

## ЛАЗЕРЫ

## Лазерная генерация излучения ближнего ИК диапазона на парах цезия

А.А.Бабин, М.В.Волков, С.Г.Гаранин, С.А.Ковалдов, А.В.Копалкин, С.М.Куликов, С.Н.Носов, Ф.А.Стариков, А.В.Страхов, В.В.Феоктистов, В.А.Шотниев

*Получена резонаторная генерация в парах цезия на  $\lambda \sim 3$  мкм (переходы  $7P_{3/2} \rightarrow 7S_{1/2}$  и  $7P_{1/2} \rightarrow 7S_{1/2}$ ). Продольная накачка осуществлялась излучением второй гармоники параметрического генератора, накачиваемого излучением второй гармоники лазера на гранате, легированного ионами  $Nd^{3+}$ . Длина волны излучения накачки соответствовала переходам  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{3/2}$  и  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{1/2}$  атомов цезия. Ширина спектра излучения накачки равнялась  $12 \text{ см}^{-1}$ , энергия в импульсе –  $10 \text{ мДж}$ , частота следования импульсов –  $10 \text{ Гц}$ . При температуре кюветы с парами  $155^\circ\text{C}$  энергия ИК импульса генерации составила  $100 \text{ мкДж}$ . Эффективность преобразования энергии накачки в энергию излучения с  $\lambda \sim 3$  мкм была равна  $\sim 1.5\%$ .*

**Ключевые слова:** лазер на парах цезия, ближний ИК диапазон, продольная накачка.

Концепция лазера на парах щелочных металлов с оптической накачкой была предложена в 1958 г. [1]. Первая практическая реализация этой идеи осуществлена в 1962 г. [2] при резонансной оптической накачке паров цезия одной из сильных линий излучения атомов гелия с  $\lambda = 388.8 \text{ нм}$ . В этой работе была получена непрерывная генерация на переходе  $8^2P_{1/2} \rightarrow 8^2S_{1/2}$  атома цезия ( $\lambda = 7.18 \text{ мкм}$ ) – создан первый лазер на атомарных переходах с оптической накачкой.

Практический интерес представляет получение эффективной генерации на переходах  $(n+1)P \rightarrow (n+1)S$  атомов цезия или рубидия вблизи  $\lambda = 3 \text{ мкм}$ . Лазерное излучение в этом спектральном диапазоне необходимо, в частности, для целей оптической локации и диагностики загрязнений в атмосфере.

В работах [3–5] пары рубидия возбуждались излучением перестраиваемого лазера на красителях ( $\lambda = 421.7$  и  $420.2 \text{ нм}$ ) и наблюдалась безрезонаторная генерация. Достигнутая в работе [5] энергия лазерного излучения в импульсе составила  $\sim 100 \text{ нДж}$ , что соответствовало эффективности преобразования энергии накачки  $\sim 1.7 \times 10^{-4}$ .

В настоящей работе экспериментально получена резонаторная генерация излучения трехмикронного диапазона в парах цезия в смеси с гелием при накачке уровней  $7P_{3/2}$  и  $7P_{1/2}$  излучением синего диапазона ( $\lambda_p = 455.5$  и  $459.5 \text{ нм}$  соответственно). Эффективность преобразования по энергии составила  $\sim 1.5\%$ , что соответствует КПД преобразования по числу фотонов  $\sim 10\%$ .

В качестве излучения накачки использовалась вторая гармоника параметрического генератора света на кристалле ВВО, накачиваемого излучением второй гармоники лазера на гранате, легированного  $Nd^{3+}$ . Длина волны

излучения накачки соответствовала переходу  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{3/2}$  или  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{1/2}$  атомов цезия, ширина спектра излучения накачки равнялась  $0.25 \text{ нм}$  ( $12 \text{ см}^{-1}$ ). Временная форма импульса соответствовала гауссовому сигналу с длительностью по полувысоте  $\sim 5 \text{ нс}$ , поперечный профиль интенсивности пучка накачки диаметром  $\sim 8 \text{ мм}$  близок к прямоугольному. Энергия в импульсе излучения накачки синего и ближнего УФ диапазонов не превышала  $10 \text{ мДж}$ , частота следования импульсов составляла  $10 \text{ Гц}$ .

Цилиндрическая кювета длиной  $45 \text{ см}$  откачивалась до давления не выше  $10^{-6} \text{ Тор}$ . В нее помещалось  $\sim 2 \text{ г}$  цезия и добавлялся буферный газ  $^4\text{Ne}$  при давлении  $\sim 4 \text{ атм}$  и комнатной температуре. Такое давление  $^4\text{Ne}$  использовалось для того, чтобы увеличить ширину линии поглощения атомов Cs и согласовать ее с шириной линии излучения накачки. Входное и выходное окна изготавливались из лейкосапфира без антиотражающих покрытий. При этом френелевские потери на каждом окне составляли  $\sim 15\%$  как для излучения накачки, так и для ИК излучения. Омические нагреватели позволяли устанавливать температуру стенок кюветы вплоть до  $250^\circ\text{C}$  с точностью  $\sim 1^\circ\text{C}$ . Чтобы избежать конденсации металла на окнах, их температура поддерживалась внешними нагревателями примерно на  $20^\circ\text{C}$  выше температуры стенок.

На рис.1 представлен фрагмент диаграммы уровней атома цезия, взятый из работы [6]. Расстояние между уровнями  $7P_{3/2}$  и  $7P_{1/2}$  составляет  $181 \text{ см}^{-1}$  [6, 7], и при давлении  $^4\text{Ne}$   $p \approx 4 \text{ атм}$  скорость столкновительного перемешивания между указанными уровнями должна быть достаточно высокой. Поэтому в смеси с гелием лазерный эффект возможен на прямых переходах  $7P_{3/2} \rightarrow 7S_{1/2}$  и  $7P_{1/2} \rightarrow 7S_{1/2}$  с  $\lambda = 2.93$  и  $3.10 \text{ мкм}$  соответственно.

Калибровка концентрации атомов цезия осуществлялась по измерению пропускания кюветы на длине волны вспомогательного диодного лазера ( $\lambda = 852.32 \text{ нм}$ ), соответствующей длинноволновому крылу линии поглощения на переходе  $6S_{1/2} \rightarrow 6P_{3/2}$  ( $\lambda = 852 \text{ нм}$ ). В диапазоне температур кюветы  $60\text{--}80^\circ\text{C}$  измеренная концентрация атомов цезия  $n_{\text{Cs}}$  соответствовала расчетным значениям: при  $80^\circ\text{C}$   $n_{\text{Cs}} = 4 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . Следовательно, согласно тео-

А.А.Бабин, М.В.Волков, С.Г.Гаранин, С.А.Ковалдов, А.В.Копалкин, С.М.Куликов, С.Н.Носов, Ф.А.Стариков, А.В.Страхов, В.В.Феоктистов, В.А.Шотниев. ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИЭФ», Россия, Нижегородская обл., 607188 Саров, просп. Мира, 37; e-mail: starikov@otd13.vniief.ru

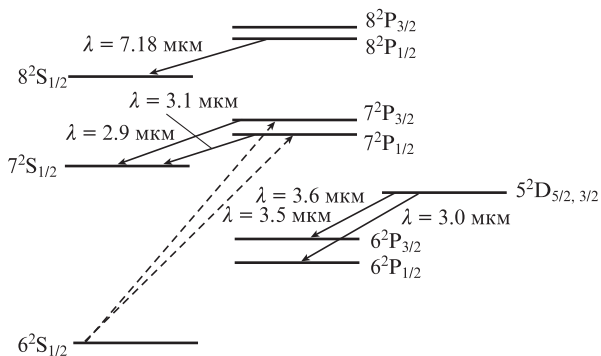


Рис.1. Фрагмент схемы уровней атома цезия. Штриховые линии – излучения накачки, возбуждающие термы  $7P_{3/2}$  и  $7P_{1/2}$ .

ретическим оценкам концентрация  $n_{Cs} \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , необходимая для получения ИК генерации, должна достигаться при температурах 150–160 °C [9].

На рис.2 приведены зависимости от температуры коэффициентов пропускания кюветы  $K_{tr} = W_{out}/W_{in}$  для излучений накачки уровнями  $7P_{3/2}$  и  $7P_{1/2}$  ( $\lambda_p = 455.5$  и  $459.5$  нм соответственно), измеренные с помощью калориметров ( $W_{out}$  – энергия излучения накачки, прошедшего ячейку с парами Cs, а  $W_{in}$  – энергия на входе в ячейку). Из рис.2 следует, что рабочий диапазон температур в данном эксперименте, как и ожидалось, составляет 100–150 °C.

Система регистрации ИК излучения на выходе кюветы состояла из приемников (датчиков), работающих в диапазоне 2–20 мкм и монохроматора, фиксирующего сигнал в полосе 2–9 мкм. Один из датчиков измерял суммарную энергию генерации по всем линиям излучения, второй датчик располагался на выходе монохроматора и, следовательно, измерял энергию излучения на линии конкретного перехода.

Для получения лазерной генерации на ИК переходе атома цезия глухое зеркало резонатора, устанавливаемое перед кюветой, настраивалось по нормали к пучку накачки, а плоскопараллельное выходное окно кюветы служило выходным зеркалом. При нагреве ячейки до температуры  $\sim 60$  °C с ИК датчиков наблюдался сигнал, причем его флуктуация, возникающая из-за нестабильности энергии накачки ( $\sim 5\%$ ), превышала 100%, что характерно для генерации вблизи порога. При дальнейшем увеличении температуры ячейки разброс ИК сигнала (выходной

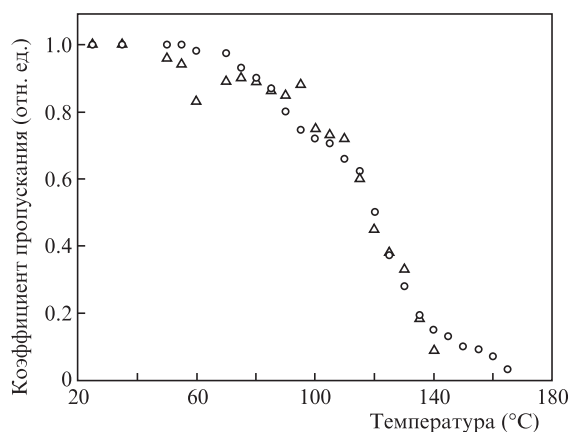


Рис.2. Зависимости от температуры коэффициентов пропускания кюветы для излучений накачки уровнями  $7P_{3/2}$  ( $\lambda_p = 455.5$  нм (o)) и  $7P_{1/2}$  ( $\lambda_p = 459.5$  нм (Δ)).

энергии) стабилизировался на уровне 10%–12%. Разъюстировка глухого зеркала резонатора при температуре кюветы  $\sim 150$  °C приводила более чем к 10-кратному уменьшению выходного сигнала. Следовательно, налицо резонаторная генерация ИК излучения в парах цезия.

Исследование спектрального состава излучения с помощью ИК монохроматора показало, что при накачке парами цезия уровня  $7P_{3/2}$  ( $\lambda_p = 455.5$  нм) генерируется излучение на четырех ИК линиях (рис.3) с длинами волн 2.933, 3.013, 3.096 и 3.495 мкм. При накачке уровня  $7P_{1/2}$  ( $\lambda_p = 459.5$  нм) наблюдались три ИК линии генерации с длинами волн 3.013, 3.096 и 3.495 мкм. Отметим, что при этой накачке отсутствует линия генерации с  $\lambda = 2.933$  мкм, за которую отвечает переход  $7P_{3/2} \rightarrow 7S_{1/2}$  при накачке с меньшей длиной волны ( $\lambda_p = 455.5$  нм,  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{1/2}$ ). Присутствие же в спектрах генерации линии с  $\lambda = 3.495$  мкм свидетельствует о возбуждении перехода  $7P_{3/2} \rightarrow 5D_{5/2}$  излучениями обеих длин волн накачки. Это означает, что в спектре излучения атомов цезия должна наблюдаться интенсивная люминесценция с  $\lambda \sim 1.4$  мкм. Однако, поскольку время жизни уровня  $5D_{5/2}$  значительно больше, чем уровня  $7P_{3/2}$  (1300 нс против 135 нс [8]), лазерной генерации на этой длине волны ( $\lambda = 1.4$  мкм) быть не может.

Сравнение длин волн генерации с данными работ [6, 8] показывает, что экспериментально измеренные длины волн соответствуют следующим переходам в атоме цезия:

- $\lambda = 2.933$  мкм –  $7P_{3/2} \rightarrow 7S_{1/2}$ ,
- $\lambda = 3.013$  мкм –  $5D_{3/2} \rightarrow 6P_{1/2}$ ,
- $\lambda = 3.096$  мкм –  $7P_{1/2} \rightarrow 7S_{1/2}$ ,
- $\lambda = 3.495$  мкм –  $5D_{5/2} \rightarrow 6P_{3/2}$ .

Точность полученных в наших экспериментах значений определялась характеристиками используемого монохроматора и составляла  $\sim 1$  нм, так что некоторое расхождение измеренных длин волн и их справочных значений может быть вызвано неточностями калибровки монохроматора и его настройки на центр линии, а также сдвигом лазерных уровней из-за взаимодействия атомов цезия с буферным газом.

Как видно из рис.3, максимальная выходная энергия получена на  $\lambda \sim 3.096$  мкм (переход  $7P_{1/2} \rightarrow 7S_{1/2}$ ) при обеих накачках. Это достаточно естественно, поскольку генерация с этого уровня начинается либо при его непосредственном заселении, либо при достаточно быстром перемешивании уровней  $7P_{3/2}$  и  $7P_{1/2}$  в результате столкновений. Тот факт, что интенсивность ИК генерации

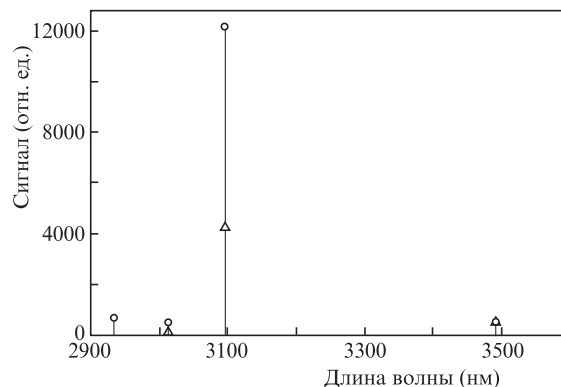


Рис.3. Спектры генерации атомов цезия при накачке на уровни  $7P_{3/2}$  (o) и  $7P_{1/2}$  (Δ) и температуре 140 °C.

при возбуждении атома на уровень  $7P_{3/2}$  больше примерно в три раза (рис.3), чем при возбуждении на уровень  $7P_{1/2}$ , связан, вероятно, со специфическими особенностями возбуждаемых уровней.

На рис.4 приведены экспериментальные зависимости от температуры кюветы энергии импульсов генерации для наиболее сильных ИК линий с  $\lambda = 3.096$  мкм (переход  $7P_{1/2} \rightarrow 7S_{1/2}$ ) и  $\lambda = 3.013$  мкм (переход  $5D_{3/2} \rightarrow 6P_{1/2}$ ), а также температурная зависимость суммарной по всем генерируемым линиям энергии (тоже в относительных единицах). Необходимо отметить, что энергии на линиях с  $\lambda = 3.096$  и  $3.013$  мкм были определены при одинаковой настройке монохроматора и одних и тех же ослабляющих фильтрах перед ИК приемником, регистрирующим сигнал на выходе монохроматора. Следовательно, эти энергии можно сравнивать друг с другом (рис.4, а и б) для разных возбуждающих лазерную генерацию излучений накачек ( $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{3/2}$  и  $6S_{1/2} \rightarrow 7P_{1/2}$ ). Суммарная же энергия генерации регистрировалась другим датчиком и, следовательно, этот сигнал нельзя сравнивать с сигналом на линиях.

Как показали проведенные эксперименты, наибольшая энергия в импульсе трехмикронного излучения была получена при возбуждении уровня  $7P_{3/2}$  ( $\lambda_p = 455,5$  нм). На рис.5 приведены спектры падающего на кювету и прошедшего через нее излучения накачки, зарегистрированные при температуре  $150^\circ\text{C}$  и накачке на уровень  $7P_{3/2}$ . Видно, что на длине всей трассы (45 см) поглощается 84.5% энергии излучения накачки. Эта величина, по су-

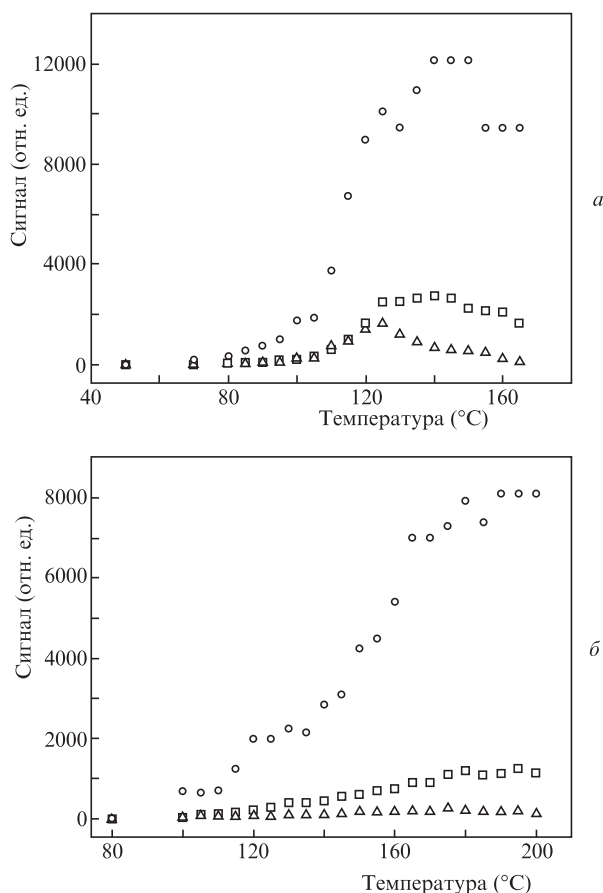


Рис.4. Температурные зависимости энергии генерации на длинах волн 3.096 мкм (о) и 3.013 мкм (Δ), а также суммарной по спектру энергии (□) при накачке атомов на уровни  $7P_{3/2}$  (а) и  $7P_{1/2}$  (б).

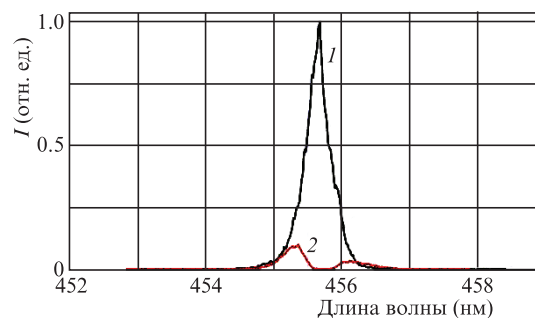


Рис.5. Интенсивности  $I$  спектров излучения накачки, падающего на кювету (1) и прошедшего через нее (2). Температура кюветы  $\sim 150^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_p = 455,5$  нм.

ществом, является квантовым КПД, определяющим максимально возможную эффективность генерации ИК излучения. Прямое измерение поглощенной энергии накачки (по измерению коэффициента пропускания) в кювете с помощью калориметров дало ту же величину (см. рис.2). Следовательно, энергия, затраченная на возбуждение уровня, практически полностью переходит в энергию генерации. Отметим, что спектры падающего и прошедшего излучения накачки регистрировались с использованием однотипных, но различных спектрометров. При этом абсолютная калибровка спектрометра по длине волны проводилась по излучению He-Ne-лазера перед каждой регистрацией только для падающего излучения накачки. Спектрометр прошедшего излучения калибровался в начале измерений, а подгонка по длине волны измеренного спектра прошедшего излучения накачки осуществлялась по крыльям спектров падающего и прошедшего излучений. Во всех проведенных экспериментах энергия импульса излучения накачки была приблизительно одинакова и составляла 8–10 мДж. Измеренная энергия генерации при накачке каждого уровня составила 100 мкДж. Следовательно, энергетический КПД был равен 1%–1.5%, что соответствует полученному в эксперименте квантовому КПД с учетом соотношения длин волн излучений накачки и генерации. Отметим, что реально измеренный энергетический КПД заметно ниже расчетного, и это связано с наличием в резонаторе лазера неучтенных потерь на длине волны генерации. Оптимизация выходного излучения по энергии, которая могла бы в несколько раз увеличить ее, с помощью, например, подбора выходного зеркала не проводилась.

На рис.6 приведены экспериментальная и расчетная формы импульса ИК генерации при температуре стенок кюветы  $155^\circ\text{C}$ . Экспериментальные осциллограммы получены с помощью охлаждаемого скоростного (время отклика  $\sim 1$  нс) ИК диода.

Расчетные исследования генерации выполнены на основе кинетической 3D модели лазера-генератора с торцевой накачкой в геометрическом приближении переноса излучения накачки и лазерного излучения. Модель включает кинетику уровней  $6S$ ,  $6P$ ,  $7S$  и  $7P$  атома цезия, процессы фотоионизации, ионизации Пеннинга и рекомбинации, учитывает экспериментальную форму импульса излучения накачки и его спектральное распределение. Решается нестационарная взаимосогласованная задача с использованием расщепления по физическим процессам. Вначале находятся скорости накачки, затем решаются уравнения кинетики населенностей уровней без учета вынужденных процессов, далее рассчитывается усиление ла-

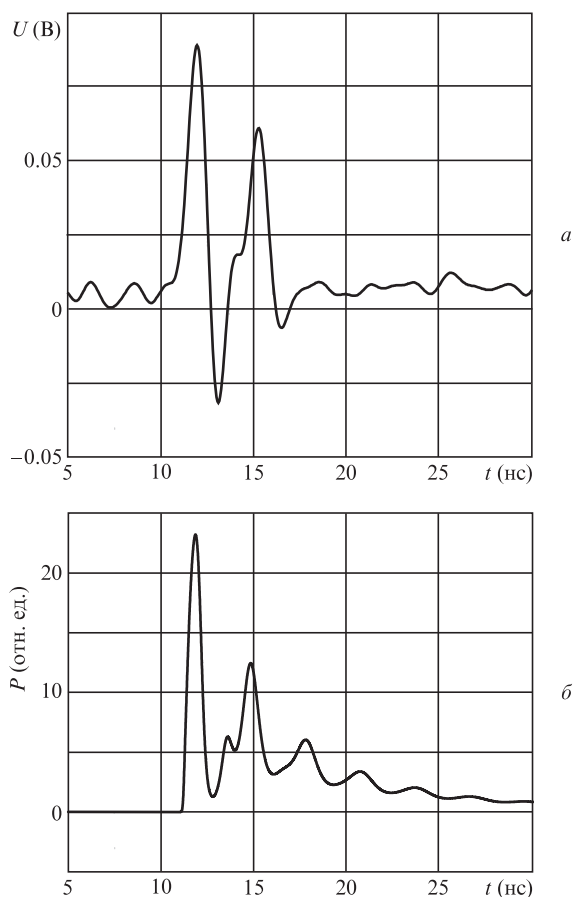


Рис.6. Экспериментальный (а) и расчетный (б) импульсы ИК генерации при температуре стенок кюветы 155 °С.

зерного излучения и в конце временного шага находится изменение населенностей под действием лазерного излучения.

Как следует из рис.6, структура импульса генерации является многопиковой. Такая структура обусловлена, по-видимому, малой ( $\sim 5$  нс) длительностью импульса накачки и достаточно большой длиной кюветы (время пробега излучения через нее составляет  $\sim 1.5$  нс). В этих условиях положительная инверсия на лазерном переходе может образовываться не по всей длине активной среды, что приводит к появлению пиков в импульсе генерации. Отметим, что отрицательная часть сигнала на «экспериментальной» осциллограмме, по-видимому, связана с недостаточной широкополосностью системы фотодиод + осциллограф, и, следовательно, длительность импульса генерации должна быть заметно меньше времени отклика регистрирующего фотодиода (ширина полосы осциллографа не менее 1 ГГц). Как видно из рис.6, расчетная форма импульса генерации качественно совпадает с экспериментальной, а расчетное значение энергии импульса генерации 105 мкДж достаточно близко к измеренному.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность В.Н.Новикову за предоставление ИК фотоприемников и полезные обсуждения работы, Г.М.Мищенко – за помощь в проведении расчетов.

1. Schawlow A.L., Townes C.H. *Phys. Rev.*, **112**, 1940 (1958).
2. Rabinowitz P., Jacobs S, Gould G. *Appl. Opt.*, **1**, 4 (1962).
3. Richards R.M. *M.S. Thesis* (Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: Air Force Institute of Technology, 2013).
4. Moran P.J. *M.S. Thesis* (Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: Air Force Institute of Technology, 2015).
5. Moran P.J., Richards R.M., Rice C.A., Perram G.P. *Opt. Commun.*, **374**, 51 (2016).
6. *Физические величины*. Справочник под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова (М.: Атомэнергоиздат, 1991).
7. Brown K.C. *Dissertation* (Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: Air Force Institute of Technology, 2012).
8. Zhdanov B.V., Ehrenreich T.E., Knize R.J. *Opt. Commun.*, **260** (2), 696 (2006).
9. Steck D.A., Cesium D. <http://steck.us/alkalidata> (revision 2.1.2, 12 August 2009).