

О предельной частоте следования импульсов генерации самоограниченного He–Sr⁺-лазера

А.Н. Солдатов^{1,2}, Н.А. Юдин¹, А.В. Васильева^{1,2}, Ю.П. Полуни²,
Е.Л. Латуш³, Г.Д. Чеботарев³, А.А. Фесенко^{3*}

¹Западно-Сибирский филиал Российского государственного университета
инновационных технологий и предпринимательства

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

²Томский государственный университет

634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

³Южный федеральный университет

344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105

Поступила в редакцию 27.03.2008 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований частотно-энергетических характеристик лазера на самоограниченных переходах иона стронция ($\lambda = 1,03$ и $1,09$ мкм) методом введения перед каждым импульсом возбуждения дополнительного импульса и результаты численного моделирования кинетики процессов в активной среде этого лазера. Показано, что частота следования импульсов генерации самоограниченного He–Sr⁺-лазера может достигать ~ 1 МГц, при этом наблюдается увеличение энергии импульса генерации в импульсе возбуждения в определенном диапазоне задержек между дополнительным и возбуждающим импульсами.

Ключевые слова: самоограниченный He–Sr⁺-лазер, импульсно-периодический режим, математическое моделирование.

Введение

Одним из наиболее эффективных среди RM-лазеров (на переходах с резонансного на метастабильный уровень) является лазер на парах меди (ЛПМ). Исследованию процессов, происходящих в его активной среде, посвящено наибольшее количество публикаций [1–3]. В ЛПМ, как известно, инверсия возникает только в период ионизационной неравновесности плазмы на переднем фронте импульса возбуждения, поскольку в последующий период (квазистационарной ионизации) каждому акту возбуждения верхнего лазерного уровня соответствует акт его ионизации [1, 4]. Это определяет ряд взаимосвязанных причин ограничения частотно-энергетических характеристик ЛПМ.

Во-первых, обуславливает насыщение населенности верхних лазерных уровней в импульсе возбуждения и является фактором ограничения энергии импульса генерации сверху. Поэтому для достижения высокого уровня средней мощности генерации ЛПМ требуются высокие частоты следования импульсов возбуждения.

Во-вторых, определяет наличие критической предимпульсной населенности метастабильных состояний, при достижении которой инверсия в активной среде не реализуется, что определяет предельную частоту следования импульсов (ЧСИ) генерации [5]. Следовательно, ЧСИ и уровень средней мощности генерации должны определяться процессом релаксации метастабильных состояний в межимпульсный период [6].

Однако хорошо известно, что метастабильные состояния эффективно разрушаются столкновениями с остывающими электронами [7]. Это позволило сделать предположение [8] и в дальнейшем экспериментально его обосновать [9], что метастабильные состояния в активной среде могут разрушаться за времена < 1 мкс, а основным фактором ограничения ЧСИ является высокая предимпульсная концентрация электронов n_e , которые невозможно быстро разогреть из-за наличия индуктивности в разрядном контуре лазера. Существует критическая предимпульсная $n_e \sim 10^{14}$ см⁻³, когда невозможно разогреть электроны до температуры, при которой скорость заселения верхнего лазерного уровня превышает скорость заселения нижнего [10].

Вышесказанное демонстрирует неоднозначность в оценке частотно-энергетических характеристик даже наиболее изученного ЛПМ и указывает на необходимость дальнейшего исследования RM-лазеров с целью выяснения энергетического потенциала этого класса лазеров. Исследования, прове-

* Анатолий Николаевич Солдатов; Николай Александрович Юдин; Анна Викторовна Васильева (anita@tic.tsu.ru); Юрий Петрович Полуни; Евгений Леонидович Латуш (latush@phis.rsu.ru); Геннадий Дмитриевич Чеботарев; Александр Анатольевич Фесенко (fescenko_a@pochta.ru).

денные в [11–14], показали, что энергетические характеристики лазера на парах стронция сравнимы с энергетическими характеристиками ЛПМ. При этом процессы, протекающие в активной среде лазера на парах стронция, имеют существенные отличия от процессов в ЛПМ, что обуславливает необходимость более детального исследования физики процессов в активной среде лазера на самоограниченных переходах атома и иона стронция.

В настоящей статье приводятся результаты экспериментальных исследований частотно-энергетических характеристик самоограниченного He–Sr⁺-лазера (1,03 и 1,09 мкм) методом введения перед каждым импульсом возбуждения дополнительного импульса, а также результаты численного моделирования кинетики процессов в активной среде, соответствующие экспериментальным условиям.

Экспериментальные исследования проводились с газоразрядной трубкой (ГРТ), разрядный канал которой был изготовлен из BeO-керамической трубки внутренним диаметром 15 мм и длиной 500 мм. На торцах разрядного канала в холодных буферных зонах ГРТ располагались электроды. В качестве буферного газа использовался гелий при давлении ~13,2 кПа. Импульсно-периодический режим двухимпульсного возбуждения активной среды осуществлялся за счет разряда накопительных конденсаторов тиратронами: возбуждающего импульса – тиратроном ТГИ1-500/20 и дополнительного импульса – тиратроном ТГИ1-270/12.

Энергия возбуждающего и дополнительного импульсов изменялась путем варьирования напряжения на высоковольтных выпрямителях, при этом за счет использования схемы резонансного заряда в каждом канале начальные напряжения на накопительных конденсаторах были вдвое выше напряжений на выпрямителях. Частота следования импульсов возбуждения изменялась в пределах 15–19 кГц. 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 (Nova-II). Для исследования спектрального состава генерации использовались светофильтры: СЗС-20, пропускающий излучение в области ~1 мкм, и СЗС-8, пропускающий излучение в области ~3 мкм.

На первом этапе эксперимента с помощью возбуждающего импульса лазер на парах стронция выводился на рабочий режим одновременной генерации длин волн: $\lambda = 6,45; 2,60; 2,69; 2,92; 3,01$ и $3,06$ мкм SrI и $\lambda = 1,03$ и $1,09$ мкм SrII суммарной мощностью генерации ~800 мВт. Затем перед каждым импульсом возбуждения на ГРТ подавался дополнительный импульс с регулируемой задержкой относительно основного импульса [15]. В ходе эксперимента изменялись напряжение высоковольтного выпрямителя (от 0 до 3,6 кВ) и емкость накопительного конденсатора (500, 891 и 1650 пФ)

дополнительного канала. Напряжение на высоковольтном выпрямителе (3,6 кВ) и емкость накопительного конденсатора (891 пФ) в канале формирования импульса возбуждения не изменялись, как и емкость обостряющего конденсатора (94 пФ).

Проведенные исследования показали, что при уменьшении задержки между возбуждающим и дополнительным импульсами (при сравнимых энергиях накачки в обоих импульсах) не наблюдалось изменения энергии генерации на самоограниченных переходах как атома SrI, так и иона SrII в дополнительном импульсе. При этом наблюдается снижение энергии генерации на самоограниченных переходах SrI в возбуждающем импульсе. В то же время происходит увеличение энергии импульса генерации на самоограниченных переходах SrII в импульсе возбуждения в определенном диапазоне задержек. Для иллюстрации вышесказанного на рис. 1 и 2 приведены осциллограммы импульсов тока и генерации на самоограниченных ИК-переходах SrII ($\lambda = 1,03$ и $1,09$ мкм) в дополнительном и возбуждающем импульсах накачки при задержке между импульсами 0,72 и 2,6 мкс соответственно.

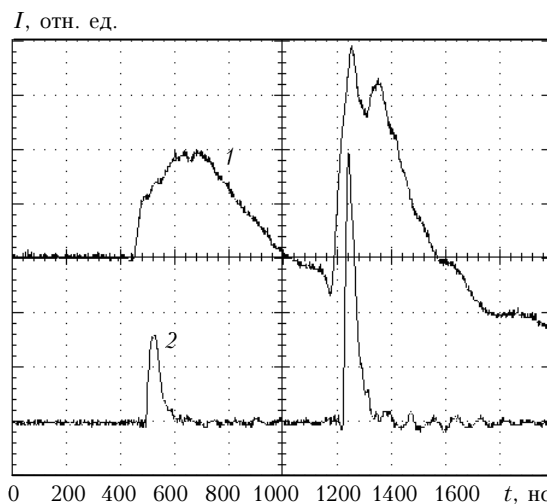


Рис. 1. Осциллограммы импульсов тока (1) и генерации на ИК-переходах SrII (2) при задержке 0,72 мкс между дополнительным и возбуждающим импульсами

Более наглядное представление о процессах, протекающих в активной среде, может дать численное моделирование кинетики этих процессов. Моделирование проводилось с использованием самосогласованной математической модели He–Sr⁺-лазера [16]. Математическая модель включает в себя совместное описание электрической цепи и плазмы импульсно-периодического разряда. Моделирование электрической цепи сводится к записи дифференциальных уравнений для токов и напряжений, которые решаются совместно с кинетическими уравнениями для параметров плазмы. При расчете поуровневой кинетики иона стронция учитывалось 20 возбужденных уровней, показанных на рис. 3, где дана также нумерация уровней, используемая в расчетах.

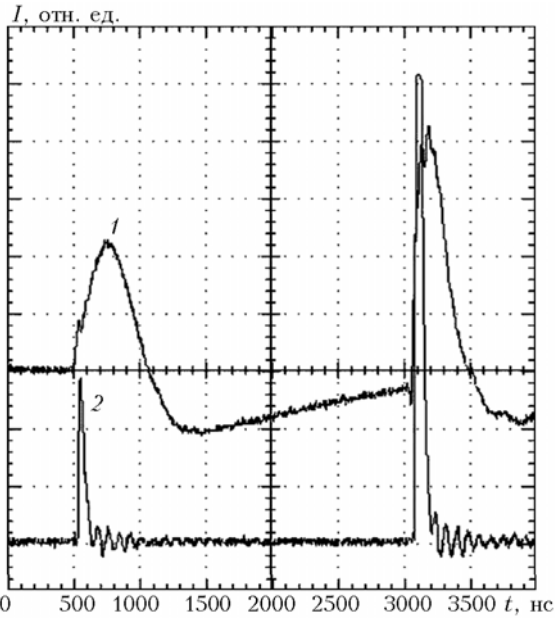


Рис. 2. Осциллограммы импульсов тока (1) и генерации на ИК-переходах SrII (2) при задержке 2,6 мкс между дополнительным и возбуждающим импульсами

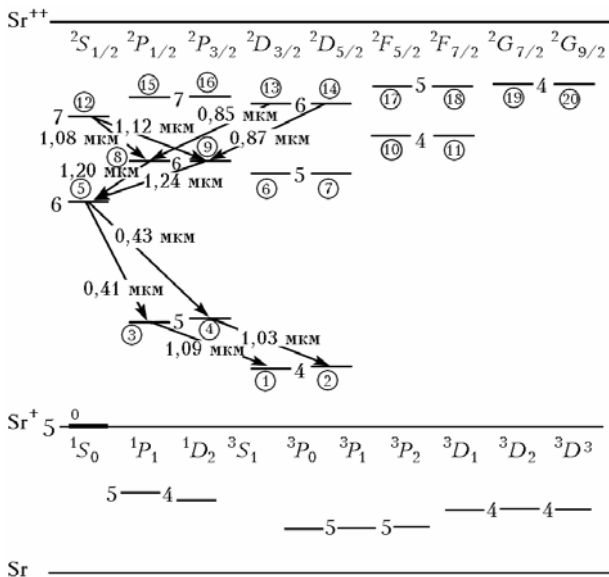


Рис. 3. Схема уровней атома и иона стронция (стрелками указаны переходы SrII, на которых наблюдается лазерная генерация; в кружках указана нумерация уровней SrII, используемая в математической модели)

Дифференциальные уравнения баланса населенностей возбужденных уровней SrII имеют следующий вид:

$$\frac{dN_i}{dt} = \sum_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^{20} (A_{j,i} + F_{j,i} + G_{j,i}) N_j - \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq i}}^{20} (A_{i,k} + F_{i,k} + G_{i,k}) N_i - \sum_{i=1}^{20} K_{Sr(i)} N_{Sr(i)} N_e + \delta_i + W_p^{(i)}; \quad i=1...20,$$

где $A_{i,k}$ — вероятности оптических переходов; $F_{i,k} = \langle \sigma_{i,k} v_e \rangle n_e = V_{i,k} n_e$ — вероятности электронного возбуждения или девозбуждения; $G_{i,k} = K_{i,k} N_{He}$ —

вероятности атомного возбуждения или девозбуждения; $K_{Sr(i)}$ — константы скорости ионизации возбужденных состояний; δ_i — слагаемые, учитывающие эффект насыщения на лазерных переходах; $W_p^{(i)}$ — парциальные скорости накачки уровней.

При моделировании использовались параметры, примерно соответствующие экспериментальным условиям. При расчетах режимов сдвоенных импульсов задавались одинаковые емкости накопительных конденсаторов ($C = 1000$ пФ) и начальные напряжения для обоих импульсов.

На рис. 4–6 представлены результаты моделирования (ток разряда I , ненасыщенный коэффициент усиления k на ИК-переходах SrII, приведенные населенности рабочих уровней N1–N4 и параметры плазмы: концентрация n_e и температура T_e электронов) режима сдвоенных импульсов при межимпульсном интервале 2,6 мкс и начальном напряжении на накопительных конденсаторах $U = 7,25$ кВ.

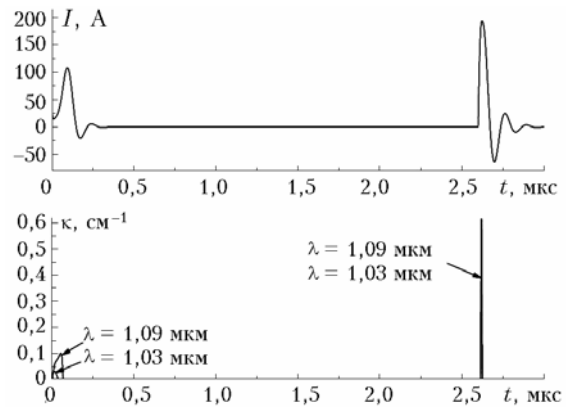


Рис. 4. Рассчитанные дополнительный и возбуждающий импульсы тока и коэффициенты усиления на ИК-переходах SrII при задержке 2,6 мкс

Как видно из рис. 5, в межимпульсный период происходит эффективное электронное девозбуждение метастабильных состояний SrII за времена < 1 мкс, что и определяет предельную частоту следования импульсов генерации ~ 1 МГц.

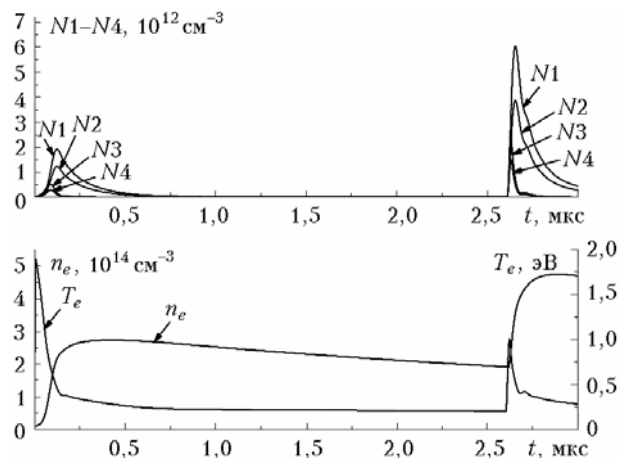


Рис. 5. Рассчитанные населенности рабочих уровней ($\lambda = 1,03$ мкм: N4 \rightarrow N2; $\lambda = 1,09$ мкм: N3 \rightarrow N1), концентрация n_e и температура T_e электронов

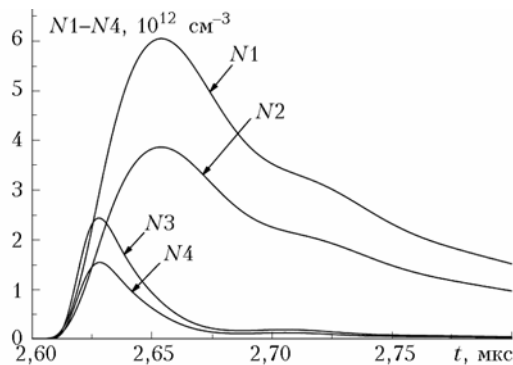


Рис. 6. Рассчитанные населенности рабочих уровней ($\lambda = 1,03$ мкм: $N4 \rightarrow N2$; $\lambda = 1,09$ мкм: $N3 \rightarrow N1$) во втором импульсе возбуждения

В режиме двоянных импульсов как в эксперименте (см. рис. 2), так и при моделировании (см. рис. 4) наблюдаются увеличение амплитуды и укорочение второго импульса тока по сравнению с первым. Это обусловлено наличием высокой остаточной предимпульсной концентрации электронов n_e (см. рис. 5) и, соответственно, высокой предимпульсной проводимостью плазмы.

Что касается усиления, то во втором импульсе усиление выше, чем в первом (см. рис. 4), и даже выше, чем в режиме одиночных импульсов. Это согласуется с экспериментальными данными (см. рис. 2) и является следствием того, что при малом межимпульсном интервале к началу второго импульса остается существенной концентрация не успевших прорекомбинировать ионов стронция, которыми в основном определяется предимпульсная n_e (см. рис. 5). Соответственно снижается доля энергии, затрачиваемая на создание ионов Sr^+ из основного состояния атомов Sr, и повышается доля энергии, идущая на возбуждение резонансных уровней SrII из основного состояния Sr^+ . Несмотря на то что возросшая предимпульсная n_e препятствует быстрому нагреву электронного газа и приводит к снижению T_e во втором импульсе тока, населенности резонансных уровней и инверсия возрастают (см. рис. 5, 6).

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования, а также результаты численного моделирования кинетики процессов в активной среде самоограниченного He-Sr⁺-лазера показали, что частота следования импульсов генерации может достигать ~1 МГц, что обусловлено достаточно быстрой релаксацией метастабильных состояний иона стронция за счет электронного девозбуждения. Установлено увеличение энергии импульса генерации в импульсе возбуждения в определенном диапазоне задержек между дополнительным и возбуждающим импульсами, обусловленное существенной остаточной предимпульсной концентрацией не успевших прорекомбинировать ионов стронция.

A.N. Soldatov, N.A. Yudin, A.V. Vasilieva, Yu.P. Polunin, E.L. Latush, G.D. Chebotarev, A.A. Fesenko. About pulse repetition rate of self-terminating He-Sr⁺ laser.

Results of experimental researches of frequency and energy characteristics of laser on self-terminating transitions in strontium ion ($\lambda = 1.03$ and 1.09 μm) by an introduction method before each excitation pulse of an additional pulse and results of theoretical calculations of the parameters of the active He-Sr⁺ laser medium are presented. It is shown, that pulse repetition rate of self-terminating He-Sr⁺ laser can reach ~1 MHz, the increase of pulse energy in a certain pulse-delay range is thus observed.

1. Солдатов А.Н., Соломонов В.И. Газоразрядные лазеры на самоограниченных переходах в парах металлов. Новосибирск: Наука, 1985. 151 с.
2. Батенин В.М., Бучанов В.В., Казарян М.А., Климовский И.И., Молодых Э.И. Лазеры на самоограниченных переходах атомов металлов. М.: Науч. книга, 1998. 544 с.
3. Little C.E. Metal Vapour Lasers // Physics, Engineering and Applications. New York: John Wiley & Sons, 1999. 620 p.
4. Юдин Н.А., Клишкин В.М., Прокотьев В.Е. Оптогальванический эффект в лазере на самоограниченных переходах атома меди // Квант. электрон. 1999. Т. 28. № 9. С. 273–276.
5. Kazaryan M.A., Lyabin N.A., Yudin N.A. Prospects for further development of self-heated lasers on the self-contained transitions of a copper atom // J. of Russian Laser Research. 2004. V. 25. N 3. P. 267–297.
6. Исаев А.А., Петраш Г.Г., Пономарев И.В. Релаксация метастабильных атомов в послесвечении лазера на парах меди // Квант. электрон. 1986. Т. 13. № 11. С. 2295–2301.
7. Смирнов Б.М. Возбужденные атомы. М.: Энергоиздат, 1982. 231 с.
8. Бохан П.А., Силантьев В.И., Соломонов В.И. О механизме ограничения частоты следования импульсов генерации в лазере на парах меди // Квант. электрон. 1980. Т. 7. № 7. С. 1264–1269.
9. Бохан П.А., Закревский Д.Э. Влияние согласования генератора накачки с лазерной трубкой и условий накачки на релаксацию метастабильных состояний и частотно-энергетические характеристики лазера на парах меди // Квант. электрон. 2002. Т. 32. № 7. С. 602–608.
10. Яковленко С.И. Критическая плотность электронов при ограничении частоты следования импульсов в лазере на парах меди // Квант. электрон. 2000. Т. 30. № 6. С. 501–505.
11. Soldatov A.N., Filonov A.G., Shumeiko A.S., Kirilov A.E., Ivanov B., Haglund R., Mendenhall M., Gabella B., Kostadinov I. A Sealed-off Strontium-Vapor Laser // Proc. SPIE. 2004. V. 5483. P. 252–261.
12. Горбунова Т.М., Солдатов А.Н., Филонов А.Г. О механизме формирования инверсии на инфракрасных переходах атома SrI и иона SrII // Оптика атмосф. и океана. 2004. Т. 17. № 2–3. С. 262–265.
13. Солдатов А.Н., Филонов А.Г., Васильева А.В. Исследование работы Sr-лазера при высоких частотах повторения импульсов // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19. № 2–3. С. 224–226.
14. Soldatov A.N., Filonov A.G., Polunin Yu.P., Sidorov I.V. A Multiple-Wavelength Infrared SrI- and SrII-Vapor Laser Oscillator Amplifier System // The 8-th Sino-Russian Symp. on Laser Physics and Laser Technologies. Tomsk, Russia, 10–15 August 2006. P. 26–29.
15. Солдатов А.Н. Физика и техника лазеров на парах меди с управляемыми параметрами // Оптика атмосф. и океана. 1993. Т. 6. № 6. С. 650–658.
16. Chebotarev G.D., Prutsakov O.O., Latush E.L. Mathematical modeling of ion recombination strontium vapor laser // Proc. SPIE. 2004. V. 5483. P. 83–88.