

Ю. С. Ковшов¹, С. С. Пономаренко¹, С. А. Кишко¹, А. А. Лихачев¹, С. А. Власенко^{1,2},
В. В. Завертанный¹, Э. М. Хуторян³, А. Н. Кулешов¹

¹Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины
12, ул. Акад. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: jeanalexkh@gmail.com

²Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина
4, пл. Свободы, Харьков, 61077, Украина

³Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui
Bunkyo 3-9-1, Fukui-shi, Fukui-ken, 910-8507, Japan

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ОМИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ В КЛИНОТРОНАХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ

При создании электронно-вакуумных приборов актуальной задачей является проведение достоверных расчетов их рабочих характеристик. Определение величин высокочастотных потерь и их учет в моделировании приборов является одной из важных проблем. В данной работе предлагается провести исследование шероховатости поверхности замедляющих систем клинотронов, изготавливаемых электроэрозионным способом, методами оптической микроскопии, а также выполнить моделирование температурной нагрузки на элементы таких замедляющих систем для 2-мм, 0,75-мм и 0,33-мм диапазонов волн. В результате проведенных исследований оценена величина высокочастотных омических потерь замедленной волны с учетом шероховатости поверхности реальных замедляющих систем. Получен градиент температуры, как по высоте ламели, так и по основанию гребенки. Определена степень воздействия электронного потока, осаждаемого на замедляющей системе, на величину электропроводности ее поверхностного слоя. С учетом определенных значений высокочастотных омических потерь проведено моделирование выходной мощности клинотронов в зависимости от величины рабочего тока электронного пучка при фиксированной рабочей частоте. В процессе сравнения экспериментальных рабочих характеристик клинотронов, работающих на частотах 136 и 301 ГГц, с результатами моделирования показано качественное и количественное соответствие между ними. Ил. 8. Табл. 1. Библиогр.: 35 назв.

Ключевые слова: источники ТГц-излучения, клинотрон, высокочастотные омические потери, шероховатость поверхности, электропроводность, электронно-волновое взаимодействие.

Электромагнитные волны терагерцевого диапазона частот обладают рядом особенностей, в числе которых неразрушающее воздействие на облучаемый объект, что позволяют применять данное излучение для исследования материалов, химических соединений и биологических объектов [1–3]. Так, в случае спектроскопии ядерного магнитного резонанса с применением техники динамической поляризации ядер необходимы компактные источники ТГц-излучения с уровнем выходной мощности 1 Вт на частоте 200 ГГц и более 200 мВт на частоте 600 ГГц [4, 5]. К этим источникам выдвигаются также требования по стабильности частоты и выходной мощности излучения в течение длительного промежутка времени [6, 7]. С этой точки зрения наиболее перспективными генераторами для коммерческих приложений в терагерцевом диапазоне являются клинотроны [8–10].

Основой клинотронов – генераторов с длительным взаимодействием, работающих на излучении Вавилова–Черенкова, является замедляющая система. На этапе конструирования основными параметрами, которые определяются для данной системы, является дисперсионная зависимость, величина сопротивления связи, а также значение высокочастотных омических потерь.

В данной статье проведен анализ эффектов, приводящих к росту высокочастотных омических потерь в клинотронах ТГц-диапазона частот, определена степень их влияния на уровень

выходной мощности генераторов, а также выполнено сравнение результатов моделирования с экспериментом. Величина потерь определяется исходя из значений мощности, переносимой волной через сечение электродинамической системы, а также мощности тепловых потерь, связанных с протеканием наведенных токов в металлических стенках. Моделирование рабочих параметров клинотронов производится путем решения уравнений возбуждения лампы обратной волны (ЛОВ) с наклонным электронным потоком аналогично работе [10].

1. Влияние наноразмерных неоднородностей на величину высокочастотных омических потерь. Распространение поверхностной волны вдоль замедляющей системы сопровождается протеканием высокочастотных токов в материале системы. Исходя из конечной величины проводимости материала, происходит нагрев системы, что является результатом ослабления распространяющейся волны, характеризуемого высокочастотными омическими потерями.

Величина потерь сильно зависит от шероховатости поверхности замедляющей системы. При превышении величины скин-слоя высотой неоднородностей поверхности наблюдается увеличение длины протекания высокочастотных токов, что отражается в снижении электропроводности материала и приводит к дополнительному тепловыделению. Значение электропроводности металла в зависимости от шероховатости поверх-

ности для различных частотных диапазонов может быть оценено по эмпирической формуле Хаммерштеда [11]:

$$\sigma(R_a) = \frac{\sigma_0}{\left\{1 + 2 \arctan \left[\frac{4(R_a/\delta)^2}{\pi} \right] \right\}^2}, \quad (1)$$

где δ – глубина скин-слоя; R_a – среднее арифметическое величины неоднородностей поверхности (шероховатости). Величины удельной проводимости меди для различных параметров шероховатости поверхности в диапазоне частот 50...950 ГГц приведены на рис. 1 для случая $\sigma_0 = 5,7 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Из графиков на рисунке следует, что в ТГц-диапазоне частот с увеличением шероховатости поверхности более 0,03...0,06 мкм происходит резкое снижение электропроводности, а при величинах более 0,96 мкм проводимость меди $1,44 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$.

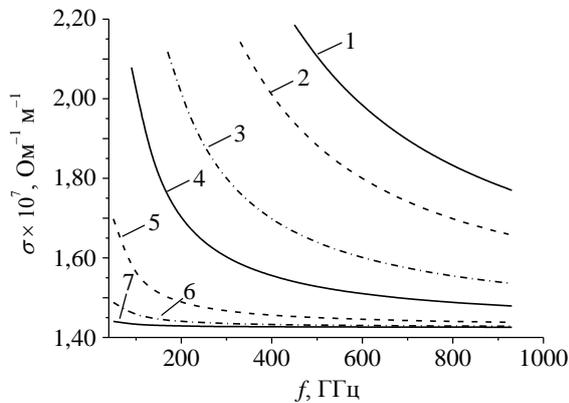


Рис. 1. Удельная проводимость меди как функция частоты для некоторых значений шероховатости поверхности R_a : 1 – 0,1 мкм; 2 – 0,12 мкм; 3 – 0,17 мкм; 4 – 0,24 мкм; 5 – 0,48 мкм; 6 – 0,96 мкм, 7 – 1,92 мкм

В клинотронах применяются широкие гребенчатые замедляющие системы, изготавливаемые электроэрозионным (электроискровым) методом. При использовании соответствующих материалов данная методика позволяет создавать замедляющие системы с шириной щели s не более 0,02 мм [12]. Однако в процессе изготовления поверхность системы оказывается шероховатой и загрязненной продуктами разряда электрода. Это требует применения дальнейшей химической очистки и отжига в водороде [13]. Для более легкого удаления продуктов разряда поверхность замедляющей системы омывается дистиллированной водой в процессе электроискровой обработки.

Оценка величины шероховатости поверхности замедляющих систем клинотронов была проведена методом измерения профиля поверхности с применением микроинтерферометра Линника МИИ-4 [14, 15]. Для этого были определены величины среднего арифметического от-

клонения точек действительного профиля от средней линии R_a , а также средней разности высот наивысших и наименьших точек R_z . Измерения проведены непосредственно на поверхностях ламелей для нескольких образцов замедляющих систем после прохождения химической обработки (рис. 2, а–в). Для большего снижения шероховатости обычно применяют электролитическую и химическую полировку [16], что позволяет достигнуть 9–10 классов чистоты.

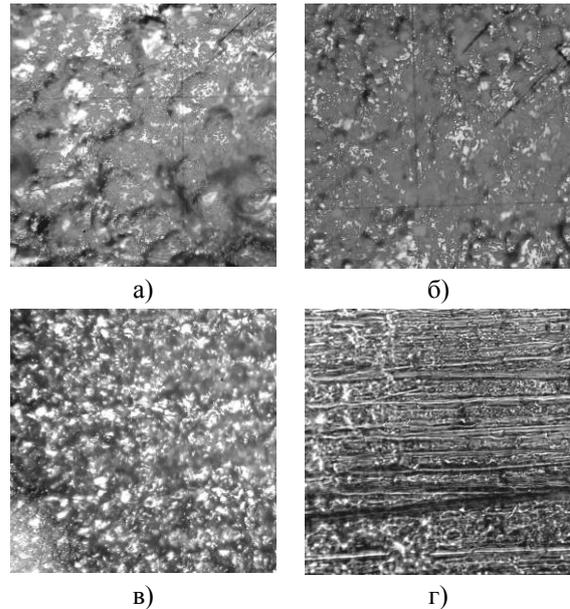


Рис. 2. Оптическое изображение исследуемых поверхностей: а) $R_a = 5,03 \text{ мкм}$, $R_z = 24,74 \text{ мкм}$; б) $R_a = 3,58 \text{ мкм}$, $R_z = 20,52 \text{ мкм}$; в) $R_a = 2,87 \text{ мкм}$, $R_z = 12,77 \text{ мкм}$; г) $R_a = 0,206 \text{ мкм}$, $R_z = 0,978 \text{ мкм}$

Для сравнения на рис. 2, г приведена поверхность медной фольги, используемой для изготовления мелкоструктурных систем по методу, исключающему механическую обработку рабочих поверхностей резонаторов замедляющей системы [17, 18]. Высокую чистоту поверхностей обеспечивает также метод плавающей накатки. Однако данный подход реализован на клинотронах непрерывного действия только для волн диапазона более 2 мм [19, 20]. Необходимо отметить, что при изготовлении замедляющих систем клинотронов диапазона волн короче 2 мм медную заготовку подвергают предварительному упрочнению методом пластической деформации (нагартовка). Нагартовка способствует повышению прочности и снижению пластичности металла, что особенно важно при его последующей обработке [13].

Современные методы изготовления мелкоструктурных систем, такие как *X-Ray*, *UV-LIGA* и *DRIE*, обеспечивают чистоту поверхности 0,05...0,4 мкм [21, 22]. Их общей особенностью является процесс электроосаждения меди на спе-

циальную форму, соответствующую изготавливаемой структуре. При этом в растворе электролита присутствуют примеси, которые связываются с атомами растущей кристаллической структуры меди. В случае осаждения электронного потока на замедляющую систему во время работы электронного прибора ионы, вырываемые из металла, будут приводить к ионной бомбардировке катода, снижению его эмиссии и срока службы. Таким образом, при создании электродинамической системы клинотрона использование перечисленных методик может встретить соответствующие технологические трудности. В настоящее время *LIGA* и *DRIE* используются при создании ЛОВ и ламп бегущей волны (ЛБВ) со встречно-штыревыми системами и системами типа «изогнутый волновод» [12].

Моделирование величин удельных омических потерь с учетом шероховатости поверхности гребенок производилось аналогично работе [23]. Параметры исследуемых замедляющих систем клинотронов 2-мм, 0,75-мм и 0,33-мм диапазонов волн приведены в таблице, а результаты проведенного моделирования – на рис. 3. Также на данном рисунке приведены величины сопротивления связи R_c .

Параметры замедляющих систем

Диапазон волн, мм	Период p , мм	Высота ламели h , мм
2,0	0,2	0,475
0,75	0,08	0,1
0,33	0,03	0,05

Анализ полученных результатов показывает, что эквивалентные уровни потерь величиной 0,5 дБ/мм достигаются при фазовом сдвиге $0,389\pi$ на частоте 130 ГГц, $0,322\pi$ на частоте 470 ГГц и $0,163\pi$ на частоте 734 ГГц. При этом оптимальный сдвиг фазы в 2-мм диапазоне составляет порядка $0,4\pi$, а при длине волны 0,8 мм – $0,2...0,3\pi$ [9, 20]. Результаты моделирования согласуются с экспериментальными данными, представленными в [18, 20] для 2-мм диапазона волн. Для волн порядка $\lambda = 0,33$ мм полученные значения потерь сравнивались с результатами моделирования аналогичных замедляющих систем, проведенного при помощи кода *CST MWS* [24]. Таким образом, было получено соответствие результатов и в этом диапазоне.

В тоже время следует отметить, что фактические потери поверхностной волны при распространении вдоль замедляющей системы могут быть определены лишь экспериментальным путем в «холодном» режиме [18, 25]. Кроме того, чистота обработки поверхностей резонаторов гребенки сильно зависит от выбранного режима

искрового разряда, что требует исследования образцов обработанной поверхности индивидуально в каждом конкретном случае.

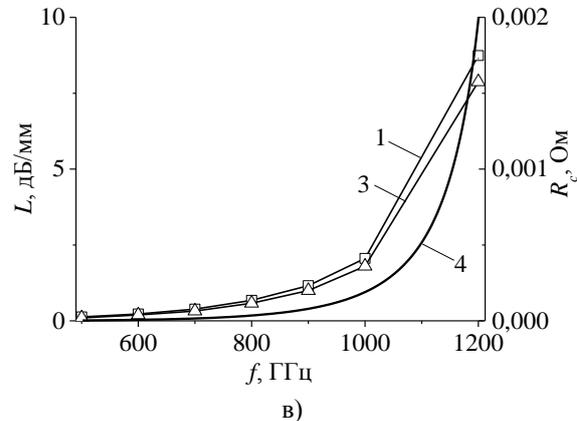
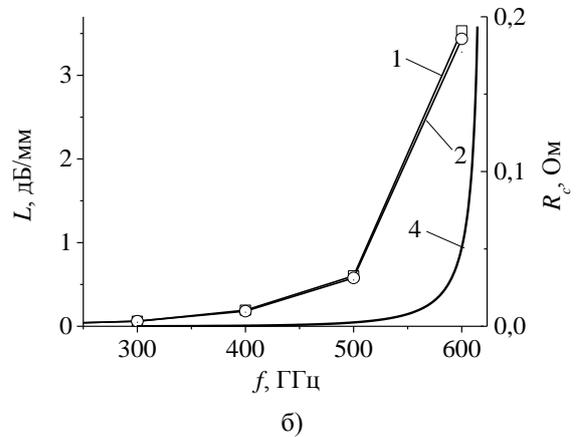
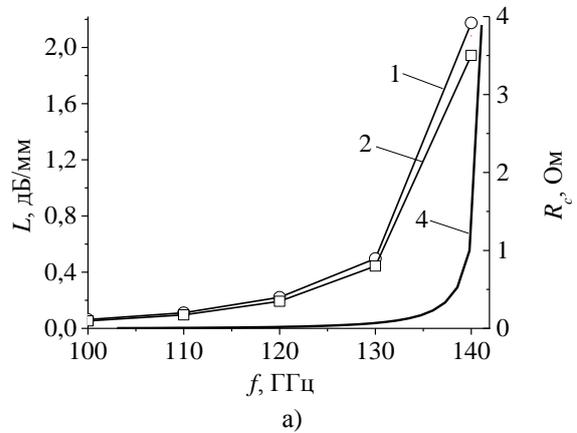


Рис. 3. Удельные омические потери как функция частоты с учетом шероховатости поверхности (1 – $R_a = 3$ мкм; 2 – $R_a = 0,25$ мкм; 3 – $R_a = 0,09$ мкм; 4 – сопротивление связи R_c): а) $\lambda = 2,0$ мм; б) $\lambda = 0,75$ мм; в) $\lambda = 0,33$ мм

2. Температурная нагрузка на элементы замедляющей системы. В клинотронном режиме работы электронный поток осаждается на поверхности замедляющей системы, которая таким образом играет роль коллектора. Прикладываемая мощность электронного потока может достигать нескольких сотен ватт, в результате чего поверх-

ность замедляющей системы нагревается, что приводит к уменьшению электропроводности материала гребенки. Проводимость металла как функция температуры определяется законом Видемана–Франца [26]:

$$\sigma_0(T) = 3e^2 K / T\pi^2 k^2, \quad (2)$$

где K – коэффициент теплопроводности меди; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Для оценки величины температур, которых может достигать ламель замедляющей системы, было проведено моделирование двумерного стационарного уравнения теплопроводности [27]:

$$\chi(\partial^2 T / \partial x^2 + \partial^2 T / \partial y^2) + Q(x, y) = 0, \quad (3)$$

где χ – коэффициент теплопроводности. Моделирование производилось для одного периода замедляющей системы в предположении равномерного распределения мощности электронного потока по ее длине, а также равенства ширины пучка и системы. Тепловой поток в основании гребенки вдоль оси Y полагаем равным 0, что соответствует случаю расположения моделируемого участка в середине системы. Температура основания T_c соответствует температуре охлаждающей жидкости. В результате граничные условия имеют следующий вид:

$$T(0, y)/dx = 0; \quad T(p, y)/dx = 0; \quad T(x, 0) = T_c.$$

Кроме того, предполагалось, что ламель окружена средой с нулевым коэффициентом теплопроводности, а теплопроводность материала гребенки не зависит от изменения температуры. Функция точечных источников тепла задавалась на верхней кромке ламели в следующем виде:

$$Q(x, y) = IU / Nw_{gr}s\Delta y, \quad (4)$$

где I – ток пучка; U – ускоряющее напряжение; N – число периодов; w_c – ширина замедляющей системы; Δy – величина шага по оси Y .

На рис. 4 представлен пример распределения температуры для одного периода замедляющей системы 2-мм диапазона волн. Данная гребенка обладает следующими параметрами: период $p = 0,2$ мм, высота ламели $h = 0,45$ мм, толщина ламели $s = 0,1$ мм. Температура основания T_c предполагается равной 333 К, а плотность мощности электронного пучка составляет $3,06$ кВт/см².

На рис. 5 приведено сравнение результатов моделирования уравнений теплопроводности в двумерном (знаки \circ , \square и Δ) и одномерном приближении (линии: сплошная, штриховая и штрихпунктир). Градиент температуры по высоте ламели составляет 80 К, а по высоте основания 50 К, что по порядку значений соответствует результатам, приведенным в [18, 20]. Также на рис. 5 приведены значения проводимости меди σ_0 в соответствующем диапазоне температур. С учетом

приведенных значений, как показывают результаты расчетов, величина омических потерь возрастает в среднем в 1,3 раза по сравнению с результатами, приведенными на рис. 3.

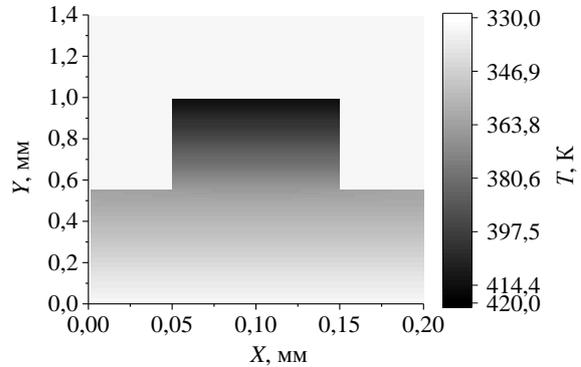


Рис. 4. Распределение температуры для одного периода замедляющей системы 2-мм диапазона волн

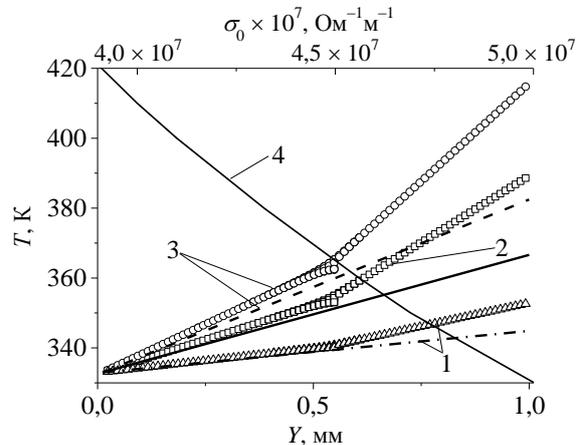


Рис. 5. Градиент температуры по высоте гребенки: 1 – 1,08 кВт/см²; 2 – 3,06 кВт/см²; 3 – 4,51 кВт/см²; 4 – проводимость меди как функция температуры

2. Моделирование параметров клинотронов с учетом высокочастотных омических потерь. Взаимодействие электронного потока с ВЧ-полем будем рассматривать при совместном решении уравнения возбуждения колебаний в ЛОВ с наклонным электронным потоком (клинотрон) и трехмерных уравнений движения электронного потока, фокусируемого однородным магнитным полем конечной величины. Уравнения решаются конечно-разностным методом с использованием M крупных частиц аналогично [10], при этом не производится учет отражений от концов замедляющей системы. Кроме того, проведем сравнение с результатами моделирования дисперсионного уравнения ЛОВ [28, 29]:

$$(\delta^2 + q)[i\delta - id - b] = -(1 + Cb)^2, \quad (5)$$

где δ – нормированная постоянная распространения; q – параметр пространственного заряда; C – параметр усиления, введенный Пирсом;

d – параметр потерь; b – параметр несинхронности. В одномерном случае при анализе эффективности электронно-волнового взаимодействия используем подход к определению электронного КПД и выходной мощности, изложенный в [30]. На рис. 6 приведены результаты моделирования выходной мощности клинотрона 2-мм диапазона волн в зависимости от тока пучка при фиксированной частоте генерации. Расчеты выполнены как с учетом изменения проводимости замедляющей системы при увеличении тока (кривая 4), так и при фиксированном значении потерь (кривые 2 и 3). Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными, полученными для нескольких десятков генераторов, обладающих идентичными замедляющими системами. В данном случае средний период гребенки составляет $p = 0,196$ мм, высота ламели $h = 0,453$ мм, а длина замедляющей системы $L_c = 15,22$ мм. Стандартное отклонение S перечисленных параметров для рассматриваемого набора генераторов не превышает 2,8 %. Аналогичный случай рассматривается для генераторов 0,95-мм диапазона (рис. 7), при этом средний период гребенки составляет $p = 0,118$ мм, высота ламели $h = 0,168$ мм, длина замедляющей системы $L_c = 17,02$ мм, а стандартное отклонение $S \approx 8$ %.

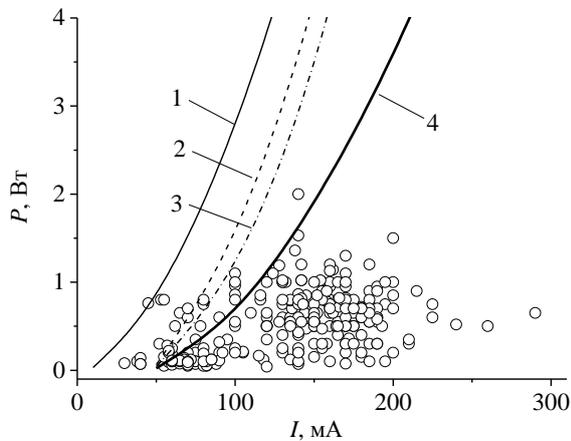


Рис. 6. Зависимость выходной мощности P_0 клинотрона от тока I_0 в пучке при $f_0 = 136,41$ ГГц, $S = 0,45$ % (○ – эксперимент; 1 – одномерная модель; двумерная модель: 2 – $B_0 = 1$ Тл, 3 – $B_0 = 0,5$ Тл, 4 – $B_0 = 0,5$ Тл)

На графиках видно влияние величины фокусирующего магнитного поля B_0 на выходную мощность при росте пространственного заряда в пучке. При этом на частоте 300 ГГц разница между уровнями мощности, определенной в двумерной модели и одномерном приближении, превосходит аналогичное значение для частоты 136 ГГц. Таким образом, наблюдается эффект уменьшения локализации высокочастотного поля вблизи поверхности гребенки.

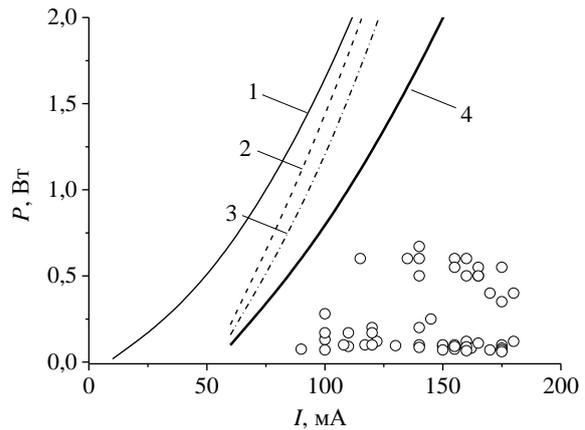


Рис. 7. Зависимость выходной мощности P_0 клинотрона от тока I_0 в пучке при $f_0 = 301,52$ ГГц, $S = 0,91$ % (○ – эксперимент; 1 – одномерная модель; двумерная модель: 2 – $B_0 = 1$ Тл, 3 – $B_0 = 0,5$ Тл, 4 – $B_0 = 0,5$ Тл)

Снижение проводимости и, следовательно, рост потерь с увеличением тока пучка приводят к существенному снижению расчетной выходной мощности. В тоже время достигается соответствие таких результатов с экспериментом при малой величине пространственного заряда. При дальнейшем увеличении пространственного заряда отличие между значениями мощности возрастает, что может объясняться влиянием ряда эффектов. Так, в двумерной модели производится учет только поперечной компоненты поля пространственного заряда, что допускается при значительной ширине пучка по отношению к его толщине [31]. Кроме того, при транспортировке электронного потока в магнитном поле имеют место диакотронные колебания [32], влияние которых на эффективность электронно-волнового взаимодействия [33] возрастает при уменьшении локализации ВЧ-поля.

С укорочением длины волны элементы замедляющей системы становятся чрезвычайно малы. В результате при финальной химической обработке ее поверхностей труднее в полной мере удалить продукты эрозии электродов, образующихся при протекании искрового разряда. Таким образом, происходит еще большее снижение проводимости поверхностного слоя материала замедляющей системы, учет которого в полной мере пока произвести невозможно. Это также может объяснять несколько завышенные расчетные значения мощности колебаний по сравнению с экспериментом. Кроме того, имеет место влияние разброса скоростей электронов, неоднородности электронного потока и магнитного фокусирующего поля, а также взаимодействия мод ВЧ-поля, учет которых на данном этапе не производился.

Графики зависимости приведенного электронного КПД клинотронов от тока пучка

изображены на рис. 8. Как следует из графиков, данные зависимости соответствуют значениям η_0/C , достигаемы реальными приборами.

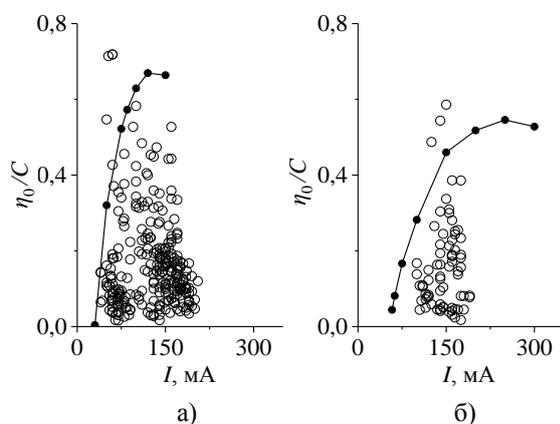


Рис. 8. Зависимость приведенного КПД клинотронов 2-мм (а) и 0,95-мм (б) диапазонов от тока I_0 в пучке (● – моделирование, ○ – эксперимент)

Экспериментальные точки, находящиеся выше кривых, могут объясняться как резонансными свойствами электродинамической системы, учет которых в данной модели произведен не был, так и использованием расчетных значений сопротивления связи при определении параметра C аналогично [34].

Выводы. Экспериментальный анализ шероховатости поверхности замедляющих систем клинотронов, изготавливаемых методом электроэрозионной обработки, позволил установить, что возрастание потерь в клинотронах частотных диапазонов выше 140 ГГц обусловлено существенным превышением параметра шероховатости R_a над глубиной скин-слоя. Учет шероховатости поверхностей при моделировании омических потерь показывает, что улучшение чистоты поверхности до 10 раз (по сравнению с реализуемыми значениями) приводит к незначительному снижению потерь (до 5...6 %) при рабочих частотах менее 400...500 ГГц. По результатам моделирования двумерного стационарного уравнения теплопроводности установлено, что учет температурной нагрузки на замедляющую систему клинотрона приводит к возрастанию потерь в среднем на 14...20 %. Моделирование клинотронов 2-мм и 0,95-мм диапазонов волн с учетом потерь, обусловленных шероховатостью поверхности и температурной нагрузки на замедляющую систему, показывает снижение выходной мощности до 50 % по сравнению с учетом потерь, вызванных лишь шероховатостью. При первенсах менее $0,6 \text{ мкА/В}^{3/2}$, что соответствует токам пучка менее 100 мА в рабочем диапазоне ускоряющих напряжений клинотронов 2-мм диапазона волн, достигается количественное соответствие результатов моде-

лирования и соответствующих экспериментальных данных. Таким образом, изложенная методика учета ВЧ омических потерь может быть использована при моделировании параметров клинотронов в субТГц- и ТГц-диапазонах. В тоже время уменьшение размеров элементов замедляющей системы осложняет ее технологическую очистку перед сборкой генератора, что приводит к появлению дополнительных омических потерь. Таким образом, актуальным является создание электродинамических систем, способных поддерживать колебания, менее чувствительных к рассмотренным вносимым потерям, например как в [35].

Авторы выражают благодарность А. Ф. Забродскому, С. Н. Терехину и Т. В. Кудиновой за полезные замечания при обсуждении технических и технологических вопросов. В дальнейшем планируется произвести учет отражений от концов замедляющей системы, а также связи резонатора клинотрона с ВЧ-нагрузкой.

Библиографический список

- Idehara T., Kosuga K., Agusu L., Ikeda R., Ogawa I., Saito T., Matsuki Y., Ueda K., Fujiwara T. Continuously frequency tunable high power sub-THz radiation source – gyrotron FU CW VI for 600 MHz DNP–NMR spectroscopy. *J. Infrared Millimeter Terahz Waves*. 2010. vol. 31, N 7. P. 775–790.
- Yamazaki T., Miyazaki A., Suehara T., Namba T., Asai S., Kobayashi T., Saito H., Ogawa I., Idehara T. and Sabchevski S. Direct observation of the hyperfine transition of ground-state positronium. *Phys. Rev. Lett.* 2012. vol. 108, Iss. 25. P. 253401-1–253401-5.
- Вертий А. А., Карнаухов И. М., Шестопалов В. П. Поляризация атомных ядер миллиметровыми волнами. Киев: Наук. думка, 1990. 232 с.
- Rosaya M., Blank M., Engelke F. Instrumentation for solid-state dynamic nuclear polarization with magic angle spinning NMR. *Journal of Magnetic Resonance*. 2016. vol. 264. P. 88–98.
- Matsuki Y., Idehara T., Fukazawa J., Fujiwara T. Advanced instrumentation for DNP-enhanced MAS NMR for higher magnetic fields and lower temperatures. *Journal of Magnetic Resonance*. 2016. vol. 264. P. 107–115.
- Khutoryan E., Idehara T., Kuleshov A., Ueda K. Stabilization of Gyrotron Output Power by Use of PID Feedback Control of Anode Voltage. *The Physical Society of Japan*. 2015. P. 552.
- Khutoryan E. M., Idehara T., Kuleshov A. N., Tatematsu Y., Yamaguchi Y., Matsuki Y., Fujiwara T. Stabilization of Gyrotron Frequency by PID Feedback Control on the Acceleration Voltage. *J Infrared Milli Terahz Waves*. 2015. vol. 36, Iss. 12. P. 1157–1163. DOI:10.1007/s10762-015-0212-2
- Лысенко Е. Е., Паньков С. В., Пишко О. Ф., Чумак В. Г., Чурилова С. А. Разработка клинотронов непрерывного действия для диапазона 400...500 ГГц. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2010. Т. 15, № 11. С. 63–71.
- Ponomarenko S. S., Kishko S. A., Khutoryan E. M., Kuleshov A. N., Zavertanniy V. V., Lopatin I. V., Yefimov B. P. 400 GHz Continuous-wave clinotron oscillator. *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2013. vol. 41, N 1. P. 82–86.
- Khutoryan E., Sattarov M., Lukin K. A., Oh-Joon K., Sun-Hong M., Bhattacharya R., In-Keun B., Seontae K., Minwoo Yi, Joonho S., Gun-Sik P. Theory of Multimode Resonant Backward-Wave Oscillator With an Inclined Electron Beam. *IEEE Trans. Elec. Dev.* 2015. vol. 62, N 5. P. 1628–1634.

11. Kirley M. P., Booske J. H. The physics of conductivity at terahertz frequencies. *Proc. IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC): conf. proc. Beijing, 2015*. DOI: 10.1109/IVEC.2015.7223746
12. Booske J. H., Dobbs R. J., Joye C. D., Kory C. L., Neil G. R., Gun-Sik Park, Park J., Temkin R. J. Vacuum electronic high power terahertz sources. *Trans. Terahertz Sci. and Tech.* 2011. vol. 1, N 1. P. 54–75.
13. Голант М. Б., Маклаков А. А., Щур М. Б. Изготовление резонаторов и замедляющих систем. Под ред. Н. Д. Девяткова. Москва: Сов. радио, 1969. 408 с.
14. Хватов Б. Н. Выполнение измерений параметров шероховатости поверхности по ГОСТ 2789–73 при помощи приборов профильного метода: лабораторная работа. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006. 24 с.
15. Сафонова Т. Н. Физика. Ч. 3. Волновая и квантовая оптика: методические указания по выполнению лабораторных работ. Ливны: Изд-во ОрелГТУ, 2008. 72 с.
16. Awad A. M., Abdel Ghany N. A., Dahy T. M. Removal of tarnishing and roughness of copper surface by electropolishing treatment. *Applied Surface Science.* 2010. N 256. P. 4370–4375.
17. Куц В. С., Голант М. Б., Задворнов М. Г. Метод изготовления замедляющих систем для ЛОВ субмиллиметрового диапазона волн. *Вопросы спецрадиоэлектроники. Сер. Электроника СВЧ.* 1964. Т. 7. С. 121–125.
18. Куц В. С. Разработка мелкоструктурных замедляющих систем для СВЧ генераторов субмиллиметрового диапазона волн и их исследование: дис. канд. техн. наук; Ин-т радиофизики и электроники АН УССР. Харьков, 1971. 172 с.
19. Левин Г. Я., Бородкин А. И., Ефимов Б. П., Васюренко А. П., Руденский Г. Я., Ендальцев Л. И. Изготовление гребенчатых замедляющих систем субмиллиметрового и миллиметрового диапазонов радиоволн при помощи плавающей накатки. *Радиофизика и электроника: Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины.* Харьков, 1962. Т. 10. С. 223–226.
20. Левин Г. Я., Бородкин А. И., Кириченко А. Я., Чурилова С. А., Усиков А. Я. Клиноotron. Киев: Наук. думка, 1992. 157 с.
21. Gamzina D., Li H., Himes L., Barchfeld R., Popovic B., Pan P., Letizia R., Mineo M., Feng J., Paoloni C., Luhmann N. C. Nanoscale Surface Roughness Effects on THz Vacuum Electron Device Performance. *IEEE Trans. on Nanotechnology.* 2016. vol. 15, N 1. P. 85–93.
22. Bhattacharjee S., Booske J. H., Kory C. L., Van der Weide D. W., Limbach S., Gallagher S., Welter J. D., Lopez M. R., Gildenbach R. M., Ives R. L., Read M. E., Divan R., Mancini D. C. Folded Waveguide Traveling-Wave Tube Sources for Terahertz Radiation. *IEEE Trans. on Plasma Sci.* 2004. vol. 32, N 3. P. 1002–1013.
23. Ponomarenko S. S., Kovshov Y. S., Kishko S. A., Novikova-Korotun Y. S., Khutoryan E. M., Kuleshov A. N. Development of compact CW clinotrons for DNP-NMR spectroscopy. *Proc. 9th Int. Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016).* Kharkiv, 2016. P. 1–4.
24. Mineo M., Paoloni C. Comparison of THz Backward Wave Oscillators Based on Corrugated Waveguides. *Progress In Electromagnetics Research Letters.* 2012. vol. 30. P. 163–171. doi:10.2528/PIERL12013107
25. Joe J., Louis L. J., Scharer J. E., Booske J. H. and Basten M. A. Experimental and theoretical investigations of a rectangular grating structure for low-voltage traveling wave tube amplifiers. *Phys. Plasmas.* 1997. vol. 4, N 7. P. 2707–2715.
26. Путилов К. А. Курс физики: в 3 т. Т. 2. Учение об электричестве: учеб. пособие. Москва: Гостехтеориздат, 1962. 583 с.
27. Сивухин Д. В. Общий курс физики: в 5 т. Т. 3. Термодинамика и молекулярная физика. Москва: Наука, 1975. 552 с.
28. Шевчик В. Н., Трубецков Д. И. Электроника ламп обратной волны. Саратов: Саратовский ун-т, 1975. 195 с.
29. Tsimring Sh. E. Electron beams and microwave vacuum electronics. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2007. 599 с.
30. Grow R. W., Watkins D. A. Backward-Wave Oscillator Efficiency. *Proceedings of the IRE.* 1955. vol. 43, N 7. P. 848–856.
31. Алямовский И. В. Электронные пучки и электронные пушки. Москва: Сов. радио, 1966. 454 с.
32. Basten M. A. and Booske J. H. Two-plane focusing of high-space-charge sheet electron beams using periodically cusped magnetic fields. *J. Appl. Phys.* 1999. vol. 85, N 9. P. 6313–6322.
33. Кириченко А. Я. Ортоклиноotronный эффект. *Радиофизика и электроника: сб. науч. тр. Ин-т радиофизики и электроники НАН Украины.* Харьков, 2007. Т. 12, спец. вып. С. 117–121.
34. Альтшулер Ю. Г., Татаренко А. С. Лампы малой мощности с обратной волной. Москва: Сов. радио, 1963. 296 с.
35. Хutoryan Э. М., Пономаренко С. С., Кишко С. А., Лукин К. А., Кулешов А. Н., Ефимов Б. П. Колебания в генераторе О-типа при возбуждении объемно-поверхностной моды резонатора с периодически неодородной гребенкой. *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2013. Т. 21, № 2. С. 9–19.

REFERENCES

1. IDEHARA, T., KOSUGA, K., AGUSU, L., IKEDA, R., OGAWA, I., SAITO, T., MATSUKI, Y., UEDA, K., FUJIWARA, T., 2010. Continuously frequency tunable high power sub-THz radiation source – gyrotron FU CW VI for 600 MHz DNP-NMR spectroscopy. *J. Infrared Millimeter Terahz Waves.* vol. 31, no. 7, pp. 775–790.
2. YAMAZAKI, T., MIYAZAKI, A., SUEHARA, T., NAMBA, T., ASAI, S., KOBAYASHI, T., SAITO, H., OGAWA, I., IDEHARA, T. and SABCHEVSKI, S., 2012. Direct observation of the hyperfine transition of ground-state positronium. *Phys. Rev. Lett.* vol. 108, Iss. 25, pp. 253401-1–253401-5.
3. VERTIY, A. A., KARNAUKHOV, I. M., SHESTOPALOV, V. P., 1990. The polarization of atomic nuclei with millimeter waves. *Otv. red. I. I. Zalyubovskiy (ed.).* Kiev: Naukova dumka (in Russian).
4. ROSAYA, M., BLANK, M., ENGELKE, F., 2016. Instrumentation for solid-state dynamic nuclear polarization with magic angle spinning NMR. *Journal of Magnetic Resonance.* vol. 264, pp. 88–98.
5. MATSUKI, Y., IDEHARA, T., FUKAZAWA, J., FUJIWARA, T., 2016. Advanced instrumentation for DNP-enhanced MAS NMR for higher magnetic fields and lower temperatures. *Journal of Magnetic Resonance.* vol. 264, pp. 107–115.
6. KHUTORYAN, E., IDEHARA, T., KULESHOV, A., UEDA, K., 2015. Stabilization of Gyrotron Output Power by Use of PID Feedback Control of Anode Voltage. *The Physical Society of Japan.* P. 552.
7. KHUTORYAN, E. M., IDEHARA, T., KULESHOV, A. N., TATEMATSU, Y., YAMAGUCHI, Y., MATSUKI, Y., FUJIWARA, T., 2015. Stabilization of Gyrotron Frequency by PID Feedback Control on the Acceleration Voltage. *J. Infrared Milli Terahz Waves.* vol. 36, Iss. 12, pp. 1157–1163. DOI:10.1007/s10762-015-0212-2
8. LYSENKO, E. E., PAN'KOV, S. V., PISHKO, O. F., CHUMAK, V. G., CHURILOVA, S. A., 2010. CW 400...500 GHz clinotron development. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy.* vol. 15, no. 11, pp. 63–71 (in Russian).
9. PONOMARENKO, S. S., KISHKO, S. A., KHUTORYAN, E. M., KULESHOV, A. N., ZAVERTANNIY, V. V., LOPATIN, I. V., YEFIMOV, B. P., 2013. 400 GHz Continuous-wave clinotron oscillator. *IEEE Trans. Plasma Sci.* vol. 41, no. 1, pp. 82–86.

10. KHUTORYAN, E., SATTOROV, M., LUKIN, K. A., OHJOON, K., SUN-HONG, M., BHATTACHARYA, R., INKEUN, B., SEONTAE, K., MINWOO, YI., JOONHO, S., GUN-SIK, P., 2015. Theory of Multimode Resonant Backward-Wave Oscillator with an Inclined Electron Beam. *IEEE Trans. Elec. Dev.* vol. 62, no. 5, pp. 1628–1634.
11. KIRLEY, M. P., BOOSKE, J. H., 2015. The physics of conductivity at terahertz frequencies. In: *Proc. IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC)*. Beijing. DOI: 10.1109/IVEC.2015.7223746
12. BOOSKE, J. H., DOBBS, R. J., JOYE, C. D., KORY, C. L., NEIL, G. R., GUN-SIK PARK, PARK, J., TEMKIN, R. J., 2011. Vacuum electronic high power terahertz sources. *Trans. Terahertz Sci. and Tech.* vol. 1, no. 1, pp. 54–75.
13. GOLANT, M. B., MAKLAKOV, A. A., SHUR M. B., 1969. The manufacturing of resonators and slow-wave structures; N. D. Devyatkov (ed.). Moscow, USSR: Sovetskoe radio (in Russian).
14. HVATOV, B. N., 2006. The measurement of the surface roughness parameters according to the GOST 2789–73 with the profile method instruments: laboratory work. Tambov, Russia: Tambov State Tech. Univ. Publ. (in Russian).
15. SAFONOVA, T. N., 2008. Physics. V.3 Wave and quantum optics: guidelines for laboratory works. Livny, Russia: Orel State Technical University (OrelSTU) Publ. (in Russian).
16. AWAD, A. M., ABDEL GHANY, N. A., DAHY, T. M., 2010. Removal of tarnishing and roughness of copper surface by electropolishing treatment. *Applied Surface Science*. no. 256. P. 4370–4375.
17. KUSH, V. S., GOLANT, M. B., ZADVORNOV, M. G., 1964. The method of the slow-wave structure manufacturing for submillimeter wavelength range BWO's. *Voprosy spetsradioelektroniki. Ser. Elektronika SVCh*. vol. 7, pp. 121–125 (in Russian).
18. KUSH, V. S., 1971. *The shallow slow-wave structure development for the UHF oscillators in the submillimeter wavelength range and their investigation*. PhD thesis ed., Institute for Radiophysics and Electronics of AS of the UkrSSR, Kharkov (in Russian).
19. LEVIN, G. Ya., BORODKIN, A. I., YEFIMOV, B. P., VASURENKO, A. P., RUDENKIY, G. Ya., YENDALZEV, L. I., 1962. The manufacturing of grating slow-wave systems of the submillimeter and millimeter ranges of radio waves using the floating rolling. In: *Radiofizika i elektronika*. Institute for radiophysics and electronics. vol. 10, pp. 223–226 (in Russian).
20. LEVIN, G. Ya., BORODKIN, A. I., KIRICHENKO, A. Ya., CHURILOVA, S. A., USIKOV, A. Ya., 1992. Clinotron. Kiev: Naukova dumka (in Russian).
21. GAMZINA, D., LI, H., HIMES, L., BARCHFELD, R., POPOVIC, B., PAN, P., LETIZIA, R., MINEO, M., FENG, J., PAOLONI, C., LUHMANN, N. C., 2016. Nanoscale Surface Roughness Effects on THz Vacuum Electron Device Performance. *IEEE Trans. on Nanotechnology*. vol. 15, no. 1, pp. 85–93.
22. BHATTACHARJEE, S., BOOSKE, J. H., KORY, C. L., VAN DER WEIDE, D. W., LIMBACH, S., GALLAGHER, S., WELTER, J. D., LOPEZ, M. R., GILDENBACH, R. M., IVES, R. L., READ, M. E., DIVAN, R., MANCINI, D. C., 2004. Folded Waveguide Traveling-Wave Tube Sources for Terahertz Radiation. *IEEE Trans. on Plasma Sci.* vol. 32, no. 3, pp. 1002–1013.
23. PONOMARENKO, S. S., KOVSHOV, Y. S., KISHKO, S. A., NOVIKOVA-KOROTUN, Y. S., KHUTORYAN, E. M., KULESHOV, A. N., 2016. Development of compact CW clinotrons for DNP-NMR spectroscopy. *Proc. 9th Int. Kharkiv Symposium on Physics and Engineering of Microwaves, Millimeter and Submillimeter Waves (MSMW'2016)*. Kharkiv, pp. 1–4.
24. MINEO, M., PAOLONI, C., 2012. Comparison of THz Backward Wave Oscillators Based on Corrugated Waveguides. *Progress In Electromagnetics Research Letters*. vol. 30, pp. 163–171. DOI:10.2528/PIERL12013107
25. JOE, J., LOUIS, L. J., SCHARER, J. E., BOOSKE, J. H. and BASTEN, M. A., 1997. Experimental and theoretical investigations of a rectangular grating structure for low-voltage traveling wave tube amplifiers. *Phys. Plasmas*. vol. 4, no. 7, pp. 2707–2715.
26. PUTILOV, K. A., 1962. The course of physics. Vol. II. Electricity. Tutorial. Moscow, USSR: Gostekhteorizdat (in Russian).
27. SIVUHIN, D. V., 1975. General course of physics. Vol. 3. Thermodynamics and molecular physics. Moscow, USSR: Nauka (in Russian).
28. SHEVCHIK, V. N., TRUBETZKOV, D. I., 1975. Electronics of backward wave tubes. Saratov, USSR: Saratov University (in Russian).
29. TSMIRING, Sh. E., 2007. Electron beams and microwave vacuum electronics. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
30. GROW, R. W., WATKINS, D. A., 1955. Backward-Wave Oscillator Efficiency. *Proceedings of the IRE*. vol. 43, no 7, pp. 848–856.
31. ALYAMOVSKI, I. V., 1966. Electron beams and electron guns. Moscow, USSR: Sovetskoe radio (in Russian).
32. BASTEN, M. A. AND BOOSKE, J. H., 1999. Two-plane focusing of high-space-charge sheet electron beams using periodically cusped magnetic fields. *J. Appl. Phys.* vol. 85, no 9, pp. 6313–6322.
33. KIRICHENKO, A. YA., 2007. Ortoclinotron effect. In: *Radiofizika i elektronika*. vol. 12, spec. Iss., pp. 117–121 (in Russian).
34. ALTSHULER, YU. G., TATARENKO, A. S., 1963. Low power backward wave tubes. Moscow, USSR: Sovetskoe radio (in Russian).
35. KHUTORYAN, E. M., PONOMARENKO, S. S., KISHKO, S. A., LUKIN, K. A., KULESHOV, A. N., YEFIMOV, B. P., 2013. Autooscillations in O-type oscillator at excitation of space-surface mode in resonator with a periodically inhomogeneous grating. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika*. vol. 21, no. 2, pp. 9–19.

Рукопись поступила 20.12.2016.

Yu. S. Kovshov, S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko,
S. A. Vlasenko, A. A. Lihachev, V. V. Zavertanniy,
E. M. Khutoryan and A. N. Kuleshov

HIGH FREQUENCY OHMIC LOSSES IN TERAHERTZ FREQUENCY RANGE CW CLINOTRONS

Reliable simulations of electron-vacuum devices' operation parameters are an actual challenge during the R&D process. One of the most important problems is determining high frequency ohmic losses and taking them into account in the simulation. The surface roughness investigation of the clinotrons' slow-wave structures, manufactured by electro discharge machining, with the methods of optical microscopy is proposed in this paper. As a result the real values of the surface roughness were considered for the high frequency ohmic losses estimation of the real slow-wave structures. Taking into account the electron beam interception with the slow-wave structure surface, the temperature load simulations have been carried out and the temperature gradient of the clinotrons' slow-wave structures of 2-mm, 0.75-mm and 0.33-mm wavelength ranges was found. The electric conductivity decrease caused by surface roughness and increase of temperature of a slow-wave structure with beam current has been taken into account at the simulation of the clinotron output power. The qualitative and quantitative agreement between experimental data and simulation results was achieved for the 136 GHz and 301 GHz clinotrons.

Key words: THz radiation sources, clinotron, high frequency losses, surface roughness, electric conductivity, beam-wave interaction.

Ю. С. Ковшов, С. С. Пономаренко,
С. О. Кишко, С. О. Власенко, О. О. Ліхачов,
В. В. Завертанний, Е. М. Хуторян, О. М. Кулешов

ВИСОКОЧАСТОТНІ ОМІЧНІ ВТРАТИ В КЛІНОТРОНАХ БЕЗПЕРЕРВНОЇ ДІЇ ТЕРАГЕРЦЕВОГО ДІАПАЗОНУ ЧАСТОТ

Під час створення електронно-вакуумних приладів актуальною задачею є проведення достовірних розрахунків їх робочих характеристик. Визначення величин високочастотних омічних втрат та їх врахування у моделюванні приладів є однією із важливих проблем. У цій роботі пропонується провести дослідження шорсткості поверхні уповільнюючих сис-

тем, що виготовляються електроерозійним способом, методами оптичної мікроскопії, а також провести моделювання температурного навантаження на елементи таких систем для 2-мм, 0,75-мм і 0,33-мм діапазонів хвиль. За результатами проведених досліджень оцінено величину високочастотних омічних втрат хвилі із врахуванням шорсткості поверхні реальних систем. Отримано градієнт температури, як за висотою ламелі, так і за основою гребінки. Визначено міру впливу електронного потоку, що осаджується на систему, на величину електропровідності її поверхневого шару. З урахуванням визначених високочастотних омічних втрат проведено моделювання вихідної потужності кліноотронів у залежності від величини робочого току електронного пучка при фіксованій робочій частоті. У процесі порівняння експериментальних робочих характеристик кліноотронів, що працюють на частотах 136 і 301 ГГц, із результатами моделювання показано якісну та кількісну відповідність між ними.

Ключові слова: джерела ТГц-випромінювання, кліноотрон, високочастотні омічні втрати, шорсткість поверхні, електропровідність, електронно-хвильова взаємодія.