

## ОПТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 535:631.373.8

## ОПТИМАЛЬНАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ ОБЛАСТЬ РАБОТЫ ВОЛС С ОДНО- И ДВУХКАСКАДНЫМ РАМАНОВСКИМ УСИЛИТЕЛЕМ

Н. А. Казанцева, О. Е. Наний

(кафедра оптики и спектроскопии)

Теоретически рассчитаны зависимости максимального коэффициента усиления монохроматического сигнала в одно- и двухкаскадном рамановских усилителях при оптимальных спектрах накачки. Показано, что максимум усиления в двухкаскадном рамановском усилителе сдвинут в инфракрасную область относительно минимума поглощения оптического волокна и относительно максимума усиления в однокаскадном рамановском усилителе. Дано качественное объяснение особенностям полученной спектральной зависимости коэффициента усиления.

Распределенный рамановский усилитель — это усилитель, в котором излучение накачки распространяется в волоконно-оптической линии связи, обеспечивая усиление сигнала в нем, т. е. телекоммуникационное волокно используется в качестве среды рамановского усиления. При использовании рамановского усилителя в оптической линии связи уменьшается значение шум-фактора и ослабляются нелинейные эффекты по сравнению с обычными дискретными усилителями (например, эрбиевыми). Это позволяет использовать более длинные участки волокна между усилителями и более высокие скорости передачи [1].

В двухкаскадном рамановском усилителе под действием первой накачки происходит усиление второй накачки, которая уже непосредственно усиливает передаваемый сигнал. В работе [2] показано, что при одном и том же усилении сигнала в двухкаскадном рамановском усилителе мощность шумов на 1.5 дБ меньше, чем в однокаскадном.

Оптимальная длина волны оптического сигнала в линии связи с дискретными усилителями, обеспечивающая максимально допустимое расстояние между усилителями при заданном уровне шумов, очевидно, совпадает с минимумом затухания оптического волокна. Оптимальная длина волны оптического сигнала в линии связи с распределенными рамановскими усилителями в общем случае не совпадает с минимумом затухания сигнальной волны, так как коэффициент усиления рамановского усилителя зависит от затухания накачки.

В настоящей работе численно исследованы зависимости от длины волны сигнала коэффициента усиления одно- и двухкаскадного рамановских усилителей при оптимальных длинах волн излучения накачки. В численных расчетах использовалась модель рамановского усилителя, основанная на уравнениях связанных волн [3].

Для каждой длины волны сигнала из диапазона 1.35–1.8 мкм исследовалась зависимость коэффициента усиления однокаскадного рамановского усилителя

от длины волны накачки. Накачку с длиной волны, обеспечивающей максимальное усиление, будем называть оптимальной накачкой, а соответствующий коэффициент усиления — коэффициентом усиления при оптимальной накачке.

В двухкаскадном усилителе для каждой длины волны сигнала проводилась оптимизация длин волн двух каскадов накачки. Оптимизация заключается в нахождении пары длин волн, соответствующих излучению первого и второго каскада накачки, при которых коэффициент усиления сигнала максимален. Пару накачек, обеспечивающую максимальный коэффициент усиления в двухкаскадном рамановском усилителе, будем называть оптимальной накачкой. Зависимости нормированных коэффициентов усиления сигнала  $G_N/G_{\max}$  (максимумы кривых равны единице) однокаскадного и двухкаскадного усилителей при оптимальных накачках от длины волны сигнала приведены на рис. 1.

На рис. 1 видно, что область оптимального усиления в двухкаскадном усилителе сдвигается в сторону длинных волн относительно оптимального диапазона однокаскадного усилителя, который в свою

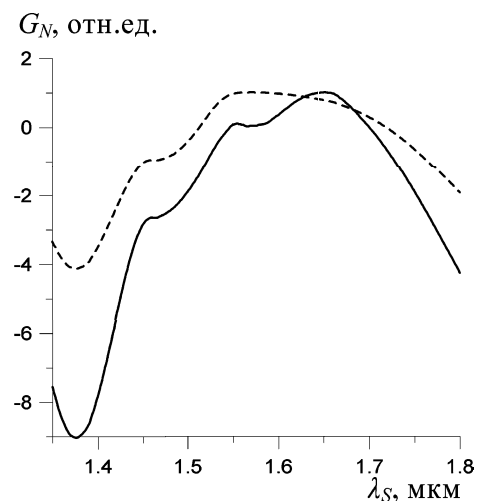


Рис. 1. Зависимость оптимального коэффициента усиления от длины волны сигнала в однокаскадном (пунктир) и двухкаскадном (сплошная кривая) рамановских усилителях

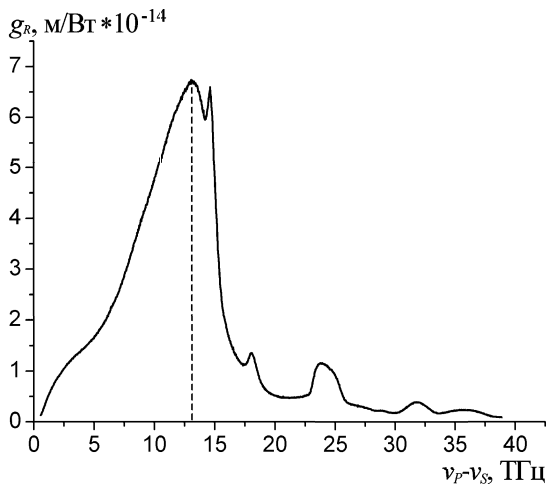


Рис. 2. Зависимость коэффициента рамановского рассеяния от сдвига частоты сигнала относительно накачки  $v_P - v_S$

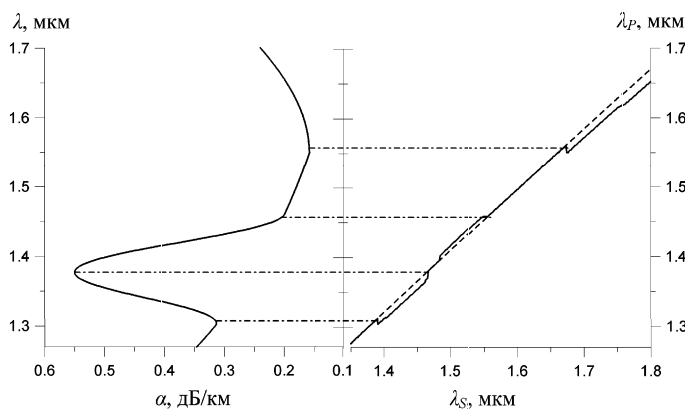


Рис. 3. Слева — спектр поглощения, справа — зависимость оптимальной длины волны накачки (сплошная кривая) и длины волны, сдвинутой относительно длины волны сигнала на 13 ТГц (пунктир), от длины волны усиливаемого сигнала в однокаскадном усилителе

очередь сдвигнут относительно минимума затухания. Проследим, в чем причина этого эффекта. Максимальный коэффициент рамановского рассеяния  $g_R$  приходится на сигнал, сдвинутый на 13 ТГц относительно накачки (рис. 2). Однако, как оказалось, максимальное усиление рамановского усилителя не обязательно приходится на пик коэффициента  $g_R$ . Причина этого состоит в форме спектра коэффициента поглощения  $\alpha$  (рис. 3 слева). Максимальный коэффициент усиления сдвигается от пика коэффициента  $g_R$  вправо или влево в зависимости от значения поглощения в этой точке. Приведем график зависимости оптимальной длины волны накачки  $\lambda$  от длины волны сигнала  $\lambda_S$  и сравним с зависимостью для длин волн, сдвинутых относительно сигнала на 13 ТГц (рис. 3 справа).

Первое отклонение кривой оптимальной накачки от прямой линии в сторону коротких волн наблюдается на длине волны накачки 1.3 мкм, что соответствует точке основания пика гидроксильного поглощения (1.3–1.45 мкм) с левой стороны, следующая особая точка — 1.38 мкм — это максимум гидроксильного поглощения. На длине волны накачки 1.46 мкм начинается сдвиг в сторону длинных волн — это точка основания пика поглощения

гидроксильной группой с правой стороны. В точке 1.55 мкм находится минимум поглощения и длина волны накачки отклоняется в сторону коротких волн.

Таким образом, мы проследили, как находится максимально возможный пик усиления в зависимости от спектра затухания и коэффициента  $g_R$ . Также с помощью спектра поглощения можно объяснить на рис. 2 провал на кривой для однокаскадного усилителя области 1.46–1.48 мкм — в этом диапазоне накачка попадает на пик гидроксильного поглощения. Аналогично на кривой для двухкаскадного усилителя: провал в области 1.46–1.49 мкм объясняется попаданием на пик второй накачки, провал на 1.55–1.6 мкм — попаданием первой накачки на этот пик.

Для получения результата, наиболее приближенного к действительности, в работе учитывались и другие аспекты, вследствие которых сигнал в рамановском усилителе с различными накачками будет распространяться по-разному. Таковой является, например, зависимость эффективной площади сечения от длины волны, которая была найдена по формуле  $A_{\text{eff}} = \pi w^2$ , где  $w$  — среднее арифметическое радиусов модового пятна  $w_1$  и  $w_2$ , рассчитанных из приближения Маркуса [4]  $\frac{w_1}{a} = 0.65 + 1.69V^{-3/2} + 2.879V^{-6}$  и приближения Снайдер-Саммута [5]  $\frac{w_2}{a} = (\ln(V))^{1/2}$  соответственно. Параметр  $V$  связан с длиной волны  $\lambda$  следующим образом:  $V = \frac{1}{\lambda} 2\pi a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ , где  $a$  — радиус сердцевины волокна,  $n_1$  и  $n_2$  — коэффициенты преломления сердцевины и оболочки соответственно.

Еще одним параметром из модели рамановского усилителя, зависящим от длины волны, является коэффициент рамановского рассеяния. Он обратно пропорционален длине волны накачки:  $g_R \sim 1/\lambda_P$ .

Таким образом, показано, что максимальное усиление при оптимальной накачке в однокаскадном рамановском усилителе достигается на длинах волн сигнала 1.55–1.6 мкм, в двухкаскадном усилителе эта область сдвигается в сторону длинных волн: 1.6–1.65 мкм. Длина волны оптимальной накачки для данного сигнала зависит как от спектра коэффициента комбинационного рассеяния, так и от спектра затухания света в волокне.

### Литература

1. Islam M.N. // IEEE J. of Selected Topics in Quantum Electronics. 2002. 8, N 3. P. 548.
2. Papernyi S.B., Karpov V.I., Clements W.R.L. // Postdeadline Papers. OFC'2002. Anaheim. USA. 17–22 March 2002. FB4-1-3.
3. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М., 1996.
4. Marcuse D. // Bell Syst. Techn. J. 1977. 56, N 5. May–June. P. 703.
5. Snyder A.W., Sammut R.A. // J. Opt. Soc. Am. 1979. 12. P. 1663.

Поступила в редакцию  
22.06.04