

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Снижение амплитуды макроскопических квантовых флуктуаций при нестационарном ВКР

Н.В.Диденко, А.В.Конященко, Л.Л.Лосев

Экспериментально показано, что при нестационарном вынужденном комбинационном рассеянии использование накачки двумя последовательными ортогонально поляризованными лазерными импульсами позволяет снизить амплитуду макроскопических квантовых флуктуаций энергии стока импульса в четыре раза по сравнению с таковой при накачке одиночным импульсом. В водороде при относительной дисперсии энергии импульсов иттербиевого лазера 0.4% получена дисперсия энергии импульсов первой стоксовой компоненты 0.9%.

Ключевые слова: вынужденное комбинационное рассеяние, фемтосекундные импульсы, стабильность энергии, квантовые флуктуации.

1. Введение

Стабильность работы нелинейного преобразователя лазерного излучения является одним из главных факторов, определяющих область применения данного устройства. Наиболее жесткие требования обычно предъявляются к энергетической стабильности нелинейного преобразователя. В частности, в случае частотного преобразования на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) важна энергетическая стабильность стока излучения – стабильность энергии стока импульса для импульсных ВКР-преобразователей.

ВКР-преобразование лазерных импульсов с длительностью, меньшей нескольких наносекунд, чаще всего осуществляется в режиме однократного прохода лазерного импульса через активную среду. Используются схемы с однократной либо многократной фокусировкой лазерного излучения в активную среду или различные световодные системы (капилляры, световоды с многослойной оболочкой типа фотонный кристалл). Как было показано в [1], в этом случае одна из причин нестабильности энергии стока импульса – спонтанная природа стоксовых фотонов, с которых начинает развиваться процесс ВКР. Квантовые флуктуации числа исходных стоксовых фотонов приводят к заметным макроскопическим флуктуациям энергии стока импульса на выходе активной среды. Экспериментально [2, 3] и теоретически [4] было установлено, что макроскопические квантовые флуктуации энергии стока импульса максимальны при низкой эффективности преобразования, когда энергия стока импульса значительно меньше энергии импульса накачки. При возрастании эффективности преобразования амплитуда макроскопических квантовых флуктуаций снижается. Тем не менее они сохраняются и в режиме насыщенного ВКР-преобразования, когда энергии лазерного и стока им-

пульсов сравнимы [5, 6]. Так, например, в [6] при эффективности преобразования 40% относительная дисперсия энергии стоксовых импульсов (отношение дисперсии к средней энергии импульса в процентах) составила 8%, что близко к расчетным значениям. Таким образом, макроскопические квантовые флуктуации энергии стока излучения являются неотъемлемой частью процесса ВКР-преобразования лазерных импульсов в схемах с развитием стока излучения с уровня спонтанного комбинационного рассеяния. В связи с этим разработку методов, позволяющих снизить влияние макроскопических квантовых флуктуаций и повысить стабильность работы комбинационного преобразователя, представляет собой актуальную задачу.

В настоящей работе нами предлагается и экспериментально исследуется метод снижения амплитуды макроскопических квантовых флуктуаций энергии стока импульса при нестационарном ВКР. Принципиальная схема метода представлена на рис. 1. При нестационарном ВКР, когда длительность лазерного импульса меньше времени

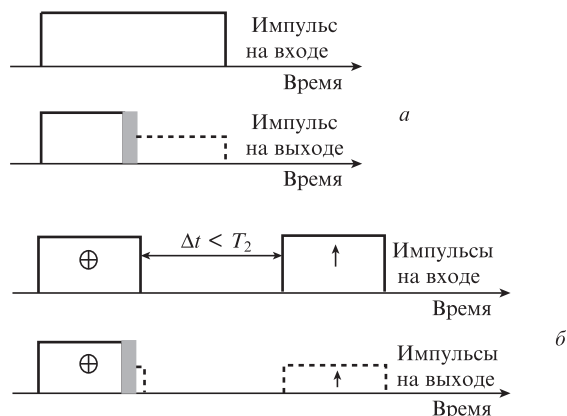


Рис. 1. Принципиальная схема метода снижения макроскопических квантовых флуктуаций энергии стока импульса при нестационарном ВКР: моноимпульсная накачка (а) и накачка двумя импульсами с ортогональными поляризациями (б). Сплошные линии – лазерный импульс, штриховые – стоксов. Серым цветом выделена область нестабильности стока импульса.

Н.В.Диденко, А.В.Конященко, Л.Л.Лосев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: llosev@mail.ru

Поступила в редакцию 16 февраля 2020 г.

дефазировки когерентных колебаний в активной среде T_2 , стоков импульс с мощностью, сравнимой с мощностью импульса накачки, возникает после прохождения через активную среду части лазерного импульса, несущей пороговую энергию накачки [7]. При этом в случае фиксированной формы и фиксированной энергии лазерного импульса момент времени, соответствующий возникновению стокова импульса, будет варьироваться вследствие квантовых флуктуаций исходного числа стоковых фотонов. В свою очередь, это будет вызывать флуктуацию энергии стокова импульса (рис.1,а). Для снижения амплитуды макроскопических квантовых флуктуаций энергии стокова импульса предлагается разделить исходный лазерный импульс на два субимпульса с временным интервалом между ними, меньшим времени дефазировки T_2 . Затем путем изменения соотношения энергий субимпульсов или параметров активной среды необходимо выбрать такой режим преобразования, в котором интенсивный стоков импульс будет возникать в конце первого субимпульса (рис.1,б). Тогда ВКР-преобразование второго субимпульса будет осуществляться при рассеянии на динамической решетке поляризуемости (на когерентных колебаниях среды), уже сформированной первым импульсом, поскольку временной интервал между импульсами меньше времени дефазировки T_2 . Следовательно, процесс спонтанного комбинационного рассеяния не будет оказывать заметного влияния на преобразование второго субимпульса, и амплитуда квантовых флуктуаций должна быть значительно ниже.

В средах со скалярным типом комбинационного рассеяния, к которому относится ВКР на колебательных уровнях в газах, поляризация стоковой волны воспроизводит поляризацию волны накачки. Поэтому для разделения субимпульсов стокова излучения на выходе преобразователя можно использовать поляризационный способ, при котором на входе в активную среду формируются ортогонально линейно поляризованные субимпульсы лазерного излучения.

2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Для проведения экспериментов использовалась оптическая схема, подробно описанная в [8, 9]. Источником лазерного излучения служил фемтосекундный иттербиевый лазер (ТЕТА, Авеста). Частота следования импульсов составляла 1 кГц. Длительность импульса могла варьироваться в пределах 0.25–2 пс с помощью частотного chirпирования. Центральная длина волны излучения была равна 1033 нм, ширина спектра – 8 нм. Максимальная энергия в импульсе достигала 400 мкДж. Относительная дисперсия энергии лазерных импульсов составляла 0.4%. Для разделения лазерного импульса на два субимпульса с ортогональными поляризациями лазерный пучок перед входом в камеру преобразователя проходил через двулучепреломляющий кристалл кальцита, что позволяло получить два ортогонально поляризованных импульса, разделенных во времени на 5 пс. Соотношение энергий субимпульсов варьировалось вращением полуволновой фазовой пластины, установленной перед кристаллом кальцита. ВКР-преобразование осуществлялось в капилляре из плавленого кварца с внутренним диаметром 250 мкм и длиной 80 см, помещенном в заполненную водородом камеру длиной 1 м. На выходе камеры после выделения ши-

рокополосным фильтром стокова излучения с центральной длиной волны 1.8 мкм ортогонально поляризованные субимпульсы разделялись призмой Глана–Френеля. Для измерения энергии стоковых импульсов и статистической обработки данных использовался измеритель мощности Ophir с пирозлектрическим сенсором.

Перед проведением экспериментов с двойным лазерным импульсом была измерена стабильность работы комбинационного преобразователя при моноимпульсной накачке. Использовался одиночный лазерный импульс длительностью 1.6 пс. Давление водорода составляло 28 атм. На рис.2 показаны зависимости относительной дисперсии энергии стоковых импульсов и эффективности преобразования от энергии лазерного импульса. Относительная дисперсия измерялась для последовательности из 10^4 импульсов. Выполнялось несколько серий измерений, на основе которых вычислялись среднее значение относительной дисперсии и ошибка измерений. Из рис.2 видно, что в соответствии с теорией [4] при уменьшении энергии импульса накачки и приближении ее к пороговому значению наблюдается резкий рост относительной дисперсии и снижение стабильности работы комбинационного преобразователя. Минимальное значение относительной дисперсии ($\sim 4\%$) достигалось при энергии накачки около 350 мкДж, при которой эффективность преобразования приближалась к своему максимальному значению. Дальнейшее увеличение энергии накачки не приводило к заметному росту эффективности преобразования, а относительная дисперсия увеличивалась до 5%. Такой рост относительной дисперсии может быть связан с двумя эффектами: генерацией второй стоковой компоненты и обратной перекачкой стокова излучения в волну накачки [10]. В настоящей работе не проводилось детального исследования причин возрастания относительной дисперсии при насыщении эффективности преобразования. Однако, по-нашему мнению, наиболее вероятен процесс обратной перекачки энергии из стоковой волны в излучение накачки, который возникает при эффективном нестационарном ВКР-преобразовании. Стоково излучение вблизи заднего фронта стокова импульса при эффективном преобразовании может перекачаться в излучение с длиной волны, совпадающей с длиной волны исходного лазерного излучения, при антистоксовом рассеянии на решетке поляризуемости, записанной в среде излучением накачки и переднего фронта стокова импульса. Условие фазового синхронизма выполняется при этом автомати-

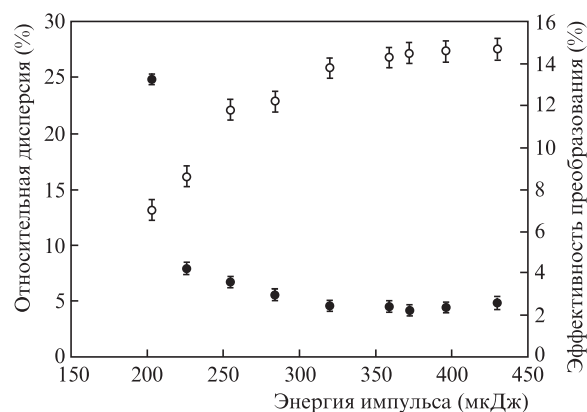


Рис.2. Зависимости относительной дисперсии энергии стокова импульса (темные точки) и эффективности преобразования (светлые точки) от энергии одиночного лазерного импульса.

чески, что приводит к осцилляциям мощности стокова импульса и, следовательно, к снижению стабильности работы. Что касается генерации второй стоковой компоненты с длиной волны ~ 8 мкм, то в нашем случае ее порог генерации не превышался вследствие малости коэффициента комбинационного усиления, обратно пропорционального длине волны стокова излучения, и поглощения излучения второй стоковой компоненты в стенках капилляра из плавленого кварца.

Эксперименты с двухимпульсным возбуждением активной среды проводились при равной энергии субимпульсов. Как показали наши предыдущие эксперименты [9], при таком соотношении энергий субимпульсов достигаются максимальные значения комбинационного инкремента усиления и эффективности преобразования. Длительности субимпульсов составляли 1.6 пс, временной интервал между ними был равен 5 пс. Энергия двойного импульса была фиксирована и составляла 300 мкДж. Для изменения комбинационного инкремента усиления варьировалось давление водорода в камере преобразователя. (Комбинационный инкремент усиления в нестационарном случае пропорционален произведению энергии лазерного импульса и концентрации частиц [7].)

На рис.3 показаны зависимости относительной дисперсии, а также доли энергии стокова импульса, содержащейся в задержанном субимпульсе, от давления водорода в камере. Из представленных зависимостей видно, что в случае низкого давления (меньше 25 атм), когда стокова компонента возникает только в задержанном импульсе накачки, относительная дисперсия превышает 10 %. Рост давления водорода приводит к тому, что уже для первого субимпульса накачки значение пороговой энергии ВКР превышает и для второго субимпульса накачки рассеяние начинается на заранее сформированной волне когерентных колебаний активной среды, поскольку при максимальном в условиях эксперимента давлении водорода 40 атм время дефазировки T_2 составляет 120 пс [11]. Влияние квантовых флуктуаций числа затравочных стоковых фотонов при этом уменьшается, и относительная дисперсия энергии стоковых импульсов снижается. Наиболее значительное уменьшение относительной дисперсии – до $0.9\% \pm 0.4\%$, что в четыре раза ниже минимального значения дисперсии при моноимпульсной на-

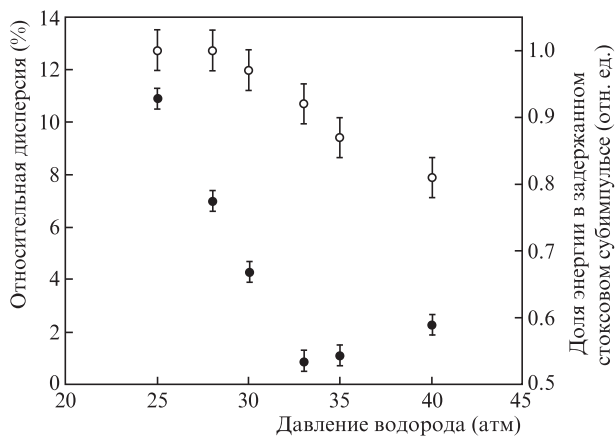


Рис.3. Зависимости относительной дисперсии энергии задержанного стокова субимпульса при двухимпульсной накачке (темные точки) и доли энергии задержанного стокова субимпульса в суммарной энергии стокова импульса (светлые точки) от давления водорода.

качке, наблюдалось при давлении водорода 33 атм. В этом режиме $\sim 10\%$ от суммарной энергии стокова импульса приходится на первый субимпульс. Соответственно во втором субимпульсе с малой относительной дисперсией содержится 90% энергии стокова импульса. При этом суммарная эффективность преобразования в стоково излучение совпадала с эффективностью преобразования одиночного импульса накачки и составляла $\sim 15\%$. Повышение давления водорода до 40 атм приводит к снижению как доли, так и абсолютного значения энергии стокова излучения в задержанном субимпульсе. Относительная дисперсия для задержанного импульса возрастает до 2.5%. Как уже отмечалось выше, мы связываем этот эффект с нестабильным изменением формы стокова импульса вследствие обратной перекачки стокова излучения в волну накачки в случае насыщения преобразования при нестационарном ВКР [10].

В [8, 9] было показано, что комбинационные преобразователи с двухимпульсной фемтосекундной накачкой позволяют одновременно со сдвигом частоты осуществлять уширение спектра стокова импульса вследствие нелинейной фазовой кросс- и самомодуляции. Частотно chirпированный стоков импульс затем может быть сжат по времени до длительности, более чем на порядок меньшей длительности исходного импульса накачки. При этом стабильность работы комбинационного преобразователя-компрессора не исследовалась. В настоящей работе была рассмотрена стабильность работы комбинационного преобразователя с двухимпульсной накачкой при изменении длительности субимпульсов. Длительность лазерного субимпульса менялась от 400 фс до 1.8 пс. При меньшей длительности субимпульса эффективность комбинационного преобразования резко снижалась вследствие эффектов нелинейной фазовой модуляции [12]. Давление водорода составляло 35 атм, энергия двойного импульса накачки была равна 250 мкДж. Результаты измерений представлены на рис.4. Отметим, что относительная дисперсия суммарной энергии стоковых импульсов совпадает при нестационарном ВКР с дисперсией при накачке одиночным импульсом с энергией, равной суммарной энергии двойного импульса. При уменьшении длительности субимпульса наблюдается рост относительной дисперсии энергии стоковых импульсов. Такая зависимость может быть связана с уменьшением инкремента комбинационного усиления вследствие нелинейной фазовой модуляции [12]. Уменьшение комбинационного инкремента усиления, как и снижение энергии лазерного импульса, ведет к росту от-

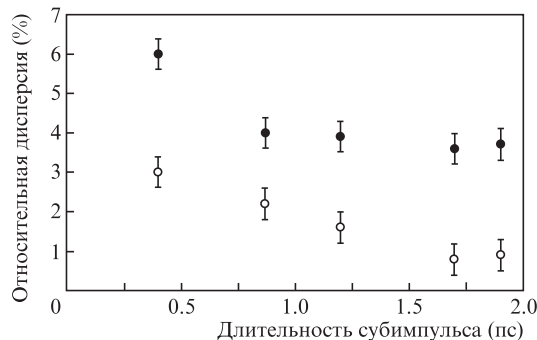


Рис.4. Зависимости относительной дисперсии суммарной энергии двух стоковых субимпульсов (темные точки) и относительной дисперсии энергии задержанного стокова субимпульса (светлые точки) от длительности субимпульса.

носительной дисперсии (рис.2). И, как следствие, для наиболее коротких субпикосекундных импульсов получено только двукратное уменьшение относительной дисперсии энергии стокового импульса по сравнению с моноимпульсной накачкой.

В заключение отметим, что предложенная схема комбинационного преобразователя с двухимпульсной накачкой [9] является перспективной для создания частотных преобразователей, стабильность работы которых близка к стабильности лазерной системы. Использование данной схемы со световодами большего диаметра и с более мощными иттербиевыми лазерами [13] открывает возможность генерации высокостабильных миллиджоульных импульсов в районе 2 мкм для экспериментов в области нелинейной оптики среднего ИК диапазона.

1. Walmsley I.A., Raymer M.G. *Phys. Rev. Lett.*, **50**, 82 (1983).
2. Fabricius N., Nattermann K., Linde D. *Phys. Rev. Lett.*, **52**, 113 (1984).
3. Nattermann K., Fabricius N., Linde D. *Opt. Commun.*, **57**, 212 (1986).
4. Lewenstein M. *Z. Phys. B – Condensed Matter*, **56**, 69 (1984).
5. Walmsley I.A., Raymer M.G., Sizer T. II, Duling I.N. III, Kafka J.D. *Opt. Commun.*, **53**, 137 (1985).
6. Грабчиков А.С., Килин С.Я., Козич В.П., Иодо Н.М. *Письма в ЖЭТФ*, **43**, 118 (1986) [*JETP Lett.*, **43**, 151 (1986)].
7. Everall M.E., Partanen J.P., Barr J.R.M., Shaw M.J. *Opt. Commun.*, **64**, 393 (1987).
8. Konyashchenko A.V., Losev L.L., Pazyuk V.S. *Opt. Lett.*, **44**, 1646 (2019).
9. Комященко А.В., Лосев Л.Л., Пазюк В.С. *Квантовая электроника*, **49**, 845 (2019) [*Quantum Electron.*, **49**, 845 (2019)].
10. Elgin J.N., O'Hare T.B. *J. Phys. B: At. Mol. Phys.*, **12**, 159 (1979).
11. Berger J.Ph., Saint-Loup R., Berger H., Bonamy J., Robert D. *Phys. Rev. A*, **49**, 3396 (1994).
12. Комященко А.В., Кострюков П.В., Лосев Л.Л., Пазюк В.С. *Квантовая электроника*, **47**, 593 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 593 (2017)].
13. Nagy T., Hadrich S., Simon P., Blumenstein A., Walter N., Klas R., Buldt J., Stark H., Breitkopf S., Jojart P., Seres I., Varallyay Z., Limpert J. *Optica*, **6**, 1423 (2019).