

PACS: 06.20.-r, 42.68.Wt, 42.79.Qx, 42.55.Lt

УДК 551.501+53.08

Ветровой доплеровский низкокогерентный лидар с мультиплицированной временной когерентностью опорной и сигнальной волн

Г. Г. Матвиенко, С. Н. Поляков, В. К. Ошлаков
Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск, Россия

Сформулировано определение мультиплицированной временной когерентности (МВК) составных внутриволоконных импульсов (СВИ). Впервые предложены концепция и схема ветрового доплеровского низкокогерентного лидара с МВК опорной и сигнальной волн. Рассмотрены одномодовые оптоволоконные топологии для формирования СВИ со свойствами МВК.

PACS: 42.68.Wt, 41.20.-q

Введение

В современных технологиях мониторинга и прогнозирования состояния атмосферы, природно-климатических изменений и рисков природопользования и других исследованиях требуются данные о высотных и приземных профилях вектора скорости ветра. Ветровые доплеровские когерентные лидары (ВДКЛ) зарекомендовали себя как эффективный инструмент для получения таких данных и реализованы в вариантах наземного, авиационного и космического базирования. Но в силу специфичности и технической сложности аппаратной реализации ВДКЛ не имеют в настоящее время решений, коммерчески привлекательных для потенциальных потребителей — метеорологических служб, авиации, космического приборостроения и т. д. Прежде всего это обязано построению их лазерных систем по схеме МОРА (Master Oscillator Power Amplifier), в которых высококогерентный (с двухкратным превосходством длины когерентности l_{coh} над многокилометровой дальностью зондирования L_{prob}) непрерывный лазер совместно с акустооптическим модулятором (АОМ) выступают в роли гетеродина и служат для инициирования одночастотного мощного зондирующего лазера с длительностью генерации $\tau_{pulse} > 0,5$ —1 мкс, при которой их пороговая чувствительность по скорости $V_{min} = 0,5 \cdot \lambda / \tau_{pulse}$ (где λ — длина зондирующей волны) характеризуется практически значимыми значениями $V_{min, \lambda=1064 \text{ нм}} = 0,5$ —1 м/с, $V_{min, \lambda=1545 \text{ нм}} = 0,75$ —1,5 м/с или $V_{min, \lambda=2053 \text{ нм}} = 1$ —2 м/с.

В последнее время в методологии и практике лазерной доплеровской анемометрии определилась тенденция оптоволоконного исполнения не-

силовых элементов оптического тракта лидаров дальнего действия [1] и даже всего тракта лидаров с малой дальностью зондирования на основе волоконных лазеров [2]. Применение оптоволоконных элементов позволяет предварить фотосмещение опорной и сигнальной волн их эффективным внутриволоконным смещением, способствует удешевлению тракта, но ограничивает его пропускную мощность. В рамках этой тенденции особо выделим работу [3], в которой впервые была сформулирована концепция низкокогерентного доплеровского лидара, предусматривающая использование импульсного лазера для зондирования и (совместного с АОМ и кольцевым оптоволоконным резонатором (КОР)) формирования гетеродина с $l_{coh} \geq \Delta L_{prob} = c\tau_{pulse}/2$ (ΔL_{prob} — пространственное разрешение лидара; c — скорость света). В [3] декларируется также применимость концепции к ВДКЛ, но рассматривается применение наносекундных лазеров, при котором лидаром могут быть реализованы практически незначимые значения $V_{min} > 10$ м/с. Кроме того, в КОР с наносекундным периодом $T_{ring} = \tau_{pulse}$ (где T_{ring} — временной период КОР) неизбежно чрезмерно быстрое экспоненциальное затухание опорной волны $\epsilon_{ring} \sim 0,95^{T_{prob} \cdot \tau_{pulse}}$ (ϵ_{ring} — коэффициент энергопотери в КОР; число 0,95 — доля аккумулируемой в нем мощности внутриволоконного излучения в каждом цикле его обращения; T_{prob} — продолжительность зондирования; знак (\div) — оператор целочисленного деления).

В работах [4, 5] это затухание предлагается компенсировать введением в КОР волоконного усилителя, причем в [5] 50 % циклически усиливается в КОР мощности излучения импульсного

лазера используется для зондирования, 5 % отводится в качестве опорной волны, а сам лидар представляет некое подобие инициирующего кольцевого волоконного лазера.

В работе [6], направленной на развитие предложенной в [3] концепции низкокогерентных доплеровских лидаров, впервые было введено понятие "мультиплицированной (составной) временной когерентности" (МВК) оптических пучков; впервые предложена концепция ВДКЛ с МВК опорной и зондирующей волн и предложены топологии оптоволоконных мультипликаторов для формирования прямоугольных составных внутриволоконных импульсов (СВИ) длительностью $\tau_{mfp} > 0,5$ мкс со свойством МВК на основе наносекундных лазерных импульсов с ограниченной временной когерентностью ($\tau_{pulse} \geq \tau_{coh} \geq 0,7$ нс; $l_{coh} \geq 0,2$ м). Показано, что при исполнении мультипликатора на основе коммерческих многомодовых пассивных 20-полюсных разветвителей (Power combiners с пропускной мощностью 0,2 кВт из волокон диаметром 200 мкм) при коэффициенте общих энергопотерь при мультиплицировании $\varepsilon_{mfp} = 0,66$ достижима энергия зондирующих импульсов не выше 0,13 мДж. Последняя может быть увеличена до 5 Дж при изготовлении разветвителей из специальных волокон с 200-микрометровой сердцевиной и пределом повреждения лазерным излучением до 1 ГВт/см².

В настоящей работе рассматривается возможность совместного мультиплицирования опорной (формируемой с помощью КОР) и сигнальной волн с приданием им свойств МВК в интервале $[t, t + \tau_{mfp}]$ шириной $\tau_{mfp} > 0,5$ мкс в намерении исключения прохождения мощного излучения наносекундных лазеров по оптоволоконным трактам лидаров.

Когерентное детектирование при МВК опорной и сигнальной волн

Понятие МВК составных внутриволоконных импульсов введено авторами впервые в работе [6]. Оно предполагает, что произвольные волновые фронты СВИ в интервале $[t, t + \tau_{mfp}]$ воспроизводят в своей структуре соответствующий им волновой фронт исходного лазерного импульса с временным периодом T_{frac} , не превосходящим длительность когерентного цуга лазера τ_{coh} .

Составные внутриволоконные импульсы состоят из параллельно существующих компонент (далее фрагментарные компоненты), которые сформированы излучением следующих один за другим фрагментов (фракций, долей) исходного лазерного импульса длительностью $T_{frac} \leq \tau_{coh}$. При этом каждая компонента образована излучением единст-

венного фрагмента исходного импульса. Интервал τ_{mfp} (время МВК) многократно превосходит длительность исходного импульса τ_{pulse} , при этом ($\tau_{pulse}/\tau_{coh} = N_{coh} \leq N_{frac} = \tau_{pulse}/T_{frac}$ и $\tau_{mfp}/T_{frac} = M$, где M — коэффициент мультиплицирования) напряженность электрического поля СВИ E_{mfp} с точностью до константы определяется выражением

$$E_{mfp}(t) \sim M^{-1} \Pi(t, \tau_{mfp}) \times \sum_{n=1}^{N_{frac}} A[(n-1)T_{frac} + \xi(t - nT_{frac})] \exp\{2\pi i \nu_n t\}, \quad (1)$$

где $\Pi(t, \tau_{mfp})$ — функция единичного временного окна длительностью τ_{mfp} ;

$A[(n-1)T_{frac} + \xi(t - nT_{frac})]$ — временное распределение амплитуды исходной лазерной волны в пределах когерентного цуга, отстоящего от начала генерации на $\Delta t = nT_{frac}$;

ν_n — частота этого же цуга (она же частота соответствующей фрагментарной компоненты СВИ);

$$\xi(t) = (t / \tau_{pulse}) - (t \div \tau_{pulse}).$$

Результатом преобразования совокупности циклически лазерных импульсов, поступающих из КОР с периодом $T_{ring} = \tau_{mfp}$ (см. рис. 3, иллюстрирующий функциональную схему ВДКЛ с МВК опорной и сигнальной волн) в СВИ, будет квазинепрерывная (с медленным экспоненциальным затуханием) опорная волна со свойствами МВК

$$E_{RW}(t) \sim 0,98^{t \div T_{ring}} M^{-1} \sum_{n=1}^{N_{frac}} A[(n-1)T_{frac} + \xi(t - nT_{frac})] \exp\{2\pi i (\nu_n + \nu_{АОМ}) t\}, \quad (2)$$

где $\nu_{АОМ}$ — частотный сдвиг, вносимый акустооптическим модулятором.

Выполненное описание до сих пор условно касалось мультиплицирования исходного лазерного импульса произвольной формы, но в ходе математического моделирования было установлено, что оно может распространяться на случай мультиплицирования произвольного фрагмента сигнальной волны длительностью τ_{pulse} , который можно рассматривать как изолированный прямоугольный импульс. Преимущество такого подхода состоит в том, что низкоинтенсивная (по сравнению с зондирующей волной) сигнальная волна не накладывает каких-либо ограничений на пропускную мощность оптоволоконного тракта лидара.

Операция мультиплицирования, примененная к сигнальной волне, преобразует каждый ее фраг-

мент длительностью τ_{pulse} , который может рассматриваться в качестве прямоугольного изолированного импульса, в СВИ с комплексной амплитудой

$$E_{SW}(t) \sim M^{-1} \Pi(t, \tau_{mfc}) \sum_{n=1}^{N_{frac}} A[(n-1)T_{frac} + \xi(t - nT_{frac})] \exp\{2\pi i t [v_n + v_D(t)]\}, \quad (3)$$

где $v_D(t)$ — доплеровское смещение спектра сигнальной волны.

При единообразном мультиплицировании опорной и сигнальной волн и их фотосмещении на фотоприемнике будет иметь место их когерентное сложение, и результатом детектирования лидарного сигнала будет многокомпонентный фототок с точностью до аппаратной константы, описываемый выражением

$$j(t) \sim M^{-2} \Pi(t, \tau_{mfp}) 0,98^{t \pm T_{ring}} \sum_{n=1}^{N_{frac}} A^2[(n-1)T_{frac} + \xi(t - nT_{frac})] \cos\{2\pi [v_{AOM} - v_D(t)]t + \varphi_n\},$$

который в каждый момент времени t будет усредненно характеризовать весь разрешаемый зондируемый объем протяженностью $\Delta L_{prob} = c\tau_{mfp}/2$. При этом каждая фрагментарная компонента фототока характеризуется одним и тем же независимым от частот v_n амплитудным Фурье-спектром, который используется для определения скорости ветра ($V = 2v_D/\lambda$) и с точностью до константы в области положительных частот (при условии $v_D(t) = \text{const}(t) \equiv v_D$ в пределах разрешаемого зондируемого объема протяженностью ΔL_{prob}) может быть определен выражением

$$S(v) \sim T \sin c[\pi(v + v_{AOM} - v_D)T] + T \sin c[\pi(v + v_{AOM} + v_D)T],$$

где $T = \min\{\tau_{mfp}, \tau_{proc}\}$;

τ_{proc} — интервал спектральной обработки детектированного лидарного сигнала.

Отметим, что формулы (1)—(3) записаны в скалярной форме, т. е. в пренебрежении векторами поляризации фрагментов исходного импульса, составляющих СВИ, поскольку при единообразном мультиплицировании сигнальной и опорной волн возможно достижение аппаратного уравнивания

направлений поляризации синхронных фрагментов, составляющих эти волны.

В отличие от предыдущей версии низкокогерентного ВКДЛ [6] лидарный сигнал в каждой своей фрагментарной компоненте M -кратно воспроизводит в интервале $[t, t + \tau_{mfp}]$ сигнал, последовательно формирующийся в результате рассеяния наносекундного импульса длительностью T_{frac} .

Оптоволоконные топологии для формирования СВИ со свойствами МВК

Проведенным авторами математическим моделированием процесса мультиплицирования установлено, что оптоволоконный мультипликатор (ОМ) для формирования СВИ и придания ему свойства МВК в общем случае может состоять из входного пассивного оптоволоконного разветвителя (ОР₀) с конфигурацией (входной порт) × (N₁ выходных портов, (N₁ ≥ 2)) и M (M ≥ 2) последовательно соединенных схем мультиплицирования (СМ_m). Все СМ имеют однотипную структуру и состоят из N_m, (m ∈ [1, M], N_{M+1} ≤ 2) параллельных оптоволоконных линий задержки (ЛЗ_{nm}, (n ∈ [1, N_m]; m ∈ [1, M])) и связанного с ними через входные порты пассивного ОР_m типа "звезда" с конфигурацией (N_m входных портов) · (N_{m+1} выходных портов) или составного ОР_m (рис. 1), образованного парой последовательно соединенных пассивных ОР с конфигурацией (N_m входных портов) · (выходной порт) и (входной порт) · (N_{m+1} выходных портов). В свою очередь входной ОР₀ также может быть составным. Времена задержек Δt_{nm} (n ∈ [1, N_m]; m ∈ [1, M]) линий задержки ЛЗ_{nm} возрастают в арифметической прогрессии с шагом Δt_m , т. е.

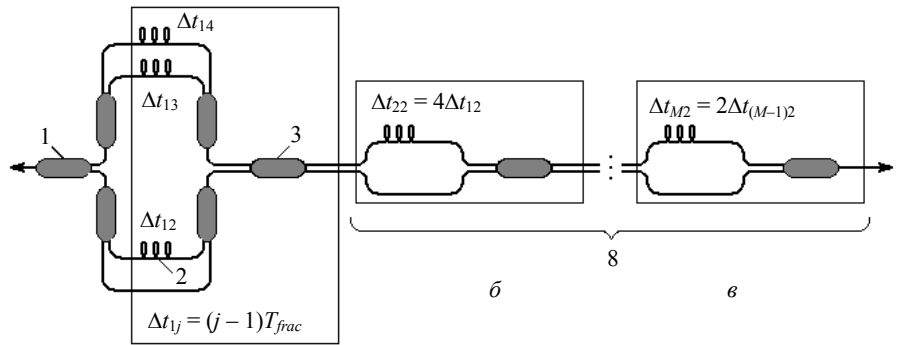
$$\Delta t_{nm} = (n-1)\Delta t_m, \quad (n = \overline{2, N_m}), \quad (4)$$

и удовлетворяют условию

$$\Delta t_1 = T_{frac} \quad \text{и} \quad \Delta t_m = N_{m-1}\Delta t_{m-1}, \quad (m = \overline{2, M}). \quad (5)$$

Рис. 1. Схема однододового оптоволоконного мультипликатора для получения СВИ:

1, 3 — оптоволоконные разветвители;
2 — волоконные линии задержки;
а–в — схемы мультиплицирования



Результатом мультиплицирования в SM_m является падение суммарной мощности внутриволоконных компонент формируемого СВИ по закону:

$$P_m(t) = N_m^{-1} \sum_{j=0}^{t \div \Delta t_m - 1} \varepsilon_{mj} P_{(m-1)}(t + j\Delta t_m), \quad (6)$$

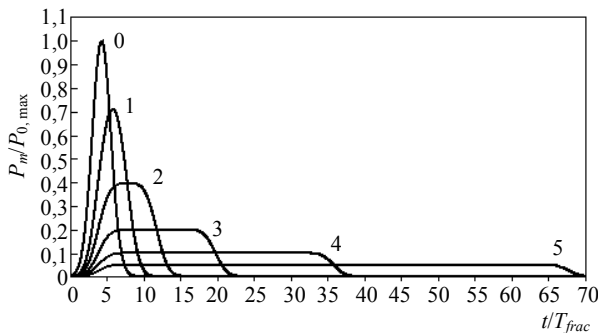
где весовые коэффициенты ε_{mj} , ($j \in [1, N_m]$) в общем случае учитывают неравномерность коэффициентов разветвления OP_m и привнесенные ими потери мощности. При соблюдении условий (4) и (5) время мультиплицированной когерентности τ_{mfp} и общие энергопотери при мультиплицировании ε_{mfp} (с учетом (6) и при условии $\varepsilon_{mj} = \text{const}(j) \equiv \varepsilon_m$) определяются, соответственно, выражениями:

$$\tau_{mfp} = T_{frac} M = T_{frac} \prod_{m=1}^M N_m$$

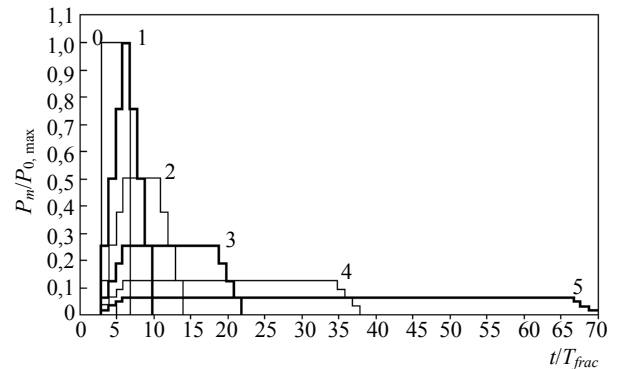
и

$$\varepsilon_{mfp} = \prod_{m=1}^M \varepsilon_m.$$

На рис. 2 изображены хронограммы пяти последовательных первых стадий преобразования мультиплицирования гауссового (см. рис. 2, а) и прямоугольного (см. рис. 2, б) импульсов в мультипликаторе с топологией, схематически отображенной на рис. 1 с параметрами $N_1 = N_{frac} \leq 4$ и $N_{m,m \geq 2} = 2$.



а



б

Рис. 2. Хронограммы мощности СВИ на различных стадиях мультиплицирования гауссового (а) и прямоугольного (б) импульсов:

0 — мощность исходного импульса перед мультиплицированием; 1—5 — мощности СВИ на выходах с 1-й по 5-ю схем мультиплицирования, соответственно

Отметим два обстоятельства. Во-первых, хронограммы с нарастанием параметра m демонстрируют все большее приближение формы СВИ к прямоугольной, что должно отобразиться в снижении погрешности измерений по сравнению со случаем зондирования гауссовым импульсом в классических ВДКЛ. Во-вторых, независимо от направления пропуска исходного импульса через ОМ результатом его преобразования будет СВИ одной и той же формы. При этом при прохождении ОМ независимо от направления пропуска через него мультиплицируемой волны каждый фрагмент после трансформации исходного лазерного импульса или фрагмента сигнальной волны в СВИ приобретает одинаковый поворот вектора поляризации. При условии, что на входе в ОМ мультиплицированные волны были одинаково поляризованы, при фотосмещении фототок будет иметь максимальное значение.

Кроме топологии мультипликатора, иллюстрированного на рис. 1, возможно множество других их вариантов. Лимитирующими их условиями являются: требование $N_1 \geq N_{coh}$, допустимый радиус изгиба волокна линий задержки в SM_1 и энергопотери при мультиплицировании.

Для лазеров с $N_{coh} \leq 2$ и $\tau_{pulse} > 0,8$ нс при дугообразном исполнении линий задержки в SM_1 воз-

можно одномодовая топология с параметрами $M = 9$ и $N_m = 2$ ($m = 1, \dots, M$), обеспечивающая формирование СВИ с $\tau_{mfp} \geq 0,5$ мкс при $\epsilon_{mfp} = 10\epsilon_{FS} = 0,6$ дБ (где ϵ_{FS} — коэффициент потерь в волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) одномодовых ОР с конфигурацией портов 2×2 или 1×2).

Увеличение параметра N_{coh} до 4 диктует применение топологии (см. рис. 1) с $\epsilon_{mfp} = 12\epsilon_{FS} = 0,72$ дБ. Естественно, что использование одномодовых мультипликаторов лимитируется их пропускной мощностью и возможно лишь в лидарах с мультиплицированием сигнальной волны.

Принципиальная схема ВДКЛ с МВК опорной и сигнальной волн

Приведем обобщенную схему (рис. 3) ВДКЛ с МВК опорной и сигнальной волн. В лидаре используется наносекундный лазер 1 с субметровой длиной когерентности, которая может быть реализована без применения схемы достаточно дешевым приемом, а именно внутривибрационной селекцией продольных мод [7]. Зондирование осуществляется непосредственно наносекундными импульсами с помощью сканирующей и передающей систем. Часть лазерного пучка с помощью фокусирующей линзы 3 сопрягается с входным портом КОР 4, состоящим из ОР 6 и оптоволоконной линии задержки 5 с микросекундным периодом T_{ring} . Выход КОР через ОР 7 связан с одномодовым оптоволоконным мультипликатором 8, например с топологией, отображенной на рис. 1 и рассчитанной на получение микросекундного СВИ.

6, 7, 9 и 12 — оптоволоконные разветвители; 8 — оптоволоконный мультипликатор; 10 — акустооптический модулятор; 11 — контроллер поляризации; 13 — фотоприемник; v_D — доплеровская частота; v_{AOM} — частота акустооптической модуляции; v — несущая оптическая частота

По прохождении КОР (при условии $T_{ring} = \tau_{mfp} = MT_{frac}$) и АОМ 10 опорная волна становится квазинепрерывной с амплитудой, описываемой выражением (2). Сигнальная волна пропускается через мультипликатор 8 в направлении, противоположном опорной волне, приобретая свойство МВК, и смешивается с опорной в ОР 12. Для устранения различий поляризационных характеристик волн, обязанных противонаправленным прохождением через одномодовый мультипликатор, возможны исполнение КОР из поддерживающих поляризацию элементов или введение в оптоволоконный тракт лидара контроллера поляризации 11.

Заключение

Описанный вариант формирования ВДКЛ обладает следующими преимуществами:

- его оптоволоконный тракт может быть составлен из недорогих, широко употребляемых в ВОЛС оптоволоконных элементов и волокон;
- требования к пропускной мощности тракта не лимитируют мощность лазера и отпадает необходимость в ограничении предела повреждения лазерным излучением элементов волоконного тракта лидара;
- энергопотери при мультиплицировании снижаются в 1,3 раза (с соответствующим приростом дальности зондирования) по сравнению с описанным в работе [6] вариантом мультиплицирования опорной и зондирующих волн;
- требования к временной когерентности гетеродина по сравнению с классическими ВДКЛ могут быть снижены в 10^4 — 10^5 раз;
- лидар может быть реализован на основе коммерческих и технически совершенных наносекундных лазеров без схемы МОРА и ущерба для разрешения по скорости.

Литература

1. Songsheng C., Jirong Yu., Mulugeta P. et al.// Proc. SPIE. 2003. V. 5652. P. 175.
2. Kameyama S., Ando T., Asaka K., Hirano Y., Wadaka S.// Appl. Opt. 2007. V. 46. № 11. P. 1953.
3. Dorrington A. A., Künнемeyer R., Danehy P. M.// Ibid. 2001. V. 40. P. 3076.
4. Shen J. L., Künнемeyer R.// Ibid. 2006. V. 45. P. 8346.
5. Shen Jyi-Lai// International Journal of Infrared and Millimeter Waves. 2006. V. 27. № 5. P. 753.
6. Matvienko G. G., Polyakov S. N., Oshlakov V. K.// Las. Phys. 2007. V. 17. P. 1327.

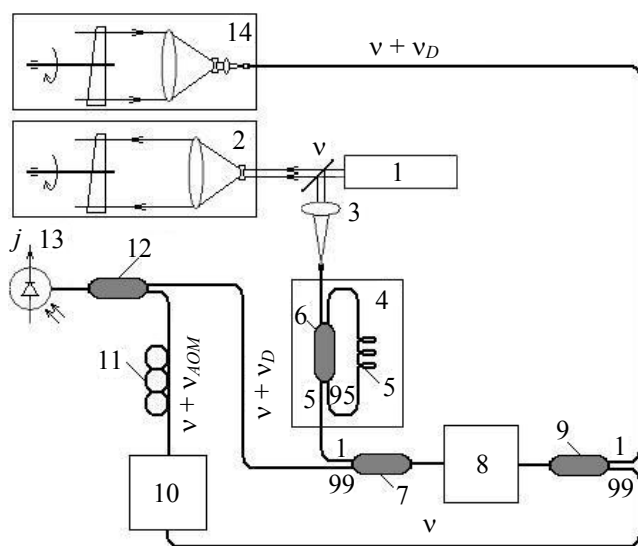


Рис. 3. Принципиальная схема ВДКЛ МВК опорной и сигнальной волн:

- 1 — наносекундный лазер; 2 и 14 — оптические антенны;
- 3 — фокусирующая линза; 4 — кольцевой волоконный резонатор; 5 — оптоволоконная линия задержки;

7. Никонова Е. И., Павловская Е. Н., Старцев Г. П. // Опт. и спектр. 1967. Т. 2. № 6. С. 984.

Статья поступила в редакцию 7 августа 2008 г.

Wind Doppler low-coherence lidar with multiple time coherence of reference and signal waves

G. G. Matvienko, S. N. Polyakov, V. K. Oshlakov

Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia

The notion of multiple time coherence (MTC) of multiple fiber pulses (MFPs) is formulated. The fundamentals and circuit of wind Doppler low-coherence lidar with MTC of reference and signal waves are proposed for the first time. The single mode fiber topologies for forming of the MFPs with MTC properties are considered.

PACS: 42.68.Wt, 41.20.-q
УДК 535.37

Защитное покрытие лампы низкого давления с парами ртути как решающий фактор срока ее службы

Л. М. Василяк

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

А. И. Васильев, Л. А. Дроздов, С. В. Костюченко, Д. В. Соколов, А. Ю. Старцев
ЗАО «НПО "Лаборатория импульсной техники"», Москва, Россия

Н. Н. Кудрявцев

Московский физико-технический институт (Государственный университет),
г. Долгопрудный Московской обл., Россия

Спад мощности резонансного УФ-излучения в лампах низкого давления с разрядом в парах ртути и инертных газах определяется образованием слоя адсорбированной ртути на поверхности кварца. Защитное покрытие внутренней стороны кварцевой колбы препятствует адсорбции ртути и увеличивает ресурс лампы. Предложена методика ускоренной оценки качества защитного покрытия и ресурса ламп.

PACS: 68.35.-P

Введение

Кварцевые амальгамные лампы с разрядом низкого давления на парах ртути — один из наиболее мощных и эффективных источников бактерицидного УФ-излучения [1, 2].

Основным недостатком данных ламп является высокий спад мощности УФ-излучения по мере их работы. Причиной спада УФ-излучения является снижение пропускания света кварцевым стеклом из-за образования на внутренней поверхности колбы лампы слоя с внедренными атомами ртути, поглощающими резонансное УФ-излучение [3].

Образование поглощающего слоя и потемнение кварца происходят достаточно быстро, например при работе кварцевой бактерицидной лампы с погонной мощностью разряда более 1,5 Вт/см в течение 3—4 тыс. ч, мощность УФ-излучения снижается в два раза, поэтому дальнейшая эффек-

тивная эксплуатация такой лампы далеко не всегда возможна. При этом ресурс электрода полностью не используется, поскольку поддержание разряда в лампе возможно в течение 15—20 тыс. ч.

Таким образом, эксплуатационный срок службы лампы в данном случае определяется не ресурсом электродного узла, а прозрачностью кварцевой колбы для УФ-излучения и уменьшением мощности последнего.

Пленка, поглощающая УФ-излучение, образуется в результате ряда реакций взаимодействия разрядной плазмы с внутренней поверхностью колбы лампы. Для уменьшения скорости этих взаимодействий, а также скорости образования поглощающей пленки в амальгамных УФ-лампах

низкого давления применяются защитные покрытия внутренней поверхности колбы. Эти покрытия, как правило, состоят из оксидов редкоземель-