложении 4.

Юстировка зеркал резонатора производится с помощью простого и, как показала практика, надежного устройства, показанного на рис.3. Упругим элементом служит уплотнение из силиконовой резины. Юстировка резонатора не нарушается в течение сотен импульсов за несколько недель работы.

Во всех трех типах лазеров растворы красителей находятся в кварцевой или стеклянной кювете. Между кюветой и лампами накачки помещается либо жидкостный фильтр, служащий как для исключения ультрафиолетовой части спектра излучения накачки

(H_2O , изо-пропиловый спирт, водные растворы $CuSO_4$, $NaNO_3$, $C_2F_5(CN)_2$ и др.), так и для охлаждения системы между импульсами, либо (в случае стеклянной кюветы) дистиллированная вода, служащая только для охлаждения. После каждого импульса раствор красителя и жидкостный фильтр прокачиваются в замкнутых контурах индивидуальными системами прокачки.

Основными элементами каждой системы прокачки (рис.4) являются сильфонный насос производительностью 0,5 л/мин, приводимый в действие электродвигателем РД-09 (редукция 1/137), система обратных клапанов и резервуар объемом 1000 см³. Чтобы исклю-

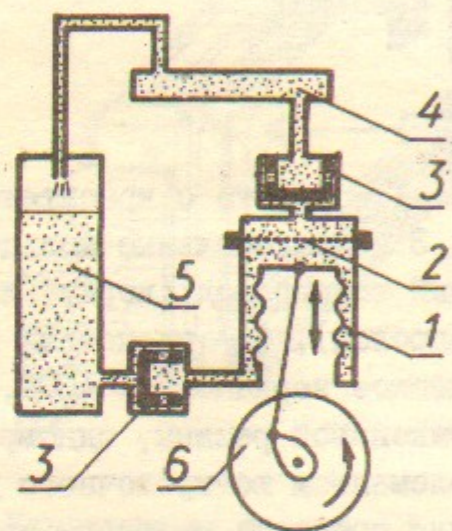


Рис.4. Система прокачки.
1 - сильфонный насос,
2 - фильтр из пористой нержавеющей стали ФНС-4,
3 - обратные клапаны,
4 - лазерная кювета (или рубашка с жидкостным фильтром),
5 - резервуар,
6 - электродвигатель

чить попадание макроскопических примесей растворы прокачивались через фильтр из пористой нержавеющей стали с размером пор ~ 4 мкм.

Как в системе прокачки, так и в конструкциях лазеров, используются только материалы, не вносящие загрязнений в растворы, - нержавеющая сталь, тефлон, кварц, стекло и силиконовая резина.

Применение системы прокачки позволяет стабильно получать максимальную (для заданной энергии накачки) энергию генерации при частоте повторения 1 импульс в 5 минут, но позволяет работать и с частотой 1 импульс в 15 секунд за счет некоторого уменьшения энергии генерации и увеличения расходимости.

Основными факторами, обеспечивающими стабильную долговременную (несколько тысяч импульсов) работу без смены раствора, являются при работе на родамине 6Ж (\equiv Rhodamin G): 1) исполь-

зование стеклянной кюветы для фильтрации УФ-части излучения накачки (см. раздел 3), 2) применение в качестве растворителя для родамина 6Ж изо-пропилового спирта [22], 3) специальная очистка самого родамина 6Ж (см. Приложение 2).

При необходимости генерировать излучение других длин волн, в качестве активных сред использовались растворы родамина В, Na - флуоресцеина, красителей класса керамидонинов [17] и др.

3. Исследование фотохимической устойчивости растворов родамина 6Ж

Как уже говорилось, одним из основных недостатков мощных лазеров на красителях, ограничивающим их применение, является низкая фотохимическая устойчивость активных сред. И хотя благодаря целому ряду работ, [14, 23-30] и др., в которых исследовались кинетика и механизмы фотохимических процессов, определенный уровень понимания уже достигнут, тем не менее он еще далек от полноты.

Особый интерес представляет фотохимическая устойчивость растворов родаминов 6Ж и Ж (6G); до сих пор являющихся наиболее часто используемыми красителями.

В работе [22] нами было показано, что растворы родамина 6G - экстра фирмы Bayer в изо-пропанолу обладают существенно более высокой фотохимической устойчивостью, чем обычно используемые этанольные растворы. При дальнейших исследованиях оказалось, что этот краситель был недостаточно чист. Поэтому последующие более подробные исследования были выполнены с растворами очищенного (Приложение 2) родамина 6Ж. Специальные контрольные опыты показали, что генерационные характеристики растворов этого красителя, как минимум, не уступают генерационным характеристикам растворов красителя Rhodamin 6G Eastman Kodak.

Исследования генерационных характеристик растворов родамина 6Ж в зависимости от номера импульса при фильтрации излучения накачки в разных спектральных диапазонах проводились на лазере Л. Рабочий объем кварцевой кюветы с красителем $V_k = 4,6 \text{ см}^3$. После каждого импульса краситель перемешивался, в контакте с

атмосферой, с красителем из небольшого резервуара (описанная выше системы прокачки красителя была отключена, чтобы ограничить полный объем исследуемого раствора красителя и наблюдать эффекты фотодеградации за ограниченное число импульсов). Полный объем раствора красителя составлял 18 см^3 . В качестве растворителя использовался изо-пропиловый спирт марок х.ч. или ч.д.а. Жидкостный фильтр (толщина 2 мм) общим объемом 1000 см^3 прокачивался после каждого импульса в замкнутом контуре. Каждый последующий импульс производился только после полного восстановления оптической однородности активной среды, что контролировалось с помощью He-Ne лазера по восстановлению картины концентрических колец при интерференции его излучения, отраженного от обеих зеркал резонатора лазера Л. В эксперименте одновременно регистрировались - энергия генерации E , форма импульса генерации и спектр генерации.

Зависимости энергии генерации от номера импульса N приведены на рис.5. Спектры поглощения растворителей и жидкостных фильтров, снятые на спектрофотометре Shimadzu UV-360, показаны на рис.6.

Из рисунка 5 хорошо видно, что, если излучение накачки проходит через водяной фильтр, энергия генерации экспоненциально падает и к 8 импульсу генерация прекращается. Если в качестве фильтра использовать изо-пропанол, энергия генерации уменьшается гораздо медленнее, что указывает на важную роль поглощения УФ-излучения накачки самим растворителем. Если фильтрами служат CuSO_4 или NaNO_3 , исключается поглощение излучения накачки третьим синглетом S_3 родамина 6Ж, а стеклянный фильтр ограничивает поглощение света вторым синглетом S_2 . Фотоустойчивость раствора в этих случаях все больше возрастает, тогда как начальная энергия генерации практически одинакова при всех фильтрах. На рис.7 показана интегральная величина освечивания, отнесенная к полному объему красителя, при которой величина E падает вдвое, в зависимости от границы пропускания фильтра λ_f .

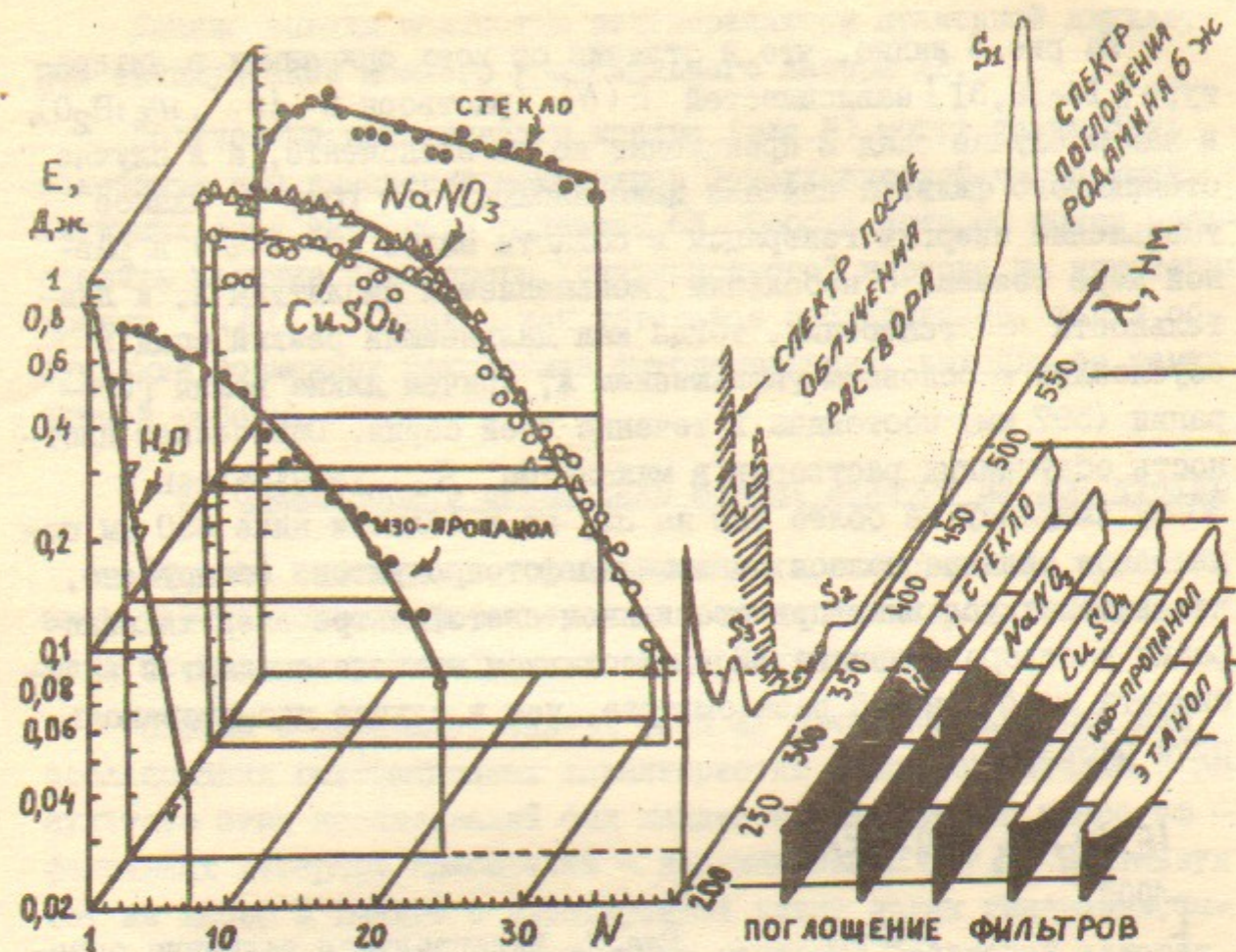


Рис.5. Зависимость энергии генерации E раствора родамина 6Ж в изо-пропаноле ($C = 1,8 \cdot 10^{-4}$ моль/л) от номера импульса N . Освечивание за импульс составляло 110 Дж/см^3 (по энергии, запасенной в конденсаторе). Справа схематически показаны спектры поглощения фильтров и спектр поглощения родамина 6Ж в изо-пропаноле. Знаком S_i указаны пики поглощения первых трех синглетов родамина 6Ж.

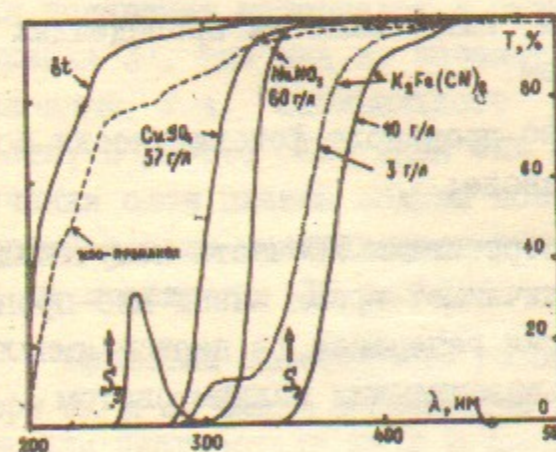


Рис.6. Пропускание $T(\lambda)$ водных растворов CuSO_4 , NaNO_3 , $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$, а также этанола и изо-пропанола. ($d = 4 \text{ мм}$). Стрелки указывают положение 2-го и 3-го синглета в спектре поглощения родамина 6Ж в изо-пропаноле.

Из рис.5 видно, что в отличие от всех описанных в литературе [14-16,31] зависимостей $E(N)$ (растворы в Et , $\text{Me}:\text{H}_2\text{O}$), в нашем случае спад E происходит не по экспоненте, а в случае стеклянного фильтра вначале даже наблюдается рост E . Слабое уменьшение энергии генерации в области плато (CuSO_4) в равной мере связано с небольшим уменьшением и амплитуды A , и длительности τ генерации, тогда как дальнейший резкий спад E обусловлен в основном уменьшением A , причем длина волны генерации (597 нм) постоянна в течение всей серии. Оптическая плотность облученных растворов в максимуме S_1 уменьшалась к 30-му импульсу не более чем на 3%, но в области ниже 350 нм появлялись сильные полосы поглощения фотопродуктов. Обнаружено, что в наших условиях при стеклянном светофильтре энергия генерации раствора родамина 6Ж в абсолютном этаноле спадает в зависимости от N в 1,5 раза быстрее, чем в случае изо-пропанольного раствора.

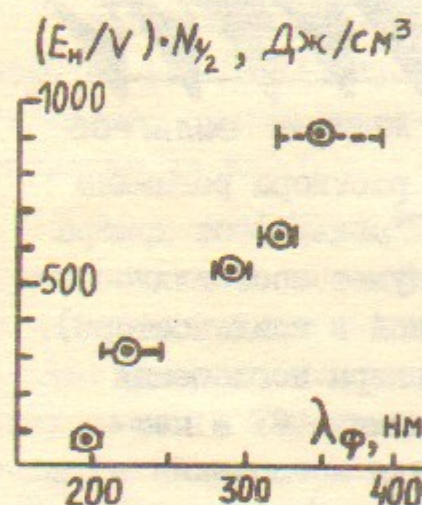


Рис.7. Интегральная величина освещения, соответствующая падению энергии генерации вдвое, для разных фильтров.

Основные практические выводы, вытекающие из проведенных экспериментов, состоят в следующем:

- 1) растворы родамина 6Ж в изо-пропанолe фотохимически более устойчивы, чем растворы в этаноле;
- 2) использование фильтров, обрезающих УФ-часть излучения накачки более чем на порядок увеличивает время жизни изо-пропанольных растворов; при этом энергия генерации (в первом импульсе) практически та же, что и при возбуждении полным светом лампы.

Данные выводы полностью подтверждаются практикой двухлетней эксплуатации мощного коаксиального лазера ЛЗ.

Полученные кинетические кривые (рис.5) могут также быть полезными при выяснении механизмов фотохимической деградации активных сред на основе родамина 6Ж. Особый интерес может представить наличие некоторого "индукционного" периода на некоторых кривых $E(N)$. Однако, как детальное исследование, так и обсуждение возможных механизмов фотодеградации, выходят за рамки данной работы.

4. Практическое применение мощных лазеров на красителях

Высокая надежность, стабильность характеристик и простота эксплуатации описанных лазеров позволили нам широко использовать их в самых разнообразных экспериментах.

Первая модификация лазера типа ЛП была использована для исследования генерационных характеристик новых красителей. В результате этих исследований был найден новый большой класс эффективных лазерных красителей — керамидинов [17]. Используя тот же лазер в режиме с перестройкой длины волны генерации, были проведены измерения оптического усиления растворов хелатов европия при возбуждении последних импульсным электронным пучком [19].

Лазер ЛП имеет также хорошие перспективы использования в качестве источника света в теневого приборах и приборах для измерения распределения напряженности электрического поля в жидкостях по эффекту Керра [20].

Кроме того все перечисленные лазеры могут быть применены для испарения материалов в самых различных устройствах (см. Приложение 3), так как их параметры естественным образом отвечают условиям, т.н. "оптимального режима испарения" [32]. В частности, в работе [21] нами был предложен и реализован метод получения слоя плазмы вблизи поверхности в вакууме, в котором на первой стадии материал поверхности испаряется излучением лазера на красителе (Л2 или Л3).

Применяя селективные резонаторы и варьируя красители, лазеры ЛП и ЛЗ можно использовать также в качестве источников света для диагностики газа и плазмы методом резонансной флуоресценции [33].

ПРИЛОЖЕНИЕ I. Некоторые параметрические зависимости

В данном разделе приводятся некоторые графические зависимости, знание которых часто бывает необходимым при практическом использовании лазеров. Материал носит справочный характер.

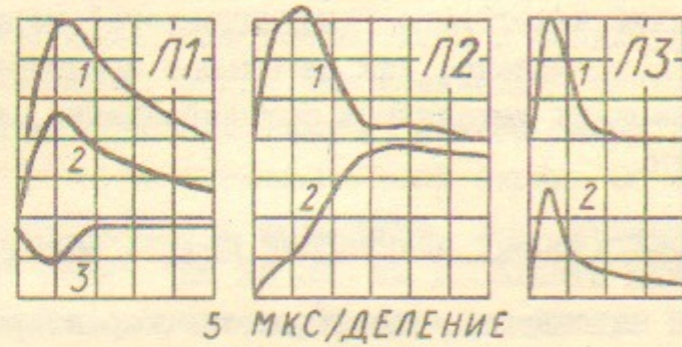


Рис.8. Осциллограммы импульсов генерации (1), импульсов излучения лампы накачки (2) для трех типов лазеров. (3) - разрядный ток через лампу ИФП-1200.

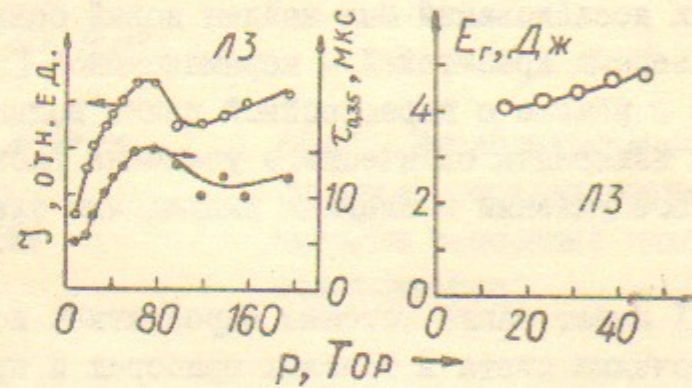


Рис.9.а) Освечивание за импульс ($\int I dt$) коаксиальной лампы лазера ЛЗ (○) и длительность этого импульса (●) при изменении давления ксенона $E = 0,9$ кДж. б) Изменение энергии генерации с давлением.

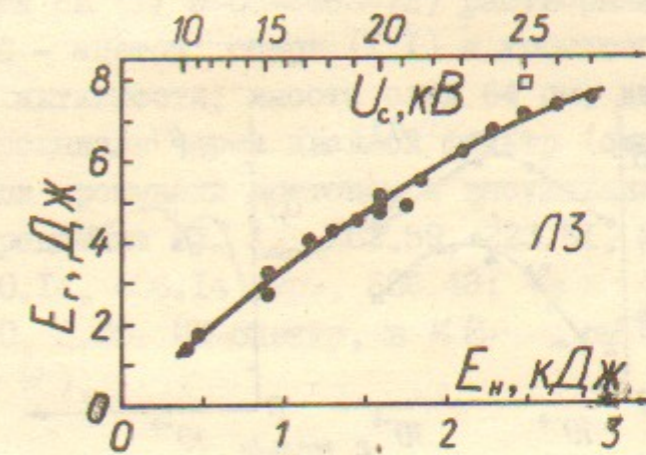


Рис.10. Энергия генерации лазера ЛЗ в зависимости от энергии накачки. $p_{Xe} = 38$ Тор, $c = 2 \cdot 10^{-4}$ моль/л, $R_{вых} \approx 4\%$, стеклянная кювета. Расстояние "глухого" зеркала от окна кюветы $l = 4$ см. Квадратная точка получена при более коротком резонаторе.

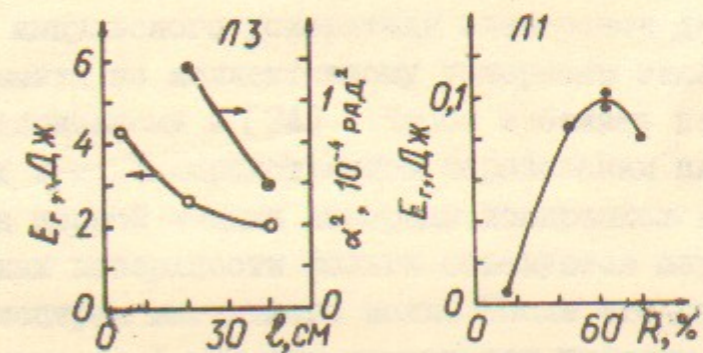


Рис.11.а) Энергия генерации (○) и расходимость излучения (●) лазера ЛЗ в зависимости от расстояния l 100% зеркала от окна кюветы; вторым "зеркалом" служит другое окно кюветы.

$E_n = 1,3$ кДж, $p_{Xe} = 60$ Тор.

б) Энергия генерации лазера Л1 в зависимости от $R_{вых}$ ($R_2 = 100\%$).

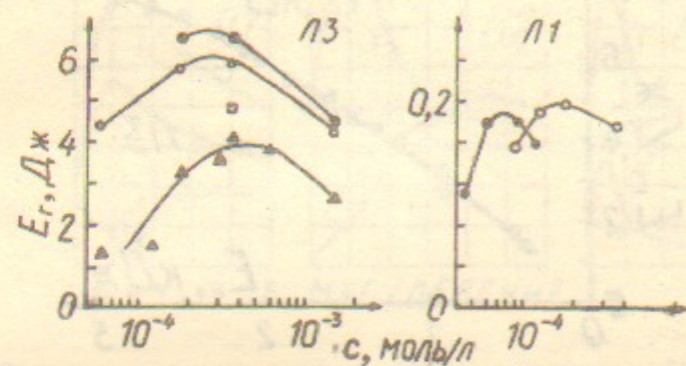


Рис.12. Энергия генерации в зависимости от концентрации.

- а) ЛЗ, родамин 6Ж в изо-пропаноле, $E_H = 2$ кДж, $p_{\text{хе}} = 70$ Тор, $\Delta - R_2 = 50\%$, $\varnothing_{\text{кюв}} = 8$ мм, $\square - R_2 = 30\%$, $\varnothing_{\text{кюв}} = 8$ мм; $\circ - R_2 \approx 4\%$, $\varnothing_{\text{кюв}} = 6$ мм, $\bullet - R_2 \approx 4\%$, $\varnothing_{\text{кюв}} = 8$ мм.
- б) Л1, $E_H = 500$ Дж, Rhodamin 6G (Bayer) в изо-пропаноле (\circ) и в этаноле (\bullet).

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Очистка родамина 6Ж

4 г родамина 6Ж (ТУ 6-09-2463-72) растворяли в 80 мл смеси растворителей - ацетон: спирт (1:1) и хроматографировали на Al_2O_3 (II ст. активности; высота слоя 64 см, диаметр - 2.3 см). Раствор отфильтровывали через двойной фильтр (синяя лента) и упаривали. Осадок промывали ацетоном и высушивали на воздухе. Получили 3.3 г родамина 6Ж. $\lambda_{\text{макс}}$ 202.59, 223.61, 248.50, 279.64, 291.37 пер., 350.14, 506.14 пер., 536.48; $\lg \epsilon$ 4.64, 4.48, 4.60, 4.23, 4.00, 5.00. ИК-спектр, в KBr , см^{-1} : 1715с (C=O), 3250 ушир. (N-H).

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Применение мощного лазера на растворе родамина 6Ж для получения локализованного облака паров вблизи поверхности в вакууме

Во многих приложениях возникает необходимость получения в определенном месте вакуумного объема строго локализованного облака паров с заданным составом элементов, - в ионных источниках, масс-анализаторах, при создании газовых мишеней. В частности, такая необходимость появляется при реализации способа получения [21] плазменного слоя в магнитном поле вблизи анодной фольги мощного импульсного ускорителя электронов для осуществления эксперимента по коллективному ускорению тяжелых ионов по методу, предложенному в [34]. Чтобы избежать неоднородностей, неизбежных при непосредственном образовании плазмы в магнитном поле, на первой стадии лазерным испарением в одной или нескольких точках поверхности фольги образуется пар, свободно расширяющийся поперек магнитного поля. После его расширения до нужного размера (~ 1 см) пар ионизуется внешним импульсом ультрафиолетового излучения.

"Оптимальный" режим испарения соответствует такой поглощенной плотности мощности $F_{\text{онт}}$ лазерного излучения, когда перемещение δ фронта испарения равно перемещению за время импульса лазера τ температурного фронта в материале мишени. При больших и меньших F эффективность испарения уменьшается, причем дальнейший рост F приводит к лазерному пробою в парах.

Оптимальная плотность мощности равна $F_{\text{опт}} \approx 1,7 H \rho \sqrt{\frac{a}{\tau}}$ [32], где H - удельная теплота испарения, ρ - плотность, a - коэффициент температуропроводности материала мишени. Полная поглощенная энергия E , необходимая для испарения N_a атомов мишени, определяется соотношением $E = F_{\text{опт}} S \tau = H N_a m_a$, где S - облучаемая площадь, а m_a - масса атома мишени. Глубина испарения $\delta \sim \sqrt{a \tau}$. Используя справочные данные, приведенные в таблице 2, можно легко вычислить параметры оптимального испарения наиболее интересных материалов.

Наиболее "жестким" параметром большинства лазеров является длительность импульса генерации, поэтому, взяв для примера титан, сведем в таблицу 3 характерные параметры оптимальных режимов испарения в зависимости от τ . Площадь облучения однозначно определяется требуемым количеством испаренных атомов.

Таблица 3. Режимы оптимального испарения Ti.

τ , мкс	0,1	1	4	10	100
$F_{\text{опт}}$, МВт/см ²	40	12	6	4	1
δ , мкм	0,6	1,7	3,5	5,5	17
$N_a = 10^{19}$, E=7 Дж	200	60	30	20	6
$N_a = 10^{18}$, E=0,7 Дж	20	6	3	2	0,6
$N_a = 10^{17}$, E=0,07 Дж	2	0,6	0,3	0,2	0,06

Из Таблицы 3 видно, что уменьшение длительности импульса приводит к увеличению отношения площади испаряемой поверхности к испаряемому объему, а следовательно, и количества в паре примесей ранее адсорбированных поверхностью. Увеличение длительности импульса с одной стороны требует уменьшения площади фокусировки, что не всегда осуществимо для мощных лазеров с их большой расходимостью, с другой, - не позволяет образовать облако пара размером ~ 1 см, т.к. типичные скорости разлета пара ~ 10^5 см/с. Для получения $N_a \sim 10^{17} + 10^{19}$ наиболее подходящими являются лазеры с микросекундной длительностью импульса и энергией 0,1-10 Дж. Лазером, для которого такие параметры

Таблица 2

Элемент	Li	Be	B	C	Na	Mg
Z	3	4	5	6	11	12
A	7	9	10,8	12	23	24,3
I_i , эВ	5,39	9,32	8,30	11,3	5,14	7,64
λ_i , Å	2299	1330	1493	1097	2410	1622
ρ , г/см ³	0,53	1,84	2,34	2,25	0,97	1,74
ρ , 10^{22} ат/см ³	4,54	12,3	13	11,3	2,5	4,3
$T_{пл}$, °К	454	1556	2303	3873	371	923
$\Delta H_{пл}$, эВ/атом	0,03	0,13	0,23		0,03	0,09
T_u , °К	1590	2750	4173	3925	1163	1393
ΔH_u , эВ/атом	1,54	3,06	5,62	9 (судл)	0,93	1,37
k , Дж/см.с.°К. (К)	0,71 (454т) 0,43 (454ж) 1,1 (2000)	1,8 (300) 0,83 (1073) 0,63 (1773)	0,14 (500) 0,06 (1000)	0,8 (500) 0,5 (1500) 0,4 (2000)	1,33 (300)	1,65 (273) 0,96 (1173)
Дж/г.°К	3,9 (400) 4,1 (1000)	2,2 (400) 3,0 (1000) 3,6 (1500)	1,67 (500) 2,4 (1000)	1,2 (500) 1,7 (1000) 2 (2000)	1,37 (400) 1,26 (1000)	1,08 (400) 1,18 (600)
$k/c_p \rho$, см ² /с	0,34 (454т) 0,21 (454ж)	0,44 (300) 0,15 (1000) 0,09 (1500)	0,036 (500) 0,01 (1000)	0,3 (500) 0,09 (1000)	1 (300)	0,88 (273) 0,48 (1173)
σ , $10^4 \text{ см}^{-1} \text{ см}^{-1}$	7,9 (373) 2,2 (500ж)	3,6 (273)		0,13 (273) 0,11 (1000) 0,09 (2500)	24 (293) 15 (372 т) 10 (372 ж)	25 (273)
$F_{\text{опт}} \cdot \sqrt{\tau}$, $10^4 \text{ Дж/см}^2 \sqrt{\text{с}}$	1,36	3,1	2	8,3	0,63	1,1

Z	Al	K	Ca	Ti	V	Cr
13	19	20	22	23	24	
A	27	39	40	48	51	52
$I_i, \text{эВ}$	5,98	4,34	6,11	6,83	6,74	6,76
$\lambda_i, \text{Å}$	2072	2855	2028	1814	1839	1833
$\rho, \text{г/см}^3$	2,7	0,87	1,55	4,5	5,87	7,1
$\rho, 10^{22} \text{ ат/см}^3$	6	1,34	2,3	5,6	6,9	8,2
$T_m, \text{°K}$	933	336	1123	1941	2003	2176
$\Delta H_m, \text{эВ/атом}$	0,11	0,02	0,09	0,16	0,18	0,15
$T_H, \text{°K}$	2720	1027	1760	3553	3653	2915
$\Delta H_u, \text{эВ/атом}$	3,05	0,8	1,56	4,47	4,76	3,63
$k, \text{Дж/см.с.°K, (°K)}$	2,1(300) 2,8(900) 0,6(1200)	0,49(337) 0,24(1500)	0,98(273)	0,16(293) 0,2(973) 0,09(1933)	0,33(293) 0,45(1773)	0,67(300) 0,29(1400)
$C_p, \text{Дж/г.°K}$	0,95(400) 1,09(1000)	0,81(400) 0,81(400)	0,69(400) 1,00(1000)	0,55(400) 0,65(1000)	0,51(400) 0,72(1500)	0,5(400) 0,75(1500)
$k/c_p \rho, \text{см}^2/\text{с}$	0,82(300) 0,95(900) 0,21(1200)	0,7(400)	0,92(273)	0,06(293) 0,07(973) 0,03(1933)	0,11(293) 0,11(1500)	0,19(300) 0,05(1400)
$\sigma, 10^4 \text{ Ом.см}^{-1}$	40(273) 13(673)	16,4(273) 3,2(623)	24(273)	1,8(300)	3,8(300)	5,3(300)
$\sigma_{\text{от.}\sqrt{c}}, 10^4 \text{ Дж/см}^2\sqrt{\text{с}}$	2,3	0,24	0,94	1,2	3,0	1,8

Z	Ni	Cu	Zn	Sr	Nb	Mo
28	29	30	38	41	42	
A	58,7	63,5	65,4	88	92,9	96
$I_i, \text{эВ}$	7,63	7,72	9,39	5,69	6,88	7,13
$\lambda_i, \text{Å}$	1624	1605	1320	2178	1801	1738
$\rho, \text{г/см}^3$	8,7	8,9	6,9	2,54	8,57	9,0
$\rho, 10^{22} \text{ ат/см}^3$	8,9	8,4	6,3	1,73	5,5	5,6
$T_m, \text{°K}$	1726	1356	693	1043	2760	2898
$\Delta H_m, \text{эВ/атом}$	0,18	0,14	0,08	0,09	0,28	0,29
$T_H, \text{°K}$	3073	2868	1180	1640	5173	5073
$\Delta H_u, \text{эВ/атом}$	3,96	3,16	1,19	1,43	7,24	6,18
$k, \text{Дж/см.с.°K, (°K)}$	0,92(297) 0,55(1573)	4,0(297) 3,0(1356т)	1,11(297) 0,57(890)	-	0,53(300) 1,0(2700)	1,62(300) 0,7(2898т)
$C_p, \text{Дж/г.°K}$	0,49(400) 0,62(1500)	0,40(400) 0,49(1500)	0,40(400) 0,48(1000)	0,26(300т)	0,27(400) 0,32(1500)	0,26(400) 0,33(1500)
$k/c_p \rho, \text{см}^2/\text{с}$	0,22(297) 0,10(1573)	1,12(297) 0,7(1356т)	0,4(297) 0,17(890)	-	0,23(300) 0,37(2700)	0,69(300) 0,3(2898)
$\sigma, 10^4 \text{ Ом.см}^{-1}$	15(300) 1,7(700)	60(300) 4,1(1800т)	17(300) 2,6(693т)	5(273)	7,6(300)	20(273) 9,7(400) 1,1(2600)
$\sigma_{\text{от.}\sqrt{c}}, 10^4 \text{ Дж/см}^2\sqrt{\text{с}}$	3,0	6,1	0,84	-	6,6	5,2

	I_n	C_s	S_{0a}	T_a	W	$P\%$
Z	49	55	56	73	74	82
A	115	133	137,3	181	184	207
$I_i, \text{эВ}$	5,79	3,99	5,21	7,88	7,98	7,42
$\lambda_i, \text{Å}$	2140	3185	2378	1573	1553	1670
$\rho, \text{г/см}^3$	7,28	1,87	3,78	16,6	19,3	11,2
$\rho, 10^{22} \text{ат/см}^3$	3,79	0,84	1,65	5,5	6,3	3,2
$T_m, \text{°K}$	430	301	983	3269	3653	600
$\Delta H_{пл}, \text{эВ/атом}$	0,03	0,02	0,08	0,33	0,37	0,05
$T_v, \text{°K}$	2348	958	1910	5673	5803	2024
$\Delta H_v, \text{эВ/атом}$	2,32	0,68	1,55	7,83	8,3	1,86
k	0,71(400)	0,19(400) 0,1(1500)	-	0,63(300) 1,0(2700)	1,3(300) 0,88(3653т)	0,35(297) 0,16(600ж) 0,2(1027)
$D_{ж}/\text{см, с.°K}, (\text{°K})$	0,25(400) 0,26(1500)	0,24(400)	0,2(400) 0,23(1500)	0,14(400) 0,16(1500)	0,14(400) 0,15(1500)	0,13(400) 0,14(1000)
$D_{ж}/\text{г.°K}$	0,39(400)	0,42(400)	-	0,27(300) 0,38(2700)	0,48(300) 0,3(3653т)	0,24(297) 0,1(600ж) 0,13(1027)
$k/c_p \rho, \text{см}^2/\text{с}$	12,2(273)	5,3(273) 2,7(303ж)	2,8(273) 2(293)	8,1(273)	18(300) 1,9(1800) 0,76(3800)	4,9(300) 1,1(600ж) 0,86(1100)
$\sigma, 10^4 \text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$	1,49	0,1	-	7,2	7,8	0,58
$\sigma_{out} \cdot \sqrt{\tau}, 10^4 \text{Дж/см}^2 \cdot \sqrt{\text{с}}$						

наиболее естественно, является лазер на растворе родамина 6Ж с ламповой накачкой. Поглощенная энергия, необходимая для испарения $N_a = 10^{18}$ атомов некоторых элементов, а также параметры оптимального испарения для импульса с $\tau = 4$ мкс приведены в Таблице 4.

Таблица 4. Параметры оптимального испарения при $\tau = 4$ мкс

Элемент	Li	C	Al	Ti	Zn	Pb
A	7	12	27	48	65	207
$F_{out}, \text{МВт/см}^2$	4,3	44	11	5,9	4,6	2,6
$\delta^R, \text{мкм}$	8,9	6,3	8,9	3,5	8,2	6,3
$N_a = 10^{18}$	E, Дж	0,3	1,4	0,5	0,7	0,3
	S, мм ²	1,5	0,8	1,1	3	1,1

С учетом зависимости коэффициента отражения от температуры ориентировочно можно считать, что за импульс поглощается ~50% падающего излучения. Следовательно, необходимая энергия лазера должна в 2 раза превышать указанную в таблицах.

Были проведены экспериментальные исследования испарения C, Al, Ti, Pb и некоторых сплавов. Источниками излучения служили лазер плоской геометрии Л2 или коаксиальный лазер Л3 на растворах родамина 6Ж в изо-пропиловом спирте. В различных режимах получены пары плотности от 10^{15} до 10^{18} при объеме ~10 см³.

Пространственно-временное распределение плотности паров свинца, определенное теневым методом Теплера, при фокусировке излучения лазера Л2 в одно пятно площадью 10 мм² показано на рис.13. Начало испарения соответствовало приблизительно максимуму лазерного импульса.

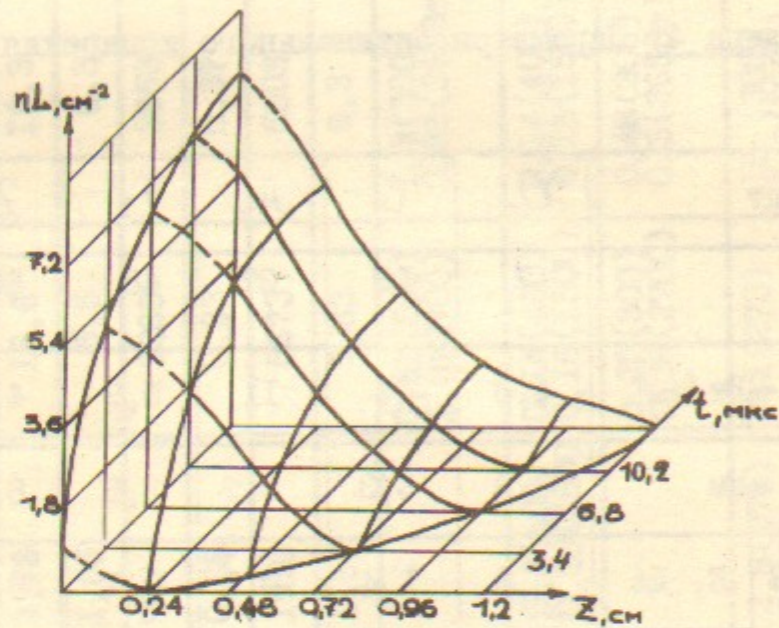


Рис.13. Распределение плотности паров свинца по нормали к поверхности при испарении импульсом излучения лазера Л2.

Для испарения Al и Ti использовался лазер Л3, излучение которого разделялось четырьмя призмами и фокусировалось на поверхность мишени в 4 равностоящие точки на диаметре 18мм. Распределение плотности энергии излучения в одной из "точек" приведено в Приложении 4. Пары алюминия после расширения до размера ~ 1 см ионизовались импульсом ультрафиолетового излучения ($\lambda > 170$ нм). Согласно измерениям, проведенным зондами Ленгмюра и СВЧ-интерферометром с линией Лехера, плотность ионов превышала $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Времяпролетный анализ массового состава обнаружил единственный пик, соответствующий $A/Z = 26,6 \pm 4$. Все измерения проводились во втором и третьем импульсах, т.к.

в первом импульсе с поверхности образца чистого $(0,99999) Al$ вместе с Al испаряется некоторое количество примесей, причем наблюдается лазерный пробой в парах ($\bar{\Phi} = 29 \text{ МВт/см}^2$), в последующих импульсах оптический пробой не наблюдается.

ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Фольговый метод оперативного контроля пространственного распределения плотности энергии (мощности) излучения импульсного лазера

Оперативный контроль распределения плотности энергии является необходимым во многих приложениях. Фотографический способ с последующим фотометрированием является наиболее точным методом определения пространственного распределения энергии излучения, но он очень трудоемок и требует очень больших затрат времени для получения конечного результата. Другие же способы [35] носят лишь качественный характер.

При плотностях мощности $\sim 0,1 \text{ МВт/см}^2$ и выше распределение интенсивности излучения можно легко и быстро измерить с помощью "сэндвичей" из алюминированного лавсана. Листочки лавсановой пленки с нанесенным на нее слоем Al толщиной $\sim 100 \text{ \AA}$ набираются в пакет, помещаемый перпендикулярно лазерному лучу в плоскости, где проводятся измерения. Под действием лазерного излучения алюминиевые слои последовательно испаряются, тогда как лавсановая основа практически полностью сохраняется. Количество "пробитых" пленок характеризует величину плотности энергии (a , следовательно, и средней плотности мощности) в данной точке.

Для иллюстрации возможностей метода приведем результаты измерения распределения плотности мощности излучения лазера Л3 в одной из четырех "точек испарения" на поверхности Al и Ti фольг (см. Приложение 3) как фотографическим, так и фольговым методом. На рисунке 14 внизу справа приведена фотография сечения ослабленного светофильтрами лазерного пучка, полученная на пленке РФ-3.

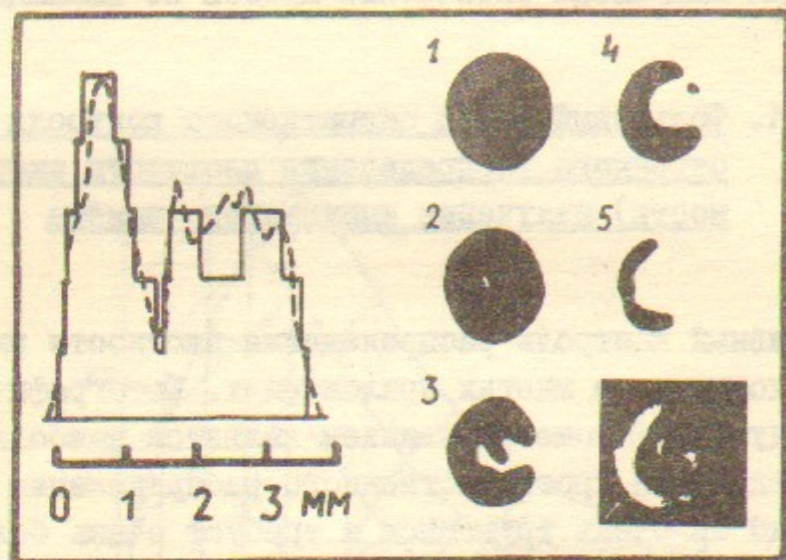


Рис. 14. Измерение распределения плотности энергии фольговым и фотографическим методами

Рядом в том же масштабе изображены контактные фотокопии отверстий в алюминиевых слоях пяти последовательных лавсановых пленок, образованных при попадании лазерного пучка на "сэндвич", помещенный на то же место.

Каждая пленка имела толщину 10 мкм и с обеих сторон была покрыта слоем алюминия толщиной около 150 Å. Последняя величина лишь в 3 раза больше, чем глубина проникновения излучения лазера в алюминий, а поскольку время прогрева слоя Al толщиной 150 Å за счет теплопроводности составляет $\sim 10^{-11}$ с, то нагрев алюминиевого слоя носит, по-видимому, объемный характер.

В данном случае ($F_{\max} = 0,93$ МВт/см², $\tau = 4$ мкс) было "пробито" пять пленок. Гистограмма числа пробитых пленок показана слева. На нее пунктиром наложено распределение интенсивности, пересчитанное по данным фотометрирования фотопленки вдоль направления, указанного стрелкой. Если учесть, что оба измерения произведены в разных импульсах, согласие между обоими методами следует признать хорошим. В наших условиях зависимость числа пробитых пленок от поглощенной энергии, как видно

из рисунка, близка к линейной, что позволяет проводить оперативные количественные оценки.

Нетрудно оценить, что в данном случае на удаление одного слоя Al было затрачено 0,37 Дж/см². С другой стороны, для нагрева и испарения такого количества алюминия требуется всего лишь 0,14 Дж/см² (потери на отражение учтены). Остальная часть энергии, видимо, идет на нагрев и испарение поверхностного слоя лавсана. Заметим, что глубина прогрева лавсана $\delta \sim \sqrt{at}$, за время испарения одного слоя Al составляет примерно 1500 Å, а толщина испаренного слоя, по энергетическим соображениям, не может превысить несколько сот ангстрем, что много меньше толщины лавсановой пленки.

Следует отметить, что для импульса излучения с той же плотностью энергии, но иной длительности, число пробитых отверстий, вообще говоря, может измениться. Следовательно при этом должна быть проведена новая абсолютная калибровка. При высоких плотностях мощности следует учитывать возможность возникновения оптического пробоя в парах алюминия, который, по-видимому, и ограничивает применимость метода сверху. В этом случае, однако, при фольговых измерениях можно предварительно ослаблять излучение лазера калиброванными светофильтрами.

В заключение авторы благодарят Л.В. Анкудинова, В.С. Николаева и М.В. Сомова за помощь, оказанную на различных этапах работы.

Л и т е р а т у р а

1. В.К.Гончаров, Л.Я.Минько, С.А.Михнов, В.С.Стрижнёв.
В сб. Квант электр. под ред. Н.Г.Басова, № 5, 1971, II2.
2. Дж. Бункенбург. ПНИ, № II, 55 (1972).
3. С.А.Михнов, В.С.Стрижнёв. Журн прикл.спект., 17, 38 (1972).
4. P. Anliker, M. Gassmann, H. Weber. Optics Commun.,
5, 137 (1972).
5. P. Burlamachi, R. Pratesi. Appl. Phys. Lett., 23, 475 (1973)
6. P. Burlamachi, R. Pratesi. Optics Commun., 11, 109 (1974).
7. М.И.Дзюбенко, И.Г.Науменко, В.П.Пелипенко, С.Е.Солдатенко.
Письма в ЖЭТФ, 18, 43 (1973).
8. С.С.Ануфрик, В.А.Мостовников, А.Н.Рубинов, В.Ф.Воронин,
Г.Р.Гиневич - В кн.: Квантовая электроника и лазерная спек-
троскопия. Минск; Наука и техника, 1974, с.5.
9. Ю.Г.Аникеев, Р.Г.Вдовченко, С.Н.Теленин. Квант. электр.
2, 7 (1975).
10. В.С.Стрижнев. Квант. электр. 2, 191 (1975).
11. M. Maeda, O. Uchino, T. Okada, Y. Miyazoe. Japan J. Appl. Phys., 14, 1975 (1975).
12. M. Maeda. Appl. Phys., 15, 191 (1978).
13. F. P. Schäfer. In: Tunable lasers and applications.
Berlin - Heidelberg - N.Y., Springer - Verlag, 1976,
p. 50.
14. В.А.Мостовников, А.Н.Рубинов, Г.Р.Гиневич, С.С.Ануфрик,
А.Ф.Абрамов. Квант. электр. 3, 2064 (1976).
15. D. Basting, D. Ouw, F. P. Schäfer. Optics Commun., 18,
260 (1976).
16. В.И.Атрощенко и др. Журн. прикл. спектр, 27, 226 (1977).
17. В.С.Бурмасов, Г.Г.Долгов-Савельев, Б.А.Князев, Е.П.Фокин,
Журнал прикл. спектр. 19, 545 (1973).
18. Б.А.Князев, В.М.Моралев, Е.П.Фокин. Опт. и спектр. 40, 93
(1976).

19. Б.А.Князев, Е.П.Фокин. Труды Всесоюзной конференции "Лазе-
ры на основе сложных органических соединений", Минск, 1975,
стр.191.
20. В.В.Воробьев, Б.А.Князев, там же, стр.214.
21. Б.А.Князев, С.В.Лебедев, В.Н.Снытников. Тезисы докладов
У Всесоюзной конф. по физике низкотемпературной плазмы.
Киев, 1979, стр.339.
22. Б.А.Князев, С.В.Лебедев, Е.П.Фокин. Квант. электр., 6,
2028 (1979).
23. В.Е.Коробов, А.К.Чибилов, Химия высоких энергий, 10, 177
(1976).
24. В.Е.Коробов, Т.Д.Славнова, А.К.Чибилов. Журн. прикл.спект.
26, 841 (1977).
25. Г.Р.Гиневич, С.С.Ануфрик. Труды 2-й Всесоюзн. конф. "Лазе-
ры на основе сложн. органич. соединений и их применение",
Душанбе, 1977, стр.65.
26. Л.М.Гурджиян, О.Л.Калия, Н.С.Лебедева, О.Л.Лебедев, Т.Н.Фе-
сенко. Там же, стр.68.
27. В.В.Рыльков, Там же, стр.70.
28. В.Е.Коробов, А.К.Чибилов, Там же, стр.186.
29. Л.М.Гурджиян, Н.С.Лебедев, О.Л.Калия, О.Л.Лебедев,
Е.А.Лукьянец, Журн. прикл.спект, 31, 665 (1979).
30. В.С.Шевандин, А.В.Аристов, Опт. и спектр., 48, 62 (1980).
31. S. Chu, R. W. Smith. Optics Commun., 28, 221 (1979).
32. С.И.Анисимов, Я.А.Имас, Г.С.Романов, Д.В.Ходико.
"Действие излучения большой мощности на металлы",
М., Наука, 1970.
33. Б.А.Князев. Препринт ИЯФ СО АН СССР № 78-103, 1978.
34. Д.Д.Рятов, Г.В.Ступаков. Физика плазмы, 2, 767 (1976).
35. Г.Хирд. Измерение лазерных параметров. М., Мир, 1970.