

УДК 621.373.826

Усиленное спонтанное излучение на D -линиях натрия при нерезонансной оптической накачке

Т.Д. Петухов^{1,2}, Г.С. Евтушенко^{1,3}, Е.Н. Тельминов^{4*}

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

²АО НВП «Тоназ»

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

³Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН

634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

⁴Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 5.06.2017 г.

Описываются эксперименты по получению усиленного спонтанного излучения на D -линиях натрия ($D_2 = 588,9$ нм, $D_1 = 589,6$ нм) при продольной оптической накачке с большой отстройкой от линии D_2 в коротковолновую область. Измерены спектры излучения, показывающие наличие усиления на обеих линиях, при концентрации натрия $(1-5) \cdot 10^{14}$ см⁻³, давлении буферного газа гелия 600 торр, плотности мощности накачки более 1,5 МВт/см². Представлена временная характеристика выходящего излучения в зависимости от концентрации атомов натрия в активной среде. Приведены данные по поглощению излучения на D -линиях натрия при изменении концентрации атомов и давления буферного газа.

Ключевые слова: активная оптическая система, усиленное спонтанное излучение, щелочные металлы, натрий, оптическая накачка; active optical system, amplified spontaneous emission, alkaline metals, sodium, optical pumping.

Введение

Активные оптические системы на основе усилителей яркости изображения в последнее время находят применения в средствах неразрушающего контроля и диагностики. Такие системы позволяют наблюдать объекты и быстропротекающие процессы, экранированные мощной фоновой засветкой, в режиме реального времени благодаря использованию активных сред, которые имеют высокую спектральную яркость, большой коэффициент усиления, высокие частоты следования импульсов. Перечисленными достоинствами, в первую очередь, обладают среды на самоограниченных переходах атомов металлов: меди, свинца, марганца и др. [1–4].

В настоящее время внимание исследователей сосредоточено на создании эффективных лазеров на парах щелочных металлов с диодной накачкой. Основная идея состоит в преобразовании широкополосного излучения лазерных диодов в узкие атомарные линии металла [5]. При этом большая часть работ связана с получением больших мощностей излучения и КПД [6, 7]. Изучению же усилительных характеристик подобных активных сред должного внимания не уделялось.

Представляется интересным проанализировать возможность применения активных сред такого типа лазеров в качестве усилителей яркости изображения. По сравнению с активными средами на самоограниченных переходах они обладают рядом таких достоинств, как: компактность; работа в видимой и ближней ИК-областях спектра; непрерывный, наряду с импульсно-периодическим, режим работы. Для оценки применимости сред в качестве усилителей яркости изображения необходимо знать ширину линии излучения, а также убедиться в возможности получения больших коэффициентов однопроходового усиления с тем, чтобы обеспечить режим сверхизлучения [3].

В работах по данной тематике наибольший коэффициент усиления, равный 145 при малых сигналах, получен на резонансных переходах цезия [7, 8], что соответствует усилению 2,5 см⁻¹. Аналогичные оценки усиления в натрии получены теоретически в [9, 10]; это должно обеспечить режим сверхизлучения. Полуширина излучения D_1 -линии натрия, по данным [9, 11–13], достигает 50 пм.

Установлено, что эффективное излучение и усиление на D_1 -линии (переход $3^2P_{1/2} - 3^2S_{1/2}$) регистрируется при резонансном возбуждении уровня D_2 ($3^2P_{3/2}$) и высоком давлении буферного газа (более 200–300 торр). В случаях малых отстроек излучения накачки от линии D_2 интенсивность излучения на линии D_1 уменьшается. При отстройке

* Тимофей Дмитриевич Петухов (smileedition@gmail.com); Геннадий Сергеевич Евтушенко (evt@tpu.ru); Евгений Николаевич Тельминов (telminov@sibmail.com).

излучения накачки в коротковолновую область интенсивность линии D_1 уменьшается медленнее, чем при отстройке в длинноволновую область [9, 10]. Более высокие давления буферного газа обеспечивают нерезонансное возбуждение с большой отстройкой излучения накачки от линии D_2 в коротковолновую область, вплоть до появления двухфотонных переходов [10, 11]. При нерезонансном возбуждении регистрируются излучение и усиление на обеих линиях — D_2 и D_1 . Увеличение давления буферного газа до атмосферного и выше позволяет значительно расширить область отстройки излучения накачки.

В данной работе рассматривается механизм получения усиленного спонтанного излучения в ячейке с парами натрия при нерезонансной продольной накачке лазером на красителе, с большой отстройкой от линии D_2 (переход $3^2P_{3/2} - 3^2S_{1/2}$) в коротковолновую область (рис. 1). Проведена также регистрация спектров поглощения на D -линиях натрия при различных температурах и давлениях буферного газа гелия в Na-ячейке.

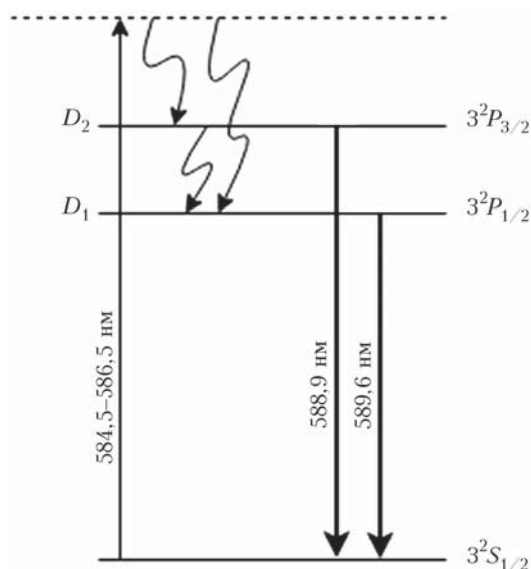


Рис. 1. Схема рабочих переходов натрия

Интерес к исследованию активной среды на переходах натрия вызван тем, что излучение D_1 - и D_2 -линий лежит в видимой области спектра (589,6 и 588,9 нм соответственно). Такое излучение требуется в устройствах визуально-оптического контроля и диагностики.

Схема эксперимента

Одно- и двухпроходное излучения регистрировались по схеме, представленной на рис. 2 (в однопроходовой схеме на место зеркала Z_2 устанавливается детектор). В работе использована кювета с парами натрия длиной 29 см и диаметром 1,6 см. Длина нагреваемой зоны 10 см, температура внешней стенки ячейки 235–265 °С, давление буферного

газа гелия при рабочей температуре достигает 600 торр (исходное давление 300 торр).

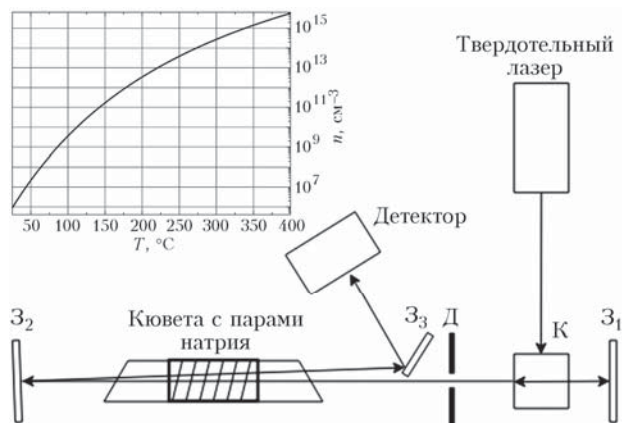


Рис. 2. Схема эксперимента по регистрации одно- и двухпроходного излучения: Д — диафрагма; К — кювета с красителем; З — плоскопараллельные зеркала. На вставке — зависимость концентрации натрия от температуры

Для накачки использовалось излучение лазера на красителе (ЛК) «Пиромитен 597». Резонатор ЛК образован плоскопараллельным зеркалом Z_1 и выходным окном кюветы с красителем. Краситель возбуждался излучением второй гармоники $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ -лазера (LQ-529В, «Солар ЛС») 532 нм. Длительность импульсов возбуждения составляла 5 нс (по полувысоте), частота их следования 1 Гц. Ширина линии излучения ЛК по полувысоте была 5 нм, максимум находился в диапазоне от 584,5 до 586,5 нм. Излучение ЛК проходило через диафрагму диаметром 5 мм и направлялось вдоль оси кюветы с парами натрия. Энергия излучения накачки измерялась прибором OPHIR NOVA II с приемником PE50-V2.

При двухпроходовой схеме ослабленное после первого прохода излучение накачки направлялось под малым углом зеркалом Z_2 в кювету с парами натрия и далее отводилось на детектор зеркалом Z_3 .

Выходное излучение регистрировалось анализатором спектра AvaSpec-2048 (с разрешением порядка 1 нм). В этом случае линии поглощения D_2 и D_1 не разделялись. Временная развертка излучения осуществлялась полупроводниковым детектором Thorlabs DET10A.

Эксперимент по регистрации поглощения излучения парами натрия проводился по схеме, подобной представленной на рис. 2. В качестве источника излучения вместо лазера на красителе использовался светоизлучающий диод с шириной линии излучения 20 нм и максимумом на 595 нм; максимум был сдвинут до 590 нм охлаждением кристалла термостатом Пельтье до -4 °С. Температура ячейки с парами натрия изменялась от 25 до 285 °С. При этом концентрация атомов натрия, рассчитанная, согласно данным [14], изменялась в диапазоне от 10^6 до 10^{14} см^{-3} (см. рис. 2, вставка). Начальное давление буферного газа устанавливалось равным 10, 100 и 500 торр. Прошедшее излучение

регистрировалось измерителем длины волны Solar SHR с функцией спектрометра, обеспечивая разрешение 18 пм на длине волны 589 нм с точностью ± 3 пм.

Результаты экспериментов и их обсуждение

При одном проходе излучения ЛК через ячейку с парами натрия, наряду с ослабленным излучением накачки, регистрировалось излучение на линиях D_2 и D_1 . Резкое увеличение интенсивности излучения на D -линиях натрия наблюдается при энергиях накачки больше 2–3 мДж (рис. 3, *a*), что соответствует плотности мощности 1,5–2,0 МВт/см². Это свидетельствует о появлении вынужденного излучения при превышении порогового значения энергии накачки. Лучшее регистрируемое соотношение интенсивностей линий накачки и линий натрия при различных энергиях накачки составило 1:1 за один проход излучения (рис. 3, *б*).

Таким образом, значительная доля энергии накачки ЛК трансформируется в излучение на переходах натрия; причем излучение регистрируется на обеих линиях (D_2 и D_1). К сожалению, используемый нами в данном эксперименте спектрометр AvaSpec-2048 не позволил их отчетливо разрешить.

Регистрируемое двупроходное излучение характеризуется отношением интенсивности усиленного излучения к интенсивности накачки 2:1 (рис. 3, *в*). Не столь значительное, как ожидалось, усиление связано с сильным ослаблением излучения накачки при первом проходе через активную среду (от 50 до 80%). Полученные результаты показывают, что мы имеем дело с усиленным спонтанным излучением на D -линиях натрия.

О трансформации излучения накачки ЛК в усиленном спонтанном излучении свидетельствуют и временные характеристики выходящего из Na-кюветы излучения (рис. 4). При малых концентрациях натрия ($< 10^{12}$ см⁻³), соответствующих температуре 190 °С (см. рис. 2, *б*), на выходе из кюветы преобладает излучение накачки с длительностью 5 нс.

При температуре 190–240 °С заметно небольшое удлинение спадающего фронта импульса накачки. Оно обусловлено появлением спонтанного излучения на переходах с D -уровней натрия, время жизни которых составляет 16 нс [15]. По достижении температуры 260 °С наблюдается второй максимум интенсивности (через 5–7 нс после импульса накачки) с амплитудой, равной амплитуде импульса накачки, и спадающим фронтом 6 нс, что свидетельствует о появлении вынужденного излучения на D -линиях натрия. Это подтверждается интенсивностью, сравнимой с интенсивностью прошедшего излучения накачки, и укорочением спадающего фронта импульса. При температуре 290 °С наблюдается затяжной спадающий фронт импульса, равный 15 нс. Рост температуры и, как следствие, концентрации атомов натрия выше 10^{14} см⁻³ приводит к большому поглощению как излучения накачки, так и собственного излучения среды (эффект пленения излучения). Мы полагаем, что в этом случае регистрируется лишь спонтанное излучение, выходящее с дальнего торца кюветы.

Эксперименты по регистрации спектров поглощения на D -линиях натрия, представленные на рис. 5, показывают изменения ширины и интенсивности линий поглощения в зависимости от давления буферного газа и температуры ячейки (концентрации атомов Na).

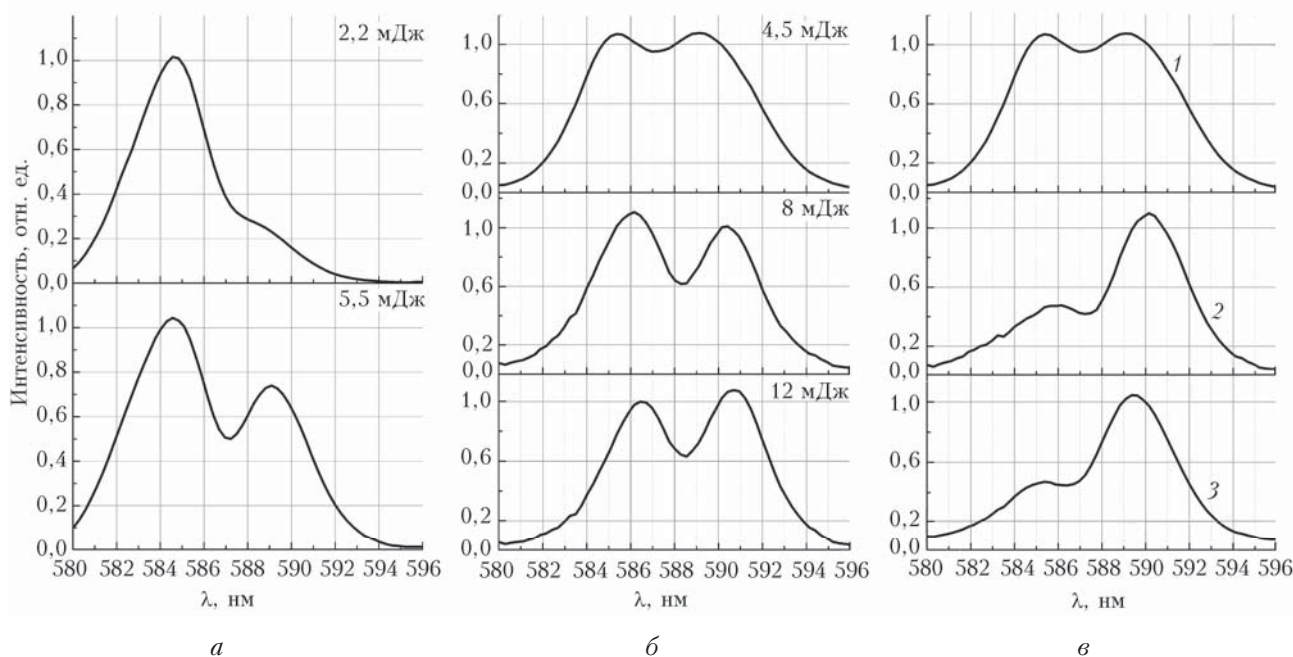


Рис. 3. Однопроходное излучение, регистрируемое при различных энергиях накачки (*a*, *б*); излучение, регистрируемое при энергии накачки 4,5 мДж (*в*): однопроходное (1), двупроходное излучения (2, 3)

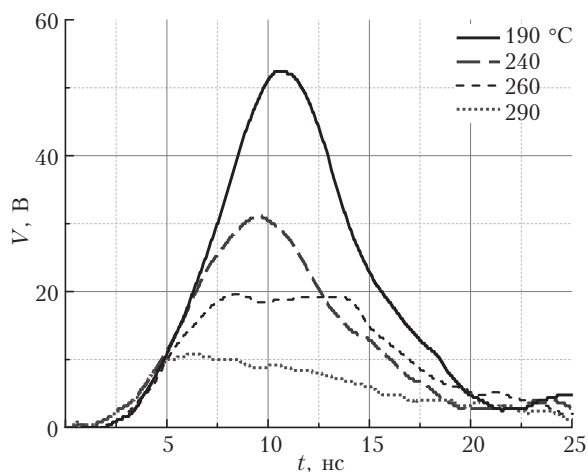


Рис. 4. Временные характеристики однопроходowego излучения в зависимости от температуры активной среды

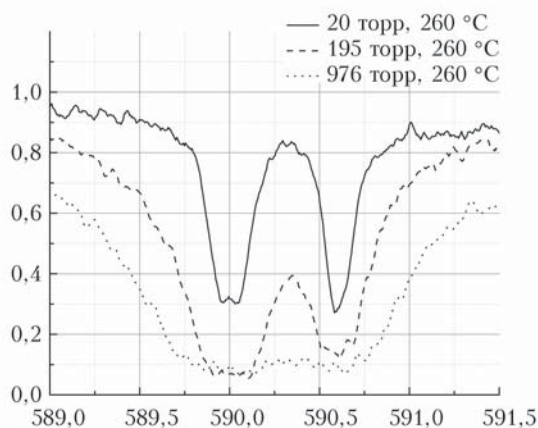
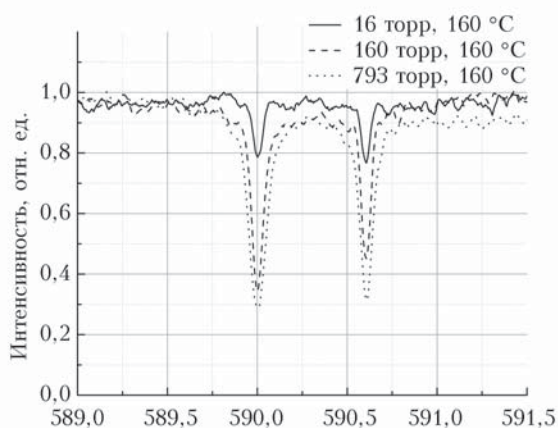
Из рис. 5 видно, что увеличение концентрации атомов в ячейке с парами натрия и рост давления буферного газа приводят к значительному уширению линий поглощения. Наибольшее уширение D_1 - и D_2 -линий, вплоть до слияния линий в одну, вызывается увеличением концентрации атомов натрия

в активной среде. Линии поглощения D_2 позволяют оценить максимальную ширину линии излучения накачки, которое будет эффективно и резонансно поглощаться и преобразовываться в излучение линии D_1 , а также показывают максимально возможные ширины линий излучения.

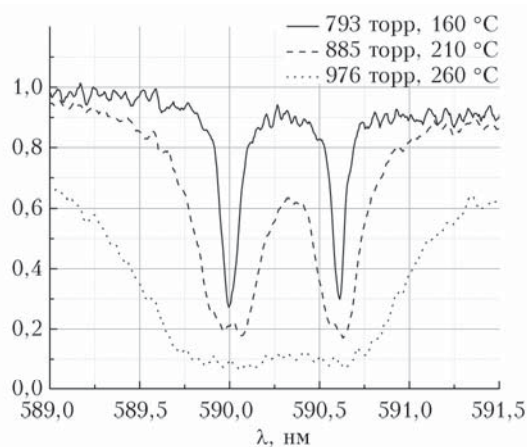
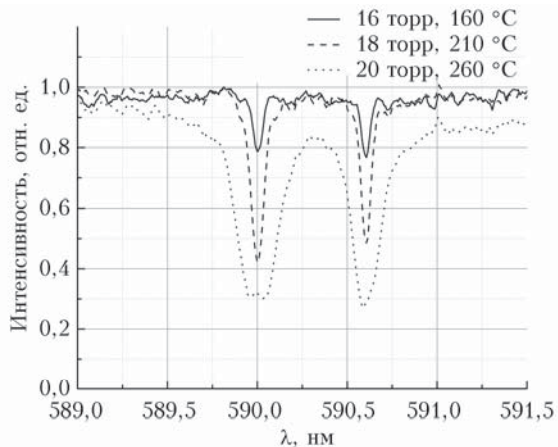
Заклучение

Результаты экспериментов доказывают наличие усиленного спонтанного излучения на D -линиях натрия при значительной отстройке длины волны накачки (с максимумом в районе 585 нм) от линии D_2 и высоком давлении буферного газа (600 торр при рабочей температуре). Это подтверждается наличием пороговой плотности мощности накачки $1,5 \text{ МВт/см}^2$, после которой регистрируется интенсивное излучение на D -линиях; дополнительным усилением этого излучения при повторном прохождении активной среды; укорочением импульса по сравнению со спонтанным излучением при появлении вынужденного излучения.

Результаты наших экспериментов в основном согласуются с теоретическими и экспериментальными данными А.М. Шалагина с коллегами по усилению



а



б

Рис. 5. Зависимость интенсивности и ширины линий поглощения в Na-ячейке от давления буферного газа (а), температуры ячейки (б)

излучения на D -линиях натрия, в том числе при значительной отстройке линии накачки от D_2 -уровня при высоких давлениях буферного газа [10].

Авторы выражают благодарность В.Б. Суханову, В.Г. Соковинову и Т.А. Солодовой за помощь в проведении экспериментов и обсуждение полученных результатов.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 14-19-00175.

1. *Evtushenko G.S.* From a metal vapor laser projection microscope to a laser monitor (by the 50 year-anniversary of metal vapor lasers) // Proc. SPIE. 2015. V. 9810. P. 98101F-1–98101F-9.
2. *Evtushenko G.S., Trigub M.V., Gubarev F.A., Evtushenko T.G., Torgaev S.N., Shiyonov D.V.* Laser monitor for non-destructive testing of materials and processes shielded by intensive background lighting // Rev. Sci. Instrum. 2014. V. 85, N 3. P. 1–5.
3. *Земсков К.И., Казарян М.А., Петраш Г.Г.* Усилители яркости изображений в проекционных оптических системах // Оптические системы с усилителями яркости (Тр. ФИАН). М.: Наука, 1991. Т. 206. С. 3–62.
4. *Little C.E.* Metal Vapor Lasers: Physics, Engineering & Applications. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 1998. 620 p.
5. *Пархоменко А.И., Шалагин А.М.* Усилитель лазерного излучения на парах щелочных металлов // Ж. эксперим. и теор. физ. 2014. Т. 146, вып. 1. С. 31–44.
6. *Шалагин А.М.* Мощные лазеры на парах щелочных металлов с диодной накачкой // Успехи физ. наук. 2011. Т. 181, № 9. С. 1011–1016.
7. *Gao F., Chen F., Xie J.J., Li D.J., Zhang L.M., Yang G.L., Guo J., Guo L.H.* Review on diode-pumped alkali vapor laser // Optik. 2013. V. 124, N 20. P. 4353–4358.
8. *Zhdanov B.V., Knize R.J.* Efficient diode pumped cesium vapor amplifier // Opt. Commun. 2008. V. 281, N 15–16. P. 4068–4070.
9. *Амутлов С.Н., Плеханов А.И., Шалагин А.М.* Сверхсветимость на резонансном переходе атомов Na при оптическом возбуждении // Оптика и спектроскопия. 1984. Т. 56, № 2. С. 215–222.
10. *Марков Р.В., Пархоменко А.И., Плеханов А.И., Шалагин А.М.* Генерация на резонансном переходе атомов натрия при нерезонансном оптическом возбуждении // Ж. эксперим. и теор. физ. 2009. Т. 136, вып. 2. С. 211–233.
11. *Марков Р.В., Плеханов А.И., Шалагин А.М.* Инверсия заселенностей на переходах в основное состояние атомов при нерезонансном поглощении лазерного излучения // Ж. эксперим. и теор. физ. 2001. Т. 120, вып. 5. С. 1185–1193.
12. *Konefal Z., Ignaciuk M.* Stimulated collision induced processes in sodium vapor in the presence of helium // Appl. Phys. B. 1990. V. 51. P. 285–291.
13. *Konefal Z., Ignaciuk M.* Stimulated processes in sodium vapour in the presence of molecular buffer gas systems // Opt. Quantum Electron. 1993. V. 28. P. 169–180.
14. *ГСССД 112-87.* Литий, натрий, калий, рубидий, цезий. Давление насыщенных паров при высоких температурах. М.: Изд-во стандартов, 1988. 38 с.
15. *Веролайнен Я.Ф., Николаич А.Я.* Радиационные времена жизни возбужденных состояний атомов // Успехи физ. наук. 1982. Т. 137, вып. 2. С. 305–338.

T.D. Petukhov, G.S. Evtushenko, E.N. Tel'minov. **Amplified spontaneous emission on sodium D -lines using nonresonant optical pumping.**

Experiments are described on the excitation of amplified spontaneous emission on the D -lines of sodium ($D_2 = 588.9$ nm; $D_1 = 589.6$ nm) at longitudinal optical pumping with a large detuning from the D_2 line toward shorter wavelengths. The radiation spectra are measured, which proves gain on the both lines, at Na concentration of $(1-5) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, buffer gas (helium) pressure of 600 Torr at the working temperature, and pumping power density of more than 1.5 MW/cm^2 . The time characteristics show that the output radiation varies versus the concentration of sodium atoms in the active medium. The dependences of radiation absorption at the D -lines of sodium on the concentration of Na atoms and buffer gas pressure are given.