**УДК 533.9**

**В. И. Карась**, докт. физ.-мат. наук,  
 ННЦ “Харьковский физико-  
 технический институт” НАН  
 Украины,

Харьковская национальная академия  
 городского хозяйства  
 Каф. Светотехники и источников  
 света

**E-mail:** [karas@kipt.kharkov.ua](mailto:karas@kipt.kharkov.ua)

**Л. А. Назаренко**, докт. техн. наук,  
 Харьковская национальная академия  
 городского хозяйства

Каф. Светотехники и источников  
 света

**E-mail:** [Lnazarenko@ksame.kharkov.ua](mailto:Lnazarenko@ksame.kharkov.ua)

## ***О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСТОЧНИКОВ СВЕТА С КВАЗИСОЛНЕЧНЫМ СПЕКТРОМ ИЗЛУЧЕНИЯ***

1. В 1992 специалисты из Корпорации систем синтеза (Мериленд, США) спроектировали высокоэффективный источник излучения квазисолнечного спектра – безэлектродный микроволновый газовый разряд в трубе с серой [1]. Высокомощное световое излучение лампы с серой характеризуется непрерывным (молекулярным) спектром близким к спектру солнечного излучения, но с ослабленными уровнями ультрафиолетового и инфракрасного излучения. В октябре 1994 Компания Светового синтеза продемонстрировала в Вашингтоне две эффективных излучающих системы, которые привлекли внимание экспертов-дизайнеров и перспективных потребителей к новым источникам света, введение которых было воспринято как наиболее значительный технологический прорыв на рубеже 21 века. Первые излучающие системы на основе трубки с серой использовали микроволновое возбуждение с мощностью 3.4 кВт (от двух магнетронов по 1.7 кВт) в полосе частот 915-2450 МГц. Наивысшие результаты, достигнутые в 1996 с наилучшей световой мощностью, были: излучаемый поток 480 клм, выходная световая эффективность более 95 лм/Вт.

Физический механизм работы серных ламп состоит в излучении фотонов в результате переходов между энергетическими состояниями испаренных молекул серы, возбужденных или ионизованных микроволновым разрядом в малом объеме, ограниченном сферической кварцевой оболочкой [1-3].

Блок - схема микроволнового светового источника видимого света представлена на рис. 1 (из [3]).

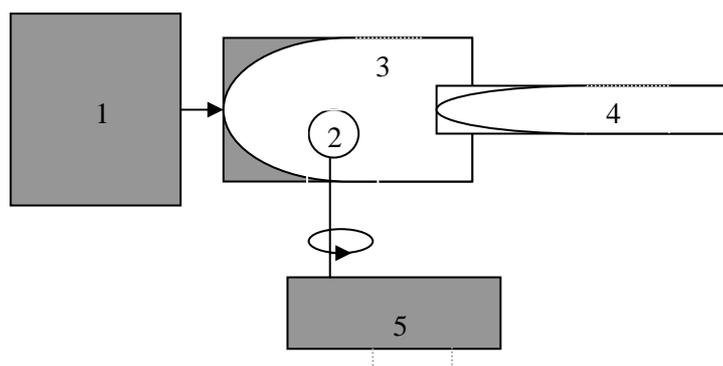


Рис. 1 – Основные части микроволнового источника света

1 – Источник питания, микроволновый мощный генератор и согласующая с микроволновой кюветой система; 2 – Кварцевая оболочка с Ag-S смесью; 3 – Микроволновый резонатор вместе со световой выходной системой; 4 – Световодные системы; 5 – Системы вращения и усиленного охлаждения кварцевой оболочки.

Система экстракции световой энергии устройства обеспечивает максимальный выход света из резонатора при поддержке микроволнового излучения безопасного уровня в соответствии с установленными государственными нормами. Микроволновая частота, используемая в этой лампе,  $2450 \pm 50$  МГц, согласована для использования в промышленных, научных и медицинских приложениях. Эта зона используется во всем мире микроволнами и недорогие микроволны от магнетрона возможны для применения в СССР. Образец Светового Синтеза Серная световая система (ССС) сделана в соответствии с подобными планами.

Остановимся на основных проблемах, относящихся к системе накачки микроволн, (см., например, [2]):

- Выбор уровня мощности и формы микроволнового сигнала (непрерывный, амплитудно-модулированный).
- Создание системы для "транспортировки" микроволновой энергии от источника (генератор) к нагрузке (безэлектродная лампа) и передающего устройства (зависящее от моды колебаний, топографии микроволнового поля в пространстве его взаимодействия с рабочей субстанцией лампы) в начальных условиях и в плазменной моде.
- Обеспечение (поддержание) устойчивости работы микроволнового генератора на нагрузку, существенно изменяющуюся в течение развития микроволнового разряда, (временной интервал от старта до достижения стационарной плазменной моды).
- Предотвращение несанкционированного микроволнового излучения в окружающее пространство с частотой накачки  $f_w$  (в случае, если только оптическое излучение является «полезным продуктом») и гармоник частоты ( $2f_w \dots 5f_w \dots nf_w$ ) и так далее последующих осцилляций, соответственно, в обеспечении экологической безопасности и электромагнитной совместимости (ЭМС), с этим сопровождающая комплексная проблема - определение компромисса между световой прозрачностью стенок микроволнового резонатора и микроволновым засорением, в то время как взаимодействие микроволновых полей с плазменным факелом имеет место в резонаторе.

Выбор частоты высокочастотного поля, требующий минимальной мощности, определяющий вопрос. В порядке определения рабочей частоты микроволновых осцилляций необходимо сравнить 3 величины: диаметр оболочки  $\Lambda$  ( $\Lambda \approx (1 - 2)$ ) см,

длину свободного пробега  $l$  и амплитуду осцилляций электронов  $A$ . Обратим внимание на тот факт, что (см., например, [4]) зависимость порогового поля (поля, при котором происходит пробой газа) от давления для всех газов имеет минимум, разделяющий две ветви. На левой ветви, где порог падает с ростом давления, величина порогового поля тем больше, чем меньше размеры разрядной камеры и чем выше частота поля. На правой ветви, где порог растет с повышением давления, зависимость порогового поля от размеров и частоты становится все менее заметной и в пределе больших давлений почти совсем исчезает: все кривые сходятся к одной. Все эти результаты качественно объясняются на основе элементарных представлений о скорости набора энергии электроном в переменном поле и при помощи критерия стационарного пробоя. Как известно, для СВЧ разряда в регулярных электромагнитных полях минимальная напряженность поля достигается при равенстве частоты столкновений  $\nu_p$  циклической частоте электромагнитного поля  $\omega$  [4]. Так, минимальная напряженность электрического поля для пробоя может быть найдена из следующего выражения:

$$E_{tr} = \left( \frac{Dm\omega^2 I_{Ar}}{e^2 \Lambda^2 \nu_p} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $D$  - коэффициент диффузии,  $m$ ,  $e$  - соответственно масса и заряд электрона,  $\Lambda$  - характерный размер области пробоя газа. Для аргона при  $f \approx 3.0$  ГГц регулярного электромагнитного излучения и давлении около 665 Па она составляет 500 В/см.

2. Для повышения эффективности таких источников в 2004 (ННЦ ХФТИ [5]), было предложено использовать микроволны со стохастически прыгающей фазой для поддержания микроволнового разряда в аргоне с парами серы. Как будет видно из дальнейшего, это предложение имеет следующие достоинства:

- Такие микроволны позволяют создавать разряд при низких давлениях, потому что прыгающая фаза обеспечивает малость диффузии даже в отсутствие парных соударений;
- Скачки фазы обеспечивают бесстолкновительный нагрев электронов без потерь энергии, связанных с упругими и неупругими соударениями.
- Однородный микроволновый разряд легко получается, так как такие микроволновые поля проникают в плазму со сверхкритической плотностью.

В ННЦ ХФТИ созданы нового типа пучково-плазменные генераторы интенсивного стохастического излучения. Эти генераторы основаны на взаимодействии электронного пучка с гибридным плазменным волноводом. Они имеют малый вес и габариты при высокой выходной мощности. В непрерывном режиме 40 кВт мощности микроволнового излучения и 100 кВт мощности в импульсе 4 мс в 10 см диапазоне длин волн с электронным к.п.д. 50%. Максимальная мощность 66 кВт при электронном к.п.д. около 40% получена в частотном диапазоне от 0.85 до 1.66 ГГц. Для иллюстрации приведем характерные осциллограммы реализации стохастического сигнала в пучково-плазменных генераторах [6-8].

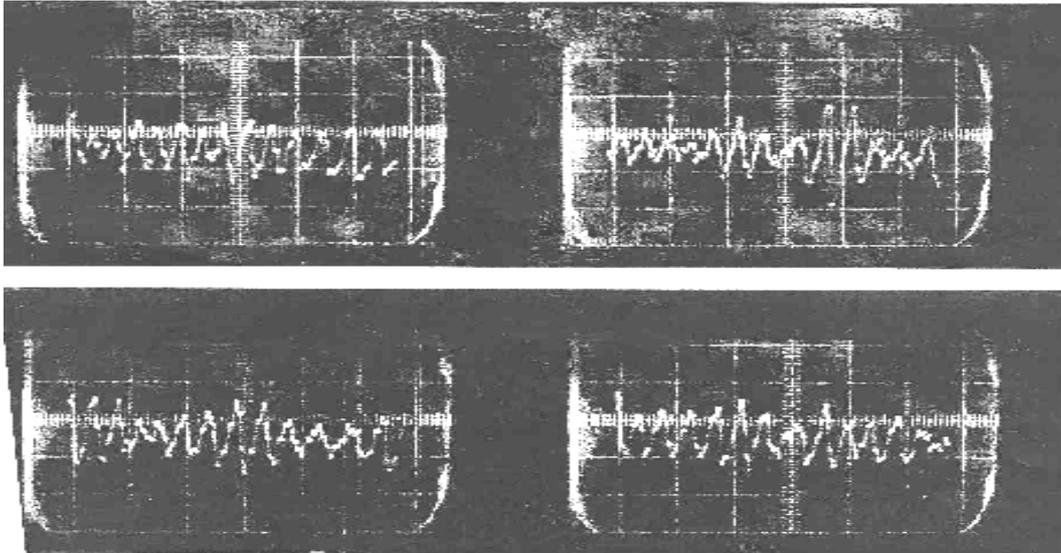


Рис. 2 – Реализации микроволнового сигнала со стохастически прыгающей фазой, полученного в пучково-плазменном генераторе

Из рис. 2 видно, что стохастические прыжки фазы сигнала происходят очень часто (не реже чем через 2-3 периода).

В настоящей статье кратко обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований и численного моделирования прямого и наклонного падения на поверхность раздела вакуум-плазма со сверхкритической плотностью линейно поляризованных электромагнитных волн и приложение этих результатов к созданию разряда в источнике светового излучения.

Литвак и Токман [9] продемонстрировали полезную возможность прохождения волн через область их поглощения благодаря использованию классического аналога квантовой электромагнитной индуцированной прозрачности. Файнберг и др. [10] показали, что стохастические электрические поля с конечным временем корреляции фазы могут эффективно нагревать частицы в бесстолкновительной плазме, потому что обратное время корреляции при взаимодействии частица волна фактически имеет физический смысл некоторой эффективной частоты столкновений.

Теоретические исследования нормального и наклонного падения линейно поляризованных электромагнитных волн на границу вакуум-плазма сверхкритической плотности убедительно продемонстрировали [5,11-13] следующее:

- Микроволновое излучение как со стохастическим, так и с регулярным сбоем фазы одинаково хорошо проникает в плотную плазму. Следовательно, для проникновения в плотную плазму важным является наличие скачков фазы.
- Для косоуго падения падающее на плазменный слой электромагнитное поле сильно влияет на электроны (особенно для больших углов падения). Продольные поля близки по величине к поперечным полям. Продольная энергия электронов (и их температура) вырастает в разы. Функция распределения электронов имеет немаксвелловский характер, есть ускоренные «электронные хвосты». Энергия падающего поперечного поля частично переходит в энергию продольного, а частично - в энергию электронов.

В результате проведенных экспериментальных исследований [14-15] прохождения стохастического электромагнитного излучения через плотную плазму было установлено:

- возбуждение резонатора регулярным сигналом менее эффективно, чем МВИСПФ (для получения одинаковой амплитуды прошедшего сигнала для МВИСПФ и регулярного требуется, чтобы амплитуда регулярного сигнала на один-два порядка была выше);
- отсутствует избирательности при возбуждении и прохождении резонатора регулярным монохроматическим сигналом относительно собственных и несобственных волн.

Таким образом результаты экспериментальных исследований находятся в удовлетворительном согласии с выводами теоретических исследований.

3. Для проведения исследований по воздействию мощного стохастического СВЧ-излучения на плазму, создаваемую в разреженном газе, в качестве источника излучения использовался пучково-плазменный генератор, созданный в ННЦ ХФТИ [7], и модернизированный для условий проведения экспериментов.

Блок-схема генератора и эпюра продольного распределения напряженности магнитного поля представлены на рис. 3.

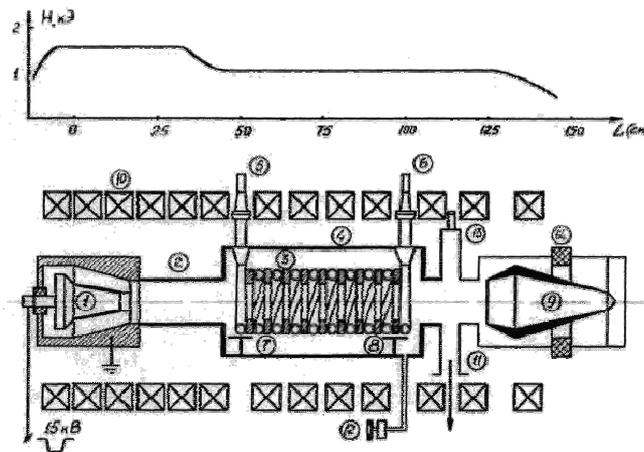


Рис. 3 – Блок-схема импульсного пучково-плазменного генератора и продольное распределение напряженности магнитного поля

Импульсный пучково-плазменный генератор состоит из электронной пушки (1), плазменного волновода (2), замедляющей системы (3) в металлическом экране (4), входного

(5) и выходного (6) СВЧ-фидеров, согласующих устройств – (7, 8), коллектора электронов (9), изолированного от корпуса с помощью керамического изолятора (14), соленоида (10) для создания продольного магнитного поля, системы откачки (11), напуска рабочего газа (12) и датчика контроля давления в системе (13).

Замедляющая структура, представляющая собой модифицированную спираль, рассчитана на синхронную скорость волны, соответствующую энергии электронного пучка 12 кэВ. В качестве источника электронного пучка в генераторе использовалась пушка магнетронного типа, формирующая трубчатый электронный пучок с внешним диаметром 3 см и внутренним диаметром 2.2 см. Ускоряющее напряжение до 15 кВ, ток пучка - до 8 А, длительность импульса 160 мкс, частота следования импульсов 1 ÷ 5 Гц.

Стохастические СВЧ-колебания, генерируемые в пучково-плазменном генераторе, с выхода замедляющей структуры через широкополосный коаксиальный ответвитель подавались на вход коаксиального волновода длиной 1,5 м и далее через ответвитель регистрировались измерителем большой мощности типа ИБМ-2. Вход

замедляющей структуры генератора подключался к согласованной нагрузке типа Э2-9 или к короткозамыкателю. К вторичным плечам направленных ответвителей подключались ваттметры типа М3-54 и через аттенюаторы анализаторы спектра типа С4-60. К другим плечам этих ответвителей подключались коаксиальные нагрузки и через аттенюаторы коаксиального типа Д2-13 и аттенюаторы подключались к осциллографу типа С7-19. Синхронный запуск модулятора высокого напряжения, подаваемого на катод электронной пушки генератора, и осциллографа осуществлялась с помощью запускающего устройства. Используя устройство задержки, момент запуска осциллографа можно было изменять в пределах длительности импульса высокого напряжения, что позволяло наблюдать реализации СВЧ-колебаний в различные моменты времени от начала импульса тока электронного пучка. При этом контролировались давление рабочего газа в коаксиальном волноводе, мощность и спектры стохастических СВЧ-колебаний на входе и выходе коаксиального волновода.

Для изучения степени стохастичности генерируемых колебаний использовался метод Фурье - анализа реализаций колебаний сложной формы, определялись автокорреляционные функции и времена корреляции. С помощью фазочастотного анализа колебаний [5, 6] получены данные о поведении частоты, фазы и амплитуды СВЧ колебаний.

В экспериментах с помощью анализатора спектра С4-60 регистрировался интегральный частотный спектр генерируемых колебаний, установлено, что в максимуме выходной мощности (при давлении рабочего газа, равном  $1.3 \cdot 10^{-3}$  Па) основная часть мощности заключена в интервале частот  $\approx 300 \div 550$  МГц (при этом ширина спектра составляет  $250 \div 270$  МГц).

С экрана высокочастотного осциллографа С7-19 фотографировались реализации СВЧ-колебаний, по которым методами корреляционного анализа определялись автокорреляционные функции, частотные спектры и зависимость фазы колебаний от времени.

На рис. 4 показаны осциллограммы с характерными реализациями сигналов, сфотографированные в момент времени после 100 мкс от начала импульса тока электронного лучка и соответствующие трем режимам работы генератора, определяемым давлением рабочего газа в области взаимодействия. На рис. 5 (а-с) представлены графики фазовых и амплитудных спектров и соответствующих автокорреляционных функций исследуемых колебаний.

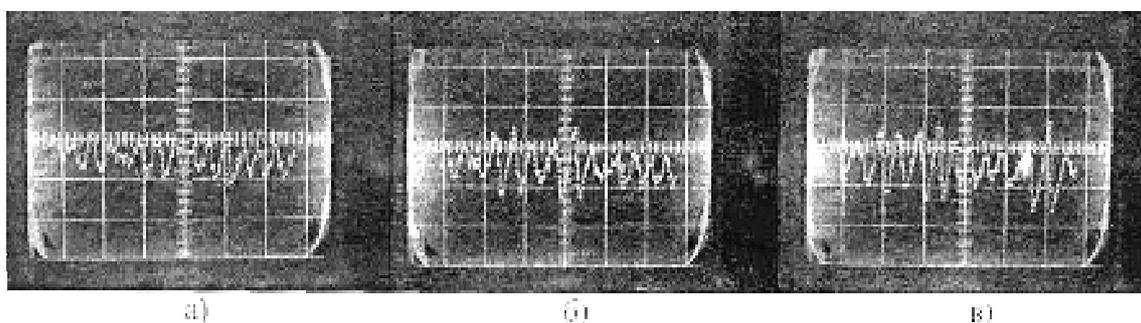


Рис. 4 – Осциллограммы высокочастотных сигналов при давлениях рабочего газа:  
а) -  $P = 6.5 \cdot 10^{-4}$  Па; б) -  $P = 1.3 \cdot 10^{-3}$  Па; в) -  $P = 2.7 \cdot 10^{-3}$  Па.

Масштаб длительности развертки - 5 нс/дел.

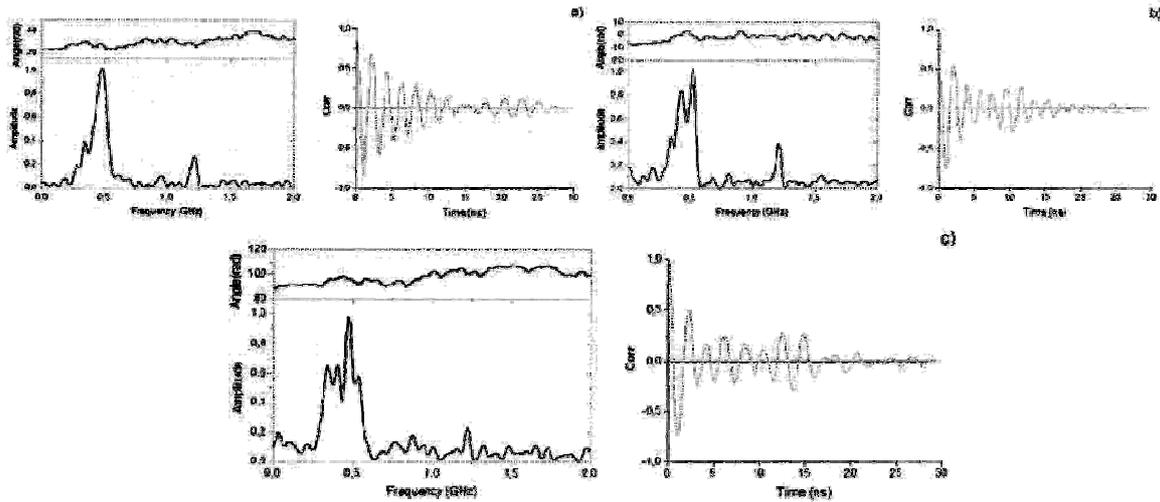


Рис. 5 – Фазочастотные и корреляционные характеристики генерируемых колебаний при давлениях рабочего газа: а) –  $P = 6,5 \cdot 10^{-4}$ ; б) –  $P = 1,3 \cdot 10^{-3}$  Па; в) –  $P = 2,7 \cdot 10^{-3}$  Па

Видно, что колебания на выходе пучково-плазменного генератора носят нерегулярный характер с заметными скачками фазы. Можно заметить также, что степень стохастичности СВЧ-колебаний увеличивается с ростом давления рабочего газа в области взаимодействия. Для этих же трех режимов работы пучково-плазменного генератора проведен анализ СВЧ-колебаний корреляционным и фазочастотным методами. Установлено, что с ростом давления рабочего газа в плазменно-лучковом генераторе время корреляции уменьшается. Так для режима, соответствующего давлению  $P = 6,5 \cdot 10^{-4}$  Па, время корреляции –  $\tau \approx 15$  нс, для  $P = 1,3 \cdot 10^{-3}$  Па –  $\tau \approx 10$  нс и для  $P = 2,7 \cdot 10^{-3}$  Па –  $\tau \approx 5$  нс.

Так как время корреляции и ширина спектра генерируемых колебаний  $\Delta f$  связаны соотношением:

$$\tau \cdot \Delta f \approx 1, \quad (2)$$

то чем меньше время корреляции, тем шире спектр (и наоборот), т.е. выше степень их стохастичности. Таким образом, с ростом давления рабочего газа в области взаимодействия пучково-плазменного генератора увеличивается степень стохастичности генерируемых колебаний.

Исследования СВЧ-разряда в разреженном газе проводились по следующей методике. Стохастические колебания от пучково-плазменного генератора подавались на вход коаксиального волновода, заполненного рабочим газом (воздух, аргон) при низком давлении. Выход коаксиального волновода был подключен к согласованной нагрузке, в качестве которой использовался измеритель больших мощностей ИБМ-2. Мощность генератора плавно увеличивалась до момента возникновения СВЧ-разряда в коаксиальном волноводе. Момент возникновения разряда определялся по появлению интенсивного свечения в волноводе и резкому падению мощности на его выходе.

Режим генерации стохастических колебаний осуществлялся путем подачи через ферритовый вентиль на вход замедляющей структуры регулярного сигнала с генератора Г4 - 37А мощностью  $\approx 1$  Вт на частоте 400 МГц либо использовался короткозамыкатель, что приводило к полному отражению СВЧ сигнала от входа замедляющей структуры пучково-плазменного генератора.

В режиме генерации «узкополосного» стохастического СВЧ излучения были экспериментально определены пороговые значения мощностей, вызывающих пробой рабочего газа (воздух, аргон) в коаксиальном волноводе. На рис. 6 представлен график

зависимости пороговой импульсной мощности стохастических СВЧ колебаний от давления рабочего газа.

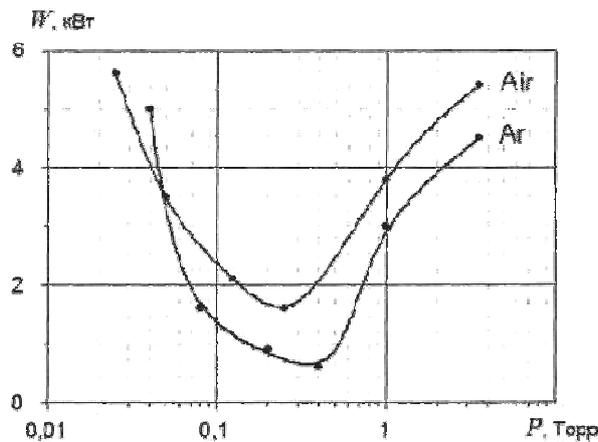


Рис. 6 – Зависимости пороговой импульсной мощности СВЧ-колебаний от давления рабочего газа

Из рис. 6 видно, что для каждого из газов существует оптимальное давление, при котором пороговая мощность пробоя газа минимальна. Для аргона оно составляет 53, Па, а для воздуха 40 Па. При этом пороговая мощность равна 0.6 кВт и 1.6 кВт, соответственно.

Зависимости порога СВЧ разряда от давления газа наблюдались ранее в работе А. Мак-Дональда (см. [4]) для регулярного сигнала. В экспериментах использовался цилиндрический резонатор. Давление рабочего газа (аргона), соответствующее минимальному значению напряженности электрического поля ( $\approx 60$  В/см на частоте 994 МГц), при которой наблюдался СВЧ пробой, составляло  $\approx 156$  Па.

Сравнение показывает, что в отличие от регулярного сигнала для стохастического СВЧ излучения со скачками фазы минимальная пробойная мощность слабо зависит от давления рабочего газа (аргона) при его уменьшении от оптимального значения.

Интегральный спектр стохастических СВЧ колебаний, снятый с помощью анализатора спектра С4-60 на входе коаксиального волновода и на его выходе представлены на рис. 7 (а, б). Исходный спектр является довольно широкополосным. В нем присутствуют колебания с частотами от десятков до сотен мегагерц (рис. 7а). Как видно, максимальные амплитуды спектральных составляющих наблюдаются в диапазоне частот  $400 \div 750$  МГц и на  $\sim 20 \div 30$  дБ превышают амплитуды колебаний в других областях спектра. Такой сигнал подавался на вход коаксиального волновода и, поджигая в нем плазму, взаимодействовал с ней и регистрировался на его выходе.

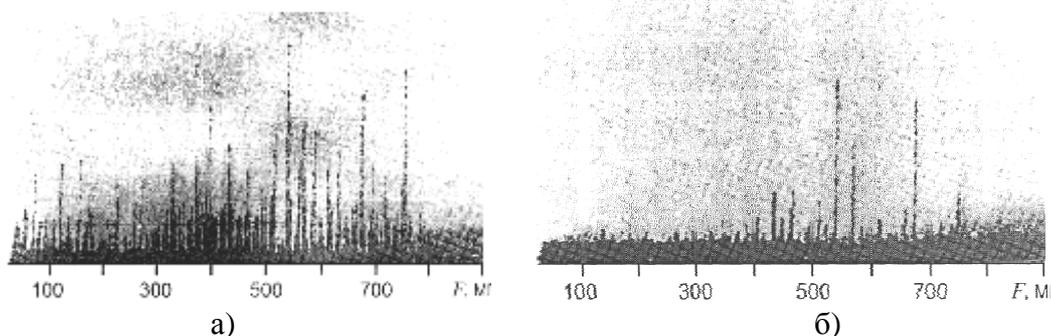


Рис. 7 – Интегральный спектр СВЧ-колебаний на входе (а) и выходе (б) коаксиального плазменного волновода

Интегральный спектр сигнала, прошедшего через плазменный волновод, существенно отличался от спектра входного сигнала (рис. 7б). Из рисунка видно, что спектр колебаний значительно сузился. Колебания с частотами до 400 МГц, практически отсутствуют, что связано со значительным затуханием низкочастотных составляющих спектра при их прохождении через плазму. Кроме того, происходило обеднение спектра и в диапазоне частот 400 ÷ 750 МГц (чем меньшую амплитуду имела спектральная составляющая, тем большее затухание она испытывала). Этот факт свидетельствует о нелинейном характере взаимодействия мощного стохастического СВЧ-излучения с создаваемой им в разреженном газе плазмой. Выбор частоты высокочастотного поля, требующий минимальной мощности для пробоя, является определяющим вопросом.

Как было отмечено выше, в [5] предложено использовать СВЧ-колебания со стохастически прыгающей фазой для поджига разряда в аргоне, что позволит создавать разряд при более низких давлениях, потому что скачки фазы обеспечат ограничение диффузии электронов и бесстолкновительный нагрев электронов без потерь энергии, связанных с упругими и неупругими соударениями. Кроме того, может быть легко реализован однородный СВЧ-разряд, так как стохастическое СВЧ-излучение проникает в плазму со сверхкритической плотностью (см. [5, 11]).

Рассмотрим условия пробоя в аргоне для конкретного случая использования СВЧ-излучения, получаемого с помощью генератора, описанного выше. Средняя рабочая частота составляла  $f \approx 400$  МГц, средняя частота скачков фазы  $\nu_{jp} = 2 \cdot 10^8$  с<sup>-1</sup>. Следует иметь в виду, что сечение упругих столкновений электронов с атомом аргона изменяется очень сильно (около 30 раз) при изменении энергии электрона от нуля и вплоть до энергии ионизации  $I_{Ar} = 15,76$  эВ, превышая в максимуме в несколько раз сечение ионизации, соответствующее энергии электронов около 15 ÷ 20 эВ. При давлении аргона 4 Па частота ионизационных столкновений сравнивается с частотой скачков фазы.

Преимуществом работы в таких условиях является сведение к нулю потерь энергии при упругих столкновениях с сохранением незначительной диффузии и эффективной передачи энергии электромагнитного поля электронам. Подставляя в (1) в качестве  $\nu_p$  эффективную частоту скачков фазы, получаем необходимую пороговую напряженность электромагнитного поля, которая не превышает в нашем случае 50 В/см.

Обратим внимание, что теоретические оценки сделаны для одночастотного СВЧ излучения со скачками фазы. В реальном генераторе, используемом в эксперименте, ширина спектра составляла (250 ÷ 270 МГц). Поэтому напряженности электрического поля, а значит и мощности, необходимые для пробоя, в экспериментальных условиях существенно выше, чем приведенные теоретические значения.

### Заклучение

В настоящей статье приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований пробоя и поддержания разряда в разреженном газе импульсным СВЧ-излучением со стохастическими скачками фазы и особенностей прохождения этого излучения через создаваемую им плазму. Показано, что для стохастического СВЧ-излучения со скачками фазы минимум пробойной мощности слабо зависит от давления рабочего газа при его уменьшении от оптимального ( $\approx 50$  Па), что обусловлено эффективным бесстолкновительным нагревом электронов, ослабленной диффузией и снижением потерь на упругие и неупругие соударения. Это позволяет расширить область существования разряда в сторону более низких давлений. Установлено, что:

для уменьшения мощности СВЧ-излучения, необходимой для пробоя и поддержания разряда, требуется сужение спектра (увеличение спектральной плотности мощности) при сохранении частоты скачков фазы; существует оптимальное давление, при котором пороговая мощность пробоя газа минимальна. Для аргона оно составляет  $\approx 40$  Па, а для воздуха  $\approx 33$  Па. Продемонстрировано существенное изменение спектрального состава СВЧ-сигнала после его прохождения через плазму: значительное затухание низкочастотных составляющих спектра (до 400 МГц), а также обеднение спектра в высокочастотной области (400 ÷ 750 МГц). Последнее свидетельствует о нелинейном характере взаимодействия мощного стохастического СВЧ - излучения с создаваемой им в разреженном газе плазмой.

### Список литературы

1. J.T. Dolan, M.G. Ury, D.A. MacLeean. //Proc. VI International Symposium on Science and Technology of Light Sources. Budapest, 1992, p. 301 - 311.
2. A. Kozlov, V. Perevodchikov, R. Umarhodzhaev, E. Shlifer. Electroless Microwave Discharges as Sources of Light and UV-Emission for the Illumination and Biomedical Applications. //Proceedings of IV International Workshop "Microwave Discharges: Fundamentals and Applications, September 18-22, 2000, Zvenigorod, Russia /ed. by Yu.A. Lebedev. M.: Yanus-K, 2001. P. 235-244.
3. A. Didenko, B. Zverev, A. Koljashkin, A. Prokopenko. Development of Microwave Powered Electroless Light Source in MPhI. //Proceedings of IV International Workshop "Microwave Discharges: Fundamentals and Applications, September 18-22, 2000, Zvenigorod, Russia /ed. By Yu.A. Lebedev. M.: Yanus-K, 2001. P. 235 - 244.
4. Yu.P. Raizer *Osnovy sovremennoi phisiki gasorazriadnykh processov*. Moscow: Nauka, 1980, 416. (In Russian).
5. В.И. Карась, Я.Б. Файнберг, А.Ф. Алисов, А.М. Артамошкин, Р. Бингхам, И.В. Гавриленко, В.Д. Левченко, М. Лонтано, В.И. Мирный, И.Ф. Потапенко, А.Н. Старостин. *Физика плазмы*. 2005, т. 31, вып. 9, с. 810.
6. A.N. Antonov, Yu.P. Bliokh, Yu.A. Degtyar" et al. Plasma - Beam Generator Based on Electron Beam Interaction with a Plasma - Waveguide Structure Inside an Inductively - Coupled Cavity Array. //Plasma Physics Reports 1994.vol.20, 9 p. 699-702.
7. A.K. Berezin, Ya.B. Fainberg, A.M. Artamoshkin" et al. Beam - Plasma Generator of Stochastic Oscillations in the Decimeter Wavelength Band. //Plasma Physics Reports 1994.vol.20, 9 p. 703- 709.
8. A.K. Berezin, Ya.B. Fainberg, Yu.M. Lyapkalo et al. Beam - Plasma Generator of Stochastic CW Microwave Oscillations. //Plasma Physics Reports, 1994,vol.20, 9, p. 710-713.
9. A.G. Litvak and M.D. Tokman. *Phys. Rev. Lett*, 2002, 88, 095003.
10. Ya.B. Fainberg, F.G. Bass, V.D. Shapiro. Kvazilineynaya teoriya slaboturbulentnoy plazmy s uchetom korrelyatsii elektricheskikh poley. //Zh. Eksp. Teor.fiz., 1965,vol. 49, с 329-337. (In Russian).
11. V.I. Karas', V.D. Levchenko. Penetration of Microwave with a stochastic jumping phase (MSJP) into overdense plasmas and electron collisionless heating by it //Proc. of the V International Workshop "Strong Microwaves in plasmas" (Nizhny Novgorod, Russia, August 1-9, 2002) /ed. By A.G. Litvak in two volumes. Nizhny Novgorod: IAP of RAS, 2003.V. 2, p. 550-554; *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Plasma Electronics and New Acceleration Methods*. 2003, vol. 4(3), p. 133-136.
12. V.D. Levchenko, Yu.S. Sigov, in book: Dynamics of Transport in Fluids, Plasmas and Charged Beams. Ed. G. Maino and A. Provenzale. World Scientific: Singapore, 1995, 121.
13. L.V. In'kov, V.D. Levchenko. Optimizatsiya PIC metoda v ramkakh ob'ektno-orientirovannoy modeli plazmy v kode SUR. Preprint 133, IPM im. M V. Keldysha RAN, Moskva, 1995. (In Russian).
14. A. Alisov, V. Antipov, A.Artaamoshkin, I. Zagrebelny, N. Zemlyansky, V. Mirny, V. Karas`, Ya. Fainberg. Investigations of propagation, reflection and action on plasma of microwave stochastic radiation. //Proc of the International School and Conference "Plasma Physics and Controlled Fusion" (Alushta, Ukraine, September 16-21, 2002), abstracts, p. 140.
15. A.F. Alisov, A.M. Artamoshkin, LA. Zagrebelny, N.M. Zemlyansky, V. Mirny, V.I. Karas', Ya. Fainberg, S.I. Solodovchenko, A.F. Shtan`. Experimental investigations of propagation of microwave radiation with stochastic jumping phase in overdense plasma. //Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Plasma Electronics and New Acceleration Methods. 2003, vol. 4(3), p. 69-73. (In Russian).

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЖЕРЕЛ СВІТЛА З  
КВАЗИСОНЯЧНИМ СПЕКТРОМ ВИПРОМІНЕННЯ

В. І. Карась, Л. А. Назаренко

*У цій статті наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень пробою і підтримки розряду в розрідженому газі імпульсним СВЧ-випромінюванням зі стохастичними стрибками фази і особливостей проходження цього випромінювання через створювану ним плазму. Показано, що для стохастичного НВЧ-випромінювання зі стрибками фази мінімум пробійної потужності слабо залежить від тиску робочого газу при його зменшенні від оптимального.*

ON THE OPPORTUNITIES OF A HIGH EFFICIENCY LIGHT SOURCE MAKING WITH  
A QUSISUN SPECTRUM OF RADIATION

V. I. Karas, L. A. Nazarenko

*This paper presents the results of theoretical and experimental studies of the breakdown and maintain the discharge in rarefied gas by pulsed microwave radiation with stochastic phase jumps and features of this radiation through specially formed plasma. It is shown that for a stochastic microwave radiation with a phase jump of electrical power at least weakly dependent on the pressure of the working gas when it decreases from the optimum.*