

УДК 530.182.551.510.42+535.621.33

Динамика структуры области множественной филаментации лазерных импульсов в стекле

Д.В. Апексимов¹, С.С. Голик^{2,3}, А.А. Землянов¹,
А.М. Кабанов¹, А.Ю. Майор², А.В. Петров^{1*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН
690041, г. Владивосток, ул. Радио, 5

³Дальневосточный федеральный университет
690950, г. Владивосток, ул. Суханова, 8

Поступила в редакцию 6.04.2016 г.

Представлены результаты экспериментов по исследованию пространственных характеристик области множественной филаментации (ОМФ) гигаваттных импульсов Ti:Sapphire-лазера в стекле. Получены зависимости координаты начала и окончания ОМФ, ее диаметра от энергии лазерного импульса. Обнаружено, что при достижении определенных значений средней интенсивности в пучке ОМФ формируется уже около освещенной грани стеклянного образца. Показано, что при достижении пороговой интенсивности в пучке формируется вторичная ОМФ, пространственные характеристики которой зависят от времени воздействия импульсно-периодического лазерного излучения. Установлена зависимость диаметра вторичной ОМФ и координаты ее начала от времени воздействия. Зависимость от времени воздействия пространственных характеристик первичной ОМФ в экспериментах отсутствовала.

Ключевые слова: лазерное излучение, фемтосекундный импульс, самофокусировка, множественная филаментация, стекло; laser radiation, femtosecond pulse, self-focusing, multiple filamentation, glass.

Филаментация лазерного излучения — едва ли не ключевой эффект, представляющий интерес в задачах фемтосекундной атмосферной оптики, поскольку именно с ним связаны такие сопровождающие явления, как локализация световой энергии, формирование протяженных плазменных каналов, генерация направленного суперконтинуального свечения и т.д. [1, 2]. Исследование филаментации в средах с сильной кубичной нелинейностью представляет интерес как с точки зрения моделирования распространения тераваттных лазерных импульсов на протяженных атмосферных трассах, так и для решения задач в микрооптике, для модификации свойств материалов и т.д. [3, 4].

В наших предшествующих исследованиях области множественной филаментации (ОМФ) в стекле [5–7] было показано, что при достижении определенной мощности лазерного импульса, имеющего гауссово распределение плотности энергии, ОМФ приобретает форму полого конуса, направленного вершиной к источнику излучения. При достижении определенной энергии импульса внутри конуса

начинает формироваться внутренняя область множественной филаментации, которая также приобретает коническую форму. При этом в предыдущих работах нами не были исследованы временные зависимости трансформации данных структур при длительном воздействии импульсно-периодическим излучением. Настоящая работа направлена на исследование именно этих характеристик.

Схема и методика эксперимента

Эксперименты проводились на стенде ИАПУ ДВО РАН, в качестве источника фс-импульсов использовалось лазерное излучение Ti:Sapphire-лазера на основной гармонике. Схема эксперимента и характеристики излучения представлены на рис. 1 и в подписи к нему.

Лазерный импульс от источника 1 направлялся на образец 8 стекла К8, для которого коэффициент кубичной нелинейности $n_2 = 3,5 \cdot 10^{-16}$ см²/Вт, критическая мощность самофокусировки $P_{кр} = 2$ МВт, испытывал в нем самофокусировку, и при достижении энергии импульса $E \sim 2$ мДж (соответствует пиковой мощности 44 ГВт) область филаментации формировалась внутри образца. Уменьшение диаметра пучка с 7 до 3,5 мм достигалось телескопированием пучка с использованием фокусирующего и дефокусирующего зеркал в коллиматоре 14. Уменьшение начальной площади пучка было необходимо

* Дмитрий Владимирович Апексимов (apeximov@iao.ru); Сергей Сергеевич Голик (golik_s@mail.ru); Александр Анатольевич Землянов (zaa@iao.ru); Андрей Михайлович Кабанов (kam@iao.ru); Александр Юрьевич Майор (mayor@iacr.dvo.ru); Алексей Вадимович Петров (awp@iao.ru).

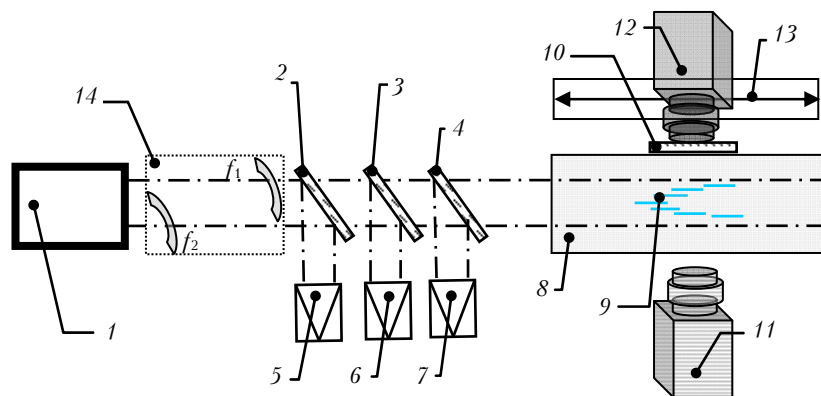


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – лазерная система (Spitfire Pro 40F, Spectra Physics): $\lambda = 800$ нм, $E < 5$ мДж, частота следования импульсов 1 кГц, длительность импульса 45 фс (с возможностью chirпирования импульса), диаметр пучка на выходе из системы (по уровню e^{-2}) $d_0 = 7$ мм; 2–4 – поворотные пластины; 5 – автокоррелятор PSCOUT PL-SP-LF, Spectra Physics; 6 – измеритель энергии Spectra Physics 407A; 7 – измеритель профиля пучка LBP2-HR-VIS (Ophir); 8 – стекло К8 (длина, ширина, высота = 100, 60, 60 мм); 9 – область филаментации; 10 – нейтральный светофильтр; 11 – фотоаппарат Pentax K-3 (25 Мп) с макрообъективом Pentax100MacroWR; 12 – CCD-камера ANDOR-Clara E с объективом HELIOS-44M 2/58 на позиционере (M)-IMS Newport 13; 14 – коллиматор (фокусное расстояние $f_1 = 1000$ мм, $f_2 = -500$ мм), формирующий коллимированный пучок $d_0 = 3,5$ мм

для достижения в нем интенсивности и, соответственно, величины нелинейной добавки $n_2 I$ к показателю преломления стекла, достаточной для формирования как первичной, так и вторичной ОМФ в виде конуса при самофокусировке отдельных элементов гауссова пучка и отсутствии самофокусировки всего пучка как целого. Регистрация области филаментации проводилась CCD-камерой 12, расположенной на позиционере 13, позволявшем проводить последовательную съемку области филаментации по всей длине образца.

Результаты экспериментов

Примеры регистрируемых изображений области множественной филаментации представлены на рис. 2.

Видно, что при увеличении энергии импульса с 1 до 4,8 мДж структура ОМФ постепенно трансформируется от хаотично распределенных филаментов в центре пучка к конической форме с диаметром основания конуса, совпадающим с диаметром пучка на входе в стекло. Данное обстоятельство иллюстрирует график на рис. 3, на котором видно, что быстрый рост диаметра ОМФ d_1 при достижении энергии импульса $\sim 2,5$ мДж (53 ГВт) сменяется насыщением при достижении 3,5 мм, что соответствует диаметру пучка d_0 .

Из рис. 3, 4 видно, что при достижении энергии импульса 2–2,5 мДж ОМФ начинает формироваться непосредственно возле освещенной грани стекла и дальнейшее увеличение энергии приводит к тому, что конус, форму которого имеет ОМФ, становится усеченным, причем диаметр этого сечения возрастает с ростом энергии. Из рис. 4 также видно, что при энергии импульса > 3 мДж длина ОМФ начинает сокращаться. Зависимости расстояния от освещенной грани стекла до начала L_n и окончания L_k области филаментации представле-

ны на рис. 4. Важно отметить, что характеристики ОМФ, представленные на рис. 2–4, не зависят от времени воздействия лазерными импульсами с энергией до 5 мДж, повторяющимися с частотой 1 кГц и средней мощностью до 5 Вт.

Далее рассмотрим вторичную ОМФ (ОМФ-2), которая появляется у теневой грани стекла при достижении (в данном эксперименте) энергии импульса $\sim 4,2$ мДж. Стоит отметить, что, как упоминалось выше, ранее мы наблюдали появление вторичной ОМФ при достижении энергии импульса 40 мДж для пучка диаметром $d_0 = 1,25$ см [5], т.е. средняя по сечению пучка пороговая (для появления вторичной ОМФ) интенсивность импульса и в том, и другом случае составляет $\sim (7-9) \cdot 10^{11}$ Вт/см². На рис. 5 представлены примеры первичной ОМФ-1 и вторичной ОМФ-2, зарегистрированные при различных интервалах воздействия импульсно-периодическим излучением. Видно, что с увеличением времени воздействия ОМФ-2 существенно изменяется. Во-первых, координата ее начала L_{n2} приближается к источнику излучения, во-вторых, увеличивается ее диаметр d_2 . Количественные изменения L_{n2} и d_2 представлены на рис. 6, 7.

На рис. 6 видно, что экспериментальные данные для энергий импульсов 4,75 и 4,2 мДж находятся на одной кривой, соответствующей одинаковой мощности импульса. Стоит отметить, что структура ОМФ-1 остается неизменной при любых временах лазерного воздействия. Различное поведение ОМФ-1 и ОМФ-2 можно связать с тем, что вторичная ОМФ формируется за счет трансформации микрофизических и оптических свойств материала, возникающих при формировании первичной ОМФ. Ход кривых на рис. 6, 7 указывает на то, что с течением времени (зависящим от энергии и средней мощности импульсно-периодического излучения) пространственные характеристики ОМФ-2 L_{n2} и d_2 выходят на стационарный режим.

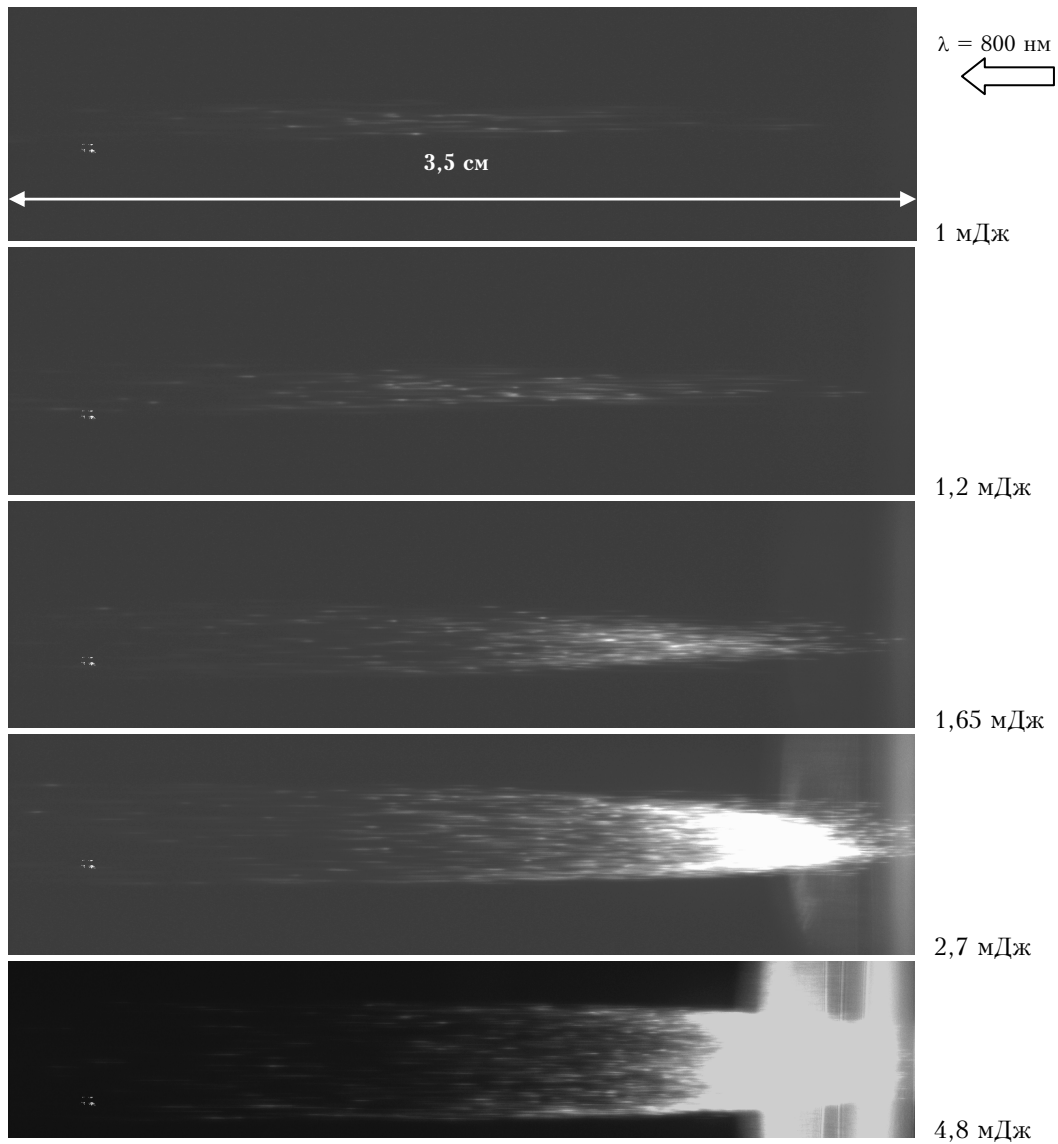


Рис. 2. Примеры структуры области филаментации в стекле при различных энергиях лазерного импульса

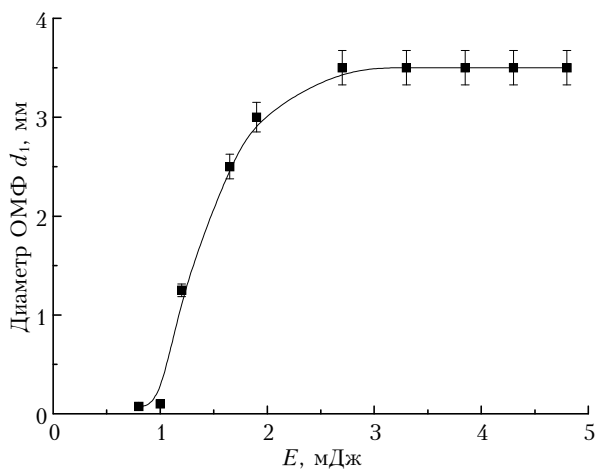


Рис. 3. Зависимость диаметра области филаментации от энергии импульса E

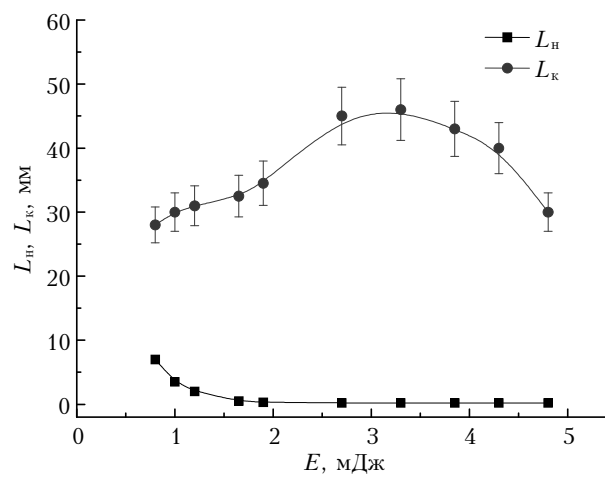


Рис. 4. Зависимости расстояний от освещенной грани стекла до начала L_n и конца L_k области филаментации от энергии импульса

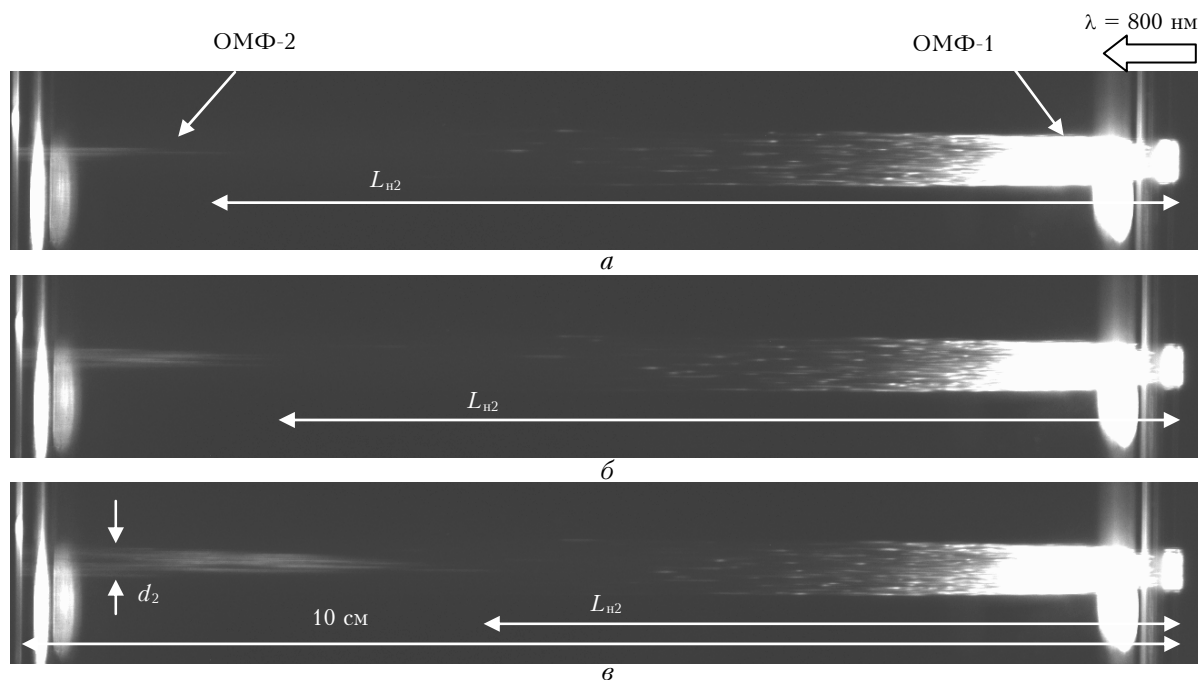


Рис. 5. Снимки первичной (ОМФ-1) и вторичной (ОМФ-2) областей множественной филаментации при различной продолжительности воздействия импульсами с энергией 5 мДж и частотой следования импульсов 1 кГц: а – 1; б – 61; в – 294 с

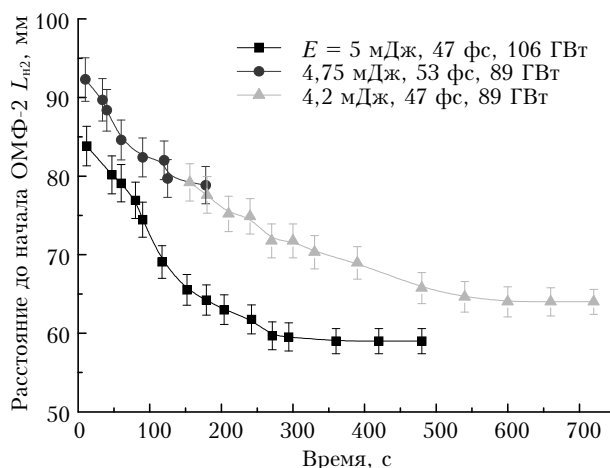


Рис. 6. Зависимость расстояния от освещенной грани стекла до начала вторичной области множественной филаментации L_{n2} от времени при различных пиковых и средних мощностях лазерных импульсов

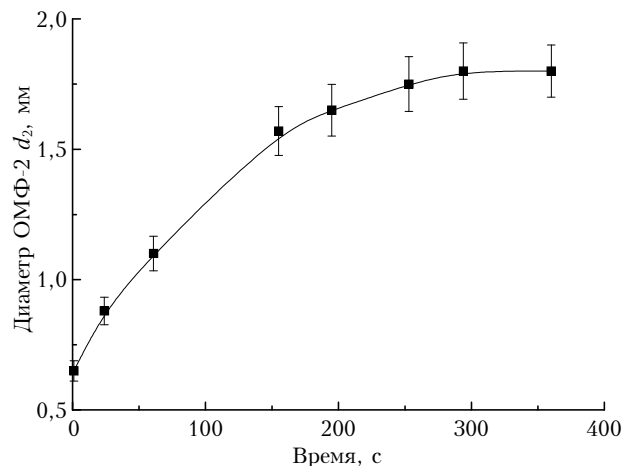


Рис. 7. Зависимость диаметра вторичной области множественной филаментации от времени воздействия лазерными импульсами с энергией 5 мДж и частотой повторения 1 кГц

Расстояние от первичной до вторичной ОМФ, на порядок превышающее длину отдельных филаментов в ОМФ-1, исключает возможность трактовать появление ОМФ-2 как результат рефокусировок либо формирование так называемых дочерних филаментов.

Таким образом, по результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Пространственные характеристики первичной области множественной филаментации формируются при воздействии первого лазерного фс-импульса и не зависят от времени воздействия лазерными импульсами. Вторичная область множественной

филаментации существенно зависит от времени воздействия, что может быть связано с модификацией свойств среды в первичной ОМФ.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (соглашение 15-17-10001), в части измерения динамики вторичной области множественной филаментации при поддержке НШ-8199.2016.5.

1. Гейнц Ю.Э., Землянов А.А., Кабанов А.М., Матвиенко Г.Г. Нелинейная фемтосекундная оптика атмосферы / Под ред. А.А. Землянова. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 212 с.

2. Чекалин С.В., Кандидов В.П. От самофокусировки световых пучков — к филаментации лазерных импульсов // Успехи физ. наук. 2013. Т. 183, № 2. С. 133–152.
3. Мартынович Е.Ф., Кузнецов А.В., Курпичников А.В., Пестряков Е.В., Багаев С.Н. Создание люминесцентных эмиттеров интенсивным лазерным излучением в прозрачных средах // Квант. электрон. 2013. Т. 43, № 5. С. 463–466.
4. Дергачев А.А., Кадан В.Н., Шлёнов С.А. Взаимодействие неколлинеарных фемтосекундных лазерных филаментов в сапфире // Квант. электрон. 2012. Т. 42, № 2. С. 125–129.
5. Апексимов Д.В., Голик С.С., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б. Множественная филаментация коллимированного лазерного излучения в воде и стекле // Оптика атмосф. и океана. 2015. Т. 28, № 11. С. 972–977; *Apeksimov D.V., Golik S.S., Zemlyanov A.A., Iglakova A.N., Kabanov A.M., Kuchinskaya O.I., Matvienko G.G., Oshlakov V.K., Petrov A.V., Sokolova E.B.* Multiple filamentation of collimated laser radiation in water and glass // *Atmos. Ocean. Opt.* 2016. V. 29, N 2. P. 135–140.
6. Апексимов Д.В., Букин О.А., Голик С.С., Землянов А.А., Иглакова А.Н., Кабанов А.М., Кучинская О.И., Матвиенко Г.Г., Ошлаков В.К., Петров А.В., Соколова Е.Б. Множественная филаментация лазерных импульсов в стекле // Известия вузов. Физ. 2015. Т. 58, № 11. С. 89–94.
7. Гейнц Ю.Э., Голик С.С., Землянов А.А., Кабанов А.М., Петров А.В. Микроструктура области множественной филаментации фемтосекундного лазерного излучения в твердом диэлектрике // Квант. электрон. 2016. Т. 46, № 2. С. 133–141.

D.V. Apeksimov, S.S. Golik, A.A. Zemlyanov, A.M. Kabanov, A.Yu. Mayor, A.V. Petrov. **Dynamics of the structure of multiple filamentation domain of laser pulses in glass.**

The results of experiments on the study of the spatial characteristics of the multiple filamentation domain of Ti:Sapphire laser gigawatt pulses in glass are presented. The dependences of the coordinates of the beginning, the end, the diameter of the multiple filamentation domain (MFD) vs the laser pulse energy is obtained. It was found that when the average intensity in the beam reaches specific values, MFD is formed near the illuminated side of the glass sample. It is shown that when the threshold intensity of the beam is reached, secondary multiple filamentation domain is formed. The spatial characteristics of MFD depend on the time of influence of pulse-periodic laser radiation. The diameter of the secondary multiple MFD and coordinates of its start depend on the exposure time. No dependence of the spatial characteristics of the primary MFD on the exposure time was revealed during the experiments.