

Лазер на парах стронция с частотой следования импульсов генерации до 1 МГц

А.Н.Солдатов, Н.А.Юдин, А.В.Васильева, Е.А.Колмаков, Ю.П.Полунин, И.Д.Костыря

Впервые экспериментально показано, что частота следования импульсов генерации в лазерах на самоограниченных переходах атомов металлов может достигать ~ 1 МГц. Реализована максимальная частота следования импульсов генерации ~ 830 кГц на самоограниченных ИК переходах в атоме Sr I ($\lambda = 6.456$ мкм и ~ 3 мкм) и в ионе Sr II ($\lambda \sim 1$ мкм) в лазере на парах стронция, работающем в саморазогревном импульсно-периодическом режиме. Установлено, что энергосъем в Sr-лазере пропорционален энерговкладу в активную среду в широком диапазоне частот следования импульсов возбуждения, при этом суммарная удельная средняя мощность генерации составляет 30–40 Вт/см³.

Ключевые слова: лазер на парах стронция, импульсно-периодический режим.

Лазер на парах стронция (ЛПС) является эффективным источником излучения в ИК диапазоне на самоограниченных переходах в атоме Sr I с длинами волн $\lambda = 6.456$ мкм и ~ 3 мкм (2.60, 2.69, 2.92, 3.01 и 3.06 мкм) и в ионе Sr II с $\lambda \sim 1$ мкм (1.091 и 1.033 мкм) (рис.1). Установлено, что длины волн излучения ЛПС попадают в полосы поглощения полимеров и биотканей. Высокий коэффициент поглощения лазерного излучения на этих длинах волн обеспечивает эффективную абляцию, что позволяет применять лазер в медицине, а также для обработки полимеров [1].

К настоящему времени реализованы средние мощности генерации ЛПС ~ 13.5 Вт и 22 Вт в режиме «генератор–усилитель». При этом энергосъем в лазере растет пропорционально объему активной среды. Наряду с генерацией на самоограниченных переходах в атоме и ионе стронция получена генерация на самоограниченном переходе $2^1P_1 - 2^1S_0$ в атоме гелия ($\lambda = 2058$ нм) и на переходах $2s - 2p$ в атоме неона в смеси He–Ne–Sr. Реализован ионизационно-рекомбинационный режим работы ЛПС, при котором наряду с генерацией на самоограниченных переходах в атоме и ионе стронция происходит генерация на линии с $\lambda = 430$ нм в ионе Sr II [2–7]. В экспериментах достигнута частота следования импульсов (ЧСИ) генерации ~ 100 кГц [2]. При этом результаты численного моделирования [8] показали, что предельная ЧСИ генерации в лазере на парах стронция может составлять ~ 1 МГц. Это обуславливает необходимость исследования энергетических характеристик излучения ЛПС при высоких ЧСИ возбуждения.

В настоящей работе эксперименты проводились в саморазогревном режиме ЛПС с газоразрядной трубкой (ГРТ), разрядный канал которой изготовлен из керамической BeO-трубки с внутренним диаметром 8 мм и рабо-

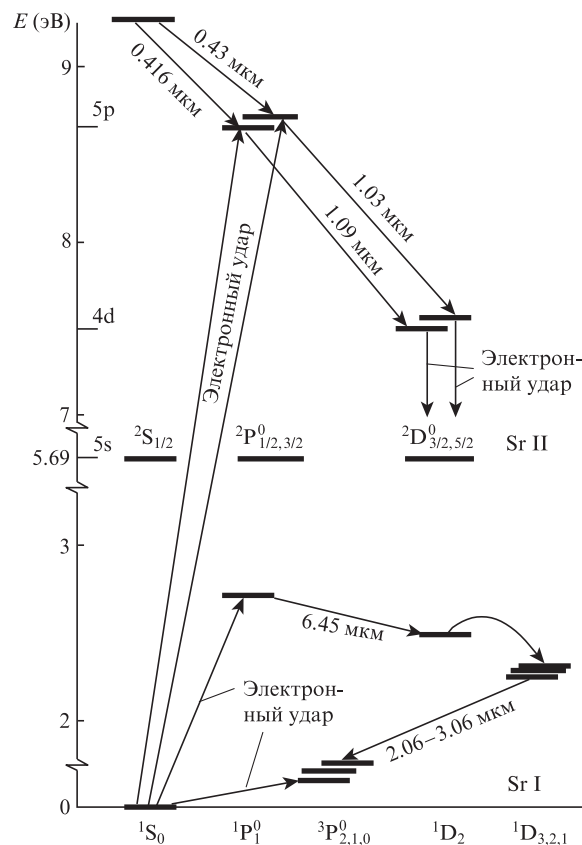


Рис.1. Схема лазерных переходов в атоме и ионе стронция.

чим объемом 9 см³. В качестве буферных газов использовались гелий и неон. Накачка активной среды осуществлялась прямым разрядом накопительного конденсатора емкостью 235–470 пФ на ГРТ [9–11]. Коммутатором служил таситрон ТГУ1-60/7. ЧСИ возбуждения составляла 120–830 кГц, а напряжение на высоковольтном выпрямителе $U_{hv} = 0.65 - 1.35$ кВ. Импульсы тока, напряжения и генерации регистрировались с помощью пояса Роговского, пробника напряжения Tektronix P6015A и фотоприемников ФЭК-24 и ФСГ. Регистрируемые сигналы пода-

А.Н.Солдатов, Н.А.Юдин, А.В.Васильева, Е.А.Колмаков, Ю.П.Полунин. Томский государственный университет, Россия, 634050 Томск, просп. Ленина, 36; e-mail: yudin@tic.tsu.ru
И.Д.Костыря. Институт сильноточной электроники СО РАН, Россия, 634055 Томск, просп. Академический, 2/3

Поступила в редакцию 24 октября 2011 г.

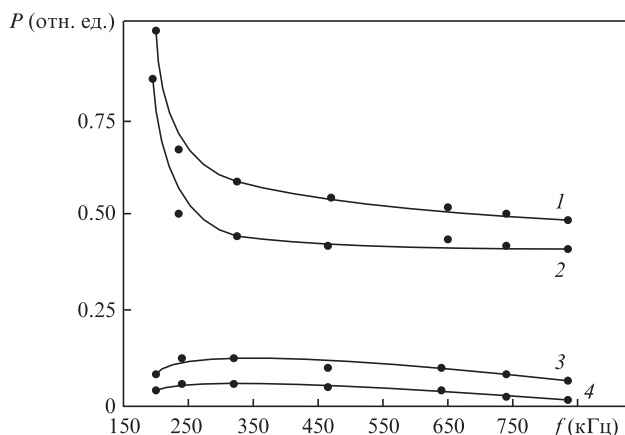


Рис.2. Зависимости суммарной средней мощности генерации (1), а также средней мощности генерации на линиях с $\lambda = 6.456$ мкм в атоме Sr I (2), ~ 1 мкм в ионе Sr II (3) и ~ 3 мкм в атоме Sr I (4) от ЧСИ возбуждения при давлении буферного газа (смесь He–Ne) 60 Тор и емкости накопительного конденсатора 330 пФ.

вались на осциллограф Tektronix TDS-3034B. Средняя мощность генерации контролировалась измерителем мощности Nova II (OPNIR). Индуктивность зарядного дросселя в цепи зарядки накопительного конденсатора была равна ~ 5 мГн и выбиралась из условия резонансной зарядки накопительного конденсатора при ЧСИ возбуждения ~ 200 кГц.

Моделирование процесса резонансной зарядки накопительного конденсатора через зарядный дроссель показало, что в этом случае накопительный конденсатор заряжается от высоковольтного выпрямителя до удвоенного напряжения $\sim 2U_{HV}$ при ЧСИ возбуждения менее 200 кГц и напряжение на накопительном конденсаторе практически линейно уменьшается в два раза при изменении ЧСИ возбуждения от ~ 200 до ~ 800 кГц. Соответственно энергия, запасаемая в накопительном конденсаторе, уменьшается примерно в четыре раза, что позволяет автоматически поддерживать саморазогревный режим работы лазера при таком изменении ЧСИ возбуждения без изменения емкости накопительного конденсатора и напряжения на высоковольтном выпрямителе.

Экспериментальные исследования энергетических характеристик ЛПС, проводимые в указанных выше условиях, позволили получить максимальную ЧСИ генерации 830 кГц. При этом с ростом ЧСИ возбуждения наблюдалось изменение средней мощности генерации (рис.2) без изменения спектрального состава лазерного излучения. При изменении ЧСИ возбуждения от 250 до 830 кГц суммарная средняя мощность генерации на всех линиях излучения лазера снижалась менее чем на 25%. При исследовании генерации на самоограниченных переходах в ионе Sr II с ростом ЧСИ возбуждения происходило уменьшение длительности импульсов генерации по полувысоте до нескольких наносекунд (рис.3). В то же время генерация в атоме Sr I на $\lambda = 6.456$ мкм прекращалась только с окончанием импульса возбуждения (рис.4).

На рис.5 представлены импульсные вольт-амперные характеристики разряда при различных ЧСИ возбуждения. С увеличением ЧСИ наблюдалось незначительное снижение эффективности энерговклада в ГРТ, среднее значение которой во всем интервале изменения ЧСИ составляло $\sim 45\%$ (относительно мощности, «отбираемой» от выпрямителя) при давлении буферного газа (смесь He–Ne)

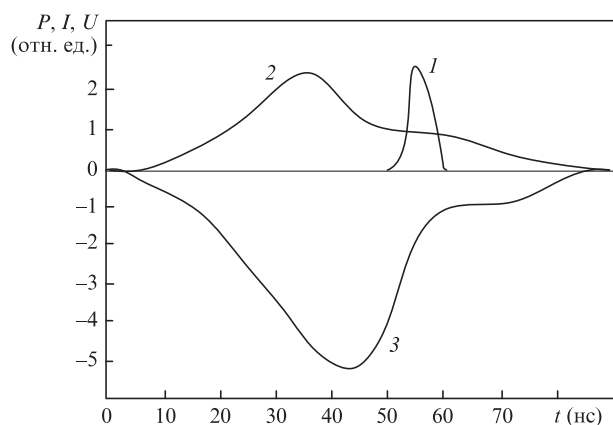


Рис.3. Осциллограммы импульса генерации (P) на $\lambda \sim 1$ мкм в ионе Sr II (1), импульсов тока I (2) и напряжения U (3) при ЧСИ ~ 150 кГц, давлении буферного газа (смесь He–Ne) 38 Тор, емкости накопительного конденсатора 330 пФ и суммарной средней мощности генерации 335 мВт.

примерно 90 Тор. Суммарная мощность генерации уменьшалась в два раза при почти трехкратном увеличении давления буферного газа (рис.6). Интересно отметить, что при давлении гелия ~ 80 Тор средняя мощность генерации группы линий Sr II с $\lambda \sim 1$ мкм была в полтора раза больше мощности генерации на $\lambda = 6.456$ мкм в атоме Sr I. Суммарная мощность группы линий Sr I с $\lambda \sim 3$ мкм при давлении гелия до 100 Тор оставалась практически постоянной, а в дальнейшем незначительно уменьшалась. Эффективность накачки активной среды заметно снижалась с увеличением давления буферного газа – в два раза при увеличении давления почти в три раза.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают выводы численного моделирования [8] о том, что ЧСИ генерации в импульсно-периодическом лазере на самоограниченных переходах стронция может составлять ~ 1 МГц. Ограничение предельной ЧСИ генерации Sr-лазера в наших экспериментах (830 кГц) было обусловлено процессом резонансной зарядки накопительного конденсатора, а не процессами в активной среде лазера: гене-

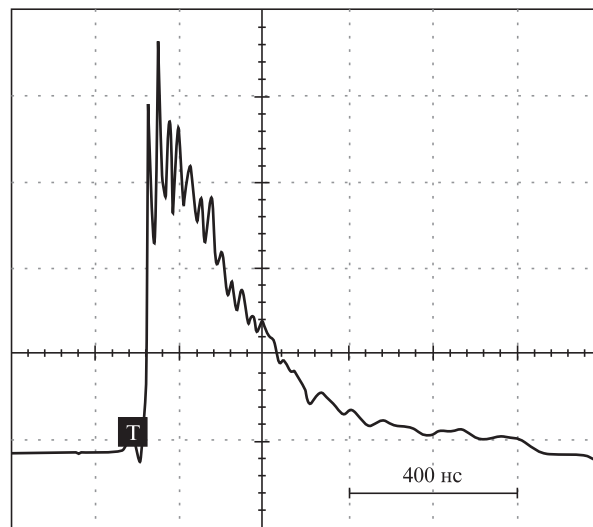


Рис.4. Осциллограмма импульса генерации на $\lambda = 6.456$ мкм (из-за инерционности фотоприемника длительность импульса существенно больше истинной, не превышающей длительности импульса возбуждения).

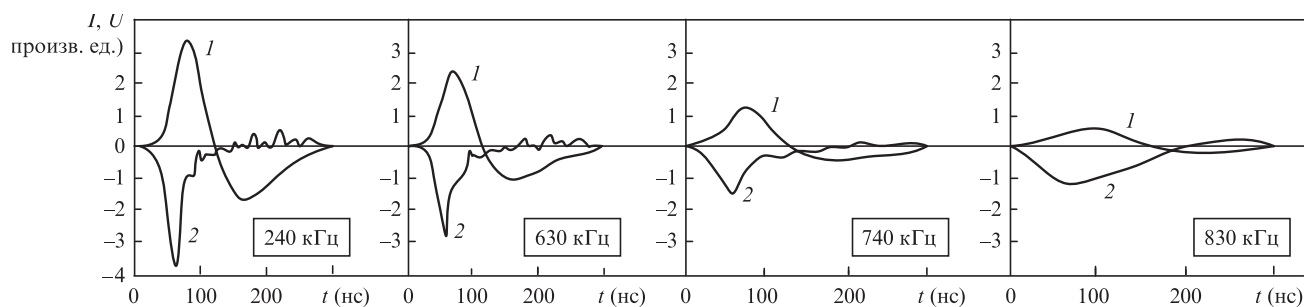
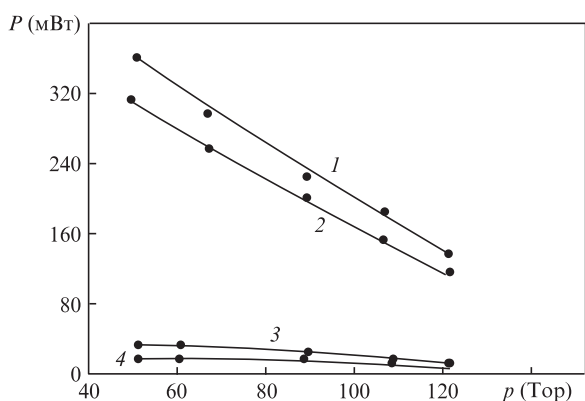
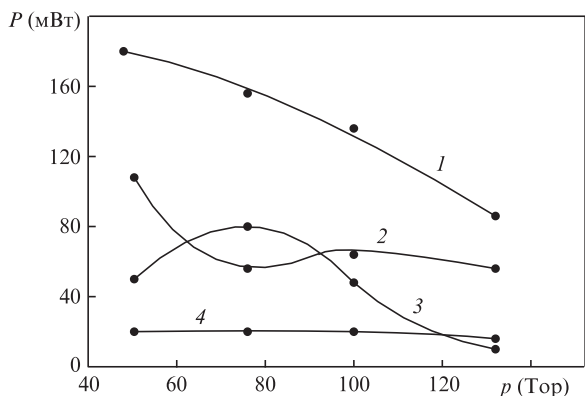


Рис.5. Осциллограммы импульсов тока (1) и напряжения (2) при изменении ЧСИ от 240 до 830 кГц.

Рис.6. Зависимости суммарной средней мощности генерации (1), а также средней мощности генерации на линиях с $\lambda = 6.456$ мкм в атоме Sr I (2), ~ 1 мкм в ионе Sr II (3) и ~ 3 мкм в атоме Sr I (4) от давления буферных газов гелия (а) и неона (б) при ЧСИ генерации 242 кГц и емкости накопительного конденсатора 470 пФ.

рация на всех самоограниченных ИК переходах в атоме Sr I и ионе Sr II имела место до значений ЧСИ возбуждения, при которых накопительный конденсатор еще мог зарядиться до напряжения, превышающего его пороговое значение.

Полученные экспериментальные данные указывают на то, что пороговые условия по накачке активной среды Sr-лазера реализуются при напряженности поля 30–40 В/см, а оптимальная напряженность поля составляет 100–200 В/см.

При этом энергосъем в лазере на парах стронция пропорционален энерговкладу в активную среду в широком диапазоне ЧСИ возбуждения. Низкие пороговые значения отношения E/p (~ 0.2 В·Тор $^{-1}$ ·см $^{-1}$), определяющие возможность квазинепрерывной [12, 13] и непрерывной [14] генерации лазеров на парах щелочно-земельных металлов, обуславливают тот факт, что в наших экспериментах при высоких ЧСИ была достигнута достаточно высокая удельная средняя мощность генерации (30–40 мВт/см 3), соответствующая полученной ранее в ЛПС с рабочим объемом активной среды до 650 см 3 при ЧСИ генерации 10–20 кГц [7].

Настоящая работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты № 11-02-98012-р_сибирь_a и 11-02-98019-р_сибирь_a).

1. Soldatov A.N., Filonov A.G., Shumeiko A.S., Kirilov A.E., Ivanov B., Haglund R., Mendenhall M., Gabella B., Kostadinov I. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **5483**, 252 (2004).
2. Солдатов А.Н., Филонов А.Г., Васильева А.В. *Оптика атмосферы и океана*, **19**, 224 (2006).
3. Soldatov A.N., Polunin Yu.P., Sidorov I.V., Filonov A.G. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4184**, 498 (2006).
4. Солдатов А.Н., Юдин Н.А., Полуниин Ю.П., Реймер И.В., Хохряков И.В. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **51** (1), 6 (2008).
5. Полуниин Ю.П., Солдатов А.Н., Юдин Н.А. *Оптика атмосферы и океана*, **22**, 1051 (2009).
6. Vuchkov N.K., Temelkov K.A., Sabotinov N.V. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **53** (5/2), 29 (2010).
7. Солдатов А.Н. *Изв. вузов. Сер. Физика*, **53** (5/2), 91 (2010).
8. Солдатов А.Н., Юдин Н.А., Васильева А.В., Полуниин Ю.П., Чеботарев Г.Д., Латуш Е.Л., Фесенко А.А. *Квантовая электроника*, **38**, 1009 (2008).
9. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. *Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов* (Новосибирск: Наука, 1985).
10. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. *Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов* (М.: Научная книга, 1998).
11. Little C.E. *Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Applications* (New York: John Wiley & Sons, 1999).
12. Батенин В.М., Калинин С.В., Климовский И.И. *Квантовая электроника*, **9**, 2075 (1982).
13. Батенин В.М., Калинин С.В., Климовский И.И. *ДАН СССР*, **273**, 101 (1983).
14. Климкин В.М., Монастырев С.С., Прокопьев В.Е. *Письма в ЖЭТФ*, **20**, 251 (1974).