

ПРИМЕНЕНИЕ ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ЛАЗЕРА ДЛЯ ИМИТАЦИИ ПЛАЗМЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

К.Н. Синогейкин¹, А.Е. Волков¹, Н.В. Суетина²

¹Военная Академия РВСН им. Петра Великого, Москва, Российская Федерация
e-mail: nvsnvs1946@mail.ru

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Предложен способ лабораторных исследований свойств плазменных образований, инициированных с помощью твердотельного лазера. Приведена схема лабораторной установки. Рассмотрены этапы развития инициированного СВЧ-разряда при различных давлениях воздуха. Описаны результаты исследований влияния точности синхронизации лазерного и СВЧ-импульсов при различных давлениях на свойства разряда. Даны рекомендации по проведению экспериментальных исследований искусственных плазменных образований, инициированных лазерным импульсом.

Ключевые слова: плазменное образование, инициированный СВЧ-разряд, методика экспериментальных лабораторных исследований свойств плазменных образований, твердотельный лазер, синхронизация, инициирующий лазерный импульс.

USING A SOLID-STATE LASER TO IMITATE PLASMA FORMATIONS UNDER LABORATORY CONDITION

K.N. Sinogeykin¹, A.E. Volkov¹, N.V. Suetina²

¹Peter the Great Military Academy of Strategic Missile Troops, Moscow, Russian Federation
e-mail: nvsnvs1946@mail.ru

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

A technique is proposed for laboratory studies of properties of plasma formations activated using a solid-state laser. A scheme of the laboratory setup is given. Stages of evolution of the activated microwave discharge with different air pressures are considered. Results of investigations of impact of the laser and microwave pulses on the discharge properties with different pressures are described. Recommendations on performing experimental studies of artificial plasma formations induced by a laser pulse are given.

Keywords: plasma formation, activated microwave discharge, technique of experimental laboratory studies of plasma formations, solid-state laser, synchronization, activating laser pulse.

При проведении в лабораторных условиях исследований свойств искусственных плазменных образований, их взаимодействия с материалами и научно-исследовательской аппаратурой актуален вопрос обеспечения стабильности и повторяемости характеристик получаемых плазменных образований в серии последовательных экспериментов. Для решения этой проблемы предлагается использовать твердотельный лазер [1, 2]. Возможность управления энергией и частотой им-

пульсов, а также стабильность энергетических параметров позволяют выполнять измерения с необходимой достоверностью.

В настоящей статье предлагается схема экспериментальных исследований магнитных полей искусственных плазменных образований, инициированных импульсом Nd-лазера и СВЧ-разрядами, применяемых для получения разряда при уровне СВЧ-поля ниже критического. Исследования проводились на базе Лаборатории физики и химии высокоскоростных потоков газоразрядной плазмы отделения Магнито-плазменной аэродинамики и МГД-преобразования энергии Института высоких температур РАН.

Иницирующий импульс лазера (схема эксперимента показана на рис. 1) подводился в фокус СВЧ-пучка вблизи диэлектрической поверхности экрана, внутри которого размещались датчики магнитного поля. Максимальная энергия лазера достигала 500 мДж, диаметр пучка 6 мм, расходимость менее 0,7 мрад и длительность импульсов 10...14 нс, фокусное расстояние линзы 4 см, размер искры при нормальных условиях составлял $(2...3) \times (5...7)$ мм.

Для регистрации лазерного и СВЧ-разрядов использовали высокоскоростную фотокамеру. Время экспозиции выбирали исходя из задачи исследований. Синхронизация камеры с лабораторной установкой с помощью ПЭВМ позволяла получать снимки разрядных процессов при каждом эксперименте.

С помощью многолучевого осциллографа (на рис. 1 не обозначен) обеспечивались калибровка и контроль работы лабораторной установки, фиксировались временные интервалы между лазерной искрой и СВЧ-разрядом. Моменты появления лазерной искры и СВЧ-разряда фиксировались ФЭУ (на рис. 1 не обозначен).

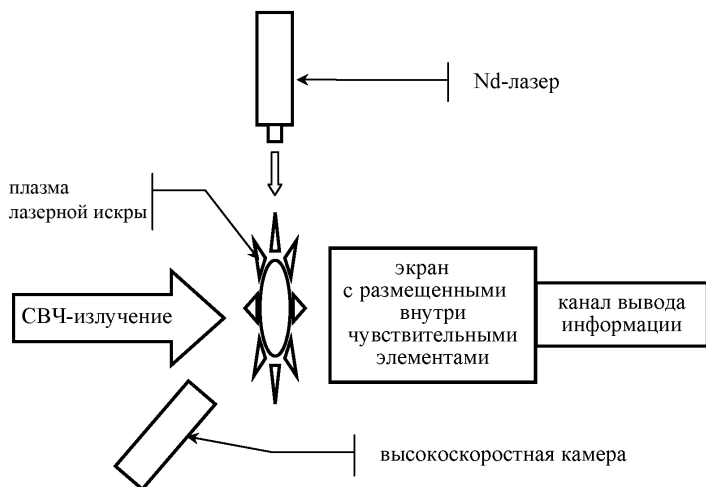


Рис. 1. Схема эксперимента

Для реализации иницированного СВЧ-разряда (исследуемого плазменного образования) необходимо, чтобы уровень электрической компоненты электромагнитной волны E_0 превышал критический $E_{кр}$, при котором реализуется свободно-локализованный разряд. Для этого необходимо создать условие, когда в некоторой области сфокусированного СВЧ-пучка (с допробойной плотностью потока энергии) выполняется неравенство $E_0 \geq E_{кр}$. Это достигается посредством иницирования разряда лазерным импульсом.

Условия возникновения и характер распространения СВЧ-разряда из области лазерного иницирования определялись следующими физическими факторами: диффузией (свободной или амбиполярной), ионизацией молекул электронным ударом, действием образовавшейся плазмы на СВЧ-поле [3].

Для рассматриваемых условий (давление не менее 100 мм. рт. ст.) характерен стримерный процесс развития разряда. В результате случайных флуктуаций в тонкой поверхностной области начального плазменного образования (лазерной искры), вытянутой вдоль E_0 — вектора напряженности электрического поля СВЧ-волны с $E > E_{кр}$, может резко упасть концентрация молекул (n). В этом случае параметр E практически сохраняет свое значение. Тогда, в соответствии с данными работы [4], запишем

$$E_{кр} = 40p, \quad (1)$$

где p — давление (мм. рт. ст.).

Значение критического поля $E_{кр}$ падает, а частота ионизации ν_i растет:

$$\nu_i = \nu_a \left(\frac{E}{E_{кр}} \right)^\beta, \quad (2)$$

где $\beta = 5,34$;

$$\nu_a = 2 \cdot 10^4 p \quad (3)$$

— частота прилипания.

С ростом частоты ионизации ν_i в этой области увеличивается концентрация электронов (n_e), следовательно, и температура газа (T). Это в условиях изобаричности приводит к дополнительному уменьшению концентрации молекул (n). Образовалась положительная обратная часть, интерпретируемая как ионизационно-перегревная неустойчивость [4]. Развитие неустойчивости приводит к распаду первоначального однородного разряда на отдельные стримеры, вытянутые вдоль электрического поля. Процессы, протекающие при этом, носят взрывной характер, т.е. имеют конечные время t , температуру газа (T), концентрацию электронов (n_e).

Варьирование давлением позволило проследить зарождение усложнений в структуре разряда и показало существенные различия в формах инициированных СВЧ-разрядов. Необходимо отметить, что на начальных стадиях разряд повторяет свою геометрию при различных давлениях.

При атмосферном давлении прослеживается четкая стримерная структура разряда (рис. 2, *а*). Разрядные каналы развиваются из “полюса” лазерной искры и имеют двоякую направленность: навстречу падающей СВЧ-волне и поверхности мишени (отдельными диполями). Стримеры распространяются навстречу излучению, что связано, по всей видимости, с ультрафиолетовым излучением плазмы головки стримеров, ионизирующих газ вблизи них и создающих условия для образования новых стримеров.

При понижении давления четкие линии стримерного разряда сменяются расплывчатыми формами контрагированного разряда (рис. 2, *б*). Увеличение длины нитей контракции с понижением давления связано с увеличением расстояния, на которое электроны могут продиффундировать.

При дальнейшем понижении давления разряд приобретает черты и свойства диффузного. Время релаксации плазмы лазерной искры при этом возрастает, что увеличивает инициирующую способность лазерной искры по времени. Увеличивается время существования СВЧ-разряда.

При увеличении времени между лазерным и СВЧ-импульсами разряд носит случайный характер. Поджиг СВЧ-разряда в этой ситуации происходит нестабильно, что, прежде всего, зависит от наличия свободных электронов, не успевших прорекомбинировать после распада плазмы лазерной искры. Разряд СВЧ развивается далеко за фронтом

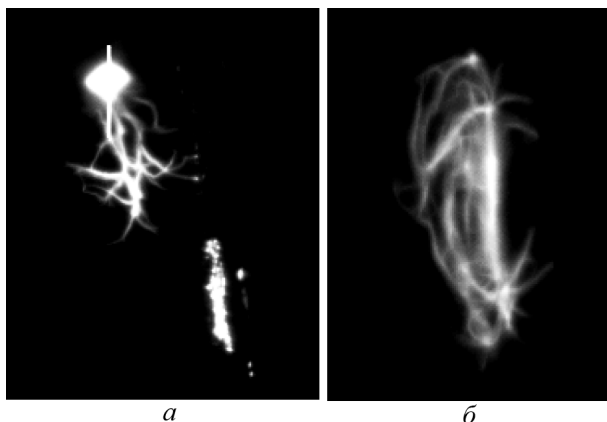


Рис. 2. Разряд при нормальном (*а*) и пониженном давлении (*б*). Время экспозиции 5 мкс

начала СВЧ-импульса, часть энергии рассеивается и не участвует в СВЧ-разряде.

Смещение лазерной искры во фронт СВЧ-импульса стабилизирует разряд. Часть энергии СВЧ-импульса проходит без развития лавины ионизации, и лишь при появлении лазерной искры происходит разряд и отрыв его от поверхности мишени.

В целом с ростом плотности потока энергии лазерной искры наблюдается тенденция понижения порогов пробоя и увеличения времени иницирующей способности СВЧ-разряда. Однако имеется интервал времени 10 мкс, в течение которого пороги пробоя минимальны и практически совпадают при всех исследованных энергиях лазерного импульса [1, 2]. Наиболее существенно повышение энергии лазера влияет на образование СВЧ-разряда при задержках от нескольких десятков микросекунд до миллисекунд и больше. С понижением давления иницирующая способность лазерной искры возрастает до времени в десятки и даже сотни миллисекунд.

Таким образом, одним из результатов проведенных исследований явилось стабильное инициирование СВЧ-разряда импульсом Nd-лазера при давлениях воздуха не менее 100 мм. рт. ст. Наибольшее время существования СВЧ-разряда при минимальных значениях плотности потока энергии Nd-лазера достигнуто при точной синхронизации лазерного и СВЧ-импульсов, а также при задержке между импульсами до 10 мкс. Данные результаты могут быть полезными при наземной экспериментальной отработке радиоэлектронной аппаратуры высотных летательных аппаратов и соответствующих конструкционных материалов.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ по гранту Президента Российской Федерации для ведущих научных школ НШ-3851.2012.10.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев С.А., Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф. Инициация СВЧ-разряда посредством лазерной искры // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 14. С. 73–78.
2. Афанасьев С.А., Бровкин В.Г., Колесниченко Ю.Ф., Машек И.Ч. Влияние газодинамических процессов на структуру и пороги СВЧ-разряда при инициации лазерной искрой // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. Вып. 15. С. 40–46.
3. Гильденбург В.Б., Гуцин И.С., Двинин С.А. и др. // ЖЭТФ. 1990. Т. 97. Вып. 4. С. 1151–1158.
4. Грачев Л.П., Есаков И.И., Ходатаев К.В. Иницированный подкритичный стримерный сверхвысокочастотный разряд и проблема глобальной очистки атмосферы Земли от фреонов // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 12. С. 15–24.

REFERENCES

- [1] Pis'ma v ZhTF [Technical Physics Letters, 2010, vol. 36, issue 7, pp. 672–674], 2010, vol. 36, i. 14. pp. 73–78 (in Russ.).

- [2] Afanas'ev S.A., Brovkin V.G., Kolesnichenko Yu.F., Mashek I.Ch. Effect of gasdynamic processes on structure and threshold of laser spark initiated microwave discharge. *Pis'ma v ZhTF* [Technical Physics Letters, 2011, vol. 37, issue 8, pp. 710–713], 2011. vol. 37, i. 15, pp. 40–46 (in Russ.). DOI: 10.1134/S1063785011080025.
- [3] Gil'denburg V.B., Gushchin I.S., Dvinin S.A., Kim A.V. Dynamics of high-frequency streamer. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki* [Journal of Experimental and Theoretical Physics], 1990, vol. 97, i. 4, pp. 1151–1158 (in Russ.).
- [4] Grachev L.P., Esakov I.I., Khodataev K.V. Initiated subcritical microwave streamer discharge and the problem of global elimination of Freons from the Earth's atmosphere. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki* [Technical physics, 1998, vol. 43, no. 12, pp. 1414–1423], 1998, vol. 68, no. 12, pp. 15–24 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 27.06.2013

Константин Николаевич Синогейкин — канд. техн. наук, старший научный сотрудник НИЛ НИЦ Военной академии РВСН им. Петра Великого. Автор ряда научных работ в области распространения электромагнитных волн радиочастотного диапазона.

Военная академия РВСН им. Петра Великого, Российская Федерация, 109074, г. Москва, Китайгородский пр-д, д. 9.

K.N. Sinogeikin — Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of Peter the Great Military Academy of Strategic Missile Troops. Author of a number of publications in the field of propagation of electromagnetic waves of RF band.

Peter the Great Military Academy of Strategic Missile Troops, Kitaigorodskii proezd 9, Moscow, 109074 Russian Federation.

Александр Евгеньевич Волков — канд. техн. наук, доцент, профессор Военной академии РВСН им. Петра Великого. Автор ряда научных работ в области специальных информационных систем и комплексов.

Военная академия РВСН им. Петра Великого, Российская Федерация, 109074, г. Москва, Китайгородский пр-д, д. 9.

A.E. Volkov — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor, professor of Peter the Great Military Academy of Strategic Missile Troops. Author of a number of publications in the field of special information systems and complexes.

Peter the Great Military Academy of Strategic Missile Troops, Kitaigorodskii proezd 9, Moscow, 109074 Russian Federation.

Наталья Владимировна Суетина — старший научный сотрудник НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор ряда научных работ в области лазерной техники и оптико-электронных измерительных приборов.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

N.V. Suetina — senior researcher of Research Institute of Radio-Electronics and Laser Technology of the Bauman Moscow State Technical University. Author of a number of publications in the field of laser technology and optic-electronic measuring instruments.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.