

**БЕЗОПАСНЫЕ ДЛЯ ГЛАЗ ВКР-ЛАЗЕРЫ НА КРИСТАЛЛЕ $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$:
СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИ НАКАЧКЕ $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2\text{Nd}$ -ЛАЗЕРАМИ
С РАБОЧИМИ ПЕРЕХОДАМИ ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ И ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ****

В. И. Дашкевич^{1*}, А. А. Русак¹, В. А. Орлович¹, А. П. Шкадаревич²

УДК 535:375.5:621.375.8

¹ Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси,

220072, Минск, просп. Независимости, 68-2, Беларусь; e-mail: v.dashkevich@dragon.bas-net.by

² Унитарное предприятие “НТИ “ЛЭМТ” БелОМО”, Минск, Беларусь

(Поступила 16 июня 2017)

Проведено сравнительное исследование безопасных для глаз внерезонаторных $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ (KGW) ВКР-лазеров, преобразующих многомодовое излучение импульсных KGW:Nd -лазеров, работающих на переходах ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ и ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$, в третью стоксову компоненту на $\lambda = 1500$ нм и первую стоксову компоненту на $\lambda = 1507$ или 1538 нм. При одинаковых размерах комбинационных и лазерных элементов ВКР-лазер, излучающий третью стоксову компоненту, обеспечивает более высокую энергию импульса (~14.2 мДж) и меньшую расходимость стоксова пучка (~9.4 мрад), причем при более низкой энергии накачки KGW:Nd -лазера (~6.7 Дж). При энергии импульсов накачки 29—34 мДж все ВКР-лазеры имеют практически одинаковый оптический КПД генерации, достигающий 36%. Однако с точки зрения электрической энергии, подводимой к лампе накачки, полный КПД ВКР-лазера третьей стоксовой компоненты в ~1.7 раза выше. Длительность ВКР-импульсов сравнима с длительностью импульсов накачки и составляет ~20 нс для первых стоксовых компонент. Импульс третьей стоксовой компоненты в 2.5—3 раза короче. В силу разного уровня накачки и разной силы термооптических искажений лазерных KGW:Nd -элементов распределение плотности энергии в пучках первых стоксовых компонент является эллиптическим, тогда как в пучке третьей стоксовой компоненты оно практически круговое. Показана возможность одновременной генерации на длинах волн 1507 и 1538 нм при параллельных и взаимно ортогональных поляризациях стоксовых волн.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, внерезонаторный KGW ВКР-лазер, многомодовый KGW:Nd -лазер накачки, первая и третья стоксовы компоненты, безопасное для глаз излучение.

A comparative study of eye-safe extracavity KGW Raman lasers that convert multimode radiation from Nd:KGW lasers operating on ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ and ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ transitions into the third Stokes component at $\lambda = 1500$ nm and the first Stokes component at $\lambda = 1507$ or 1538 nm, respectively, was carried out. For the same sizes of laser and Raman elements, Raman laser emitting the third Stokes component provides higher power and energy of the pulse (~14.2 mJ) and smaller divergence of the Stokes beam (~9.4 mrad) at lower pump energy of Nd:KGW laser (~6.7 J). At the pump pulse energy of 29—34 mJ, all Raman lasers have the same optical efficiency reaching 36%. However, in terms of the electrical energy delivered to the flashlamp, the total efficiency of the Raman laser of the third Stokes component is ~1.7 times larger. The duration of Raman pulses is comparable to that of pump pulses and is ~20 ns for the first Stokes components. The pulse of the third Stokes component is shorter by a factor of 2.5—3. Because of different pump levels and different

EYE-SAFE $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ RAMAN LASERS: A COMPARATIVE STUDY AT PUMPING BY $\text{Nd:KGd}(\text{WO}_4)_2$ LASERS WITH ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ AND ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ WORKING TRANSITIONS

V. I. Dashkevich^{1*}, A. A. Rusak², V. A. Orlovich, A. P. Shkadarevich² (¹ B. I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus, 68-2 Nezavisimosti Prosp., Minsk, 220072, Belarus; e-mail: v.dashkevich@dragon.bas-net.by; ² Unitary Enterprise “STC “LEMT” of the BelOMO”, Minsk, Belarus)

**Доложено на Международной конференции LO-2012, Санкт-Петербург, Россия, 25—29 июня 2012 г.

strength of thermo-optical distortions of Nd:KGW laser elements, the energy density distribution for the beams of the first Stokes component is elliptical, while it is almost circular for the beam the of the third Stokes component. The possibility of simultaneous lasing at wavelengths of 1507 and 1538 nm in parallel and orthogonal polarizations of Stokes waves is shown.

Keywords: *stimulated Raman scattering, extracavity KGW Raman laser, multimode Nd:KGW pump laser, first and third Stokes components, eye-safe radiation.*

Введение. Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) — общепризнанный метод генерации когерентного излучения в тех участках спектра, для которых подходящие лазерные среды еще не найдены или характеристики лазерных сред не вполне совершенны для ряда практических применений. Примером может служить получение безопасного для глаз излучения в области 1.5—1.6 мкм. Для данного спектрального диапазона ВКР-лазеры являются достаточно высокоэффективной альтернативой традиционным Er-содержащим лазерам, поскольку Er-стекла характеризуются очень невысокой теплопроводностью, а Er-кристаллы не обладают высоким квантовым выходом.

Первые шаги использования ВКР в целях генерации безопасного для глаз излучения представляли собой преобразование частоты Nd-содержащих лазеров с $\lambda = 1.06$ мкм в сжатом метане (стоксов сдвиг 2917 см^{-1}). ВКР-излучение являлось первой стоксовой компонентой (СК) с $\lambda = 1.54$ мкм [1, 2]. Последующие годы характеризовались успешным поиском и созданием целого ряда высокоэффективных ВКР-активных кристаллов, что дало возможность приступить к разработке полностью твердотельных безопасных для глаз лазерных источников, в которых ВКР-лазеры преобразуют излучение Nd-лазеров.

Существует два подхода к созданию таких лазерных источников. Это обусловлено тем, что частоты колебательных мод ВКР-кристаллов, доступных для широкого практического использования, лежат в диапазоне $700\text{—}1100 \text{ см}^{-1}$. Первый подход основан на ВКР-преобразовании лазерного излучения перехода иона неодима ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ($\lambda_r \sim 1.3$ мкм) в первую СК. При втором подходе для накачки ВКР-лазера используется излучение традиционного перехода ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ($\lambda_r \sim 1$ мкм) и осуществляется каскадная генерация третьей или четвертой СК. Безопасные для глаз лазеры третьей СК продемонстрированы с использованием кристаллов $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ [3—7] и $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ (KGW) [8], накачиваемых YAG:Nd- и KGW:Nd-лазерами. Показано, что необходимость организации каскадного ВКР-процесса не является препятствием к достижению высоких энергетических характеристик [5, 6].

Что касается первой СК, то сообщалось о внрезонаторном (ВКР-лазер расположен вне резонатора лазера накачки) преобразовании излучения YAG:Nd-лазера в кристалле $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ [9]. Поскольку поперечное сечение перехода ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ иона Nd^{3+} относительно мало, генерация первой СК обычно осуществляется путем внутррезонаторного преобразования, при котором ВКР-лазер (или его часть, содержащая комбинационный кристалл) расположен в пределах высокочастотного резонатора лазера накачки. К типу внутррезонаторного преобразования относится также режим ВКР-самопреобразования, при котором для генерации как лазерного, так и стоксова излучения используется один и тот же кристалл. Безопасные для глаз лазерные источники с внутррезонаторным ВКР-преобразованием, излучающие первую СК в режиме модуляции добротности лазера накачки с рабочим переходом ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$, продемонстрированы с использованием кристаллов $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ [10, 11], KGW:Nd [12—14], YVO₄:Nd [15], GVO₄:Nd [16]. Отметим, что при создании безопасных для глаз лазерных источников использовались принципы как ламповой, так и диодной накачки, применялись Nd-лазеры с различными энергетическими характеристиками, разные ВКР-кристаллы различной длины, осуществлялось вне- и внутррезонаторное ВКР-преобразование и т. д. Таким образом, в силу отличия условий проведения экспериментов существующие публикации не позволяют вынести суждение о том, какой из подходов к ВКР-генерации безопасного для глаз излучения наиболее эффективен.

Цель настоящей работы — сравнительное исследование внрезонаторных KGW ВКР-лазеров, излучающих первую и третью СК при накачке KGW:Nd-лазерами с рабочими переходами ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ и ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$. Сведения о таких источниках безопасного для глаз излучения в литературе отсутствуют. Сравнение лазерных источников проведено при одинаковых размерах лазерных и комбинационных сред.

Эксперимент. Исследуемые безопасные для глаз лазерные источники имеют одинаковую структуру оптической схемы (рис. 1, а). При создании источников в лазерах накачки использован один и тот же цилиндрический KGW:Nd-элемент диаметром 4 мм и длиной 50 мм, вырезанный вдоль кристаллографического направления [010] (b-срез) и просветленный для спектрального диапазона

1—1.6 мкм. Концентрация ионов неодима ~3 ат.%. В $\text{KGW}:\text{Nd}$ -лазерах используется система ламповой накачки с естественным воздушным охлаждением, описанная в [17]. В каждом из источников резонатор лазера накачки образован глухим плосковогнутым зеркалом M_1 с радиусом кривизны 250 см и плоским выходным зеркалом M_2 . В случае рабочего перехода ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ($\lambda_r = 1067.2$ нм) используется выходное зеркало с оптимальным коэффициентом отражения 20 %. Длина резонатора L_p варьирует от 16 до 27 см. Модуляция добротности резонатора осуществляется четвертьволновым электрооптическим затвором (ЭОЗ) на основе кристалла DKDP.

В случае лазера накачки с рабочим переходом ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ($\lambda_r = 1351$ нм) экспериментально определен оптимальный коэффициент отражения выходного зеркала M_2 65 %. Для построения резонатора используются зеркала, коэффициенты отражения которых на $\lambda = 1067.2$ и 1538 нм не превышают 2—4 %. Это позволяет избежать паразитной генерации на сильном переходе иона неодима ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ и ВКР-самопреобразования излучения, генерируемого в канале ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$. Модуляция добротности резонатора длиной $L_p = 19.5$ см осуществляется ЭОЗ на основе кристалла LiNbO_3 , рабочие грани которого срезаны под углом Брюстера.

В ВКР-лазерах используется один и тот же KGW -элемент b -среза длиной 50 мм, имеющий просветляющие покрытия для спектрального диапазона 1—1.6 мкм. Устойчивый резонатор ВКР-лазера третьей СК образован входным вогнутым менисковым зеркалом M_3 с радиусом кривизны 100 см и плоским выходным зеркалом M_4 . Зеркало M_3 является прозрачным ($T \sim 80$ %) для излучения накачки ($\lambda = 1067.2$ нм) и высокоотражающим ($R > 99.5$ %) для первых трех СК ($\lambda = 1181, 1321$ и 1500 нм). Выходное зеркало M_4 практически полностью отражает излучение накачки и первые две СК. В экспериментах коэффициент отражения выходного зеркала на длине волны третьей СК $R_{\text{вых}}$ варьирует от 23 до 62 %. В области длины волны четвертой СК $\lambda \approx 1734$ нм коэффициенты отражения зеркал резонатора ≤ 2 %. Таким образом, используемые зеркала обеспечивают условия для развития каскадного ВКР-процесса, заканчивающегося генерацией третьей СК. В лазерном источнике третьей СК элементы $\text{KGW}:\text{Nd}$ и KGW имеют одинаковую ориентацию кристаллографических осей. В силу этого колебания электрического вектора E в поляризованном излучении лазера накачки происходят вдоль оси N_m оптической индикатрисы кристалла KGW ($E \parallel N_m$) и ВКР возбуждается на единственно сильной колебательной моде 901.5 см^{-1} [18].

В случае генерации первой СК устойчивый резонатор ВКР-лазера образован входным плоским зеркалом M_3 и плосковогнутым выходным зеркалом M_4 с радиусом кривизны 50.4 см. Зеркало M_3 является прозрачным ($T \sim 95$ %) для излучения накачки ($\lambda = 1351$ нм) и высокоотражающим ($R > 99.8$ %) для СК. Выходное зеркало M_4 полностью отражает ($R \sim 99.9$ %) на $\lambda = 1351$ нм, т. е. в ВКР-лазерах первой СК, как и третьей СК, реализуется двухпроходный режим накачки. При этом вогнутая отражающая поверхность выходного зеркала способствует уменьшению диаметра пучка накачки при его втором прохождении через кристалл KGW . При геометрии накачки $E \parallel N_m$ коэффициент отражения выходного зеркала M_4 на длине волны первой СК равен 49 %.

В исследуемых источниках диаметр пучка накачки на входе в кристалл KGW задается выбором кратности телескопа, расположенного перед ВКР-лазером окуляром в сторону входного зеркала M_3 , и путем расстройки телескопа. Телескоп также используется для устранения обратной связи между лазером накачки и ВКР-лазером. Возникновение обратной связи возможно в силу реализации в ВКР-лазере двухпроходного режима накачки. Наличие обратной связи неизбежно приводит к внутрирезонаторному режиму ВКР-преобразования, в том числе в кристалле $\text{KGW}:\text{Nd}$. Обратная связь устраняется путем наклона телескопа на некоторый угол. В случае генерации третьей СК кратность телескопа, просветленного на $\lambda = 1067$ нм, составляет 1.8. При генерации первых СК используется телескоп с кратностью 2.7, просветленный на $\lambda = 1351$ нм. Телескоп расстроен так, что диаметр пучка накачки на входе в ВКР-кристалл составляет 1.2 мм.

Результаты и их обсуждение. Энергетические и временные характеристики $\text{KGW}:\text{Nd}$ -лазеров накачки с рабочими переходами ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ ($\lambda_r = 1067.2$ нм) и ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ($\lambda_r = 1351$ нм) представлены на рис. 1, б. Длительность импульсов как среднее 16 реализаций измерена на уровне 0.5 максимальной интенсивности (FWHM). Как видно, более высокое поперечное сечение перехода ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ позволяет получать при одной и той же энергии питания лампы накачки более высокую энергию фундаментального лазерного излучения. Так, при энергии накачки $U_n \sim 6.7$ Дж энергии импульсов на $\lambda = 1067.2$ и 1351 нм различаются в 2.5 раза и составляют ~50 и ~20 мДж. При этом в силу более высокого усиления в активной среде импульс лазера с $\lambda_r = 1067$ нм имеет в несколько раз меньшую дли-

длительность, чем импульс лазера с рабочим переходом ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$. Длительности импульсов обоих лазеров уменьшаются с ростом уровня накачки и в пределе составляют ~ 5 нс ($L_p = 16$ см) и ~ 20 нс (19.5 см) для $\lambda = 1067.2$ и 1351 нм. При $U_p \approx 10$ Дж выходная энергия импульса лазера с переходом ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ достигает 35—36 мДж. В силу относительно невысокого контраста ЭОЗ на основе кристалла DKDP энергия накачки лазера с рабочим переходом ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ в экспериментах ≤ 6.7 Дж. При $U_n > 6.7$ Дж работа лазера характеризуется возникновением свободной генерации до момента включения ЭОЗ (prelasing). При указанных энергиях накачки активные элементы KGW:Nd прокачиваются полностью и диаметр многомодового пучка генерации, измеренный методом острого движущегося края, на выходных зеркалах обоих лазеров составляет ~ 3.2 мм.

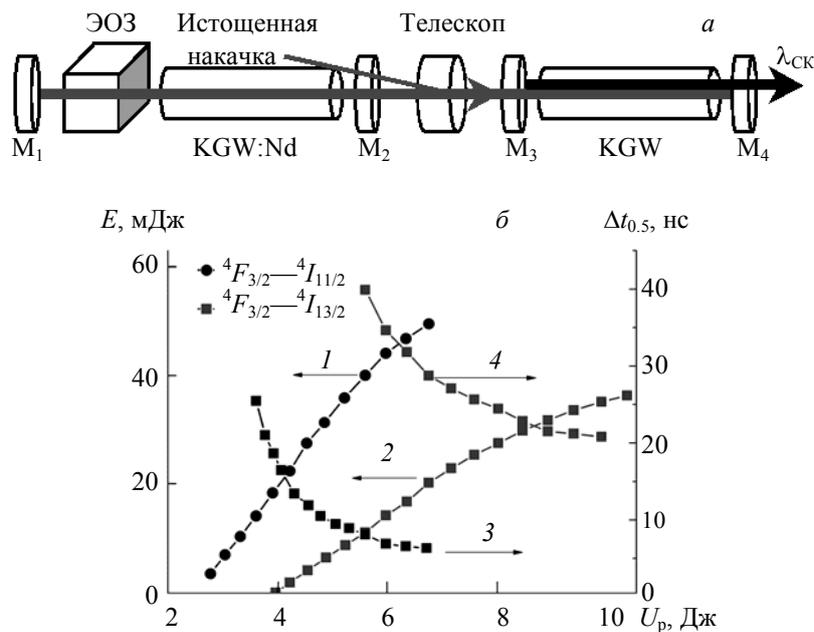


Рис. 1. Оптическая схема безопасных для глаз лазерных источников (а); энергетические (1, 2) и временные (3, 4) характеристики KGW:Nd-лазеров с рабочими переходами ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ (1, 3) и ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ (2, 4) (б)

Запись с помощью решетчатого монохроматора МДР 23 и протяженного ПЗС-датчика Hamamatsu G9212-512Q совокупности спектров безопасного для глаз излучения, получаемого путем ВКР-преобразования лазерного излучения на $\lambda = 1067.2$ нм, показывает, что среднее значение длины волны третьей СК, оцениваемое как центр спектрального распределения мощности, составляет $\lambda_{3СК} = 1499.7$ нм. Частотный сдвиг между линиями третьей СК и основного лазерного излучения достаточно хорошо согласуется с утроенной частотой фоновой моды кристалла KGW 901 см^{-1} . Оцененная за 100 импульсов флуктуация длины волны стоксова излучения происходила в пределах 1499.4—1499.9 нм. Ширина спектральной линии третьей СК на уровне 0.5 максимальной мощности не превосходит 2.7 см^{-1} (~ 0.6 нм). Как установлено в [6], в силу аккумуляции с каждым этапом каскадной ВКР-генерации свойственных ВКР спектральных флуктуаций ширина спектра СК высокого порядка, например третьей СК ($\delta\nu_{3СК}$), может превосходить ширину спектра предшествующих ей СК, а также ширину спектра излучения накачки ($\delta\nu_n$). Ситуация $\delta\nu_{3СК} \geq \delta\nu_n \approx 2.5 \text{ см}^{-1}$ (~ 0.3 нм) наблюдается и в наших экспериментах.

Типичные осциллограммы мощности лазерного излучения накачки и третьей СК приведены на рис. 2, а. Возбуждающие ВКР-лазер импульсы зарегистрированы с использованием излучения, проходящего сквозь зеркало M_1 лазера накачки (см. рис. 1, а). Достаточно хорошее совпадение гигабайтных импульсов накачки, зарегистрированных при наличии и в отсутствие выходного зеркала ВКР-лазера M_4 , свидетельствует о том, что зеркало M_4 , полностью отражающее на $\lambda = 1067.2$ нм, не оказывает влияния на работу KGW:Nd-лазера накачки, поэтому в эксперименте осуществляется только процесс внрезонаторного ВКР-преобразования.

В отличие от внутрирезонаторного преобразования, при котором генерация лазерного излучения и его рассеяние в СК представляют собой единый процесс, приводящий к короткой длительности формируемого ВКР-импульса [19], внерезонаторное преобразование обеспечивает независимость процессов генерации лазерного и стоксова излучения. При внерезонаторном преобразовании излучение накачки осуществляет проход или обход резонатора ВКР-лазера и стоксов импульс формируется в той части импульса накачки, где интенсивность фундаментального лазерного излучения достаточна для поддержания ВКР-генерации. В силу указанных обстоятельств длительность ВКР-импульса при внерезонаторном преобразовании сравнима с длительностью импульса накачки. Такая ситуация имеет место при каскадной генерации СК высокого порядка, поскольку в этом случае резонатор ВКР-лазера составлен зеркалами, высокоотражающими излучение предшествующих ей СК, что обеспечивает для них низкий порог ВКР-генерации и достаточно большое время жизни фотона в резонаторе, и длительность импульса СК, излучение которой играет роль накачки для последней СК каскадного ВКР-преобразования, практически такая же, как и длительность импульса лазера накачки, возбуждающего ВКР-лазер. Как видно из рис. 2, а, каскадная ВКР-генерация третьей СК развивается уже на переднем фронте импульса накачки. При $L_p = 16$ см, $U_n = 6.7$ Дж, $R_{\text{вых}} = 47\%$ и энергии ВКР-излучения $E_{\text{ЗСК}} \sim 12$ мДж средняя длительность импульса третьей СК $\text{FWHM} \approx 4.3$ нс.

Еще одно доказательство осуществления внерезонаторного ВКР-преобразования — зависимости длительности ВКР-импульса от его энергии в пределах 5—14 мДж (рис. 2, б). Данные зависимости — следствие закономерностей, приведенных на рис. 1, б, и факта, что энергия ВКР-излучения, как показано ниже, пропорциональна энергии лазерного излучения. Увеличение уровня накачки Nd:KGW -лазера приводит, с одной стороны, к увеличению энергии импульса ВКР-излучения, с другой — к сокращению длительности импульса накачки. Таким образом, длительность ВКР-импульса сокращается по мере роста его энергии. Можно отметить, что в случае внутрирезонаторного ВКР-лазера третьей СК [8] длительность ВКР-импульса практически не зависит от уровня накачки KGW:Nd -лазера.

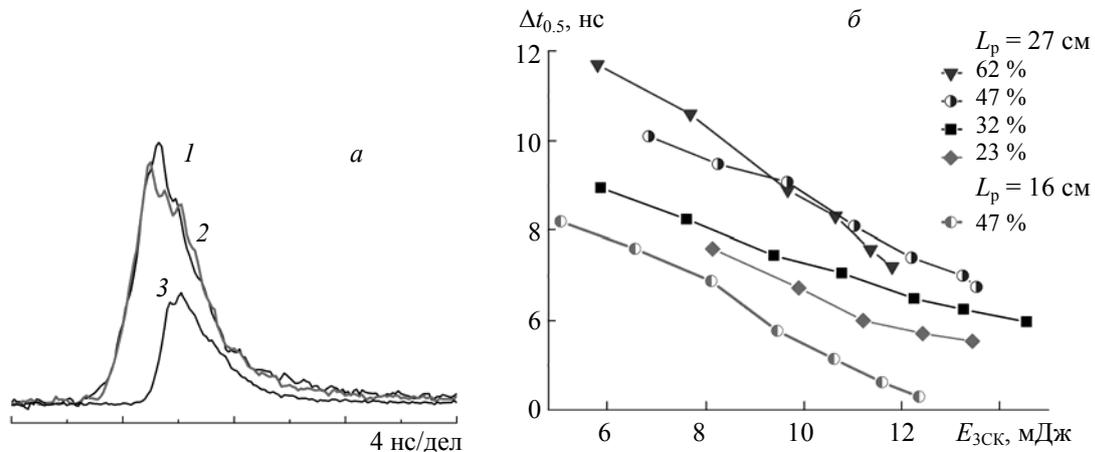


Рис. 2. Временные характеристики лазерного источника третьей стоксовой компоненты: а — осциллограммы импульсов основного лазерного излучения (1, 2) и стоксовой компоненты (3), импульсы 1 и 3 относятся к одной и той же вспышке KGW:Nd -лазера накачки; б — зависимость длительности стоксова импульса от энергии ВКР-излучения при различных коэффициентах отражения выходного зеркала и разных длинах резонатора лазера накачки

Как известно, при модуляции потерь длительность импульса лазера пропорциональна L_p . При внерезонаторном ВКР-преобразовании это позволяет управлять длительностью ВКР-импульса путем вариации длиной резонатора лазера накачки. Например, из рис. 2, б следует, что при $R_{\text{вых}} = 47\%$ и $E_{\text{ЗСК}} \sim 12$ мДж переход от $L_p = 16$ к 27 см позволяет увеличить длительность импульса третьей СК с 4.3 до 7.5 нс. При неизменной длине L_p длительность стоксова импульса зависит от коэффициента отражения выходного зеркала ВКР-лазера. При выходной энергии >10 мДж с точки зрения получения наибольшей длительности ВКР-импульса оптимально зеркало с $R_{\text{вых}} = 47\%$.

Лазерный источник первой СК, возбуждаемой в геометрии $E||N_m$, генерирует безопасное для глаз излучение на $\lambda_{1СК} = 1538$ нм. Ширина спектральной линии первой СК (FWHM) ≤ 1.9 см⁻¹. Типичные осциллограммы импульсов излучения накачки, истощенной накачки и ВКР для данного лазерного источника приведены на рис. 3, а. Импульс истощенной накачки 2 зарегистрирован с помощью фотоприемника, расположенного на пути пучка излучения накачки, выходящего из объектива телескопа (см. рис. 1, а). Импульс неистощенной накачки 1 зарегистрирован тем же фотоприемником при подавлении ВКР-генерации путем наклона входного зеркала M_3 . Как видно, развитие ВКР-генерации начинается уже на переднем фронте импульса накачки. Длительность ВКР-импульса 3 (FWHM) практически такая же, как и длительность импульса накачки (≈ 20 нс). Практически полное совпадение огибающих импульсов истощенной и неистощенной накачки вне пределов процесса ВКР-генерации свидетельствует о внрезонаторном характере ВКР-генерации. Небольшой провал в области вершины ВКР-импульса связан с возбуждением второй СК. Вхождение в генерацию второй компоненты объясняется использованием узкого пучка накачки (диаметр ~ 1.2 мм) и существованием не до конца устраненной обратной связи на ней. При максимальной накачке ~ 34 мДж энергия импульса второй СК в выходном пучке ≤ 0.8 мДж.

Следует отметить, что для первой СК зависимость длительности импульса от его энергии не является ярко выраженной. При уменьшении энергии накачки на ~ 35 %, когда снижение плотности энергии импульсов возбуждающего излучения $W_n = \int I_n(t) dt$ не сопровождается существенным уменьшением интенсивности излучения накачки $I_n(t)$, увеличение длительности импульсов накачки (см. рис. 1, б) способствует увеличению длительности стока импульса до 27 нс. Однако при дальнейшем уменьшении накачки КGW:Nd-лазера снижение W_n характеризуется заметным снижением $I_n(t)$. В этом случае ВКР-генерация в лазере первой СК обеспечивается интенсивной центральной частью импульса накачки. В результате длительность стока импульса, несмотря на увеличение длительности импульса накачки, вновь уменьшается до 20 нс.

Для ВКР-лазера первой СК путем поворота кристалла КGW вокруг оптической оси резонатора осуществлен постепенный переход от геометрии возбуждения $E||N_m$ к $E||N_g$. Энергия импульса накачки неизменна (~ 29 мДж). Выявлено, что направления линейных поляризаций стока излучения определяются положением осей оптической индикатрисы КGW. Этим объясняются представленные на рис. 3, б зависимости энергии СК от угла между вектором E и осью N_m . В результате поворота кристалла уменьшение проекции E на N_m и увеличение проекции E на N_g ведут к падению энергии поляризованной вдоль N_m СК с $\omega_R = 901$ см⁻¹ ($\lambda_{1СК} = 1538$ нм) и увеличению энергии ортогонально поляризованных СК с $\omega_R = 767$ см⁻¹ ($\lambda_{1СК} = 1507$ нм) и $\omega_R = 901$ см⁻¹ ($\lambda_{1СК} = 1538$ нм). Из рис. 3, б следует, что существуют положения кристалла КGW, при которых возможна двухчастотная генерация ортогонально поляризованных первых СК. Например, если при максимальной накачке ~ 34 мДж угол между вектором E и осью $N_m \sim 45^\circ$, то составляющие ВКР-излучения на $\lambda = 1507$ и 1538 нм поляризованы ортогонально и имеют энергию ~ 5.6 и ~ 4 мДж. Естественно, в положениях $E||N_m$, $E||N_g$ существует генерация и вторых СК, однако их энергия достаточно мала.

Выходное зеркало M_4 , используемое для случая $E||N_m$, не является оптимальным для случая $E||N_g$, при котором в длинноволновой области спектра спонтанного КР наблюдаются линии 767 и 901 см⁻¹, причем последняя менее интенсивна [18]. Коэффициент отражения зеркала M_4 на $\lambda_{1СК} = 1507$ нм ($\omega_R = 767$ см⁻¹) составляет ≈ 25 %, т. е. данное зеркало создает более высокую добротность резонатора для излучения, возбужденного с участием линии с $\omega_R = 901$ см⁻¹ ($R_{\text{вых}} = 49$ %). В силу этого ВКР-генерация является двухчастотной с поляризацией первых СК в одной плоскости. При $E||N_g$ генерация единственной первой СК, соответствующей колебательной моде КGW 767 см⁻¹, достигнута путем использования зеркала M_4 , имеющего $R_{\text{вых}} = 50$ % на $\lambda = 1507$ нм и $R_{\text{вых}} \sim 5$ % на $\lambda = 1538$ нм. При этом временные характеристики данного лазерного источника аналогичны представленным на рис. 3, а. Ширина спектральной линии первой СК на $\lambda = 1507$ нм ≤ 2 см⁻¹.

На рис. 3, в представлены энергетические характеристики исследуемых ВКР-лазеров. Во всех источниках энергия безопасного для глаз ВКР-излучения практически линейно зависит от энергии импульса накачки, причем для ВКР-лазера третьей СК это имеет место независимо от коэффициента отражения выходного зеркала $R_{\text{вых}}$. Как показывают зависимости $E_{3СК}(R_{\text{вых}})$, полученные при разных энергиях импульса накачки, для лазера третьей СК с точки зрения выходной энергии оптимально зеркало с $R_{\text{вых}} = 32$ %, т. е. максимальные энергия и длительность импульса обеспечиваются разными зеркалами. При $R_{\text{вых}} = 32$ % дифференциальный КПД ВКР-генерации третьей СК (slope efficiency) ≈ 41 %.

Отметим, что энергия ВКР-импульса третьей СК остается неизменной при указанных выше изменениях длины резонатора KGW:Nd -лазера накачки.

Оба ВКР-лазера первой СК ($E||N_m$, $E||N_g$) характеризуются практически одинаковой энергией выходного излучения и более высоким дифференциальным КПД генерации (~56—57 %) по сравнению с ВКР-лазером, генерирующим третью СК. Как видно из рис. 3, в, в области энергий импульса накачки 29—34 мДж все ВКР-лазеры обеспечивают практически одинаковую энергию безопасного для глаз излучения. При $E_n \sim 34$ мДж оптический КПД генерации $E_{СК}/E_n$ достигает 36 %. Тем не менее сравнение рис. 1, б и рис. 3, в с учетом указанных выше коэффициентов пропускания входного зеркала M_3 на $\lambda = 1067.2$ и 1351 нм показывает, что с точки зрения электрической энергии, подводимой к лампе накачки, полный КПД лазерного источника третьей СК в ~1.7 раза выше. К тому же данный источник способен обеспечить большую энергию безопасного для глаз излучения: 14.2 мДж при $U_n \sim 6.7$ Дж по сравнению с 12 мДж при $U_n \sim 10$ Дж для источников первой СК. Для всех ВКР-лазеров энергия выходного стоксова излучения линейно снижается с увеличением длины резонатора ВКР-лазера. Кроме того, начинает проявляться эффект синхронизации мод. Огибающая ВКР-импульса становится промодулированной с периодом, равным времени обхода резонатора.

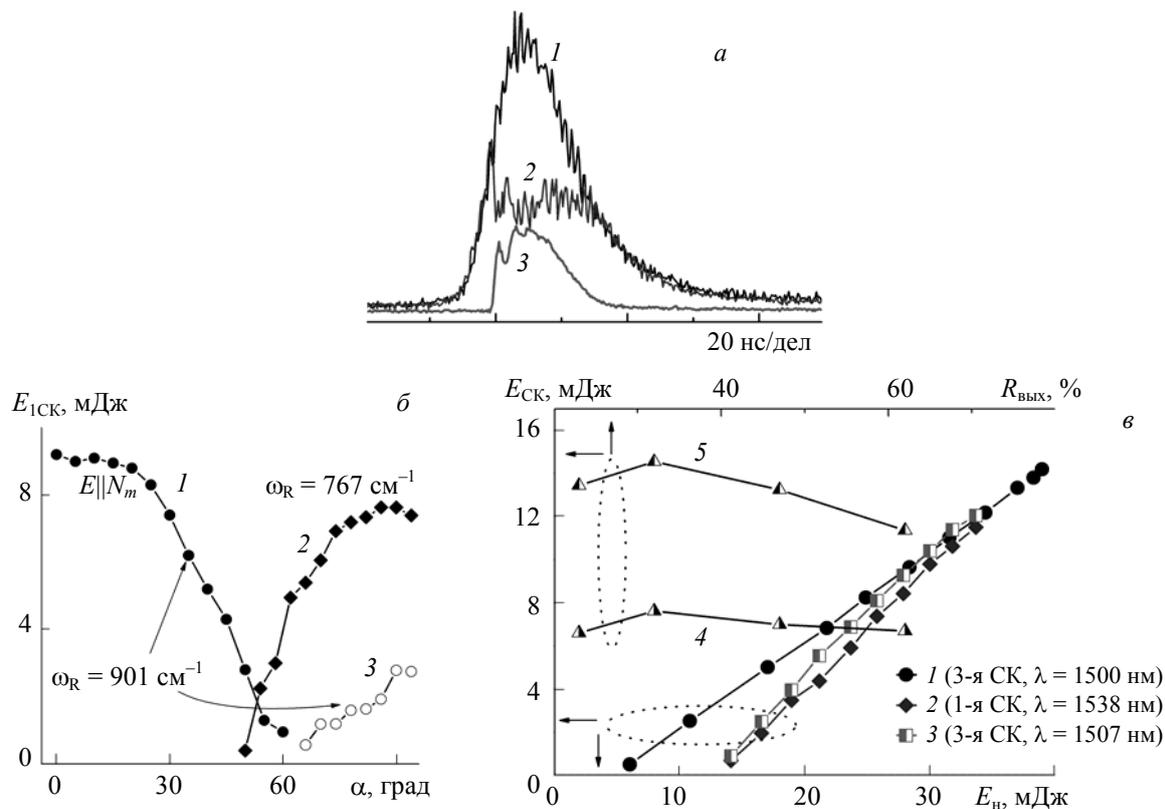


Рис. 3. Временные и энергетические характеристики ВКР-излучения: а — осциллограммы импульсов накачки (1), истощенной накачки (2) и первой стоксовой компоненты на $\lambda = 1538$ нм (3); б — зависимость энергии первых стоксовых компонент, поляризованных вдоль осей N_m (1) и N_g (2, 3), от угла α между вектором E излучения накачки и осью N_m ; в — зависимости энергии ВКР-импульса от энергии импульса накачки E_n (1—3) и коэффициента отражения выходного зеркала $R_{\text{вых}}$ (4, 5), $R_{\text{вых}} = 32\%$ (1), электрическая энергия накачки лазерного источника третьей стоксовой компоненты 4.6 (4) и 6.7 Дж (5)

При максимальной энергии безопасного для глаз излучения выходные пучки ВКР-лазеров имеют различный вид, что связано с разной силой термооптических искажений активных элементов KGW:Nd -лазеров накачки. Как известно, KGW:Nd характеризуется разными знаками и температурными коэффициентами показателя преломления вдоль главных осей оптической индикатрисы. В силу этого в цилиндрических KGW:Nd -элементах стандартной ориентации [010] под действием мощной ламповой накачки образуется термическая линза, близкая к цилиндрической [18]. Исследования

показали, что при накачке ~ 10 Дж выходной пучок KGW:Nd-лазера с $\lambda = 1.351$ мкм является эллиптическим. Вследствие этого пучок ВКР-лазера первой СК также эллиптический. Для ближнего поля (на расстоянии 11 см от выходного зеркала) двумерное распределение плотности энергии в пучке ВКР-лазера с $\lambda = 1538$ нм и одномерные распределения вдоль осей максимального и минимального размеров пучка приведены на рис. 4, а. Как видно, измеренные распределения характеризуются наличием плоской вершины (flat-top) и имеют невысокое качество аппроксимации функцией Гаусса. Эллиптическое распределение плотности энергии наблюдается и в дальней волновой зоне — задней фокальной плоскости собирающей линзы. Эллиптичность распределения 0.68. Расходимость стоксова излучения вдоль малой и большой осей эллипса, в пределах которого сосредоточено 86.5 % полной энергии пучка, составляет 9 и 13.4 мрад. Для указанного уровня энергии расходимость пучка ≈ 11 мрад, измеренная методом варьируемой круглой диафрагмы, достаточно хорошо согласуется с геометрическим средним расходимостей вдоль осей эллипса. Здесь указана внутрирезонаторная расходимость пучка, которая получена из реальной расходимости пучка за выходным зеркалом, представляющим собой рассеивающую линзу. Внутрирезонаторная расходимость определена с использованием формулы (5.26) из [20].

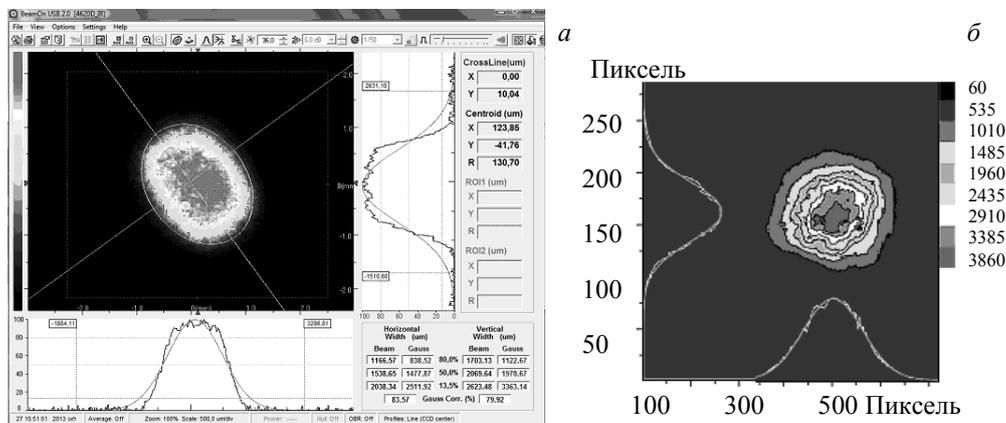


Рис. 4. Пространственное распределение плотности энергии в выходных пучках ВКР-лазера первой стоксовой компоненты на $\lambda = 1538$ нм (а) и KGW:Nd-лазера накачки с рабочим переходом ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ (б); расстояние от выходного зеркала до ПЗС-камеры 11 (а) и 74 см (б), размер пикселя 17(Г)×34(В) мкм

При ламповой накачке оптическая сила D термической линзы, развивающейся в стержне KGW:Nd-лазера с рабочим переходом ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$, при накачке 6.7 Дж для направлений N_g и N_m не превосходит 0.08 и -0.12 диоптрий на $\lambda_{\text{набл}} = 0.632$ нм [17] и в силу малых и близких значений D термолинзы активного элемента выходной пучок используемого KGW:Nd-лазера с $\lambda = 1067.2$ нм имеет практически круговое распределение плотности энергии. При этом распределение многомодового излучения — достаточно гладкое и хорошо аппроксимируется функцией Гаусса (рис. 4, б). Практически аналогичные характеристики имеет выходной пучок ВКР-лазера третьей СК. При $L_p = 27$ см расходимость этого пучка на уровне 86.5 % полной энергии импульса составляет ≈ 9.3 мрад. Расходимость оценена методом варьируемой круглой диафрагмы.

Заключение. Сравнительное исследование безопасных для глаз лазерных источников, в которых внрезонаторные KGW ВКР-лазеры преобразуют многомодовое излучение импульсных KGW:Nd-лазеров накачки, работающих на переходах ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ и ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$, в третью стоксову компоненту с $\lambda = 1500$ нм и первые стоксовы компоненты с $\lambda = 1507$ и 1538 нм, показывает, что при энергии импульсов накачки 29—34 мДж все ВКР-лазеры имеют практически одинаковый оптический КПД генерации, достигающий 36 %. Однако с точки зрения электрической энергии, подводимой к лампе накачки, полный КПД ВКР-лазера третьей стоксовой компоненты в ~ 1.7 раза выше. Данный ВКР-лазер генерирует импульсы с максимальной энергией ~ 14.2 мДж при электрической энергии накачке KGW:Nd-лазера 6.7 Дж. В случае генерации первых стоксовых компонент максимальная энергия импульса ~ 12 мДж достигается при накачке KGW:Nd-лазера ~ 10 Дж. Длительность ВКР-импульсов сравнима с длительностью импульсов накачки и составляет ~ 20 нс для первых стоксовых компонент. Импульс третьей стоксовой компоненты в зависимости от коэффициента отражения выходного зер-

кала ВКР-лазера и длины резонатора KGW:Nd -лазера в 2.5—5 раз короче. В лазере третьей стоксовой компоненты длительность ВКР-импульса отчетливо сокращается по мере роста его энергии от 6 до 14 мДж. В силу разного уровня накачки и разной силы термооптических искажений лазерных KGW:Nd -элементов распределение плотности энергии в пучках первых стоксовых компонент является эллиптическим, тогда как в пучке лазера третьей стоксовой компоненты оно практически круговое. Расходимость излучения первой стоксовой компоненты вдоль малой и большой осей эллипса, в пределах которого сосредоточено 86.5 % полной энергии пучка, составляет 9 и 13.4 мрад, расходимость пучка третьей стоксовой компоненты ≈ 9.3 мрад. Лазерный источник на основе ВКР-лазера первой стоксовой компоненты позволяет осуществлять либо переключение длины волны генерации с 1507 на 1538 нм, либо одновременную генерацию на $\lambda = 1507$ и 1538 нм при параллельных и ортогональных поляризациях стоксовых волн. Следовательно, при одинаковых размерах лазерных и комбинационных элементов безопасный для глаз внрезонаторный KGW ВКР-лазер третьей стоксовой компоненты способен обеспечить более высокие энергию и мощность импульса, а также меньшую расходимость выходного пучка, причем при более низкой электрической энергии накачки KGW:Nd -элемента.

- [1] **D. C. Hanna, D. J. Pointer.** *Opt. Commun.*, **60**, N 3 (1986) 187—190
- [2] **Z. Chu, U. N. Singh, T. D. Wilkerson.** *Opt. Commun.*, **75**, N 2 (1990) 173—178
- [3] **P. G. Zverev, T. T. Basiev, A. M. Prokhorov.** *Opt. Mater.*, **11** (1999) 335—352
- [4] **N. Tkei, S. Suzuki, F. Kannari.** *Appl. Phys. B*, **74** (2002) 521—527
- [5] **V. A. Lisinetskii, H. J. Eichler, H. Rhee, X. Wang, V. A. Orlovich.** *Opt. Commun.*, **281** (2008) 2227—2232
- [6] **R. Chulkov, V. Lisinetskii, O. Lux, H. Rhee, S. Schrader, H. J. Eichler, V. Orlovich.** *Appl. Phys. B*, **106** (2012) 867—875
- [7] **P. V. Shpak, S. V. Voitkov, R. V. Chulkov, P. A. Apanasevich, V. A. Orlovich, A. S. Grabtchikov, A. Kushwaha, N. Satti, L. Agrawal, A. K. Maini.** *Opt. Commun.*, **285** (2012) 3659—3664
- [8] **В. И. Дашкевич, В. А. Орлович, А. П. Шкадаревич.** *Журн. прикл. спектр.*, **76**, № 5 (2009) 725—732
- [9] **V. I. Dashkevich, V. A. Orlovich, A. P. Shkadarevich.** *J. Appl. Spectr.*, **76**, N 5 (2009) 685—691
- [10] **J. T. Murray, W. L. Austin, R. C. Powell.** *Opt. Mater.*, **11** (1999) 353—371
- [11] **J. T. Murray, R. C. Powell, N. Peyghambarian, D. Smith, W. Austin, R. A. Stolzenberger.** *Opt. Lett.*, **20** (1995) 1017—1019
- [12] **D. Sakaizawa, Ch. Nagasawa, T. Nagai, M. Abo, Y. Shibata, M. Nakazato.** *J. Appl. Phys.*, **47**, N 3 (2008) 1612—1614
- [13] **N. S. Ustimenko, E. M. Zabotin.** *Proc. SPIE*, **5447** (2005) 30—38
- [14] **N. S. Ustimenko, A. V. Gulin, V. A. Pashkov.** *Proc. SPIE*, **4723** (2002) 69—72
- [15] **Huang Jianhong, Lin Jipeng, Su Rongbing, Li Jinghui, Zheng Hui, Xu Canhua, Shi Fei, Lin Zongzhi, Zhuang Jian, Zeng Wenrong, Lin Wenxiong.** *Opt. Lett.*, **32** (2007) 1096—1098
- [16] **Y. F. Chen.** *Opt. Lett.*, **29** (2004) 2172—2174
- [17] **Y. F. Chen.** *Opt. Lett.*, **29** (2004) 2632—2634
- [18] **В. И. Дашкевич, А. И. Водчиц, В. А. Орлович, Н. С. Казак, В. К. Павленко, В. И. Покрышкин, И. П. Петрович, В. В. Руховец.** *Журн. прикл. спектр.*, **73**, № 4 (2006) 535—543 [V. I. Dashkevich, A. I. Vodchits, V. A. Orlovich, N. S. Kazak, V. K. Pavlenko, V. I. Pokryshkin, I. P. Petrovich, V. V. Rukhovets. *J. Appl. Spectr.*, **73**, N 4 (2006) 604—612]
- [19] **I. V. Mochalov.** *Opt. Eng.*, **36** (1997) 1660—1669
- [20] **V. L. Kalashnikov.** *Opt. Commun.*, **218** (2003) 147—153
- [21] **N. Hodgson, H. Weber.** *Laser Resonator and Beam Propagation: Fundamentals, Advanced Concepts and Applications*, 2nd ed., Springer (2005)