

06;07
©1994

ПОРОГОВЫЙ ИНКРЕМЕНТ ВКР УСИЛЕНИЯ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

В.В.Спирин, Л.О.Смирнов

Определение пороговой мощности накачки, достаточной для возникновения интенсивного стоксового излучения при попутном ВКР в оптических волокнах, необходимо как для проектирования волоконных ВКР усилителей и лазеров [1], так и для нахождения предельной мощности сигнального излучения используемого в волоконно-оптических датчиках или передаваемого по ВОЛС [2].

Для определения пороговой мощности накачки P_{crit} в литературе используется оценка порогового инкремента усиления G_{th} , впервые полученная в [3]:

$$G_{th} = gP_{crit}/s\alpha_P = 16, \quad (1)$$

где: s — эффективная площадь сердцевины волокна, α_P — затухание накачки, g — коэффициент ВКР усиления. Соотношение (1) получено в предположении постоянной накачки, одинаковых для накачки и стоксовой волны значительных потерь, определяющих длину взаимодействия накачки и стоксовой компоненты и для конкретных значений параметров кварцевого волокна [3]. Соотношение (1) получено также без учета дисперсии групповых скоростей.

В предлагаемой работе проведена оценка ошибок определения порогового инкремента, возникающих при использовании оценки (1), из критерия которого получена оценка (1), описанного в [3], и модели, учитывающей истощение накачки при изменении параметров кварцевых и капиллярных волокон. В работе проведено сравнение экспериментально измеренного порогового инкремента ВКР в кварцевом волокне в условиях согласования групповых скоростей накачки и стоксовой компоненты, что позволяет в первом приближении пренебречь дисперсией групповых скоростей с пороговыми инкрементами, вычисленными на основании различных критериев.

Оценка (1) получена в [3] на основании анализа решения трансцендентного уравнения для P_{crit} , которое в случае произвольных потерь в оптическом волокне может быть преобразовано к виду

$$Q_{exp}(-\alpha_P l + gP_{crit} l_f / s) = P_{crit} \exp(-\alpha_P l), \quad (2)$$

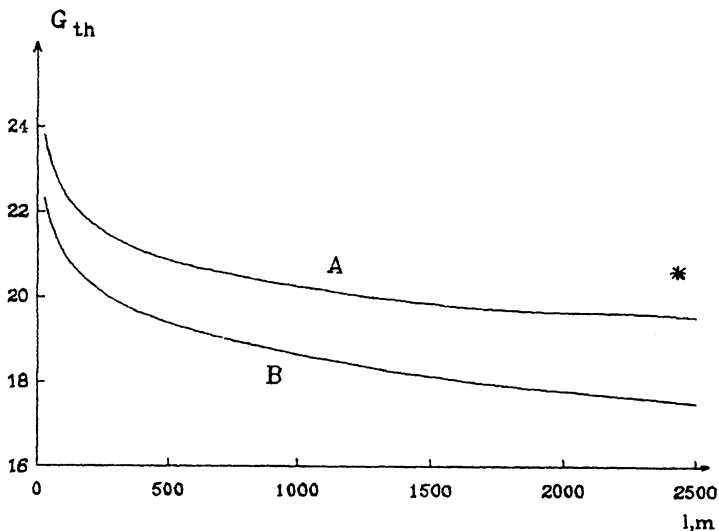


Рис. 1. Зависимость порогового инкремента усиления в кварцевом волокне от длины волокна.

А — модель, учитывающая, истощение накачки; В — модель, не учитывающая истощение накачки; звездочка — экспериментальные данные.

где $Q = h\nu_s \sqrt{\pi} \Delta\nu / 2 \sqrt{g P_{\text{crit}} l_f / s}$ — приведенный ко входу волокна шум спонтанного рассеяния накачки, $\Delta\nu$ — спектральная ширина линии ВКР усиления, $l_f = (1 - \exp(-\alpha_P l)) / \alpha_P$ — эффективная длина волокна, l — физическая длина волокна.

На рис. 1 представлена зависимость величины порогового инкремента усиления $G_{\text{th}} = g P_{\text{crit}} l_f / s$ от длины волокна, полученная на основании решения уравнения (2). Расчеты проводились при следующих значениях параметров: $g = 0.37 \cdot 10^{-13}$ м/Вт [6], $s = 46 \cdot 10^{-12}$ м², $\Delta\nu = 240$ см⁻¹, $\lambda_s = 1.418$ мкм (длина волны стоксовой компоненты), $\alpha_P = 0.5$ дБ/км.

Из данных, представленных на рис. 1, следует, что при изменении длины волокна почти на порядок значение G_{th} изменяется в пределах $\pm 10\%$ от среднего значения, равного 20. На этом же рисунке представлены результаты расчета инкремента усиления G_{th} для модели, учитывающей истощение накачки и произвольное соотношение затухания накачки и стоксовой волны. Этот расчет проводился на основе решения системы уравнений, описывающих процесс попутного стационарного ВКР [4]:

$$\begin{aligned} dP_P/dz + \alpha_P P_P &= -(g/s) P_P (P_s + Q); \\ dP_s/dz + \alpha_s P_s &= (g/s) (\lambda_P / \lambda_s) P_P (P_s + Q), \end{aligned} \quad (3)$$

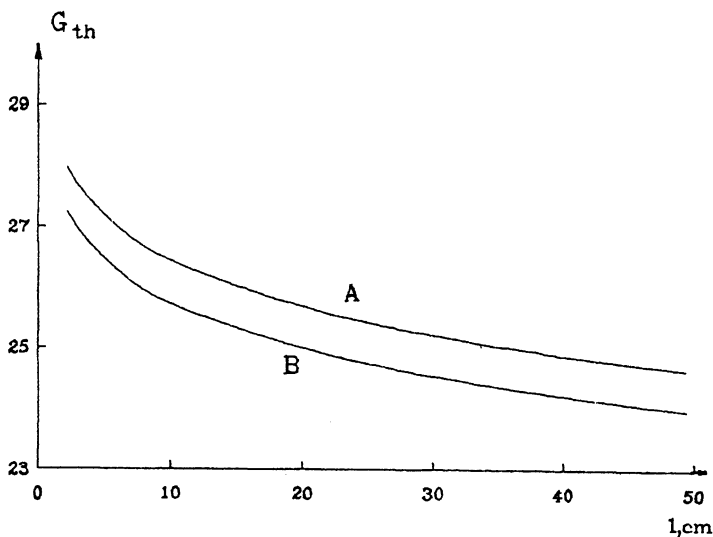


Рис. 2. Зависимость порогового инкремента усиления в капиллярном волокне от длины волокна.

A — модель, учитывающая истощение накачки; B — модель, не учитывающая истощение накачки.

где P_p , P_s — мощности накачки и стоксовой компоненты; λ_p , λ_s — длины волн накачки и стоксовой компоненты. α_p , α_s — затухание накачки и стоксовой компоненты. Приведенная система уравнений не учитывает дисперсии групповых скоростей импульсов накачки и Стокса, а также пространственного распределения света по сечению волокна.

Спонтанное рассеяние учитывается членом Q аналогично (2). Расчеты проводились при тех же значениях параметров g , s , $\Delta\nu$, λ_s , α_p , что и в предыдущем случае. Кроме того, $\lambda_p = 1.32$ мкм, $\alpha_s = 1.5$ дБ/км. В качестве пороговой мощности накачки P_{crit} здесь, как и в (2), принималось такое значение мощности накачки на входе волокна, что мощность накачки на выходе волокна равнялась мощности стоксовой компоненты. Характер зависимости G_{th} (1) близок к характеру зависимости, полученной на основании (2), однако значения G_{th} , вычисленные на основании критерия, учитывающего истощение накачки в среднем на 10–15%, больше во всем диапазоне изменения длины.

На рис. 2 представлены результаты расчета G_{th} для капиллярных волокон, заполненных CCl_4 . Расчеты проводились при следующих значениях параметров одномодового капиллярного волокна: $g = 5.6 \cdot 10^{-11}$ м/вт, $s = 46 \cdot 10^{-12}$ м², $\Delta\nu = 2$ см⁻¹, $\lambda_p = 0.532$ мкм, $\lambda_s = 0.545$ мкм, $\alpha_p = \alpha_s = 0.1$ м⁻¹.

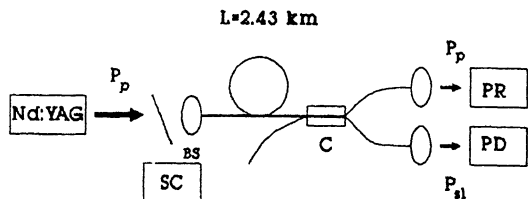


Рис. 3. Схема экспериментальной установки.

Одномодовость капиллярного волокна при $s = 46 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ может быть достигнута изменением температуры сердцевины волокна [5]. Из данных, представленных на рис. 2, следует, что изменение ширины линии усиления и коэффициента усиления на 2 порядка по сравнению с кварцевыми волокнами приводит к увеличению G_{th} на 20–25%.

Схема установки для экспериментального определения порогового инкремента ВКР усиления в кварцевом оптическом волокне представлена на рис. 3. Для накачки использовался непрерывный Nd:YAG лазер с активной синхронизацией мод, средней мощностью 1.5 Вт. Лазер обеспечивал генерацию непрерывной последовательности импульсов длительностью 200 пс с периодом следования 6 нс в диапазоне 1.32 мкм. Параметры волокна были подобраны таким образом, что групповые скорости накачки ($\lambda_p = 1.32 \text{ мкм}$) и первой стоксовой компоненты ($\lambda_s = 1.418 \text{ мкм}$) были равны, что предопределяло возможность использования для оценок порога моделей, не учитывающих дисперсию групповых скоростей. В эксперименте использовалось одномодовое, не сохраняющее поляризацию $\text{SiO}_2 + \text{GeO}_2$ волокно длиной 2.43 км. Регистрация стоксового излучения осуществлялась фотодиодом PD после спектрального разделения накачки и стоксового излучения спектрально зависимым ветвителем C , а регистрация средней мощности накачки измерителем мощности PR . Длительность импульсов накачки определялась с помощью скоростной электро-оптической камеры "Агат" (SC) и равнялась в эксперименте 200 пс. Средняя мощность накачки, соответствовавшая достижению порога ВКР, равнялась 400 мВт, что эквивалентно 12 Вт пиковой мощности. При этом экспериментальное значение порогового инкремента $G_{th} = 20.6$ (рис. 1).

Таким образом, значение порогового инкремента усиления и в случае использования критерия, описанного в [3] и при использовании модели, учитывающей истощение накачки (3), значительно отличается от принятого в литературе значения $G_{th} = 16$ и зависит от конкретных параметров волокна. Для кварцевых волокон, одномодовых в области 1.32 мкм с затуханием 0.5 Дб/км, значение G_{th} при использо-

вании критерия, учитывающего истощение накачки, изменяется в пределах $G_{th} = 23-20$ при изменении длины волокна в пределах 30–2500 метров. Для капиллярных, одномодовых, заполненных $SiCl_4$ волокон G_{th} изменяется в пределах 28–25 при изменении длины от 0.01 до 0.5 метров. Экспериментально измеренное значение порогового инкремента усиления G_{th} для кварцевого волокна длиной 2.43 км, одномодового в области 1.32 мкм, равняется 20.6 и хорошо совпадает с расчетным значением $G_{th} = 20$, полученным на основании модели, учитывающей истощение накачки. Значения G_{th} при использовании критерия, описанного в [3], не учитывающего истощение накачки, примерно на 10–15% меньше.

Список литературы

- [1] *Stolen R.H.* // *Fiber and Integrated Optics*. 1980. V. 3. P. 21–25.
- [2] *Stolen R.H.* // *Proceedings IEEE*. 1980. V. 68. N 10. P. 1232–1236.
- [3] *Smith R.G.* // *Applied Optics*. 1972. V. 11. N 11. P. 2489–2494.
- [4] *Yijiang Chen, Snyder A.W.* // *El. Lett.* 1988. V. 24. N 23. P. 1450–1452.
- [5] *Петров М.П., Кузин Е.А., Максютенко М.А., Спиринов В.В.* // *Квантовая электроника*. 1990. Т. 13. В. 9. С. 1199–1202.
- [6] *Greer E.J., Hickmann J.M., Taylor J.R.* // *El. Lett.* 1991. V. 27. N 13. P. 1171–1172.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
16 июня 1994 г.