

# Методика расчета порога ВРМБ в оптических волокнах

О.Е.Наний, Е.Г.Павлова

*Показано, что в ряде важных для практического применения случаев широко используемая на практике методика расчета порога ВРМБ в оптических волокнах дает ошибочные результаты. В частности, не во всех оптических волокнах, обладающих «антиволноводными» свойствами для акустических волн, наблюдается повышение порога ВРМБ. Для его повышения принципиально важно обеспечить быстрое разрушение волнового фронта акустической волны за счет рефракции.*

**Ключевые слова:** волокно, вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюена, порог ВРМБ, мощные волоконные лазеры.

Интерес к исследованию методов увеличения порога ВРМБ стимулируется быстрым прогрессом в разработке мощных волоконных лазерных источников света с узким спектром излучения, в которых ВРМБ становится основным фактором, ограничивающим максимальную выходную мощность излучения [1]. Кроме того, в системах кабельного телевидения ВРМБ ограничивает максимальную мощность сигнала, вводимого в волоконную линию, и, следовательно, дальность работы таких систем [2].

Недавно были предложены принципы создания волокон с увеличенным порогом ВРМБ, заключающиеся в том, чтобы использовать такие легирующие добавки в сердцевине и оболочке, которые обеспечили бы существенное уменьшение пространственного перекрытия оптической и акустической мод [1, 3, 4]. Коэффициент перекрытия оптической и акустической волноводных мод  $I_{ac}$  определяется следующим выражением [4]:

$$I_{ac} = \frac{(\int E_0 E_0^* \rho_{ac} r dr d\theta)^2}{\int (E_0 E_0^*)^2 r dr d\theta \int \rho_{ac} \rho_{ac}^* r dr d\theta}, \quad (1)$$

где  $E_0$  – комплексная амплитуда электрического поля оптической волноводной моды;  $\rho_{ac}$  – комплексная амплитуда акустической волноводной моды. Коэффициент ВРМБ-усиления пропорционален, а порог ВРМБ обратен пропорционален коэффициенту перекрытия.

По мнению авторов работ [1–4], причиной относительно низкого порога ВРМБ в стандартном телекоммуникационном волокне является значительное перекрытие оптических и генерируемых акустических волн, поскольку скорость акустических волн в сердцевине такого волокна (кварц, легированный германием) меньше их скорости в оболочке (чистый кварц), а значит, такое волокно обладает свойствами волновода для акустических волн.

Цель настоящей работы – обратить внимание на то, что расчет степени увеличения порога ВРМБ по используемой сегодня методике (см. [1, 3, 4]) дает в ряде важных случаев завышенное значение. Как показали наши исследования, при слабом перекрытии акустической и оптической волноводных мод необходимо учитывать рассеяние света на акустических волнах, расходящихся в результате дифракции или рефракции, т.е. на континууме вытекающих мод.

Наиболее наглядно необходимость учета расходящихся акустических волн можно продемонстрировать на примере волокна, в котором либо показатель преломления сердцевины меньше показателя преломления оболочки, либо легирующая добавка подбирается таким образом, чтобы акустические показатели преломления сердцевины и оболочки были одинаковы. В этом случае акустические волноводные моды не существуют, что, казалось бы, должно вести к неограниченному росту порога ВРМБ, поскольку коэффициент ВРМБ-усиления должен падать до нуля. Этот вывод, однако, противоречит экспериментальным результатам работы [5], в которой показано, что порог ВРМБ в волокнах с сердцевиной из чистого кварца лишь незначительно отличается от порога ВРМБ в стандартном волокне. Нами показано, что учет рассеяния на континууме вытекающих мод позволяет объяснить низкий порог ВРМБ в волокнах с сердцевиной из чистого кварца.

Проведенный расчет структуры возбуждаемых акустических волн и величины коэффициента ВРМБ-усиления для волокон со ступенчатыми профилями показателя преломления показал, что для телекоммуникационных волокон с диаметром сердцевины  $\sim 9$  мкм и типичным временем жизни акустической волны  $T_B = 10$  нс порог ВРМБ меняется не более чем на 10% при изменении относительной разности акустических показателей преломления сердцевины и оболочки от +0.65 до –0.65.

Полученный результат связан с тем, что дифракционная длина акустической волны  $L_{dac} = k_{ac} r_0^2$  ( $k_{ac} = 2\pi/\lambda_{ac}$  – волновой вектор акустической волны,  $r_0$  – радиус акустического пучка) в волокнах со стандартным для телекоммуникационных волокон профилем показателя прелом-

О.Е.Наний, Е.Г.Павлова. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы; e-mail: nanii10@rambler.ru

ления оказывается больше длины затухания  $L_B = (V_{ac} \times T_B) \approx 60$  мкм ( $V_{ac}$  – скорость распространения акустической моды). При  $L_{d_{ac}} > L_B$  пространственная структура акустического пучка определяется структурой возбуждающего оптического пучка. Поэтому порог ВРМБ слабо зависит от акустических волноводных свойств волокна.

Для снижения порога ВРМБ акустические свойства волокна должны быть такими, чтобы структура акустического пучка разрушалась из-за рефракции на длине рефракции  $L_{гac} < L_B$ . Все волокна, в которых удалось значительно (на 6–10 дБ) увеличить порог ВРМБ [1–4], обладают этим свойством.

Наши расчеты показывают, что наиболее высокий порог ВРМБ достижим в волокнах, акустический профиль показателя преломления которых имеет вид, представленный на рис.1. При этом оптический профиль показателя преломления имеет стандартную ступенчатую форму. Обеспечить сочетание таких акустического и оптического профилей показателя преломления можно сочетанием легирующих примесей  $GeO_2$  и  $Al_2O_3$ .

Таким образом, широко используемая на практике методика расчета порога ВРМБ, предложенная в [3, 4], дает правильные результаты только для волокон с хорошими волноводными свойствами для акустической волны. В важнейших для практики случаях, когда оптические волокна обладают «антиволноводными» свойствами для акустических волн, эта методика дает ошибочные результаты, поскольку основной вклад в ВРМБ-усиление при этом дают расходящиеся акустические волны. В та-

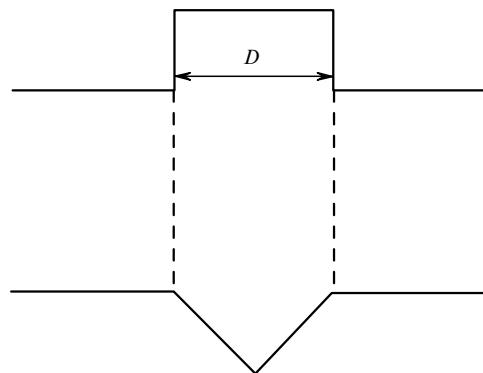


Рис.1. Оптический (вверху) и акустический (внизу) профили показателя преломления телекоммуникационного волокна с высоким порогом ВРМБ.

ких волокнах необходим численный расчет пространственной структуры возбуждаемой акустической волны и коэффициента рассеяния на ней волны накачки. Принципиально важно при конструировании оптических волокон с высоким порогом ВРМБ обеспечить быстрое разрушение волнового фронта акустической волны за счет рефракции.

1. Gray S. et. al. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 37 (2009).
2. Акопов С.Г. *Lightwave* (Rus. Ed.), № 1, 20 (2006).
3. Kobayakov A. et al. *Opt. Express*, **13**, 5338 (2005).
4. Li M.-J. et al. *OFC'2006*, paper OTuA4 (2006).
5. Zou W. et. al. *OFC'2008*, paper OMN1 (2008).