

УДК 528.8.044.6

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ СРАВНЕНИЕ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ НАКАЧКИ В РАМАНОВСКОМ УСИЛИТЕЛЕ ДЛЯ ЛИДАРНЫХ ПРИМЕНЕНИЙ

В. И. Григорьевский

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН, 141190, Московская область, г. Фрязино, пл. академика Введенского, д.1

Статья поступила в редакцию 28 июля 2018 г.

Аннотация. В работе проведено исследование характеристик выходного излучения рамановского волоконного усилителя на длину волны 1650 нм при сравнении прямой и обратной накачки, осуществляемой на длине волны 1540 нм. Усилитель предназначен для лидарных измерений концентрации метана в атмосфере Земли. Использовался как модельный расчет выходной мощности на основе точных уравнений распространения накачки в волокне в прямом и обратном направлении, так и прямой эксперимент по сравнению обеих видов накачки мощностью 3.5 Вт в волокне длиной 1500 метров, который подтвердил преимущество обратной накачки для характеристик выходного сигнала, таких как мощность и спектральная чистота.

Ключевые слова: лидар, рамановский усилитель, лазер, накачка.

Abstract. In this work a study of the characteristics of the output radiation of a Raman fiber amplifier at a wavelength of 1650 nm when comparing direct and reverse pumping performed at a wavelength of 1540 nm was carried out. The amplifier is designed for lidar measurements of methane concentration in the Earth's atmosphere. A model calculation of the output power was used on the basis of exact equations for the propagation of pumping in the fiber in the forward and backward directions. Also we made a direct experiment comparing both pump types with a power of 3.5 W in a fiber with a length of 1500 m. The study showed the advantage of reverse pumping in Raman amplifiers in the wavelength range of ~ 1650 nm both in terms of output power, as well as in spectral purity of the output signal, which is

especially valuable for lidar applications. A qualitative explanation of this effect consists in a more efficient use of pumping: with small input signals, together with low pumping at the initial length of the active fiber and at high pumping, together with a large signal on a finite length of fiber. The filtration of the pumping residuals is also better in this case. When the pumping is propagated back with a small input signal, the noise characteristics of the output signal are better, the spectrum is cleaner, the filtration of the pumping remains is better. With large input signals, the difference in output power for both types of pumping decreases: if for small signals this difference is 2-3 times, then for large signals ~ 1.5 times. This is also understandable, since large input signals with direct pumping efficiently remove the inversion on the initial portion of the fiber, that is, the pumping is used more fully.

Keywords: lidar, Raman amplifier, laser, pumping.

1. Введение

При разработке лидаров для определения малых газовых составляющих в атмосферах планет применяются мощные лазерные передатчики на длинах волн, попадающих в линии поглощения исследуемых газов. Метан имеет линии поглощения в диапазоне длин волн ~ 1650 нм. Этот диапазон является второй гармоникой от основной линии поглощения метана в диапазоне ~ 3300 нм. И, хотя в диапазоне 1650 нм линии поглощения слабее, именно этот диапазон наиболее оптимален для определения концентрации метана, поскольку существует выбор инфракрасной техники, особенно фотоприемников (в том числе и лавинных), способных эффективно принимать и преобразовывать оптические сигналы. С мощными источниками излучения в этом диапазоне немного сложнее, поскольку оптические эрбиевые усилители могут эффективно усиливать излучение лишь в диапазоне до ~ 1600 нм. Для работы лидара, устанавливаемого, например, на борту самолета с высотой полета до 10 км, с целью эффективного поиска утечек газа из магистральных трубопроводов, требуемая мощность излучения составляет ватты при погрешности измерения концентрации газа на уровне 1%. В этом случае можно использовать

малогобаритную приемо-передающую оптику. Если же использовать лидар на борту низкоорбитального спутника, то требуемая непрерывная мощность излучения, как минимум, должна составлять около 30 Вт [1]. Получение большой мощности передатчика в диапазоне длин волн 1650 нм возможно с помощью рамановских усилителей, преобразующих эрбиевую накачку в требуемый диапазон длин волн, однако таких усилителей с мощностью более 2 Вт, с достаточной чистотой спектра выходного излучения пока нет, что подтверждает актуальность исследований в данной области.

Целью работы является оптимизация рамановского усилителя посредством, повышения выходной мощности, улучшения его спектрально-шумовых характеристик с помощью моделирования и сравнения прямой и обратной накачки в активном рамановском волокне.

2. Математическое моделирование процессов рамановского преобразования оптических сигналов

Исследовалась блок-схема одиночного рамановского преобразователя накачки в стоксову сигнальную волну, состоящего из источника накачки (1538 нм), оптического мультиплексора (MX) и демультиплексора (DMX) и отрезка активного волокна, рис.1. В качестве усиливаемого сигнала использовалось излучение DFB- лазера с линейно-частотной модуляцией.



Рис.1 - Схема одиночного рамановского преобразователя.

В случае обратной накачки мультиплексор и демультиплексор менялись местами, то есть накачка подавалась на демультиплексор, а сигнал (1650 нм) и остатки накачки снимались с мультиплексора. Основания для такого исследования заключаются в следующем. При прямой накачке малый входной

сигнал 1650 нм неэффективно использует большую начальную накачку, поскольку он не может полностью осуществить сброс инверсии населенных уровней молекул волокна из-за своей малости на начальной длине волокна. И, наоборот, в конце участка рамановского волокна, когда сигнал большой, а накачка уже истощена, наблюдается насыщение оптического усилителя. То есть, рамановское волокно на большом своем протяжении работает как бы “вхолостую”, не усиливая эффективно полезный сигнал. Этот вывод подтверждает и приведенные ниже теоретические расчеты.

Рассмотрим теоретические модели как прямой, так и обратной накачки рамановского усилителя. Исходные решаемые уравнения для прямой накачки в рамановском волокне записываются в следующем виде:

$$\frac{dI_s}{dz} = g_R I_P I_S - \alpha_S I_P \quad (1)$$

$$\frac{dI_P}{dz} = -\frac{\omega_P}{\omega_S} g_R I_P I_S - \alpha_P I_P \quad (2)$$

где I_s – интенсивность стоксовой волны в зависимости от точки наблюдения z , I_P – интенсивность накачки, g_R – коэффициент комбинационного (рамановского) усиления, α_S , α_P – коэффициенты затухания в волокне на частотах стоксовой ω_s и накачки ω_p . Считаем, что они с высокой точностью равны и обозначим их как α . В случае прямой накачки, как было показано в [2], решение системы (1) для рамановского преобразованного сигнала получают аналитически и записывается в следующем виде:

$$I_s(z) = \frac{(I_s^0 + \frac{\omega_S}{\omega_P} I_P^0) \exp(-\alpha z)}{1 + \frac{\omega_S I_P^0}{I_S^0} \exp \left[\frac{g_R}{\alpha} \left(\frac{\omega_P}{\omega_S} I_S^0 + I_P^0 \right) (\exp(-\alpha z) - 1) \right]} \quad (3)$$

где I_s^0 – интенсивность начальной волны (стоксова) рамановского сигнала, I_p^0 – интенсивность начальной накачки. В свою очередь, $I_s = I_s^0 / A_{ef}$, где A_{ef} – эффективная площадь сердцевины волокна. На рис. 2 приведены графики расчетов выходной мощности рамановского усилителя по формуле (3) на длине волны 1.65 мкм при прямой накачке 3.5 Вт, в зависимости от длины волокна. Различные кривые соответствуют различным значениям входной мощности излучения на длине волны 1.65 мкм.

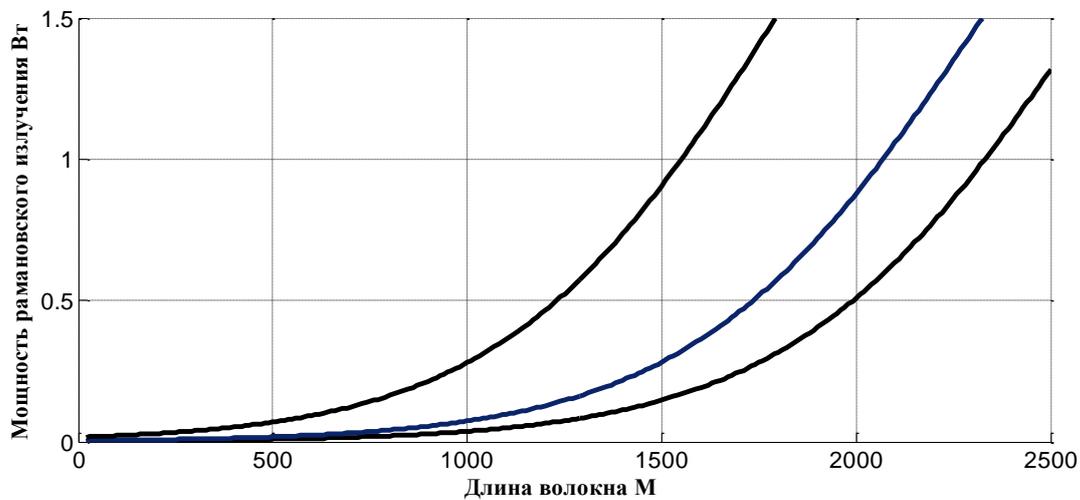


Рис.2 - Графики расчетов выходной мощности рамановского излучения на длине волны 1.65 мкм при прямой накачке 3.5 Вт. Входной сигнал для верхней кривой – 16 мВт, для средней кривой – 4 мВт, для нижней кривой – 2 мВт.

Приведем значения теоретических вычислений мощности рамановского излучения для случая прямой накачки по формуле (3). При длине волокна 1500 метров и входных сигналов 2 мВт, 4 мВт, и 16 мВт, выходные сигналы равны соответственно: 150 мВт, 300 мВт, 870 мВт.

Для обратной накачки уравнения (1) и (2) переписываются следующим образом:

$$-\frac{dI_s}{dz} = g_R I_P I_S - \alpha_S I_P \quad (3)$$

$$\frac{dI_P}{dz} = -\frac{\omega_P}{\omega_S} g_R I_P I_S - \alpha_P I_P \quad (4)$$

Видно, что они отличаются только знаком минус перед членом dI_s/dz , поскольку сигнал распространяется навстречу накачке, однако решение данной системы в аналитическом виде выглядит совсем по-другому, чем для системы (1,2), а именно [3]:

$$I_s = b_0(1 - b_0)I_p^0 \exp(-\alpha z) / (G(z) - b_0) \quad (5)$$

$$I_p = (1 - b_0)G(z)I_p^0 \exp(-\alpha z) / (G(z) - b_0) \quad (6)$$

где

$$G(z) = \exp\left\{(1 - b_0) \frac{g_0}{\alpha} [1 - \exp(-\alpha z)]\right\} \quad (7)$$

$$b_0 = I_s^0 / I_p^0, \quad g_0 = g_R I_p^0$$

Здесь b_0 – параметр эффективности рамановского взаимодействия, g_0 – коэффициент усиления сигнала. Обозначения в вышеприведенных уравнениях те же, что и в системе (1,2). Решение системы (3,4), полученные графически с помощью программы MScad для длины волокна 1500 метров, входных сигналов 2 мВт, 4 мВт и 16 мВт, входной накачке 3.5 Вт, дает численные значения соответственно 735 мВт, 983 мВт, 1557 мВт. Ход решения для нахождения выходного сигнала I_s^0 выглядел следующим образом. Вначале в уравнение (3) вместо z подставлялась длина волокна $L=1500$ метров и обе части данного уравнения делились на I_p^0 . В левой части полученного уравнения находится величина I_s^L/I_p^0 – известная из начальных условий. Правая функция уравнения зависит от $b_0 = I_s^0 / I_p^0$ – искомой величины. Графически находилась точка пересечения для функций левой и правой частей уравнения, и абсцисса этой точки пересечения давала значение b_0 . Далее определялась I_s^0 при известном $I_p^0=3.5$ Вт. Из расчетов видно, что выходные мощности рамановского сигнала при обратной накачке существенно выше, чем для прямой накачки. Примерно аналогичные пропорции выходной мощности для прямой и обратной накачки получаются для значений накачки ~ 5 Вт, а также для длины рамановского волокна ~ 3000 метров как с накачкой 3.5 Вт, так и с

накачкой 5 Вт. Сводная таблица теоретических оценок для прямой и обратной накачек при $L=1500$ метров и величине накачки 3500 мВт представлены в таблице 1.

Таблица 1 – результаты теоретических вычислений стоксова сигнала при прямой и обратной накачке при длине волокна 1500 метров и накачке 3.5 Вт

Входной сигнал	Прямая накачка	Обратная накачка
2 мВт	150 мВт	735 мВт
4 мВт	300 мВт	983 мВт
16 мВт	870 мВт	1557 мВт

3. Экспериментальные результаты и их сравнение с теоретическими вычислениями

Полученные теоретические расчеты проверялись экспериментально при длине рамановского волокна 1500 метров и начальной накачке 3.5 Вт. Результаты этой проверки даны ниже в таблице 2.

Таблица 2 - результаты экспериментальных измерений стоксова сигнала при прямой и обратной накачке при длине волокна 1500 метров и величине накачки 3.5 Вт

Входной сигнал	Прямая накачка	Обратная накачка
2 мВт	220 мВт	440 мВт
4 мВт	520 мВт	1450 мВт
16 мВт	1200 мВт	1650 мВт

Погрешность экспериментальных данных составляла +/- 10%. Из таблиц видно, что теоретические данные подтвердили правильность положения о большей эффективности обратной накачки по сравнению с прямой. Экспериментальные данные для обоих видов накачки оказались заметно выше теоретических расчетов. Это связано с тем, что вклад в суммарную выходную мощность вносит и остаточная спонтанная эмиссия, обладающая большой величиной на крыльях спектра выходного сигнала. Для случая обратной

накачки расхождение в теоретических и экспериментальных данных при низких уровнях входного сигнала особенно сильное: 440 мВт вместо 735 мВт. Данное расхождение при низких уровнях входного сигнала объясняется меньшим уровнем остаточной спонтанной эмиссии на выходе усилителя и повышенной чистотой спектра, по-видимому из-за конкретных конструктивных особенностей усилителя и применяемых в нем компонент, имеющих разбросы в характеристиках в случае работы в прямом и обратном направлениях. То есть, несмотря на полученные меньшие выходные мощности при обратной накачке при малом входном сигнале, шумовые характеристики выходного сигнала лучше, спектр чище, лучшая фильтрация остатков накачки. При больших входных сигналах разница в выходной мощности при обоих видах накачки уменьшается: если при малых сигналах эта разница 2-3 раза, то при больших сигналах ~ 1.5 раза. Это также объяснимо, поскольку большие входные сигналы при прямой накачке эффективнее снимают инверсию на начальном участке волокна, то есть накачка используется более полно.

4. Заключение

Таким образом, проведенное исследование показало преимущество обратной накачки в рамановских усилителях в диапазоне длин волн ~ 1650 нм как по показателям выходной мощности, так по спектральной чистоте выходного сигнала, что особенно ценно для лидарных применений. Качественное объяснение этого эффекта заключается в более эффективном использовании накачки при малых входных сигналах совместно с малой накачкой на начальной длине активного волокна и при большой накачке совместно с большим сигналом на конечном отрезке волокна.

Литература

1. G. A. Akimova, V. I. Grigor'yevskii, V. V. Mataibaev, V. P. Sadovnikov, Yu. P. Strykh, Ya. A. Tezadov, A. V. Fedenev, and V. V. Khabarov. Enhancement of the Energy Potential of a Lidar for Methane Detection with the Use of a quasi

Continuous Radiation Source. *Journal of communication technology and electronics*, 2015, Vol. 60, No.10, pp. 1058-1061. DOI: 10.7868/S0033849415100022.

2. VI Grigor'evskii, YA Tezadov, AV Elbakidze. Modeling and research of a powerful fiber-optic transmitter for lidar applications. *Journal of Russian Laser Research*, 2017, Vol.38, No. 4, pp. 344-348. DOI: 10.1007 s/10946-017-9651-7.

3. Агравал Г. Нелинейная волоконная оптика. М., Мир, 1996, 323 с.

Для цитирования:

В. И. Григорьевский. Математическое моделирование и экспериментальное сравнение прямой и обратной накачки в рамановском усилителе для лидарных применений. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2018. №8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug18/12/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2018.8.12