

Статистические особенности в процессах генерации второй гармоники и ВКР преобразования при возбуждении лазерным излучением со статистикой Леви

А. С. Грабчиков, Л. Е. Батай

Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларусь, Минск, Беларусь
e-mail: asg@dragon.bas-net.by

Экспериментально исследовано преобразование лазерного излучения с характеристиками статистики Леви методами генерации второй гармоники (ГВГ) и вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). Показана возможность генерации излучения второй гармоники и ВКР излучения со статистическими особенностями близкими к получаемым изначально в лазере. Разный характер развития статистик при ГВГ и ВКР преобразовании в конечном счете приводит к качественно близкому результату.

Ключевые слова: негауссова статистика; распределение Леви; вынужденное комбинационное рассеяние; генерация второй гармоники.

Statistical features in second harmonic generation processes and SRS conversion at excitation by laser radiation with Lévy statistics

A. S. Grabtchikov, L. E. Batay

B. I. Stepanov Institute of Physics of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus
e-mail: asg@dragon.bas-net.by

Conversion of laser radiation with Levy statistics characteristics using the methods of second-harmonic generation (SHG) and stimulated Raman scattering (SRS) has been experimentally studied. Possibility of generating second-harmonic and SRS-radiation with statistical features similar to those obtained in a laser has been experimentally demonstrated. It is noted that the different nature of the development of statistics at SHG and SRS conversion ultimately leads to a qualitatively similar result.

Key words: non-Gaussian statistics; Levy distribution; stimulated Raman scattering; second harmonic generation.

Введение

Изучение проявлений негауссовой статистики оптического излучения с образованием экстремальных волн насчитывает уже более 20 лет [1]. Основные закономерности их возникновения и особенности развития изложены в ряде обзоров [2–4]. Существование экстремальных волн продемонстрировано в лазерах с модуляцией добротности и с синхронизацией мод [5, 6]. Большое внимание уделено их присутствию в волоконных лазерных системах [7]. Особым направлением в исследованиях экстремальных эффектов является ВКР [3, 8].

В докладе рассматривается последовательная трансформация статистики негауссова характера излучения, генерируемого лазером, а именно, статистики Леви излучения импульсного наносекундного лазера, при генерации второй гармоники и ВКР-преобразовании излучения в режиме близком к линейному. Хотя статистика

излучения при ВКР хорошо изучена [9], её анализ в условиях присутствия экстремальных явлений рассмотрен не достаточно подробно [8].

1. Эксперимент

В качестве лазерного источника излучения в эксперименте использовался импульсный Nd:YAG лазер с ламповой накачкой. Он генерировал моноимпульсы с частотой 10 Гц на длинах волн основной (1064 нм) и второй (532 нм) гармоник с длительностью импульсов ≈ 17 нс (1064 нм) и ≈ 12 нс (532 нм), соответственно. При максимальной энергии ламповой накачки энергия лазерных импульсов достигала более 100 мДж. Лазер работал в многомодовом режиме по продольным и поперечным индексам.

ВКР преобразование происходило в водороде, который характеризуется отсутствием развития конкурирующих с ВКР нелинейных эффектов. Водород, сжатый при давлении 26 атм, заполнял кювету длиной 120 см. Излучение лазера фокусировалось в кювету и коллимировалось на выходе из неё. Выходящие из кюветы потоки излучения разводились пространственно двумя призмами Пеллин-Брока. Пространственно разделенные потоки дополнительно фокусировались для выделения отдельных спектральных компонент. При изменении энергии возбуждающих импульсов в экспериментах одновременно измерялись до трех потоков излучения: энергия импульсов излучения Nd:YAG лазера на основной частоте, второй гармоники, и стоксовой компоненты. Для контроля энергии импульсов использовались измерители Pulsar 2 с пироэлектрическими приемниками (Ophir). Время накопления импульсов составляло до 10 мин, при этом число импульсов, накопленных в процессе измерения для расчета статистических показателей, достигало значений 1000–6000. Для выбранных данных рассчитывались статистические характеристики и строились гистограммы энергии импульсов лазера, второй гармоники и 1-ой стоксовой компоненты.

2. Результаты и обсуждение

В докладе основное внимание уделяется данным, полученным вблизи порога генерации, когда реализуется линейный режим с малой эффективностью преобразования. В таких условиях наблюдалось существование особого вида распределений энергии импульсов излучения, обладающих чертами статистики Леви.

Статистика Леви характеризуется двумя типами событий: событиями гауссово-вого характера с флуктуациями энергии до 100 % относительно среднего значения, образующими экспоненциальную или колоколообразную форму распределения в зависимости от модового состава, а также наряду с ними, она включает события, имеющие флуктуации выше 100 % и образующие на гистограмме «хвост» из высокознергетичных событий.

На рис. 1 приведен пример гистограммы энергий лазерных импульсов в пороговых условиях при энергии ламп накачки 18,5 Дж в двух представлениях. Рисунок 1, *a* демонстрирует сравнение колоколообразной части гистограммы с гауссовым распределением. Рисунок 1, *b* показывает это же распределение в логарифмическом масштабе по вертикальной оси для более наглядного представления

каналов с малым числом событий. Линией 2х на рисунке обозначена граница перехода к зоне экстремальных явлений.

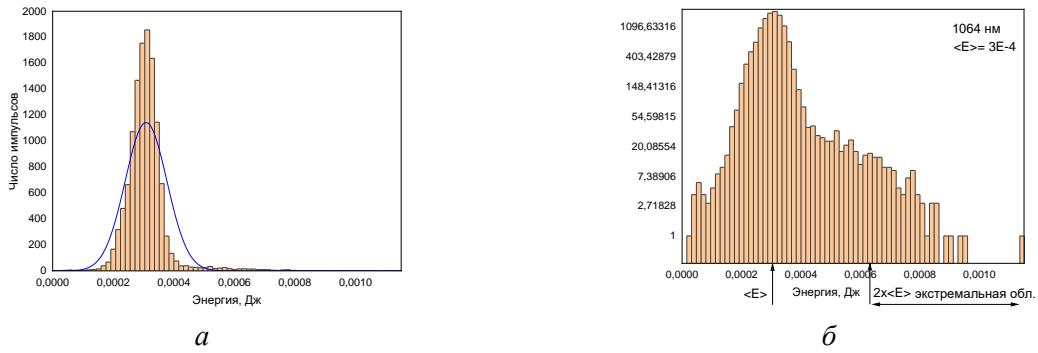


Рис. 1. Гистограммы энергии импульсов лазера вблизи порога генерации:
а – в линейном представлении, б – в логарифмическом представлении

Полученные экспериментально гистограммы демонстрируют существенные отличия от характерных распределений пуассоновского и гауссова типа в статистике лазерного излучения. Свойства распределений, показанных на рис. 1 совпадают со свойствами распределений, приведенными в работе [9].

Рассмотрено преобразование статистики энергии импульсов излучения Nd:YAG лазера при ГВГ ($\lambda = 532\text{нм}$) и последующем ВКР-преобразовании в первую стоксову компоненту ($\lambda = 683\text{ нм}$). На рис. 2 и рис. 3 представлены соответствующие гистограммы импульсной энергии излучения.

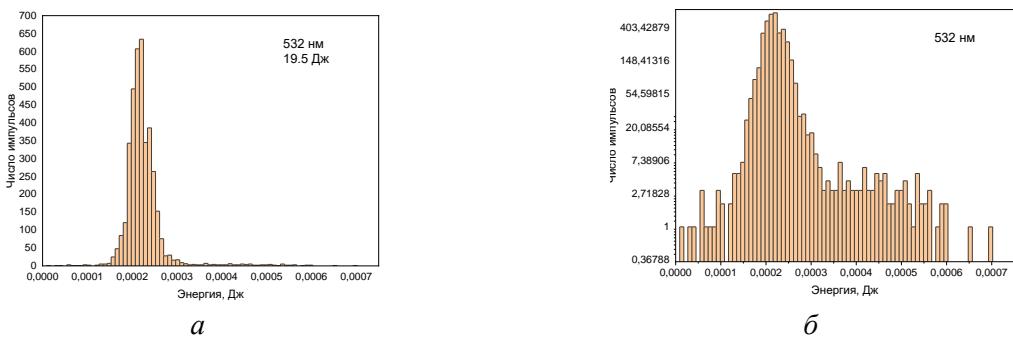
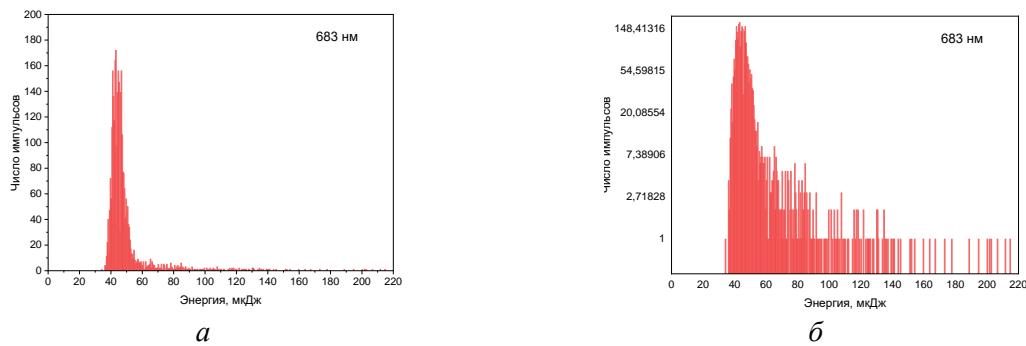


Рис. 2. Гистограмма энергии импульсов излучения второй гармоники:
а – в линейном представлении, б – в логарифмическом представлении

Гистограмма на рис.2, представленная с линейной шкалой (рис. 2, а) и нелинейной (экспоненциальной по вертикали) шкалой (рис. 2, б), демонстрирует характерные особенности распределения энергий импульсов второй гармоники. Форма гистограммы аналогична форме гистограмм лазерных импульсов, обладающих свойствами распределения Леви.

На гистограмме энергии импульсов стоксовой компоненты ВКР (рис. 3. б), соответствующей энергии ламп накачки 23,5 Дж, хорошо видны экстремальные события: импульсы с энергией, превышающей среднее значение (49 мкДж) в два раза, а также более, чем в три раза. Таким образом, полученные данные указывают

на возможность переноса особенностей статистики энергии импульсов излучения такими нелинейными процессами как ГВГ и ВКР.



*Рис. 3. Гистограмма энергии импульсов излучения первой стоксовой компоненты ВКР (683 нм): *a* – в линейном представлении, *б* – в логарифмическом представлении*

Заключение

Обнаружена устойчивая генерация импульсного излучения, относящегося к статистике Леви, в наносекундном лазере с модуляцией добротности. Зарегистрированные гистограммы соответствуют распределению Леви, описанному в работе [9] и характеризуются: сдвигом стабилизированного распределения от нулевых значений энергии, сильной асимметрией, обусловленной «хвостом» из высоко-энергетичных событий, а также вытянутой вверх формой по отношению к гауссовой. Проведено экспериментальное исследование последовательного преобразования свойств гистограмм, полученных при генерации второй гармоники и импульсного стоксова ВКР-излучения, возбуждаемого ею. Результаты говорят о переносе характерной картины исходного распределения Леви, генерируемого в лазере, на стоксово излучение с большим спектральным сдвигом, что может быть использовано для решения задач спектроскопии.

Библиографические ссылки

1. Optical rogue waves / D. R. Solli [et al.] // Nature. 2007. Vol. 450. P. 1054–1058.
2. Roadmap of optical rogue waves and extreme events / N. Akhmediev [et al.] // J. Opt. 2016. Vol. 18. P. 063001.
3. Tlidi M., Taki M. Rogue waves in nonlinear optics // Advances in Optics and Photonics. 2022. Vol. 14, No. P.87.
4. Roque waves and their generating mechanisms in different physical contexts / M. Onorato [et al.] // Physics Reports. 2012. P. 1–40.
5. Experimental demonstration of spatial rogue waves in the passively q-switched Nd:YAG laser / R. Navitskaya [et al.] // Opt. Lett. 2021. Vol. 46, No.15. P. 3773–3776.
6. Soto-Crespo J. Dissipative rogue waves: extreme pulses generated by passively mode-locked lasers / J. Soto-Crespo, P. Grelu, N. Akhmediev // Phys. Rev. E. 2011, Vol. 84, P. 016604.
7. Raman rogue waves in a partially mode-locked fiber laser / A. F. Runge [et al.] // Opt. Lett. 2014. Vol. 39. P. 319–322.
8. Raymer M. G., Walmsley I. A. The quantum coherence properties of SRS // Progress in Opt. 1990. Vol. 28. P. 247–255.
9. Bradley J. V. The insidious L-shaped distribution // Bull. of the Psych. Society. 1982. Vol. 20. P. 85–88.