ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2021, № 2, с. 83-87

_____ ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ____ ТЕХНИКА

УДК 535.015

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР СВЕТА В СРЕДНЕМ ИНФРАКРАСНОМ ДИАПАЗОНЕ НА ОСНОВЕ ВЕЕРНОЙ ПЕРИОДИЧЕСКИ-ПОЛЯРИЗОВАННОЙ СТРУКТУРЫ НИОБАТА ЛИТИЯ С ЗАДАЮЩИМ УЗКОПОЛОСНЫМ ЛАЗЕРОМ

© 2021 г. А. А. Бойко^{*a,b,c,e,**}, Е. Ю. Ерушин^{*b,c,d*}, Н. Ю. Костюкова^{*b,c,d,e*}, И. Б. Мирошниченко^{*c,d,e*}, Д. Б. Колкер^{*b,c,d*}

^а Томский государственный университет Россия, 634050, Томск, просп. Ленина, 36 ^b Новосибирский национальный исследовательский государственный университет Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2 ^c Институт лазерной физики СО РАН Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 15Б ^d Новосибирский государственный технический университет Россия, 630073, Новосибирск, просп. К. Маркса, 20 ^e ООО "Специальные технологии" Россия, 630060, Новосибирск, ул. Зеленая горка, 1/3 *e-mail: baa.nsk@gmail.com Поступила в редакцию 02.09.2020 г. После доработки 06.10.2020 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований влияния узкополосного задающего излучения газового лазера на спектральную ширину линии генерации параметрического генератора света (п.г.с.) на основе веерной структуры периодически поляризованного кристалла ниобата лития PPLN. Использование задающего He–Ne-лазера позволило снизить порог генерации п.г.с. в 1.53 раза – от 120 мкДж (29.5 мДж/см²) до 78 мкДж (19 мДж/см²). При оптимальном согласовании мод He–Ne-лазера в резонаторе п.г.с. ширина спектральной линии сигнальной волны уменьшилась в 4.65 раза и составила 0.481 нм.

DOI: 10.31857/S0032816221020026

введение

Источники когерентного узкополосного излучения в среднем инфракрасном (и.к.) диапазоне света востребованы во многих важных приложениях, таких как обнаружение вредных примесей в атмосфере, неинвазивная медицинская диагностика и т.д. Возможность плавной непрерывной перестройки длины волны в среднем и.к.-диапазоне делает такие системы особенно привлекательными для применения в оптико-акустической спектроскопии.

Лазерная оптико-акустическая спектроскопия один из эффективных методов, используемых для точного определения слабых концентраций летучих соединений в сложных газовых смесях, в том числе в выдыхаемом человеком воздухе.

Задача обнаружения и измерения концентрации CH₄ является актуальной в связи с его принадлежностью к парниковым газам [1]. Метод оптико-акустической спектроскопии является на сегодняшний день одним из наиболее чувствительных для проведения измерений в условиях реальной атмосферы при использовании детекторов резонансных типов [2–6]. Параметрические генераторы света (п.г.с.) являются универсальными источниками когерентного излучения с возможностью непрерывной перестройки длины волны в широком спектральном диапазоне [7]. Однако, в отличие от лазерных источников когерентного излучения, п.г.с. на основе кристаллов с регулярной доменной структурой обладают широкополосным спектром излучения [8]. Спектральная ширина излучения п.г.с. обусловлена широкополосными зеркалами резонатора и многочастотным излучением лазера накачки, что приводит к значительному уширению спектра генерации и не всегда позволяет использовать этот источник для прецизионной спектроскопии. Та-



Рис. 1. Схема экспериментальной установки. Fan-out PPLN – веерная структура кристалла ниобата лития; OH – оптический изолятор Фарадея; $\lambda/2$ – полуволновая пластинка; L_1 – CaF₂-линза с фокусным расстоянием f = 500 мм; L_2 – CaF₂-линза с фокусным расстоянием f = 300 мм; M_1 – M_4 – металлические зеркала; M_6 – металлическое сферическое зеркало с фокусным расстоянием f = 500 мм; M_2 – M_9 – дихроичные зеркала.

ким образом, использование излучения п.г.с. в высокоточных газоаналитических системах не всегда возможно.

Для уменьшения спектральной ширины линии генерации п.г.с. используются различные методы. Так, в работах [8, 9] в качестве селективного элемента п.г.с. применялась брегговская решетка. Другой методикой является использование узкополосного задающего генератора, при этом в качестве усилителя используется п.г.с. В качестве задающего генератора может быть выбран Не– Ne-лазер с длиной волны 3.39 мкм. Применение узкополосного излучения непрерывного газового лазера позволяет существенно уменьшить ширину линии генерации п.г.с. на выбранной длине волны.

В данной работе проведено исследование параметров системы He–Ne-лазер (задающий генератор) плюс п.г.с. (усилитель) с целью использования ее в газоаналитическом оборудовании [2–6] для детектирования метана.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве источника накачки п.г.с. использовался Nd:YLF-лазер (TECH-1053 Advanced, OOO "Лазер-экспорт") с длиной волны 1.053 мкм. Частота следования импульсов варьировалась от 0.02 до 4 кГц. Максимальная энергия в импульсе составляла 1 мДж. Спектральная ширина линии излучения лазера



Рис. 2. Зависимость длительности импульса лазера от уровня энергии накачки при разной частоте следования импульсов.

накачки ~1 см⁻¹, показатель качества пучка $M^2 < < 1.3$, половина угла расходимости ~1.8 мрад. Зависимость длительности импульсов лазера накачки от уровня энергии и частоты следования импульсов показана на рис. 2. Спектральная ширина излучения накачки показана на рис. 3.

В качестве задающего генератора использовался непрерывный Не–Ne-лазер с длиной волны 3.39 мкм, специально изготовленный в ИЛФ СО РАН для данного эксперимента. Показатель



Рис. 3. Спектр Nd:YLF-лазера.

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА № 2 2021



Рис. 4. а – внешний вид (вверху) и структура (внизу) кристалла PPLN; **б** – диапазон перестройки холостой волны в зависимости от координаты.

качества пучка $M^2 = 1.1$, половина угла расходимости ~1.25 мрад, мощность 1 мВт.

Излучение лазера накачки фокусировалось посредством CaF₂-линзы L_2 с фокусным расстоянием 300 мм до диаметра $d_{x,y} = 1.2$ мм. Резонатор п.г.с. образован двумя плоскими дихроичными зеркалами M_7 и M_8 с высоким коэффициентом пропускания для излучения накачки и холостой волны и с высоким коэффициентом отражения для сигнальной волны. Длина резонатора составляла 60 мм. Зеркало M_7 устанавливалось на линейную подвижку и пьезокерамический актуатор для точной подстройки длины резонатора, чтобы удовлетворить условию кратности резонатора п.г.с. целому числу полуволн задающего лазера.

Излучение He—Ne-лазера также согласовывалось при помощи CaF₂-линзы L_1 с фокусным расстоянием 500 мм до диаметра $d_{x,y} = 2.15$ мм для выполнения условия:

$$b_1 = \frac{2\pi w_{\scriptscriptstyle \rm H}^2}{\lambda_{\scriptscriptstyle \rm H}} = b_2 = \frac{2\pi w_{\scriptscriptstyle \rm H}^2}{\lambda_{\scriptscriptstyle \rm H}},$$

где $w_{\rm H}$ и $w_{\rm u}$ — диаметры перетяжки для излучения лазера накачки и задающего лазера соответственно; $\lambda_{\rm H}$ и $\lambda_{\rm u}$ — длины волн накачки и задающего лазера соответственно. Выполнение данного условия необходимо для наблюдения эффекта усиления моды задающего лазера в резонаторе п.г.с.

Излучение задающего He–Ne-лазера направлялось в резонатор п.г.с. с помощью металлических зеркал M_2-M_4 через дихроичное зеркало M_5 (HR@ 1053–1064 нм, HT@ 1140–1630 нм, HT@ 3000–14000 нм). Для визуализации оптического тракта He–Ne-лазера использовался диодный лазер с длиной волны $\lambda = 520$ нм. При помощи сферического зеркала M_6 (F = 500 мм) излучение Nd:YLF-лазера фокусировалось до диаметра $d_{x,y} =$ = 0.72 мм, а He–Ne-лазера – до $d_{x,y} = 1.29$ мм, что обеспечивало согласование мод в резонаторе п.г.с. задающего лазера и излучения п.г.с.

Для наблюдения эффекта усиления моды необходимо точное совпадение частоты одной из волн п.г.с. с излучением задающего лазера. Для выполнения этого условия использовалась веерная структура кристалла ниобата лития (fan-out PPLN). Размер кристалла PPLN составлял $50(\square) \times 20(\square) \times 3(B)$ мм, период структуры при комнатной температуре находился в диапазоне $\Lambda = 27.45 - 32.42$ мкм. Для поддержания постоянной температуры кристалл PPLN размещался в термостате. Посредством прецизионной моторизованной подвижки осуществлялось перемещение кристалла PPLN относительно оси резонатора, чем обеспечивалась перестройка длины волны в диапазоне 2.8-4.5 мкм. Зависимость перестройки длины волны от координаты приведена на рис. 4.

Оптимальная длина холостой волны рассчитывалась по выражению

$$\lambda_s = \frac{\lambda_{seed} \lambda_p}{\lambda_{seed} - \lambda_p}$$

и составила 1527.5 нм.

Требуемая длина волны была измерена с помощью спектроанализатора фирмы Angstrom WS6 IR-II с точностью 10^{-6} , спектр излучения сигнальной волны показан на рис. 5. Полная ширина спек-

Интенсивность, отн. ед. 1.0 0.8 0.6 0.4 0.2 0.2 0.520 1524 1528 1532 Длина волны, нм

Рис. 5. Спектр сигнальной волны п.г.с.



Рис. 7. Спектр сигнальной волны п.г.с. с инжекцией излучения задающего лазера (1) и без инжекции (2).

тральной линии сигнальной волны на уровне половинной амплитуды составила 2.241 нм.

После инжекции излучения He—Ne-лазера в резонатор п.г.с. полная ширина спектральной линии сигнальной волны на уровне половинной амплитуды составила 0.481 нм (рис. 6).

В ходе дальнейших экспериментов в схему перед зеркалом M_7 была добавлена линза L_3 с фокусным расстоянием 200 мм для изменения параметра фокусировки и увеличения мощности п.г.с. Полная ширина спектральной линии сигнальной волны на уровне половинной амплитуды соста-



Рис. 6. Спектр сигнальной волны п.г.с. с инжекцией излучения He–Ne-лазера (*1*) и без инжекции (*2*).



Выходная энергия п.г.с., мкДж



Рис. 8. Энергетические характеристики п.г.с. *1* – свободный режим; *2* – с задающим генератором.

вила 3.284 нм, а после инжекции излучения задающего лазера в п.г.с. — 1.116 нм (рис. 7).

Также были исследованы энергетические характеристики и измерен порог генерации п.г.с. при частоте следования импульсов 1 кГц. Эффективность преобразования энергии накачки в энергию п.г.с. при частоте 1 кГц без задающего генератора составила ~11.3%, а квантовая эффективность ~36.4%. Эффективность с инжекцией излучения задающего генератора возросла до ~16.1%, а квантовая эффективность – до ~51.8%. Зависимость выходной энергии п.г.с. в обоих режимах работы представлена на рис. 8. Таким образом,

Nº 2

2021

ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

при инжекции излучения задающего лазера порог генерации был снижен со 120 до 78 мкДж.

выводы

Исследованы характеристики компактной системы: задающий узкополосный Не-Ne-лазер плюс усилитель, в качестве которого использован параметрический генератор света на основе веерной структуры кристалла PPLN в области 3.39 мкм (длина холостой волны) с накачкой Nd:YLF-лазером. Применение задающего Не-Ne-лазера позволило снизить порог генерации п.г.с. в 1.53 раза: от 120 мкДж (29.5 мДж/см²) до 78 мкДж (19 мДж/см²). При оптимальном согласовании мод Не-Ne-лазера в резонаторе п.г.с. ширина спектральной линии сигнальной волны уменьшилась в 4.65 раза и составила 0.481 нм. При использовании задающего Не-Nе-лазера в калибровочной смеси 1000 ррт CH₄ в сухом азоте наблюдалось увеличение сигнала фотоакустического детектора, подробно описанного в работе [10], в 1.7 раза.

Предложенная система может быть использована в качестве источника излучения в среднем и.к.-диапазоне для оптико-акустического газоаналитического оборудования, а также в качестве источника излучения для лидаров дистанционного и локального действия.

Применение перестраиваемого узкополосного задающего лазера в данной системе позволит создавать компактные универсальные широкоперестраиваемые узкополосные источники излучения для гражданского и специального назначения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-32-60055 и госзадания № FSUS-2020-0036.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Real-time and historical methane CH4 levels. https://www.methanelevels.org (Cited: January 25, 2020)
- Miklos A., Hess P., Bozoki Z. // Rev. Sci. Instrum. 2001. V. 72. № 4. P. 1937. https://doi.org/10.1063/1.1353198
- 3. *Harren F.J.M., Bijnen F.G.C., Reuss J., Voesenek L.A.C.J., Blom C.W.P.M.* // Appl. Phys. B. 1990. V. 50. № 2. P. 137. https://doi.org/10.1007/BF00331909
- Fink T., Büscher S., Gäbler R., Yu Q., Dax A., Urban W. //
- Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. № 11. P. 4000. https://doi.org/10.1063/1.1147274
- 5. Колкер Д.Б., Шерстов И.В., Костюкова Н.Ю., Бойко А.А., Кистенев Ю.В., Нюшков Б.Н., Зенов К.Г., Шадринцева А.Г., Третьякова Н.Н. // Квантовая электроника. 2019. Т. 49. № 1. Р. 29. https://doi.org/10.1070/QEL16932
- 6. Колкер Д.Б., Шерстов И.В., Костюкова Н.Ю., Бойко А.А., Зенов К.Г., Пустовалова Р.В. // Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 1. С. 14.
- Petrov V. // Progress in Quantum Electronics. 2015. V. 42. P. 1.
- Александров Л.Н., Новиков А.А., Зиновьев А.П., Антипов О.Л. // Сб. докл. Всероссийской школы для молодых учёных по лазерной физике и лазерным технологиям. Саров, 2010. С. 53–56.
- Li Wang, Boyko A.A., Schirrmacher A., Büttner E., Weidong Chen, Ning Ye, Petrov V. // Opt. Lett. 2019. V. 44. P. 5659. https://doi.org/10.1364/OL.44.005659
- Karapuzikov A.A., Sherstov I.V., Kolker D.B., Karapuzikov A.I., Kistenev Yu.V., Kuzmin D.A., Styrov M.Yu., Dukhovnikova N.Yu., Zenov K.G., Boyko A.A., Starikova M.K., Tikhonyuk I.I., Miroshnichenko I.B., Miroshnichenko M.B., Myakishev Yu.V., Loconov V.N. // Physics wave of phenomena. 2014. V. 22. № 3. P. 189. https://doi.org/10.3103/S1541308X14030054