

УДК 535.372, 632.08

## УЛЬТРАКОМПАКТНЫЙ ФЛУОРЕСЦЕНТНЫЙ ЛИДАР НА БАЗЕ ДИОДНОГО ЛАЗЕРА (405 нм, 150 мВт) ДЛЯ ЗОНДИРОВАНИЯ АКВАТОРИЙ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ С КВАДРОКОПТЕРА

© 2021 г. М. Я. Гришин<sup>1,\*</sup>, В. Н. Леднёв<sup>1</sup>, С. М. Першин<sup>1</sup>, П. О. Капралов<sup>2</sup>

Представлено академиком РАН И.А. Щербаковым 22.03.2021 г.

Поступило 25.03.2021 г.

После доработки 25.03.2021 г.

Принято к публикации 31.03.2021 г.

Разработан ультракомпактный (~300 г) флуоресцентный лидар на базе диодного лазера (405 нм, 150 мВт) и дифракционного миниспектрометра с линейкой фотодиодов. Натурный эксперимент по зондированию растительности с квадрокоптера показал перспективность автономного мониторинга больших площадей для раннего обнаружения очагов поражения посевных угодий.

*Ключевые слова:* лидар, флуоресценция, дистанционное зондирование, квадрокоптер

DOI: 10.31857/S2686740021030093

Известно, что лидары являются одним из эффективных инструментов дистанционного зондирования при использовании лазеров в широком спектральном диапазоне от УФ до ИК с энергией импульсов несколько Дж [1, 2]. Однако опасность поражения глаз излучением лазера ограничивает их применение для зондирования среды обитания при плотности энергии в пучке лазера, например, для видимого диапазона более 1 мкДж/см<sup>2</sup> [3]. Принимая этот фактор во внимание, мы предложили и разработали новый принцип зондирования среды обитания лидарами на диодных лазерах [4–6] и однофотонных приемниках – лавинных фотодиодах. Недавно [7] таким лидаром с плотностью энергии импульса <0.01 мкДж/см<sup>2</sup> было проведено зондирование над ледником Гарабаши аэрозольных слоев у вершины вулкана Эльбрус на удалении более 4000 м. Высокая эффективность, малая масса, низкое энергопотребление, помехоустойчивость цифровых цепей и работа диодного лазера в широком диапазоне температур от –100 до +20°C [8] позволили нам выиграть конкурс НАСА (США) среди лидаров других стран для зондирования атмосферы Марса. Впервые российский прибор был включен в состав миссии НАСА “Mars Polar Lander-99” и

как первый лидар (лидар РАН) был доставлен к Марсу 3 декабря 1999 г. [9]. Эта версия бортового лидара для космических миссий и мониторинга среды обитания с высокой частотой повторения импульсов (до сотен кГц) [6] явилась экспериментальным обоснованием использования предложенной нами концепции для лидарной навигации беспилотных автомобилей и других подвижных платформ [10].

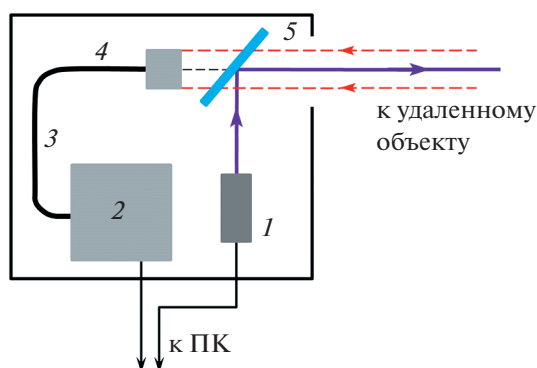
Несомненно, что прогресс в разработке диодных лазеров синего и УФ-диапазонов открыл возможность создания компактных флуоресцентных лидаров на их основе. Так, флуоресцентный лидар [11] с непрерывным диодным лазером (длина волны 445 нм, мощность 1.5 Вт, диаметр антенны 50 мм, масса 3.2 кг), установленный на октокоптер, обеспечил регистрацию сигнала флуоресценции травяного покрова и кроны деревьев в ночное время. Заметим, что при диаметре пятна пучка лазера (3 см) плотность мощности лазерного излучения на объекте зондирования составляет более 200 мВт/см<sup>2</sup> [11], что на два порядка превышает безопасный для глаз уровень [3] в дневное время. Эта пороговая величина повреждения глазкратно снижается в ночное время из-за расширения диаметра зрачка глаза. Оставалась неясной возможность флуоресцентного зондирования растительности лидаром с безопасным уровнем плотности мощности (в 10 раз ниже использованного в работе [11]) с борта квадрокоптера, что и являлось целью данной работы.

Схема лидара приведена на рис. 1. Основными компонентами лидара являются полупроводни-

<sup>1</sup> Институт общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup> ООО “Международный центр квантовой оптики  
и квантовых технологий”, Москва, Россия

\*E-mail: mikhail.grishin@kapella.gpi.ru



**Рис. 1.** Схема ультракомпактного флуоресцентного лидара: 1 – полупроводниковый лазер непрерывного действия, 2 – дифракционный миниспектрометр, 3 – оптическое волокно, 4 – волоконный конденсор, 5 – интерференционное зеркало.

ковый лазер непрерывного действия (1) (405 нм, 150 мВт) и дифракционный миниспектрометр (2) Ocean Optics STS-VIS (анализ спектра в диапазоне 330–820 нм обеспечивается диодной линейкой на 1024 ячейки с размерами отдельного пиксела  $7.8 \times 125$  мкм).

Интерференционное зеркало (5) (DMLP425, Thorlabs Inc.) направляет лазерный пучок к удаленному исследуемому объекту, где происходит упругое рассеяние (без изменения длины волны излучения), а также возбуждение флуоресценции. Конденсор (4) собирает рассеянное назад излучение (пунктир на рис. 1) и фокусирует его на вход оптического волокна (3), соединенного с входной щелью спектрометра. В состав спектрометра входило две сменных щели размером 10 и 200 мкм для вариации разрешающей способности в зависимости от ширины полосы сигнала флуоресценции. Так, разрешающая способность составляла 1 и 12 нм для щели 10 и 200 мкм соответственно. Управление лазером (1) и считывание данных с диодной линейки спектрометра осуществляется компактным одноплатным компьютером (Intel NUC), установленным на борту квадрокоптера, с помощью программного обеспечения, разработанного в среде National Instruments LabVIEW. Заметим, что лидар допускает работу в двух режимах: 1) автономно по заданной программе, 2) в режиме диалогового обмена командами и данными с удаленным компьютером оператора по радиоканалу Wi-Fi.

Габариты лидара составляют  $10 \times 15 \times 5$  см (масса 310 г), габариты компьютера  $11 \times 11 \times 3$  см (масса 600 г), напряжение питания 12 В, энергопотребление всей системы не более 40 Вт. Разделение лидара на две части (оптический блок и компьютер) позволяет оптимизировать его размещение на летающей платформе для сохранения положения центра масс.



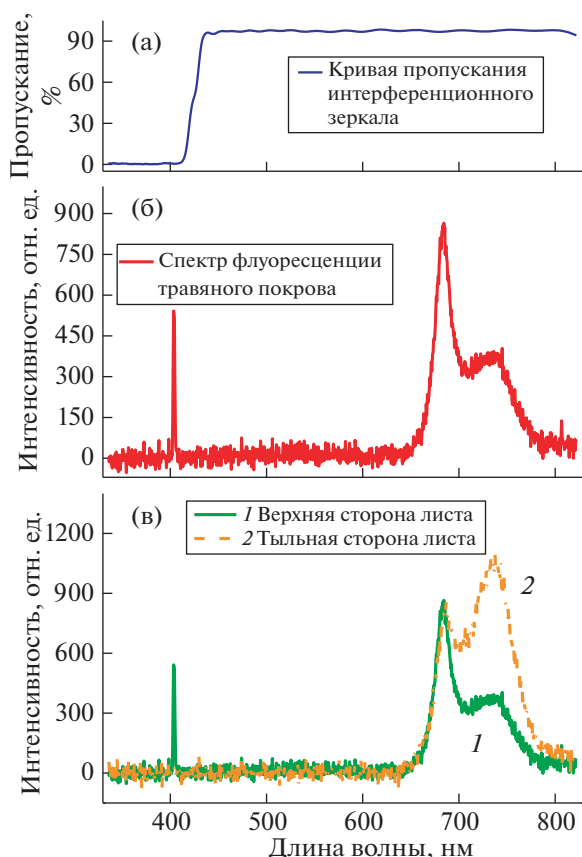
**Рис. 2.** Общий вид легкого квадрокоптера с установленным флуоресцентным лидаром (справа) и управляющим компьютером (слева).

Поскольку лидар был разработан для применения на легких беспилотных авианосителях, были проведены испытания в условиях натурального эксперимента, приближенных к реальной эксплуатации. Лидар был установлен на легкий квадрокоптер, имеющий грузоподъемность 2 кг и время автономного полета до 30 мин. На рис. 2 приведена фотография квадрокоптера с установленным лидаром.

В версии диалогового обмена связь с лидаром осуществляли дистанционно (до 300 м) с отдельного портативного компьютера (ноутбука) по каналу Wi-Fi на частоте 2.4 ГГц с использованием протокола Remote Desktop.

В натурном эксперименте квадрокоптер зависал неподвижно над травяным покровом, и лидар проводил измерения направлением в надир (к поверхности) по следующему протоколу: спектрометр регистрировал фоновый спектр (без подсветки лазером) в течение заданного времени экспозиции (0.5 с), далее включался лазер, и спектрометр регистрировал спектр с такой же экспозицией 0.5 с. Затем фон программно вычитали из сигнала и получали спектр флуоресценции. Для достижения заданного отношения сигнал/шум задавали число (10–20–50) повторных измерений в режиме накопления сигнала.

Интерференционное зеркало (5) со спектром пропускания в виде ступеньки (рис. 3а) отражает излучение с длиной волны  $<425$  нм и направляет лазерный пучок (405 нм) к объекту зондирования. Одновременно это зеркало существенно ослабляет упруго рассеянное излучение лазера на щели спектрометра. На рис. 3б показан пример спектра флуоресценции травяного покрова, полученного с помощью лидара в натуральных экспериментах (щель 10 мкм, высота 50 см). На рис. 3в приведены спектры листьев растения, полученные в лаборатории (щель 200 мкм) с удаления 3 м при зондировании верхней стороны листа (линия 1) и нижней стороны (штриховая линия 2).



**Рис. 3.** Кривая пропускания интерференционного зеркала (а), примеры спектров флуоресценции: (б) травяной покров (щель 10 мкм, высота 50 см), (в) верхняя поверхность листа дерева (сплошная линия 1) и тыльная поверхность (штриховая линия 2) (щель 200 мкм, дальность 3 м).

Как видно из рис. 3б, 3в, спектр состоит из линии лазерного излучения, соответствующей упругому рассеянию (405 нм), и полосы флуоресценции хлорофилла растительности (~650–780 нм). Из рисунков видно, что для верхней поверхности листьев (сплошная линия 1 на рис. 3в) большую интенсивность имеет компонента хлорофилла  $a$  ~ 685 нм, а при зондировании нижней поверхности листьев (штриховая линия 2 на рис. 3в) доминирует компонента хлорофилла  $b$  ~ 730 нм. Предполагается [12], что флуоресценция на длине волны ~685 нм обусловлена хлорофиллом фотосистемы 2, а на длине волны ~730 нм — фотосистемы 1 (фотосистемы 1 и 2 — элементы фотосинтетического аппарата растений, различающиеся по составу белков, пигментов и оптическим свойствам).

В настоящей работе была продемонстрирована возможность зондирования флуоресценции растений с борта легкого беспилотного летательного аппарата с помощью ультракомпактного лидара-флуориметра с безопасным для глаз уровнем

излучения. Высокая эффективность регистрации сигнала флуоресценции обусловлена, в том числе, совпадением длины волны возбуждающего лазерного излучения (405 нм) с полосой поглощения хлорофилла  $a$  [13].

Несомненно, что перспективой развития данного метода является повышение отношения сигнал/шум и дальности зондирования, что может быть обеспечено применением в качестве детектора спектра флуоресценции линейки лавинных однофотонных диодов с внутренним усилением и возможностью стробирования, как в случае зондирования многослойных облаков у вершины вулкана Эльбрус [7].

Особый интерес здесь представляет использование в этом лидаре выносной приемо-передающей антенны с синтезированной апертурой большой суммарной площади, защищенной патентом России № 2 692 121. Принимая во внимание волоконный ввод сигнала в спектрометр, а также транспорт излучения лазера по волокну, такая антенна допускает снижение на волоконном фидере от платформы носителя с целью повышения отношения сигнал/шум, а также исключения возмущения поверхности (растения, акватории) зондирования воздушным потоком от винтов.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации на создание и развитие научных центров мирового уровня «Центр фотоники» (№ 075-15-2020-912).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bunkin A., Voliak K.* Laser Remote Sensing of the Ocean: Methods and Applications. N.Y.: Wiley&Sons, 2001.
2. *Cecchi G., Bazzani M., Pantani L., Mazzinghi P., Raimondi V.* Fluorescence lidar remote sensing of vegetation // Proc. SPIE Remote Sensing for Agriculture, Forestry, and Natural Resources. 1995. V. 2585. P. 48–56.
3. *Sliney D., Wolbarsht M.* Safety with lasers and other optical sources: a comprehensive handbook. N.Y.: Springer, 2013. 1035 p.
4. *Першин С.М.* Лидар / Большая российская энциклопедия. М.: Большая российская энциклопедия. Т. 17. 2011. С. 451–452.
5. *Pershin S., Linkin V., Makarov V., Prochazka I., Hamal K.* Spaceborn laser altimeter based on the single photon diode receiver and semiconductor laser transmitter // Proc. Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). OSA Technical Digest. 1999. V. 10. P. CF11.
6. *Pershin S.* A new generation of the portable backscatter Lidar with eye-safe energy level for environmental sensing // Proc. International Symposium «Aerospace Sensing». SPIE's. 1994. V. 2222. P. 392. Orlando, Apr. 4.

7. *Pershin S.M., Grishin M.Ya., Zavozin V.A., Lednev V.N., Lukyanchenko V.A., and Makarov V.S.* Aerosol layers sensing by an eye-safe lidar near the Elbrus summit // *Laser Phys. Lett.* 2020. V. 17 (2). 026003.
8. *Pershin S.M.* Astrophysica, detector a laser, escolhido em concurso internacional esturdara a atmosfera mar-siana: Aparelho russo integra sonda da NASA // *Scien-cia Hoje.* 1999. № 12. P. 71–74.
9. [https://mars.nasa.gov/internal\\_resources/818/](https://mars.nasa.gov/internal_resources/818/)
10. *Hecht J.* Lidar for self-driving cars // *Opt. Photon. News.* 2018. V. 29 (1). P. 26–33.
11. *Wang X., Duan Z., Brydegaard M., Svanberg S., Zhao G.* Drone-based area scanning of vegetation fluorescence height profiles using a miniaturized hyperspectral lidar system // *Applied Physics B.* 2018. V. 124. P. 207.
12. *Кочубей С.М.* Организация пигментов фотосинте-тических мембран как основа энергообеспечения фотосинтеза. Киев: Наук. думка, 1986. 188 с.
13. *Jacobs E.E., Holt A.S.* The absorption spectrum of chlorophyll a crystals // *J. Chem. Phys.* 1954. V. 22 (1). P. 142.

## ULTRACOMPACT FLUORESCENCE LIDAR BASED ON A DIODE LASER (405 nm, 150 mW) FOR REMOTE SENSING OF WATERBODIES AND UNDERLYING SURFACE FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES

**M. Ya. Grishin<sup>a</sup>, V. N. Lednev<sup>a</sup>, S. M. Pershin<sup>a</sup>, and P. O. Kapralov<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> *Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>b</sup> *Russian Quantum Center, Moscow, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS I.A. Shcherbakov

We report on developing an ultracompact (~300 g) fluorescence lidar based on a diode laser (405 nm, 150 mW) and a diffraction spectrometer equipped with a linear photodiode array. Field tests have been performed on remote sensing of vegetation from a quadcopter. The field tests have shown the prospects of autonomous lidar monitoring for early crop disease detection.

*Keywords:* lidar, fluorescence, remote sensing, unmanned aerial vehicles