

ФИЗИКА, МЕХАНИКА, ХИМИЯ

doi: 10.51639/2713-0576_2024_4_3_82

УДК 535.621(075.8)

ГРНТИ 29.31.29

ВАК 1.3.19

Выбор режима счета фотонов для лидара комбинационного рассеяния света¹ Урасов К. В., *^{1,2}Шеманин В. Г.

¹-Новороссийский политехнический институт (филиал) Кубанского государственного технологического университета, Новороссийск, 353900, Россия,
г. Новороссийск, ул. Карла Маркса, дом 20

²- Новороссийский филиал Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (НФ БГТУ им. В.Г. Шухова), 353919, Россия,
г. Новороссийск, Мысхакское шоссе, дом 75

e-mail: * tytnet22nekogo@mail.ru, vshemanin@mail.ru**Аннотация**

В работе предложена система счета фотонов для лидара комбинационного рассеяния света и сделан выбор фотоумножителя ФЭУ-79 и режима работы этой системы счета фотонов для повышения чувствительности лидарных измерений за счет регистрации очень слабых световых сигналов. Система включает блок высоковольтного питания ФЭУ и усилитель-формирователь для ввода счетных импульсов в ПК. Управление работой системы ведется программно, задается начало времени счета и само время регистрации импульсов, которое и является мерой интенсивности лидарного сигнала комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами.

Ключевые слова: счет фотонов, лидар, фотоумножитель.

Введение

Счет фотонов – это область оптического приборостроения, которая включает измерения и анализ индивидуальных фотонов света и основана на его квантовой природе [1]. Такой подход позволяет измерять очень слабые оптические сигналы, которые не видят обычные фотодетекторы и выполнять измерения интенсивности света с высокой точностью, что важно в различных областях науки и техники [2].

Счет фотонов является ключевым инструментом в квантовой оптике и основой для разработки новых квантовых технологий [2, 3].

Поэтому счет фотонов нашел применение в астрономии для изучения слабо светящихся объектов в космосе, таких как удаленные галактики и звезды, в биологии для исследования биомолекул и клеток с помощью флуоресцентной микроскопии, в медицине для разработки новых методов диагностики и лечения болезней, использующих лазерное излучение, а также для разработки новых систем лазерной связи с повышенной скоростью и безопасностью [2, 3].

Технологии счета фотонов используют различные фотоприемники, такие как фотоумножители [4], преобразующие один фотон в электронный сигнал, лавинные

фотодиоды, работающие в режиме лавинного умножения и позволяющие усиливать сигнал от одного фотона [3] и сверхпроводящие детекторы [5-7], основанные на сверхпроводимости и способные улавливать отдельные фотоны.

Поэтому целью настоящей работы является выбор режима работы и разработки системы счета фотонов для повышения чувствительности лидарных измерений с возможностью регистрации слабых световых сигналов, которые невозможно зарегистрировать традиционными аналоговыми методами.

В работе будет сделан выбор фото приемного устройства и режим его работы в системе счета фотонов. Так как дифференциальное сечение комбинационного рассеяния света газообразными молекулами атмосферы очень мало [8] выбор фотоприемника будет решающим фактором создания высокоэффективной системы счета фотонов.

Способы повышения чувствительности системы

Повышение чувствительности измерений в режиме счета фотонов - это ключевой аспект для многих исследований и приложений. Вот несколько ключевых подходов к повышению чувствительности [9-11]. Главная задача улучшения детекторов - это увеличение квантовой эффективности детектора, которая определяет вероятность регистрации падающего фотона. Более высокая квантовая эффективность позволяет уловить больше фотонов, что улучшает чувствительность; снижает шум, так как любые шумы в сигнале от детектора могут замаскировать слабые сигналы. А разработка детекторов с низким уровнем шума позволяет повысить чувствительность измерений. Увеличение размера детектора позволяет улавливать больше фотонов, что также улучшает чувствительность. Этому способствует и использование более чувствительных новых материалов, например, сверхпроводников или полупроводников с особыми свойствами [7, 10].

Традиционный фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) представляет собой особую форму вакуумной трубки, преобразующую поступающие фотоны в электрический сигнал, который внутри трубки усиливается с помощью электронного умножителя [4]. Фотон попадает на фотокатод ФЭУ, вызывая появление электрона, который затем фокусируется в электронном умножителе, состоящим из ряда вторичных электродов известных как система динодов, каждый из которых испускает дополнительные электроны при поглощении падающих электронов, тем самым создавая эффект лавинного умножения в устройстве. На динодах поддерживается определенный электрический потенциал, который увеличивается от динода к диноду для ускорения электронов через фотоэлектронный умножитель в направлении анода, где они поглощаются, тем самым генерируя выходной сигнал в виде электрического импульса. Такой процесс требует подачи на фотоэлектронный умножитель высокого напряжения обычно 1 ... 3 кВ. На рис. 1 показано схематическое изображение традиционного фотоэлектронного умножителя.

Фотоэлектронный умножитель может использоваться в режиме Гейгера для обнаружения единичных фотонов [12], однако очень высокий внутренний ток требует электрического сброса фотоэлектронного умножителя после регистрации каждого фотона, что приводит к мертвому времени, в течение которого фотоны не могут наблюдаться. Несмотря на то, что существует несколько материалов для изготовления фотокатодов с различными спектральными характеристиками, которые могут быть использованы в зависимости от диапазона длин волн для регистрации фотонов, традиционные вакуумные ФЭУ обычно имеют лучшую чувствительность в более коротковолновой области спектра - длины волн синего и ультрафиолетового диапазона.

Также ФЭУ, как правило, имеют относительно большие активные области (несколько десятков миллиметров в диаметре), но часто это приводит к высоким уровням

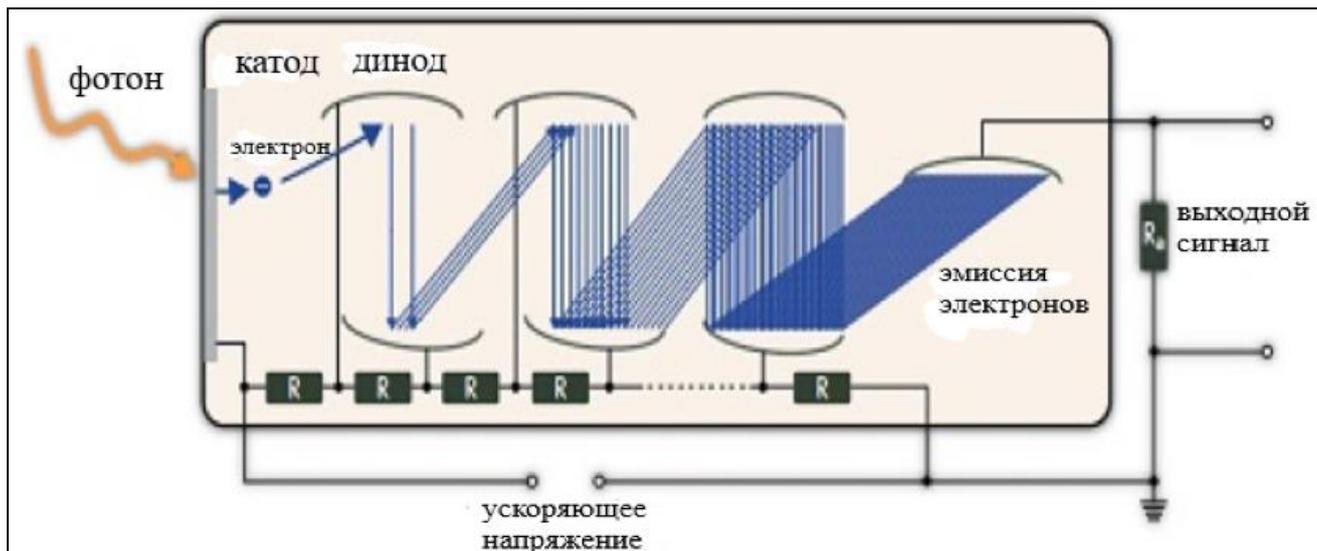


Рис. 1. Схематическое изображение традиционного фотоэлектронного умножителя (ФЭУ)

темнового тока и склонности к послеимпульсам, эффект которых заключается в появлении ложных импульсов на выходе ФЭУ, несмотря на то, что фотонов не было [8].

Лавинные фотодиоды (APD – avalanche photo diode) для регистрации единичных фотонов представляют собой фотодиоды с высокой чувствительностью и с очень быстрым временем отклика [13]. В отличие от обычных PIN фотодиодов лавинные фотодиоды используют внутреннее усиление для создания лавины электронно-дырочных пар под действием ударной ионизации. Предпосылкой к этому является достаточно высокое напряжение смещения, которое расширяет область поглощения лавинного фотодиода, чтобы обеспечить появление достаточного количества электронов и дырок при ионизации (рис. 2).

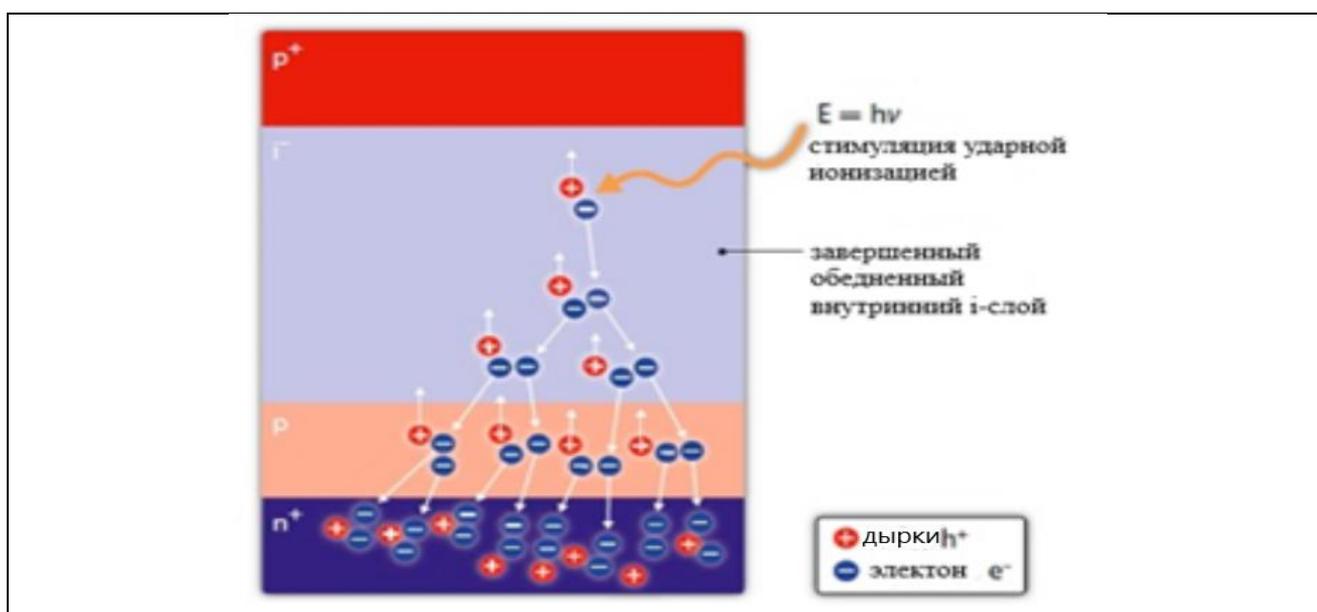


Рис. 2. Принцип работы лавинного фотодиода.

Падающий фотон создает электронно-дырочную пару. Электрон, который ускоряется, создает дополнительную электрон-дырочную пару посредством ударной ионизации и возникает эффект лавины

При работе ниже напряжения пробоя лавина очень скоро гасит себя из-за фрикционных потерь внутри полупроводника. Специально сконструированный лавинный фотодиод также может быть использован в режиме Гейгера, где напряжение смещения устанавливается выше напряжения пробоя, что позволяет поддерживать лавину и достигать внутреннего усиления до 108. Такие лавинные фотодиоды, как правило, называют лавинными фотодиодами для регистрации единичных фотонов (SPAD фотодиоды).

Гейгеровский режим работы при таком высоком коэффициенте усиления неизбежно приводит к очень высокому значению тока протекающего в SPAD фотодиоде, который должен находиться под контролем с использованием соответствующей схемы гашения для того, чтобы предотвратить повреждение фотоприемника.

В своей простейшей форме схема гашения может быть основана на токоограничивающем резисторе, расположенном последовательно с лавинным фотодиодом, который будет гасить лавину, если значение резистора достаточно велико. Однако такие схемы обычно имеют долгое время восстановления, ограничивающее максимальную скорость счета. По этой причине большинство коммерчески доступных модулей счета фотонов на основе SPAD фотодиодов имеют активную схему гашения, которая регистрирует возникновение лавины, а затем снижает в течение нескольких наносекунд напряжение смещения на лавинном фотодиоде ниже напряжения пробоя [14].

Результатом такого процесса является относительно малое мертвое время, как правило, около 50 нс, после чего напряжение смещения возвращается на прежний уровень, позволяя зарегистрировать следующий фотон.

Таким образом, можно легко достигнуть максимальную скорость счета в 10 МГц и выше. В настоящее время лучшие модули счета фотонов на основе SPAD фотодиодов позволяют получить скорость счета темновых импульсов менее 10 импульсов/с, что соответствует динамическому диапазону свыше 10^8 .

Совсем недавно были разработаны изготавливаемые на основе КМОП технологии многоячейстые кремниевые лавинные фотодиоды, работающие в гейгеровском режиме, которые часто называют кремниевыми фотоумножителями [6, 10].

Эта технология представляется перспективной, обладая такими преимуществами как - относительно низкая себестоимость фотоприемников благодаря традиционному КМОП процессу, низкое рабочее напряжение, компактные размеры с большой общей активной областью и хорошим временным разрешением. Однако на сегодняшний день темновой ток, который на несколько порядков выше, чем в обычном SPAD фотодиоде и низкая квантовая эффективность в более длинноволновой области спектра означает, что эти устройства по-прежнему значительно уступают одноэлементным SPAD фотодиодам, используемым в большинстве применений связанных со счетом единичных фотонов.

Однако продолжается создание более сложных детекторных систем. Это многопиксельные детекторы с большим количеством пикселей, которые позволяют регистрировать фотоны с высокой пространственной разрешающей способностью [5].

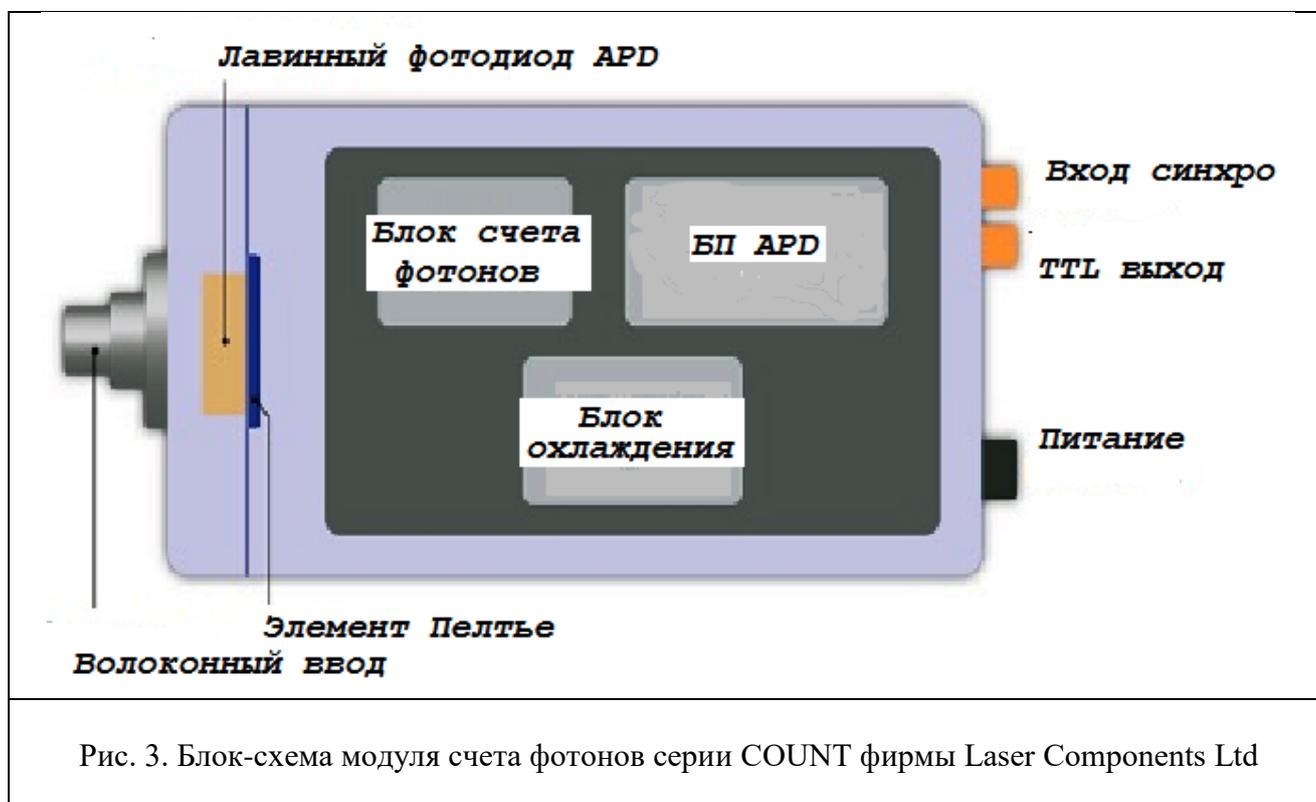
Также и детекторные массивы, причем использование нескольких детекторов позволяет увеличить общее количество регистрируемых фотонов и улучшить чувствительность измерений.

Для улучшения техники измерений используются методы усиления слабых сигналов, как например, фото умножение, лавинные фотодиоды, которые позволяют увеличить сигнал от отдельного фотона. С другой стороны, возможно применение методов уменьшения шумов за счет фильтрации шумов и повышения отношения сигнала к шуму. А сбор данных в течение длительного времени или использование нескольких детекторов позволяет увеличить отношение сигнала к шуму.

Экспериментальная установка

Для оптимизации экспериментальной установки главное – это снижение потерь света [1]. Минимизация потерь света в оптической системе позволяет увеличить количество фотонов, достигающих детектора. Так же возможно использование более эффективных оптических элементов: Применение линз и зеркал с более высокой прозрачностью позволяет увеличить количество фотонов, проходящих через оптическую систему. И наконец, оптимизация геометрии эксперимента: Правильный выбор геометрии эксперимента позволяет увеличить количество фотонов, падающих на детектор.

Коммерчески доступные модули SPAD имеют термоэлектрическое охлаждение, оптимизированную схему активного гашения и компактный корпус, что позволяет пользователю достигать максимальной производительности фотоприемника. На рис. 3 показана блок-схема детектора для счета фотонов серии COUNT компании Laser Components Ltd. (Германия) с разъемом для крепления оптического волокна [14].



Однако в предлагаемой системе используется фотоэлектронный умножитель ФЭУ-79 с охлажденным фотокатодом и магнитным экраном для уменьшения шума или числа темновых импульсов. Вся система включает блок высоковольтного питания ФЭУ и усилитель-формирователь для ввода счетных импульсов в ПК. Управление работой системы ведется программно и задается начало времени счета и само время регистрации импульсов, которое и является мерой интенсивности лидарного сигнала комбинационного рассеяния света исследуемыми молекулами [1].

Оптическая схема лидара комбинационного рассеяния света построена, как и в [1, 16]. В качестве зондирующего – используется излучение третьей и второй гармоники YAG: Nd лазера с накачкой полупроводниковым лазером с длинами волн 355 и 532 нм с длительностью импульсов 10 нс и энергиями в импульсе до 1 мДж при частоте следования лазерных импульсов f до 100 кГц [17].

Для регистрации сигнала комбинационного рассеяния света была создана компьютерная система счета фотонов на основе гейтирования с управлением от ПК через контроллер типа Arduino Uno и собственное ПО [15].

Чтобы оценить возможности предложенной системы и самого лидара зондировать молекулы метана выполним компьютерное моделирование лидарного уравнения из [16, 17] с теми же данными для длины волны лазерного излучения 532 нм с частотой следования лазерных импульсов 1 кГц, энергии в импульсе 1 мДж в диапазоне расстояния зондирования от 10 до 100 м. Результаты решения этого уравнения для исследуемых молекул представлены как зависимость времени измерения t от расстояния зондирования z для оценки возможностей такого варианта лидара комбинационного рассеяния света. Из этого уравнения выразим значение концентрации $N(z)$ исследуемых молекул в виде [16]:

$$N(z) = n(\nu, z)z^2 / BI(\nu, z)t$$

Решение этого уравнения для тех же экспериментальных условий [16а] и времени измерения $t = 100$ и 1000 с для молекул метана представлены на рис. 4 как зависимость концентрации $N(z)$ исследуемых молекул от расстояния зондирования z для оценки возможностей такого лидара комбинационного рассеяния света.

Таким образом, подбирая время счета импульсов в ПК, можно увеличить расстояние зондирования минимально возможной концентрации исследуемых молекул метана тем же лидаром комбинационного рассеяния света в соответствии с данными [16, 17].

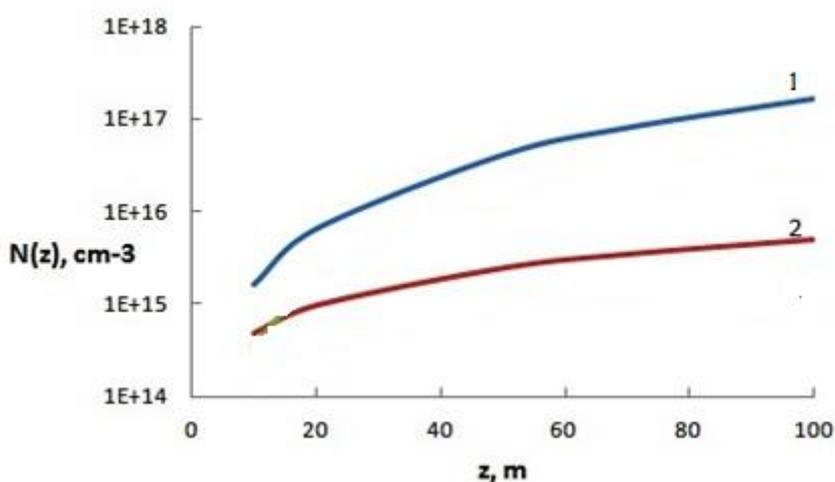


Рис. 4. Графики зависимости концентраций молекул метана в логарифмическом масштабе, в м⁻³ от расстояния зондирования z (в м) для длины волны лазерного излучения 532 нм и времени измерения 100 с (1) и 1000 с (2)

Заключение

Счет фотонов - это перспективная область оптического приборостроения, основанная на квантовой природе света. Она позволяет измерять очень слабые оптические сигналы и выполнять измерения с высокой точностью. Счет фотонов является ключевым инструментом в квантовой оптике и основой для разработки новых квантовых технологий. Благодаря своей чувствительности, он находит широкое применение в астрономии, биологии, медицине и лазерных коммуникациях. Развитие фотоприемников, таких как

фотоумножители, лавинные фотодиоды и сверхпроводящие детекторы, позволяет увеличивать точность и чувствительность измерений в режиме счета фотонов.

Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами, на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

Список использованных источников

1. Дьяченко В. В., Девисилов В. А., Шеманин В. Г. Лидарная технология измерения климатически активных газов для карбоновых полигонов // *Экология и промышленность России*, 2023 Т. 27 № 6 С. 30–35.
DOI: 10.18412/1816-0395-2023-6-30-35
2. Александров, Б. Л. Роль фотонов в физических и химических явлениях: учебное пособие для вузов / Б. Л. Александров, М. Б. Родченко, А. Б. Александров. — 3-е изд., стер. — С.-Пб: Лань, 2024. — 404 с. — ISBN 978-5-507-50045-1. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/409457> (дата обращения: 04.08.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Дюбов, А. С. Фотонно-электронные компоненты и устройства в инфокоммуникациях: учебное пособие / А. С. Дюбов; под редакцией А. К. Канаева. — С.-Пб: СПбГУТ им. М.А. Бонч-Бруевича, 2021. — 74 с. — ISBN 978-5-89160-218-2. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/180171> (дата обращения: 04.08.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
4. URL: https://ncontrol.ru/blog/azbuka_kontrolya/feu (дата обращения: 04.08.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
5. Шарангович, С. Н. Голографические фотонные структуры в наноструктурированных материалах: учебное пособие для вузов / С. Н. Шарангович. — С.-Пб: Лань, 2024. — 132 с. — ISBN 978-5-507-48916-9. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/401114> (дата обращения: 04.08.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
6. Козлов, А. А. Фотонные кристаллы из полимерных микросфер: методические указания / А. А. Козлов, А. С. Аксенов. — М.: РТУ МИРЭА, 2021. — 40 с. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/182499> (дата обращения: 04.08.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
7. Неупругая релаксация квазичастиц и детектирование ИК фотонов в сверхпроводниковых наноструктурах WSi: монография / А. А. Корнеев, Ю. П. Корнеева, С. А. Рябчун [и др.]. — Москва: МПГУ, 2017. — 92 с. — ISBN 978-5-4263-0567-0. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/107391> (дата обращения: 04.08.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
8. Межерис, Р. Лазерное дистанционное зондирование. М., Мир, 1987 – 550 с.
9. Дегтяренко, Н. Н. Введение в физику и моделирование фотонных кристаллов: учебное пособие / Н. Н. Дегтяренко, Н. И. Каргин. — М.: НИЯУ МИФИ, 2012. — 148 с. — ISBN 978-5-7262-1802-1. — Текст: электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/75933> (дата обращения: 04.08.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
10. Усанов, Д. А. Одномерные СВЧ фотонные кристаллы. Новые области применения: монография / Д. А. Усанов. — 2-е изд., доп. и перераб. — Саратов: СГУ, 2020. — 236 с. — ISBN 978-5-292-04634-9. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система.

— URL: <https://e.lanbook.com/book/170585> (дата обращения: 04.08.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

11. Комаров, Ф. Ф. Ионная и фотонная обработка материалов: учебное пособие / Ф. Ф. Комаров, С. В. Константинов. — Минск: Вышэйшая школа, 2022. — 246 с. — ISBN 978-985-06-3395-8. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/276206> (дата обращения: 04.08.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

12. Каримуллин К.Р., Зуйков В.А., Самарцев В.В. Детектирование световых импульсов в режиме счета фотонов. // Ученые записки Казанского государственного университета. Физико-математические науки. 2006. – Т.148. - №1 – С. 135-141

13.С. Н. Мосенцов, А. В. Лосев, В. В. Заводиленко, А. А. Филяев, И. Д. Павлов, Н. В. Буров. Сравнение отечественных детекторов одиночных фотонов от QRate с аналогами от ID Quantique // Фотоника. 2023. - №2. С.

DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.2.134.145

14. Детекторы для счета фотонов на основе лавинных фотодиодов. URL: <https://azimp.ru/articles/tech/405/> (дата обращения: 04.08.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

15. URL: <https://arduino.ru> (дата обращения: 04.08.2024). Режим доступа: для авториз. пользователей.

16. Привалов В. Е., Шеманин В. Г. Лидарное уравнение с учетом конечной ширины линии генерации лазера // Известия РАН. Серия Физическая. 2015. Т. 79. № 2. С. 170-180.

17. Дьяченко В. В., Шеманин В. Г. Лидарный мониторинг парниковых газов в атмосфере // Лазеры. Измерения. Информация. 2022. Т. 2. No 04 (08), С. 015-029. Извлечено от <https://lasers-measurement-information.ru/ojs/index.php/laser/article/view/48> doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_3_34 С.15-29.

Selecting a photon counting mode for a Raman lidar

¹ Urasov K. V., ^{*1,2} Shemanin V. G.

¹*Novorossiysk Polytechnic Institute (branch) Kuban State Technological University, Novorossiysk, 353900, Russia, Novorossiysk, Karl Marx str., house 20*

²*Novorossiysk branch of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (NF BSTU named after V.G. Shukhov), 353919, Russia, Novorossiysk, Myshakskoe highway, house 75*

e-mail: *tytnet22nekogo@mail.ru, vshemanin@mail.ru

Abstract

The paper proposes a photon counting system for a Raman lidar and selects the FEU-79 photomultiplier tube and the operating mode of this photon counting system to increase the sensitivity of lidar measurements by registering very weak light signals. The system includes a high-voltage power supply unit for the photomultiplier and a shaper amplifier for inputting counting pulses into the PC. The operation of the system is controlled by software; the beginning of the counting time and the pulse registration time itself are set, which is a measure of the intensity of the lidar signal of Raman scattering of light by the molecules under study.

Key words: photon counting, lidar, photomultiplier.

References

1. Shemanin V. G. Lidar technology for measuring climatically active gases for carbon polygons // Ecology and Industry of Russia, 2023 vol. 27 No. 6 pp. 30-35. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-6-30-35
2. Alexandrov, B. L. The role of photons in physical and chemical phenomena: a textbook for universities / B. L. Alexandrov, M. B. Rodchenko, A. B. Alexandrov. — 3rd ed., ster. — S.-Pb: Lan, 2024. — 404 p. — ISBN 978-5-507-50045-1. — Text: electronic // Lan: electronic library system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/409457> (date of application: 08/04/2024). — Access mode: for authorization. users.
3. Dubov, A. S. Photonic-electronic components and devices in infocommunications: a textbook / A. S. Dubov; edited by A. K. Kanaev. — S.-Pb: M.A. Bonch-Bruevich St. Petersburg State University, 2021. — 74 p. — ISBN 978-5-89160-218-2. — Text: electronic // Lan: electronic library the system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/180171> (date of application: 08/04/2024). — Access mode: for authorization. users.
4. Электронный ресурс URL: https://ncontrol.ru/blog/azbuka_kontrolya/feu (date of application: 08/04/2024). — Access m
5. Sharangovich, S. N. Holographic photonic structures in nanostructured materials: a textbook for universities / S. N. Sharangovich. — S.-Pb: Lan, 2024. — 132 p. — ISBN 978-5-507-48916-9. — Text: electronic // Lan: electronic library system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/401114> (date of application: 08/04/2024). — Access mode: for authorization. users.
6. Kozlov, A. A. Photonic crystals from polymer microspheres: methodological guidelines / A. A. Kozlov, A. S. Aksenov. — M.: RTU MIREA, 2021. — 40 p. — Text: electronic // Lan: electronic library system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/182499> (date of application: 08/04/2024). — Access mode: for authorization. users.ode: for authorization. users.
7. Inelastic relaxation of quasiparticles and IR photon detection in WSi superconducting nanostructures: monograph / A. A. Korneev, Yu. P. Korneeva, S. A. Ryabchun [et al.]. — Moscow: MPSU, 2017. — 92 p. — ISBN 978-5-4263-0567-0. — Text: electronic // Lan: electronic Library system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/107391> (date of application: 08/04/2024). — Access mode: for authorization. users.
8. Mezheris, R. Laser remote sensing. M., Mir, 1987 – 550 p. 9. Degtyarenko, N. N. Introduction to physics and modeling of photonic crystals: textbook / N. N. Degtyarenko, N. I. Kargin. — M.: NRU MEPhI, 2012. — 148 p. — ISBN 978-5-7262-1802-1. — Text: electronic // Lan : electronic library system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/75933> (date of application: 08/04/2024). — Access mode: for authorization. users.
9. Degtyarenko, N. N. Introduction to physics and modeling of photonic crystals: textbook / N. N. Degtyarenko, N. I. Kargin. — M.: NRU MEPhI, 2012. — 148 p. — ISBN 978-5-7262-1802-1. — Text: electronic // Lan: electronic library system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/75933> (date of application: 08/04/2024). — Access mode: for authorization. users.
10. Usanov, D. A. One-dimensional microwave photonic crystals. New fields of application: monograph / D. A. Usanov. — 2nd ed., additional and revised. — Saratov: SSU, 2020. — 236 p. — ISBN 978-5-292-04634-9. — Text: electronic // Lan: electronic library system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/170585> (date of application: 08/04/2024). — Access mode: for authorization. users.
11. Komarov, F. F. Ion and photon processing of materials: a textbook / F. F. Komarov, S. V. Konstantinov. — Minsk: Higher School, 2022. — 246 p. — ISBN 978-985-06-3395-8. — Text: electronic // Lan: electronic library system. — URL: <https://e.lanbook.com/book/276206> (date of application: 08/04/2024). — Access mode: for authorization. users.

12. Karimullin K.R., Zuikov V.A., Samartsev V.V. Detection of light pulses in the photon counting mode. // Scientific notes of Kazan State University. Physical and mathematical sciences. 2006. – Vol.148. - No.1 – pp. 135-141
13. S. N. Mosentsov, A.V. Losev, V. V. Zavodilenko, A. A. Filyaev, I. D. Pavlov, N. V. Burov. Comparison of domestic single photon detectors from QRate with analogues from ID Quantique // Photonics. 2023. - No.2. S.
DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2023.17.2.134.145
14. Электронный ресурс URL: <https://azimp.ru/articles/tech/405/> / (date of access: 08/04/2024). — Access mode: for authorization. users.
15. Электронный ресурс Arduino <https://arduino.ru/?ysclid=m1w8y3r6kj594944277> (date of access: 18/08/2024). — Access mode: for authorization. users.
16. Privalov V. E., Shemanin V. G. Lidar equation taking into account the finite width of the laser generation line // Izvestiya RAS. The series Is Physical. 2015. Vol. 79. No. 2. pp. 170-180.
17. Dyachenko V. V., Shemanin V. G. Lidar monitoring of greenhouse gases in the atmosphere // Lasers. Measurements. Information. 2022. Vol. 2. No 04 (08), pp. 015-029. Retrieved from <https://lasers-measurement-information.ru/ojs/index.php/laser/article/view/48> doi: 10.51639/2713-0568_2022_2_3_34 pp.15-29.