

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.9>

УДК: 621.396.029.7

## **ДВУХПОЛЯРИЗАЦИОННОЕ УСИЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ЭФФЕКТЕ РАМАНА ДЛЯ ПЕРЕДАТЧИКА ЛИДАРА**

**В. И. Григорьевский, Я. А. Тезадов**

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

Статья поступила в редакцию 3 сентября 2021 г.

**Аннотация.** Проведено сравнение спектральных искажений выходного излучения рамановского усилителя в случае одно и двухполяризационного усиления модулированного излучения в протяженном оптическом волокне. При выходной мощности 3.5 Вт на длине волны 1649 нм спектральные искажения для двухполяризационного усиления меньше, что дает возможность увеличить выходную мощность усилителя до  $\sim 4$  Вт, причем уровень спектральных искажений на выходе усилителя, позволяет с высокой точностью проводить лидарные измерения концентрации метана дистанционным методом. Наряду с экспериментальной проверкой проведено моделирование двухполяризационного рамановского усиления. Для такого моделирования вводился коэффициент деполяризации излучения, распространяющегося в протяженном одномодовом волокне. Экспериментальные результаты и результаты теоретического моделирования достаточно хорошо совпадают. Увеличение мощности усилителя позволяет увеличить и дальность зондирования метана в открытой атмосфере лидарами, использующие рамановские усилители в качестве передатчиков.

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

**Abstract.** A comparison is made of the spectral distortions of the output radiation of a Raman amplifier in the case of one and two-polarization amplification of modulated radiation in an extended optical fiber. With an output power of 3.5 W at a wavelength of 1649 nm, the spectral distortions for bipolarization amplification are lower, which makes it possible to increase the amplifier output power to  $\sim 4$  W, and the level of spectral distortions at the amplifier output makes possible to carry out lidar measurements of methane concentration by a remote method with high accuracy. Simulation of bipolarization Raman amplification was carried out along with experimental verification. For this simulation, the coefficient of depolarization of radiation propagating in an extended single-mode fiber was introduced. The experimental results and the results of theoretical modeling are in good agreement. An increase in the amplifier power also makes it possible to increase the methane sensing range in an open atmosphere with lidars using Raman amplifiers as transmitters.

**Key words:** lidar, raman amplifier, polarization, pumping, methane.

## **Введение.**

В лидарных технологиях определения содержания метана в атмосферах Земли и планет с летательных аппаратов требуются мощные, более 1-3 Вт лазерные источники в диапазоне линий поглощения метана 1640-1660 нм, обладающие узким спектром излучения, менее ширины линии поглощения метана, которая составляет  $\sim 0.1$  нм. Для применения лидаров на космических аппаратах для глобального мониторинга содержания метана требуется мощность в максимуме излучаемого импульса, превышающая 20-30 Вт [1]. В настоящее время таких мощных, коммерческих источников излучения не существует. Указанный диапазон длин волн привлекателен не только для лидарных технологий, но также широко используется в медицине, связи, научных исследованиях [2-5]. Такие приборы с высокой чистотой спектра, могут заполнить дефицит мощных лазерных источников, диапазон длин волн которых находится между диапазоном длин волн волоконных усилителей на основе эрбия и диапазоном длин волн современных усилителей и лазеров на основе тулия [6].

Целью настоящей работы является исследование возможности повышения выходной мощности рамановского усилителя без ухудшения спектрального состава его выходного излучения за счет усиления двух ортогональных поляризаций входного излучения лазерного источника.

## 1. Моделирование и теоретические оценки.

Выходная мощность рамановских усилителей и преобразователей указанного диапазона длин волн 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 вводится коэффициент деполяризации  $k_{pol}$ , который зависит от поляризации сигнала и накачки. Коэффициент  $k_{pol}$  равен 1 при совпадающих поляризациях,  $k_{pol} = 0.5$  для деполяризованной накачки,  $k_{pol} = 0$  при взаимно ортогональных поляризациях сигнала и накачки. Общая усилительная способность  $g_{rtot}$  рамановского волокна оказывается равной  $g_{rtot} = g_r \cdot k_{pol}$ , где  $g_r$  – усилительная способность при совпадающих поляризациях сигнала и накачки.

Нами было проведено теоретическое моделирование двухполяризационного усиления в рамановском усилителе и проведено его сравнение с однополяризационным усилением. Мощность на выходе рамановского усилителя определялась решением уравнений для нелинейного взаимодействия сигнала и накачки [8].

$$P_s(z) = \frac{(P_s^0 + \frac{\omega_s}{\omega_p} P_p^0) \exp(-\alpha z)}{1 + \frac{\omega_s P_p^0}{P_s^0} \exp \left[ \frac{g_r k_{pol}}{\alpha} \left( \frac{\omega_p}{\omega_s} I_s^0 + I_p^0 \right) (\exp(-\alpha z) - 1) \right]}. \quad (1)$$

Здесь  $P_s$ ,  $P_p$ ,  $I_s$  и  $I_p$  – соответственно мощности и интенсивности стоксовой компоненты сигнала и накачки в зависимости от длины волокна  $z$ ,  $g_r$  – усилительная способность активной среды волокна при совпадающих поляризациях сигнала и накачки, м/Вт,  $\omega_s$  и  $\omega_p$  – частоты сигнала и накачки,  $\alpha$  – коэффициент затухания оптического сигнала в волокне.  $I_s^0, I_p^0$  –

соответственно интенсивности сигнала и накачки в начале волокна, то есть при  $z = 0$ . Выходная мощность стоксова сигнала на выходе волоконного усилителя  $P_s^L$  определяется по формуле:  $P_s^L = I_s^L A_{ef}$ , где  $A_{ef}$  – эффективная площадь сердцевины волокна,  $L$  – длина волокна. При расчете выходной мощности  $P_s^L$  зависимости от входной по формуле (1) оказалось, что для различных значений  $k_{pol}$  выходная мощность определяется кривыми, показанными рис. 1.

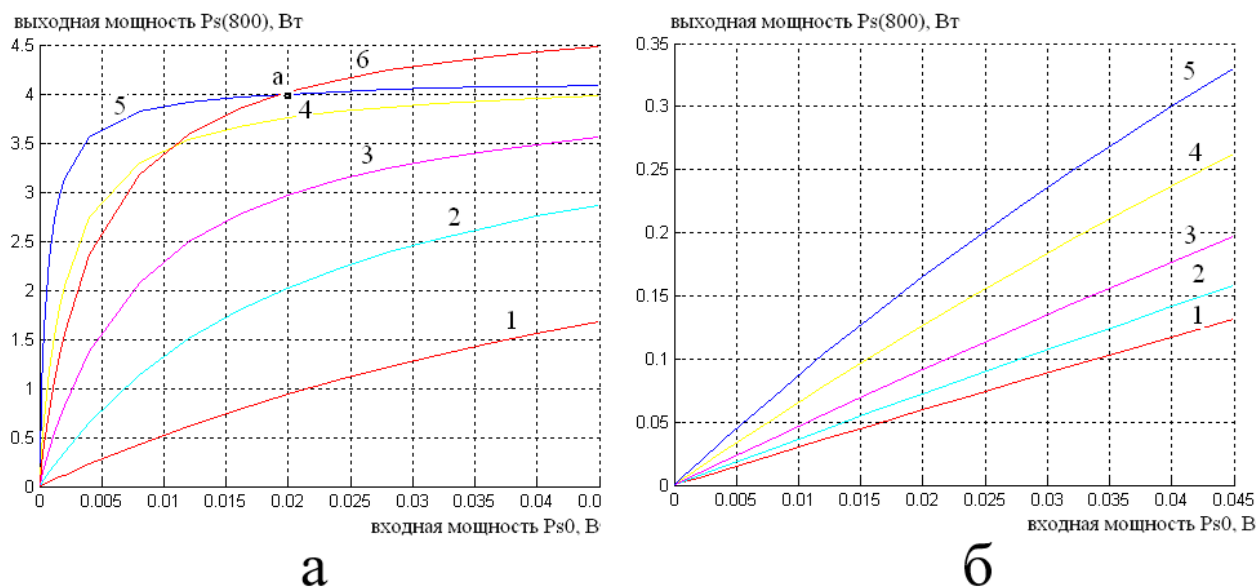


Рис. 1. Мощность рамановского излучения на выходе протяженного волокна длиной 800 метров в зависимости от входной мощности: 1 –  $k_{pol} = 0.21$ , 2 –  $k_{pol} = 0.27$ , 3 –  $k_{pol} = 0.32$ , 4 –  $k_{pol} = 0.39$ , 5 –  $k_{pol} = 0.45$ , 6 –  $k_{pol} = 0.56$ . а) для кривых 1-5 общая мощность накачки 4.3 Вт (однополяризационное усиление), 6 – общая мощность накачки 5 Вт (двухполяризационное усиление). б) мощность накачки 1 Вт (однополяризационное усиление).

В вычислениях использовались следующие числовые значения:  $\alpha \approx 0,22$  дБ/км (или  $5,2 \times 10^{-5}$  1/м для длины волны 1,55 мкм (область малых потерь световода)),  $P_p^0 = 4.3$  Вт (выбранные мощности накачки 4.3 Вт и 1 Вт равны величинам, которые использовались в описанном ниже эксперименте), а коэффициент рамановского преобразования для кварцевого волокна без учета деполяризации  $g_r = 0,7 \times 10^{-13}$  м/Вт. На рис. 1б зависимость выходной мощности от входной для всех кривых почти линейна. В то же время на рис. 1а видно, что чем ближе друг к другу поляризации входного сигнала и накачки (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 нижеописанном эксперименте было определено, что спектр выходного сигнала уширяется и при попытке увеличить мощность накачки свыше 4.3 Вт. Такое уширение спектра объясняется нелинейными искажениями типа самомодуляции при распространении излучения в протяженном волокне [9].

Для устранения уширения спектра излучения была предпринята попытка разбиения входного сигнала на две ортогональные поляризации с целью обеспечения усиления в более далекой от насыщения области усилителя. При этом если увеличить общую мощность накачки до 5 Вт, так, что на каждую поляризацию будет приходиться по 2.5 Вт мощности накачки, то выходная мощность стоксова оптического сигнала будет равна  $\sim 4$  Вт (точка «а» на кривой б, рис. 1а). Качественно это можно объяснить следующим образом: для двухполяризационного усиления, приходящаяся на каждую поляризацию мощность накачки меньше примерно в два раза и линейность усиления может быть выше. При этом сумма мощностей двух усиленных сигналов с ортогональными поляризациями может быть равна выходной мощности сигнала, полученной 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, чем спектр сигнала, полученный без разбиения сигнала по поляризациям. Так как в активном волокне два излучения со взаимно перпендикулярными поляризациями «истощают» накачку по-разному, то и  $k_{\text{pol}}$  для них будут иметь, несколько отличающиеся значения в зависимости от конструктивных особенностей усилителя, то есть, возможно, накачка в усилителе будет использоваться более эффективно.

## 2. Экспериментальные результаты.

Для сравнения получаемых на выходе усилителя сигналов была исследована схема усиления DFB лазера с линейной поляризацией излучения,

рис. 2. Линейно поляризованное излучение от DFB – лазера разветвлялось на два канала с помощью поляризационного разветвителя PBS. В каждом канале излучение распространялось со взаимно ортогональными поляризациями, причем в один из каналов был введен дополнительно отрезок волокна типа «panda» для устранения взаимной когерентности излучения. Длина этого отрезка волокна  $L$  выбиралась из условия:

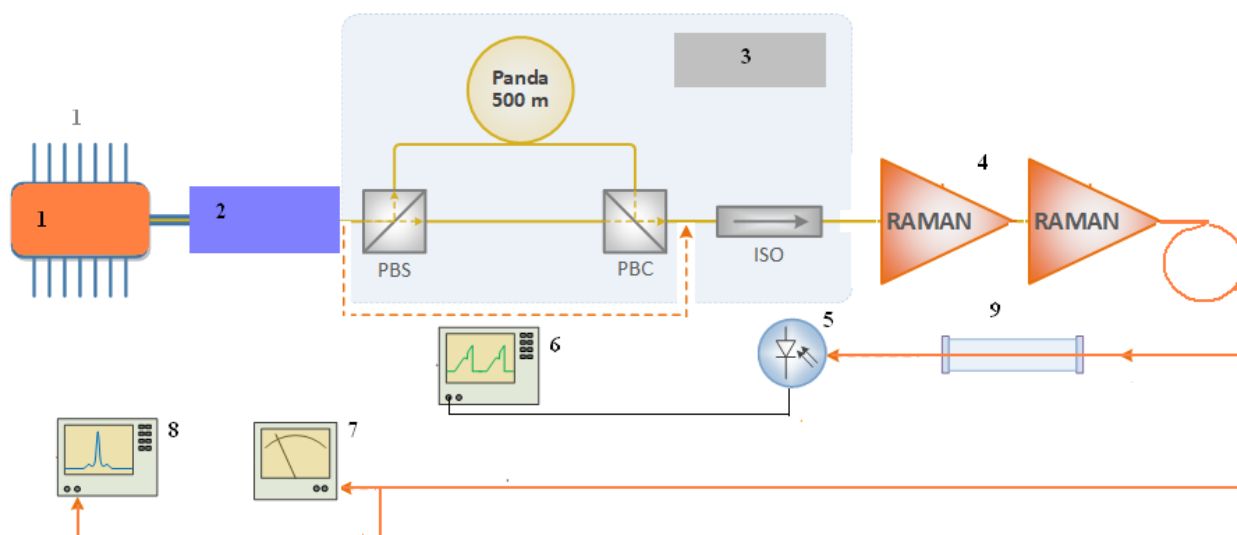


Рис. 2. Блок-схема установки. 1 – задающий лазер со сканированием по длине волны, 2 – контроллер поляризации, 3 – оптический деполаризатор 4 – двухкаскадный рамановский усилитель, 5 – фотоприемник, 6 – осциллограф, 7 – оптический анализатор спектра, 8 – оптический измеритель мощности, 9 – кювета с метаном

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

где  $L_{coh}$  – длина когерентности DFB лазера,  $c$  – скорость света,  $\Delta\nu \sim 1$  МГц ширина спектра излучения лазера. Затем оба канала излучения объединялись поляризационным объединителем PBC. 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 накачка была не поляризована и вводилась в активное волокно стандартным образом через оптический мультиплексор. Регистрировались спектр излучения на выходе

оконечного усилителя, 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 происходило как при наличии делителя-объединителя, так и без него, то есть, когда излучение проходило непосредственно от задающего лазера к изолятору как показано пунктирной линией на рис. 1. Вначале были сняты выходные характеристики усилителя в зависимости от входных сигналов аналогично представленным на рис. 1 при теоретическом моделировании. Оказалось, что кривые в пределах погрешностей для двух и однополяризационном усилении почти совпадают, рис. 3 и близки к кривой 3 на рис. 1а.

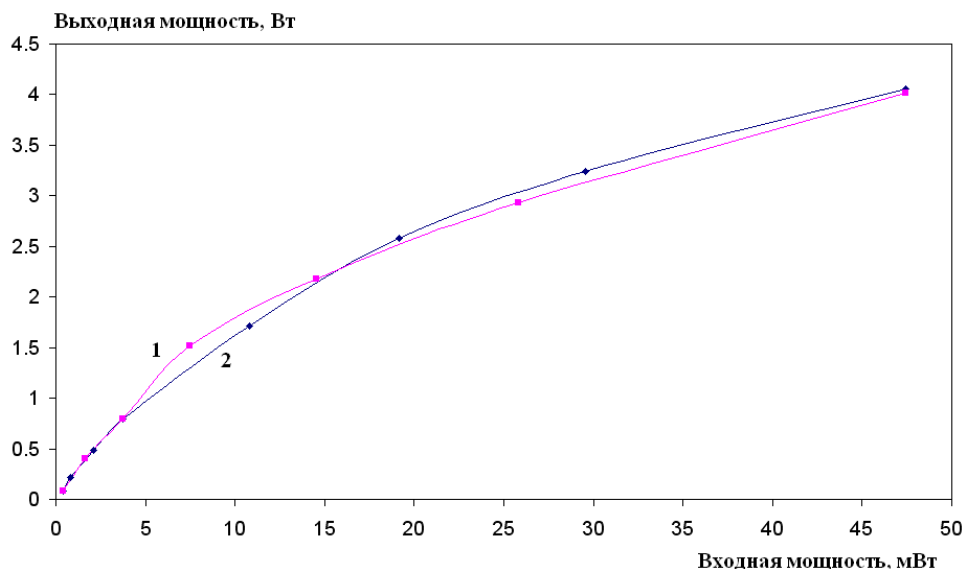


Рис. 3. Экспериментальные зависимости выходной мощности от входной при мощности накачки 4.3 Вт. Кривая 1 – двухполяризационное усиление, 2 – однополяризационное усиление.

Поскольку для двухполяризационного усиления входной сигнал и мощность накачки для каждой поляризации в  $\sim 2$  раза меньше, чем для случая с одной поляризацией, то совпадение кривых на рис. 3 можно объяснить тем, что  $k_{pol}$  для отдельных поляризаций имеет большую величину. Проведенный расчет по формуле (1) показал, что он составляет  $\sim 0.56$ , в то время как для случая с одной поляризацией  $k_{pol} \sim 0.32$  (кривая 3 на рис. 1а). Для случая двух поляризаций накачка составляла соответственно  $\sim 2.15$  Вт для каждой из поляризации, а

выходной сигнал в формуле (1) умножался на 2, поскольку происходило сложение выходных мощностей от усиления двух сигналов с ортогональными поляризациями.

Экспериментально полученные спектры выходных сигналов показаны на рис. 4.

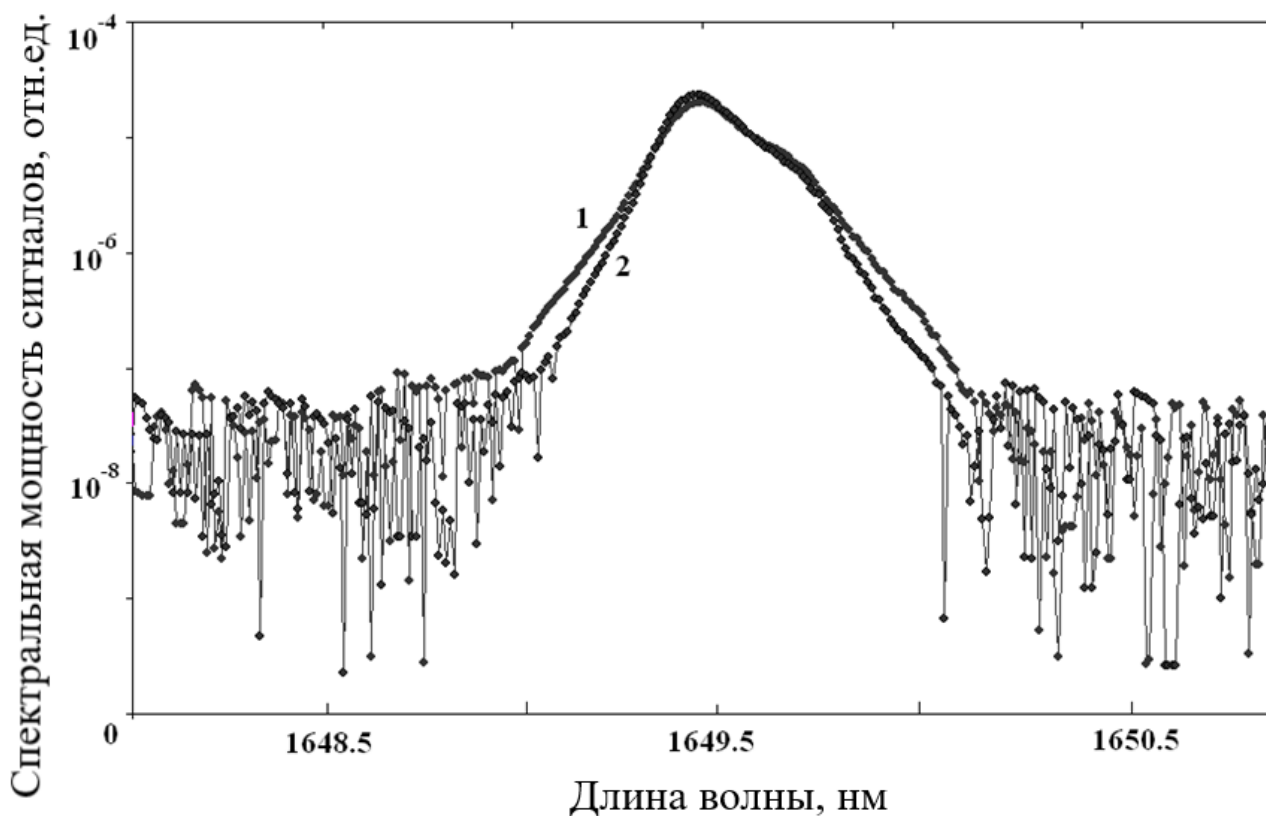


Рис. 4. Спектры излучения на выходе рамановского усилителя. 1 – без разделения по поляризациям, 2 – с разделением по поляризациям

Необходимо отметить, что излучение лазера периодически сканировалось по длине волны с диапазоном сканирования  $\sim 0.5$  нм и периодом  $\sim 20$  мс. Спектры были сняты при мощности оптического сигнала на входе оконечного усилителя  $\sim 40$  мВт. Из рисунка видно, что ширина спектра для случая с поляризационным разделением излучения несколько уже, чем для случая без него. Это свидетельствует о том, что нелинейные искажения для случая двух усиленных ортогональных поляризаций излучения меньше. Этот вывод подтверждается и сравнением осциллограмм сигналов, полученных с выхода фотоприемника в случае помещения кюветы с метаном на пути луча после



оконечного усилителя, рис. 5. Калиброванная кювета с метаном устанавливалась между фотоприемником и торцом выходного волокна. Осциллограммы были сняты для двух величин накачки выходного усилителя 1 Вт и 4.3 Вт. На входе оконечного усилителя поддерживались одинаковые мощности входных сигналов  $\sim 40$  мВт. При накачке 4.3 Вт для обоих случаев сравнения (с разделением и без разделения по поляризациям) на выходе оконечного усилителя мощность составляла  $\sim 3.5$  Вт. Из рис. 5а видно, что «провал» на линии поглощения метана для разделенных усиливаемых поляризаций излучения больше, чем для случая без разделения по поляризациям (точки *A* и *B* соответственно).

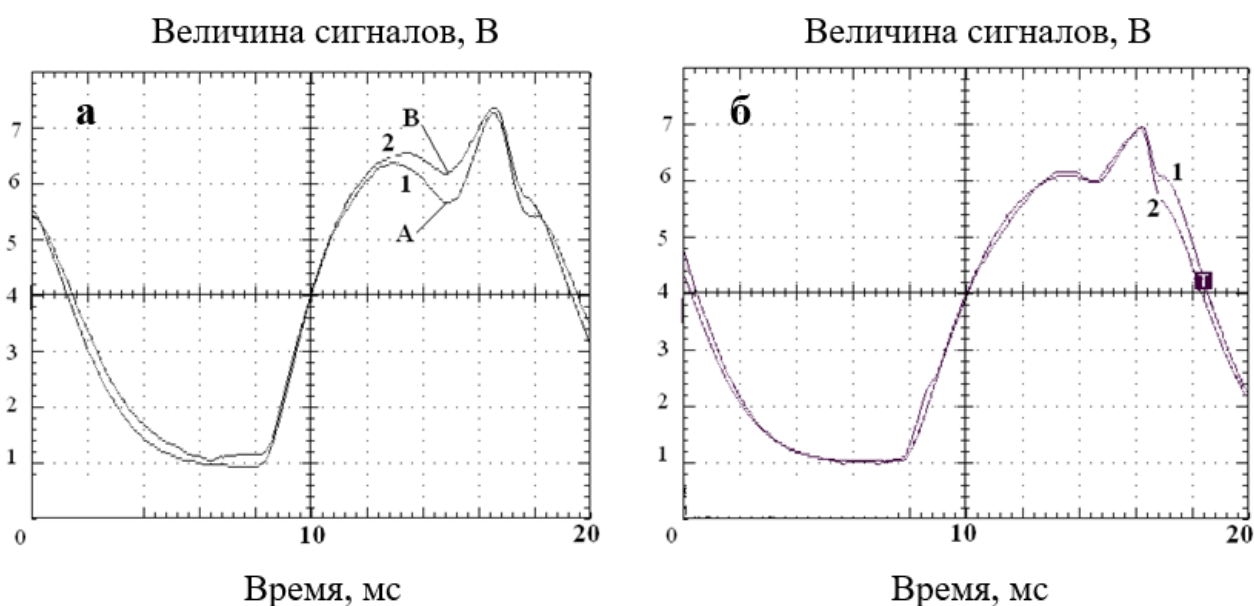


Рис. 5. Сравнение лидарных сигналов после фотоприемника при наличии кюветы с метаном на пути луча. а) мощность накачки 4.3 Вт. 1 – с разделением излучения по поляризациям, 2 – без разделения по поляризациям. б) мощность накачки 1 Вт. 1 – с разделением излучения по поляризациям, 2 – без разделения по поляризациям.

То есть, поскольку спектр для первого случая несколько уже, линия поглощения метана прописывается точнее, с меньшим интегрированием по времени (или по длине волны в диапазоне сканирования) и, следовательно, точнее может быть измерена концентрация газа. Без разделения по поляризациям усилитель работает ближе к зоне насыщения, где нелинейные явления могут расширить спектр излучения, и, следовательно, линия поглощения метана будет

больше интегрироваться широкой спектральной линией излучения. При малой накачке усилителя в обоих рассматриваемых случаях усиление происходит на линейных участках выходной характеристики усилителя, где меньше искажения спектра излучения и поэтому осциллограммы для двух случаев сравнения выглядят примерно одинаково, рис. 5б. При увеличении мощности накачки в случае двухполяризационного усиления мощность на выходе усилителя оказалась на  $\sim 0.5$  Вт или на 10-12% больше, чем мощность выходного излучения для случая без разделения по поляризациям, где мощность излучения составляла 3.5 Вт. Причем ширина спектра излучения в обоих случаях была одинаковой. Результаты моделирования примерно совпадают с экспериментальными результатами и выигрыш в полученной мощности в случае разбиения сигнала на две поляризации 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 с высотой полета до  $\sim 10$  км.

### **Заключение.**

Таким образом, показано, что двухполяризационное усиление в рамановском усилителе повышает выходную мощность с  $\sim 3.5$  Вт до  $\sim 4$  Вт без уширения спектра выходного излучения, что увеличивает, например, энергетический потенциал лидара для дистанционного зондирования концентрации метана в воздухе. Причем результаты моделирования разбиения входного оптического излучения на две ортогональные поляризации и их усиление достаточно хорошо совпадают с результатами экспериментальных исследований.

### **Финансирование.**

Работа выполнена в рамках государственного задания.

## Литература

1. Akimova G.A., Grigor'yevskii V.I., Mataibaev V.V. Enhancement of the energy potential of a lidar for methane detection with the use of a quasi\_continuous radiation source. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2015. V.60. №10. PP.1058-1061. <http://doi.org/10.1134/S1064226915100022>
2. Crotti C., Deloison F., Alahyane F., et al. Wavelength optimization in femtosecond laser corneal surgery. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*. 2013. V.54. №5. P.3340-3349. <http://dx.doi.org/10.1167/iovs.12-10694>
3. Horton N.G., Wang K., Kobat D., et al. In vivo three-photon microscopy of subcortical structures within an intact mouse brain. *Nature Photonics*. 2013. V.7. №3. P.205-209. <http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2012.336>
4. Sharma U., Chang E.W., Yun S.H. Long-wavelength optical coherence tomography at 1.7  $\mu\text{m}$  for enhanced imaging depth. *Optics Express*. 2008. V.16. №24. P.19712-19723. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.16.019712>
5. Cadroas P., Abdeladim L., Kotov L., et al. All-fiber femtosecond laser providing 9 nJ, 50 MHz pulses at 1650 nm for three-photon microscopy. *Journal of Optics*. 2017. V.19. №6. P.065506-065511. <http://dx.doi.org/10.1088/2040-8986/aa6f72>
6. Chen S., Jung Y., Alam S., et al. Ultra-short wavelength operation of thulium-doped fiber amplifiers and lasers. *Optics Express*. 2019. V.27. №25. P.369322-369331. <http://dx.doi.org/10.1364/OE.27.036699>
7. Delahaye T., Maxwell S.E., Reed Z.D., et al. Precise methane absorption measurements in the 1.64  $\mu\text{m}$  spectral region for the MERLIN mission. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2016. V.121. №12. P.7360-7370. <http://dx.doi.org/10.1002/2016JD025024>
8. Grigorievsky V.I., Tezadov Y.A., Elbakidze A.V. Modeling and investigation of high-power fiber-optical transmitters for lidar applications. *Journal of Russian Laser Research*. 2017. V.38. №4. P.311-315. <https://doi.org/10.1007/s10946-017-9651-7>
9. Агравал Г. *Нелинейная волоконная оптика*. Москва, Мир. 2009. 639 с.

**Для цитирования:**

Григорьевский В.И., Тезадов Я.А. Двухполяризационное усиление оптического излучения на эффекте Рамана для передатчика лидара. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. №9. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.9.9>