

## СОЗДАНИЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫХ КАНАЛОВ В АТМОСФЕРЕ ДЛЯ НАПРАВЛЕННОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ИЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

**В.Д. Зворыкин**, вед. науч. сотр. Физического института Академии наук (ФИАН)  
им. П.Н. Лебедева, канд. физ.-мат. наук

**А.О. Левченко**, науч. сотр ФИАН

**И.В. Сметанин**, зав. сект. ФИАН, канд. физ.-мат. наук

**Н.Н. Устиновский**, ст. науч. сотр. ФИАН, канд. физ.-мат. наук

*В статье описываются способы создания протяженных ионизованных токопроводящих каналов в атмосферном воздухе с помощью лазерного излучения и перспективы их использования для направленной передачи энергии электромагнитного излучения или электрического тока.*

**Ключевые слова:** плазменный канал, беспроводная передача импульсов тока, УФ лазер, активная молниезащита, каналирование СВЧ-излучения.

**Введение.** Существует несколько важных прикладных задач, в которых требуется создание протяженных электропроводящих плазменных каналов в атмосферном воздухе. Среди них инициирование протяженных высоковольтных разрядов, в том числе для управления молниевыми разрядами [1, 2], передача электрической мощности и импульсов тока через проводящий канал, а также электромагнитного излучения СВЧ и радиочастотного диапазонов по искусственному плазменному волноводу для уменьшения их естественной расходимости при транспортировке к удаленным объектам. Наиболее перспективным для создания протяженных ионизованных токопроводящих каналов является лазерное излучение, обладающее рекордно малой угловой расходимостью, а следовательно, и небольшими энергетическими затратами на единицу длины канала в воздухе.

**История вопроса.** Использовать мощные лазеры для создания плазменных антенн и волноводов было предложено еще в 1960-е гг. [3, 4]. Важную роль при этом играло явление самофокусировки мощного лазерного излучения, предсказанное в 1961 г. Г.А. Аскарьяном и впервые наблюдавшееся в 1965 г. [5]. Первые эксперименты начались несколько позднее [6–8], по мере развития лазерной техники, и ограничились инициированием протяженных электрических разрядов. В этих экспериментах использовались импульсные Nd (длина волны 1,06 мкм) и CO<sub>2</sub>-лазеры (10,6 мкм). Разряд развивался в ходе лавинной ионизации воздуха электронами в лазерной искре, образованной сфокусированным излучением лазера, т. е. при оптическом пробое атмосферного воздуха. Прямая многофотонная ионизация атомов кислорода и азота с потенциалами ионизации 12,06 эВ и 15,58 эВ для излучения Nd-лазера с энергией кванта 1,17 эВ малосущественна, а для более длинноволнового излучения CO<sub>2</sub>-лазера с малой энергией кванта 0,117 эВ она вообще пренебрежимо мала.

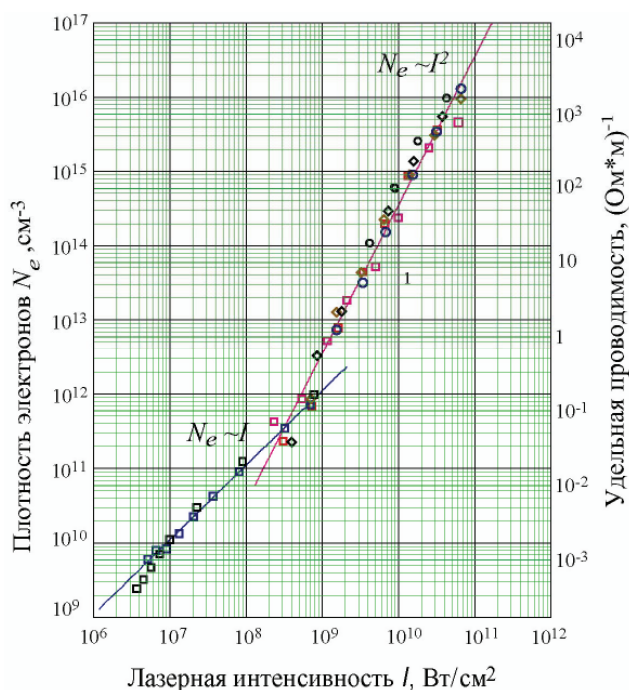
**Преимущества УФ-лазеров.** УФ-лазерное излучение обладает целым рядом преимуществ для создания однородных протяженных ионизованных каналов в воздухе по сравнению с излучением ИК и видимого диапазонов [9–11]. Во-первых, предельная (дифракционная) расходимость пучка Krf-лазера в 40 раз меньше, чем для CO<sub>2</sub>-лазера, вследствие чего при одинаковых начальных размерах пучков для достижения заданной интенсивности в дальней зоне в случае УФ-излучения требуется в 1600 раз меньшая мощность. Во-вторых, УФ-излучение может создавать равномерную ионизацию воздуха вдоль трассы распространения лазерного пучка без оптического пробоя воздуха. При большой энергии квантов  $h\nu = 5$  эВ излучение Krf-лазера рождает свободные электроны в процессах трехфотонной ионизации

молекул кислорода  $O_2$  и четырехфотонной ионизации азота  $N_2$ , в результате чего возможна эффективная ионизация воздуха в предпробойном режиме. Оптический пробой воздуха, обусловленный процессами лавинной ионизации, для УФ-лазерного излучения развивается при значительно более высоких интенсивностях. Но даже в случае такого пробоя плотность электронов в полностью однократно ионизованной плазме  $N_e = 2,7 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$  оказывается почти на два порядка меньше критической плотности электронов ( $1,6 \times 10^{22} \text{ см}^{-3}$  для излучения с  $\lambda = 248 \text{ нм}$ ). В результате этого воздушная плазма будет прозрачна для УФ-излучения, и оно может транспортироваться вдоль протяженной трассы.

**Полученные результаты и перспективы.** Для решения задачи направленной передачи энергии по протяженным плазменным каналам в атмосферном воздухе каналы должны обладать достаточной электрической проводимостью, определяемой концентрацией свободных электронов. Наиболее эффективным ионизатором воздуха для создания протяженных плазменных каналов представляется УФ-лазерное излучение (см. выше).

**Проводимость лазерно-индуцированного канала.** Процессы ионизации (и последующей рекомбинации) атмосферного воздуха под действием 20 нс УФ-импульсов были изучены в широком диапазоне интенсивностей  $I = 3 \times 10^6 \div 7 \times 10^{10} \text{ Вт/см}^2$  КгГ-лазера с длиной волны  $\lambda = 248 \text{ нм}$  [12, 13]. Результаты исследования приведены на рис. 1.

Видно, что существуют две области, отличающиеся характером зависимости концентрации электронов  $N_e$  от интенсивности  $I$ . При сравнительно высоких интенсивностях  $I = 3 \times 10^8 \div 7 \times 10^{10} \text{ Вт/см}^2$  (но ниже порога оптического пробоя воздуха  $\sim 10^{11} \text{ Вт/см}^2$ ) эта зависимость имеет вид  $N_e \sim I^2$ , характерный для двухступенчатого процесса двухквантового возбуждения кислорода в промежуточное состояние с последующей быстрой одноквантовой ионизацией. В области низких интенсивностей  $3 \times 10^6 \div 3 \times 10^8 \text{ Вт/см}^2$  наблюдается линейная зависимость  $N_e \sim I$ , которую можно объяснить одноквантовой или двухступенчатой ионизацией сложных органических примесных молекул с низкими потенциалами ионизации и



**Рис. 1.** Зависимости концентрации электронов и электрической проводимости в фотоионизационной воздушной плазме от интенсивности УФ-лазерного излучения

промежуточными резонансными уровнями. Возможен также фотоэффект аэрозольных микрочастиц, так как энергия УФ-квантов превышает работу выхода большинства материалов. Показано, что искусственное введение аэрозольных частиц (табачного дыма) в межэлектродный промежуток или паров некоторых органических веществ (например, керосина) резко увеличивает степень ионизации и проводимость плазмы – в парах керосина сигнал возрастал в линейной области почти на 3 порядка.

**Передача (прием) импульсов тока по ионизованному каналу.** Полученные значения проводимости воздушной плазмы позволили перейти к экспериментам по созданию протяженных электропроводящих каналов и передаче по ним импульсов электрического тока. Эксперименты проводились с KrF-лазером «Гарпун» при энергии лазерного импульса около 50 Дж и длительности  $\approx 100$  нс [14]. Продемонстрирована передача импульсов тока по ионизованному каналу от заряженного электрода к заземленному на расстояние 10 м. При напряжении на высоковольтном электроде 40 кВ амплитуда тока составляла 10 мА и определялась, в соответствии с законом Ома, сопротивлением межэлектродного промежутка. Возможные приложения такой схемы передачи импульсов тока проиллюстрированы на рис. 2.

Если объектом «Цель» является «злоумышленник», это схема нелетального (несмертельного) воздействия, так называемый тетанайзер, идея которого была предложена в работе [15]. Используется физиологическое явление тетаназии (мышечные судороги) при воздействии последовательности электромагнитных импульсов (ЭМИ), следующих с частотой от 1 Гц до 10 кГц (задается генератором синхросигналов) и дублирующих по форме (задается генератором ЭМИ) невральные сигналы. Однако при такой схеме объект «Цель» должен быть заземлен, в противном случае тетанизирующее воздействие на объект должно передаваться по двум каналам ионизированного воздуха, что сильно усложняет задачу.

Если объектом «Цель» является грозовое облако, то описанная схема может использоваться для «приема» импульсов тока (разрядов молнии), т. е. осуществлять активную молниезащиту. Токопроводящее зеркало (или токопроводящая прозрачная пластина) должны быть заземлены, генератор ЭМИ не нужен, а генератор синхросигналов задает момент грозового разряда (в случае использования импульсного лазера). Для осуществления надежной активной молниезащиты важно знать механизм инициирования протяженных высоковольтных разрядов вдоль лазерно-индуцированных плазменных каналов в атмосферном воздухе и минимально достаточную энергию лазера в импульсе на единицу длины. Подобная минимизация была проведена в работе [16]. Схема эксперимента приведена на рис. 3. Энергия KrF-лазера с длиной волны 248 нм варьировалась в диапазоне от десятков миллиджоулей до десятков джоулей при длительности импульса, создающей начальную ионизацию воздуха и поддерживающую ее в течение  $\approx 100$  нс. Длина каустики (область в районе фокуса линзы с

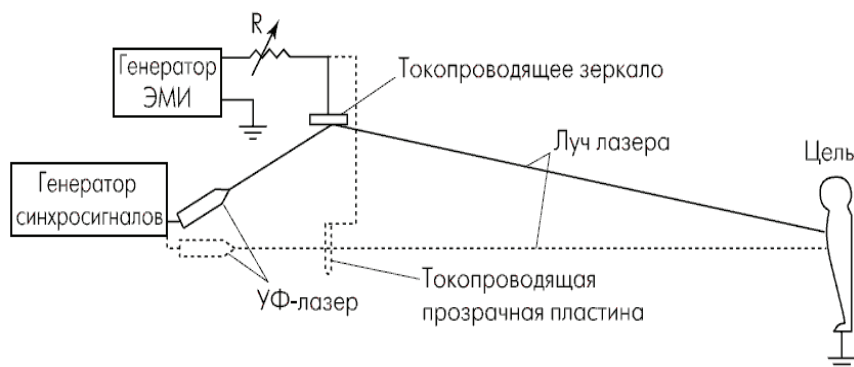


Рис. 2. Использование УФ-лазера в схемах передачи (приема) импульсов тока

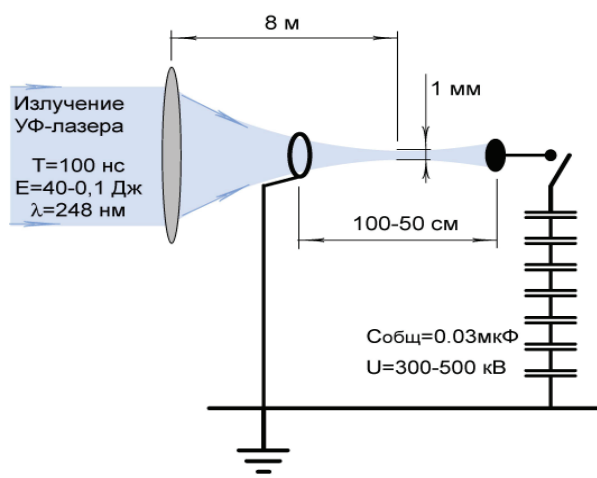


Рис. 3. Схема экспериментов по инициированию высоковольтных разрядов

минимальным диаметром лазерного пучка)  $\sim 10$  см была значительно короче межэлектродного промежутка, как и должно быть в реальном эксперименте по инициированию грозового разряда. Импульс высокого напряжения формировался 7-каскадным генератором импульсного напряжения (ГИН), собранного по схеме Маркса.

Полное управление разрядом, когда длина управляемой части разряда точно совпадает с направлением распространения лазерного пучка и занимает весь межэлектродный промежуток, наблюдалось при длинах промежутка вплоть до  $L = 80$  см (рис. 4). При этом между земляным и высоковольтным электродами зажигается прямой яркий плазменный шнур. Коммутация промежутка и ток через него возникают с некоторой задержкой относительно лазерного импульса, величина которой зависит от амплитуды напряжения  $U$ , его полярности, длины промежутка  $L$  и энергии лазерного импульса  $E_{las}$ . При снижении энергии лазерных импульсов увеличивалась задержка и уменьшалась длина управляемой части разряда. Порог возникновения управляемого пробоя составил  $E_{las}^{nop} \approx 40$  мДж (что соответствует интенсивности лазерного излучения в каустике линзы  $7 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>), при этом  $L = 60$  см и  $U = 390$  кВ. Длина управляемой части разряда составляла при этом более половины длины промежутка, а задержка увеличивалась до 5 мкс. Отметим, что при такой задержке напряжение на высоковольтном электроде в момент пробоя было не более 60 % от амплитудного напряжения  $U$ .

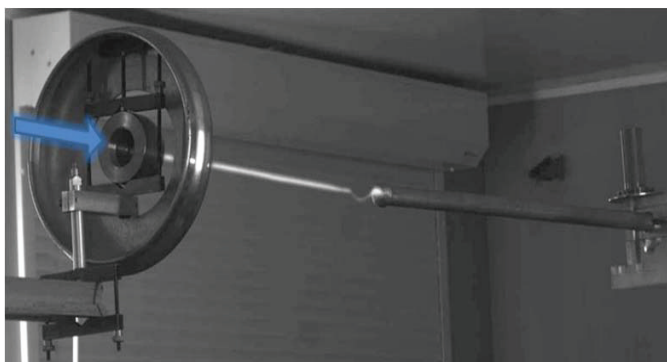


Рис. 4. Фото лазерно-управляемого высоковольтного разряда

Пороговые значения энергии Krf-лазера для управления высоковольтным разрядом оказались на несколько порядков ниже, чем для CO<sub>2</sub>-лазера [17], и таким образом экспериментально подтверждаются преимущества УФ-излучения, обсуждавшиеся выше.

**Каналирование СВЧ-излучения.** Теоретический анализ распространения электромагнитного излучения радио и СВЧ-диапазонов вдоль протяженных плазменных образований с различной концентрацией электронов и проводимостью показывает, что в области миллиметровых и субмиллиметровых длин волн становится возможным каналирование СВЧ-излучения на основе эффекта отражения на границе оптически менее плотной среды [13, 18]. Этот эффект подобен полному внутреннему отражению оптического излучения в стекловолокне, но отличается от последнего наличием поглощения СВЧ-излучения в плазменной трубке волновода. Знак эффекта (усиление или поглощение СВЧ) определялся балансом этих двух факторов. Качественным условием каналирования СВЧ-излучения в геометрическом приближении (справедливым, строго говоря, когда диаметр волновода  $D \gg \lambda_{\text{СВЧ}}$ ) является условие, когда дифракционный угол расходимости СВЧ-излучения  $\lambda_{\text{СВЧ}} \approx \lambda_{\text{СВЧ}}/D$  меньше угла полного внутреннего отражения  $\Theta$ , определяемого соотношением  $\cos \Theta = n$ , где  $n$  – показатель преломления ионизованного газа относительно воздуха. Для волновода достаточно большого диаметра низшие моды становятся «скользящими»: поперечное волновое число значительно (в  $\sim \lambda/R$  раз) меньше продольного. Важно, что данный подход не требует высокой плотности плазмы, ограничиваясь сравнительно низкой степенью ионизации воздуха  $N_e = 10^{11} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , реально достижимой в эксперименте (см. рис. 1). Были поставлены лазерные эксперименты по созданию таких волноводов [12, 13, 18, 19].

В экспериментах также использовался ранее упомянутый Krf-лазер «Гарпун». В качестве источника СВЧ-излучения использовался импульсный магнетрон с пиковой выходной мощностью 20 кВт на частоте 35,3 ГГц (длина волны 8,5 мм), оснащенный конической рупорной передающей антенной диаметром 25 мм (рис. 5).

Исходный лазерный пучок сжимался двухлинзовым телескопом и с помощью системы из аксикона (коническая линза) и линзы или из двух аксиконов (обе системы можно назвать телескопом) без потерь энергии преобразовывался в «практически» трубчатый пучок, а именно, в слабо расходящийся или слабо сходящийся трубчатый пучок с начальным внешним диаметром 120 мм и толщиной «стенки» 10 мм (рис. 6).

В принципе, с помощью телескопа из двух одинаковых аксиконов разного диаметра можно получить идеальный протяженный трубчатый пучок с внешним диаметром, определяемым бóльшим аксиконом. Однако из-за малости угла преломления аксикона (обычно  $\sim 2^\circ$ ,

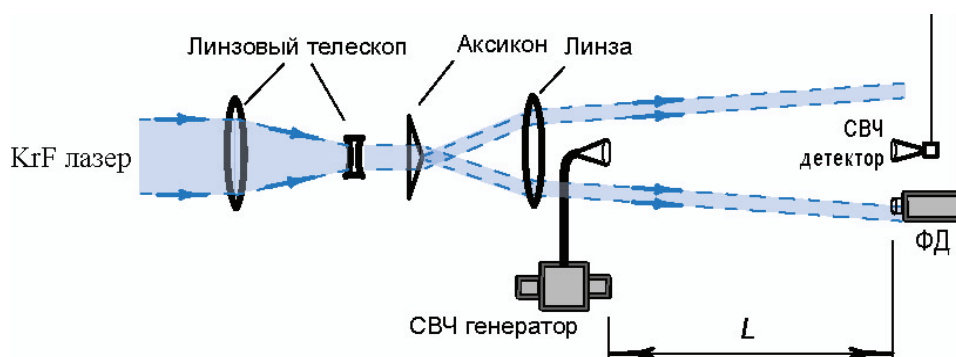
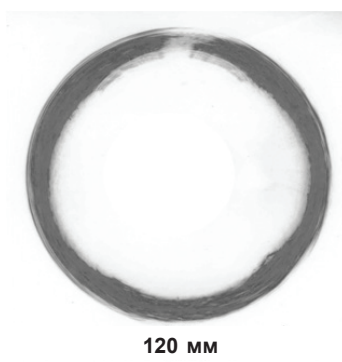


Рис. 5. Оптимальная экспериментальная схема по созданию плазменного волновода для СВЧ-излучения:

ФД – фотодиод (для регистрации лазерного импульса)



**Рис. 6. Отпечаток лазерного пучка на фотобумаге сразу после телескопа из линзы и аксикона (из двух аксиконов)**

угол при вершине конуса соответственно  $\sim 176^\circ$ ) трудно изготовить два точно одинаковых аксикона разного диаметра. Небольшое различие в углах преломления применявшихся в [13] аксиконов делало трубчатый лазерный пучок из двухаксиконного телескопа сходящимся: его диаметр убывал в 2 раза на расстоянии вдоль оси около 15 м. В случае использования одного аксикона трубчатый пучок расходился с углом  $2,4^\circ$  (угол преломления меньшего аксикона). При использовании комбинации аксикона и линзы, уменьшавшей угол расхождения трубчатого пучка (см. рис. 5), было достигнуто наиболее эффективное каналирование СВЧ-излучения: приемник, установленный на расстоянии до 60 м от излучателя, регистрировал увеличение амплитуды СВЧ-сигнала в 6 раз при включении лазера. Длина, на которой происходило взаимодействие СВЧ-излучения с плазмой в слаборасходящемся волноводе оценивалась в эксперименте путем перекрытия лазерного пучка диэлектрическим экраном на различных расстояниях от СВЧ-излучателя и составила около 10 м.

При этом эффективное каналирование СВЧ-излучения достигалось только в случае искусственного увеличения электронной плотности в воздухе. Для этого на полу коридора, непосредственно под создаваемым плазменным волноводом, расстилалось 10-метровое полотно и сбрызгивалось керосином. Исходная средняя интенсивность излучения в кольце на рис. 6 (стенка плазменного волновода) составляла  $I = 10^7$  Вт/см<sup>2</sup>, при этом концентрация электронов в воздухе составляет  $N_e \sim 10^{10}$  см<sup>-3</sup> (см. рис. 1). Однако в парах керосина концентрация возрастала на 3 порядка и составляла уже  $N_e \sim 10^{13}$  см<sup>-3</sup>.

Для практической реализации обнаруженного эффекта каналирования СВЧ-излучения необходимо найти способ увеличить концентрацию электронов до значений  $N_e \sim 10^{12} - 10^{13}$  см<sup>-3</sup> в атмосферном воздухе с естественным составом (без искусственных органических примесей). Исследование механизмов многофотонной ионизации воздуха УФ-лазерным излучением и процесса гибели электронов за счет их прилипания к молекулярному кислороду [12, 13], а также анализ усиления ультракоротких импульсов (УКИ) в КгF-усилителях [20] дают основания утверждать, что наиболее эффективным образом это можно сделать, используя комбинацию УКИ и длинных УФ-импульсов или цуга субпикосекундных УФ-импульсов с энергией  $\sim 1$  Дж, следующих с временным интервалом  $\sim 2$  нс. Последний определяется временем восстановления инверсии населенностей (усиления) в активной среде КгF-усилителя, которое оказывается короче характерного времени прилипания электронов, что обеспечивает эффективное накопление электронов в плазме. Вычисления, проведенные для волновода с радиусом  $R = 10$  см, показали, что дальность распространения увеличивается с уменьшением длины волны и для субмиллиметровых волн достигает нескольких километров [13].

Очевидно востребованным использование эффекта каналирования СВЧ может оказаться в радарных технологиях. Направленное действие электромагнитного излучения может также использоваться для нарушения нормального функционирования современной радиоэлектронной аппаратуры [21]. В литературе обсуждается идея электромагнитного поражения систем зажигания транспортных средств и датчиков ориентации и управления беспилотных летательных аппаратов, так называемое VDW (Vehicle Disabling Weapon) [22, 23]. Традиционные излучательные антенны (см. напр., [24]) имеют недостаточную угловую (пространственную) избирательность ( $10\text{--}30^\circ$  и более), что не позволяет селективировать одиночные объекты на фоне группы, ограничивает дальность действия (за счет большого углового рассеяния и, следовательно, затухания). Повышение мощности СВЧ-, ВЧ-генератора для компенсации такого затухания ограничено пороговым явлением электрического пробоя атмосферы мощным излучением на выходе из генератора.

**Плазменные каналы-филаменты – новые перспективы.** Новые возможности для формирования протяженных ионизованных каналов открылись в середине 1990-х гг. после создания лазерных систем, генерирующих ультракороткие импульсы (УКИ) фемтосекундной длительности со сверхвысокой мультитераваттной пиковой мощностью. Наиболее известным является лазер на основе кристаллов титан-сапфира (Ti:Sa), генерирующий УКИ с длиной волны  $\lambda \approx 800$  нм. Оказалось, что по мере распространения такого импульса в воздухе формируются тонкие протяженные нити с высокой концентрацией энергии – филаменты, распространяющиеся на десятки и сотни метров [25, 26]. Образование филаментов есть следствие нестационарного самовоздействия лазерного излучения в нелинейной среде. Важно отметить, что эффект филаментации сохраняется не только при пониженной плотности атмосферы (т. е. на высоте), но и в условиях сильного дождя и ограниченной видимости [27, 28]. К настоящему времени по УКИ и создаваемым ими проводящим каналам-филаментам опубликовано большое число работ (см. например, [29–32]), однако в основном исследовалось ИК-излучение.

Длина управляемого разряда с использованием ИК-филамент была доведена до 3,8 м, при этом напряжение было на 32 % меньше статического пробойного значения [33]. Эксперименты по направленной передаче 10-ГГц СВЧ-излучения в полых цилиндрическом плазменном волноводе со стенками, составленными из плазменных каналов – филаментов, проводились в работе [34] но длина каналирования составила всего 16 см. Что касается УФ-диапазона, здесь филаментация лазерного излучения в атмосферном воздухе изучена еще недостаточно. На практике УФ УКИ фемтосекундной длительности получают путем нелинейного преобразования излучения титан-сапфирового лазера в УФ-диапазон с эффективностью 5–10 %; они могут затем усиливаться в K<sub>r</sub>F-усилителях на длине волны 248 нм.

**Заключение.** Показано, что наиболее эффективным (с точки зрения энергетических затрат) для создания протяженных плазменных каналов является лазерное УФ-излучение, которое ионизирует воздух в нелинейных процессах прямой или ступенчатой (через промежуточные возбужденные состояния молекул) многофотонной (3–4-кратной) ионизации. Используя комбинацию ультракоротких и длинных УФ-импульсов (или цугов УКИ, отстоящих на времена, соизмеримые с временем жизни свободных электронов  $\sim 5\text{--}10$  нс), можно поддерживать высокую степень ионизации в плазме необходимый период времени [35].

Наиболее обнадеживающие результаты достигнуты в области направленной передачи энергии СВЧ-излучения вдоль лазерно-индуцированного плазменного волновода, и получены они в России. Способы и устройства для направленной передачи СВЧ запатентованы в РФ [36–38], которая в последние 3 года является лидером и по числу публикаций в данном направлении исследований. Замена высоковольтных генераторов на основе емкостных ГИНов в лазерных K<sub>r</sub>F-системах, использующихся для создания рупорных плазменных волноводов, генераторами на основе SOS-диодов, разрабатываемыми Институтом электрофизики Уральского научного центра РАН (г. Екатеринбург), позволит существенно уменьшить

размеры установки вплоть до мобильного (с возможностью размещения на автомобиле) варианта. Кооперация научно-исследовательских работ ИОФ РАН в области плазменных релятивистских источников СВЧ-импульсов с мощностью в десятки и сотни мегаватт и ФИАН в области разработки мощных эксимерных лазерных УФ-систем является предпосылкой для создания импульсных источников СВЧ-излучения мегаваттного уровня мощности с лазерной расходимостью  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  рад.

### Список литературы

1. **Базелян Э.М., Райзер Ю.П.** Механизм притяжения молний и проблема лазерного управления молнией // Успехи физических наук. 2000. Т. 170. № 7.
2. **Базелян Э.М., Райзер Ю.П.** Физика молнии и молниезащита. М.: Физматлит, 2001.
3. **Аскарьян Г.А., Рабинович М.С., Савченко М.М., Смирнова А.Д.** Письма в журнал // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1965. Т. 1.
4. **Аскарьян Г.А.** Волноводные свойства трубчатого светового луча // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1968. Т. 55.
5. **Пилипецкий Н.Ф., Рустамов А.Р.** Письма в журнал // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1965. Т. 2.
6. **Коорман D.V., Wilkenson T.D.** Channeling of ionizing electrical streamer by laser beam, J. Appl. Phys., Vol. 42, 1971.
7. **Greig J.R., Koopman D.W., Fernsler R.F., Pechachek R.E., Vitkovsky I.M. and Ali A.W.** Electrical discharges guided by pulsed CO<sub>2</sub>-laser radiation, Phys. Rev. Lett., Vol. 41, 1978.
8. **Зворыкин В.Д., Николаев Ф.А., Холин И.В., Чугунов А.Ю., Шелоболин А.В.** Инициирование протяженных сильноточных разрядов длинной лазерной искрой // Физика плазмы. 1979. Т. 5.
9. **Zhao X.M., Wang Y.C., Diels J.-C., Elizondo J.** Femtosecond ultraviolet pulse induced electrical discharges in gases. IEEE J. Quant. Electron., Vol. 31, 1995.
10. **Miki M., Wada A.** Guiding of electrical discharges under atmospheric air by ultraviolet laser-produced plasma channel. J. Appl. Phys., Vol. 80, 1996.
11. **Rambo P., Schwarz J., Diels J.-C.** High-voltage electrical discharges induced by an ultrashort-pulse UV laser system, J. Opt. A: Pure Appl. Opt., Vol. 3, 2001.
12. **Зворыкин В.Д., Левченко А.О., Молчанов А.Г., Сметанин И.В., Устиновский Н.Н.** Канализирование СВЧ-энергии в плазменных волноводах, создаваемых в атмосфере мощным УФ-лазером, Краткие сообщения по физике // ФИАН. 2010. № 2.
13. **Zvorykin V.D., Levchenko A.O., Shutov A.V., Solomina E.V., Ustinovskii N.N. and Smetanin I.V.** Long-distance directed transfer of microwaves in tubular sliding-mode plasma waveguides produced by KrF laser in atmospheric air. Phys. Plasmas 19, 033509, 2012.
14. **Басов Н.Г., Вадковский А.Д., Зворыкин В.Д., Метревели Г.Е., Сучков А.Ф.** Инжекционное управление параметрами излучения мощного KrF-лазера с электронно-пучковой накачкой // Квантовая электроника. 1994. Т. 21. № 1.
15. **Herr J.E.** Non-lethal tetanizing weapon. US Patent №. 5 675 103, H01T 23/00. Priority 07.10.97.
16. **Зворыкин В.Д., Левченко А.О., Устиновский Н.Н.** Управление протяженными высоковольтными электрическими разрядами в атмосферном воздухе УФ излучением KrF-лазера // Квантовая электроника. 2011. Т. 41. № 3.
17. **Апполонов В.В., Василяк Л.М., Казанцев С.Ю., Кононов И.Г., Поляков Д.Н., Сайфулин А.В., Фирсов К.Н.** Направление электрического разряда сплошной лазерной искрой при фокусировке излучения CO<sub>2</sub>-лазера коническим зеркалом // Квантовая электроника. 2002. Т. 32.
18. **Зворыкин В.Д., Левченко А.О., Сметанин И.В., Устиновский Н.Н.** Транспортировка СВЧ-излучения в плазменных волноводах скользящих мод // Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2010. Т. 91.



19. **Smetanin I.V., Zvorykin V.D., Levchenko A.O., Ustinovskii N.N.** Transfer of microwave radiation in sliding modes of plasma waveguides. *J. Russian Las. Res.*, Vol. 31, 2010.
20. **Зворыкин В.Д., Левченко А.О., Устиновский Н.Н.** Усиление субпикосекундных УФ-импульсов в многокаскадной лазерной Ti:сапфир-KrF-системе ГАРПУН-МТВ // *Квантовая электроника*. 2010. Т. 40.
21. **Слюсар В.** Новое в несмертельных арсеналах: нетрадиционные средства поражения // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2003. № 2.
22. **Sutton R.W., Rains J.C. Jr.** Remote vehicle disabling system. US Patent № 5 293 527, H01Q 1/00. Priority 08.03.94.
23. **J.E. Herr.** Engine disabling weapon, US Patent № 5 952 600, H01T 23/00. Priority 14.09.99.
24. **Слюсар В.** Генераторы супермощных электромагнитных импульсов в информационных войнах // *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2002. № 5.
25. **Braun A., Korn G., Liu X., et al.** *Opt. Lett.* Vol. 20. № 1, 1995.
26. **Brodeur A., Kosareva O.G., Chien C.Y., et al.** *Opt. Lett.* Vol. 22. № 4, 1997.
27. **Mechain G., Mejean G., Ackerman R., Rohwetter P., Andre Y.-B., Kasparian J., Prade B., Stelmazczyk K., Yu J., Winn W., Vern L.A., Mysyrowicz A., Saubrey R., Woste L., Wolf J.-P.** Propagation of fs TW laser filaments in adverse atmospheric conditions. *Appl. Phys. B*, Vol. 80, 2005.
28. **Rodriguez M., Bourayon R., Mejean G., Kasparian J., Yu J., Salmon E., Scholz A., Stecklum B., Eisloffel J., Laux U., Hatzes A.P., Saubrey R., Woste L., Wolf J.-P.** Kilometer-range nonlinear propagation of femtosecond laser pulses. *Phys. Rev. E*, Vol. 69, 2004.
29. **Couairon A., Mysyrowicz A.** Femtosecond filamentation in transparent media. *Physics Reports*, Vol. 441, Issues 2-4, 2007.
30. **Berge L., Skupin S., Nuter R., Kasparian J., Wolf J.-P.** Ultrashort filaments of light in weakly ionized, optically transparent media. *Reports on Progress in Physics*, Vol. 70, 2007.
31. **Kasparian J. and Wolf J.-P.** *Opt. Express* Vol. 16, 2008. **Kandidov V.P., Shlenov S.A., and Kosareva O.G.** *Quantum Electron.* Vol. 39, 2009.
32. **Chin S.L.** Femtosecond Laser Filamentation. Monography, Springer series on Atomic, Optical, and Plasma Physics, Vol. 55, New York, 2010.
33. **Rodriguez M., Sauerbrey R., Wille H., Woste L., Fujii T., Andre Y.-B., Mysyrowicz A., Klingbeil L., Rethmeier K., Kalkner W., Kasparian J., Salmon E., Yu J., Wolf J.-P.** Triggering and Guiding Megavolt Discharges Using Laser-Induced Ionized Filaments. *Opt. Lett.* Vol. 27, 2002.
34. **Chateaufneuf M., Payeur S., Dubois J., and Kieffer J.-C.** Microwave guiding in air by a cylindrical filament array waveguide. *Appl. Phys. Lett.* Vol. 92, 2008.
35. **Ionin A.A., Kudryashov S.I., Levchenko A.O. et al.** Triggering and guiding electric discharge by a train of ultraviolet picosecond pulses combined with a long ultraviolet pulse. *Appl. Phys. Letters*, Vol. 100, 2012.
36. **Зворыкин В.Д., Левченко А.О., Сметанин И.В., Устиновский Н.Н.** Патент на изобретение № 2406188, Дата начала отсчета срока действия патента: 15.09.2009 «Устройство направленной транспортировки СВЧ электромагнитного излучения»
37. **Зворыкин В.Д., Левченко А.О., Сметанин И.В., Устиновский Н.Н.** Патент на полезную модель № 90620, Дата начала отсчета срока действия патента: 21.09.2009 «Устройство направленной транспортировки СВЧ электромагнитного излучения»
38. **Зворыкин В.Д., Левченко А.О., Сметанин И.В., Устиновский Н.Н.** Патент на изобретение № 2411662, Дата начала отсчета срока действия патента: 31.05.2010 «Способ направленной транспортировки СВЧ электромагнитного излучения»