

ЛАЗЕР НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ НА НЕОДИМОВОМ СТЕКЛЕ

Н. М. Галактионова, Г. А. Гаркави, В. С. Зубкова,
А. А. Мак, Л. Н. Сомс и М. М. Халеев

Изучена возможность получения непрерывной генерации на неодимовых стеклах различного состава. На силикатном стекле получена непрерывная генерация мощностью 0.5 вт.

1. Требование низкой пороговой мощности накачки и высокой термостойкости ограничивает число материалов, которые могут работать при непрерывной накачке. Низкая термостойкость стекла делает достаточно проблематичным вопрос о возможности получения непрерывной генерации на этом материале.

Однако высокое оптическое совершенство неодимового стекла, возможность управления в довольно широких пределах его спектрально-люминесцентными характеристиками позволяют надеяться, что эти трудности могут быть преодолены. Спектроскопические исследования, выполненные за последние годы (см., например, [1, 2, 7]), свидетельствуют о том, что низкие пороги возбуждения генерации следует ожидать у фторидных (фторбериллатных и фторфосфатных) стекол, характеризующихся большим квантовым выходом и сравнительно узкой линией люминесценции, а также у фосфатных стекол, ширина линии люминесценции иона неодима у которых уже, чем у силикатных стекол (табл. 1).

Таблица 1

№ п./п.	Тип стекла	N, см ⁻³	$\eta_{1,06}$, %	$\eta_{полн.}$, %	τ , мксек.	$\Delta\nu_{1}$, см ⁻¹	$\sum \int k_{\nu} d\nu$, отн. ед.	Θ , отн. ед.	
								непрерывная генерация	импульсная генерация
1	Фторбериллатное	0.4 · 10 ²⁰	49	100	860	160	0.30	0.9	1.15
2		1.7 · 10 ²⁰	48	97	760	165	1.00	0.25	0.30
3	Фторфосфатное	0.6 · 10 ²⁰	56	100	305	190	0.55	0.50	0.22
4		2.4 · 10 ²⁰	45	88	225	190	1.45	0.25	0.08
5	Силикатное	2 · 10 ²⁰	15	30	670	195	1	1	1
6		2 · 10 ²⁰	15	30	620	185	0.95	0.95	0.85
7	Фосфатное	—	3.0	—	325	120	1.90	0.50	0.25
8		2 · 10 ²⁰	7.5	—	270	155	1.70	0.90	0.35
9		5.2 · 10 ²⁰	4	—	110	155	4.75	0.60	0.95

Примечание. N — концентрация активатора в см⁻³; $\eta_{1,06}$ — квантовый выход люминесценции в $\lambda = 1.06$ мкм; $\eta_{полн.}$ — полный квантовый выход люминесценции; τ — время жизни верхнего рабочего уровня ${}^4F_{3/2}$; $\Delta\nu$ — ширина линии люминесценции; $\sum \int k_{\nu} d\nu$ — суммарное поглощение во всех полосах накачки в относительных единицах. Θ — расчетная пороговая мощность накачки для непрерывной генерации или пороговая энергия накачки для импульсной генерации.

Действительно, первые попытки получения непрерывной генерации были предприняты с неодимовыми стеклами на фторидной и фосфатной основе. В работе [1], например, была получена непрерывная генерация на образце фосфатного стекла, однако предельная не приводящая к разрушению стержня, мощность накачки была практически равна пороговой (~720 вт). Имеется сообщение о непрерывной генерации, полученной на неодимовом стекле с боратной основой [3]. В этом случае для увеличения плотности накачки использовалась тонкая (диаметром 0.1 мм) нить активированного стекла, заключенного в прозрачную стеклянную оболочку.

В данной работе проведено исследование стекол различного состава с целью изучения возможности получения на них непрерывной генерации.

2. Были изучены неодимовые стекла на силикатной, фосфатной и фторбериллатной основе. В табл. 1 приведены спектрально-люминесцентные характеристики стекол различной основы, а также вычисленные на основании спектральных характеристик пороговые мощности накачки в относительных единицах (за единицу приняты пороговые мощности для силикатного стекла, см. № 5, табл. 1).

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что наиболее низкие пороги генерации следует ожидать у фторбериллатных, фторфосфатных, а также у фосфатных стекол.

Исследования генерации проводились на стержнях диаметром 2.5 мм, концентрация ионов неодима в образцах составляла $\sim (2 \div 5) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Для увеличения термической прочности силикатных стекол боковая поверхность образцов была подвергнута специальной обработке [4]. Накачка образцов осуществлялась криптоновой дуговой трубчатой лампой высокого давления в кварцевом цилиндрическом осветителе с серебряными отражающими поверхностями диаметром 30 мм длиной 55 мм. Отсечка ультрафиолетового излучения накачки осуществлялась раствором нитрита натрия в воде. В экспериментах использовался резонатор с плоскими диэлектрическими зеркалами, минимальное расстояние между которыми составляло 11 см.

Предварительно все стекла были опробованы в импульсном режиме генерации (возбуждение осуществлялось в той же системе накачки, лампа — с ксеноновым наполнением). Самой низкой пороговая энергия оказалась у фосфатного стекла — 1.5 дж, у силикатного и фторбериллатного — 2.6 и 4 дж соответственно. Относительно высокий порог генерации на фторбериллатных стеклах объясняется низким качеством торцевых поверхностей стержней (вследствие недостаточной химической стойкости этих стекол после обработки качество поверхности ухудшалось). Была изучена также термическая стойкость образцов при непрерывной накачке. Разрушение образцов происходило при 650 вт накачки для фосфатного стекла, 800—1000 вт для фторбериллатного стекла и 3000 вт для силикатного стекла.

Вследствие низкого порога разрушения фосфатного и фторбериллатного стекол непрерывная генерация на них не была получена. Пороговая мощность накачки при возбуждении генерации на силикатном стекле при коэффициенте пропускания зеркал резонатора $T_1 = T_2 \leq 0.5\%$ и базе резонатора 11 см составила ~700 вт. В экспериментах использовалось силикатное стекло высокого оптического качества с неактивным поглощением на длине волны 1.06 мкм не более 0.001 см^{-1} . Зависимость пороговой мощности накачки от пропускания выходного зеркала представлена в табл. 2.

Оценка коэффициента пороговых потерь (на двойной проход) в резонаторе, исходя из этих данных, дает величину $\sigma_{\text{п}} \approx 0.05$. На рис. 1 и 2 представлена зависимость мощности генерации от мощности, подводимой к лампе накачки для двух длин резонатора (22 и 11 см) при пропускании

Таблица 2

$T, \%$	$P_{\text{п}}, \text{вт}$
0.5	700
1.3	850
3	1070
5	1480

выходного зеркала 0.5 и 3%. При длине резонатора 22 см наблюдается насыщение мощности генерации с последующим падением ее при дальнейшем увеличении мощности накачки; при длине резонатора 11 см в исследуемом диапазоне изменения накачки наблюдается тенденция к насыщению мощности генерации.

С целью определения причин насыщения мощности генерации была изучена термическая деформация активных элементов при накачке. Термическая линза, которую представляет собой активный элемент, меняет конфигурацию резонатора и при достаточно высоких уровнях накачки и соответствующей длине резонатора возможен переход резонатора в неустойчивую область и резкое увеличение потерь. Нами были измерены фокусные расстояния (f_r , f_θ) и вершинные отрезки (S_r , S_θ) термической линзы для излучения разных поля-

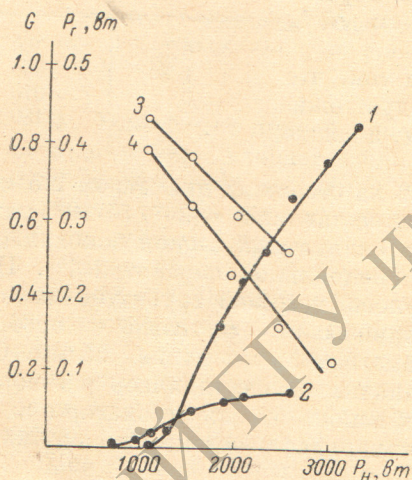


Рис. 1. Зависимость мощности генерации и параметра G от мощности накачки для длины резонатора $L = 11$ см.

1 и 2 $P_r = f(P_n)$; 3 и 4 $G = f(P_n)$; 1 — $T = 3\%$, 2 — $T \leq 0.5\%$, 3 — r -поляризация, 4 — θ -поляризация.

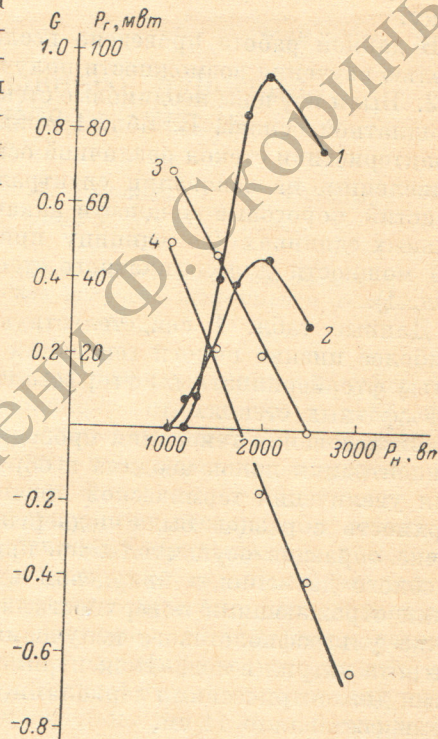


Рис. 2. Зависимость мощности генерации и параметра G от мощности накачки для длины резонатора $L = 22$ см.

1 и 2 $P_r = f(P_n)$; 3 и 4 $G = f(P_n)$; 1 — $T = 3\%$, 2 — $T \leq 0.5\%$, 3 — r -поляризация, 4 — θ -поляризация.

ризаций при различных мощностях накачки. Результаты этих измерений представлены в табл. 3.

Резонатор с плоскими зеркалами и внесенной линзой эквивалентен сферическому и характеризуется параметрами G .

$$G_{1,2} = 1 - \frac{d_{1,2}}{f},$$

где $d_{1,2}$ — расстояние от главных плоскостей линзы до соответствующих зеркал, f — фокус термической линзы.

Зависимость параметра G от мощности накачки для длин резонатора 22 и 11 см представлена на рис. 1 и 2 (в экспериментах использовалась симметричная установка зеркал резонатора относительно активного элемента, $G_1 = G_2 = G$).

В исследуемом диапазоне накачек для длин резонатора 22 и 11 см параметр G меняется от +0.8 до 0 для r -поляризации и от +0.8 до -0.6 для θ -поляризации. Исследование картины распределения интенсивности излучения в ближнем поле свидетельствует о том, что интенсивная гене-

рация имеет место лишь вблизи центра сечения активного элемента. При увеличении накачки зона генерации в ближнем поле слегка возрастает, а затем остается неизменной и даже несколько уменьшается вплоть до накачек, превышающих в 4—5 раз пороговую. Максимальная мощность генерации, достигнутая в наших исследованиях, составила ~ 0.5 вт. Была проведена оценка мощности генерации с помощью соотношения [5]

$$P_r = \eta_1 \frac{\nu_r}{\nu_n} \frac{\ln 1/R}{\sigma + \ln 1/R} P_n \left(1 - \frac{1}{n}\right),$$

где ν_r и ν_n — частоты генерации и полос накачки, σ — неактивные потери в резонаторе на двойной проход, P_n — мощность накачки, n — превышение пороговой мощности накачки, R — коэффициент отражения зеркала резонатора.

Таблица 3

P_n , вт	f_r , см	S_r , см	f_θ , см	S_θ , см
1000	20	18.5	29.5	28.5
1500	13.2	11.5	18.5	17
2000	8.9	7	12.8	11
2500	7.5	5.5	10.3	8.5
3000	6.5	4.5	—	—

Для трехкратного превышения порога при накачке криптоновой дуговой лампой с учетом эффективности системы накачки расчетная мощность генерации составила ~ 6 вт, т. е. примерно в 10 раз выше достигнутой.

Из рис. 1 и 2 также следует, что насыщение и даже падение мощности генерации при увеличении мощности накачки не может быть объяснено переходом резонатора в неустойчивую область (в нашем случае — $0.6 < G < 0.8$).

Для качественного объяснения перечисленных выше явлений необходимо, по-видимому, рассмотреть механизм возбуждения типов колебаний в резонаторе при наличии наведенной анизотропии в активном элементе, имеющем цилиндрическую форму [6]. Возникающее при накачке активного элемента двулучепреломление приводит к тому, что высокочастотные плоскополяризованные типы колебаний могут существовать лишь вблизи оси активного элемента. Чем выше мощность накачки, тем сильнее двулучепреломление, тем меньшую область в центре активного элемента занимают высокочастотные моды, следовательно, мощность генерации может понизиться.

Использование стекол с низкими термооптическими константами, придание активному элементу прямоугольной формы должно привести к участию в генерации большего объема активного элемента, а следовательно, и к увеличению КПД лазера непрерывного действия на неодимовом стекле.

Литература

- [1] О. К. Deutschbein, С. С. Rautrat. IEEE QE-4, № 2, 1968.
- [2] Л. А. Голубцов, В. Ф. Егорова, В. С. Зубкова, С. Г. Лунтер, А. А. Мак, В. Д. Халилев. Тез. докл. на III Симп. по спектр. кристаллов, активированных ионами редкоземельных и переходных металлов. Л., 1970.
- [3] С. G. Jo ung. Appl. Phys. Lett., 2, 151, 1963.
- [4] А. А. Мак, Ю. Н. Михайлов, А. И. Степанов, Л. С. Ястребова. Опт.-мех. промышл., № 10, 73, 1969.
- [5] А. А. Мак, Ю. А. Ананьев, Б. А. Ермаков. Усп. физ. наук, 92, 377, 1967.
- [6] А. А. Мак, Л. Н. Сомс, А. И. Степанов, А. Б. Судаков. Опт. и спектр., 30, 1081, 1971.
- [7] Г. М. Петровский, М. Н. Толстой, П. П. Феофилов, Г. А. Цурикова, В. Н. Шаповалов. Опт. и спектр., 21, 126, 1966.

Поступило в Редакцию 29 декабря 1971 г.