

05;10

## Эксперименты по импульсному циклическому нагреву медной поверхности на основе мощного 30-GHz мазера на свободных электронах

© А.А. Вихарев, Н.С. Гинзбург, И.И. Голубев, Ю.Ю. Данилов,  
Н.И. Зайцев, А.К. Каминский, А.П. Козлов, С.В. Кузиков,  
Э.А. Перельштейн, Н.Ю. Песков, М.И. Петелин, С.Н. Седых,  
А.П. Сергеев, А.С. Сергеев

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна  
Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород  
E-mail: alikk@sunse.jinr.ru

*В окончательной редакции 15 сентября 2010 г.*

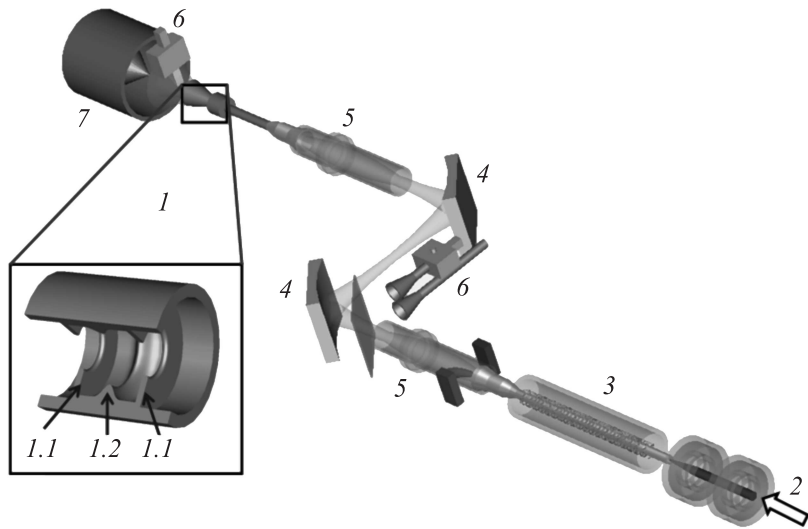
Проведены эксперименты по исследованию тепловой усталости поверхности меди при многократном импульсном СВЧ-нагреве. Для выяснения вопроса о предельно допустимом темпе ускорения в ускоряющей структуре коллайдера CLIC (ЦЕРН) в тестовом резонаторе изучалась тепловая усталость меди под действием  $10^4$ – $10^5$  импульсов СВЧ и нагреве на 190–250 К за импульс. Для запитки тестового резонатора на частоте 30 GHz использовался мощный, узкополосный мазер на свободных электронах (МСЭ). Исследована динамика процесса разрушения поверхности медного образца под действием сильного электромагнитного поля в резонаторе.

В настоящее время в ЦЕРНе интенсивно разрабатывается проект линейного электрон-позитронного коллайдера CLIC [1] на энергию до 3 TeV в системе центра масс и светимостью  $\sim 10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . При сроке работы коллайдера  $\sim 20$  лет и цикличности работы 50 Hz общее количество импульсов ускоряющего поля достигнет  $\sim 2 \cdot 10^{10}$ . Проектная величина темпа ускорения в коллайдере CLIC выбрана равной 100 MV/m при рабочей частоте около 12 GHz и длительности СВЧ-импульса около 200 ps. На рабочих частотах в десятки GHz одним из самых опасных ограничений на ресурс ускоряющих структур коллайдера является разрушение этих структур от циклического нагрева короткими мощными СВЧ-импульсами. Подобный термомеханический

эффект изучался в работе [2] для циклического импульсного нагрева металла электронным пучком. Физическая причина разрушения материала ускоряющей структуры заключается в том, что при СВЧ-нагреве импульсами короткой длительности на поверхности металла возникают большие механические напряжения, которые могут превысить предел его пластичности. Повреждение поверхности образцов из меди (и других материалов) изучалось экспериментально с использованием импульсного лазера ультрафиолетового диапазона и на основе эквивалентной ультразвуковой методики [3,4]. Эксперименты с источниками микроволнового излучения высокой импульсной мощности (клистроны с рабочей частотой 11.4 GHz, мощностью 50 MW, длительностью импульса около 1500 ns) проводились несколькими группами в SLAC совместно с ЦЕРН [5,6]. Повреждения меди исследовались при величине импульсного нагрева  $\delta T = 70\text{--}120$  К. Количество рабочих импульсов в разных экспериментах было  $N = (2\text{--}85) \cdot 10^6$ .

При проектировании экспериментального СВЧ-стенда в ОИЯИ ставилась задача получения экспериментальных данных на частоте  $f = 30$  GHz при значительно более высоких (по сравнению с параметрами экспериментов в SLAC) значениях импульсного нагрева  $\delta T \geq 200$  К. Источником СВЧ-мощности для экспериментальной установки в ОИЯИ служил мазер на свободных электронах [7] с параметрами: выходная мощность 20 MW, рабочая частота 30 GHz, длительность импульса до 200 ns и ширина спектра не более 10 MHz. Источником электронного пучка являлся индукционный ускоритель ЛИУ-3000 с током пучка 250 А при энергии электронов 0.8 MeV и цикличности работы до 1 Hz. Поскольку глубина скин-слоя в экспериментах ОИЯИ и SLAC отличалась менее чем в два раза, то различие в результатах из-за отличия в величинах рабочей частоты несущественно.

Основным элементом установки, созданной в ОИЯИ совместно с ИПФ РАН [7,8], являлся блок тестового резонатора 1 (рис. 1), через который проходил короткий (до 200 ns) СВЧ-импульс. Тестовый резонатор (ТР) состоял из двух диафрагм 1.1 и медного кольца 1.2, вставленного между ними. Конструкция ТР обеспечивала плавную регулировку резонансной частоты для согласования с рабочей частотой МСЭ за счет изменения расстояния между диафрагмами. В соответствии с результатами численного моделирования, при небольших изменениях радиуса кромки кольца можно было в широких пределах менять величину импульсного магнитного поля на кромке. При рабочих параметрах МСЭ и величине потерь мощности в тракте



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки. 1 — тестовый резонатор, 1.1 — диафрагмы, 1.2 — медное кольцо, 2 — электронный пучок, 3 — соленоид и вигглер МСЭ, 4 — двухзеркальная конфокальная линия, 5 — преобразователи мод, 6 — СВЧ-детекторы, 7 — калориметр.

транспортировки  $\sim 20\%$  изменением профиля цилиндрической вставки можно было получать нагрев центральной кромки медного кольца за время импульса в пределах от 0 до 250 К. В качестве рабочей моды резонатора выбрана электропрочная мода  $TE_{0,1,1}$ , позволяющая изучать тепловые эффекты практически в отсутствии на поверхности металла составляющих высокочастотного электрического поля, которые могут вызвать ВЧ-пробой. Для достижения требуемых величин импульсной температуры на поверхности металла нагружения добротность резонатора  $Q_L$  выбиралась в интервале 1200–1500. Дальнейшее увеличение добротности ограничено падением спектральной эффективности ввода мощности в резонатор. Накопленная величина поля в ТР превосходила амплитуду поля падающей волны примерно в  $(Q_L)^{1/2}$  раза.

Путем численного моделирования было определено не зависящее от частоты (в пределах резонансной полосы) отношение напряженностей магнитного поля на кромке кольца и в выходном волноводе ТР.

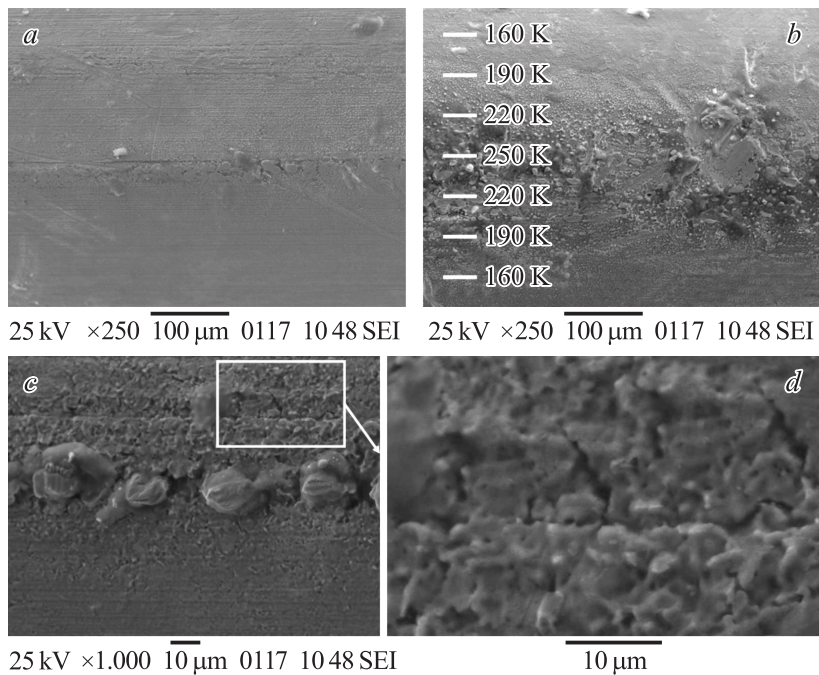
Соответственно отношение плотности потока энергии в поверхность вставленного кольца к мощности волны, распространяющейся в выходном волноводе, не зависит от времени (и от конкретной формы питающего импульса). Таким образом, измеряя с помощью выходного детектора 6 (рис. 1) форму СВЧ-импульса за ТР и с помощью калориметра 7 полную его энергию, мы могли рассчитать с точностью  $\pm 10\%$  нагрев различных участков медного кольца. Расчет приращения температуры поверхности ТР проводился на основе одномерного уравнения теплопроводности с учетом зависимости параметров металла от температуры.

В состав экспериментальной установки входили также источник электронного пучка 2, МСЭ-генератор 3, двухзеркальная конфокальная передающая линия 4, преобразователи мод 5 и системы диагностики электронного пучка и излучения 6, 7. Для транспортировки к блоку ТР волноводная мода  $TE_{1,1}$  МСЭ-генератора преобразовалась в гауссов пучок. В блоке ТР осуществлялось обратное преобразование гауссова пучка в волноводную моду  $TE_{1,1}$ , а затем в рабочую моду  $TE_{0,1,1}$  резонатора. Работа МСЭ на резонансную нагрузку исследовалась в работе [9]. Для выхода на стационарный режим запитки резонатора использовалась развязка (20% потерь при передаче излучения от МСЭ к ТР).

В экспериментах по нагреву кольцевых образцов из бескислородной меди марки МОБ импульсный нагрев центральной кромки кольца составлял 190–250 К. За время между импульсами кольцо остывало до комнатной температуры. При сравнении фотографий выделенных участков кольца, облученного  $3.2 \cdot 10^4$  СВЧ-импульсами (при нагреве 190 К за импульс), с фотографиями необлученного кольца было зарегистрировано повреждение поверхности металла на участках с максимальным нагревом (на кромке кольца тестового резонатора и в ближайшей окрестности).

В последующих экспериментах нагрев кромки кольца был увеличен до 220–250 К, в ходе эксперимента кольцо несколько раз извлекалось из резонатора и фиксировались повреждения его поверхности. Это позволило установить развитие повреждения различных участков кольца в зависимости от числа импульсов облучения  $N$  и величины нагрева кромки кольца  $\delta T$ .

После первого извлечения кольца ( $N_1 = 1.6 \cdot 10^4$  импульсов при нагреве  $\delta T = 220$ –250 К за импульс) повреждения в виде острий



**Рис. 2.** Участок поверхности медного кольца до облучения (*a*) и после облучения (*b*) ( $N = 4.8 \cdot 10^4$  импульсов при нагреве около 250 К за импульс); образование трещин вблизи кромки кольца после  $N = 6.0 \cdot 10^4$  импульсов при нагреве 250 К за импульс (*c, d*).

различной формы наблюдались только на его центральной кромке. Размеры острий были порядка единиц или десятков микрон. При последующих вскрытиях (после  $N_2 = 3.2 \cdot 10^4$ ,  $N_3 = 4.8 \cdot 10^4$  и  $N_4 = 6.0 \cdot 10^4$  импульсов) повреждения этой части кольца менялись незначительно.

После второго и последующих извлечений кольца ( $N \geq 3.2 \cdot 10^4$ ) было обнаружено, что повреждение меди появляется также при удалении от кромки кольца. На рис. 2, *a* и *b* приведены фотографии участков кольца, сделанные соответственно перед облучением и после  $N_3 = 4.8 \cdot 10^4$  импульсов. Из этих фотографий видно, что после облучения на поверхности металла появилось большое количество капель микронного размера различной формы. Слева на рис. 2, *b* приведено рас-

четное распределение температуры кольца в зависимости от расстояния от кромки при максимальном нагреве  $\delta T_{\max} = 250$  К. Из рисунка можно получить оценку, что при указанном числе импульсов разрушение меди начинается при величине импульсного нагрева 170–180 К.

После четвертого извлечения кольца ( $N_4 = 6.0 \cdot 10^4$ ) вблизи кромки кольца было обнаружено большое количество трещин различной глубины с длиной от десятков до сотни микрон (рис. 2, *c*, *d*). Из сравнения этих трещин с приведенными в работах [3–6] можно сделать вывод, что они в основном ориентированы по граням кристаллов меди. Таким образом, повреждения исследуемых образцов при больших импульсных нагревах меди похожи на наблюдавшиеся в экспериментах, проведенных в SLAC [5] при значительно меньшем импульсном нагреве, но при большем числе рабочих импульсов. Однако, как видно из рис. 2, *c* и *d*, в нашем эксперименте регистрировались трещины с длинами более сотни микрон, что более чем в десять раз превышает длины трещин, зафиксированные в [5].

После  $N = 6.3 \cdot 10^4$  СВЧ-импульсов по показаниям калориметра 7 и детектора 6, расположенных за ТР, было зарегистрировано резкое (в 4–5 раз) уменьшение энергии и длительности СВЧ-импульсов после тестового резонатора. Из наблюдений СВЧ-тракта ТВ-камерой было установлено, что резкое укорочение СВЧ-импульсов связано с наступившими регулярными пробоями на разных азимутах в ТР. Вероятной причиной локальных СВЧ-пробоев является разрыв высокочастотного тока Фуко на трещинах медного кольца, из-за чего на ребрах трещин возникает большое электрическое поле, которое вызывает авто-, а затем и взрывную эмиссию электронов.

Таким образом, в данной работе для бескислородной меди марки МОБ определено критическое число СВЧ-импульсов ( $N \approx 6 \cdot 10^4$ ) для величины импульсного нагрева  $\delta T = 220$ – $250$  К, при котором на поверхности меди происходит интенсивное образование трещин и резкое ухудшение электрической прочности резонатора. При указанном количестве СВЧ-импульсов оценена также величина импульсного нагрева, соответствующая началу повреждения меди ( $N \approx 1.6 \cdot 10^4$ ), при этом в нашем эксперименте на кромке кольца начали появляться острия микронных размеров. При увеличении числа импульсов облучения площадь повреждения меди начинает увеличиваться.

В работах [10,6] показано, что исследование ресурса металлов по отношению к многократному импульсному нагреву актуально не только

для задач ускорительной техники, но и для разработки мощных СВЧ-приборов, а также что для решения указанной проблемы необходимы экспериментальные данные о тепловой усталости металлов (и сплавов), значительно отличающихся от меди по механическим свойствам. Получение таких данных возможно на стенде, созданном в ОИЯИ совместно с ИПФ РАН.

Авторы выражают благодарность Ю.К. Потребеникову за поддержку данной работы и В.В. Скадорову за полезные обсуждения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 06-02-1616418-а, 07-02-00617-а и 09-08-00743-а.

## Список литературы

- [1] *Wuensch W.* // High gradient Collaboration Workshop. Maryland. January 23–24 2008.
- [2] *Коваленко В.Ф.* // Теплофизические процессы и электровакуумные приборы. М.: Сов. радио, 1975. 216 с.
- [3] *Calatroni S., Nuepert H., Taborelli M.* // Proceeding of EPAC. 2004. P. 557–559.
- [4] *Heikkinen S.* // CLIC meeting February. 2008.
- [5] *Ptitzkau D.P., Siemann R.H.* // Phys. Rev. ST-AB. 2002. V. 5. P. 112002.
- [6] *Laurent L., Dolgashev V., Haase A.* et al. // CLIC Workshop. 2009. CERN, Geneva. A.A. <http://indico.cern.ch/contributionDisplay.py?contribId=35&sessionId=13&confId=30911>.
- [7] *Kaminsky A.K., Sarantsev V.P.* et al. // NIM. A. 1994. V. 341. P. 105–108.
- [8] *Danilov Y.Yu., Ginzburg N.S., Golubev I.I.* et al. // Strong Microwaves: sources and applications. IAP RAS. Nizhny Novgorod, 2009. V. 1. P. 230–234.
- [9] *Гинзбург Н.С., Каминский А.К., Кузиков С.В.* и др. // ЖТФ. 2006. Т. 76. В. 7. С. 69.
- [10] *Petelin M., Fix A.* // Report on Tenth International Vacuum Electronix Conference — IVEC-2009. 28–30 April 2009. Rome, Italy.