

# Каналирование СВЧ излучения по двухпроводной линии, содержащей плазменный филамент, создаваемый интенсивными фемтосекундными лазерными импульсами в воздухе\*

Н.А.Богатов, А.И.Кузнецов, А.И.Смирнов, А.Н.Степанов

*Экспериментально продемонстрирована возможность каналирования СВЧ излучения по двухпроводной линии, в которой роль одного из проводников играет плазменный филамент, создаваемый в воздухе интенсивными фемтосекундными лазерными импульсами. Показано, что в процессе распространения СВЧ излучения по такой линии формируются сверхкороткие импульсы, длительность которых монотонно уменьшается при увеличении длины трассы распространения (вплоть до сравнимой с периодом СВЧ поля величины). Исследованные эффекты могут быть использованы для диагностики плазмы в филаменте.*

**Ключевые слова:** филаментация, керровская нелинейность, самофокусировка, фемтосекундные лазерные импульсы.

## 1. Введение

Филаментация интенсивного фемтосекундного лазерного пучка в атмосфере, обусловленная балансом между самофокусирующей керровской нелинейностью воздуха и дефокусирующим действием плазмы, возникающей из-за ионизации, в последнее десятилетие привлекает пристальное внимание исследователей [1, 2]. Плазменные нити (филаменты) применяются при создании источников терагерцевого излучения [3], для инициации высоковольтных разрядов в мегавольтных коммутаторах, а также при управлении молнией в грозовом облаке [4, 5]. Возникающее при филаментации значительное уширение спектра лазерного излучения также представляет интерес для целого ряда перспективных приложений [6].

Актуальной представляется и проблема каналирования микроволнового излучения с помощью плазменного филамента, создаваемого в воздухе интенсивными фемтосекундными лазерными импульсами. Это позволило бы обеспечить эффективную доставку энергии микроволнового излучения с сохранением высокой плотности мощности излучения на расстояние, равное длине филаментации, достигающей десятков метров [1]. Использование плазмы, создаваемой лазерными импульсами наносекундной длительности, для транспортировки СВЧ излучения исследуется уже довольно давно [7–9]. Однако специфика применения высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения в целях каналирования микроволнового излучения в атмосферных условиях, связанная в первую очередь с филаментацией лазерных пучков, обратила на себя внимание исследователей только в последнее время. В теоретической работе [10] было предложено

использовать для каналирования микроволнового излучения цилиндрический плазменный волновод, стенки которого образуются при множественной филаментации фемтосекундного лазерного пучка. В [11] экспериментально продемонстрирована реализация такого подхода с использованием лазерного комплекса мощностью 100 ТВт.

В настоящей работе проведено экспериментальное исследование каналирования микроволнового излучения вдоль двухпроводной линии, содержащей в качестве одного из проводников плазменный филамент. Данная идея ранее обсуждалась нами в работе [12]. Однофиламентационный режим, применяемый для каналирования микроволнового излучения в этом случае, позволяет кардинально снизить требования к мощности фемтосекундного лазерного излучения по сравнению с работами [10, 11].

## 2. Описание эксперимента

В эксперименте использовался фемтосекундный лазерный комплекс на кристаллах Ti:сапфира [13], генерирующий импульсное излучение с длительностью  $t_p \approx 70$  фс и частотой повторения  $F = 10$  Гц на длине волны  $\lambda \approx 0.8$  мкм. Максимальная энергия лазерного импульса не превышала 3 мДж. Лазерный пучок диаметром  $d \approx 20$  мм (по уровню  $1/e^2$ ) фокусировался в воздухе сферическим зеркалом с фокусным расстоянием  $f = 80.6$  см. В фокальной области при превышении пороговой энергии импульса ( $\sim 0.5$  мДж) наблюдалось образование светящейся плазменной нити (филамента). При максимальной энергии лазерного импульса длина филамента достигала 5 см. Филамент выступал в качестве одного из двух проводников двухпроводной линии, по которой распространялось микроволновое излучение. Другим проводником двухпроводной линии служила медная проволока диаметром 0.5 мм.

СВЧ излучение с частотой 34 ГГц и мощностью 1–2 мВт от генератора Г4-156 поступало в стандартный волновод размером  $7.2 \times 3.4$  мм (рис. 1). Для согласования стандартного волновода с двухпроводной линией [14] секция волновода симметрично стачивалась по широкой стенке до

\* Доложена на конференции «Оптика лазеров 2008», С.-Петербург, Россия.

Н.А.Богатов, А.И.Кузнецов, А.И.Смирнов, А.Н.Степанов. Институт прикладной физики РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Ульянова, 46; e-mail: step@ufr.appl.sci-nnov.ru

Поступила в редакцию 27 февраля 2009 г., после доработки – 14 мая 2009 г.

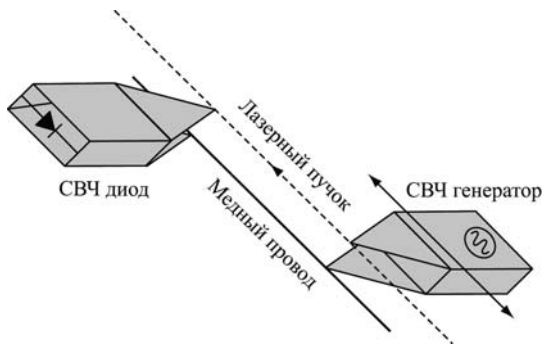


Рис.1. Схема эксперимента.

нуля. Аналогичная сточенная секция волновода использовалась для согласования выхода двухпроводной линии с СВЧ детектором. Длина двухпроводной линии могла изменяться путем перемещения секции волновода с СВЧ детектором вдоль проводников. Плазменный филамент с помощью диэлектрических зеркал формировался параллельно медной проволоке двухпроводной линии и располагался на расстояниях  $\sim 100$  мкм от конца сточенных секций волновода.

Прошедший через двухпроводную линию сигнал регистрировался СВЧ детектором, подключенным к осциллографу (Tektronix TDS-3052B, 500 МГц), что позволяло анализировать принимаемый диодом сигнал с высоким временным разрешением. При прохождении лазерного импульса возникающая в области фокуса плазменная нить приводила к формированию двухпроводной линии, по которой могло распространяться СВЧ излучение. В эксперименте измерялись амплитуда и длительность СВЧ импульса в зависимости от расстояния между приемной и передающей секциями волновода.

### 3. Результаты и их обсуждение

На рис.2 представлены сигналы с СВЧ диода при длине двухпроводной линии  $z = 2.2$  см. Штриховая кривая получена в отсутствие фемтосекундного лазерного импульса и, следовательно, плазменного филамента. Сигнал в режиме непрерывного СВЧ излучения определялся прохождением излучения от генератора через систему при наличии только одного (медного) провода в двухпроводной линии. При формировании фемтосекундным

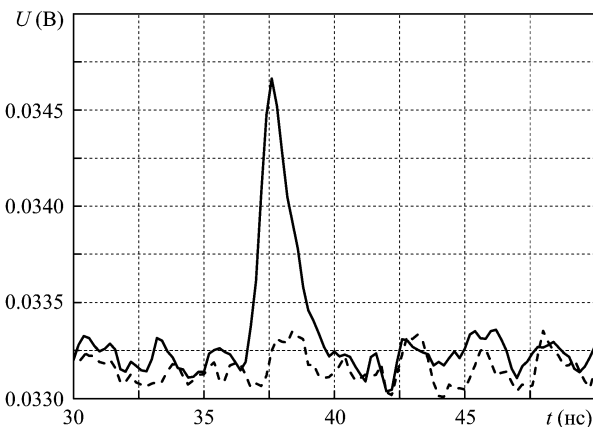


Рис.2. Сигнал с выхода СВЧ диода  $U$  при наличии филамента (сплошная кривая) и в его отсутствие (штриховая кривая). Длина двухпроводной линии  $z = 2.2$  см.

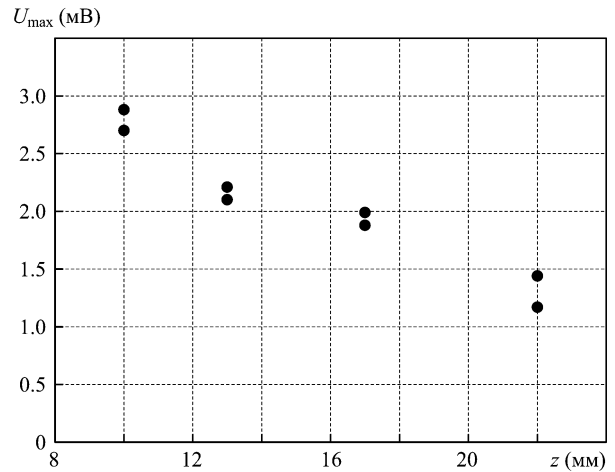


Рис.3. Зависимость амплитуды импульсного СВЧ сигнала  $U_{max}$  от длины двухпроводной линии.

лазерным импульсом плазменного филамента на осциллограмме с СВЧ диода наблюдался положительный импульс (сплошная кривая), свидетельствующий о возрастании коэффициента прохождения СВЧ излучения. Этот импульс был синхронизован с лазерным импульсом. Длительность СВЧ импульса составляла примерно 1.5 нс во всех выполненных экспериментах и не менялась при изменении длины двухпроводной линии и энергии лазерного импульса. По-видимому, длительность импульса микроволнового излучения определялась временным откликом (аппаратной функцией) системы диагностики (СВЧ диод и осциллограф) и значительно превышала длительность СВЧ импульса на выходе двухпроводной линии.

При выключенном СВЧ генераторе, но в присутствии филамента никакого сигнала на осциллографе не наблюдалось, что подтверждает связь импульса микроволнового излучения с СВЧ излучением, передающимся через двухпроводную линию при образовании филамента.

На рис.3 показана зависимость амплитуды импульсного СВЧ сигнала от длины двухпроводной линии. Как оказалось, амплитуда уменьшается обратно пропорционально расстоянию между приемной и передающей секциями волновода.

Обсудим особенности транспортировки СВЧ излучения по двухпроводной линии, у которой одним из проводников является плазменный филамент. Для этого удобно использовать телеграфные уравнения, которыми хорошо описываются электромагнитные поля в двухпроводной линии. Будем для простоты предполагать, что распределение электронной концентрации  $n_e$  вдоль филамента однородно ( $n_e = const$ ).

Как следует из теории длинных линий [14], дисперсионное соотношение, связывающее в случае монохроматических волн ( $\sim \exp[i(\omega t - hx)]$ ) постоянную распространения  $h = h' - ih''$  с частотой сигнала  $\omega$ , имеет вид

$$h^2 = \omega^2 CL \left( 1 + \frac{R}{i\omega L} \right), \tag{1}$$

где  $R = 4/(\pi d_1^2 e \mu n_e)$  – погонное сопротивление двухпроводной линии, определяемое параметрами плазменной нити;  $d_1$  – диаметр нити;  $e$  – элементарный заряд;  $\mu$  – подвижность электронов в воздухе в слабом электрическом поле;

$$L \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{4a^2}{d_1 d_2}, \quad C \approx 2\pi\epsilon_0 / \ln \frac{4a^2}{d_1 d_2}$$

$$t_{\text{mcw}} = \frac{1}{zk\alpha_r}. \quad (7)$$

– погонные индуктивность и емкость линии;  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  – диэлектрическая и магнитная проницаемости вакуума;  $a$  – расстояние между проводниками линии;  $d_2$  – диаметр второго проводника.

При  $R < \omega L$  из (1) непосредственно следует, что пространственный декремент затухания  $h''$  обратно пропорционален концентрации электронов в плазменной нити:

$$h'' \approx \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \approx \frac{k}{n_e}, \quad (2)$$

где

$$k = \frac{2}{d_1^2 \epsilon \mu \ln(2a/\sqrt{d_1 d_2})} \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \\ = \frac{1}{Z \pi d_1^2 \epsilon \mu \ln(2a/\sqrt{d_1 d_2})} \quad (3)$$

– коэффициент пропорциональности;  $Z = 60$  Ом. Динамика плазмы непосредственно после окончания создающего ее лазерного импульса определяется рекомбинацией [1], и концентрация  $n_e$  после ионизирующего лазерного импульса изменяется по закону

$$n_e = \frac{n_{e0}}{1 + n_{e0}\alpha_r t}, \quad (4)$$

где  $n_{e0}$  – начальная концентрация свободных электронов (в момент окончания лазерного импульса);  $t$  – время;  $\alpha_r$  – коэффициент рекомбинации.

После подстановки (4) в (2) получаем следующее выражение, описывающее временную эволюцию декремента затухания:

$$h'' = \frac{k}{n_{e0}} (1 + n_{e0}\alpha_r t). \quad (5)$$

Здесь время  $t$  отсчитывается от момента окончания лазерного импульса.

Тогда для интенсивности СВЧ сигнала  $I(z, t)$  на выходе из двухпроводной линии длиной  $z$  с учетом (5) получим выражение

$$I(z, t) = I_0 \exp(-2h''z) \\ = I_0 \exp\left(-2z \frac{k}{n_{e0}}\right) \exp(-zk\alpha_r t), \quad (6)$$

где  $I_0$  – интенсивность СВЧ поля на входе в двухпроводную линию.

Как следует из формулы (6), из-за распада плазмы в плазменном филаменте прохождение СВЧ излучения через двухпроводную линию зависит от времени. В результате формируется импульсный СВЧ сигнал, длительность которого определяется временем распада плазмы и расстоянием между приемной и передающей секциями волновода. Характерная длительность прошедшего через двухпроводную линию СВЧ импульса  $t_{\text{mcw}}$  оказывается обратно пропорциональной длине линии  $z$ :

Оценим длительность СВЧ импульса для наших экспериментальных условий. Используем в оценках следующие значения параметров: диаметр филамента  $d_1 = 100$  мкм [1], диаметр медной проволоки  $d_2 = 0.5$  мм, расстояние между проводниками двухпроводной линии  $a \approx 4$  мм, подвижность электронов в малых полях  $\mu = 15000 \text{ В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{см}^2$  [15]; коэффициент рекомбинации  $\alpha_r = 2 \times 10^{-7} \text{ см}^3/\text{с}$  [16], максимальная длина линии  $z_{\text{max}} \approx 2.2$  см. В итоге находим, что  $t_{\text{mcw}} \approx 400$  пс. Столь малое значение  $t_{\text{mcw}}$  подтверждает высказанное выше предположение о том, что временная форма принимаемого СВЧ сигнала целиком определяется аппаратной функцией детектирующей системы. В этом случае можно считать максимальную амплитуду  $U_{\text{max}}$  измеряемого в эксперименте сигнала с СВЧ детектора пропорциональной энергии СВЧ импульса, т. е. интегралу по времени от интенсивности СВЧ излучения [18]:

$$U_{\text{max}}(z) \sim \int_0^\infty I(z, t) dt = \frac{I_0}{zk\alpha_r} \exp\left(-2z \frac{k}{n_{e0}}\right). \quad (8)$$

Детектируемый сигнал согласно (8) обратно пропорционален длине линии  $z$  и прямо пропорционален экспоненциальному фактору, также содержащему  $z$ . В эксперименте (см. рис.3) наблюдалась обратно пропорциональная зависимость от длины линии. Это означает, что экспоненциальный фактор в диапазоне измеряемых величин не играет роли, т. е.  $2z(k/n_{e0}) \ll 1$ . Данное соотношение позволяет оценить снизу концентрацию плазмы в филаменте:  $n_{e0} > 3 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Полученная оценка не противоречит известным экспериментальным результатам (см., напр., [1]).

Возвращаясь к формуле (6), заметим, что из-за высокой начальной концентрации плазмы в филаменте амплитуда СВЧ импульса при распространении по двухпроводной линии, содержащей филамент, остается постоянной, но длительность импульса уменьшается обратно пропорционально  $z$ . В итоге на выходе линии формируются сверхкороткие СВЧ импульсы, параметрами которых можно управлять путем изменения длины линии. Приведенная выше оценка длительности СВЧ импульса ( $t_{\text{mcw}} \approx 400$  пс при  $z = 2.2$  см) составляет 14 периодов СВЧ поля. Увеличив длину филамента до 30 см, получим предельно короткий СВЧ импульс с временным масштабом порядка одного периода поля.

Таким образом, в данной работе экспериментально продемонстрирована возможность каналирования СВЧ излучения по двухпроводной линии, в которой роль одного из проводников играет плазменный филамент, создаваемый в воздухе интенсивным фемтосекундным лазерным излучением. Показано, что в процессе распространения СВЧ излучения в такой линии формируются импульсы с длительностью, монотонно уменьшающейся при увеличении длины двухпроводной линии до сравнимой с периодом СВЧ поля величины. Измеряя параметры этих СВЧ импульсов, можно осуществлять диагностику концентрации плазмы в филаменте.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 06-02-16300-а.

2. Braun A., Korn G., Liu X., Du D., Squier J., Mourou G. *Opt. Lett.*, **20** (1), 73 (1995).
3. D'Amico C., Houard A., Franco M., Prade B., Mysyrowicz A. *Opt. Express*, **15**, 15274 (2007).
4. La Fontaine B., Comtois D., Chien C.-Y., Desparois A., Génin F., Jarry G., Johnson T., Kieffer J.-C., Martin F., Mawassi R., Pepin H., Rizk F., Vidal F., Potvin C., Couture P., Mercure H. *J. Appl. Phys.*, **88**, 610 (2000).
5. Alexandrov N.L., Bazeljan E.M., Bogatov N.A., Kiselev A.M., Stepanov A.N., Tikhomirov B.A., Tikhomirov A.B. *Proc. Int. Conf. «High-power Laser Beams» (HPLB-2006)* (N.Novgorod–Yaroslavl, 2006, p. 107).
6. Zaïr A., Guandalini A., Schapper F., Holler M., Biegert J., Gallmann L., Keller U., Couairon A., Franco M., Mysyrowicz A. *Opt. Express*, **15**, 5394 (2007).
7. Аскаръян Г.А. *ЖЭТФ*, **55**, 1400 (1968).
8. Аскаръян Г.А., Раевский И.М. *Письма в ЖТФ*, **8**, 1131 (1982).
9. Колпаков В.И., Норинский Л.В. *Письма в ЖТФ*, **18**, 55 (1992).
10. Dormidonov A.E., Valuev V.V., Dmitriev V.L., Shlenov S.A., Kandidov V.P. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **6733**, 67332S (2007).
11. Châteauneuf M., Payeur S., Dubois J., Kieffer J.-C. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 091104 (2008).
12. Кузнецов А.И., Богатов Н.А., Смирнов А.И., Степанов А.Н. *Труды 5-го Российского симп. «Проблемы физики ультракоротких процессов в сильнонеравновесных средах»* (Новый Афон, 2007, с. 25).
13. Бабин А.А., Киселев А.М., Сергеев А.М., Степанов А.Н. *Квантовая электроника*, **31**, 623 (2001).
14. Вайнштейн Л.А. *Электромагнитные волны* (М.: Радио и связь, 1988).
15. *Физические величины. Справочник*. Под ред. И.С.Григорьева, Е.З.Мейлихова (М.: Энергоатомиздат, 1991).
16. Словецкий Д.И. *Механизмы химических реакций в неравновесной плазме* (М.: Наука, 1980).
17. Гоноровский И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы* (М.: Радио и связь, 1986).