

НЕЛИНЕЙНАЯ СВЯЗЬ МОД В МНОГОМОДОВЫХ ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ ГЕНЕРАЦИЯ ФЕМТО-СЕКУНДНЫХ ВКР-СОЛИТОНОВ

А.Б.Грудинин, Е.М.Дианов, Д.В.Коробкин,
А.М.Прохоров, Д.В.Хайдаров

В работе впервые экспериментально наблюдался эффект генерации 70 – 100 фемтосекундных солитонов в многомодовых световодах. Показано, что в нелинейном режиме энергия распространяется в основной моде, а мощность фундаментального солитона составляет величину около 30 кВт.

Хорошо известно, что связь мод в достаточно длинных многомодовых волоконных световодах (МВС) с малыми потерями приводит к почти равномерному распределению энергии между модами ¹. Известно также и то, что при определенных условиях в нелинейной системе энергия распределяется лишь между несколькими низшими модами ². В связи с этим большой практический и научный интерес имеет исследование временных и пространственных характеристик излучения большой интенсивности, распространяющегося вдоль МВС.

Поскольку интенсивность ВКР в световодах достаточно велика, то для решения поставленной задачи вполне очевидным представляется исследование спектральных, временных и пространственных характеристик ВКР в МВС.

Принципиальная схема эксперимента была следующей.

Излучение лазера на АИГ: Nd^{3+} , работающего в режиме одновременной синхронизации мод π - и модуляции добротности ($\tau_n = 150$ пс, $P_{пик} = 600$ кВт, $\lambda = 1,064$ мкм) вводилось в МВС. Временные характеристики измерялись на автокорреляторе интенсивностей по бесфоковой методике (временное разрешение автокоррелятора – 12 – 15 фс), спектральные – с помощью монохроматора МДР-4 и германиевого фотодиода, пространственные – сканированием одномодового световода с известным распределением поля основной моды относительно выходного торца многомодового световода.

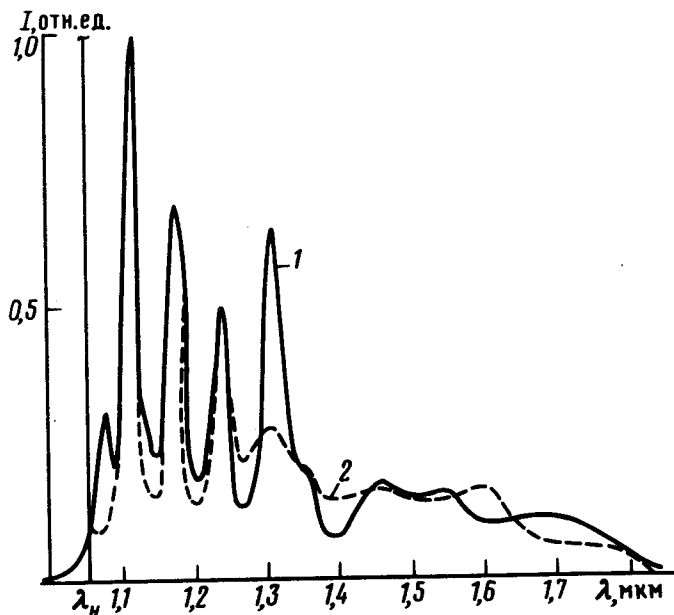


Рис. 1. Спектры каскадного ВКР: 1 — в градиентном многомодовом ВС; 2 — в одномодовом ВС

На рис. 1 кривой 1 изображен спектр ВКР в МВС с параболическим профилем показателя преломления, максимальной разностью между сердцевиной и оболочкой $\Delta n = 13 \cdot 10^{-3}$, диаметром сердцевины $2a = 38$ мкм и длиной 50 м. Обращает на себя внимание сплошной спектр в области отрицательной дисперсии групповых скоростей ($k'' < 0$): характер спектра такой же, что и в одномодовых волоконных световодах. (Для сравнения приведен спектр ВКР в ОВС – кривая 2). Поскольку сплошной спектр ВКР в ОВС обусловлен развитием модуляционной неустойчивости с последующим преобразованием частоты за счет эффекта вынужденного комбинационного саморассеяния импульсов, что в результате приводит к формированию фемтосекундных ВКР-солитонов³, то можно предположить, что и в многомодовых световодах существуют ВКР-солитоны.

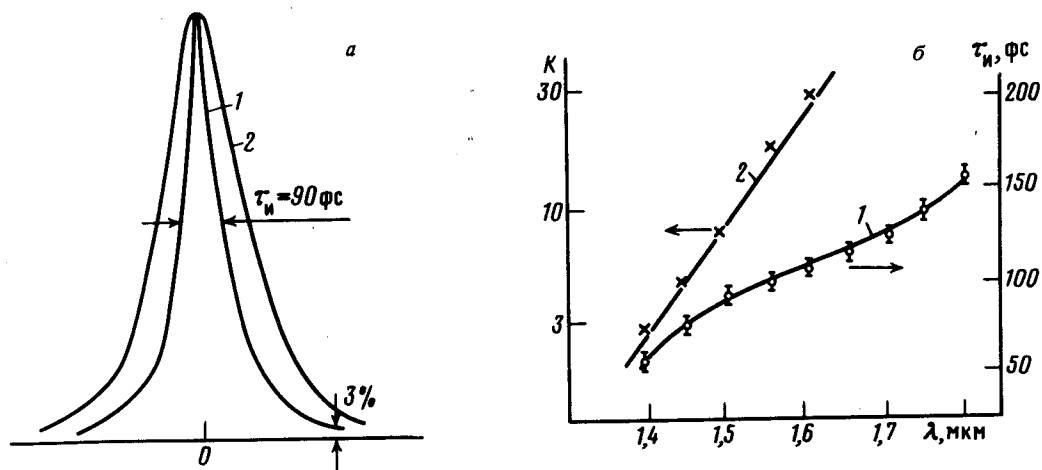


Рис. 2. а – Автокорреляционные функции излучения в области длины волны 1,6 мкм в МВС длиной: 1 – 50 м; 2 – 500 м. б – Зависимость длительности импульсов τ (кривая 1) и контраста автокорреляционной функции K (кривая 2) от длины волны

Измерения временной структуры ВКР в МВС подтвердили это предположение. На рис. 2 кривой 1 изображена автокорреляционная функция интенсивностей на выходе МВС длиной 50 м в области 1,6 мкм. Длительность импульса в предположении sech^2 -формы импульса составила 90 фс. Следует отметить, что столь короткие световые импульсы формировались в широкой спектральной области, что иллюстрирует вставка на рис. 2, где кривой 1 показана длительность импульсов, а кривой 2 – контраст корреляционной функции.

Измерения длительности в 500 метровом отрезке световода (рис. 2, кривая 2) позволили установить, что сформированные импульсы являются ВКР-солитонами; увеличение длительности импульсов обусловлено диссипацией энергии за счет линейных оптических потерь.

Измерения распределения интенсивности на торце световода дали результат, качественно согласующийся с результатами работ⁴. Если на длине волны накачки ($\lambda = 1,064$ мкм) поле на торце МВС представляет собой суперпозицию многих (около 100) мод (рис. 3, кривая 1), то в области 1,6 мкм распределение интенсивности соответствует основной моде (рис. 3, кривая 2). Подтверждение вывода об одномодовом режиме МВС явилось измерение пространственной когерентности поля на торце световода. Результаты измерения свидетельствовали о том, что поле пространственно когерентно, т. е. стоксова волна в области отрицательной хроматической дисперсии МВС распространяется в основной моде.

Этот факт имеет два основных, на наш взгляд, следствия. Во-первых, появляется реальная возможность использовать многомодовые световоды в высокоскоростных линиях связи и датчиках физических полей. Во-вторых, значительно увеличивается мощность основного

ВКР-солитона. Так, в данном случае мощность 90 фс импульса составила 30 кВт, в то время как в одномодовом световоде ВКР-солитон такой же длительности имеет пиковую мощность около 5 кВт. Подбором соответствующего световода мощность, по-видимому, можно поднять до 100 кВт.

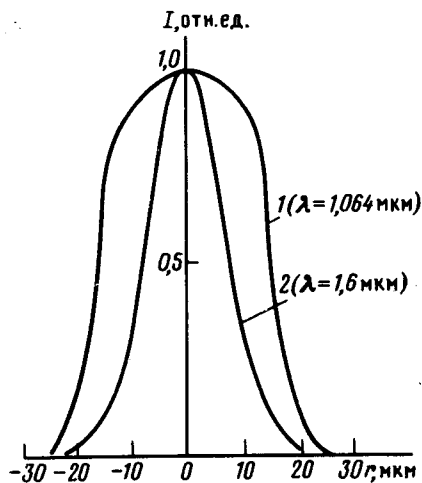


Рис. 3. Распределение интенсивности на торце МВС на разных длинах волн: 1 — $\lambda = 1,06$ мкм; 2 — $\lambda = 1,6$ мкм

Что касается физического механизма генерации фемтосекундных ВКР-солитонов в МВС, то на сегодняшний день картина остается неясной. Поэтому мы изложим ряд экспериментальных фактов, которые в дальнейшем, возможно, помогут снять суть наблюдаемого явления.

1. Временные характеристики ВКР в многомодовом световоде в области отрицательной дисперсии групповых скоростей полностью аналогичны временным характеристикам ВКР в одномодовом световоде: в области малой, но отрицательной хроматической дисперсии автокорреляционная функция интенсивностей соответствует модуляционной неустойчивости и с ростом длины волны растет контраст АКФ.

2. Распределение поля на торце МВС в области положительной хроматической дисперсии соответствует суперпозиции многих мод, причем характерный размер поля на торце уменьшается с ростом длины волны. В области отрицательной хроматической дисперсии начиная с некоторой длины волны (около 1,5 мкм) энергия переносится лишь одной основной модой. Следует отметить, что впервые эффект уменьшения числа распространяющихся мод в процессе каскадного ВКР мод наблюдался в работе ⁴ и был подтвержден в недавно опубликованной работе ⁵. В этих работах подобное пространственное поведение поля объяснялось эффектом самофокусировки, возникающем в волноводной среде при мощности на несколько порядков меньше пороговой мощности самофокусировки в объемной среде. Однако, вследствие отсутствия удовлетворительного теоретического обоснования такое объяснение требует дополнительных исследований.

3. Характер распределения поля практически не зависит от мощности накачки при достижении ею порогового значения (при котором мощность стоксовых компонент сравнима с мощностью накачки).

4. Характер распределения поля не зависит и от длины световода: при изменении длины световода от 10 до 500 метров распределение поля на длинах волн в области $\lambda > 1,5$ мкм оставалось неизменным. На наш взгляд подобное поведение обусловлено нелинейной связью мод, препятствующей диффузии энергии в моды высших порядков. Однако физический механизм такой связи пока неясен.

В заключение еще раз подчеркнем, что впервые наблюдаемый нами эффект генерации фемтосекундных ВКР-солитонов в многомодовых световодах позволяет увеличить почти на поряд-

док мощность сверхкоротких импульсов и дает возможность более детально изучать нелинейную динамику фемтосекундных солитонов.

Литература

1. *Gloge O.* Bell Syst. Tech. J., 1972, 51, 1767.
2. *Ферми Э., Паста Д., Улам С.* Научные труды . М.: Наука, 1972, т. II.
3. *Грудинин А.Б. и др.* Письма в ЖЭТФ, 1987, 45, 211.
4. *Нестерова З.В. и др.* Письма в ЖЭТФ, 1981, 34, 391.
5. *Baldeck P. et al.* Opt. Lett., 1987, 12, 588.

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
26 января 1988 г.
