

УДК 537.86+621.38.01+621.385.6+621.373

ПРИКЛАДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЗЕРА НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ С ЧАСТОТОЙ ГЕНЕРАЦИИ 30 ГГц: ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВОЗДЕЙСТВИЮ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕТАЛЛЫ

*В. Г. Баев*¹, *В. А. Вдовин*², *А. А. Вихарев*³, *Н. С. Гинзбург*³, *И. И. Голубев*⁴,
*С. М. Голубых*⁴, *Н. И. Зайцев*³, *А. К. Каминский*⁴, *Ю. А. Ковалёв*⁴, *А. П. Козлов*⁴,
*А. Ф. Кратко*⁴, *И. А. Крячко*⁴, *С. В. Кузиков*³, *А. И. Лесникович*¹, *И. А. Милевич*¹,
*Э. А. Перельштейн*⁴, *Н. Ю. Песков*³, *М. И. Петелин*³, *С. Н. Седых*⁴,
*С. И. Тютюнников*⁴, *Ю. А. Федотова*¹

¹ Белорусский госуниверситет, г. Минск, Республика Беларусь;

² Институт радиотехники и электроники РАН, г. Москва;

³ Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород;

⁴ Объединённый институт ядерных исследований, г. Дубна, Россия

Достиженные в Объединённом институте ядерных исследований и Институте прикладной физики РАН уровень мощности и стабильность режима одномодовой генерации мазера на свободных электронах с выходной частотой 30 ГГц позволили реализовать на его основе стенд для тестирования свойств различных объектов под воздействием последовательности мощных импульсов сверхвысокочастотного электромагнитного поля. В данной статье описаны эксперименты по исследованию тепловой усталости поверхности меди в тесном резонаторе, моделирующем тепловой режим ускоряющей структуры проекта CLIC (ЦЕРН), а также эксперименты по облучению биологических тканей, металлизированных плёнок и нанокластеров.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА

Основу экспериментального стенда, созданного в сотрудничестве Объединённого института ядерных исследований и Института прикладной физики РАН, составляет мазер на свободных электронах с частотой выходного излучения 30 ГГц [1, 2]. Электронный пучок генерируется линейным индукционным ускорителем ЛИУ-3000, обеспечивающим энергию электронов 0,8 МэВ при токе пучка 250 А в импульсном режиме при длительностях импульсов 250 нс и частоте их следования до 1 Гц. Увеличение скорости осцилляций частиц осуществляется в винтовом токовом ондуляторе с периодом 6 см, имеющем участок плавного нарастания поля. В области взаимодействия высокочастотного (ВЧ) излучения с электронами амплитуда ондуляторного поля примерно равняется 1,1 кЭ, а величина ведущего магнитного поля равняется –1,2 кЭ. В качестве рабочего режима мазера на свободных электронах был выбран режим обратного ведущего магнитного поля, при котором направление вращения электронов в поле винтового ондулятора противоположно направлению их вращения в ведущем поле. Данный режим оптимален с точки зрения снижения чувствительности к разбросу параметров релятивистских электронных пучков и, соответственно, достижения высокого электронного коэффициента полезного действия (КПД) [1]. Электродинамическая система мазера на свободных электронах основана на брэгговском резонаторе со скачком фазы гофрировки, обеспечивающем селективное возбуждение рабочей моды и стабильный режим одномодовой одночастотной генерации. В данной серии экспериментов мощность выходного излучения мазера на свободных электронах достигала 20 МВт при длительности импульса около 170 нс, а ширина спектра была близка к естественной ширине линии и была равна $6 \div 7$ МГц [2].

На выходе пространства взаимодействия мазера на свободных электронах располагается конический рупор, обеспечивающий трансформацию рабочей волны $TE_{1,1}$ в гауссов пучок. В качестве выходной секции генератора используется сверхразмерный волновод, работа которого основана на эффекте Тальбо и который обеспечивает повторение гауссова пучка на выходном конце. При этом барьерное, т. е. вакуумное, окно устанавливается в средней части волновода в сечении с минимальной плотностью поперечного распределения высокочастотного поля для недопущения возникновения высокочастотного пробоя. Экспериментальная установка для исследования эффекта поверхностного нагрева [3, 4], описанного далее в разделе 2, включала в себя двухзеркальную конфокальную передающую линию и необходимые преобразователи мод, которые осуществляли транспортировку высокочастотного излучения в тестовый резонатор, моделирующий температурный режим высокоградиентных ускоряющих структур. В экспериментах по облучению биологических тканей и металлизированных плёнок [5] используются фторопластовые линзы с различным фокусным расстоянием, плоский отражатель и проволочный поляризатор волны. Форма импульса излучения регистрируется детекторами на «горячих» носителях, энергия импульса измеряется калориметром с большой апертурой, спектральные характеристики контролируются при помощи гетеродинного измерителя.

2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИЗУЧЕНИЮ ДЕГРАДАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ ВЫСОКОДОБРОТНОГО РЕЗОНАТОРА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ МОЩНОГО ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Данный цикл экспериментов проводился в рамках коллаборации с группой CLIC (ЦЕРН) и имел целью определение закономерности повреждения поверхности высокоградиентной ускоряющей структуры вследствие многократного воздействия мощного импульсного излучения сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. Причиной повреждения являются циклические механические напряжения между тонким поверхностным слоем, разогретым вихревыми токами, и холодной основной массой металла, т. к. за время импульса СВЧ электромагнитного поля, составляющее сотни наносекунд, тепло успевает распространиться вглубь меди лишь на несколько микрон. Такие повреждения поверхности, родственные усталостному разрушению, в настоящее время считаются причиной одного из наиболее жёстких ограничений на величину ускоряющего поля в проектируемых коллайдерах нового поколения [6, 7].

Эксперименты по исследованию теплового ресурса высокоградиентных ускоряющих структур ведутся в ряде лабораторий Европы и США с использованием различных методик и в различных диапазонах значений двух главных параметров — величины импульсного нагрева, или эквивалентного механического напряжения, и числа импульсов, или циклов нагружения. На рис. 1 представлены результаты экспериментов по исследованию деградации поверхности меди, проведённых в ЦЕРН [8, 9] на ультразвуковых вибраторах при числе циклов нагружения $10^6 \div 10^{11}$ и эквивалентных температурах нагрева $70 \div 140^\circ\text{C}$ и на оптическом лазере при числе импульсов $10^2 \div 10^7$ и температурах нагрева $150 \div 350^\circ\text{C}$, а также данные двух групп, работающих на Стэнфордском линейном ускорителе, полученные с использованием клистронов с мощностью 50 МВт частотой выходного излучения 11,4 ГГц и длительностями импульсов 1,5 мкс при числе импульсов $2 \cdot 10^6 \div 8 \cdot 10^7$ и температурах нагрева $70 \div 120^\circ\text{C}$ [10, 11]. Специально изготовленный тестовый резонатор-имитатор ускоряющей структуры проекта CLIC, работающий на электропрочной моде с нулевой нормальной компонентой электрического поля на поверхности, позволил в наших экспериментах достичь температур нагрева порядка $200 \div 250^\circ\text{C}$, при этом число импульсов доходило до $6 \cdot 10^4$ [3, 4].

Особенностью проведённых нами экспериментов являлся периодический контроль поверхно-

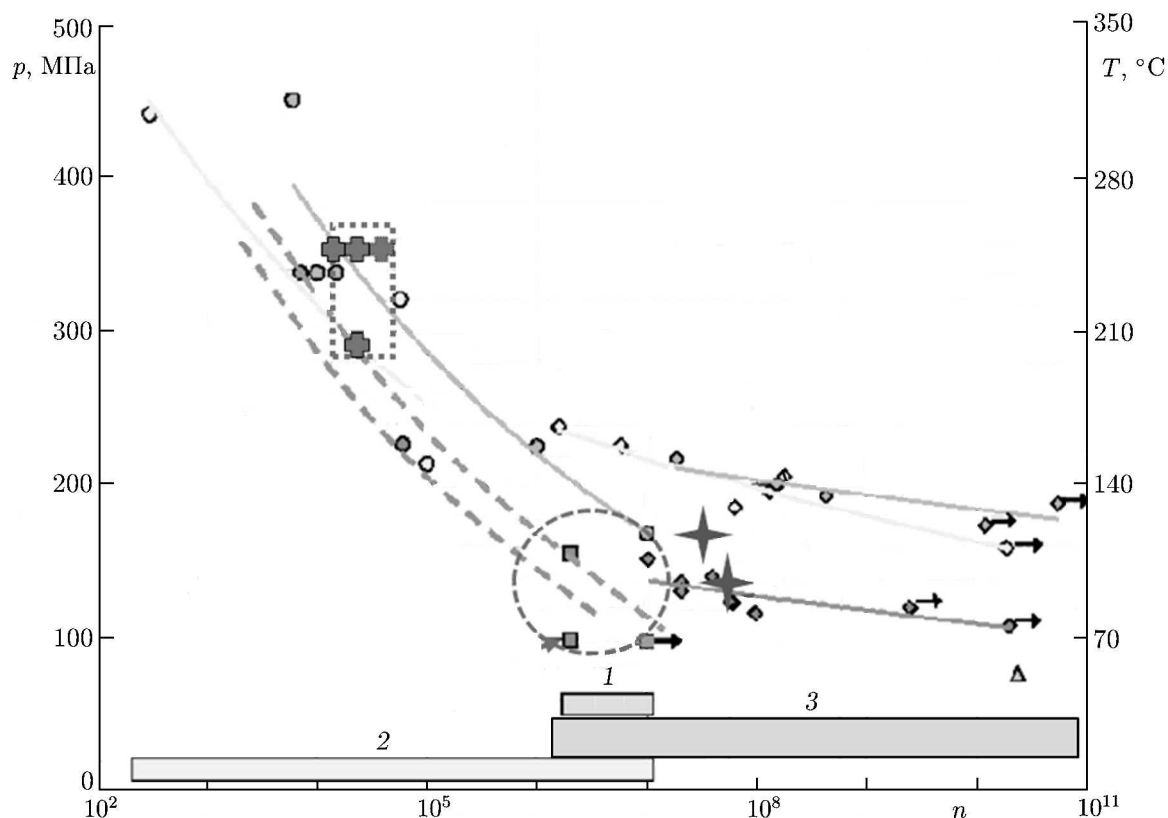


Рис. 1. Сводная диаграмма параметров экспериментов по исследованию повреждений поверхности меди при многократном воздействии мощного импульсного СВЧ излучения (1), а также лазерного излучения (2) и циклических механических нагрузок (3) по методике ULTRASOUND. Плоскость параметров эквивалентная величина нагрузки p —количество циклов n . Пунктирный прямоугольник отвечает экспериментам, выполненным в Объединённом институте ядерных исследований и Институте прикладной физики РАН, пунктирный круг и звёздочки соответствуют экспериментам, выполненным во второй и первой группах, работающих на Стэнфордском линейном ускорителе

сти меди в тестовом резонаторе через определённое число циклов нагрева, осуществляемый с помощью оптического микроскопа, что позволило исследовать динамику развития повреждений. Первые повреждения поверхности, размеры которых составляли от единиц до десятков микрон, были обнаружены в участках максимального нагрева уже после $1,6 \cdot 10^4$ импульсов, см. рис. 2а. Далее наблюдался рост площади повреждённой поверхности без существенного изменения степени её шероховатости. После $6 \cdot 10^4$ импульсов в тестовом резонаторе появились регулярные пробои и эксперимент был остановлен. Исследование поверхности резонатора с помощью сканирующего электронного микроскопа выявило большое количество трещин различной глубины с длиной от десятков до сотен микрон, см. рис. 2б. Вероятной причиной локальных пробоев СВЧ излучением может быть разрыв высокочастотных токов Фуко на трещинах медного резонатора, из-за чего там возникают большие электрические поля, вызывающие авто-, а затем и взрывную эмиссию электронов.

Результаты проведённых экспериментов неплохо коррелируют с экспериментами, проводимыми в ЦЕРН с использованием для нагрева лазера оптического диапазона с учётом разницы методики определения максимального числа импульсов [8]. Однако, выявленные нами закономерности развития повреждений не соответствуют принятой ранее модели лавинообразного разрушения поверхности.

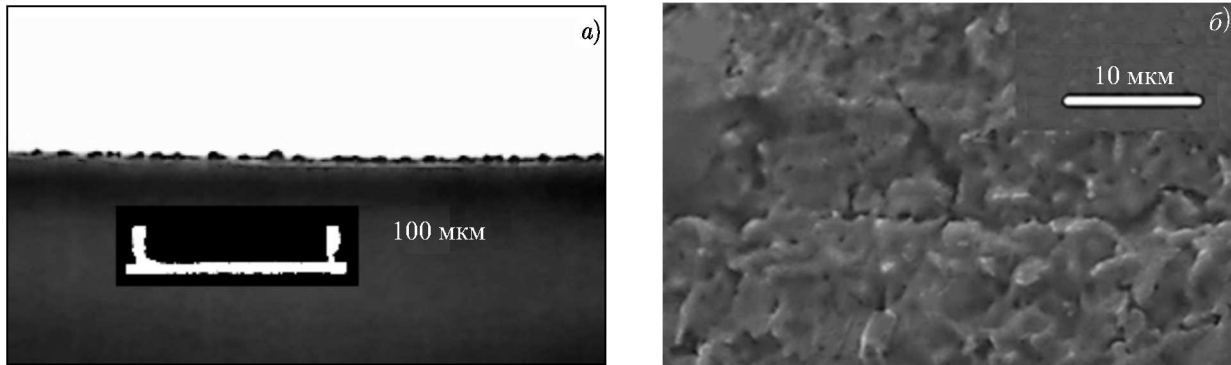


Рис. 2. Микрофотографии участка поверхности тестового резонатора после облучения $1,6 \cdot 10^4$ импульсами (а) (оптический микроскоп, вид сбоку) и $6 \cdot 10^4$ импульсами (б) (электронный микроскоп)

3. ИЗБИРАТЕЛЬНОЕ РАЗРУШЕНИЕ РАКОВЫХ КЛЕТОК — ОСНОВНЫЕ ИДЕИ ПРОЕКТА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Работы по избирательному разрушению раковых клеток с помощью наноразмерных объектов начались более 40 лет назад во многих лабораториях мира и, ввиду исключительной важности этого направления, интерес к ним постоянно возрастает. Одно из многих направлений таких исследований основано на уничтожении раковых клеток с помощью наноразмерных поглотителей излучения, нагрев которых при существенной разнице в поглощении между здоровой тканью и заражённой тканью, насыщенной нанопоглотителями, приводит к гибели раковых клеток и называется локальной гипертермией [12]. Наночастицы осаждаются на раковых клетках с помощью биохимических методов, например, за счёт связывания их со специфическими антителами. При этом облучение в режиме коротких импульсов исключает существенный теплоперенос от раковых клеток к здоровым. В случае использования оптического или инфракрасного лазерного излучения высокая эффективность нагрева металлических наночастиц достигается реализацией условий поверхностного плазменного резонанса [13–15]. Мы считаем, что для этой цели также перспективным является применение микроволнового излучения, при работе с которым тоже существуют возможности повышения эффективности нагрева наночастиц. Оптимизация частоты излучения является отдельной задачей, в настоящее время в качестве его источника нами используется мазер на свободных электронах с частотой генерации 30 ГГц.

Рисунок 3 иллюстрирует результаты предварительных экспериментов, в которых ткани раковых клеток облучались в непосредственном контакте с полимерной плёнкой. В случае, если плёнка была покрыта слоем золота с толщиной около 70 нм, облучение приводило к практически полному разрушению клеточной ткани. Металлический слой при этом также существенно разрушался, см. рис. 4. Контрольные образцы, облучённые на плёнке без металлизации, остались неповреждёнными [5].

Для выяснения механизмов воздействия мощного излучения на тонкие металлические покрытия были проведены многочисленные эксперименты по облучению металлизированных плёнок в средах с различной величиной диэлектрической проницаемости и с различным направлением электрического поля. Анализ этих экспериментов говорит о том, что воздействие мощного импульсного СВЧ поля приводит к неоднородному нагреву металлического слоя и возникновению микроразрядов, развивающихся с краёв и дефектов металлизации. Разумеется, сплошное металлическое покрытие не обеспечивает селективности воздействия на раковые клетки, но наши результаты подтвердили принципиальную осуществимость проекта. Для дальнейших экспери-

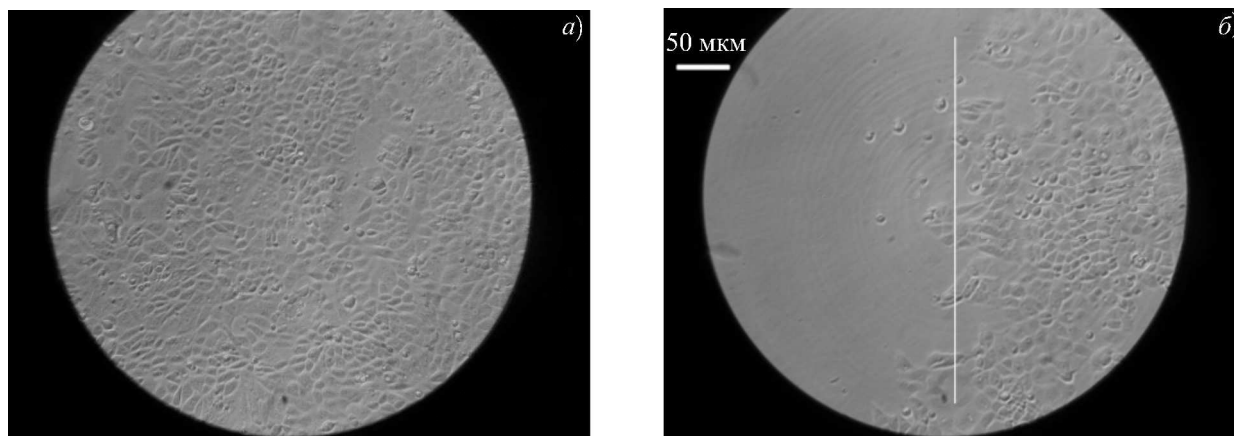


Рис. 3. Микрофотография раковых клеток в отсутствие облучения (а) и после облучения 500 импульсами СВЧ поля (б) в условиях непосредственного контакта с полимерной плёнкой, имеющей золотое покрытие толщиной 70 нм (слева) и в отсутствие такого покрытия (справа)

ментов необходим выбор малотоксичных наноразмерных кластеров, оптимальных как с точки зрения эффективности и контраста при их нагреве, так и с точки зрения возможности их эффективной транспортировки к раковым клеткам.

4. ОСОБЕННОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИМИ И ФЕРРОМАГНИТНЫМИ НАНОКЛАСТЕРАМИ

Основными эффектами при поглощении СВЧ излучения нанокластерами является периодическая переориентация их электрического и магнитного дипольных моментов в поле волны, т. е. их электрическая и магнитная поляризуемость. Для металлических наночастиц причиной нагрева является джоулево тепло, связанное с конечной проводимостью металла. В рамках классической теории, в которой частица с размером много меньшим длины волны всё ещё рассматривается как сплошная среда, максимальный нагрев достигается при её диаметре порядка толщины скин-слоя [16]. При уменьшении размеров металлических кластеров до нанометрового масштаба возникают также эффекты, которые уже не описываются в рамках классической теории. В частности, снижение подвижности электронов проводимости может происходить из-за того, что их длина свободного пробега в металле начинает превышать размер самой частицы. Для частицы, состоящей из небольшого числа атомов, необходим учёт квантовых эффектов, таких, как эффект, связанный с образованием квантовых точек, приводящих к значительному снижению проводимости по сравнению с её значением для однородного металла [17].

При рассмотрении наночастиц диэлектрика, обладающего мнимой частью диэлектрической проницаемости, существенен эффект Максвелла—Вагнера [18]. Этот квазирезонансный эффект наблюдается при равенстве времени релаксации скорости электронов проводимости в веществе и полупериода СВЧ поля. Время релаксации обратно пропорционально проводимости среды и, таким образом, зависит от диаметра кластера. Для наночастиц алмаза, например, этот параметр может также регулироваться подбором величин легирующих добавок или содержания углеродной фазы.

В качестве перспективного материала для противораковой терапии в настоящее время рассматриваются также ферромагнитные нанокластеры [19, 20]. Для обеспечения эффективности

поглощения ими излучения может быть использован эффект ферромагнитного резонанса [21]. Для его реализации необходимо добиться равенства частоты внешней волны и частоты прецессии магнитного момента нанокластера в однородном магнитном поле. При этом удовлетворить резонансным условиям оказывается проще, чем в случае эффекта Максвелла—Вагнера, т. к. для этого достаточно подобрать величину внешнего магнитного поля. Точное значение резонансного поля зависит от величины магнитного момента кластера, а его характерное значение составляет несколько килогаусс.

5. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ НАНОКЛАСТЕРАМИ В ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Ключевым пунктом вышеупомянутого проекта является разработка методики измерения эффективности поглощения СВЧ излучения нанокластерами. При этом желательно зафиксировать максимальный нагрев самих кластеров. Задача существенно осложняется импульсным характером облучения и локальностью нагрева.

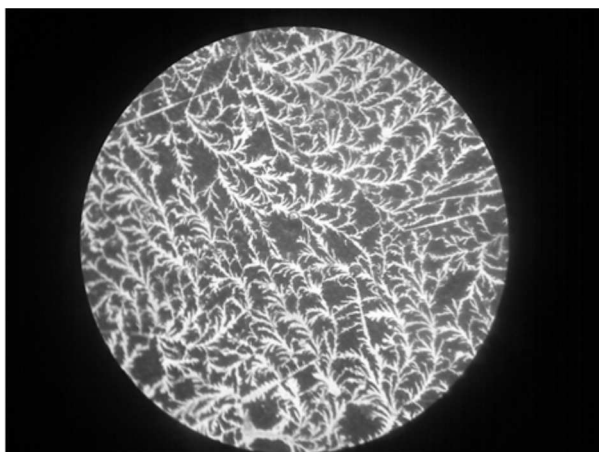


Рис. 4. Микрофотография полимерной плёнки с золотым покрытием с толщиной 70 нм после облучения 500 импульсами СВЧ поля в дистиллированной воде. Характер повреждения металлизации аналогичен имевшему место в экспериментах по облучению раковых клеток

и достаточно широкой полосе частот акустического приёмника форма акустического импульса хорошо повторяет форму импульса СВЧ поля, см. рис. 5а. При удалении металлизации с входного окна поглощение излучения происходит в самой рабочей жидкости, например, в коллоидном растворе нанокластеров заданного размера, а длительность переднего фронта акустического сигнала равна времени прохождения звуковой волны через поглощающий слой, см. рис. 5б. Поэтому данный режим можно применять для измерения эффективности поглощения электромагнитной волны нанокластерами.

В качестве индикатора локального нагрева нанокластеров предполагается использование необратимых химических или биохимических реакций с температурным порогом, в частности реакции сворачивания белка. Соответствующие эксперименты в настоящее время начаты в Объединённом институте ядерных исследований.

Для измерения эффективности поглощения СВЧ волн представляется перспективным использование широкополосного датчика СВЧ излучения на основе термоакустического эффекта [22]. Данный датчик представляет собой цилиндрический сосуд с рабочей жидкостью, в качестве которой обычно используются дистиллированная вода или этиловый спирт, на одном торце которого расположен широкополосный акустический приёмник, а на другом (входном) торце из кварцевого стекла — тонкий металлический слой, играющий роль поглотителя на входном окне. Локальный разогрев плёночного поглотителя вызывает акустическую волну в рабочей жидкости. Оптимальный выбор времени прохождения акустической волны через рабочую жидкость, т. е. акустической задержки, позволяет снизить влияние помех от срабатывания мощных электронных устройств. При высоком коэффициенте поглощения СВЧ излучения в плёнке

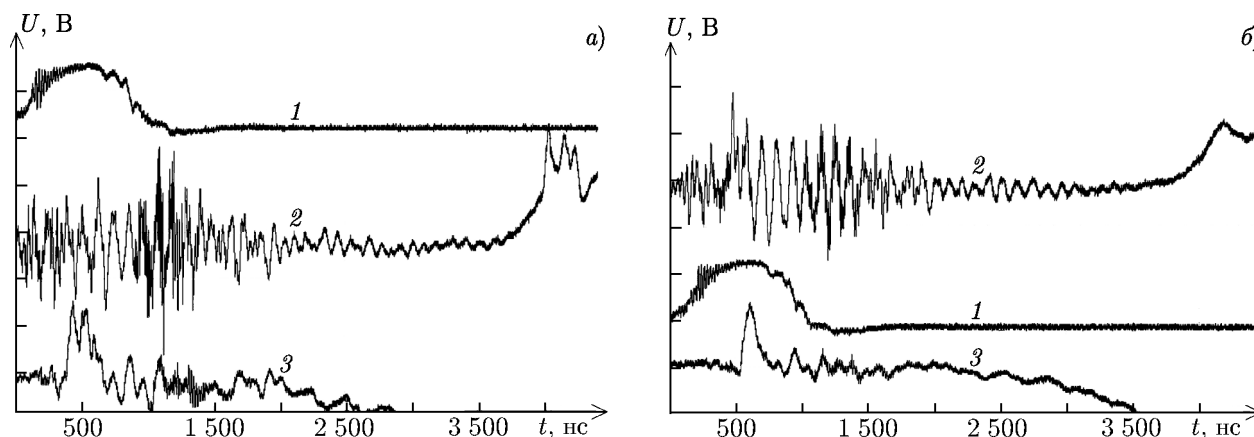


Рис. 5. Осциллограммы сигналов с датчика тока пучка на выходе ускорителя (кривые 1), с термоакустического датчика (кривые 2) и с датчика СВЧ на «горячих» носителях (кривые 3) при наличии на выходном окне локального поглотителя в виде плёнки алюминия с толщиной 3 нм (а) и при поглощении излучения в дистиллированной воде (б)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ginzburg N. S., Kaminsky A. A., Kaminsky A. K., et al. // *Phys. Rev. Lett.* 2000. V. 84. P. 3574.
2. Каминский А. К., Перельштейн Э. А., Седых С. Н. и др. // *Письма в ЖТФ.* 2010. Т. 36, № 5. С. 37.
3. Вихарев А. А., Гинзбург Н. С., Голубев И. И. и др. // *Письма в ЖТФ.* 2011. Т. 37, № 3. С. 16.
4. Ginzburg N. S., Golubev I. I., Kaminsky A. K., et al. // *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams.* 2011. V. 14. Art. no. 041002.
5. Besedin S. P., Kaminsky A. K., Komova O. V., et al. // *Proc. VII Int. Workshop "Strong Microwaves: sources and applications"*. Nizhniy Novgorod, Russia, 2008. V. 2. P. 524.
6. Nezhevenko O. A. // *Proc. 1997 Particle Accelerator Conf., Vancouver, Canada, 1997.* P. 3013.
7. Braun H., Corsini R., Delahaye J.-P., et al. // *CLIC Note 764, Geneva, CERN, 2008.* 39 p.
8. Arnau Izquierdo G., Calatroni S., Heikkinen S., et al. // *CLIC Note 708, Geneva, CERN, 2007.*
9. Dubert S. // *CLIC Note 768. Geneva, CERN, 2009.*
10. Pritzkau D. P., Siemann R. H. // *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams.* 2002. V. 5. Art. no. 112002.
11. Laurent L., Tantawi S., Dolgashev V., et al. // *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams.* 2011. V. 14. Art. no. 041001.
12. Мешалкин Ю. П., Богатова Н. П. // *J. Siberian Federal Univ. Biology.* 2008. V. 3, No. 1. P. 248.
13. Pitsillides C. M., Joe E. K., Wei X., et al. // *Biophys. J.* 2003. V. 84. P. 4023.
14. El-Sayed I. H., Huang X., El-Sayed M. A. // *Cancer Lett.* 2006. V. 239. P. 129.
15. Lapotko D. O. // *Lasers Surgery Medicine.* 2006. V. 38. P. 240.
16. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. *Электродинамика сплошных сред.* М.: Наука, 1992.
17. Nimtz G., Marquardt P., Gleiter H. // *J. Crystal Growth.* 1990. V. 86, № 1–4. P. 66.
18. Roussy G., Pearce J. A. *Foundations and Industrial Applications of Microwave and Radio Frequency Fields: Physical and Chemical Processes.* West Sussex: John Wiley and Sons Ltd., 1995.
19. Губин С. П., Кокшаров Ю. А., Хомутов Г. Б., Юрков Г. Ю. // *Успехи химии.* 2005. Т. 74, № 6. С. 540.
20. Першина А. Г., Сазонов А. Э., Мильто И. В. // *Бюлл. сибирской медицины.* 2008. № 2. С. 70.
21. Kittel C. // *Phys. Rev.* 1948. V. 73, No. 2. P. 524.
22. Andreev V. G., Vdovin V. A. // *Instrum. Experim. Techn.* 2009. V. 52, No. 2. P. 226.

Поступила в редакцию 2 сентября 2011 г.; принята в печать 30 сентября 2011 г.

**APPLIED RESEARCH USING A 30 GHz FREE-ELECTRON MASER:
EXPERIMENTAL STUDY OF INTERACTION OF HIGH-POWER PULSED
RADIATION WITH METALS**

*V. G. Baev, V. A. Vdovin, A. A. Vikharev, N. S. Ginzburg, I. I. Golubev, S. M. Golubykh, N. I. Zaitsev,
A. K. Kaminsky, Yu. A. Kovalev, A. P. Kozlov, A. F. Kratko, I. A. Kryachko, S. V. Kuzikov,
A. I. Lesnikovich, I. A. Milevich, E. A. Perelshtein, N. Yu. Peskov, M. I. Petelin, S. N. Sedykh,
S. I. Tutunnikov, and Y. A. Fedotova*

We present the research performed on the stand for testing the properties of different objects under the effect of a sequence of high-power pulses of the super-high-frequency electromagnetic field. The stand performance is due to the power level and stability of the single-mode generation of a free-electron maser having an output frequency of 30 GHz, which were achieved at the Joint Institute for Nuclear Research and the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences. This paper describes the experiments on studies of the thermal fatigue of the copper surface in a test resonator, which models the thermal regime of the accelerating structure of the CLIC project (CERN), as well as the experiments on irradiation of biological tissues, metal films, and nanoclusters.