

Ионный лазер на парах стронция в режиме многоволновой генерации

Г.Д. Чеботарев

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: Проведены численные исследования зависимостей выходных характеристик ионного лазера на парах стронция от давления и температуры активной среды. Найден диапазон условий возбуждения активной среды для реализации многоволнового режима излучения на видимых и инфракрасных переходах иона стронция ($\lambda=430,5$; $416,2$; 1091 и 1033 нм SrII). Результаты исследований обеспечивают возможность выбирать условия оптимального возбуждения многоволновых стронциевых лазеров, а также управлять относительным вкладом различных спектральных компонент в выходное излучение.

Ключевые слова: многоволновое излучение, рекомбинационная накачка, самоограниченный переход, лазер на парах стронция, численное моделирование.

Лазерное излучение в широком спектральном диапазоне может быть обеспечено лазерами на парах металлов [1-3]. Одним из представителей этого класса лазеров является лазер на парах стронция (ЛПС), который обладает высокими характеристиками генерации на рекомбинационных переходах в фиолетовой области спектра ($\lambda=430,5$ и $416,2$ нм SrII – см. рис. 1) и перспективен для широкого ряда практических применений [4-6]. Особенность ЛПС состоит в возможности эффективной реализации как рекомбинационного, так и ионизационного механизма генерации. В частности, ЛПС эффективно излучает на самоограниченных переходах стронция в инфракрасной области спектра ($\lambda\sim 1$ мкм SrII, $\lambda\sim 3$ мкм SrI и $\lambda=6,456$ мкм SrI – см. рис. 1) [7-9]. Экспериментальные исследования [10-11] показали, что, несмотря на различие в механизмах генерации в видимой и инфракрасной областях спектра, в ЛПС возможен режим одновременной многоволновой генерации в широком спектральном диапазоне на рекомбинационных и самоограниченных переходах. При этом зависимости характеристик генерации на различных переходах в спектрах как SrII, так и SrI, от давления и температуры активной среды существенно различаются.

Поэтому реализация эффективного многоволнового режима генерации в ЛПС требует тщательного подбора условий возбуждения активной среды.

В работе численно исследованы зависимости выходных характеристик ионного ЛПС от давления и температуры активной среды, а также осуществлен поиск режимов накачки, при которых достигается эффективная многоволновая генерация на переходах $\lambda=430,5$; $416,2$; 1091 и 1033 нм SrII.

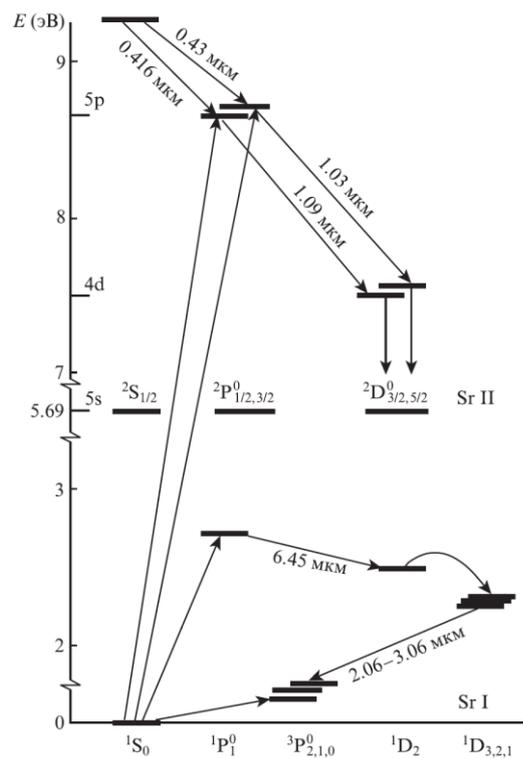


Рис. 1. – Упрощенная диаграмма уровней атома и иона стронция

При расчетах был использован метод численного моделирования ЛПС [12-14]. В частности, использовалась математическая модель ЛПС [15], включающая совместное описание электрической цепи возбуждения активной среды, газоразрядной плазмы в активном элементе и генерируемого излучения. Модель была протестирована с использованием результатов экспериментов [16-17] по измерениям параметров плазмы в активной среде ЛПС.

Численные эксперименты проводились для активных элементов ЛПС, исследованных ранее экспериментально в [10-11]. Как показали результаты экспериментальных исследований, предпочтительной схемой накачки многоволнового ЛПС является схема Блюмлейна [4-5], которая обеспечивает высокую крутизну переднего и заднего фронта импульса тока разряда.

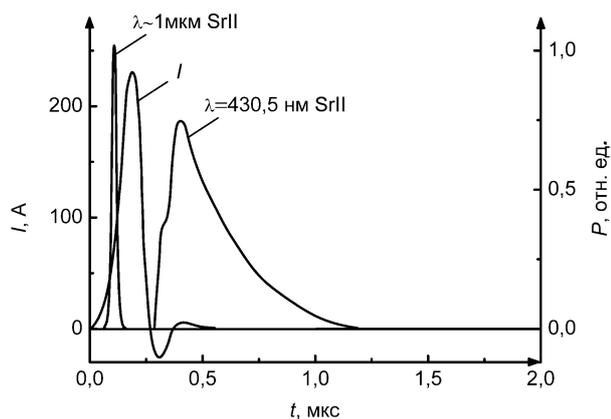


Рис. 2. – Осциллограммы импульсов тока и лазерного излучения на $\lambda=430,5$ нм и $\lambda\sim 1$ мкм SrII

На рис. 2 показан типичный для многоволнового ЛПС вид осциллограмм импульсов тока и лазерного излучения. Генерация на ИК переходах SrII осуществляется на переднем фронте импульса тока (см. рис. 2), когда в плазме реализуется ионизационная неравновесность. Генерация же в видимой области спектра происходит уже в период рекомбинационной неравновесности плазмы, имеющей место после окончания импульса тока. Заметим, что лазерные переходы $\lambda=430,5$ и $416,2$ нм SrII имеют общий верхний уровень (см. рис. 1) и являются конкурирующими компонентами дублета. По этой причине в спектре излучения обычно преобладает сильная компонента ($\lambda=430,5$ нм).

На рис. 3 приведены результаты моделирования для двух саморазогревных лазерных трубок ЛПС, имеющих одинаковую активную

длину $l=50$ см и отличающихся величиной внутреннего диаметра: $d=1,1$ см [10] и $d=2,0$ см [11].

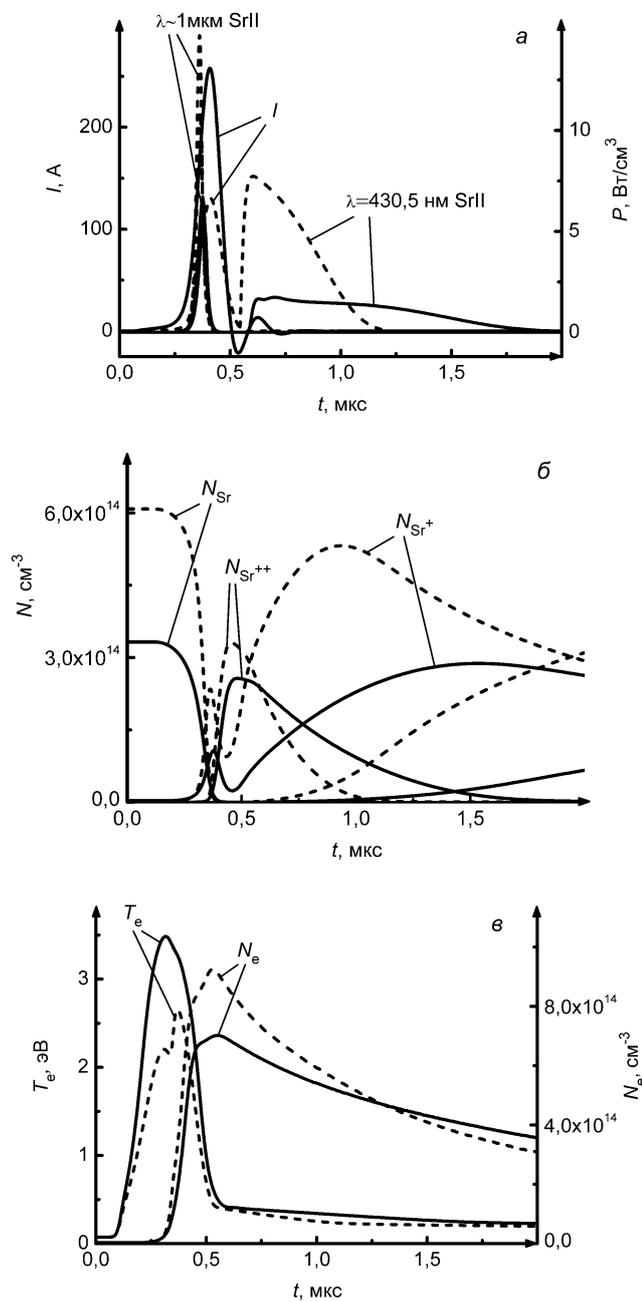


Рис. 3. – Результаты расчетов импульсов тока и лазерного излучения на переходах SrII (а), а также концентраций атомов, одно- и двукратных ионов стронция (б), электронных концентрации и температуры (в) при условиях возбуждения, соответствующих экспериментам [10] (штриховые кривые) и [11] (сплошные кривые)

В частности, на рис. 3а представлены результаты расчетов импульсов тока и лазерного излучения на переходах SrII для условий, которые соответствуют экспериментам [10] (накопительные емкости в схеме Блюмлейна $C=1650$ пФ, давление гелия $p_{\text{He}}=450$ Тор) и [11] ($C=1100$ пФ, $p_{\text{He}}=220$ Тор). Эти результаты согласуются с осциллограммами на рис. 2. Заметим, что рассчитанные импульсы генерации на двух ИК линиях SrII, показанные на рис. 3а, практически совпадают друг с другом для обеих лазерных трубок.

На рис. 3б,в приведены результаты расчетов для концентраций атомов и ионов стронция (однократных и двукратных), а также для электронной концентрации N_e и температуры T_e . Из рис. 3б следует, что за время импульса тока стронций в значительной степени дважды ионизуется в результате как прямой, так и ступенчатой ионизации электронным ударом. Этим обеспечивается интенсивная рекомбинационная накачка уровней SrII и лазерная генерация в послесвечении на переходе $\lambda=430,5$ нм SrII (см. рис. 3а). Скорость рекомбинационной накачки W_r сильно зависит от T_e ($W_r \propto T_e^{-9/2}$ [4-5]) и быстро «включается» в послесвечении по мере спада T_e (см. рис. 3в).

Лазерное излучение в ИК диапазоне ($\lambda \sim 1$ мкм SrII) имеет место на переднем фронте токового импульса (см. рис. 3а) и обусловлено быстрым возбуждением резонансных уровней иона стронция электронным ударом в условиях высоких значений T_e (см. рис. 3в).

Сопоставление приведенных на рис. 3 результатов двух численных экспериментов, осуществленных при существенно различающихся давлениях гелия, позволяет установить некоторые закономерности, свойственные активной среде ЛПС. В частности, видно, что с ростом p_{He} оптимальная начальная концентрация атомов стронция возрастает (см. рис. 3б). При этом возрастают концентрации заряженных частиц в плазме (см. рис. 3б,в), что

обеспечивается растущим удельным энерговкладом в разряд. Максимум электронной температуры во время импульса тока имеет значения в диапазоне $T_e \sim 2,5-3,5$ эВ и имеет тенденцию к снижению при высоких давлениях гелия (см. рис. 3в). Температура электронов в раннем послесвечении (в период излучения на $\lambda=430,5$ нм SrII) при увеличении давления остается на низком уровне ($T_e \sim 0,2-0,4$ эВ), несмотря на рост рекомбинационного нагрева электронного газа, чему способствует ускорение охлаждения электронов (см. рис. 3в). Низкие значения T_e , а также происходящий с ростом p_{He} рост концентраций ионов Sr^{++} и электронов, обуславливают рост скорости накачки W_r и импульсных энергетических характеристик генерации на рекомбинационных переходах SrII. При этом рост скорости рекомбинации заряженных частиц приводит к укорочению импульсов излучения в послесвечении (см. рис. 3а).

На рис. 4а приведены результаты численных расчетов зависимости средней мощности лазерной генерации P_{av} на переходах $\lambda=430,5$; 1033 и 1091 нм SrII от давления гелия для условий [10]. При расчетах для различных давлений производилась оптимизация температуры активного элемента (и, соответственно, концентрации атомов стронция, определяемой температурой внутренней стенки лазерной трубки), а также напряжения на емкостях C . Из результатов моделирования видно, что эффективная совместная видимая и ИК генерация на переходах SrII возможна в достаточно широком диапазоне давлений гелия.

Характер полученных при моделировании зависимостей $P_{\text{av}}(p_{\text{He}})$ соответствует экспериментальным данным [10] (см. рис. 4б). Из рис. 4 видно, что с ростом давления средняя мощность генерации на самоограниченных ИК переходах SrII снижается. Как показал анализ результатов моделирования, это обусловлено снижением T_e в импульсе тока и

соответствующим уменьшением скорости возбуждения резонансных уровней иона стронция за счет электронного удара.

Что касается видимого рекомбинационного перехода SrII, то вначале с ростом p_{He} имеет место рост мощности P_{av} (см. рис. 4), который обусловлен ростом скорости накачки W_r , связанным с ускорением охлаждения электронов. Затем, при высоких давлениях рост средней мощности сменяется ее спадом (см. рис. 4), так как задний фронт импульса тока начинает ограничивать рост скорости охлаждения электронов.

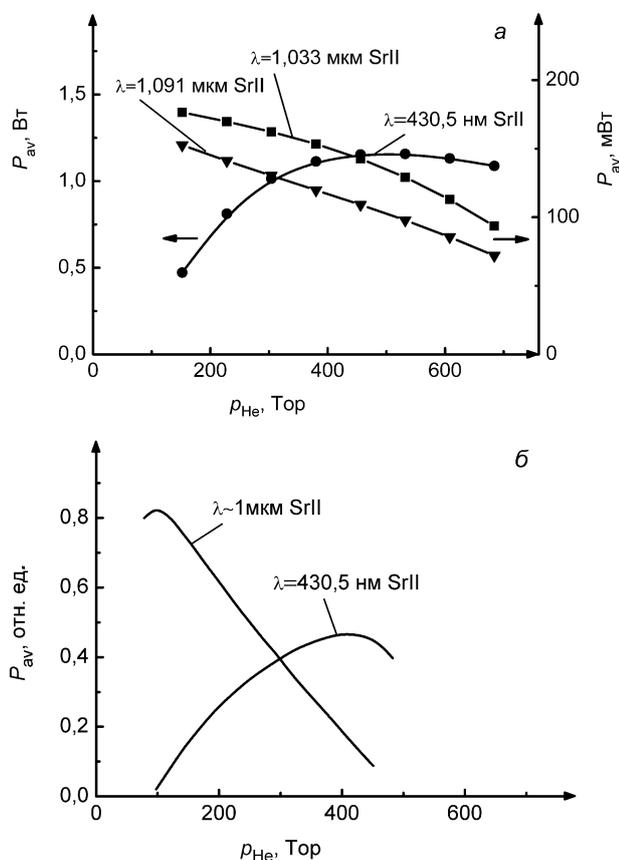


Рис. 4. – Зависимости мощности излучения на переходах SrII от давления: (а) – расчет, (б) – эксперимент [10]

На рис. 5а приведены результаты численных расчетов зависимости средней мощности лазерной генерации P_{av} на переходах $\lambda=430,5$; 1033 и 1091 нм SrII от температуры активной зоны лазерной трубки для условий [11]. Из результатов моделирования следует, что имеется определенный

диапазон температур, в котором возможна совместная видимая и ИК генерация на переходах SrII.

Характер зависимостей $P_{av}(T)$, полученных при моделировании, соответствует результатам эксперимента [11] (см. рис. 5б). Рост средней мощности, вначале наблюдаемый на всех переходах SrII при повышении температуры, обусловлен ростом скоростей накачки, связанным с повышением концентрации стронция.

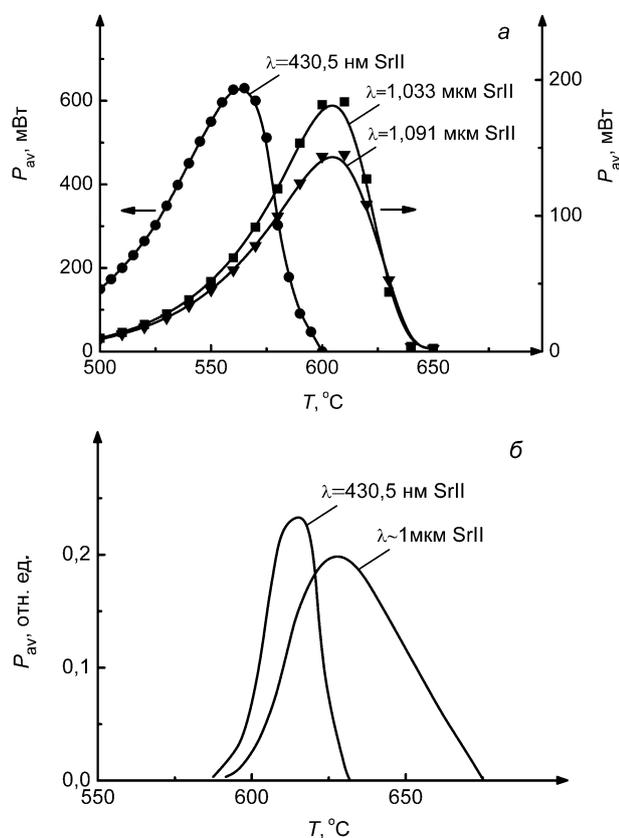


Рис. 5. – Зависимости мощности излучения на переходах SrII от температуры: (а) – расчет, (б) – эксперимент [11]

Падение же мощности P_{av} на $\lambda=430,5$ nm SrII, наблюдаемое при превышении оптимальной для генерации температуры (см. рис. 5), связано с подъемом уровня T_e в послесвечении и соответствующим падением скорости рекомбинационной накачки. Подъем T_e при высоких температурах обусловлен снижением вклада ионов гелия в охлаждение электронного газа

из-за их замещения на ионы стронция, а также вследствие роста рекомбинационного нагрева электронного газа [5]. Падение средней мощности на $\lambda \sim 1$ мкм SrII, наблюдаемое при высоких температурах (см. рис. 5), связано со снижением T_e в импульсе тока, обусловленным ростом потерь энергии электронов на ионизацию стронция.

Таким образом, в работе проведены численные исследования зависимостей характеристик генерации ионного ЛПС от давления и температуры активной среды. Найден диапазон условий возбуждения активной среды для реализации многоволнового режима излучения на видимых и инфракрасных переходах иона стронция. Выявлен ряд закономерностей, свойственных активной среде ЛПС, и установлены определяющие их физические механизмы. Результаты исследований обеспечивают возможность выбирать условия оптимального возбуждения многоволновых ЛПС, а также управлять относительным вкладом различных спектральных компонент в выходное излучение.

Литература

1. Batenin V.M., Buchanov V.V., Boichenko A.M., Kazaryan M.A., Klimovskii I.I., Molodykh E.I. High-brightness Metal Vapour Lasers: Volume I: Physical Fundamentals and Mathematical Models. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2016. 542 p.
2. Pulsed Metal Vapour Lasers / Ed. by Chris E. Little and Nicola V. Sabotinov. NATO ASI Series (1. Disarmament Technologies. – V.5). Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1996. 479 p.
3. Иванов И.Г., Зинченко С.П. Генерация лазеров на парах металлов с разрядом поперечного типа при высокой частоте повторения импульсов накачки // Инженерный вестник Дона, 2016, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3694.

4. Энциклопедия низкотемпературной плазмы / Под ред. Фортова В.Е. Том XI-4. Газовые и плазменные лазеры. Москва: Физматлит, 2005. 822 с.
 5. Солдатов А.Н., Латуш Е.Л., Чеботарев Г.Д., Юдин Н.А., Васильева А.В., Полунин Ю.П., Пруцаков О.О. Импульсно-периодические лазеры на парах стронция и кальция. Томск: ТМЛ-Пресс, 2012. 526 с.
 6. Фесенко А.А., Чеботарев Г.Д., Латуш Е.Л. Энергетические характеристики рекомбинационных He-Sr⁺ лазеров // Инженерный вестник Дона, 2007, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2007/30.
 7. Петраш Г.Г. Импульсные газоразрядные лазеры // Успехи физических наук. 1971. Т. 105. С. 645-676.
 8. Little C.E. Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Applications. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore: John Willey & Sons, 1999. 619 p.
 9. Pan B.L., Chen G., Zhong J.W., Yao Z.X. Emission of laser pulses due to transitions from metastable to metastable levels in strontium vapor // Applied physics B: Lasers Opt. 2003. V. 76. N. 4. pp. 371-374.
 10. Чеботарев Г.Д., Латуш Е.Л. Лазер на парах стронция в режиме совместной генерации на видимых и ИК переходах SrII и SrI // Электромагнитные волны и электронные системы. 2015. №6. С. 102-106.
 11. Солдатов А.Н., Мирза С.Ю., Полунин Ю.П., Шумейко А.С. Импульсно-периодическая генерация лазера на переходах SrI и SrII с высоким коэффициентом усиления в условиях ионизационной и рекомбинационной неравновесности плазмы // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. №11. С. 66-71.
 12. Carman R.J. A self-consistent model for a longitudinal discharge excited He-Sr recombination laser // IEEE J. Quant. Electron. 1990. V. 26. N. 9. pp. 1588-1608.
-

13. Carman R.J. A time-dependent two electron group model for a discharge excited He-Sr recombination laser. // *J. Phys. D.* 1991. V. 24. pp. 1803-1810.

14. Chen Li, Mao BangNing, Wang YuBo, Wang LiMing, Pan BaiLiang. A kinetic model for alternate oscillation of self-terminating and recombination lasers in strontium ions. // *Optics Communications.* 2008. V. 281. pp. 1211–1216.

15. Chebotarev G.D., Prutsakov O.O., Latush E.L. Mathematical modeling of ion recombination strontium vapour laser // *Proceedings of SPIE.* 2004. V. 5483. pp. 83-103.

16. Künemeyer R., McLucas C.W., Brown D.J.W., McIntosh A.J. Time-resolved measurements of population density in a Sr⁺ recombination laser. // *IEEE J. Quant. Electron.* 1987. V. 23. N. 11. pp. 2028-2033.

17. Loveland D.G., Webb C.E. Measurement of the electron density in a strontium vapour laser. // *J. Phys.* 1992. V. 25. pp. 597-604.

References

1. Batenin V.M., Buchanov V.V., Boichenko A.M., Kazaryan M.A., Klimovskii I.I., Molodykh E.I. High-brightness Metal Vapour Lasers: Volume I: Physical Fundamentals and Mathematical Models. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2016. 542 p.

2. Pulsed Metal Vapour Lasers. Ed. by Chris E. Little and Nicola V. Sabotinov. NATO ASI Series (1. Disarmament Technologies. – V.5). Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1996. 479 p.

3. Ivanov I.G., Zinchenko S.P. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2016, №3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2016/3694.

4. Entsiklopediya nizkotemperaturnoy plazmy [Encyclopedia of Low-Temperature Plasma]. Pod red. Fortova V.E. Tom XI-4. Gazovye i plazmennye lazery [Gas and plasma lasers]. Moskva: Fizmatlit, 2005. 822 p.

5. Soldatov A.N., Latush E.L., Chebotarev G.D., Yudin N.A., Vasil'eva A.V., Polunin Yu.P., Prutsakov O.O. Impul'sno-periodicheskie lazery na parakh

strontsiya i kal'tsiya [Repetitively pulsed strontium and calcium vapor laser]. Tomsk: TML-Press, 2012. 526 p.

6. Fesenko A.A., Chebotarev G.D., Latush E.L. Inzhenernyj vestnik Dona, 2007, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2007/30.

7. Petrash G.G. Sov. Phys. Usp. 1972. V. 14. pp. 747-765.

8. Little C.E. Metal Vapour Lasers: Physics, Engineering and Applications. Chichester, New York, Brisbane, Toronto, Singapore: John Willey & Sons, 1999. 619 p.

9. Pan B.L., Chen G., Zhong J.W., Yao Z.X. Applied physics B: Lasers Opt. 2003. V. 76. N. 4. pp. 371-374.

10. Chebotarev G.D., Latush E.L. Electromagnetic Waves and Electronic Systems. 2015. № 6. pp. 102-106.

11. Soldatov A.N., Mirza S.Yu., Polunin Yu.P., Shumeiko A.S. Russian Physics Journal. 2014. V. 56, N. 11. pp. 1281-1286.

12. Carman R.J. IEEE J. Quant. Electron. 1990. V. 26. №. 9. pp. 1588-1608.

13. Carman R.J. J. Phys. D. 1991. V. 24. pp. 1803-1810.

14. Chen Li, Mao BangNing, Wang YuBo, Wang LiMing, Pan BaiLiang. Optics Communications. 2008. V. 281. pp. 1211–1216.

15. Chebotarev G.D., Prutsakov O.O., Latush E.L. Proceedings of SPIE. 2004. V. 5483. pp. 83-103.

16. Künemeyer R., McLucas C.W., Brown D.J.W., McIntosh A.J. IEEE J. Quant. Electron. 1987. V. 23. N. 11. pp. 2028-2033.

17. Loveland D.G., Webb C.E. J. Phys. 1992. V. 25. pp. 597-604.