

Диодный лазер, генерирующий импульсы длительностью 3 нс, для лидара с высоким пространственным разрешением

С.М.Першин, М.Я.Гришин, В.А.Завозин, В.С.Макаров,
В.Н.Леднёв, А.Н.Фёдоров, А.В.Мясников, А.В.Тюрин

Получена генерация импульса излучения длительностью 3 нс полупроводникового AlGaAs-лазера (907 нм, 0.2 мкДж), плотность энергии которого не превышает 1 мкДж·см⁻² и безопасна для глаз при лидарном зондировании. Лазер составлен из трёх диодов в стекловой сборке и размещён в пластиковом корпусе. Внешний генератор токовой накачки на дискретных элементах с ключом на биполярном транзисторе FMMT417 собран на печатной плате вместе с лазером. Лидар на основе этого лазера и полупроводникового однофотонного приёмника обеспечивал мониторинг аэрозолей с пространственным разрешением 10 см в тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории над очагом вулкана Эльбрус. Впервые зарегистрирован трёхкратный скачок выноса аэрозолей неизвестной пока природы. Отсутствие следов возмущения деформации коры Земли в сигнале лазерного интерферометра с разрешающей способностью 1.6×10^{-11} м указывает на высокую чувствительность лидара как датчика для мониторинга геодинамических процессов.

Ключевые слова: диодный лазер, лидар, магматические газы, деформация земной коры, мониторинг геофизических процессов.

1. Введение

Известно [1–5], что сокращение длительности лазерного импульса является необходимым условием повышения разрешающей способности лидаров. При этом основным ограничением использования импульсных лидаров для зондирования среды обитания является опасность поражения глаз излучением лазера видимого диапазона, если плотность его энергии превышает 1 мкДж·см⁻² [6].

Принимая во внимание этот фактор, мы впервые [7], насколько нам известно, предложили использовать в лидарах диодные лазеры и приёмник на основе однофотонного лавинного фотодиода [8]. Стробирование приёмника коротким импульсом позволило эффективно (на несколько порядков) подавить шум от засветки. С учётом этих особенностей нами предложен новый, сугубо статистический принцип лидарного зондирования среды микроджоульными (безопасными для глаз) импульсами диодного лазера [7, 9–12], когда вероятность регистрации рассеянных вдоль трассы фотонов импульса зондирования меньше единицы [9]. Известно, что диодные лазеры отличаются высокой эффективностью и компактностью, однако сокращение длительности импульсов с 120 нс [7] до единиц наносекунд [13–17] остаётся актуальной задачей [1–5], например для повышения разрешающей способности лидаров по дальности.

С.М.Першин, М.Я.Гришин, В.А.Завозин, В.Н.Леднёв, А.Н.Фёдоров. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: pershin@kapella.gpi.ru
В.С.Макаров, А.В.Тюрин. Институт космических исследований РАН, Россия, 117133 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32
А.В.Мясников. Государственный астрономический институт им. П.Н.Штернберга МГУ, Россия, 119234 Москва, Университетский просп., 13

Поступила в редакцию 26 февраля 2021 г.

Первый лидар [7] был собран нами на базе импульсно-диодного AlGaAs-лазера ЛПИ-102 (ОАО «Восход», $\tau = 120$ нс, энергия в импульсе ~ 0.5 мкДж, длина волны 880 нм, частота следования импульсов 2.5 кГц) и однофотонного лавинного кремниевого фотодиода [8] с низким напряжением лавинного пробоя (27 В). Несмотря на невысокую, безопасную для глаз плотность энергии (менее 1 мкДж·см⁻²), этот лидар обеспечивал зондирование облаков и шлейфов на удалении тысячи метров с шагом дискретизации трассы 5 м [10]. Например, многослойные облака у вершины вулкана Эльбрус были зарегистрированы на удалении более 4000 м [11]. Высокая эффективность и помехоустойчивость лидара, малая масса и работоспособность при температуре -100°C позволили нам выиграть международный конкурс НАСА (США) [13] для участия в миссии НАСА «Mars Polar Lander-99» [14].

Недавно с помощью этого лидара впервые, как мы полагаем, зарегистрирована деформация коры Земли по вариации аэрозолей в коротком (17 м) тоннеле лазерного деформографа [15]. Симбатное изменение сигналов лидара и длины измерительного плеча интерферометра Майкельсона показало, что лидар является новым инструментом для мониторинга геодинамических процессов. Однако большая длительность импульса лазера ЛПИ-102 (120 нс) и шаг пространственной дискретизации (5 м) не позволили выявить локальные выбросы аэрозолей и измерить профиль их распределения вдоль короткого тоннеля.

Цель настоящей работы – сокращение длительности импульса диодного лазера для повышения разрешающей способности лидара.

В серии работ [16–20] была установлена возможность генерации наносекундных импульсов лазерными диодами. Было показано, что для уменьшения длительности генерируемого импульса необходимо увеличить скорость коммутации тока разряда и уменьшить величину потерь,

ёмкость и индуктивность контура импульсного питания лазера. Для этого авторы [16, 17] разработали технологию компоновки слоёв и элементов цепи разряда ёмкости в тиристорной гетероструктуре. Оставалась неясной возможность сокращения длительности импульса диодного лазера, использующего генератор тока на дискретных элементах, выпускаемых серийно.

2. Эксперимент и результаты измерений

В качестве излучателя коротких импульсов мы выбрали лазер SPL PL90_3 (OSRAM), собранный из трёх AlGaAs-диодов по стековой технологии в пластиковом корпусе без встроенного генератора тока питания лазера. Выбор был сделан на основании того, что такая сборка при суммировании энергии излучения трёх диодов обеспечивает: 1) одновременную последовательную накачку всех трёх диодов без разветвления тока, как в лазере ЛПИ-102 [7]; 2) минимальное значение ёмкости; 3) минимальный размер излучающей области лазера 200×10 мкм, что важно для уменьшения расходимости пучка (3×0.15 мрад) при заданном фокусном расстоянии объектива передатчика лидара 70 мм и апертуре 15×40 мм; 4) использование общего источника питания для лазера и приёмника на основе однофотонного лавинного фотодиода за счёт применения внешнего генератора тока разряда. Заметим, что лазеры со встроенными генераторами тока ЛПИ-102 [7] требуют двух отдельных источников питания, что усложняет схему, увеличивает габаритные размеры и массу лидара.

Для накачки лазера был разработан импульсно-периодический генератор коротких импульсов тока (2–20 нс), конечный фрагмент которого с лазерным диодом ЛД показан на рис. 1, а. Для сокращения длительности импульса тока нами был выбран быстрый ключ Т коммутации накопительного конденсатора К1 (82 пФ) на биполярном транзисторе FMMT417 с рабочим напряжением до 300 В. Транзистор работает в однофотонном лавинном режиме, на его базу подаются стартовые импульсы с генератора тока с заданной частотой повторения импульсов лидара (в нашем случае 10 кГц). После выключения транзистора Т конденсатор К1 заряжается через резисторы Р1 и Р2. Высоковольтное напряжение +ВН выбирается в процессе настройки генератора для каждого значения ёмкости конденсатора К1. Уменьшение длительности

лазерного импульса до 4 нс (см. осциллограмму на рис. 1, б) достигается увеличением напряжения +ВН и уменьшением ёмкости К1.

Физические процессы и алгоритм работы лидара с приёмником на однофотонном лавинном фотодиоде в гейгеровском режиме детально проанализированы ранее в работе [9]. Заметим, что прогресс в разработке специализированных микросхем измерителей временных интервалов позволил нам уменьшить почти на два порядка шаг дискретизации трассы – с 5 [7, 9–12] до 0.1 м – с использованием одной из микросхем серии ACAM TDC-GP1. Такой шаг дискретизации обеспечивает, как будет показано ниже, повышение пространственного разрешения, а также измерение огибающей оптических импульсов длительностью более 1 нс.

После сборки и отладки лидара с однофотонным лавинным фотодиодом были проведены тестовые измерения в коридоре здания ИОФ РАН. На рис. 1, в показан лидарный сигнал измерения дальности до плоской стены в конце трассы зондирования с шагом дискретизации 10 см при 50000 стартовых импульсах лазера. Видно, что форма огибающей сигнала лидара с коротким фронтом и затянутым спадом несимметрична, как и форма импульса на осциллограмме (рис. 1, б). Такая форма импульсов характерна для диодных лазеров при питании током разряда конденсатора [16–19]. Заметим, что длительность импульса лазера ~ 2.7 нс на полувысоте гистограммы фотоотсчётов лидара от плоской стены (рис. 1, в) меньше, чем на осциллограмме импульса на рис. 1, б. Увеличение длительности импульса на осциллограмме до 4 нс происходит из-за относительно узкой полосы пропускания осциллографа Aktacom ADS-2332 (300 МГц). При напряжении 300 В и ёмкости 82 пФ конденсатора К1 энергия лазерного импульса составляла 0.2 мкДж. При этом ширина спектра излучения лазера была 7 нм, температурный коэффициент уменьшения мощности излучения равен $0.4\%/^{\circ}\text{C}$, а вариации длины волны излучения – $0.28 \text{ нм}/^{\circ}\text{C}$.

Как видно из рис. 1, в, лидар способен выполнять роль осциллографа с полосой пропускания несколько ГГц и оцифровывать оптические импульсы наносекундной длительности. Несомненно, что использование других микросхем время-цифровых преобразователей, которые обеспечивают шаг дискретизации 5–10 мм, допускает измерение огибающей оптических импульсов вместо осциллографа с полосой пропускания в десятки ГГц.

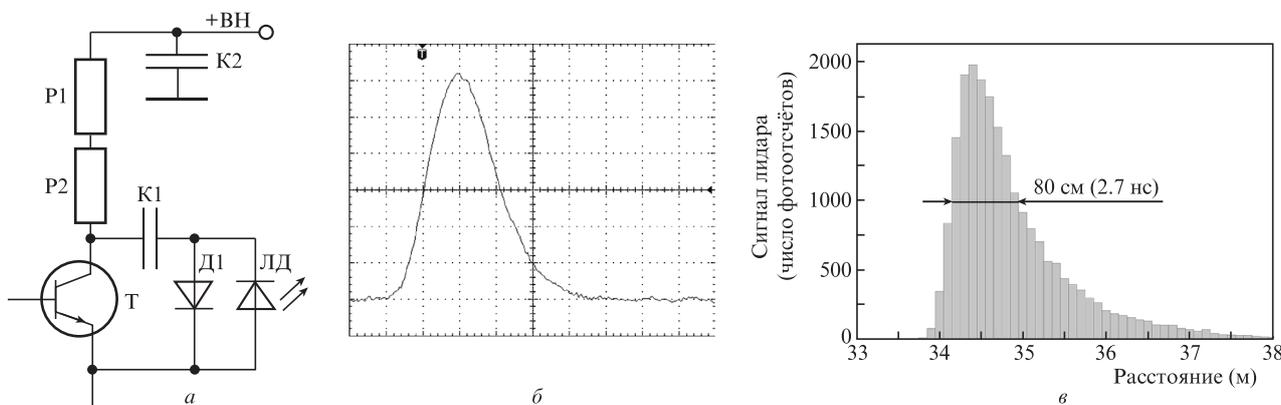


Рис. 1. Электрическая схема конечного фрагмента генератора импульсов тока, собранного на серийно выпускаемых дискретных элементах (а), осциллограмма импульса лазера (длительностью не более 4 нс) на экране осциллографа Aktacom ADS-2332 с полосой пропускания 300 МГц (б), а также импульс лазера в виде гистограммы фотоотсчётов лидара при зондировании плоской стены (разрешающая способность 10 см) (в).

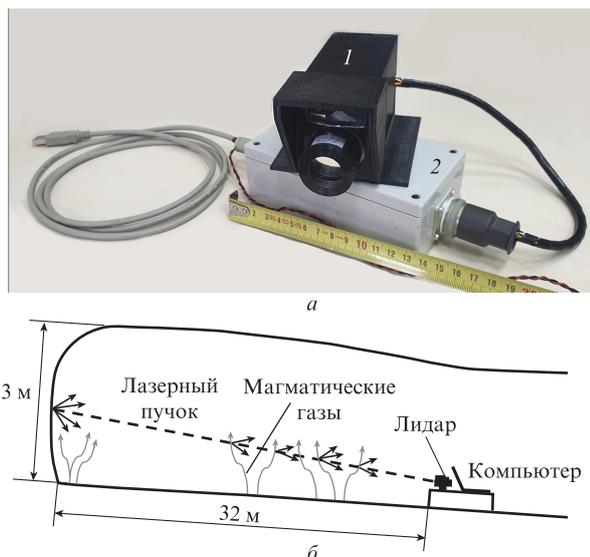


Рис.2. Общий вид лидара: приёмопередающий блок размером $50 \times 60 \times 95$ мм и массой 240 г (1) и блок управления массой 300 г (2) (а), а также схема лидарного зондирования магматических аэрозолей в горячем тоннеле-тупике Баксанской нейтринной обсерватории (продольный разрез) (б).

Заметим, что аппроксимация («взвешивание») гистограммы с полушириной ~ 80 см (рис.1,б) функциями Гаусса или Фойгта даёт почти одинаковые значения положения и разброса гравитационного центра огибающей импульса: 31.382 ± 0.007 и 31.377 ± 0.007 м соответственно. Такая аппроксимация импульса позволяет без участия оператора повысить точность измерения дистанции до плоской мишени лидаром-дальномером примерно на порядок, до ± 0.7 см, по сравнению с шагом дискретизации трассы (10 см) и на два порядка относительно полуширины импульса (80 см).

Общий вид лидара показан на рис.2,а; он включает в себя приёмопередающий блок (масса 240 г) и блок управления (масса 300 г). Лидар был установлен в горячем тоннеле (рис.2,б) с глухой стеной ($43^{\circ}14'57.7''$ N, $42^{\circ}43'19.5''$ E) над очагом вулкана Эльбрус на удалении 4000 м от входа в штольню Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) для зондирования вариации выноса аэрозолей вулканическими газами.

Измерения проводились каждые 30 мин с накоплением данных по 100000 импульсов лидара. На рис.3 показаны характерные гистограммы профиля обратного рассеяния без коррекции на квадрат расстояния от лидара. Пунктиром выделены области суммирования фотоотсчётов сигналов рассеяния: область 1 – на аэрозолях (28.10.2019, кривая 1, и 29.10.2019, кривая 2) в тоннеле; область 2 – от глухой стены тоннеля, что отражает вариации пропускания трассы на круговом обходе до стены и обратно; область 3 – шумы приёмника. Из рисунка видно, что уменьшение длительности лазерного импульса и повышение разрешающей способности с 5 м до 10 см позволяет обнаружить модуляцию профиля (область 1) аэрозольного рассеяния.

На рис.4,а представлены эволюция выноса аэрозолей в тоннеле БНО с 1 октября по 25 декабря 2019 г. (кривая 1), изменение пропускания трассы зондирования (кривая 3), а также данные лазерного деформографа [20] (кривая 2). Все измерения были проведены с привязкой к всемирному координированному времени (UTC).

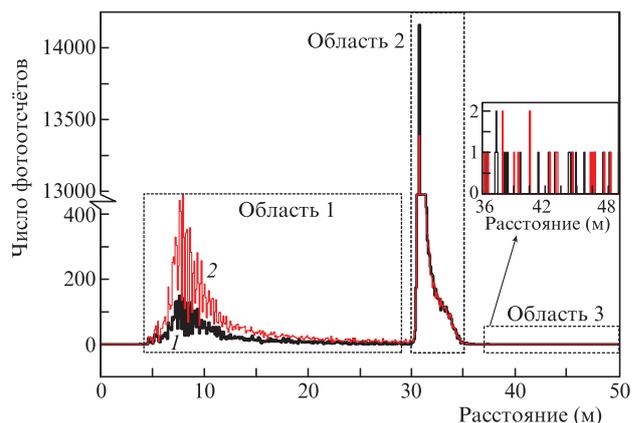


Рис.3. Профиль обратного рассеяния (число фотоотсчётов) вдоль тоннеля с шагом дискретизации 10 см (28 октября 2019 г., 21:00 UTC (1) и спустя 4 ч (2)). Пунктиром обозначены зоны суммирования фотоотсчётов для определения сигналов лидара. На вставке для лучшего отображения шумов масштаб увеличен. Цветной вариант рисунка помещён на сайте нашего журнала <http://www.quantum-electron.ru>.

На рис.4 отчётливо видно, что доминантой является впервые обнаруженный трёхкратный скачок – ступенька выноса аэрозолей 28 октября 2019 г. Затем сигнал рассеяния на аэрозолях начинает снижаться подобно сигналу деформографа из-за сезонного сжатия трещин скальной породы. Отметим, что сезонное снижение лидарного сигнала (выноса аэрозолей) продолжается с тем же коэффициентом наклона, что и измеренный нами до скачка.

Весьма существенным фактом является то, что лазерный деформограф-интерферометр с длиной измерительного плеча 75 м, несмотря на относительно высокую разрешающую способность ($\sim 1.6 \times 10^{-11}$ м) [20], не зарегистрировал на интерферограмме следов видимых возмущений за время скачка (см. рис.4,в).

3. Заключение

Таким образом, создан не имеющий отечественных аналогов компактный аэрозольный лидар на базе полупроводникового лазера коротких импульсов длительностью 3 нс с внешним генератором импульсов тока на серийных дискретных элементах. Энергия импульсов лазера 0.2 мкДж на длине волны 907 нм удовлетворяет требованиям безопасности для глаз [6]. Короткий импульс обеспечивает дециметровую разрешающую способность аэрозольного лидара, а также измерение дистанции 30 м с разбросом ± 7 мм (0.02%). Такая точность (без «мёртвой зоны») востребована при измерении скорости сближения (см/с) и причаливания многотонных космических аппаратов. Особый интерес вызывает управление мягкой посадкой платформ на планеты, а также возвращаемых корпусов носителей. Уникально малая масса (540 г) лидара допускает его размещение на квадрокоптере для профилирования рельефа поверхности, а также измерения высоты растений и деревьев с целью оценки биомассы в зоне обитания без необходимости защиты глаз от воздействия излучения.

С помощью этого лидара впервые, насколько нам известно, зарегистрирован трёхкратный скачок выноса аэрозолей (28 октября 2019 в 23:00 UTC) магматическими газами над очагом вулкана Эльбрус в тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории. Существенно, что сброс

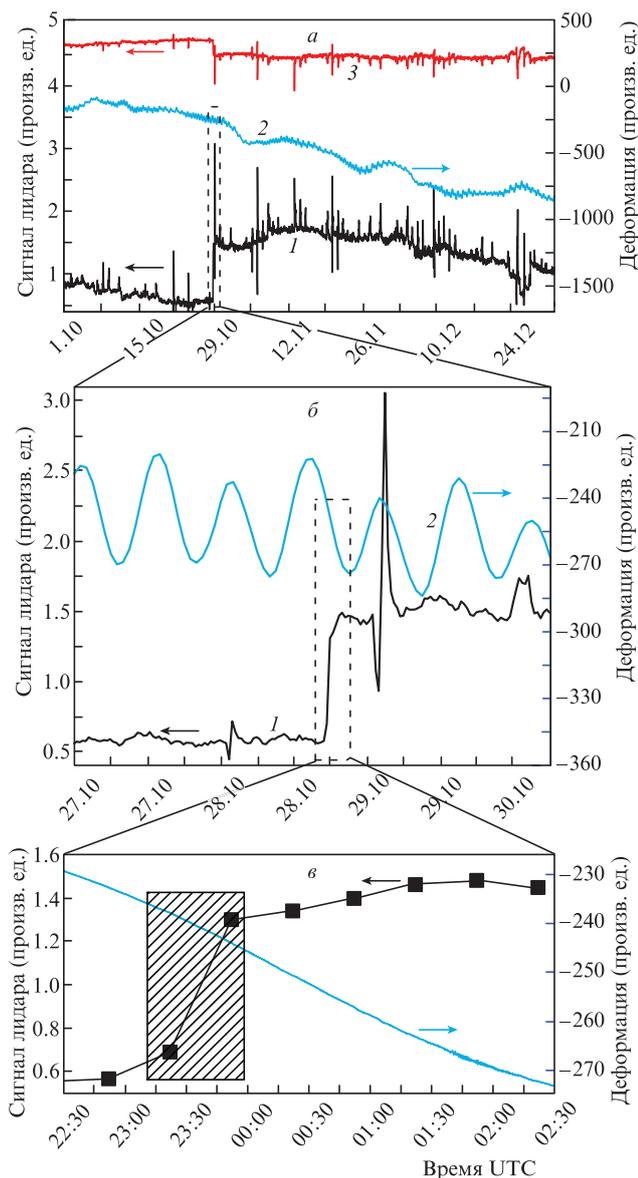


Рис.4. Сигналы лидарного зондирования магматического аэрозоля (1) и сезонного сжатия (деформации) коры Земли (2) по данным лазерного деформографа в тоннеле БНО за разные периоды времени: 1.10.2019–1.12.2019 (показано также изменение пропускания (3) трассы зондирования за двойной проход) (а), 27.10.2019 – 30.10.2019 (б) и 22:30 28.10.2019–02:30 29.10.2019 (размер квадратов соответствует разбросу данных лидара, заштрихованным прямоугольником выделен необратимый скачок выноса аэрозолей) (в).

давления газов и аэрозольный скачок не отразились на сигнале деформации коры Земли приливными волнами, измеренном лазерным интерферометром с разрешающей способностью 1.6×10^{-11} м. Отсюда следует, что лидар на основе диодного лазера, генерирующего короткие (3 нс) импульсы, является новым высокочувствительным датчиком геодинимических процессов в семействе традиционных инструментов [20]. При этом природа аэрозольного скачка и триггер сброса давления газов пока не установлены и требуют отдельного исследования.

Авторы выражают благодарность Российскому научно-му фонду за финансовую поддержку (проект № 19-19-00712).

1. Measures R.M. *Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications* (New York: Wiley & Sons, 1984).
2. Bunkin A., Voliak K. *Laser Remote Sensing of the Ocean: Methods and Applications* (New York: Wiley & Sons, 2001).
3. Fiocco G., Smulin L. *Nature*, **199**, 1275 (1963).
4. Veselovskii I.A., Hu Q., Goloub P., Podvin T., Korenskiy M., Pujol O., Dubovik O., Lopatin A. *Atmos. Meas. Tech.*, **13**, 6691 (2020).
5. Ceolato R., Berg M.J. *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.*, **262**, 107492 (2021).
6. Sliney D., Wolbarsht M. *Safety with Lasers and other Optical Sources: A Comprehensive Handbook* (New York: Springer Science & Business Media, 2013).
7. Pershin S.M., Linkin V.M., Makarov V.S., Prochazka I., Hamal K. *Proc. CLEO. Advance Program*. (1991, CFI 10, p. 120).
8. Prochazka I., Hamal K., Sopko B. *J. Mod. Opt.*, **51**, 1289 (2004).
9. Бухарин А.В., Першин С.М. *Оптика атмосферы и океана*, **7**, 521 (1994).
10. Pershin S. *Proc. Int. Symp. «Aerospace Sensing»* (Orlando, 1994, vol. 2222, p. 215).
11. Pershin S.M., Grishin M.Ya., Zavozin V.A., Lednev V.N., Lukuanchenko V.A., Makarov V.S. *Laser Phys. Lett.*, **17**, 026003 (2020).
12. Pershin S.M. *Ciência Hoje*, **12**, 71 (1999).
13. https://mars.nasa.gov/internal_resources/818/.
14. Першин С.М., Долгих Г.И., Бункин А.Ф., Гришин М.Я., Завозин В.А., Клишков В.К., Леднёв В.Н., Макаров В.С., Плотников А.А., Тюрин А.В. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, **5**, 32 (2018).
15. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Soboleva O.S., Zakharov M.S., Bakhvalov K., Romanovich D., Pikhtin N.A., Tarasov I.S., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A. *Proc. SPIE*, **9751**, 97510P-3 (2016).
16. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Golovin V.S., Rastegaeva M.G., Voronkova N.V., Pikhtin N.A., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **33**, 11 (2021).
17. Huikari J., Avrutin E., Ryykin B., Kostamovaara J. *Opt. Rev.*, **23**, 522 (2016).
18. Slipchenko S.O., Podoskin A.A., Soboleva O.S., Pikhtin N.A., Bagaev T.A., Ladugin M.A., Marmalyuk A.A., Simakov V.A., Tarasov I.S. *Opt. Express*, **24**, 16500 (2016).
19. Vainshtein S., Zemlyakov V., Egorkin V., Maslevtsov A., Filimonov A. *IEEE Trans. Power Electron.*, **34**, 3689 (2019).
20. Milyukov V.K., Myasnikov A.V. *Meas. Tech.*, **48**, 1183 (2005).