

## НОВЫЕ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ И ЭЛЕМЕНТЫ

УДК 621.373.8

### ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ НА АИГ: $\text{Nd}^{3+}$ ДЛЯ МОРСКОГО ЛИДАРА УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА<sup>1</sup>

© 2022 г. А. И. Ляшенко<sup>а, \*</sup>, Е. М. Володина<sup>а</sup>, Ю. А. Гольдин<sup>б</sup>, Б. А. Гуреев<sup>б</sup>

<sup>а</sup>Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,  
ул. Бутлерова, 15, Москва, 117342 Российская Федерация

<sup>б</sup>Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН,  
Нахимоский просп., 36, Москва, 117218 Российская Федерация

\*E-mail: alexs1407@yandex.ru

Поступила в редакцию 14.05.2022 г.

После доработки 14.05.2022 г.

Принята к публикации 30.07.2022 г.

Показано, что лидарное зондирование водной среды лазерным излучением на длине волны 266 нм обеспечивает высокую чувствительность и достоверность обнаружения нефтепродуктов. Для использования в морских лидарах предложены две лазерные системы (лазер-усилитель) на АИГ: $\text{Nd}^{3+}$  с преобразованием излучения в четвертую гармонику (с ламповой и с диодной накачкой).

DOI: 10.31857/S0033849422120154

#### ВВЕДЕНИЕ

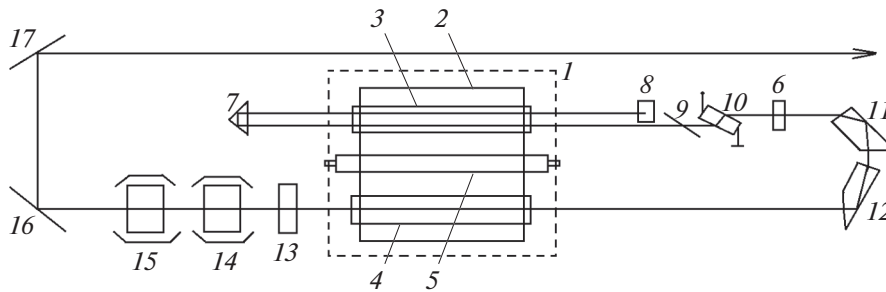
Морские спектральные лидары, осуществляющие зондирование водной среды лазерным излучением ультрафиолетового (УФ) диапазона, — эффективный инструмент мониторинга загрязнений морских акваторий и внутренних водоемов нефтепродуктами [1–3]. Спектральные лидары позволяют обнаруживать присутствие нефтепродуктов при достаточно низких концентрациях, оконтуривать область загрязнения, оценивать толщину нефтяной пленки на поверхности воды, определять тип загрязняющего нефтепродукта, оценивать объём загрязнения.

Информация о наличии нефтепродуктов в приповерхностном слое и на поверхности воды в этих лидарах получается в результате спектрального анализа эхо-сигнала, сформированного лазерно-индуцированной флуоресценцией нефтепродуктов и растворенного органического вещества, а также комбинационным рассеянием на молекулах воды. Обычно в спектральных лидарах используются источники зондирующего излучения ближнего УФ-диапазона — твердотельный лазер на АИГ: $\text{Nd}^{3+}$  с преобразованием частоты излучения в третью гармонику ( $\lambda_3 = 355$  нм) и эксимерные лазеры на  $\text{XeCl}$  ( $\lambda = 308$  нм) и на  $\text{XeF}$  ( $\lambda = 351$  нм) [1–4]. В то же время для решения за-

дачи обнаружения загрязнений водоемов нефтепродуктами лидарным методом ряд преимуществ дает использование зондирующего излучения среднего УФ-диапазона. Зондирование излучением этого диапазона позволяет частично разделить спектры флуоресценции нефтепродуктов и природного растворенного органического вещества. В этом случае полосы флуоресценции легких нефтяных углеводородов попадают в широкий спектральный интервал между полосой комбинационного рассеяния воды и полосой флуоресценции природного растворенного органического вещества, в котором флуоресцируют только нефтепродукты. Регистрация излучения возбуждаемой флуоресценции в этом спектральном интервале позволяет обнаруживать и количественно оценивать нефтепродукты с высокой чувствительностью, точностью и достоверностью.

Оптимальным для использования в морских лидарах источником зондирующего излучения среднего УФ-диапазона является твердотельный лазер на АИГ: $\text{Nd}^{3+}$  с преобразованием частоты излучения в четвертую гармонику ( $\lambda_4 = 266$  нм) [5, 6]. Преимущества использования четвертой гармоники были продемонстрированы в натурном эксперименте, выполненном в Каспийском море с судовым лидаром СФПЛ-24 [7]. В качестве источника зондирующего излучения был использован импульсный лазер ЛТИ-24 с ламповой накачкой (длина волны излучения 266 нм, энергия импульса излучения 8 мДж, длительность импульса 8 нс, расходимость зондирующего пучка 3 мрад).

<sup>1</sup> Работа доложена на Пятой Международной молодежной конференции “Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения” (Астрахань, 4–7 октября 2021 г.).



**Рис. 1.** Оптическая схема УФ-ИЗЛН: 1 – квантрон, 2 – диффузный отражатель, 3 – активный элемент из АИГ:Nd<sup>3+</sup> размером  $\varnothing 5 \times 100$  мм, 4 – активный элемент из АИГ:Nd<sup>3+</sup> размером  $\varnothing 6.3 \times 100$  мм, 5 – лампа ИНП-2-5/90, 6 – выходное зеркало, 7, 8 – призмы-крыши, 9 – пластина-поляризатор, 10 – электрооптический элемент из LiNbO<sub>3</sub>, 11, 12 – поворотные призмы-клинья, 13 – пластина  $\lambda_1/4$ , 14 – нелинейный элемент из КТР в термостате, 15 – нелинейный элемент из ВВО в термостате, 16, 17 – параметрические зеркала, селективирующие излучение с длиной волны  $\lambda_4 = 266$  нм.

Регистрация “нефтяных” эхо-сигналов без вклада флуоресценции растворенного органического вещества осуществлялась приемными каналами с максимумом чувствительности на длинах волн 320 и 350 нм. Результаты натурных испытаний показали, что чувствительность этих каналов к присутствию загрязняющих нефтепродуктов существенно выше, чем у более длинноволновых измерительных каналов.

Практическое использование лидаров, предполагающее их установку на авианоситель или стационарную платформу, выдвигает дополнительные требования к техническим характеристикам используемого лазера. В первую очередь, это более высокая энергия импульсов излучения, большой ресурс работы, виброустойчивость, низкое энергопотребление и в некоторых случаях возможность работы при отрицательных температурах.

С учетом сформулированных требований была изготовлена лазерная система (лазер-усилитель) на основе квантрона с ламповой накачкой и предложена оптическая схема лазерной системы на основе двух квантронов с диодной накачкой. Системы обеспечивают генерацию излучения на длине волны 266 нм и предназначены для использования в морских “нефтяных” лидарах. В работе представлены описания этих систем.

## 1. ЛАЗЕРНЫЕ СИСТЕМЫ

Повышенную энергию импульсов излучения обеспечивает лазерная система: лазер-усилитель с ламповой или с диодной накачкой.

При эксплуатации лазера в нормальных климатических условиях наиболее эффективной представляется лазерная система, использующая квантрон, содержащий одну лампу накачки и два активных элемента, охлаждаемых дистиллированной водой. При необходимости работать с лидаром в полевых условиях, допускающих отрицательные

температуры окружающего воздуха, предлагается использовать лазерную систему с двумя квантронами с боковой накачкой активных элементов решетками лазерных диодов, охлаждаемых морозостойкой жидкостью типа тосола или антифриза.

В системах используются зеркально-призменные резонаторы, обеспечивающие двукратное снижение порога генерации за счет дополнительного прохода излучением активного элемента и уменьшение расходимости выходного излучения в плоскости критического синхронизма нелинейного элемента из кристалла бета-бората бария (ВВО) в преобразователе излучения в четвертую гармонику [8, 9]. Резонаторы устойчивы к деформациям корпуса и термическим эффектам в активных элементах.

В качестве лазера с диодной накачкой предложено использовать лазер, представленный в [9], который отличается большей энергией импульсов и более низкой расходимостью излучения по сравнению с известным лазером [10]. Рассмотрены особенности работы этих систем, в том числе во время переходных процессов после включения.

## 2. ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА С ЛАМПОВОЙ НАКАЧКОЙ

Лазерная система с ламповой накачкой активных элементов (ЛСЛН) с оптической схемой на рис. 1 представляется наиболее эффективной в составе УФ-лидара, эксплуатируемого в нормальных климатических условиях.

Высокая эффективность ЛСЛН обеспечена прежде всего за счет следующих технических и конструктивных решений при изготовлении излучателя (УФ-ИЗЛН):

1) выбор квантрона 1, охлаждаемого дистиллированной водой, с одной лампой, помещенной в отражатель 2 между двумя активными элементами (генераторным 3 и усилительным 4), что ис-

ключает эффект затенения лампой 5 излучения накачки при передаче его в активные элементы;

2) использование призмы-крыши 7 с ребром при вершине в вертикальной плоскости, “делящим” поперечное сечение генераторного активного элемента пополам, что обеспечивает снижение порога генерации в два раза вследствие дополнительного прохода лазерным излучением активного элемента 3, повышает устойчивость резонатора при появлении термического клина в активном элементе 3 и снижает расходимость лазерного излучения в горизонтальной плоскости;

3) использование второй призмы-крыши 8 в качестве конечного отражателя с ребром при вершине в горизонтальной плоскости повышает устойчивость резонатора при возможной деформации корпуса излучателя УФ-ИЗЛН в вертикальной плоскости;

4) применение призм-клиньев 11, 12, увеличивающих размер пучка излучения в 2.25 раза в горизонтальной плоскости, снижает расходимость излучения во столько же раз.

Лучевая прочность оптических элементов резонатора, а также нелинейных элементов из кристаллов титанил-фосфата калия (КТР) и ВВО, в которых происходит генерация второй ( $\lambda_2 = 532$  нм) и четвертой ( $\lambda_4 = 266$  нм) гармоник соответственно, является высокой, но на практике оказывается вполне достижимой. Поэтому для предотвращения оптического пробоя элементов ИК-лазер следует настраивать и эксплуатировать в режиме включения добротности резонатора после окончания свободной (пичковой) генерации. Этот режим основан на внесении потерь в резонатор в начале импульса пичковой генерации и включении добротности резонатора полностью после последнего пичка через отрезок времени  $\sim 20$  мкс. В указанном режиме осуществляется стабилизация энергетических параметров (максимальной плотности энергии в сечении луча и энергии импульсов) и временных параметров импульсов излучения в широкой области энергии импульсов накачки вследствие излучения “излишков” запасенной в активном элементе энергии (инверсной населенности) в процессе пичковой генерации [11].

Внесение начальных потерь в резонатор целесообразно проводить отклонением оптической оси  $Z$  электрооптического элемента 10 от оси резонатора на небольшой угол ( $\sim 2^\circ$ ) в пределах первого кольца коноскопической картины, используя собственное двулучепреломление элемента. Начальные потери резонатора при этом практически не зависят от температуры элемента. Для того чтобы полностью “открыть” резонатор, необходимо подать на электроды элемента 10 импульс высоковольтного напряжения с блока управления электрооптическим затвором (БУЗ), причем амплиту-

да импульса также не зависит от температуры элемента.

Лазерная система ЛСЛН обеспечивает генерацию импульсов излучения с  $\lambda_4 = 266$  нм с энергией до 25 мДж при частоте повторения до 30 Гц и энергии импульсов накачки 25 Дж. При смене лампы через каждые  $1.8 \times 10^7$  импульсов ресурс системы на порядок выше.

### 3. ЛАЗЕРНАЯ СИСТЕМА С ДИОДНОЙ НАКАЧКОЙ

Существенное повышение эффективности инфракрасного (ИК) лазера за счет снижения энергопотребления до семи раз достигается при замене ламповой накачки активного элемента на диодную, в частности, на одностороннюю боковую накачку активного элемента решетками лазерных диодов (РЛД), излучающих на длине волны  $\lambda_n = 808$  нм, совпадающей с узкой полосой поглощения ионов неодима. При этом в активном элементе тепловыделение существенно снижается и возникает возможность применить контактный отвод тепла от активного элемента и корпусов РЛД на радиатор, через который может прокачиваться морозостойкая жидкость, не испытывающая фотодеструкции вследствие отсутствия взаимодействия с излучением накачки [10].

Лазерная система с диодной накачкой (ЛСДН) с оптической схемой (рис. 2) представляется наиболее эффективной при эксплуатации УФ-лидара при отрицательных температурах окружающей среды.

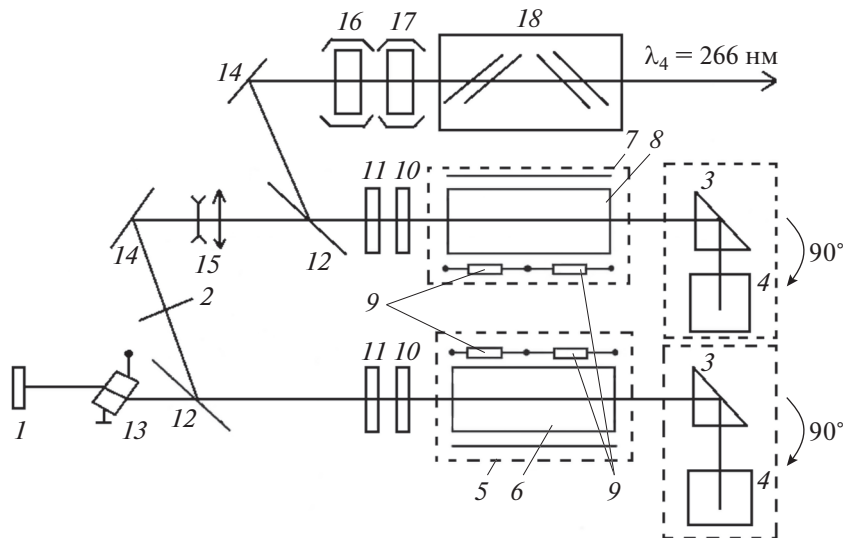
Высокая эффективность ЛСДН обеспечивается также за счет оптимизации конструкции квантрона и новых схемотехнических решений в излучателе с диодной накачкой активных элементов (УФ-ИЗДН), таких как, например:

1) выбор квантронов с односторонней боковой накачкой моноспектральными РЛД с улучшенным контактным отводом тепла от лазерных диодов к корпусу РЛД, что позволяет создать инверсную населенность в большом объеме активной среды [10];

2) выбор зеркально-призменного резонатора на основе оптической схемы двухпроходного усилителя с концевым отражателем в виде призмы-крыши, что снижает порог генерации и уменьшает расходимость излучения в два раза [9, 12];

3) выбор двухпроходного усилителя с телескопом Галилея позволяет увеличить выходную энергию моноимпульсов излучения ЛСДН и минимизировать расходимость излучения;

4) применение в оптических схемах генератора и усилителя призмы и четвертьволновые пластины позволяет устранить влияние деполяризующих эффектов в оптических компонентах [10].



**Рис. 2.** Оптическая схема УФ-ИЗДН: 1 – глухое зеркало, 2 – выходное зеркало, 3 – поворотная призма, 4 – призма-крыша, 5 – квантрон с сегментом зеркального отражателя и с генераторным активным элементом из АИГ: $\text{Nd}^{3+}$  размером  $\text{Ø}5 \times 100$  мм, 6, 7 – квантрон с сегментом зеркального отражателя и с усилительным элементом из АИГ: $\text{Nd}^{3+}$  размером  $\text{Ø}6.3 \times 100$  мм, 8, 9 – решетки лазерных диодов, 10 – четвертьволновая пластина с  $\varphi = 0^\circ$  к плоскости рисунка, 11 – четвертьволновая пластина с  $\varphi = 45^\circ$ , 12 – пластина-поляризатор, 13 – электрооптический элемент из  $\text{LiNbO}_3$ , 14 – поворотное зеркало, 15 – телескоп Галилея, 16 – нелинейный элемент из КТР в термостате, 17 – нелинейный элемент из ВВО в термостате, 18 – стопа из стеклянных пластинок (марки КУ-1).

Изменение длины волны излучения лазерных диодов (ЛД) от температуры со скоростью  $0.3 \text{ нм}/^\circ\text{C}$  вследствие изменения температуры окружающей среды и саморазогрева диодов приводит к необходимости применения энергозатратных систем термостабилизации охлаждающей жидкости. Во время переходных процессов при выходе на стационарный тепловой режим температура ЛД и, следовательно, эффективность накачки и распределение инверсной населенности по сечению активного элемента меняются, что может привести к превышению максимальной плотности энергии моноимпульсов излучения предельно допустимого уровня и разрушению оптических компонентов излучателя УФ-ИЗДН. Применение режима включения добротности резонатора после окончания свободной генерации, рассмотренного в предыдущем разделе для ЛСЛН, позволяет исключить возможность этой ситуации. При этом ресурс ЛСДН становится близким к ресурсу РЛД ( $1.8 \times 10^9$  импульсов).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моноимпульсные лазерные системы на АИГ: $\text{Nd}^{3+}$  по схеме лазер-усилитель с преобразованием частоты излучения в четвертую гармонику ( $\lambda_4 = 266 \text{ нм}$ ) могут быть построены на основе квантронов с ламповой или с поперечной диодной накачкой активных элементов из АИГ: $\text{Nd}^{3+}$ .

Выбор типа квантрона определяет оптическую схему излучателей. От режима охлаждения источников накачки (лампы или решетки лазерных диодов) зависит выбор хладагента (дистиллированная вода или морозостойкая жидкость типа тосол).

Для обеспечения надежности при работе ЛСЛН и ЛСДН в переходных режимах предложено использовать режим включения добротности резонатора после окончания свободной генерации. ЛСДН обеспечивает возможность работы с более высокой энергией импульсов излучения при более высоких частотах повторения импульсов. Преимуществом ЛСДН является длительный ресурс, низкий уровень электромагнитных помех, низкое энергопотребление и возможность работы при отрицательных температурах окружающей среды. К недостаткам ЛСДН следует отнести необходимость термостабилизации охлаждающей жидкости и высокую стоимость РЛД.

ЛСЛН и ЛСДН могут быть использованы в УФ-лидарах для дистанционного обнаружения нефтяных загрязнений в акваториях.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены в рамках государственного задания: по теме FMWE-2021-0001 Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН и по теме FFNS-

2022-0010 Научно-технологический центра уникального приборостроения РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Brown E., Fingas M.F.* // Marine Pollution Bulletin. 2003. V. 47. P. 477.
2. *Reuter R., Wang H., Willkom R.W. et al.* // Advances in Remote Sensing. 1995. V. 3. № 3. VII.
3. *Pashayev A., Tagiyev B., Allahverdiyev K. et al.* // Proc. SPIE. 2015. V. 9810. P. 981018
4. *Pelevin V., Zlinszky A., Khimchenko E., Toih V.* // Int. J. of Remote Sensing. 2017. V. 38. № 7. P. 1967.
5. *Таер Абд Дейдан, Пацаева С.В., Фадеев В.В., Южаков В.И.* // Вестн. моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 1994. Т. 35. № 2. С. 51.
6. *Федотов Ю.В., Белов М.Л., Матросова О.А., Городничев В.А.* // Изв. вузов. 2012. Т. 55. № 9/2. С. 105.
7. *Ляшенко А.И., Гольдин Ю.А., Гуреев Б.А.* // Сб. научн. тр. симп. “Методы измерений и математическое моделирование физических процессов: биофотоника, оптика и радиолокация”. Астрахань: Триада, 2018. С. 54.
8. *Казakov А.А., Ляшенко А.И., Струкова В.В.* Импульсный твердотельный лазер с генерацией высших гармоник. Пат. РФ № 2325021. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 14 от 20.05.2008.
9. *Володина Е.М., Ляшенко А.И.* Моноимпульсный твердотельный лазер. Пат. РФ на полезную модель № 204719. Оpubл. офиц. бюл. “Изобретения. Полезные модели” № 16 от 08.06.2021.
10. *Ляшенко А.И., Володина Е.М., Сапожников С.М., Подкопаев А.В.* // Матер. Четвертой Междунар. научн. конф. “Информационные технологии и технологии коммуникаций. Современные достижения”, посвященной 90-летию со дня основания Астраханского гос. техн. ун-та. Астрахань: АГТУ, 2020. С. 53.
11. *Ляшенко А.И.* // Физические основы приборостроения. 2017. Т. 6. № 3. С. 38.
12. *Гармаш В.М., Исаева Е.А., Ляшенко А.И.* // Физические основы приборостроения. 2016. Т. 5. № 3. С. 48.