

Повышение выходной мощности излучения с длиной волны около 1650 нм методом двухполяризационного рамановского усиления

В.И.Григорьевский, Я.А.Тезадов

Проведено сравнение нелинейных искажений выходного излучения рамановского усилителя при усилении излучений с одной и с двумя ортогональными поляризациями (одно- и двухполяризационном усилении) в протяженном оптическом волокне. При выходной мощности 3.5 Вт на длине волны 1650 нм нелинейные искажения для двухполяризационного усиления меньше, что обеспечивает более узкий спектр выходного излучения. Это позволяет более точно измерять, например, концентрацию метана дистанционным лидарным методом. Для режима двухполяризационного усиления на указанной длине волны получена несколько большая мощность неискаженного сигнала (~4 Вт) без ухудшения спектральных свойств выходного излучения.

Ключевые слова: лидар, рамановский усилитель, поляризация, накачка, метан.

1. Введение

В лидарных технологиях для определения содержания метана в атмосферах Земли и планет с летательных аппаратов требуются лазерные источники мощностью более 1–3 Вт в диапазоне длин волн линий поглощения метана 1640–1660 нм с узким спектром излучения, ширина которого меньше ширины линии поглощения метана, равной ~0.1 нм. В случае применения лидаров на космических аппаратах для глобального мониторинга содержания метана необходима мощность в максимуме излучаемого импульса, превышающая 20–30 Вт [1]. В настоящее время такие мощные коммерческие источники излучения не существуют. Указанный диапазон длин волн привлекателен не только для лидарных технологий, но также широко используется в медицине, средствах связи, научных исследованиях [2–5]. Данные приборы с высокой чистотой спектра излучения могут заполнить дефицит мощных лазерных источников, диапазон длин волн которых находится между диапазонами длин волн, характерных для волоконных усилителей на основе эрбия и для современных усилителей и лазеров на основе тулия [6].

Целью настоящей работы является исследование возможности повышения выходной мощности рамановского усилителя без ухудшения спектральных характеристик его выходного излучения за счет усиления двух входных сигналов с ортогональными поляризациями (двухполяризационного усиления) и их последующего суммирования.

2. Моделирование и теоретические оценки

Выходная мощность рамановских усилителей и преобразователей рассматриваемого диапазона длин волн

В.И.Григорьевский, Я.А.Тезадов Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН, Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, пл. Акад. Введенского, 1; e-mail: vig248@rambler.ru

зависит, в том числе, от поляризационных явлений в протяженном активном волокне усилителя. В работе [7] дана оценка поляризационных эффектов в таком усилителе. Для учета деполяризации сигнала и накачки вводился коэффициент деполяризации k_{pol} , зависящий от поляризаций сигнала и накачки. Коэффициент k_{pol} равен 1 при совпадающих поляризациях, 0.5 для деполяризованной накачки и нулю при взаимно ортогональных поляризациях сигнала и накачки. Общая усилительная способность рамановского волокна $g_{Rtot} = g_R k_{pol}$, где g_R – усилительная способность при совпадающих поляризациях сигнала и накачки. Нами было проведено сравнительное теоретическое моделирование двухполяризационного усиления и усиления излучения с одной поляризацией (однополяризационного усиления) в рамановском усилителе.

Мощность на выходе рамановского усилителя определялась из решения уравнения для нелинейного взаимодействия сигнала и накачки [8]:

$$P_S(z) = \left(P_{S0} + \frac{\omega_S}{\omega_p} P_{p0} \right) \exp(-\alpha z) \left\{ 1 + \frac{\omega_S P_{p0}}{P_{S0}} \times \exp \left\{ \frac{g_R k_{pol}}{\alpha} \left(\frac{\omega_p}{\omega_S} I_{S0} + I_{p0} \right) [\exp(-\alpha z) - 1] \right\} \right\}^{-1}. \quad (1)$$

Здесь P_S – мощность стоксовой компоненты сигнала, зависящая от координаты z ; ω_S и ω_p – частоты сигнала и накачки; α – коэффициент затухания оптического сигнала в волокне; P_{S0} , P_{p0} и I_{S0} , I_{p0} – соответственно мощности и интенсивности сигнала и накачки в начале волокна, при $z = 0$. Мощность стоксова сигнала на выходе волоконного усилителя P_{SL} определяется выражением $P_{SL} = I_{SL} A_{eff}$, где A_{eff} – эффективная площадь сердцевины волокна, а L – длина волокна. Результаты расчета по формуле (1) выходной мощности P_{SL} в зависимости от входной мощности для различных коэффициентов k_{pol} приведены на рис.1.

При вычислениях использовались следующие значения параметров: $\alpha \approx 0.22$ дБ/км (или 5.2×10^{-5} м⁻¹ для длины волны 1.55 мкм в области малых потерь светово-

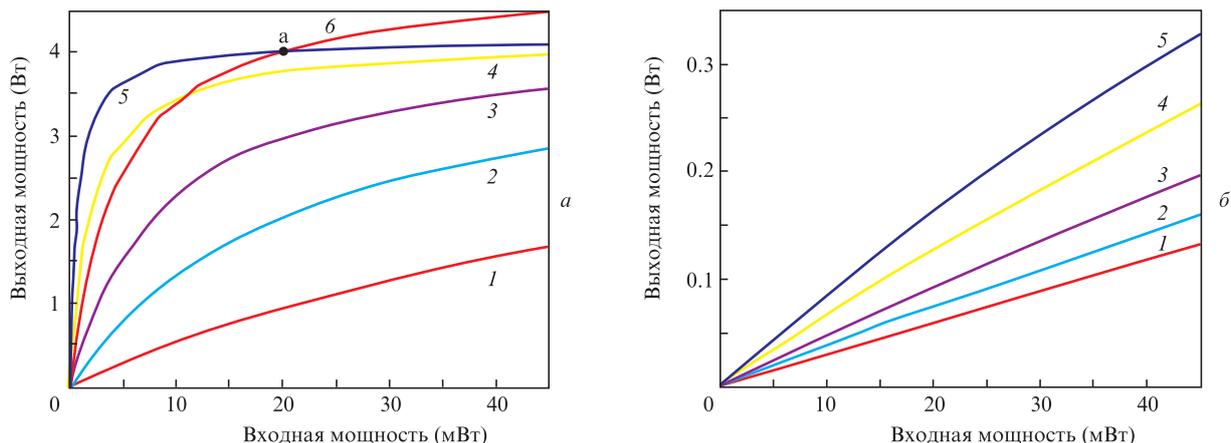


Рис.1. Зависимости мощности рамановского излучения на выходе протяженного волокна длиной 800 метров от входной мощности при $k_{\text{pol}} = 0.21$ (1), 0.27 (2), 0.32 (3), 0.39 (4), 0.45 (5) и 0.56 (6). На рис.1,а для кривых 1–5 общая мощность накачки 4.3 Вт (однополяризационное усиление), для кривой 6 – 5 Вт (двухполяризационное усиление), а на рис.1,б мощность накачки 1 Вт (однополяризационное усиление).

да), $P_{\text{p0}} = 4.3$ и 1 Вт (выбранные мощности накачки равны величинам, использованным в эксперименте), коэффициент рамановского преобразования для кварцевого волокна без учета деполяризации $g_{\text{R}} = 0.7 \times 10^{-13}$ м/Вт. Зависимости выходной мощности от входной при малой мощности накачки, приведенные на рис.1,б, почти линейны. В то же время из рис.1,а видно, что чем ближе друг к другу поляризации входного сигнала и накачки (чем больше k_{pol}), тем сильнее растет мощность на выходе усилителя, и уже при малых входных сигналах начинается область насыщения, в которой нелинейные искажения увеличиваются, а спектр выходного сигнала уширяется. В описанном ниже эксперименте было установлено, что спектр выходного сигнала уширяется при увеличении мощности накачки свыше 4.3 Вт. Такое уширение спектра объясняется нелинейными искажениями вследствие эффекта самомодуляции при распространении излучения в протяженном волокне [9].

Для устранения уширения спектра излучения была предпринята попытка разбиения входного сигнала на два с ортогональными поляризациями для обеспечения усиления в более далекой от насыщения области усиления. При этом если увеличить общую мощность накачки до 5 Вт, причем так, чтобы на каждую поляризацию приходилась мощность накачки 2.5 Вт, то выходная мощность стока оптического сигнала будет равна ~ 4 Вт (точка «а» на кривой 6, рис.1,а). Качественно это можно объяснить следующим образом: для двухполяризационного усиления приходиться на каждую поляризацию мощность накачки примерно в два раза меньше, и линейность усиления может быть выше. При этом сумма мощностей двух усиленных сигналов с ортогональными поляризациями может быть равна выходной мощности сигнала с одной поляризацией. Поскольку линейность усиления и порог нелинейных эффектов для двух меньших по величине ортогональных поляризаций выходного сигнала выше, то спектр суммы двух усиленных сигналов, возможно, также будет уже спектра сигнала, полученного без разбиения сигнала по поляризациям. В активном волокне два сигнала со взаимно перпендикулярными поляризациями «истощают» накачку по-разному, поэтому и коэффициенты k_{pol} для них будут несколько различаться в зависимости от конструктивных особенностей усилителя, т.е., скорее всего, накачка в усилителе будет использоваться более эффективно.

3. Экспериментальные результаты

Для сравнения получаемых на выходе усилителя сигналов была исследована схема усиления для DFB-лазера с линейной поляризацией излучения (рис.2). Линейно поляризованное излучение DFB-лазера разветвлялось на два канала с помощью поляризационного разветвителя PBS. В каждом канале распространялось излучение со взаимно ортогональными поляризациями, причем в один из каналов был введен дополнительный отрезок волокна типа panda для устранения взаимной когерентности излучения. Длина этого отрезка волокна L выбиралась из условия

$$L \gg L_{\text{coh}} = c/(2\Delta\nu), \quad (2)$$

где L_{coh} – длина когерентности DFB-лазера; c – скорость света; $\Delta\nu \approx 1$ МГц – ширина спектра излучения лазера. Затем оба канала излучения объединялись поляризационным объединителем PBS. После изолятора излучение подавалось на предварительный, а затем на окончательный рамановский усилитель, выходное излучение которого могло поступать на фотоприемник, оптический анализатор спектра или на оптический измеритель мощности.

Необходимо отметить, что как предварительный, так и окончательный усилитель были выполнены по схеме со встречной накачкой, причем излучение накачки было неполяризовано и вводилось в активное волокно стандартным образом через оптический мультиплексор. Регистрировались спектр излучения на выходе окончательного усилителя, а также мощность и сигнал с фотоприемника, перед которым можно устанавливать калиброванные кюветы с метаном для дополнительной оценки ширины спектра излучения. Сравнение параметров сигналов в представленной схеме проводилось как при наличии делителя-объединителя, так и в отсутствие его, т.е. когда излучение распространялось непосредственно от задающего лазера к изолятору ISO, как показано штриховой линией на рис.2. Сначала были измерены выходные характеристики усилителя в зависимости от входных сигналов, аналогичные полученным при теоретическом моделировании (рис.1). Оказалось, что в пределах погрешностей кривые для двух- и однополяризационного усиления почти совпадают (рис.3) и близки к кривой 3 на рис.1,а. Поскольку для двухполяризационного усиления входной сигнал и мощность накачки для каждой поляризации примерно в два

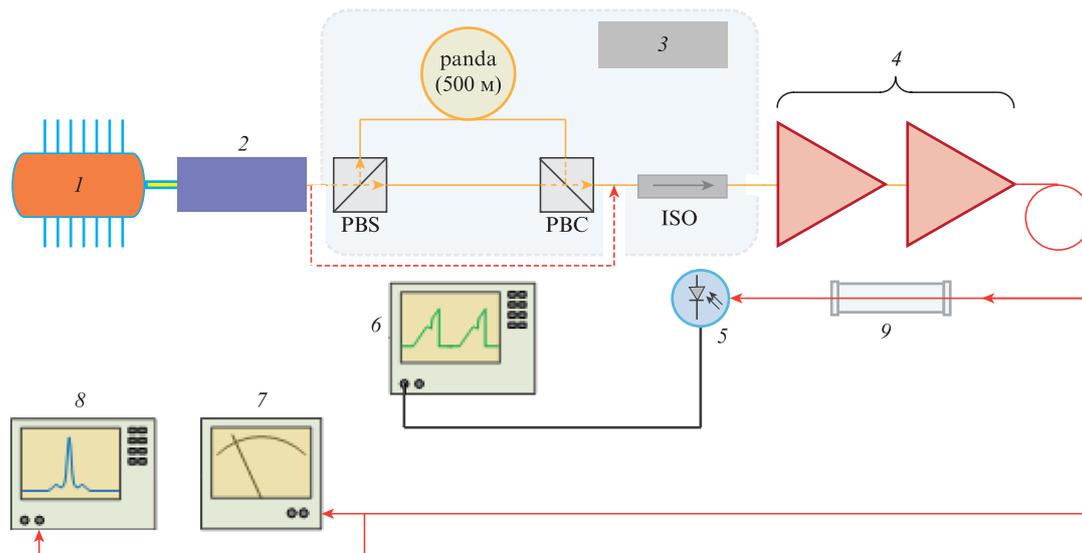


Рис.2. Блок-схема установки: 1 – задающий лазер со сканированием по длине волны; 2 – контроллер поляризации; 3 – оптический деполаризатор; 4 – двухкаскадный рамановский усилитель; 5 – фотоприемник; 6 – осциллограф; 7 – оптический измеритель мощности; 8 – оптический анализатор спектра; 9 – кювета с метаном.

раза меньше, чем для однополяризационного усиления, то совпадение кривых на рис.3 можно объяснить тем, что k_{pol} для разделенных по поляризациям излучений имеет большую величину. Расчет, проведенный по формуле (1), показал, что $k_{pol} \approx 0.56$, в то время как для излучения с одной поляризацией $k_{pol} \approx 0.32$ (кривая 3 на рис.1,а). Для случая двух поляризаций мощность накачки составляла ~ 2.15 Вт для каждой поляризации, а выходной сигнал, рассчитанный по формуле (1), умножался на 2, поскольку происходило сложение выходных мощностей двух усиленных сигналов с ортогональными поляризациями.

Экспериментально полученные спектры выходных сигналов показаны на рис.4. Необходимо отметить, что излучение лазера периодически сканировалось по длине волны с диапазоном сканирования ~ 0.5 нм и периодом ~ 20 мс. Спектры были измерены при мощности оптического сигнала на входе оконечного усилителя ~ 40 мВт. Из рис.4 видно, что ширина спектра для случая с разделением излучения по поляризациям несколько меньше, чем для случая без разделения. Это свидетельствует о том, что нелинейные искажения для двух усиленных сигналов с ортогональными поляризациями меньше.

Данный вывод подтверждается также сравнением осциллограмм сигналов, полученных с выхода фотоприем-

ника при размещении кюветы с метаном на пути пучка после оконечного усилителя (рис.5). Калиброванная кювета с метаном устанавливалась между фотоприемником и торцом выходного волокна. Осциллограммы были зарегистрированы для двух мощностей накачки выходного усилителя – 4.3 и 1 Вт. При этом на входе оконечного усилителя поддерживались одинаковые мощности входных сигналов, равные ~ 40 мВт. При мощности накачки 4.3 Вт для обоих случаев (с разделением и без разделения по поляризациям) на выходе оконечного усилителя мощность составляла ~ 3.5 Вт. Из рис.5,а видно, что провал на линии поглощения метана для разделенных по поляризациям излучений больше, чем для неразделенных (точки А и В соответственно). Поскольку спектр в первом случае несколько уже, линия поглощения метана прописывается точнее, с меньшим интегрированием по времени (или по длине волны в диапазоне сканирования), и, значит, точнее может быть измерена концентрация газа. Без разделения по поляризациям усилитель работает вблизи области насыщения, где нелинейные явления могут привести к уширению спектра излучения, и, следовательно, линия поглощения метана будет в большей степени интегрироваться широкой спектральной линией излучения. При малой мощности накачки усилителя в обоих рассматри-

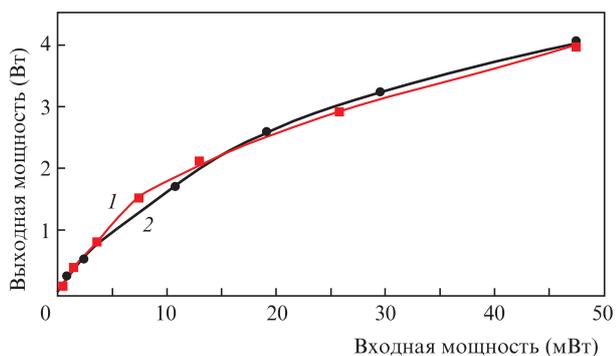


Рис.3. Экспериментальные зависимости выходной мощности от входной при мощности накачки 4.3 Вт для двух- (1) и однополяризационного (2) усиления.

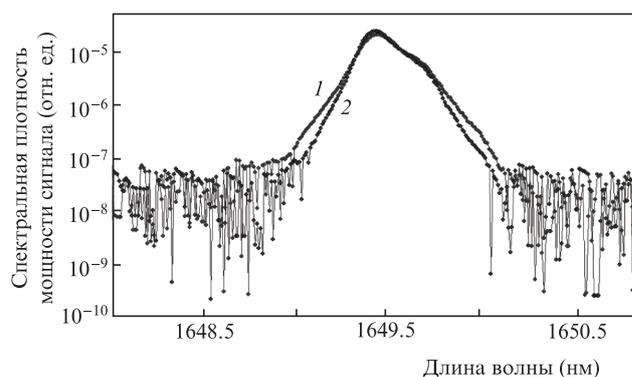


Рис.4. Спектры излучения на выходе рамановского усилителя для случаев без разделения (1) и с разделением (2) по поляризациям.

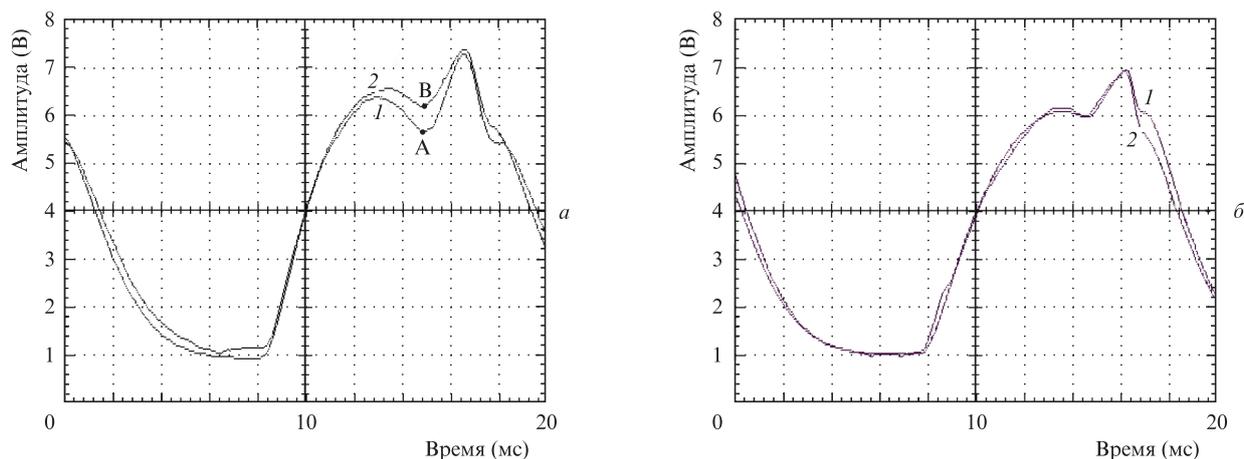


Рис.5. Осциллограммы лидарных сигналов после фотоприемника при наличии кюветы с метаном на пути пучка для случаев с разделением (1) и без разделения (2) излучения по поляризациям при мощности накачки 4.3 (а) и 1 Вт (б).

ваемых случаях усиление происходит на линейных участках выходной характеристики усилителя, где искажения спектра излучения меньше, и поэтому осциллограммы для этих случаев выглядят примерно одинаково (рис.5,б).

При увеличении мощности накачки для двухполяризованного усиления мощность на выходе усилителя оказалась на ~ 0.5 Вт, или на 10%–12% больше, чем для однополяризованного усиления, когда мощность излучения составляла 3.5 Вт. При этом ширина спектра излучения в обоих случаях была одинаковой. Результаты моделирования примерно совпадают с экспериментальными результатами, и выигрыш в полученной мощности при разбиении сигнала на два с ортогональными поляризациями не слишком большой. Однако даже такое небольшое увеличение мощности может несколько увеличить как точность зондирования фона метана, так и дальность действия лидара, особенно если речь идет о зондировании с летательных аппаратов при высоте полета до ~ 10 км.

4. Заключение

Таким образом, показано, что двухполяризованное усиление в рамановском усилителе повышает выходную мощность от ~ 3.5 до ~ 4 Вт без уширения спектра выход-

ного излучения, что увеличивает, например, энергетический потенциал лидара для дистанционного зондирования концентрации метана в воздухе. Результаты моделирования разбиения входного оптического сигнала на два с ортогональными поляризациями и усиления такого сигнала достаточно хорошо совпадают с результатами экспериментальных исследований.

Работа выполнена в рамках государственного задания.

1. Акимова Г.А., Григорьевский В.И., Матайбаев В.В., Садовников В.П., Сырых Ю.П., Тезадов Я.А., Феденев А.В., Хабаров В.В. *Радиотехника и электроника*, **10**, 1010 (2015) [*J. Commun. Technol. Electron.*, **10**, 1058 (2015)].
2. Crotti C., Deloison F., Alahyane F. *Invest. Ophthalmol. Visual Sci.*, **5**, 3340 (2013).
3. Horton N.G., Wang K., Kobat D. *Nat. Photonics*, **3**, 205 (2013).
4. Sharma U., Chang E.W., Yun S.H. *Opt. Express*, **24**, 19712 (2008).
5. Cadroas P., Abdeladim L., Kotov L. *J. Opt.*, **6**, 65506 (2017).
6. Chen S., Jung Y., Alam S. *Opt. Express*, **25**, 369322 (2019).
7. Леонов А.В., Наний О.Е., Трешиков В.Н. *Прикладная фотоника*, **1**, 26 (2014).
8. Grigorievsky V.I., Tezadov Y.A., Elbakidze A.V. *J. Russ. Laser Res.*, **4**, 311 (2017).
9. Агравал Г. *Нелинейная волоконная оптика* (М.: Мир, 2009, с. 639).