

РАСПАД ФЕМТОСЕКУНДНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ УСИЛЕНИИ В ОДНОМОДОВЫХ СВЕТОВОДАХ, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Er^{3+}

*А.Б.Грудинин, Е.М.Дианов, Д.В.Коробкин,
А.Ю.Макаренко, А.М.Прохоров, И.Ю.Хрущев*

В работе впервые наблюдался распад фемтосекундных импульсов при усилении в одномодовых волоконных световодах, легированных ионами Er^{3+} . Показано, что стоксова компонента расщепленного импульса является солитоном.

Волоконные световоды, легированные ионами редкоземельных элементов или активные волоконные световоды (АВС) одновременно совмещают в себе свойства направляющей среды и лазерного элемента, благодаря чему являются в последнее время объектом весьма интенсивного изучения¹. Среди активных световодов особый интерес представляют АВС, легированные ионами эрбия, широкая полоса люминесценции которого ($\sim 200 \text{ см}^{-1}$) лежащая в области 1,54 мкм позволяет создавать не только источники лазерного излучения, работающие в области минимальных потерь и отрицательной дисперсии кварцевых световодов, но и исследовать процессы усиления нелинейных импульсов в протяженных лазерных средах.

В этой связи особый интерес вызывает проблема усиления фемтосекундных ВКР-солитонов с длительностями, сравнимыми по величине с временем поперечной релаксации лазерного перехода $\text{Er}^{3+} \ ^4I_{13/2} \rightarrow \ ^4I_{15/2}$.

На рис. 1 изображена упрощенная схема экспериментальной установки. В качестве генератора ВКР-солитонов использовалась система, состоящая из АИГ: Nd^{3+} -лазера, работающего в режиме одновременной синхронизации мод и модуляции добротности и одномодового волоконного световода (ОВС) длиной 35 м с длиной волны нулевой хроматической дисперсии $\lambda_0 = 1,32 \text{ мкм}$. Сформированные ВКР-солитоны длительностью 80 фс в области 1,54 мкм вводились в активный световод с концентрацией ионов эрбия 1000 ppm, длиной волны отсечки первой высшей моды $\lambda_c = 1,23 \text{ мкм}$ и $\lambda_0 = 1,3 \text{ мкм}$. Световод накачивался второй гармоникой лазера на АИГ: Nd^{3+} , работающего в режиме синхронизации мод. Средняя мощность накачки 2 Вт. Эффективность ввода излучения накачки в АВС составила 50%, а для сигнала варьировалась в пределах 4–40%.

Спектральные характеристики исследовались на решеточном монохроматоре с разрешением не хуже 0,5 нм, а временные -- на автокорреляторе интенсивностей по бесфоновой методике с разрешением не хуже 15 фс².

На рис. 2а изображены автокорреляционные функции (АКФ) интенсивностей излучения на выходе из 55 см АВС при различных эффективностях согласования световода-генератора и АВС (6, 8 и 40%). На рис. 2б изображены соответствующие спектры.

Из представленных результатов видно, что в случае низкого коэффициента согласования у двух световодов импульс в процессе распространения сжимается до ~ 55 фс, а соответствующая ширина спектра равна $\Delta\lambda = 35$ нм. Субструктура в спектре в области $1,54$ мкм обусловлена усиленной спонтанной эмиссией, имеющей, вследствие штарковского расщепления резонансных уровней, различные сечения взаимодействия внутри полосы усиления. Это, однако, не приводит к существенному изменению АКФ вследствие большого времени жизни метастабильного уровня ($\sim 10^{-2}$ с).

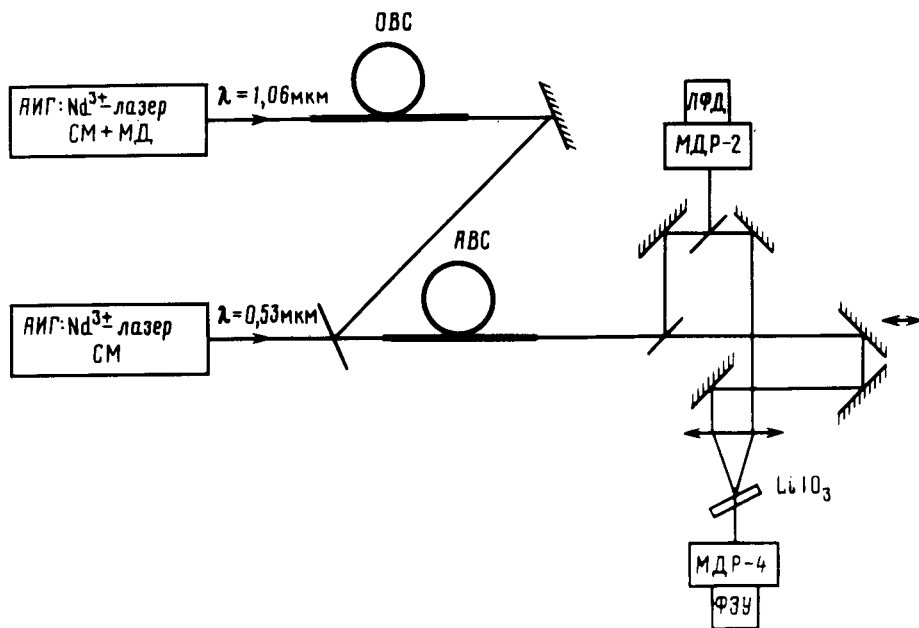


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

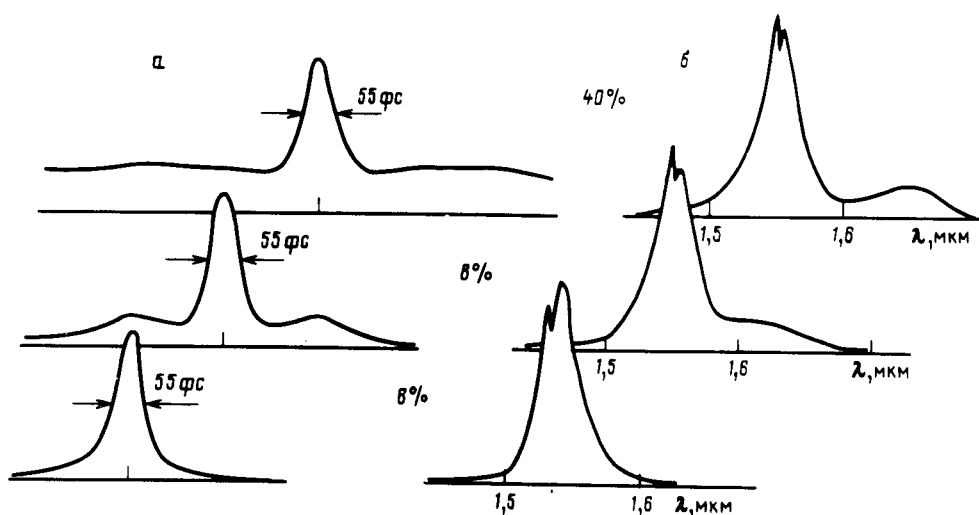


Рис. 2. а — Автокорреляционные функции интенсивностей усиленного излучения при различных эффективностях ввода из световода генератора в АВС. б — Соответствующие спектры

Коэффициент усиления волоконного усилителя по отношению ко входному импульсу равен 160, что с учетом коэффициента согласования позволяет оценить энергию выходного импульса как равную 5 нДж.

С увеличением γ в автокорреляционной функции появляются два боковых максимума, что является результатом структурной неустойчивости многосолитонного импульса, а в спектре появляется длинноволновое крыло, характерное для эффекта вынужденного комбинационного саморассеяния^{3,4} (ВКСР), причем с ростом γ как спектральное, так и временное расщепление увеличивалось.

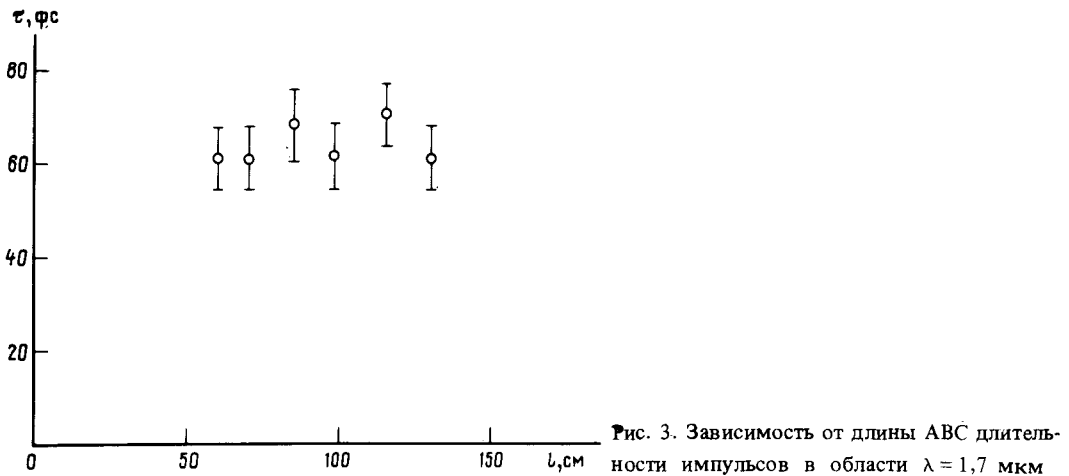


Рис. 3. Зависимость от длины АВС длительности импульсов в области $\lambda = 1,7$ мкм

Чтобы более детально проследить динамику распространения импульсов в стоксовой области экспериментальная установка была несколько видоизменена, Задающий ОВС был взят длиной 100 м, так что длительность ВКС-солитонов была теперь 120 фс (увеличение длительности произошло за счет линейных потерь в световоде), а к АВС был приварен с потерями на стыке менее 0,5 дБ кусок этого же ОВС длиной 70 см, так что сигнальные импульсы вначале проходили по пассивному ОВС, а затем по активному. Это было сделано для того, чтобы последовательно укорачивая АВС можно было проследить динамику распространения нелинейного импульса. На рис. 3 показана зависимость длительности импульсов в области 1,7 мкм, т.е. вне полосы усиления Er^{3+} от длины АВС. Видно, что длительность импульсов остается неизменной в пределах точности измерений на протяжении более чем 20 дисперсионных длин. Интересно отметить, что внутри стоксова крыла длительность импульса не меняется, оставаясь в пределах 55–60 фс, что значительно короче, чем в случае "чистого" ВК саморассеяния в обычных световодах без резонансных эффектов^{2,5}.

Качественно физическую картину можно представить следующим образом. На первом этапе усиления нелинейный импульс набирает энергию не меняя практически своих временных характеристик. При этом эффект затягивания частоты под центр линии усиления приводит к структурной стабилизации импульса и препятствует его распаду на "цветные" солитоны. При достижении некоторой пороговой энергии, большей энергии фундаментального солитона (по нашим оценкам, в 10–15 раз), импульс начинает сжиматься и распадаться на несколько частей, в результате чего в спектре формируется длинноволновое крыло,двигающееся в стоксову область за счет эффекта ВКСР⁴.

Интерпретацию полученных результатов подтверждают численные оценки. В области 1,54 мкм в используемом АВС дисперсионные длины второго порядка импульсов длительностью 80 фс и 55 фс соответственно равны 11 см и 5 см, длина усиления $z_{yc} = 1/\alpha = 6$ см, где α – коэффициент усиления, см^{-1} ; величины смещения центральной частоты вследствие ВКСР для 80 фс и 55 фс импульсов в световоде с дисперсией 15 пс/нм · км равны соответственно 10 нм/м и

40 нм/м⁶. Таким образом, процесс усиления является неадиабатическим, и на его динамику существенное влияние оказывает эффект ВКСР.

Следует отметить, что на динамику усиления должна оказывать влияние аномальная дисперсия вблизи линии резонансного усиления. По оценкам, для данного световода изменение хроматической дисперсии D вследствие этого эффекта составляет величину ± 5 пс/нм · км при значении D в отсутствие резонансной полосы 15 пс/нм · км.

В заключение отметим, что уменьшение коэффициента усиления при высоком коэффициенте связи световодов обусловлено не только резонансным эффектом насыщения усиления, но и нелинейным эффектом — сбросом энергии в стоксову область.

Авторы выражают благодарность Э.А.Ванагасу (Институт физики полупроводников, Вильнюс) за плодотворные обсуждения и Д.Н.Пэйну (Саутгемптонский Университет, Англия) за предоставленные АВС.

Литература

1. Poola S.B. et al. Electron. Lett., 1985, 21, 737.
2. Грудинин А.Б. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, 45, 211.
3. Грудинин А.Б. и др. Письма в ЖЭТФ, 1987, 46, 175.
4. Mitschke F.M., Mollenauer L.F. Opt. Lett., 1986, 11, 659.
5. Водопьянов К.Л. и др. КЭ, 1987, 14, 2053.
6. Gordon J.P. Opt. Lett, 1986, 11, 662,

Институт общей физики
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
28 декабря 1989 г.