

УДК 621.362; 621.383

*А.Н. СОЛДАТОВ, С.Ю. МИРЗА, Ю.П. ПОЛУНИН, А.С. ШУМЕЙКО***ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ЛАЗЕРА НА ПЕРЕХОДАХ SrI и SrII С ВЫСОКИМ КОЭФФИЦИЕНТОМ УСИЛЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ИОНИЗАЦИОННОЙ И РЕКОМБИНАЦИОННОЙ НЕРАВНОВЕСНОСТИ ПЛАЗМЫ**

Проведены параметрические исследования импульсно-периодического лазера на парах стронция. Определены условия одновременной генерации на переходах атома и иона стронция ($\lambda = 1,03$ и $1,09$ мкм; $2,69$, $2,6$, $2,92$, $3,01$ и $3,06$ мкм; $6,45$ мкм), формируемые в период ионизационной неравновесности плазмы на фронте импульса возбуждения, и на переходах иона стронция ($\lambda = 416,2$ и $430,5$ нм), формируемые в период рекомбинационной неравновесности плазмы в ближнем послесвечении разряда. Под одновременной генерацией понимается наличие всех полученных линий генерации в течение одного периода возбуждения в высоковольтном импульсно-периодическом разряде в одном резонаторе, глухое зеркало которого имеет коэффициент отражения $\geq 90\%$, а в качестве выходного зеркала используется плоскопараллельная пластина из CaF_2 без напыления.

Ключевые слова: лазеры на парах металлов, лазер на парах стронция.

Введение

Особенностью лазеров на парах стронция является тот факт, что в активной среде с высокой эффективностью реализуются как ионизационный, так и рекомбинационный механизмы формирования инверсии. В частности, самоограниченный режим генерации реализуется на ряде ИК-переходов в спектрах как атомов ($\lambda = 2,69$, $2,6$, $2,92$, $3,01$ и $3,06$ мкм; $6,45$ мкм), так и ионов ($\lambda = 1,03$ и $1,09$ мкм) стронция, а рекомбинационный режим – на ионных переходах ($\lambda = 416,2$ и $430,5$ нм) стронция. При этом существует возможность реализации одновременной многоволновой генерации в широком диапазоне спектра за счет обоих механизмов формирования инверсии [1].

Интерес к исследованию лазеров на самоограниченных переходах атомов и ионов стронция (ЛСПС) обусловлен практическим использованием его излучения для абляции биологических тканей и полиамидов, для лазерного термораскола стекла, в зондировании параметров атмосферы и т.д. [1–5]. К настоящему времени получена максимальная средняя мощность генерации в одном активном элементе ЛСПС более 13 Вт, при этом энергия в импульсе составляет величину порядка 1,5 мДж [6]. В системе «генератор – усилитель» на парах стронция средняя мощность генерации превышает 20 Вт. Достигнута в ЛСПС рекордная для лазеров на парах металлов частота следования импульсов (ЧСИ) генерации в импульсно-периодическом разряде 830 кГц [7].

Одним из недостатков практического использования излучения ЛСПС в вышеперечисленных технологиях является отсутствие визуального контроля оптического тракта излучения лазера в технологическом процессе. Очевидно, что устранить этот недостаток можно, реализовав одновременную многоволновую генерацию за счет обоих механизмов формирования инверсии, при этом рекомбинационный режим должен определять визуализацию ИК-излучения ЛСПС.

Известно, что условия накачки активных сред самоограниченных и рекомбинационных лазеров на парах Sr I и Sr II близки по параметрам [1]. Однако коэффициенты усиления в самоограниченном лазере, как правило, существенно выше, чем в рекомбинационном. Поэтому реализация одновременной генерации в рекомбинационном и самоограниченном режимах требует особого подхода к выбору параметров резонатора.

Объединение самоограниченного и рекомбинационного режимов в одном активном элементе, рабочий канал которого выполнен из бериллиевой керамики диаметром 15 мм и длиной 500 мм, получено в работе [8]. Схема возбуждения представляла собой симметричную схему Блюмляйна с обостряющей емкостью. В этом случае достаточно хорошо обеспечивается высокая напряженность электрического поля, что позволяет получить начальную высокую степень ионизации паров стронция. При частотах следования импульсов возбуждения в несколько кГц межимпульсный период составляет сотни микросекунд, что значительно длиннее импульса возбуждения, длительность которого составляет 100–200 нс. В этих условиях легко выполняется требование «числота» межимпульсного периода, обеспечивающее получение инверсии населенностей на рекомби-

национных переходах в послесвечении. При слабом усилении на линиях 416,2 и 430,5 нм лазерное излучение может развиваться только в многопроходном плотном резонаторе. В качестве резонатора для получения рекомбинационной генерации использовалось плоское алюминированное зеркало и плоскопараллельная кварцевая пластина с диэлектрическим покрытием и коэффициентом отражения в сине-фиолетовой области спектра $\approx 90\%$. Генерация на атомарных лазерных линиях была получена при использовании плоскопараллельного резонатора с выходным зеркалом из флюорита (BaF_2) без отражающего покрытия. Таким образом, в работе [8] были определены параметры активной среды, когда инверсия на самоограниченных и рекомбинационных переходах создавалась в разные периоды импульсно-периодического разряда. Однако одновременная генерация не была реализована.

В настоящей работе ставилась задача реализации условий одновременной генерации в рекомбинационном и самоограниченном режимах в одном резонаторе, заднее зеркало которого имело коэффициент отражения $\sim 90\%$, а в качестве выходного зеркала использовалась плоскопараллельная пластинка из CaF_2 без напыления. Поэтому основная проблема заключалась в реализации одновременной генерации на рекомбинационных и самоограниченных переходах с высоким коэффициентом усиления.

2. Экспериментальная установка

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки. Активный элемент на парах Sr имел рабочий канал из бериллиевой керамики диаметром 20 мм и длиной 500 мм. Металлический стронций загружался непосредственно в рабочую зону. Возбуждение среды осуществлялось в режиме саморазогрева разрядным контуром, собранным по схеме Блюмляйна (рис. 2).

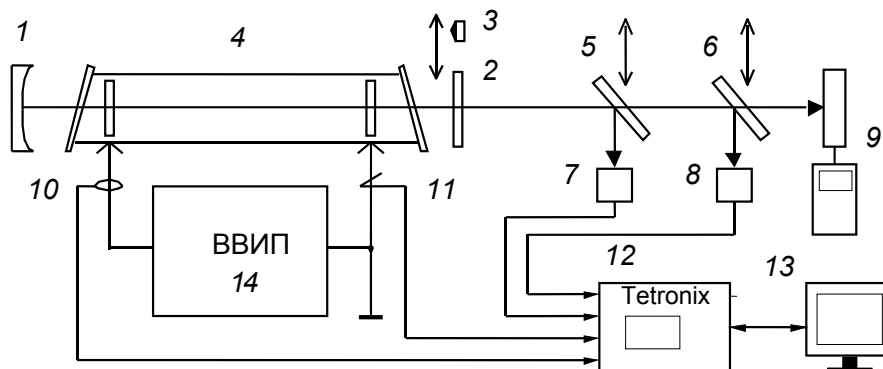


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1, 2, 3 – зеркала резонатора; 4 – ГРТ; 5, 6 – поворотные пластины CaF_2 ; 7, 8 – фотоприемники на ближнюю, ИК- и видимую области; 9 – калориметрический измеритель мощности излучения; 10 – токовый шунт; 11 – делитель напряжения; 12 – осциллограф; 13 – компьютер; 14 – высоковольтный источник питания

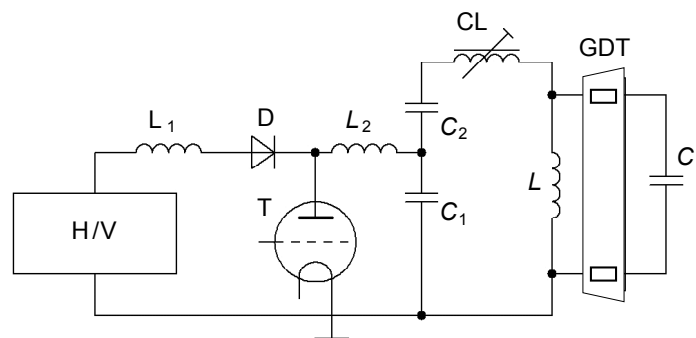


Рис. 2. Схема возбуждения Sr-лазера: H/V – высоковольтный выпрямитель; Т – водородный тиратрон ТГИ 1000/2; GDT – ГРТ на парах стронция; L_1 – зарядная индуктивность; D – зарядный диод; L_2 – компенсирующая индуктивность; L – шунтирующая индуктивность; C_1, C_2 – рабочие емкости; C_3 – обостряющая емкость; CL – линия сжатия

Были использованы устойчивые резонаторы с конфигурацией, близкой к полуконфокальной, с радиусами кривизны заднего алюминированного зеркала 2 и 3 м, а в качестве выходного зеркала была применена плоскопараллельная пластина из флюорита (BaF_2), а также телескопический неустойчивый резонатор с положительной ветвью (с увеличением $M \sim 20$). В качестве буферного газа применялась смесь газов гелия и неона в различном соотношении парциальных давлений. Регистрация импульсов тока, напряжения и генерации производилась при помощи осциллографа Tektronix DTS2012C. Датчиком импульсов тока служил низкоомный безындуктивный шунт, импульсы напряжения снимались делителем напряжения с $K = 1000$ и линейным ослабителем с $K = 10$. Для детектирования импульсов генерации применялись ФЭК22СПУ (на видимую область спектра) и п/проводниковый приемник на основе AsGa (обладающий достаточной чувствительностью и быстродействием в диапазоне длин волн $\sim 1\text{--}3$ мкм). Мощность излучения фиксировалась измерителем OPHIR NOVA II, спектральное выделение отдельных генерационных компонент производилось при помощи набора оптических светофильтров. Для повышения энергии в импульсе генерации наиболее простым решением является снижение частоты следования импульсов возбуждения. Эксперименты проводились в диапазоне частот от 1,5 до 4 кГц. При давлениях буферного газа Ne выше 150 Торр резко ухудшалась устойчивость разряда. Поэтому работа проводилась в смеси гелия с неоном, причем добавка последнего составляла $\sim 5\text{--}10\%$ от суммарного давления в газоразрядной трубке. Регистрация ИК-излучения и точная подстройка резонатора осуществлялась с использованием калориметрического измерителя мощности, который по своему принципу работы является достаточно инерционным прибором.

2. Обсуждение результатов

2.1. Закономерности изменения генерации на разных длинах волн по мере разогрева

Существование генерации на ионных линиях Sr ограничено узким температурным диапазоном. Существенное влияние на условия генерации также оказывает состав и давление буферного газа, длительность и форма импульса возбуждения. На основе анализа данных, полученных в исследованиях [6], и скорректированного температурного графика (см. рис. 3) следует, что по мере разогрева генерация появляется сначала на переходах 3 мкм блока линий, затем одномикронного блока и только потом 6-мкм генерация. При дальнейшем увеличении температуры стенки разрядного канала сначала исчезает генерация на ионных линиях, затем в области ~ 3 мкм и только при повышении температуры до величины более 750°C пропадает генерация на $\lambda = 6,45$ мкм. Верхние резонансные уровни самоограниченных линий одновременно являются нижними уровнями рекомбинационных линий генерации 416,5 и 430,2 нм (см. рис. 4), и генерация на них осуществляется в том же температурном диапазоне, что и рекомбинационная.

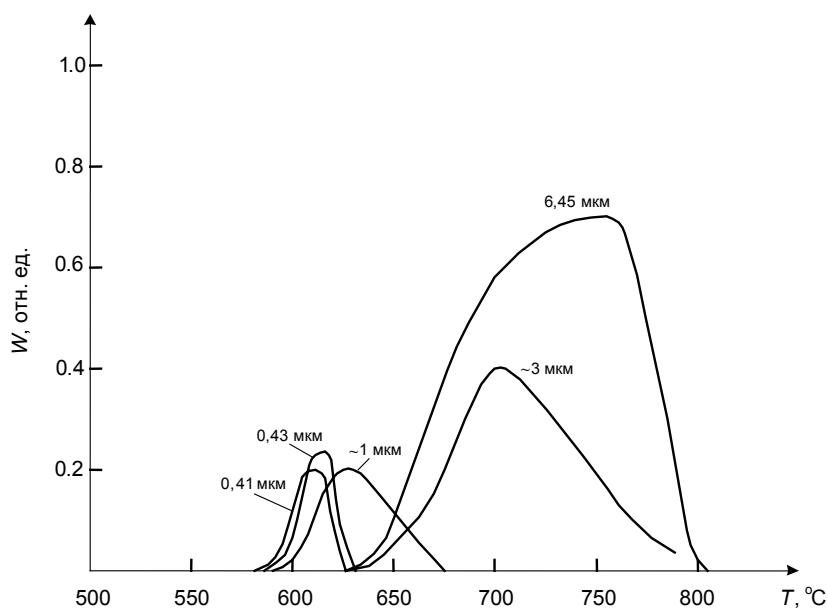


Рис. 3. Закономерности изменения генерации на разных длинах волн по мере разогрева

При работе лазера в саморазогревном режиме достаточно трудно обеспечить стабильную работу системы в узком температурном интервале, особенно если он ограничен десятком градусов. Для лазеров на парах стронция, предназначенных для технологического применения, преимущественно требуется генерация на длинах волн ~ 3 и 6,45 мкм. Выход лазера на оптимальный режим занимает 25–30 мин, причем время от начала генерации до ее максимального значения составляет ~ 5–10 мин, что соответствует температурному интервалу 560–750 °С. Максимальная мощность генерации на рекомбинационных линиях реализуется в интервале температур от 600 до 630 °С.

Была выбрана величина среднего энергоклада, которая позволяла очень плавно поднимать температуру разрядного канала и соответственно регулируемо повышать концентрацию нормальных атомов Sr. По мере разогрева рабочего канала генерация начиналась на атомарных линиях в блоке ~ 3 мкм и далее на рекомбинационных и ионных переходах. Максимальная мощность генерации на $\lambda = 6,45$ мкм наблюдалась при температурах 700–750 °С.

При дальнейшем разогреве сине-фиолетовая генерация исчезает, а по ИК-линиям происходит перераспределение в пользу линии 6,45 мкм, вплоть до практически полного подавления других спектральных компонент. Такой режим можно назвать квазистационарным, так как он может поддерживаться достаточно долго. Увеличение вводимой в разряд мощности приводило к уменьшению мощности генерации, что обусловлено перегревом и очень высокой поперечной температурной неоднородностью. Было замечено, что для каждого блока линий существует температурный интервал, в котором давление паров активного вещества оптимально с точки зрения эффективности создания инверсии.

2.2. Временные и энергетические характеристики генерации

В таблице приведены результаты измерений выборочных исследований в экспериментах с лучшими характеристиками: U, I – напряжение и ток от выпрямителя; C_1, C_2 – рабочие емкости; C_3 – обостряющая емкость; W – средняя мощность на соответствующем переходе; P1–НР (неустойчивый резонатор); P2–ППП (с ВаF₂) (плоскопараллельный); P3–ПК (КВ) (полуконфокальный); P4–ПК (с ВаF₂).

№ п/п	Тип р-ра	U , кВ	I , мА	ЧСИ, кГц	p_{He} , Торр	p_{Ne} , Торр	$C_1 = C_2$, пФ	C_3 , пФ	W_{043} , мВт	W_1 , мВт	W_3 , мВт	W_{Σ} , мВт	D , 0,43	$W_{уд}$, мВт/см ³
1	P3	7	360	2,7	275	10	1460	-	60			1100	6	
	P2	7	360	2,7	275	10	1460							
2	P3	5	400	2,7	«	«	«	«	90	?	-	120	8	
3	P4	4,8	400	2,7	«	«	«	«	80	110	300	1150	8	
4	P4	5,6	250	2,0	300	-	«	«	120			1300	8	
5	«	5,4	430	4,25	«	«	«	«	-			1400	-	
6	«	7	200	4,1	300	20	1100	«	-	38	420	1250		70
7	P1+P4	5,7	200	2,05	230	5-7	?	«	45	75	130	680	5–12	
8	P1+P4	5	200	«	50	5	«	«	>0	72	160	360		
9	P4	5,7	200	2,07	220	5	1100	«	200	145	340	700		
10	P4	6	200	2	«	«	«	«	225	140	400	970	7	
11	P1	6,4	230	2					220 (150)			900 (2200)	>0	
12	P4 33 = = 3 м	7,3	360	2,5	180 (300)		4400	-	100	280	480	2400	Кольцо $d = 6$ $D = 18$	

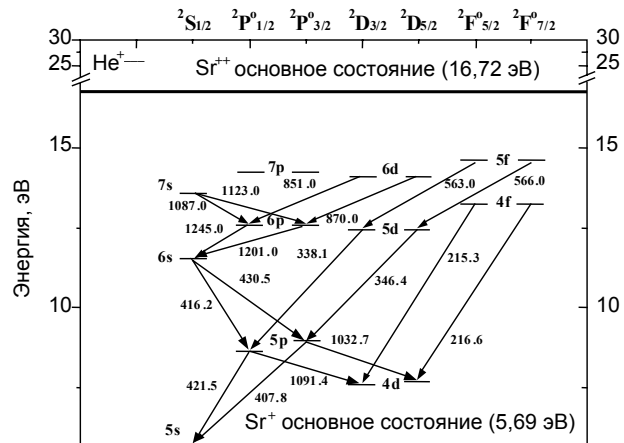


Рис. 4. Схема уровней иона стронция. Длины волн даны в нанометрах

В строке 1 повторены условия эксперимента 2, разница – в геометрии активного элемента. Использованы два резонатора для регистрации ИК- и видимых переходов. Селекция по длинам волн осуществлялась при помощи набора светофильтров, состоящих из стеклянных, кристаллических германиевых и кремниевых пластин с тестированными областями пропускания. В строках 5 и 6 генерация на видимых переходах не наблюдалась, вероятно, из-за того, что не удалось подобрать квазистационарный тепловой режим для этих переходов.

Наилучшие результаты представлены в строке 10, получена максимальная суммарная энергия в импульсе 0,48 мДж при наличии генерации на всех лазерных переходах. Удельная мощность генерации на рекомбинационных линиях составила 11,7 мВт/см³, что сопоставимо с параметрами «чисто» рекомбинационных лазеров. Доля трехмикронных линий составила 41 % от общей мощности; подобный режим работы лазера может быть интересен для спектроскопических применений. Из приведенных данных видно, что в режиме одновременной генерации энергетические характеристики лазерного излучения на каждом отдельно взятом переходе либо оптимальны, либо близки к оптимальным параметрам в лазерах на парах стронция.

На рис. 5 приведены осциллограммы импульсов напряжения (кр. 1), тока (кр. 2) и импульсов генерации на 0,43, 1 и 3 мкм (кр. 3–5).

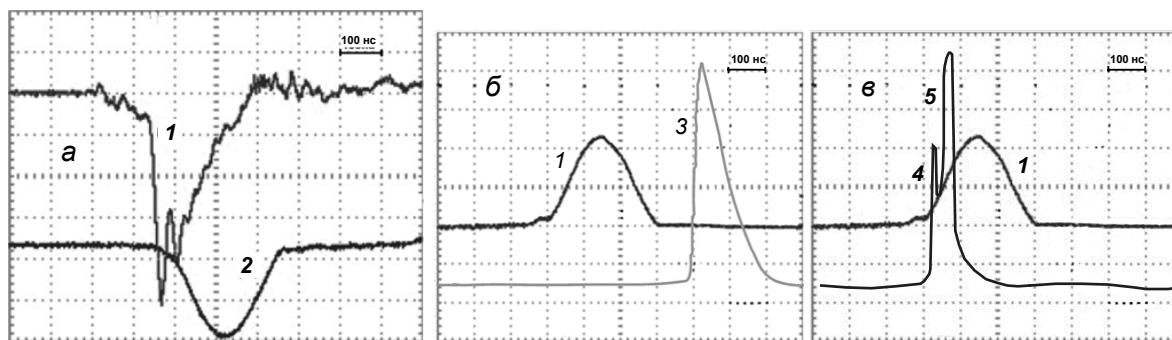


Рис. 5. Осциллограммы импульсов: напряжения на ГРТ (кр. 1), тока через ГРТ (кр. 2), генерации на $\lambda = 0,43$ мкм (кр. 3), $\lambda \sim 1$ мкм (кр. 4), $\lambda \sim 3$ мкм (кр. 5)

Из осциллограмм видно, что генерация на самоограниченных линиях блока 1 мкм и блока 3 мкм появляется на переднем фронте импульса тока и их общая длительность порядка 100 нс, тогда как генерация на ионных переходах 416 и 430 нм возникает после импульса тока, когда энергозвклад в ГРТ отсутствует. При помощи скоростного детектора на видимую область спектра можно было отследить изменение амплитуды импульса генерации при резком изменении напряжения на электродах ГРТ. Однако с повышением напряжения возрастала и вводимая мощность в разряд, что приводило к очень быстрому затуханию генерации. Это можно объяснить резким увеличением давления паров стронция, в результате чего изменяется электронная температура и падает эффективность двойной ионизации.

Заключение

Проведенные исследования показали возможность реализации одновременной многоволновой генерации за счет обоих механизмов формирования инверсии (ионизационного и рекомбинационного), при этом рекомбинационный режим определяет визуализацию ИК-излучения ЛСПС. Это позволяет прогнозировать создание лазера на парах стронция с новыми эксплуатационными характеристиками в технологических установках для абляции биологических тканей и полимеров, прецизионной обработки полупроводников, керамики и стекла мощными ИК-импульсами с возможностью юстировки и контроля излучения в видимой области спектра. Применение лазера в качестве задающего генератора в многокаскадных системах позволит избирательно усиливать излучение с длиной волны или группой длин волн для конкретного применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Солдатов А.Н., Латуш Е.Л., Чеботарёв Г.Д. и др. Импульсно-периодические лазеры на парах стронция и кальция. – Томск: ТМЛ-Пресс, 2012. – 525 с.
2. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. – Новосибирск: Наука, 1985. – 152 с.
3. Mackanos M.A., Ivanov B., Soldatov A.N., et al. // SPIE. – 2004. – V. 5319. – P. 201–308.

4. Сысоев В.К., Булкин Ю.Н., Вятлев П.А. и др. // Электронный науч. журн. «Исследовано в России». <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/084.pdf>. – 2007.
5. Бочковский Д.А., Васильева А.В., Долгий С.И. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 4. – С. 95–102.
6. Солдатов А.Н. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 5/2. – С. 91–100.
7. Солдатов А.Н., Юдин Н.А., Колмаков Е.А. и др. // Квантовая электроника. – 2012. – Т. 42. – № 1. – С. 31–33.
8. Васильева А.В., Латуш Е.Л., Полунин Ю.П. и др. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 5/2. – С. 62–65.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия
E-mail: general@tic.tsu.ru

Поступила в редакцию 09.10.13.

Солдатов Анатолий Николаевич, д.ф.-м.н., профессор, декан факультета инновационных технологий;
Мирза Сергей Юрьевич, инженер;
Полунин Юрий Петрович, ст. науч. сотр.;
Шумейко Алексей Семенович, инженер.