

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ**

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники  
Болгарская Академия наук  
Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова  
Международная научно-техническая организация «Лазерная ассоциация»

# **ИННОВАТИКА-2020**

**СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ**

**XVI Международной школы-конференции студентов,  
аспирантов и молодых ученых  
23–25 апреля 2020 г.  
г. Томск, Россия**

*Под редакцией А.Н. Солдатов, С.Л. Минькова*

Scientific & Technical Translations



ИЗДАТЕЛЬСТВО

**Томск – 2020**

**ЛАЗЕРЫ ВИДИМОГО И ИК-ДИАПАЗОНА СПЕКТРА  
НА САМООГРАНИЧЕННЫХ И РЕКОМБИНАЦИОННЫХ  
ПЕРЕХОДАХ В ПАРАХ МЕТАЛЛОВ**

**А.Н. Солдатов**

*Национальный исследовательский Томский государственный университет  
general@tic.tsu.ru*

**LASERS OF THE VISIBLE AND IR RANGE OF THE SPECTRUM  
ON SELF-LIMITING AND RECOMBINATION TRANSITIONS  
IN METAL VAPORS**

**A.N. Soldatov**

*National Research Tomsk State University*

*We have experimentally and numerically investigated a multiwavelength strontium vapour laser which simultaneously emits both in the IR spectrum range on the self-terminating transitions in strontium atoms and ions (6,456 and  $\sim 3$  for SrI, and  $\sim 1$  for SrII) and in the visible range on the recombination transition in strontium ions (0,4305 for SrII). A number of regularities in the behaviour of the output characteristics of lasing, which allow for a targeted search for optimal excitation conditions of the multiwavelength strontium vapour lasers, are established.*

*Keywords: strontium vapor laser, simultaneous generation at several wavelengths, self-limited transition, recombination transition*

Саморазогревный импульсно-периодический лазер на парах стронция является эффективным источником когерентного излучения в ИК диапазоне спектра на самоограниченных переходах атома и иона стронция ( $\lambda = 6,456$  и  $\sim 3$  мкм для SrI и  $\lambda \sim 1$  мкм для SrII) [1–7]. Кроме того, этот лазер с высокой эффективностью излучает в видимом диапазоне спектра на рекомбинационных переходах иона стронция ( $\lambda = 0,4305$  и  $0,4162$  мкм для SrII) [1, 2, 6–12]. При этом существует возможность реализации режима генерации одновременно в ИК и видимой областях спектра на нескольких длинах волн (т. е. режима многоволновой генерации) за счет как ионизационного, так и рекомбинационного механизма формирования инверсии [1, 2, 13]. В данном случае лазер на парах стронция может использоваться в качестве источника многоволнового излучения для прикладных и научных целей. При этом реализация рекомбинационного режима генерации обеспечивает визуализацию ИК излучения лазера на парах стронция (т. е. видимое излучение на рекомбинационных переходах ( $\lambda = 0,4305$  и

0,4162 мкм для SrII) может рассматриваться как визуализатор пучка ИК излучения лазера на парах стронция) [13].

При исследованиях лазеров на парах металлов наряду с экспериментальными методами широко применяется метод математического моделирования, с помощью которого могут быть решены задачи поиска оптимальных условий возбуждения активных сред, определения достижимых параметров генерации, выявления физических механизмов, описывающих наблюдаемые экспериментально закономерности [6, 11, 12, 14–15].

В экспериментах по исследованию многоволновой генерации нами использовалась саморазогревная лазерная трубка, разрядный канал которой был изготовлен из керамической BeO-трубки с длиной  $l = 50$  см и внутренним диаметром  $d = 1,5$  см. На торцах разрядного канала в «холодных» буферных зонах трубки располагались электроды. Выходные окна лазерной трубки были изготовлены из фторида кальция. В качестве глухого зеркала резонатора применялось зеркало с алюминиевым покрытием, а выходным зеркалом служила плоскопараллельная пластина из фторида кальция или кварцевая пластина с диэлектрическим покрытием для области  $\lambda = 0,43$  мкм. Регистрация импульсов тока и генерации проводилась с помощью токового шунта и коаксиального фотоэлемента ФЭК-24 соответственно. Регистрируемые датчиками сигналы подавались на осциллограф Tektronix TDS-3032. Средняя мощность генерации контролировалась измерителем мощности OPHIR (NovaII). Для выделения различных спектральных составляющих при измерениях генерируемой мощности использовались светофильтры СЗС-20 и СЗС-8, пропускающие излучение в областях  $\sim 1$  и  $\sim 3$  мкм соответственно.

В результате проведенных исследований была получена одновременная многоволновая генерация в ИК и фиолетовой областях спектра на шести переходах SrI и SrII, соответствующим длинам волн 6,456, 3,066, 3,011, 2,92, 2,69, 2,6, 1,033, 1,091 и 0,4305 мкм (рис. 1).

Эксперименты показали, что оптимальной для возбуждения активной среды является схема Блюмлейна, обеспечивающая необходимую для эффективной генерации на самоограниченных и рекомбинационных переходах стронция крутизну как переднего, так и заднего фронта импульса тока.

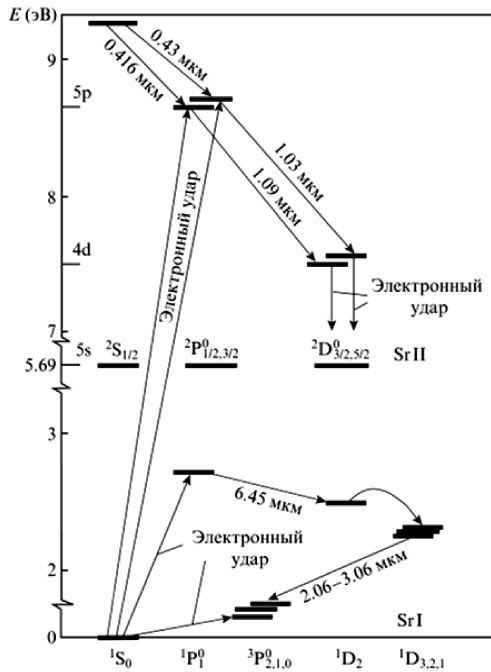


Рис. 1. Упрощенная схема лазерных переходов в атоме и ионе стронция

На рис. 2 приведены типичные осциллограммы импульсов тока через лазерную трубку (имевших амплитуду 100–200 А), а также импульсов генерации на  $\lambda \sim 1$  и 0,4305 мкм для SrII. Видно, что генерация на самоограниченных переходах SrII (как и на переходах SrI) возникает на стадии нарастания тока. После окончания импульса тока наблюдается рекомбинационная линия генерации ( $\lambda = 0,4305$  мкм для SrII), при этом некоторое рассогласование приводит, как видно из рис. 2, к наличию небольших осцилляций тока на стадии раннего послесвечения, обуславливающих немонотонность спада импульса генерации (ввиду существенной зависимости скорости рекомбинационной накачки от электронной температуры на стадии послесвечения), что, однако, не сказывается существенно на энергетических характеристиках генерации.

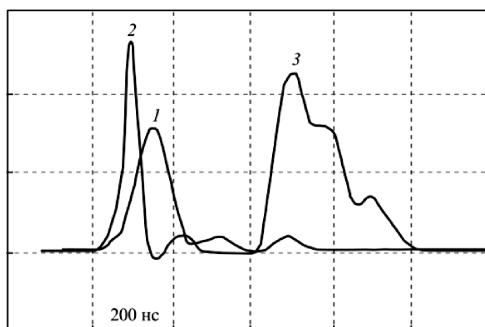


Рис. 2. Типичные оциллограммы импульсов тока через лазерную трубку (1) и генерации на  $\lambda \sim 1$  (2) и 0,4305 мкм (3) для SrII

Проведенные исследования показали, что совместная генерация на самоограниченных и рекомбинационном переходах стронция наблюдается в достаточно широком диапазоне парциальных давлений компонентов рабочей смеси при выбранной схеме возбуждения. В качестве буферного газа использовался гелий либо смесь его с неоном. Оптимальное давление буферного газа для многоволновой генерации составляло 100 – 300 Тор, при этом небольшие добавки неона к гелию ( $p_{Ne} < 15$  Тор) практически не сказывались на характеристиках генерации, но облегчали зажигание разряда в «холодной» трубке, в то время как при больших добавках неона энергетические характеристики на  $\lambda = 0,4305$  мкм для SrII снижались вследствие уменьшения скорости охлаждения электронов на стадии послесвечения при упругих соударениях с тяжелыми атомами и ионами неона.

Парциальное давление стронция определялось температурой стенки трубки, задаваемой в саморазогревном режиме потребляемой трубкой мощностью, которая оптимизировалась путем вариаций емкости накопительных конденсаторов в схеме Блюмлейна ( $C_1 = C_2 \approx 1000 - 1600$  пФ), напряжения высоковольтного выпрямителя ( $U \approx 3,5 - 7$  кВ), а также частоты следования импульсов ( $f \approx 5 - 15$  кГц). Рабочий диапазон температур для генерации на  $\lambda = 0,4305$  мкм составлял 560 – 620 °С, в то время как для генерации на  $\lambda = 6,456, \sim 3$  и  $\sim 1$  мкм он простирался до  $\sim 700$  °С и выше.

При вариациях условий возбуждения средние мощности генерации для разных спектральных компонент при совместной генерации

изменялись в следующих пределах:  $P_{ay}(0,4305 \text{ мкм}) \approx 0,05 - 0,3 \text{ Вт}$ ,  $P_{ay}(6,456 \text{ мкм}) \approx 0,4 - 1,25 \text{ Вт}$ ,  $P_{ay}(\sim 3 \text{ мкм}) \approx 0,05 - 0,45 \text{ Вт}$ ,  $P_{ay}(\sim 1 \text{ мкм}) \approx 0,05 - 0,2 \text{ Вт}$ . Для примера на рис. 3 приведены зависимости этих мощностей от давления гелия при  $p_{\text{He}} = 15 \text{ Тор}$ . Видно, что при  $U > 5,6 \text{ кВ}$  мощность генерации в видимой области снижается с ростом напряжения и, следовательно, с ростом температуры и давления паров стронция, в то время как мощность ИК генерации возрастает.

Для проведения численных экспериментов в настоящей работе применялась математическая модель ионного He-Sr-лазера [15], включающая в себя совместное описание электрической цепи накачки, плазмы импульсно-периодического разряда и лазерного излучения на переходах SrII в видимой и ИК областях спектра. С использованием этой модели нами осуществлен численный поиск режимов возбуждения активной среды ионного He-Sr-лазера, обеспечивающих возможность эффективной совместной генерации на рекомбинационном ( $\lambda = 0,4305 \text{ мкм}$ ) и самоограниченных ( $\lambda = 1,033$  и  $1,091 \text{ мкм}$ ) переходах иона стронция.

На рис. 4а представлены рассчитанные импульсы тока и генерации на линиях с  $\lambda = 0,4305, 1,033$  и  $1,091 \text{ мкм}$ , вид которых согласуется с экспериментальными осциллограммами (рис. 2) и является типичным для ионных He-Sr-лазеров [1,2]. Из рис. 4б, где приведены результаты расчетов концентраций атомов, однократно и двукратно ионизованных ионов стронция, видно, что за время импульса тока происходит значительная двукратная ионизация стронция в результате прямой и ступенчатой ионизаций электронным ударом. Это обеспечивает интенсивную рекомбинационную накачку уровней ионов стронция и генерацию на линии с  $\lambda = 0,4305 \text{ мкм}$  на стадии раннего послесвечения (рис. 4а). Рекомбинационная накачка, скорость которой  $W_r$  резко зависит от электронной температуры  $T_e$  ( $W_r \propto T_e^{-9/2}$  [1,2, 6 – 9]), «включается» на стадии послесвечения после быстрого уменьшения  $T_e$  (рис. 4в), происходящего за счет упругих столкновений электронов с атомами и ионами легкого буферного газа гелия. На переднем же фронте импульса тока в результате возбуждения электронным ударом имеют место инверсия населенностей и генерация на самоограниченных переходах с  $\lambda = 1,033$  и  $1,091 \text{ мкм}$  (рис. 4а).

На рис. 5 представлены рассчитанные по математической модели зависимости средней мощности генерации на переходах с  $\lambda = 0,4305$  и  $1,091 \text{ мкм}$  от давления гелия. Видно, что модель достаточно точно

отражает основные тенденции в поведении средней мощности генерации ионного He-Sr-лазера как в рекомбинационном, так и в ионизационном режиме накачки (рис. 3а). Как следует из результатов численного моделирования, эффективная совместная генерация на ионных переходах стронция в видимой и ИК областях спектра возможна в довольно широком диапазоне условий.

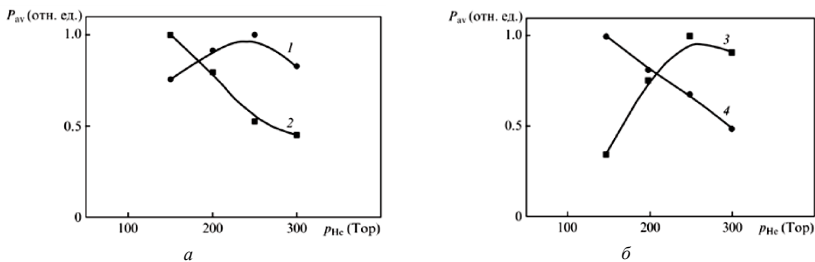


Рис. 3. Зависимости средней мощности генерации  $P_{av}$  от давления гелия на  $\lambda = 0,4305$  (1) и  $\sim 1$  мкм (2) в SrII (а), а также на  $\lambda \sim 3$  (3) и 6.456 мкм (4) в SrI (б)

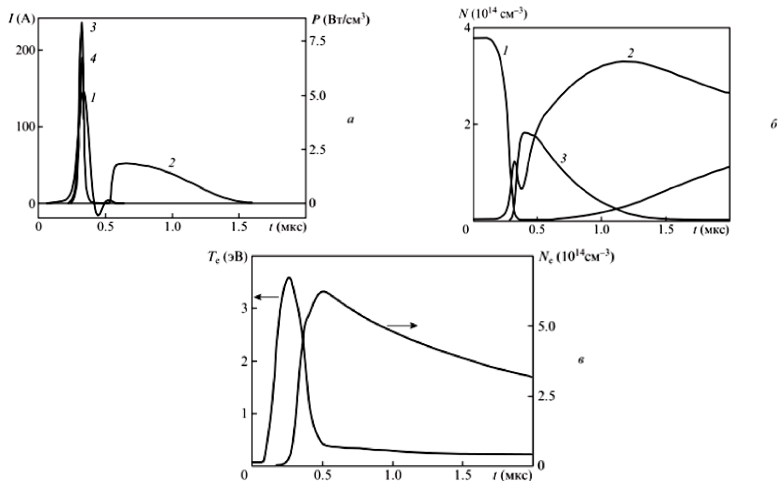


Рис. 4. Рассчитанные временные зависимости импульсов тока  $I$  (1) и генерации ( $P$ ) на  $\lambda = 0,4305$  (2), 1,033 (3) и 1,091 мкм (4) в SrII (а), концентраций  $N$  атомов (1), однократно (2) и двукратно (3) ионизованных ионов стронция (б), а также концентрации  $N_e$  и температуры  $T_e$  электронов (в) в активной среде лазера на парах стронция при  $l = 50$  см,  $d = 1,5$  см,  $C_1 = C_2 = 1150$  пФ,  $p_{He} = 250$  Тор

На основе результатов моделирования установлено, что с ростом давления буферного газа гелия имеет место монотонное уменьшение средней мощности генерации на самоограниченных переходах иона стронция (рис. 5), обусловленное снижением электронной температуры во время импульса тока и соответствующим снижением скорости возбуждения электронным ударом резонансных уровней SrII (являющихся верхними лазерными уровнями) на переднем фронте импульса тока.

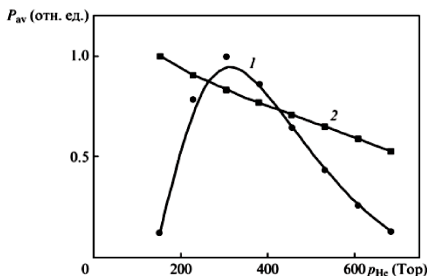


Рис. 5. Рассчитанные зависимости средней мощности генерации на  $\lambda = 0,4305$  (1) и 1,091 мкм (2) в SrII от давления гелия при  $l = 50$  см,  $d = 1,1$  см,  $C_1 = C_2 = 1150$  пФ

Для рекомбинационных переходов иона стронция средняя мощность генерации возрастает с ростом давления гелия вплоть до оптимальных значений в несколько сотен торр. При дальнейшем увеличении давления она снижается (рис. 3а). Рост средней мощности при увеличении давления обусловлен ростом энергии импульсов генерации, связанным с ускоренным охлаждением электронов при упругих соударениях с атомами и ионами гелия и соответствующим ростом скорости рекомбинационной накачки уровней SrII. Снижение же средней мощности при высоких давлениях гелия в основном вызвано ограничением скорости охлаждения электронов на стадии раннего послесвечения вследствие нагрева на заднем фронте импульса тока, которое проявляется, когда уменьшающееся с ростом давления время охлаждения электронов становится соизмеримым с длительностью заднего фронта импульса тока [1, 2].

Таким образом, в лазере на парах стронция получена и исследована одновременная многоволновая генерация в ИК и видимой областях спектра на самоограниченных и рекомбинационных переходах атома и иона стронция с  $\lambda = 6,456, \sim 3, \sim 1$  и 0,4305 мкм. На основе проведенных



экспериментальных и численных исследований установлено, что такая многоволновая генерация возможна в достаточно широком диапазоне условий. Также установлен ряд закономерностей в поведении выходных характеристик генерации и выявлены физические механизмы, определяющие наблюдаемые закономерности, что позволяет рассчитывать на реализацию лазера на парах стронция с более высокими энергетическими характеристиками при увеличении объема активной среды. Полученные в настоящей работе результаты позволяют осуществлять целенаправленный поиск оптимальных условий возбуждения многоволновых лазеров на парах стронция, а также прогнозировать создание таких лазеров с новыми эксплуатационными характеристиками.

### Литература

1. Солдатов А.Н., Латуш Е.Л., Чеботарев Г.Д. и др. Импульсно-периодические лазеры на парах стронция и кальция. – Томск : ТМЛ-Пресс, 2012.
2. Soldatov A.N., Sabotinov N.V., Latush E.L. et al. Strontium and Calcium Vapour Lasers. – Sofia : Prof. Marin Drinov Academic Publishing House, 2013–2014. – Vol. I, II.
3. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. – Новосибирск : Наука, 1985.
4. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А. и др. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. – М. : Научная книга, 1998.
5. Soldatov A.N., Filonov A.G., Shumeiko A.S. et al. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. – 2004. – Vol. 5483. – P. 252–261.
6. Little C.E. Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Applications. – Chichester – New York – Brisbane – Toronto – Singapore : John Willey & Sons, 1999.
7. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Том XI-4. Газовые и плазменные лазеры / под ред. В.Е. Фортова. – М. : Физматлит, 2005.
8. Ivanov I.G., Latush E.L., Sem M.F. Metal Vapour Ion Lasers: Kinetic Processes and Gas Discharges. – Chichester – New York – Brisbane – Toronto – Singapore : John Willey & Sons, 1996.
9. Иванов И.Г., Латуш Е.Л., Сэм М.Ф. Ионные лазеры на парах металлов. – М. : Энергоатомиздат, 1990.
10. Latush E.L., Chebotarev G.D., Sem M.F. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. – 2000. – Vol. 4071. – P. 119.
11. Чеботарев Г.Д., Латуш Е.Л., Пруцаков О.О. и др. // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38. – С. 299.
12. Чеботарев Г.Д., Латуш Е.Л., Фесенко А.А. // Квантовая электроника. – 2008. – Т. 38. – С. 309.
13. Васильева А.В., Латуш Е.Л., Полунин Ю.П. и др. // Изв. вузов. Серия Физика. – 2010. – № 5/2. – С. 62.
14. Carman R.J. // IEEE J. Quantum Electron. – 1990. – Vol. 26. – P. 1588.
15. Chebotarev G.D., Prutsakov O.O., Latush E.L. // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. – 2004. – Vol. 5483. – P. 83.