



Исследования состава атмосферы с помощью безопасного для глаз лидара По материалам компании WAVELENGTH ELECTRONICS

Я. Кинг, *Wavelength Electronics, США;*

В. Муравьев, *Специальные системы. Фотоника; www.sphotonics.ru, Санкт-Петербург, Россия*

Состав атмосферы можно исследовать с помощью лидаров. Национальный центр атмосферных исследований США (NCAR) разработал лидар для атмосферных исследований, безопасный для глаз пользователей. Прибор, использующий технологию вынужденного комбинационного рассеяния, генерирует безопасное излучение на длине волны ~1,5 мкм. Дальность действия прибора достигает 9 км. От многих ранее разработанных конфигураций лидаров его отличают более высокие эксплуатационные характеристики и безопасность для глаз. Требование безопасного для глаз излучения является необходимым условием для расширения допустимых областей локаций до густо заселенных районов и местностей, близлежащих к аэропортам.

Ключевые слова: лидар, аэрозоль, упругое комбинационное рассеяние, комбинационное рассеяние, рэфракция Рамана, КРС, Стокс, задающий лазер, исследование атмосферы, безопасный для глаз, инжекция излучения, драйвер лазера, контроллер температуры

Статья получена: 02.10.2019. Принята к публикации: 30.10.2019.

Eye-safe Atmospheric Lidar Measurements

W. King, *Wavelength Electronics, Bozeman, MT, USA;*

V. Muraviev, *Special Systems. Photonics ; www. sphotonics, St. Petersburg, Russia*

Through the use of lidar, various details of atmospheric composition can be discerned. The National Center for Atmospheric Research developed an eye-safe lidar implementation for atmospheric investigation. Using stimulated Raman scattering (a third-order nonlinear process) the instrument output is eye-safe at approximately 1.5 μm. The instrument has a range of up to 9 km. It also has performance and durability advantages over many previously reported eye-safe lidar configurations. Eye-safe operation is necessary to broaden the available locations for measurements, including more populated areas and near airports.

Ключевые слова: лидар, аэрозоль, упругое комбинационное рассеяние, комбинационное рассеяние, рэфракция Рамана, КРС, Стокс, задающий лазер, исследование атмосферы, безопасный для глаз, инжекция излучения, драйвер лазера, контроллер температуры

Received: 02.10.2019. Accepted: 30.10.2019

* Примечание. Компания Wavelength Electronics (США) разрабатывает драйверы, контроллеры и управляющую электронику для лазерных диодов, которая находит применение в научных лабораториях, системах для исследования параметров атмосферы (газо-анализаторах), оборудовании для анализа параметров и подсчета количества частиц, медицинском диагностическом и лечебном оборудовании, оборудовании для космических исследований, оборудовании для контроля производственных процессов, спектроскопии и телекоммуникационном оборудовании. Компания основана в 1993 году.

ВВЕДЕНИЕ

Использование лидаров для изучения атмосферы представляет интерес для метеорологов, так как дает информацию о пограничных слоях, распределении аэрозолей и загрязнении атмосферы в более широком диапазоне и с меньшими временными затратами. Однако в большинстве случаях лидары с упругим обратным рассеянием используют зондирующий луч с небезопасной для глаз длиной волны и/или мощностью. Таким образом, возникла необходимость разработки безопасной для глаз методики лидарных измерений.

Безопасная для зрения технология позволила эксплуатировать аппаратуру в населенных пунктах и районах вблизи аэропортов. Хорошо известно, что излучение видимого и близкого к нему диапазона фокусируются на сетчатке, что делает это излучение особенно опасным для зрения. Использование длин волн, которые не фокусируются на сетчатке, является одним из безопасных для глаз вариантом лидарных измерений.

Рабочая длина волны ~1,5 мкм была выбрана по нескольким причинам. Во-первых, мощность излучения, безопасная для глаз, на данной длине волны максимальна из возможных (рис. 1). Во-вторых, существует множество коммерчески доступных на рынке приемников, подходящих для детектирования сигналов на этой длине волны, которые не требуют специального охлаждения.

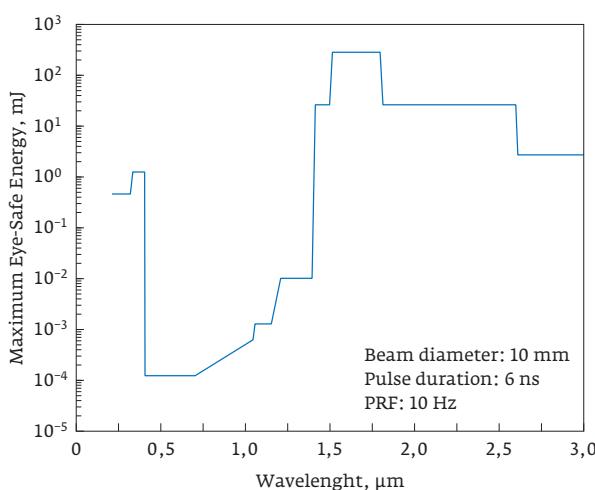


Рис. 1. Распределение максимальной величины энергии, безопасной для глаз в зависимости от длины волны излучения (длина волны ~1,5 мкм является оптимально допустимой при заданных параметрах диаметра пучка, длительности импульса и частоты повторения); источник [1] Applied Optics

Компания «Специальные Системы. Фотоника» является поставщиком и интегратором лазерно-оптических, волоконно-оптических компонентов, лабораторного оборудования и лазерных систем различного назначения. В их числе модульные контроллеры для лазерных диодов и квантовых-каскадных лазеров, устройства управления температурой лазерных диодов произведенные в компании WAVELENGTH ELECTRONICS.

Наконец, чем больше длина волны, тем меньшее молекулярное рассеяние они испытывают, и их вклад в фоновую составляющую общей светимости неба при измерении сигнала оказывается более низким, чем ультрафиолетовый свет в безопасном для глаз диапазоне. Эти факторы приводят к увеличению контрастности измерений и увеличению отношения сигнал/шум.

Вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР) использовалось для смещения излучения накачки, не являющегося безопасным для глаз, в длинноволновую часть спектра. ВКР – это процесс нелинейного рассеяния третьего порядка (интенсивность рассеянного света очень мала), который возбуждает молекулярные колебания. Эти молекулярные колебания вызывают смещение длины волны после рассеяния. Зная колебательные характеристики рассеивающей среды и длину волны излучения накачки, можно рассчитать различные допустимые сдвиги длины волны (частоты).

Также возможно спонтанное комбинационное рассеяние. Оно начинается со спонтанного испускания фотона среды. Однако в этом случае свойства пучка и мощность будут меняться. Чтобы избежать этих нежелательных флуктуаций, применяется дополнительный лазер (задающий) для стимуляции определенных комбинационных переходов и управления пространственными параметрами пучка.

Роль задающего лазера заключается в усилении определенным образом комбинационного рассеяния (КР). Когда задающий лазер взаимодействует со средой комбинационного рассеяния, он эффективно смещает рассеяние в сторону определенной длины волны. В данном эксперименте желательна была первая стоксовая линия, поэтому излучение задающего лазера соответствовало первой стоксовой линии КР.

Применение задающего лазера позволило устранить колебания энергетических и пространственных свойств пучка. Задающий лазер возбуждает

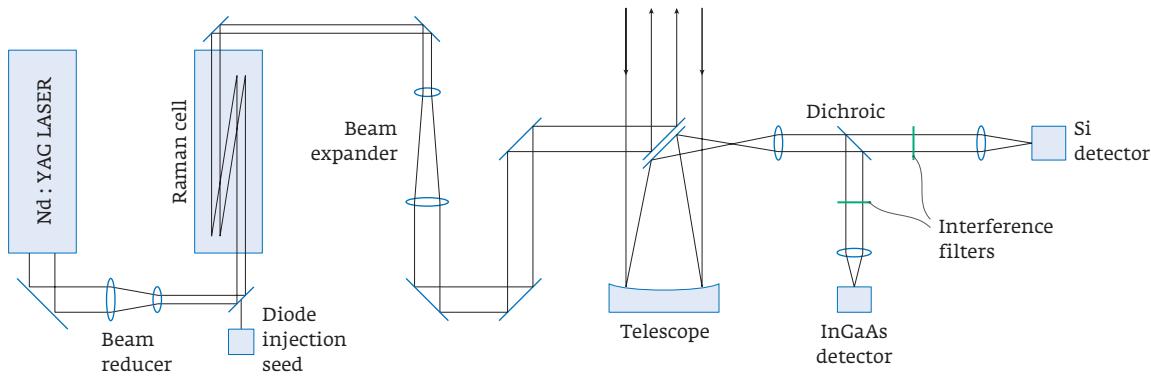


Рис. 2. Схема эксперимента для лидарных измерений на базе метода КР (источник [1] Applied Optics)

выбранный комбинационный переход, поэтому метод называется методом вынужденного комбинационного рассеяния, в отличие от спонтанного комбинационного рассеяния.

Излучение накачки (излучающие на небезопасной для зрения длине волны 1064 нм) направляли в регулируемой многопроходной конфигурации через газовый элемент, заполненный циркулирующим метаном (CH_4). На рис. 2 показана используемая экспериментальная конфигурация. Многопроходная конфигурация увеличивает оптическую длину излучения, проходящего через среду. Регулировка оптического пути через метан позволила эмпирически оптимизировать выходную мощность стоксовой линии. Газовая ячейка была специально разработана для подавления линий, отличных от первых стоксовых линий, что еще больше усиливает оптимизацию первой длины волны Стокса. Излучение накачки, рассеянное через метан, имеет безопасную для глаз длину волны 1543 нм.

После того как длина волны системы была переведена в безопасный для глаз режим, лидарный луч можно было использовать для получения полезных данных.

ПРЕДШЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДИКИ

Предыдущие лидарные системы накачки CH_4 для смещения длины волны сталкивались с проблемами прозрачности окна газовой ячейки. Поскольку ВКР – это нелинейный процесс третьего порядка, он требует использования высокой плотности энергии. Чтобы достичь необходимого порога плотности энергии, необходимо

точно сфокусировать пучок накачки внутрь газовой ячейки. Сфокусированный пучок приводил к эффекту оптического пробоя газа. Со временем это явление приводило к тому, что окна элементов покрывались слоем сажи, что ухудшало технические характеристики.

Были также разработаны методики, не использующие ВКР. Твердотельные оптические параметрические генераторы (ОПГ) использовались в некоторых лидарных системах в качестве альтернативы ВКР для смещения длины волны в безопасную для глаз область. Данная методика обладает преимуществом, заключающимся в отсутствии необходимости использования метана. Но, к сожалению, ОПГ приводят к высокой расходности пучка при мощностях, необходимых для проведения лидарных измерений, что увеличивает сложность схемы измерения.

Владея этой информацией, исследователи решили использовать метод ВКР. Чтобы избежать загрязнения, о котором сообщалось в предыдущих системах, они использовали лазер с накачкой большей мощности, который не фокусировался в ячейке.

УПРАВЛЕНИЕ СТОКСОВЫМ СДВИГОМ

Зависимость получаемой длины волны от длины волны накачки лазера и длины волны комбинационного перехода задается формулой

$$\frac{1}{\lambda_n^s} = \frac{1}{\lambda_p} - \frac{n}{\lambda_R} \quad (1)$$

и



$$\frac{1}{\lambda_n^{AS}} = \frac{1}{\lambda_p} + \frac{n}{\lambda_R} \quad (2)$$

где λ_n – длина волны п-ой Стоксовой (S) или антистоксовой (AS) компоненты, λ_p – длина волны накачки, а λ_R – длина волны комбинационного перехода.

Излучение накачки 1064 нм, взаимодействуя с метаном, возбуждает излучение с длинами волн 1543 нм, 2808 мкм и 812 нм [1]. Это первая стоксовая, вторая стоксовая и первая антистоксовская длины волн соответственно. Исследователи описывают свой метод для надежного вывода вынужденного комбинационного рассеянного света на длине волны 1543 нм следующим образом: «Как правило, Стоксово КР инициируется спонтанным излучением фотона, а следовательно, энергетические и пространственные характеристики колеблются. Чтобы предотвратить эти колебания, можно использовать задающее излучение высокостабильного перестраиваемого лазера перед газовой ячейкой, работающего на длине волн Стокса. Ячейка облучается диодным лазером непрерывного излучения с длиной волны 1543,73 нм, мощностью 20 мВт и диапазоном перестройки 3 нм».

Было предпринято несколько шагов для обеспечения того, чтобы первая длина волны Стокса была преобладающей на выходе из газовой ячейки, находящейся под давлением. Во-первых, использовалось инъекция диодным лазером, как было описано выше. Во-вторых, особое оптическое внимание было уделено подавлению второй стоксовой длины волны, а также первой антистоксовой длины волны.

Драйвер лазера WLD3343 и контроллер температуры WTC3243 производства компании Wavelength Electronics использовались для того, чтобы контролировать выходные параметры задающего лазера. Эти модули соответствовали требованиям, предъявляемым к задающему лазеру. Требуемая низкая мощность обеспечила работу драйвера вдали от верхней и нижней границ тока драйвера, где возможен высокий вклад шума. Для точной настройки выходной длины волны, а следовательно возбуждения требуемой линии Стокса, длина волны лазера настраивалась через подстройку тока и температуры. Высокоточный контроллер температуры и драйвер лазера позволили точно контролировать длину волны. Таким образом, излучение с длиной волны 1543 нм на выходе газовой ячейки было оптимизировано.

В дополнение к параметрам задающего лазера были также настроены другие экспериментальные параметры для максимизации производительности на длине волны 1543 нм. Эти параметры включают энергию импульса лазера накачки, давление в газовой ячейке и длину пути внутри газовой ячейки.

КАЧЕСТВО ПУЧКА

Качество пучка также было важным параметром для этих измерений. Расходимость пучка (θ) задается формулой

$$\theta = 2M^2\lambda/\pi w_0, \quad (3)$$

где M^2 – коэффициент качества пучка, λ – длина волны, а w_0 – радиус перетяжки пучка.

Чтобы ограничить расходимость выходного пучка и избежать проблем, возникающих с системами ОПГ, исследователи использовали два метода.

Во-первых, качество пучка было улучшено с помощью задающего лазера. Важно, что задающий лазер излучает почти идеальный гауссов пучок. Известно, что токовые шумы драйвера могут влиять на пространственные свойства пучка. Таким образом, низкий уровень шума драйвера положительно влияет на качество пучка. Без оптимальных пространственных характеристик задающего лазера качество лазерного пучка на выходе ячейки будет ухудшаться. Во-вторых, после выхода из многопроходной ячейки пучок был расширен перед исследуемой средой (см. рис. 2). Оба метода помогают ограничить расходимость пучка, и, таким образом, дают этой конфигурации преимущество перед системами на базе ОПГ.

РЕЗУЛЬТАТЫ

С помощью системы лидаров на базе ВКР исследователи смогли получить данные о составе атмосферы с разрешением 53 метра. Разрешение получаемых данных было ограничено детектором, а не схемой передачи.

Эксперимент проводился в два этапа. Один набор данных был получен в ходе экспериментов, в которых лазерный луч лидара был направлен вертикально, а второй набор данных был получен, когда луч лидара был направлен под углом 3° к горизонту.

Сбор первых данных, показанный на рис. 3, занял приблизительно 17 минут с общей дальностью 700 м. Исследователи также провели эксперимент со стандартным излучением накачки

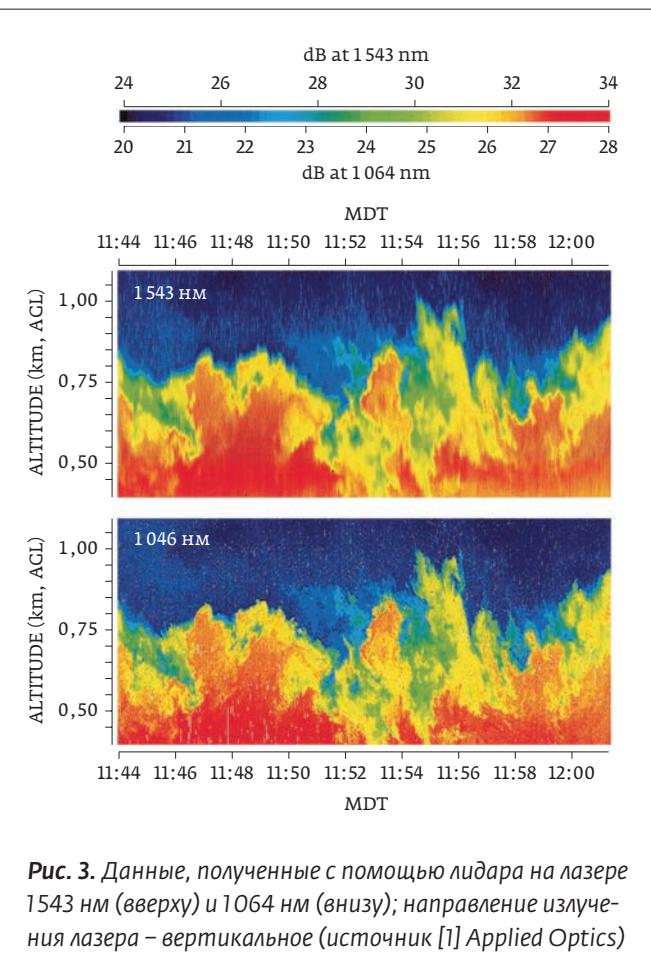


Рис. 3. Данные, полученные с помощью лидара на лазере 1543 нм (вверху) и 1064 нм (внизу); направление излучения лазера – вертикальное (источник [1] Applied Optics)

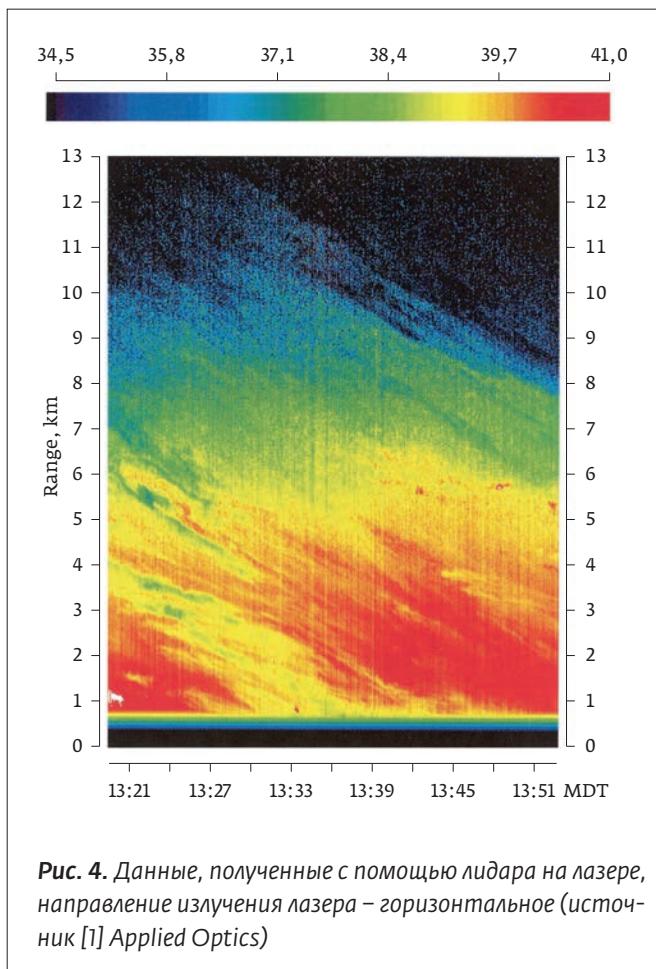


Рис. 4. Данные, полученные с помощью лидара на лазере, направление излучения лазера – горизонтальное (источник [1] Applied Optics)

1064 нм для контроля собранных данных. Данные экспериментов с длинами волн 1064 и 1543 нм очень хорошо коррелируют друг с другом, что свидетельствует о том, что безопасная для глаз лидарная система работает, как и ожидалось.

Данные, полученные в ходе второго эксперимента (рис. 4) с горизонтально направленным лазером, позволили различить когерентные структуры на расстоянии примерно 9 км. Эти данные были собраны в течение 33 минут с дальностью примерно 9 км. Полученные данные позволили получить такую информацию об аэрозольных загрязнениях и атмосферных слоях. Эта информация важна для исследований, проводимых метеорологами.

РЕШЕНИЯ ОТ WAVELENGTH ELECTRONICS

Исследователи продемонстрировали улучшенную лидарную систему для исследования аэрозолей, в которой использовалась более высокая мощность импульса накачки, чем в предыдущих системах. В сочетании с инжекцией затравочного излучения с помощью диодного лазера, это позволило про-

водить безопасные для глаз исследования состава атмосферы как функции расстояния и времени.

Задающий лазер помогал собирать эти данные, оптимизируя выходной пучок с длиной волны Стокса. Использование задающего лазера позволило улучшить качество пучка, повысило эффективность преобразования для длины волны 1543 нм и уменьшило флуктуации энергии от импульса к импульсу.

Управляющие компоненты WLD3343 и WTC3243 от Wavelength Electronics использовались для управления задающим лазером. Длина волны выходного излучения инжектора была ключевым параметром для управления, так как это позволяло оптимизировать выходное излучение. Лазерный драйвер серии WLD с токовой стабильностью 200 пА в сочетании с контроллером температуры WTC со нестабильностью менее 1 мК позволил осуществить точную настройку длины волны.

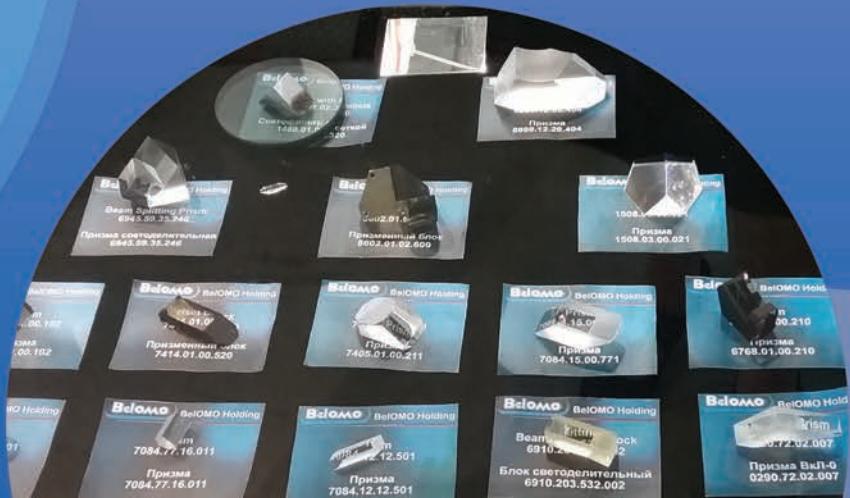
ЛИТЕРАТУРА

1. Mayor S. D., Spuler S. M. Raman-shifted eye-safe aerosol lidar. *Appl. Optics*. 2004; 43(19): 3915–3924.



**ОАО «ММЗ имени С.И. Вавилова –
управляющая компания холдинга «БелОМО»**

Оптический завод «Сфера»



Республика Беларусь, 220114,
г. Минск, ул. Макаенка, 23
Тел.: (+375 17) 325-52-91
Тел./факс: (+375 17) 276-27-71
E-mail: sfera.ved@belomo.by; sfera@belomo.by

www.belomo.by