

10-й Международный научный семинар по СВЧ-разрядам – X-th International Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications (MD-10)

Ю. А. Лебедев

Дан обзор новых интересных результатов, представленных на 10-м Международном научном семинаре по СВЧ-разрядам (X-th International Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications) состоявшемся с 3 по 7 сентября 2018 года в г. Звенигороде Московской области.

Ключевые слова: СВЧ-разряд, семинар, микроволновая плазма, сотрудничество.

Ссылка: Лебедев Ю. А. // Прикладная физика. 2019. № 1. С. 11.

Reference: Yu. A. Lebedev, Prikl. Fiz., No. 1, 11 (2019).

Введение

Регулярно проводимый в последние десятилетия международный научный семинар **Microwave Discharges: Fundamentals and Applications** является достаточно представительным форумом, где обсуждаются основные направления работ по исследованию и применению сверхвысокочастотных (СВЧ) разрядов. Необходимо подчеркнуть, что рассматриваемые вопросы имеют прямое отношение не только к тематике, связанной с научным и техническим применением СВЧ-энергии, но и для физики разрядов вообще.

Семинар как регулярное научное мероприятие был организован по инициативе российских ученых и проводится с периодичностью один раз в три года в России и за рубежом. Формально первый семинар был проведен в России в 1994 г. На нем были определены общие принципы организации и проведения семинара, принята его Конституция. Кроме того, было принято решение вести отсчет от семинара NATO ARW Workshop (1992) с таким же названием и тематикой. Кроме России (1994, 2000, 2006, 2012, 2018 гг.), он проводился в Португалии (1992 г.), Франции (1997 г.), Германии (2003 г.), Японии (2009 г.), Испании (2015 г.).

Тематика семинаров включает рассмотрение широкого круга вопросов генерации, физики, химии и применения микроволновых разрядов. Официальный язык семинаров – английский.

Календарь семинаров:

- 1992, май 11–15, NATO ARW Workshop, Vimeiro, Portugal. Director С. М. Ferreira
- 1994, сентябрь 5–8, Звенигород, Россия, Председатель А. А. Рухадзе
- 1997, апрель 20–25, Фонтенфро, Франция, Председатель J. Marec
- 2000, сентябрь 18–22, Звенигород, Россия, Председатель Ю. А. Лебедев
- 2003, июль 8–12, Грайфсвальд, Германия, Председатель А. Ohl
- 2006, сентябрь 11–16, Звенигород, Россия, Председатель Ю. А. Лебедев
- 2009, сентябрь 22–27, Хамаматсу, Япония, Председатели М. Kando, М. Nagatsu
- 2012, сентябрь 10–14, Звенигород, Россия, Председатель Ю. А. Лебедев
- 2015, сентябрь 7–11, Кордоба, Испания, Председатель А. Gamego
- 2018, сентябрь 3–7, Звенигород, Россия, Председатель Ю. А. Лебедев

Общее руководство семинаром осуществляется **Международным научным комитетом** (International Scientific Committee – ISC). ISC определяет состав пленарных докладчиков. Состав членов ISC периодически обновляется на рабочих совещаниях ISC во время проведения семинара. На рабочем совещании ISC выбирается страна

Лебедев Юрий Анатольевич, зав. лаб., д.ф.-м.н.
Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева
Российской академии наук (ИХС РАН).
Россия, 119991, ГСП-1, Москва, Ленинский пр., 29.
E-mail: lebedev@ips.ac.ru

Статья поступила в редакцию 10 января 2019 г.

© Лебедев Ю. А., 2019

проведения следующего семинара, а её представитель в ISC становится Председателем ISC. В 2018 г. в ISC входили следующие лица: Prof. J. Asmussen (USA), Prof. P. Awakowicz (Germany), Prof. E. Benova (Bulgaria), Dr. F. Dias (Portugal), Prof. A. Gamero (Spain). Prof. E. Jerby (Israel), Prof. Yu. Lebedev (Russia, Chairman), Prof. A. Lacoste (France), Prof. M. Moisan (Canada), Prof. M. Nagatsu (Japan), Prof. J. J. A. M. van der Mullen (Belgium). По Конституции семинара Председатель ISC становится Председателем локального Организационного комитета.

Локальный организационный комитет (ЛОС) создается в стране проведения семинара и в 2018 г. включал в себя следующих лиц: Ю. А. Лебедев (Председатель), В. А. Иванов (Заместитель Председателя), Т. И. Камолова, Т. Э. Кривоносова, С. Н. Сатунин (Web-page), Д. Г. Васильков, Е. В. Воронова.

После переговоров с Европейским физическим обществом (European Physical Society – EPS) было принято решение EPS – считать семинар **Microwave Discharges** проводимым под эгидой EPS с правом помещения эмблемы EPS на всех информационных документах и печатных изданиях семинара. Такая эмблема содержится на сайте семинара, книге абстрактов и на книге трудов семинара. Книга трудов в твердом переплете (в едином формате для всех семинаров) издается с 2000 г.

Общая информация о 10-м семинаре

В Программе 10-го семинара, в соответствии с Конституцией всех семинаров **Microwave Discharges (MD)**, не планировалось проведение параллельных секций и поэтому число устных докладов было ограничено. Это позволило всем участникам непосредственно ознакомиться со всеми представленными докладами. Программа включала в себя пленарные доклады (40 мин), приглашенные доклады (35 мин), устные доклады (25 мин) и стендовые доклады. Официальный язык – английский. Место проведения – пансионат «Звенигородский» (г. Звенигород, Московская область).

Сайт семинара <http://www.fpl.gpi.ru/md-10> начал работу в сентябре 2017 г. и предоставлял текущую информацию о семинаре, а также позволял проводить on-line регистрацию участников.

К началу семинара был издан сборник тезисов докладов. Все тексты принимались только на английском языке. Кроме того, доклады, отобранные Оргкомитетом, предполагалось публиковать на русском языке в журнале «Прикладная физика» (индексируется в Scopus, RSCI Web of Science, РИНЦ, включен в список ВАК России). После окончания семинара в издательстве Yanus-K издан сборник трудов конференции под общим назва-

нием: **Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. Proceedings of the X International Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications (MD-10)**. Ed. by Yu. A. Lebedev, Moscow: Yanus-K, 2018. – 268 p. ISBN 978-5-8037-0746-2, ISBN 978-5-9903264-9-1.

Информационная поддержка семинара осуществлялась:

- Association for Microwave Power in Europe for Research and Education (AMPERE)
- Научно-технический журнал «Прикладная физика».

Финансовая поддержка семинара осуществлялась Российским фондом фундаментальных исследований (РФФИ), что отмечено с указанием номера гранта в книге абстрактов и в книге трудов семинара.

Организаторы семинара:

1. Российский фонд фундаментальных исследований
2. Российская академия наук
3. European Physical Society
4. Научный совет Российской академии наук по проблеме «Физика низкотемпературной плазмы»
5. Научный совет Российской академии наук по физике плазмы
6. Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук
7. Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук
8. Научно-технологический центр «ПЛАЗМА-ИОФАН».

Основная организационная работа в проведении семинара осуществлялась Институтом нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук и Институтом общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук. Председателем Оргкомитета MD-10 являлся д.ф.-м.н. Ю.А. Лебедев.

Статистические данные о семинаре

- Общее число участников, присутствовавших на семинаре – 44
- Страны участницы: Бельгия (2), Канада (1), Чешская республика (1), Германия (1), Греция (1), Япония (1), Франция (1), Корея (1), Израиль (1), Болгария (1), Голландия (1), Португалия (1), Испания (1), Беларусь (1), Россия (28). Представители этих стран лично участвовали в работе семинара. На самом деле стран-участниц и участников было больше, поскольку доклады содержали

большое количество соавторов из разных стран. Это видно из авторского указателя книги абстрактов.

- Пленарные лекции – 12
- Приглашенные лекции – 10
- Оригинальные сообщения – 10
- Постеры – 14
- Секции: (I) Теория, моделирование и диагностика микроволновых разрядов; (II) Генерация микроволновых разрядов и применение.

Анализ содержательной части научного семинара

Физика микроволновых разрядов является новой и бурно развивающейся областью физики низкотемпературной плазмы. Интерес к ней обусловлен, с одной стороны, теми фундаментальными проблемами, которые связаны с объединением в одном объекте явлений электродинамики СВЧ, физики и химии плазмы. С другой стороны, он вызван уже реализованными и ждущими своего воплощения перспективными применениями. Это плазмохимия, газовые лазеры, источники света, уничтожение токсичных отходов (включая боевые отравляющие вещества), создание искусственных ионизированных облаков в атмосфере Земли, аналитическая химия и др.

Техника микроволн и микроволновая плазма являются теми направлениями исследований, которые интенсивно развивались в СССР и продолжают развиваться в России, впрочем, как и во всем мире, применительно к задачам специального назначения. В большинстве случаев работы ведутся с использованием магнетронов с частотами 2450 и 915 МГц (в основном используется первая частота). Но появляются и новые источники СВЧ-генерации, которые используются для получения плазмы. Примером является появление и использование новых мощных источников миллиметровых волн, разработанных в России – гиротронов.

В настоящее время достигнуты большие успехи в развитии новых направлений исследований, связанных с разработкой различных технологий широкого применения. Таким образом, роль российских исследователей и уровень исследований в этой области в России достаточно высоки. Это явилось основанием для того, что уже на первом заседании ISC было принято решение о проведении семинара «Microwave Discharges: Fundamentals and Applications» попеременно в России и за рубежом.

Проблемы, связанные с микроволновой плазмой и ее применением, сейчас рассматриваются на всех научных мероприятиях, связанных с физикой плазмы, плазмохимией и плазменными

технологиями. Интерес к этой области науки и технологии обусловил и проведение специализированных периодических научных семинаров, посвященных проблемам СВЧ-плазмы. Это международные семинары «Strong Microwaves in Plasmas» (проводится раз в три года в ИПФ РАН, семинар несколько раз менял название и в 2017 г. имел название «Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Application») и «Microwave Discharges: Fundamentals and Applications» (проводится раз в три года попеременно в России и за рубежом). Труды этих совещаний содержат исчерпывающую информацию о СВЧ-разрядах, СВЧ-плазме, генераторах плазмы и ее применениях. Тематика этих семинаров взаимно дополняет друг друга. Если на первом основное внимание уделяется проблеме генерации СВЧ-энергии, то на втором основной является разрядная тематика. Оба этих мероприятия заняли прочное место в списке международных научных форумов. Они стали традиционным местом обсуждения актуальных проблем развития этой области знаний и применений специалистами разных стран.

Отличием настоящего семинара от предыдущих было то, что ISC решил отдать предпочтение молодым исследователям в представлении пленарных докладов. Естественно, что в числе соавторов могли быть и известные ученые, но доклады делали молодые. Например, пленарный доклад из Германии был представлен аспирантом. Таким образом, из 12 пленарных докладов 8 было сделано молодыми учеными: M. Klute (Германия, «Global model of a small mw driven inductively coupled plasma jet»), V. Kudrle (Чешская республика, «Self-organization in microwave filamentary discharges»), V. A. Skalyga (Россия, «High current pulsed ECR ion sources»), Gerard van Rooij (Голландия, «Microwave plasma enabling electrification of chemical industry»), N. Britun (Бельгия, «Decisive role of non-equilibrium microwave plasmas in greenhouse gas conversion»), J. R. Sanchez-Valencia (Испания, «Metal oxide nanotubes prepared by microwave-plasma enhanced chemical vapour deposition for advanced applications»), A. Vodopyanov (Россия, «Sources of ultraviolet light based on microwave discharges»), P. Svarnas (Греция, «H- negative ion production in microwave-driven discharges: principles and diagnostics»).

Наиболее важными проблемами, рассмотренными на семинаре, были получение СВЧ-плазмы в разных газоразрядных устройствах (в том числе и новое направление – СВЧ-разряды в жидких диэлектриках (Yu. A. Lebedev, E. Benova), возможность управления параметрами СВЧ-плазмы, самоорганизация (структурирование) СВЧ-плазмы (V. Kudrle).

Базой для исследований явились работы по самосогласованному одномерному и двумерному моделированию СВЧ-разрядов на основе уравнений Максвелла и кинетических уравнений для частиц плазмы. Такое моделирование дает связь внутренних и внешних параметров разрядов. Это важно как для решения задач физики плазмы, так и для решения многих прикладных задач. Большое внимание уделялось методам диагностики плазмы. В последнее время наметилась тенденция создания пакетов программ для обработки экспериментальных данных с привлечением элементов моделирования разрядов. Такой подход позволяет получать набор данных о плазме, значительно превышающий набор, получаемый в результате использования традиционных методов. Эти результаты могут быть использованы для исследования плазмы любого типа.

Результаты по исследованию и применению СВЧ-разрядов, представленные и обсужденные в процессе работы имеют отношение не только к тематике, связанной с применением СВЧ-энергии, но и для физики разрядов вообще.

Можно подчеркнуть необходимость развития как электродинамических моделей разряда, так и разработки кинетических схем процессов в различных плазменных средах. Моделированию плазмы было посвящено много работ (М. Klute, А. Tatarinov, V. Shakhmatov). Это объясняется рядом причин. Одной из них является то, что СВЧ-разряды являются крайне трудными объектами для экспериментальных исследований, а объем требуемой информации значительно превышает возможности экспериментальных методик. В настоящее время модели достигли уровня, когда они во многом могут дополнить дорогостоящие эксперименты. Кроме того, накопление и уточнение данных о параметрах плазмы и различных физико-химических константах в настоящее время уже позволяют создать схемы, достаточно надежно описывающие кинетические процессы. Это было показано на примере плазмы разных газов.

Большой интерес вызвали доклады, посвященные физике микроволновой плазмы (М. Moisan, J. van der Mullen, S. Dvinin, А. Balmashnov, D. Chuprov, М. Korneeva и др.) и генерации микроволновой плазмы (V. Ivanov). Была продемонстрирована перспективность генераторов плазмы, основанных на применении гиротронов (V. Scalyga, А. Vodopyanov), поверхностных волнах (М. Moisan, Е. Venova) и электродных системах. Отмечалось, что прикладные задачи ставят перед исследователями разработку как генераторов плазмы больших объемов или протяженных разрядов (Н. Toyoda, S. Antipov), так и миниатюрных источников плазмы (М. Klute) и требуют расширения разрядных условий.

Прикладные работы рассматривали широкий спектр проблем: уменьшение и уничтожение выбросов CO₂ (G. van Rooij, N. Britun), получение алмазных образцов (А. Gorbachev, I. Antonova), получение нанопорошков (F. Dias, J. Sanches-Valencia, T. Gries), применение плазмы в медицине и детоксикации тканей и образцов (Е. Venova), источниках света, включая УФ-излучение (J. Kim, А. Vodopyanov), обработка углеродсодержащих материалов в СВЧ-микроразрядах (М. Tsodikov), эжекция плазмы из базальта под действием СВЧ (Е. Jerby), высокоскоростные переключатели (М. Usachonak), и др. Все это демонстрирует широкие возможности микроволновой плазмы, и они будут развиваться в дальнейшем.

Одним из важных результатов семинара является установление новых научных контактов и распространение среди специалистов по СВЧ-разрядам последней информации о физике и применении разрядов по результатам работ, которые находятся в печати или подготавливаются к опубликованию. Это неизбежно приведет к общему росту уровня исследований и, как следствие, к появлению новых научных и практических результатов.

Хроника работы семинара

Работа семинара началась с поздравления Председателя Оргкомитета Ю. А. Лебедева профессору М. Муазану (М. Moisan, Канада). Он один из ведущих ученых в области низкотемпературной плазмы и микроволновых разрядов, один из основателей семинара и член ISC. В 2017 г. он стал кавалером Ордена Академических пальм Французской республики (Chevalier dans l'Ordre des palmes académiques of the French Republic). Орден был основан императором Наполеоном I и им награждаются люди, внёсшие значительный вклад в народное образование, а также иностранные подданные и французы, проживающие за пределами Франции, активно способствующие распространению французской культуры в других странах.

Кроме того, профессор М. Муазан получил премию Европейского физического общества в области инноваций «За новаторский вклад в развитие и понимание источников микроволновой плазмы и их применение в обработке материалов, здравоохранении и охране окружающей среды» («For pioneering contributions to the development and understanding of microwave plasma sources and their application to material processing, healthcare and environmental protection»). Известно, что разряды с поверхностными волнами являются детищем проф. М. Муазана, и эта тематика прослеживается во многих докладах.

Заседания проводились в малом зале пансионата «Звенигородский». Погода была хорошей и кофе-брейки и стендовая сессия были организованы на крыше пансионата (см. рис.).

Накануне, 5 сентября, было проведено заседание Международного научного комитета (ISC). Программа заседания содержала следующие пункты:

- очередное изменение состава Международного научного комитета;
- выборы Почетных членов МНК;
- о месте проведения XI International Workshop on Microwave discharges: Fundamentals and Application в 2021 г.;
- выборы Председателя ISC на период 2018–2021 гг.

Первый пункт реализовал обычную процедуру обновления (ротацию) состава ISC. По представлению действующего члена ISC проф. М. Nagatsu, было принято решение об избрании проф. Н. Toyoda представителем Японии в ISC взамен проф. М. Nagatsu. Новый состав ISC представлен ниже:

- J. Asmussen (USA)
- P. Awakowicz (Germany)
- E. Benova (Bulgaria)
- F. Dias (Portugal)

- A. Gamero (Spain)
- E. Jerby (Israel)
- Yu. Lebedev (Russia)
- A. Lacoste (France)
- M. Moisan (Canada)
- J.J.A.M. van der Mullen (Belgium)
- H. Toyoda (Japan)

Учитывая большой вклад в развитие семинара, проф. М. Nagatsu был избран Почетным членом ISC.

Перед ISC стоял трудный выбор определения места проведения следующего семинара в 2021. Оба кандидата, Болгария и Франция, соответствовали всем требованиям к организаторам семинара. Выбор пал на Болгарию, и основным аргументом было то, что в Болгарии, в отличие от Франции, семинар еще не проводился. Поэтому семинар MD-11 было решено провести в сентябре 2021 г. в Болгарии. Председателем ISC на следующий срок избрана Prof. E. Benova.

Участники семинара 6 сентября совершили поездку в Москву, где были организованы пешеходная и автобусная обзорные экскурсии, затем было посещение Третьяковской картинной галереи и конференционный обед.



Участники 10-го семинара Microwave Discharges

Заключение

В настоящее время семинар Microwave Discharges: Fundamentals and Applications превратился в представительный международный научный форум, где обсуждаются основные направления работ по исследованию и применению СВЧ-разрядов.

Одним из важных результатов 10-го семинара Microwave Discharges является установление новых научных контактов и распространение среди специалистов по СВЧ-разрядам последней информации о физике и применениях разрядов по результатам работ, которые находятся в печати или только подготавливаются к опубликованию. Это неизбежно приведет к общему росту уровня

исследований и, как следствие, к появлению новых научных и практических результатов.

Проведённый 10-й международный семинар по физике и технике СВЧ-разрядов наглядно продемонстрировал, что это направление является быстро развивающейся областью физики низкотемпературной плазмы. Интерес к ней обусловлен, с одной стороны, теми фундаментальными проблемами, которые связаны с объединением в одном объекте явлений электродинамики СВЧ, физики и химии плазмы. С другой стороны, он вызван уже реализованными и ждущими своего воплощения перспективными применениями. Это, прежде всего, плазмохимия, газовые лазеры, источники света, уничтожение токсичных отходов

(включая боевые отравляющие вещества), создание искусственных ионизированных облаков в атмосфере Земли, аналитическая химия и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.fpl.gpi.ru/md-10>
2. Book of abstracts of the X International Workshop on Microwave discharges: Fundamentals and Applications. Moscow: Yanus-K, 2018. – 73 p.
3. Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. Proceedings of the X International Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications (MD-10). Ed. by Yu. A. Lebedev, – Moscow: Yanus-K, 2018. – 268 p.

PACS: 52.50.Dg, 52.75.Di, 52.80.Pi

Xth International Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications (MD-10)

Yu. A. Lebedev

A. V. Topchiev Institute of Petrochemical Synthesis of the Russian Academy of Sciences
29 Leninskii prospect, Moscow, 119991, Russia
E-mail: lebedev@ips.ac.ru

Received January 10, 2019

At present, the International Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications turned into a representative scientific forum, where the principal directions on researches and applications of microwave discharges are discussed. An important task of the X-th International Workshop on Microwave Discharges was to intensify the collaboration of researchers from many countries in the area of microwave plasma.

Keywords: microwave discharge, workshop, microwave plasma, collaboration.

REFERENCES

1. <http://www.fpl.gpi.ru/md-10>
2. Book of abstracts of the X International Workshop on Microwave discharges: Fundamentals and Applications. (Moscow, Yanus-K, 2018), pp. 73.
3. Microwave Discharges: Fundamentals and Applications. Proceedings of the X International Workshop on Microwave Discharges: Fundamentals and Applications (MD-10). Ed. by Yu. A. Lebedev (Moscow, Yanus-K, 2018).