

ВЛИЯНИЕ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ НА КАЧЕСТВО ОБРАЩЕНИЯ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ РАССЕЯНИИ В ВОЛОКОННЫХ СВЕТОВОДАХ

*Б.Я. Зельдович, В.А. Кривошеков, А.В. Мамаев,
Н.А. Мельников, Н.Ф. Пилипецкий, В.В. Шкунов*

Показано, что для длинных оптических волокон основным источником низкого качества обращения волнового фронта при вынужденном рассеянии (ВР) является пространственная деполяризация накачки в волокне. Условие подавления поляризационных искажений обращения является условие большого ВР-усиления стоксовой волны на длине деполяризации накачки.

Излучение, полностью поляризованное на входе в многомодовый волоконный световод (МВС), в процессе распространения приобретает спекл-структуру с поляризацией, хаотически неоднородной по поперечному сечению, т.е. деполяризуется. Взаимодействие встречных волн при вынужденном рассеянии Мандельштама – Бриллюэна (ВРМБ), приводящее к обращению волнового фронта (ОВФ), весьма чувствительно к пространственной структуре состояния их поляризаций¹⁻³. В работе² деполяризация в обрабатываемую волну вводилась преднамеренно. В настоящей работе исследуются физические эффекты, к которым приводит деполяризация в МВС при ОВФ – ВРМБ. Эти эффекты представляют также заметный интерес для приложений, поскольку ОВФ в световодах обладает достаточно низким порогом⁴⁻⁷.

В задачах ОВФ основным является вопрос о качестве обращения. При вынужденном рассеянии пространственно деполяризованного излучения происходит независимое усиление отдельных поляризационных компонент с обращением пространственных структур, но с воспроизведением поляризационного орта. Эти компоненты возбуждаются от спонтанных шумов независимо и имеют поэтому случайные амплитудно-фазовые веса, так что ОВФ оказывается лишь частичным и доля обращения сильно флуктуирует.

Для экспериментов были выбраны типичные МВС с диаметром световедущей жилы ≈ 50 мкм и апертурным углом $\theta \approx 0,2$ рад (в воздухе). Если входное излучение занимает заметную часть апертурного угла, то из-за частых ПВО-отражений от стенок оно уже на первых сантиметрах МВС приобретает развитую спекл-структуру, а через 10 – 30 см становится полностью деполяризованным. Поскольку длина деполяризации l_{gn} обычно много меньше длины ВС, почти на всей длине взаимодействия ВР происходит в поле полностью деполяризованной накачки и поэтому с низкой, флуктуирующей от выстрела к выстрелу долей ОВФ. Лишь на малой части длины взаимодействия, в пределах расстояния l_{gn} от входного торца МВС, накачка деполяризована лишь частично и доля ОВФ может возрасти за счет дискриминации необращенной компоненты стоксовой волны. Если дискриминация, определяемая величиной полного усиления стока на этом участке, велика, стоксовая волна подстраивает свою структуру под поле накачки, так что отраженное излучение оказывается обращенным и полностью поляризованным, флуктуации доли сглаживаются. В противном случае стоксовая волна сохраняет пространственную деполяризацию и случайный характер доли ОВФ.

Для выяснения роли участка волокна, на котором накачка остается частично поляризованной, было проведено следующее экспериментальное исследование. В МВС различной длины L , что обеспечивало различие длин ВРМБ-усиления $l_{yc} \approx L/30$, и с различной длиной деполяризации l_{gn} , что обеспечивалось изменением угла ввода φ накачки к оси волокна, исследовались степень поляризации стоксовой волны P_s и доля обращения H в зависимости от величины коэффициента отражения R . В качестве накачки использовалось излучение импульсного одномодового лазера на Nd-стекле с $\lambda = 1,06$ мкм и длительностью импульса $\tau_u \approx 30$ нс.

На рис. 1 приведены экспериментальные точки для H в зависимости от R в ВС из стекла ГЛСЗ различной длины: 2 и 6 м. Длина деполяризации l_{gn} в зависимости от угла ввода φ из-

мерялась в отдельных экспериментах на кусочках того же волокна малой длины. По критерию степени поляризации $P_L = 0,1$ для волокна с $L = 2$ м с углом ввода $\varphi = 6 \cdot 10^{-2}$ $l_{gn} \approx 24$ см, а для волокна с $L = 6$ м, $\varphi = 8,5 \cdot 10^{-2}$ $l_{gn} = 18$ см. При $L = 2$ м доля ОВФ довольно быстро почти без флуктуаций, выходит на свое максимальное значение и остается постоянной с экспериментальной точностью. В отличие от этого, H в шестиметровом МВС при малых R низкое и сильно флуктуирует. Лишь при $R \approx 50\%$ доля H достигает максимальных значений, а флуктуации доли сглаживаются.

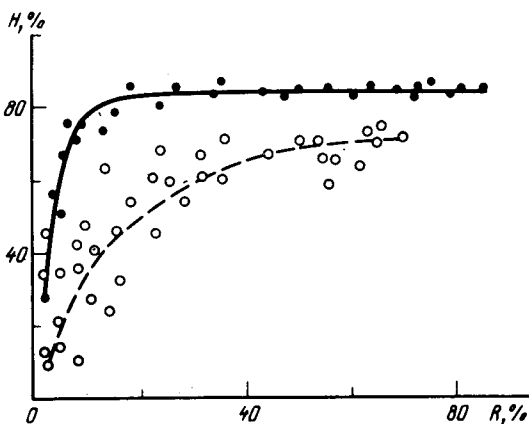


Рис. 1

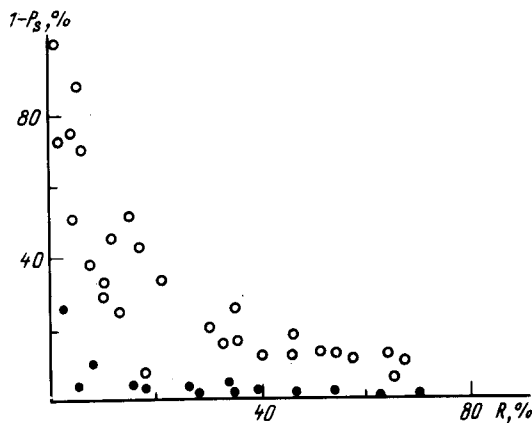


Рис. 2

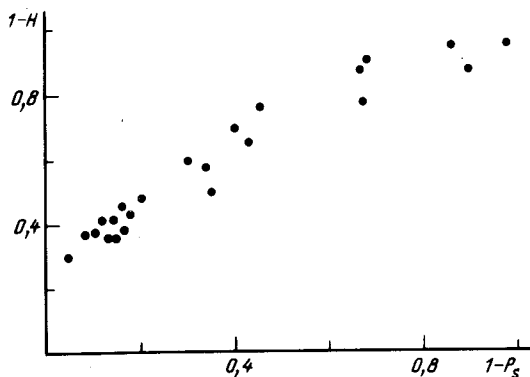


Рис. 3

Рис. 1. Зависимость доли обращения H от коэффициента отражения R . (\bullet — $L = 2$ м, \circ — $L = 6$ м)

Рис. 2. Зависимость степени деполаризации $1 - P_s$ стоксовой волны от коэффициента отражения R (\bullet — $L = 2$ м, \circ — $L = 6$ м)

Рис. 3. Зависимость доли необращения $1 - H$ от величины деполаризации $1 - P_s$ стоксовой волны

На рис. 2 приведены экспериментальные точки для степени деполаризации стока $1 - P_s$ от R . Для короткого ВС стокова волна практически полностью поляризована при всех разумных значениях R , тогда как для $L = 6$ м P_s нарастает с ростом R от весьма малых значений, испытывая большие флуктуации, которые при малых R особенно велики и сглаживаются при высоких уровнях насыщения накачки $R \sim 1$. Замечателен тот факт, что наблюдается линейная корреляция между H и P_s , которая позволяет однозначно заключить, что флуктуации качества ОВФ обусловлены флуктуациями степени поляризации стоксовой волны и, в конечном счете, флуктуациями амплитуд затравочных волн, возбуждающих различные поляризационные компоненты стока, рис.3.

Теоретические оценки для степени деполаризации $1 - P_s$ можно сделать в упрощенной модели, считая, что при $0 < z < l_{gn}$ накачка полностью поляризована $E_L(z < l_{gn}) = e_1 E_1(r, z) \sqrt{2}$, а в точке $z = l_{gn}$ превращается в полностью деполаризованную: $E_L(z > l_{gn}) = e_1 E_1(r, z) + e_2 E_2(r, z)$, $\langle |E_1|^2 \rangle = \langle |E_2|^2 \rangle = I_L/2$, $\langle E_1 E_2^* \rangle = 0$. Тогда на выходе волокна $z = 0$ получим

$$1 - P_s(0) = \frac{2|\alpha_2|^2 + |\alpha_3|^2}{|\alpha_2|^2 + 0,5|\alpha_3|^2(1 + N_{нк}) + |\alpha_1|^2 N_{овф}}, \quad (1)$$

где α_1, α_2 и $\alpha_3/\sqrt{2}$ — амплитуды возбуждения независимых стоксовых компонент $E_1^*e_1, E_2^*e_2$ и $E_1^*e_2 + E_2^*e_1$ соответственно ⁶, $N_{\text{нк}}$ и $N_{\text{овф}}$ — факторы усиления необращенной и обращенной волн поляризации e_1 на участке $0 < z < l_{gn}$. В стационарном режиме фактор $N = I_s(0)/I_s(l_{gn}) = \frac{\exp(g l_{gn}) \cdot R}{1 - R}$, где g — пороговый коэффициент усиления компоненты. Однако сравнение

этих результатов с экспериментом показывает, что факторы дискриминации увеличиваются с ростом R сильнее, чем по стационарной теории. В нестационарном режиме $\tau_{\text{и}} \sim \Gamma_{\text{РМБ}}^{-1}$ на пороге $N_{\text{овф}} \cong \exp(15\sqrt{2}l_{gn}/L), N_{\text{нк}} \cong \exp(15l_{gn}/L)$; из (1) для волокна длиной $L = 2$ м получим $1 - P_s(0) \approx 17\%$, а для $L = 6$ м $1 - P_s(0) \approx 72\%$, что хорошо согласуется с экспериментальными результатами при $R \ll 1$. Отметим, что входной участок волокна повышает качество ОВФ стоксовой волны лишь в тот интервал времени, когда по нему проходит накачка. Поэтому эффект имеет место для достаточно длинных импульсов $\tau_{\text{и}} > L/c$. При $L = 6$ м в нашем случае $\tau_{\text{и}} = L/c \cong 30$ нс. Поэтому хорошее качество ОВФ достигалось лишь при заметном превышении над порогом, когда ВР развивается в начале импульса накачки.

Таким образом, для обеспечения высококачественного ОВФ в длинных многомодовых ВС, следует увеличивать длину l_{gn} , на которой накачка сохраняет свою поляризацию до $\sim 1/30$ длины ВС, либо работать с большим превышением над порогом, обеспечивающим требуемую степень дискриминации $g_{\text{эфф}} \cdot l_{gn} > 1$. Для коротких импульсов накачки $\tau_{\text{и}} < L/c$ ОВФ высокого качества можно ожидать лишь в начале лазерного импульса, пока он полностью не погрузился в ВС и стал деполяризованным по всей длине взаимодействия.

Литература

1. Зельдович Б.Я., Шкунов В.В. ЖЭТФ, 1978, 75, 428.
2. Блазук В.Н., Зельдович Б.Я., Крашенинников В.Н., Мельников Н.А., Пилипецкий Н.Ф., Рагульский В.В., Шкунов В.В. ДАН СССР, 1978, 241, 1322.
3. Зельдович Б.Я., Пилипецкий Н.Ф., Шкунов В.В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985.
4. Басиев Т.Т., Дианов Е.М., Карасик А.А., Лучников А.В., Мирон С.Б., Прохоров А.М. Письма в ЖЭТФ, 1982, 36, 85.
5. Петров М.П., Кузин Е.А. Письма в ЖТФ, 1982, 8, 729.
6. Григорьянц В.В., Смирнов В.И. Квантовая электроника, 1983, 10, 2002.
7. Чертков А.А. Письма в ЖТФ, 1984, 10, 1416.