

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ИМПУЛЬСНОГО ВЧ-НАГРЕВА В НОРМАЛЬНО ПРОВОДЯЩИХ РЕЗОНАТОРАХ L-ДИАПАЗОНА

*В. Парамонов<sup>1</sup>, А. Скасырская<sup>1</sup>, К. Floettmann<sup>2</sup>, F. Stephan<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Институт ядерных исследований РАН, Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Deutsches Elektronen-Synchrotron, DESY, Hamburg, Zeuthen*

*E-mail: paramonov@inr.ru*

Исследуются эффекты импульсного ВЧ-нагрева в резонаторах, работающих на частоте 1300 МГц в сочетании сильных электромагнитных полей и длинного ВЧ-импульса. Это приводит к возрастанию температуры поверхности, тепловым деформациям и заметному изменению характеристик резонатора за время ВЧ-импульса. Приводятся результаты расчетов и сравнение с экспериментальными данными. Рассмотрены как общие закономерности, так и особенности эффекта на частотах 1300 МГц. Результаты работы необходимы как для более полного понимания работы резонаторов, так и для модификации систем ВЧ-управления.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Эффекты Импульсного ВЧ-нагрева (ЭИН) известны в технике сверхвысоких частот ( $> 3$  ГГц) и обусловлены необходимостью получения сильных электрических полей. Известно множество работ, например [1] и цитируемая в ней литература, посвященных исследованию ЭИН в СВЧ-диапазоне. В L-диапазоне ( $f \sim 1300$  МГц) максимально достижимые электрические и магнитные поля ниже. Вместе с меньшей величиной поверхностного сопротивления  $R_s$  это ведет к меньшим на порядок величинам импульсной плотности ВЧ-потерь  $P_d$ . Тем не менее, в резонаторах специального назначения, работающих в сочетании сильных полей и длинного ВЧ-импульса, проявляется ЭИН.

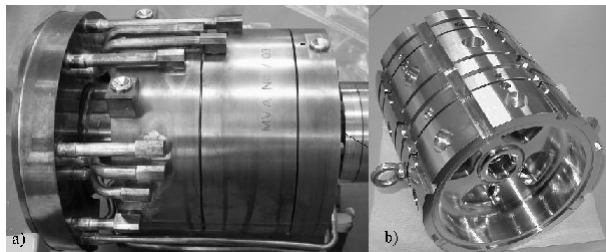


Рис.1. Резонатор ВЧ-фотоинжектора, DESY (а) и ячейки структуры CDS для бустерного резонатора установки PITZ, DESY (б)

В резонаторах ВЧ-фотоинжекторов DESY [2], Рис.1,а, работающих с напряженностью ВЧ-поля на фотокатодe до 60 МВ/м, максимальная напряженность магнитного поля достигает 100 кА/м, соответствующая плотности ВЧ-потерь  $P_d = 47$  кВт/см<sup>2</sup>. В ячейках ускоряющей структуры CDS [3,8], Рис.1,б, при темпе ускорения 14 МВ/м максимальная напряженность магнитного поля 55 кА/м развивается на торцах окон связи, соответствующая плотности ВЧ-потерь  $P_d = 14,2$  кВт/см<sup>2</sup>. Эти величины достаточны для проявления ЭИН, которые становятся наблюдаемыми в резонаторах L-диапазона при длинном (~1 мс) ВЧ-импульсе и выражаются в изменении характеристик резонаторов за время импульса.

## 2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛА

При рассматриваемых величинах  $P_d$  временной и пространственный масштабы процесса позволяют

применить для описания распространения тепла классическое уравнение теплопроводности [4]. Качественное представление о распределении температуры дает решение одномерной задачи нагрева плоскости. Рассмотрим односторонний нагрев бесконечной плоскости импульсом длительностью  $\tau$  и плотностью мощности ВЧ-потерь  $P_d = 14,2$  кВт/см<sup>2</sup>. Распределение температуры по нормали к поверхности плоскости показано на Рис.2.

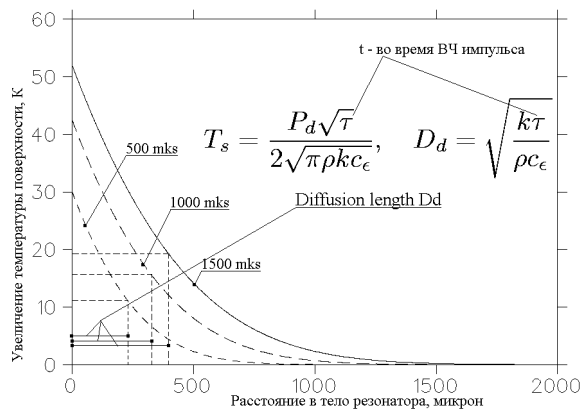


Рис.2. Распределение температуры в пластине в конце импульса с плотностью ВЧ-потерь  $P_d = 47$  кВт/см<sup>2</sup> и длительностью  $\tau = 500, 1000$  и  $1500$  мкс

Распределение температуры вблизи поверхности определяется двумя параметрами: ростом температуры на поверхности  $T_s$  за время импульса и длиной диффузии  $D_d$  – расстоянием, на котором рост температуры меньше в  $e$  раз по сравнению с ростом температуры на поверхности:

$$T_s = \frac{P_d \sqrt{k\tau}}{2\sqrt{\pi\rho k c_\epsilon}}, \quad D_d = \sqrt{\frac{k\tau}{\rho c_\epsilon}}, \quad (1)$$

где  $\rho, k, c_\epsilon$  – плотность, теплопроводность и теплоемкость материала резонатора, соответственно [5].

За время импульса  $\tau = 500, 1000$  и  $1500$  мкс температура поверхности возрастает на  $T_s = 30, 42,5$  и  $52$  С, соответственно. За это время тепло распространяется на расстояние  $D_d = 240, 340$  и  $415$  мкм, соответственно. Неоднородно нагретый слой толщиной  $\sim 2 D_d$  можно рассматривать как тонкую оболочку на поверхности резонатора. После окончания ВЧ-

импульса тепло продолжает распространяться в тело резонатора и температура поверхности быстро снижается. В моменты времени  $t = 2\tau$ ,  $T_s = 0,41 T_{smax}$ ;  $t = 10\tau$ ,  $T_s = 0,18 T_{smax}$ .

### 3. ПРОЦЕДУРА ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЕТОВ

Для исследования резонаторов в трехмерном приближении усовершенствована ранее разработанная процедура связанных расчетов распределений ВЧ-поля и ВЧ-потерь, распределений температуры и тепловых деформаций в теле резонатора, а также вызванных ими изменений характеристик резонатора [6], базирующаяся на программе ANSYS. Разработана специальная методика построения сетки конечных элементов, обеспечивающая точный расчет температур и тепловых деформаций как в тонком ( $\sim 2Dd$ ) поверхностном слое, так и в самом резонаторе. Решаются нестационарное уравнение теплопроводности и стационарное уравнение тепловых деформаций. Более подробно процедура рассмотрена в работе [7].

### 4. РОСТ ТЕМПЕРАТУРЫ В РЕЗОНАТОРАХ ВЧ-ФОТОИНЖЕКТОРОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВЧ-НАГРЕВЕ

DESY резонаторы ВЧ-фотоинжекторов [2] состоят из двух связанных ячеек (в некоторых работах – из 1,5), возбуждаемых на колебании  $E_{010}$ . Рабочим является колебание  $\pi$ -вида. Для обеспечения требований динамики пучка максимальные величины электрического поля на оси ячеек должны быть равны. В настоящее время работают и исследуются резонаторы N2, N3 и N4, различающиеся конструкцией каналов охлаждения. В режиме работы с напряженностью электрического поля на фотокатоде  $E_c = 60$  МВ/м импульсная мощность ВЧ-питания  $P_i$  превышает  $\sim 6,8$  МВт.

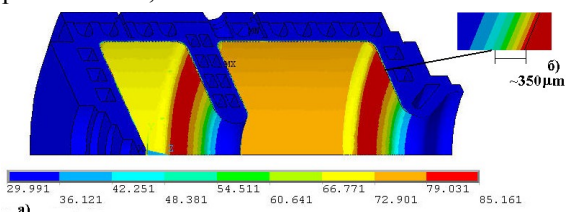


Рис.3. Расчетное распределение температуры на поверхности резонатора ВЧ-фотоинжектора N4 в конце ВЧ-импульса с  $P_i = 8,0$  МВт,  $\tau = 1000$  мкс

Расчетное распределение температуры на поверхности резонатора N4 в конце ВЧ-импульса,  $\tau = 1000$  мкс,  $P_i \sim 8,0$  МВт, показано на Рис.3,а при начальной температуре  $30^\circ\text{C}$ . Как видно из приведенного распределения, максимальный рост температуры поверхности составляет  $T_{smax} = 55^\circ\text{C}$ . Показанное на Рис.3,б распределение температуры в нагретом поверхностном слое очень хорошо совпадает с приведенным на Рис.2 графиком. Другие резонаторы фотоинжекторов при различных вариантах настройки исследованы в работе [7].

За время  $\tau \sim 1000$  мкс тепло проникает в тело резонатора на глубину  $Dd \sim 340$  мкм. Как правило, элементы системы охлаждения и другие расположены на большом расстоянии от поверхности резонатора.

Поэтому при длительности ВЧ-импульса  $\tau \sim 1000$  мкс конструкция резонатора не влияет на величину роста температуры поверхности во время импульса. Распределение температуры  $T_s$  практически совпадает с распределением плотности импульсных ВЧ-потерь  $P_d$  по поверхности резонатора и описывается соотношением (1). За время ВЧ-импульса в тонком нагретом слое запасается существенная тепловая энергия  $W_h = P_i \tau \sim 7$  кДж.

Импульсный рост температуры поверхности  $T_s$  острыми всплесками накладывается на среднее по времени распределение  $T_{av}$ , определяемое средней мощностью ВЧ-потерь  $P_{av}$ , конструкцией и режимом работы каналов охлаждения. При  $P_{av} \sim 68$  кВт, что соответствует  $P_i = 6,8$  МВт,  $\tau = 1000$  мкс и частоте повторения 10 Гц, значения  $T_{av}$  уже существенно выше входной температуры охлаждающей воды. На Рис.4 показаны расчетные распределения температуры на поверхности резонатора ВЧ-фотоинжектора N4 в начале (а) и конце (б) ВЧ-импульса с  $E_c = 60$  МВ/м,  $\tau = 1000$  мкс, частота повторения 10 Гц, входной температуре воды  $30^\circ\text{C}$ . Как видно из приведенных данных, максимальное значение температуры на поверхности резонатора в конце ВЧ-импульса превышает  $100^\circ\text{C}$  [7].

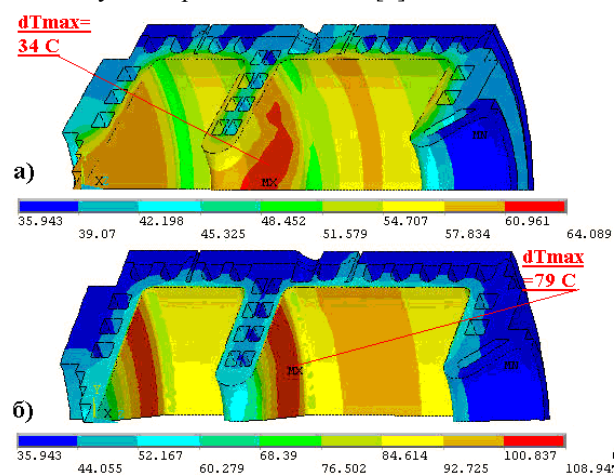


Рис.4. Расчетные распределения температуры на поверхности резонатора ВЧ-фотоинжектора N4 в начале (а) и конце (б) ВЧ-импульса с,  $\tau = 1000$  мкс, частота повторения 10 Гц

### 5. ИМПУЛЬСНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ

Причиной импульсных деформаций резонаторов является расширение импульсно нагреваемого поверхностного слоя. Из рассмотрения расширения тонкого неравномерно нагретого поверхностного слоя [7] следуют обобщения:

- величины деформирующих сил и вызванных ими деформаций пропорциональны количеству тепла, накопленному в нагретом поверхностном слое;
- при постоянной мощности ВЧ-питания величины деформаций и вызванного ими смещения частоты резонатора  $\delta f$  линейно зависят от времени в течение ВЧ-импульса, несмотря на существенно нелинейные временную и пространственную зависимости  $T_s$ .
- параметр  $S_f = \delta f / \tau / P_i$ , [кГц/мс/МВт] является характеристикой, зависящей от конструкции и крепе-

ния резонатора и позволяющей оценить сдвиг частоты резонатора при различных длительностях ВЧ-импульса и величинах входной мощности.

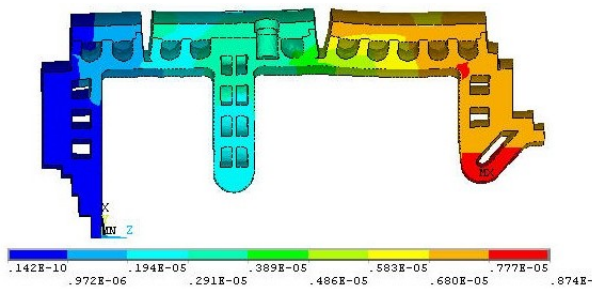


Рис.5. Расчетное распределение деформаций в резонаторе ВЧ-фотоинжектора N4 в конце ВЧ-импульса с  $P_i = 8,0$  МВт,  $\tau = 1000$  мкс

Расчитанное распределение деформаций в резонаторе ВЧ-фотоинжектора N4 в конце ВЧ-импульса с  $P_i = 8,0$  МВт,  $\tau = 1000$  мкс показано на Рис.5. Максимальное перемещение достигает 8,74 мкм. Расчетная величина  $S_f = -2,7$  [кГц/мс/МВт]. В резонаторах фотоинжектора импульсные деформации ведут к понижению частоты во время ВЧ-импульса.

Конструктивно резонаторы фотоинжекторов DESY состоят из трех частей, спаянных между собой. Наибольшего значения градиент деформаций достигает в местах спайки деталей резонатора. Импульсные деформации могут служить причиной циклической усталости материала резонатора.

Импульсные деформации в других резонаторах фотоинжекторов, изменения их конструкции и фиксации рассмотрены в работе [7]. Для всех рассмотренных вариантов расчетная величина  $S_f$  лежит в диапазоне от -4,0 до -2,0 [кГц/мс/МВт]. Существенно уменьшить импульсные деформации и вызываемый ими сдвиг частоты резонатора не представляется возможным.

При рассматриваемых параметрах ВЧ-импульса деформации являются упругими. Максимальное значение напряжений в теле резонатора в несколько раз ниже предела текучести меди. Энергия, запасенная в упругих деформациях, составляет несколько джоулей. Это на три порядка меньше тепловой энергии, запасаемой за время ВЧ-импульса в нагретом поверхностном слое и связанные термомеханические эффекты отсутствуют.

## 6. ЭИН В CDS-ЯЧЕЙКАХ РЕЗОНАТОРА-БУСТЕРА PITZ

Резонатор-бустер предназначен [3] для увеличения энергии электронов в установке Photo Injector Test Facility, DESY, Zeuthen и разработан на основе структуры с разрезными диафрагмами, реализующей значительную величину коэффициента связи (>10%) без ухудшения эффективного шунтового сопротивления  $Z_e$  [8]. При работе с максимальным темпом ускорения  $E_0T = 14,0$  МВ/м, напряженность магнитного поля 55 кА/м развивается на торцах окон связи. Распределения роста температуры  $T_s$  по поверхности и тепловых деформаций в теле ячейки показано на Рис.6,а,б, соответственно. Максималь-

ный рост температуры составляет 27°C. Максимальное перемещение  $\sim 1$  мкм имеют трубки дрейфа, что приводит к повышению частоты ячеек на 4 кГц за время ВЧ-импульса. Ячейки являются элементами периодической структуры и для вычисления деформаций необходимо применять итерационную процедуру для нахождения положения равновесия [6].

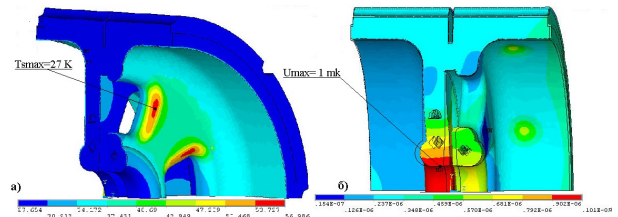


Рис.6. Распределение роста температуры (а) и деформаций (б) в ячейке в конце ВЧ-импульса с максимальным темпом ускорения 14,0 МВ/м,  $\tau = 1000$  мкс

По своим рабочим характеристикам, бустерный резонатор PITZ является полномасштабным прототипом на высоком уровне ВЧ-мощности для секций захвата предускорителя позитронов [9] в разрабатываемом проекте International Linear Collider (ILC). Эффекты импульсного ВЧ-нагрева для модификации структуры CDS [9] применительно к особенностям секций захвата рассмотрены в работе [7] в сравнении с ЭИН для более простой монопериодической структуры с малым коэффициентом связи и рабочим колебанием  $\pi$ -вида, предлагаемой для аналогичной цели.

## 7. ИЗМЕНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЗОНАТОРОВ

Изменение частоты ведет к изменению согласования резонатора с системой питания во время ВЧ-импульса. На Рис.7,а показана зависимость коэффициента отражения резонатора фотоинжектора N3 в течение ВЧ-импульса, определенной как отношение амплитуд прямой и отраженной волн в подводющем волноводе, в процессе обычной эксплуатации,  $P_i = 3,51$  МВт,  $\tau = 900$  мкс, что соответствует  $E_c = 42$  МВ/м.

Определенная [7] по результатам обработки сглаженной зависимости (Рис.7,б) величина изменения частоты резонатора за время ВЧ-импульса равна  $\delta f_c = -11,1$  кГц. Расчетная величина  $S_f = -3,0$  [кГц/мс/МВт] для резонатора N3 дает расчетное значение  $\delta f_c = -9,5$  кГц для данных параметров ВЧ-импульса. Сравнение показывает весьма удовлетворительное, для таких сложных расчетов, совпадение экспериментальных и расчетных результатов.

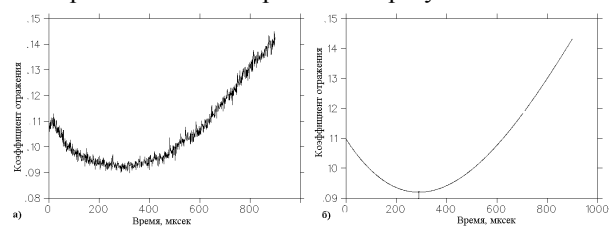


Рис.7. Изменение коэффициента отражения резонатора фотоинжектора N3 во время ВЧ-импульса

с  $P_i = 3,51 \text{ МВт}$ ,  $\tau = 900 \text{ мкс}$ . Экспериментальные (а) и сглаженные (б) данные

Изменение частоты  $\sim 10 \text{ кГц}$  сравнимо с полушириной резонансной кривой резонатора ( $\sim 65 \text{ кГц}$ ) и ведет к изменению как амплитуды, так и фазы поля в резонаторе во время ВЧ-импульса. Измеренное при данных параметрах импульса изменение фазы составляет  $12 \text{ градусов}$ .

Дополнительной причиной уменьшения амплитуды поля в резонаторе является уменьшение собственной добротности резонатора в течение ВЧ-импульса. Увеличение температуры поверхности ведет к понижению электрической проводимости материала в поверхностном слое и возрастанию поверхностного сопротивления  $R_s$ ,

$$R_s \sim \sqrt{1 + \alpha T_s}, E \sim H \sim \sqrt{\frac{P_i}{1 + \alpha T_s}}; Q_0 \sim \frac{Q_{0ref}}{\sqrt{1 + \alpha T_s}} \quad (2)$$

где  $\alpha \sim 0,0039 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . Наибольшее увеличение  $R_s$  происходит в местах наибольшего роста температуры поверхности, т.е. в местах наибольшей плотности ВЧ-потери  $P_d$ . В рассматриваемых резонаторах практически вся поступающая ВЧ-мощность рассеивается в виде потерь в проводящей поверхности. При постоянной входной ВЧ-мощности  $P_i$  рост поверхностного сопротивления  $R_s$  приводит к уменьшению напряженности магнитного поля на поверхности а, следовательно, напряженности электромагнитного поля во всем объеме резонатора. Одновременно ухудшается собственная добротность резонатора  $Q_0$  (2). Рассчитанное понижение добротности резонатора фотоинжектора равно  $\delta Q_0/Q_0 \sim 8,4\%$  при ВЧ-импульсе с  $P_i = 8,0 \text{ МВт}$ ,  $\tau = 1000 \text{ мкс}$ . Согласно (2), это соответствует понижению напряженности ВЧ-поля за время импульса на  $\delta E/E \sim 4,2\%$ . Для CDS-ячеек резонатора-бустера при максимальном темпе ускорения рассчитанное ухудшение добротности составляет  $\sim 1\%$  [7].

Для компенсации изменения как фазы, так и амплитуды ВЧ-поля в резонаторе во время ВЧ-импульса необходимо управление как фазой, так и амплитудой входной ВЧ-мощности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В нормально проводящих резонаторах, работающих в сочетании высоких электромагнитных полей и длинного ВЧ-импульса, эффекты импульсного

ВЧ-нагрева проявляются и на частотах  $\sim 1300 \text{ МГц}$ . Основной причиной появления ЭИН в данном диапазоне частот является большая длина ВЧ-импульса. При ограничении максимальной напряженности магнитного поля на поверхности резонатора величиной  $\sim 100 \text{ кА/м}$  разрушения материала резонатора или появления ВЧ-пробоев не происходит и ЭИН проявляются в изменении характеристик резонатора за время ВЧ-импульса. Для компенсации изменения как фазы, так и амплитуды поля в резонаторе за время ВЧ-импульса необходимо управление данными параметрами входной ВЧ-мощности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. D. Pritzkau. *RF Pulsed Heating. Ph.D. Thesis, SLAC-R-577, 2001.*
2. B. Dwersteg, K. Floettmann, J. Sekutowicz, Ch. Stolzenburg. RF gun design for TESLA VUV Free Electron Laser // *Nuclear Instruments and methods. 1997, A 393, p.93-95.*
3. V.V. Paramonov, F. Stephan et al. Design parameters of the normal conducting booster cavity for the PITZ-2 test stand // *Proc. 2004 Linac Conference. Lubec, 2004, p.204.*
4. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. *Теория упругости. Москва: «Наука», 1987.*
5. P.B. Wilson. Scaling linear colliders to 5 TeV and above // *In ITP Conf. on Future High Energy Colliders. Univ. of California. Santa Barbara, 1996.*
6. S.C. Joshi, V.V. Paramonov, A.K. Skasyrskaya. The complete 3D coupled RF-thermal-structural-RF analysis procedure // *Proc. 2002 Linac Conference. Korea, 2002, p.216.*
7. V.V. Paramonov, A.K. Skasyrskaya. Pulsed RF heating simulations in normal conducting L-band cavities // *TESLA-FEL report 2007-04, DESY. Hamburg, 2007.*
8. V.V. Paramonov. The Cut Disk Structure for High Energy Linacs // *Pros. 1997 PAC. Vancouver, 1998, v.3, p.2962.*
9. V.V. Paramonov et al. The PITZ booster cavity - a prototype for the ILC positron injector cavities // *Pros. 2005 PAC. Oregon, USA, 2005, p.1030.*
10. J.W. Wang et al. Studies of Room Temperature Structures for the ILC Positron Source // *Pros. 2005 PAC. Oregon, USA, 2005, p.2827.*

## PULSED RF HEATING EFFECTS INVESTIGATION IN NORMAL CONDUCTING L-BAND CAVITIES

V. Paramonov, A. Skasyrskaja, K. Floettmann, F. Stephan

RF pulsed heating effects are considered for cavities, operating with frequency 1300 MHz in combination of strong electromagnetic fields and long RF pulse. It leads to significant cavity surface temperature rise, cavity shape deformation and parameters change during RF pulse. Results of numerical simulations are presented and compared with experimental data. Results of this work are input both for improved cavity operation description and for RF control system modification.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВ ІМПУЛЬСНОГО ВЧ-НАГРІВАННЯ В НОРМАЛЬНО ПРОВІДНИХ РЕЗОНАТОРАХ L-ДІАПАЗОНУ

В. Парамонов, А. Скасірська, К. Флоеттманн, Ф. Стефан

Досліджуються ефекти імпульсного ВЧ-нагрівання в резонаторах, що працюють на частоті 1300 МГц у поєднанні сильних електромагнітних полів і довгого ВЧ-імпульсу. Це приводить до зростання температури поверхні, тепловим деформаціям і помітній зміні характеристик резонатора за час ВЧ-імпульсу. Наведено результати розрахунків і порівняння з експериментальними даними. Розглянуті як загальні закономірності, так і особливості ефекту на частотах 1300 МГц. Результати роботи необхідні як для більше повного розуміння роботи резонаторів, так і для модифікації систем ВЧ-керування.