

А. Я. Кириченко

Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины

12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина

E-mail: kharkovs@ire.kharkov.ua

О ДВУХ ПРИЧИНАХ, ЗАТРУДНЯЮЩИХ ОСВОЕНИЕ СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН КЛИНОТРОНАМИ

В настоящее время осуществляются исследования, направленные на создание источников электромагнитных колебаний субмиллиметрового диапазона. Наряду с поиском новых методов генерации изучаются возможности давно известных генераторов с длительным взаимодействием электронного потока с полями периодических структур – клинотронов и генераторов дифракционного излучения. Основным препятствием на пути создания таких генераторов зачастую ошибочно считают мелкоструктурность их элементов. На основе экспериментальных исследований клинотронов, перекрывающих миллиметровый диапазон генерации, продемонстрированы две причины, затрудняющие эффективную генерацию клинотрона в субмиллиметровом диапазоне длин волн: снижение плотности тока на границе электронного потока, прилегающей к поверхности периодической структуры, и разброс геометрических параметров периодической структуры. Ил. 3. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: клинотронный угол; структура пучка; слой, обедненный электронами; экспоненциальное спадание поля; π -вид колебаний; дефекты периодической структуры.

В связи с возрастающим интересом к созданию источников электромагнитных колебаний в субмиллиметровом (субмм) диапазоне волн, наряду с поиском новых методов генерирования, изучаются возможности использования известных генераторов, оправдавших себя в длинноволновых диапазонах – клинотронов и оротронов или генераторов дифракционного излучения (ГДИ) [1, 2]. При этом препятствия, встречающиеся на пути создания источников колебаний с длительным взаимодействием электронных потоков с полями периодических структур, считаются обусловленными только малыми геометрическими размерами отдельных элементов генерирующих систем.

Клинотрон – модификация лампы обратной волны (ЛОВ) – имеет преимущества при генерации электромагнитных волн миллиметрового (мм) и субмм диапазонов. Источники колебаний СВЧ на ЛОВ рассматривались как генераторы малой мощности [3]. Создание ЛОВ мм диапазона еще в большей степени закрепило за ними репутацию источников слабой мощности [4]. В связи с этим появление модификации ЛОВ в виде клинотрона, показавшее уровни мощности в единицы и десятки ватт, вывело этот тип генераторов мм диапазона в ряд источников колебаний средней мощности [5]. В настоящее время клинотрон рассматривается как источник колебаний, способный преодолеть трудности генерации в терагерцевой области и стабильно работать в субмм области длин волн [2]. При этом изучаются также возможности использования клинотронного режима в оротроне при релятивистских скоростях электронов в пучке.

Однако представление о клинотроне как о модификации ЛОВ, которая обладает мощностью на порядок, а иногда и на два, превышающей мощность генерации ЛОВ с аналогичными электрическими параметрами и габаритами, часто ограничивается представлением об электронтном

потоке, падающем на плоскую поверхность периодической системы под острым (клинотронным) углом. Еще большие трудности возникают в понимании сущности клинотронного эффекта. На вопросы «Что такое клинотронный эффект?», «Какой мерой он может быть измерен?», «В каком из двух сравниваемых клинотронов клинотронный эффект проявляется сильнее?», даже специалисты в вакуумной электронике затрудняются дать ответ. Одни отвечают: «Клинотрон, у которого больше оптимальный угол, обладает большим клинотронным эффектом». Для других ответ совсем простой: «Клинотрон, у которого выше выходная мощность при оптимальном клинотронном угле наклона электронного пучка, обладает большим клинотронным эффектом». Но ведь оптимальный клинотронный угол зависит от геометрических размеров периодической структуры, толщины электронного потока, качества его формирования, наконец, от частотного диапазона, в котором происходит генерация сигнала. Например, известно что в сантиметровом (см) диапазоне клинотронный эффект практически не наблюдается, а проявляется в основном в генераторах, возбуждающихся в области мм волн.

Задачей настоящего сообщения является рассмотрение двух причин, затрудняющих продвижение известных источников колебаний в область более коротких волн, проявление которых наблюдалось уже в мм диапазоне.

1. Эффективность проявления клинотронного эффекта. Чтобы получить представление о возможном определении количественного критерия для установления качества проявления клинотронного эффекта, рассмотрим угловые зависимости мощности, генерируемой клинотронами мм диапазона, на нескольких частотах. На рис. 1 представлена зависимость относительного значения мощности P , генерируемой клинотроном,

отнесенной к максимальному значению мощности P_0 , генерируемой при оптимальном угле наклона пучка φ_0 , от угла наклона пучка φ . Оптимальным углом наклона φ_0 называется угол наклона пучка к поверхности периодической структуры, при котором наблюдается максимальное значение выходной мощности P_0 . Параметром кривых является частотный диапазон работы клинотрона.

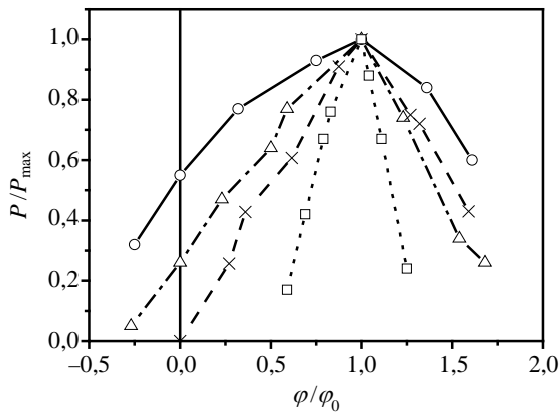


Рис. 1. Зависимости относительного значения мощности P/P_0 , генерируемой клинотроном, от угла наклона пучка φ/φ_0 . Длина генерируемой волны: о – 12 мм; Δ – 8 мм; \times – 6 мм; \square – 5 мм

В изучаемых клинотронах используется один и тот же электронный поток толщиной 0,4 мм, отличаются лишь периодические (в виде «гребенки») структуры – как общей длиной, изменяющейся от 45 до 15 мм, так и периодом структуры, в также глубиной щелевых резонаторов. Кривые четко различаются крутизной подъема и спада мощности и относительной величиной мощности P/P_0 при угле наклона пучка $\varphi/\varphi_0 = 0$, соответствующем работе клинотрона в режиме ЛОВ, т. е. при возбуждении электромагнитных полей пучком, проходящим параллельно поверхности периодической структуры. Следует вспомнить, что в см диапазоне клинотронный эффект наблюдается редко. В то же время, исходя из кривых рис. 1, можно прийти к выводу, что отношение P/P_0 при $\varphi/\varphi_0 = 0$, т. е. в режиме ЛОВ, может служить степенью проявления клинотронного эффекта. Если для клинотрона, возбуждаемого на длине волны 12 мм, $P/P_0 \sim 0,55$ при $\varphi/\varphi_0 = 0$, то при переходе к клинотрону, возбуждаемому в диапазоне 8 мм, P/P_0 снижается до 0,25, а в 6-мм диапазоне $P/P_0 \sim 0$. Клинотроны, возбуждаемые на волне 5 мм и короче, вообще невозможно возбудить электронным потоком, параллельным поверхности периодической структуры, и требуется использование провисающего

фокусирующего магнитного поля для возбуждения электромагнитных полей [5]; т. е. энергия пучка, переданная полю возбуждаемой гармонике, не превосходит потерь в системе – режим самовозбуждения не реализуется.

2. Влияние поверхностного слоя электронного потока. Приведенные результаты исследований показывают, что проявление клинотронного эффекта наблюдается в случае ослабления связи электронного потока с полем поверхностной волны, распространяющейся вдоль поверхности периодической структуры. Электронный поток как бы удаляется от поверхности периодической структуры. Между ним и поверхностью структуры образуется слой электронного потока, обедненный электронами. Спадающее по экспоненте поле поверхностной волны сконцентрировано в слое, сосредоточенном примерно в 0,1 длины замедленной волны. При размещении электронного потока параллельно поверхности периодической структуры этот слой определяет эффективный слой электронного потока, возбуждающий электромагнитное поле у поверхности периодической структуры. Толщина слоя составляет примерно 0,015 длины генерируемой волны в свободном пространстве, при учете величины ускоряющего напряжения в стандартных ЛОВ и клинотронах [6]. Ослабление влияния эффективности энергообмена электронов пучка с электромагнитным полем происходит из-за снижения плотности тока на границе реального электронного потока. На снижение плотности электронов на границе пучка влияет целый ряд факторов: начальные тепловые скорости электронов, эмитированных накаленным катодом; собственное поле пространственного заряда пучка; дефокусирующее влияние линз электронно-оптической системы, превращающее плоскую границу пучка в пульсирующую; условия согласования электронного пучка с фокусирующим магнитным полем. Поэтому слой электронного пучка, в который проникает электромагнитное поле поверхностной волны, в приборах с длительным энергообменом оказывается сравнимым для источников колебаний, генерирующих волны в длинноволновой части мм диапазона, и даже меньшим слоя пучка с обедненными электронами для источников колебаний коротковолновой части мм диапазона (рис. 1), где оказывается, что клинотронный механизм, обеспечивающий проникновение пучка в область существования поля поверхностной волны, мало эффективен, и приходится прибегать к использованию слабо неоднородных магнитных полей [5].

3. Источник электромагнитных потерь в периодической структуре. В случае рассмотрения потерь в периодической структуре при расчетах чаще всего принимают во внимание тепло-

вые омические потери в материале, из которого она изготовлена, – оценивают толщину скин-слоя. В то же время, поскольку поверхностная волна, канализируемая периодической структурой, является собственной ее волной, любая неоднородность на ее поверхности приводит к радиационным потерям и ослаблению волны, распространяющейся вдоль нее. Дефекты замедляющей структуры ослабляют волну, идущую вдоль нее, отражают ее, переводя в другие типы волн. При нарушении строгой периодичности ΔD в соседних ячейках, отстоящих одна от другой на расстоянии D , эффективная постоянная потеря α определяется выражением $\alpha = \Delta D^2 / D^2 [v/v_g - 1]^2$,

где ΔD^2 – среднеквадратичное отклонение элементарной ячейки по одному из ее размеров; v – фазовая скорость; v_g – групповая скорость [7].

В связи с резким ростом групповой скорости v_g при приближении к π -виду колебаний сильно возрастает эффективная постоянная потеря α , поэтому мощность генерации клинотрона достигает максимума, не доходя до π -вида.

Характер изменения квадрата напряженности электрического поля основной пространственной гармоники, измеренный с помощью возмущающего тела в форме вибрирующей струны, удаленной от поверхности структуры на 0,5 мм и перемещающейся на расстояние 18 мм вдоль ее поверхности, в зависимости от изменения сдвигов фаз на период периодической структуры, приведен на рис. 2. Измерения выполнены на периодической структуре типа «гребенка» с периодом 0,5 мм, при ширине и глубине щелевого резонатора 0,25 и 1,87 мм соответственно [8]. При возбуждении клинотрона на 1-й отрицательной гармонике самая низкая частота 32,18 ГГц наблюдается при сдвиге фаз на период $\psi_{-1} = -1,87\pi$ (кривая 1), который соответствует сдвигу фаз на основной гармонике $\psi_0 = 0,13\pi$. Кривая зависимости квадрата напряженности амплитуды высокочастотного поля гармоническая. При повышении частоты до 35,42 ГГц при $\psi_{-1} = -1,42\pi$ ($\psi_0 = 0,57\pi$) гармоничность кривой 2 сохраняется при уменьшении величины периода за счет повышения частоты и увеличения замедления волны. Иначе ведет себя зависимость поля вдоль поверхности периодической структуры на частоте 36,32 ГГц (кривая 3) при $\psi_{-1} = -1,29\pi$ ($\psi_0 = 0,69\pi$). Видно, что по мере приближения к π -виду колебаний проявляются нарушения гармонической зависимости поля вдоль периодической структуры. Таким образом проявляется несовершенство в выполнении периодической структуры, не позволяющее приблизиться гене-

рации к π -виду колебаний используемой периодической структуры. В то же время постоянно существует стремление экспериментатора приблизиться к π -виду колебаний, которое связано с тем, что сопротивление связи пучка с полем поверхностной волны при этом возрастает.

Используя одну и ту же технологию изготовления периодических структур для клинотронов, генерирующих все более короткую волну, приблизиться к π -виду колебаний становится все труднее. На графике зависимости мощности от генерируемой длины волны появляется максимум достижимой мощности, после которого она падает.

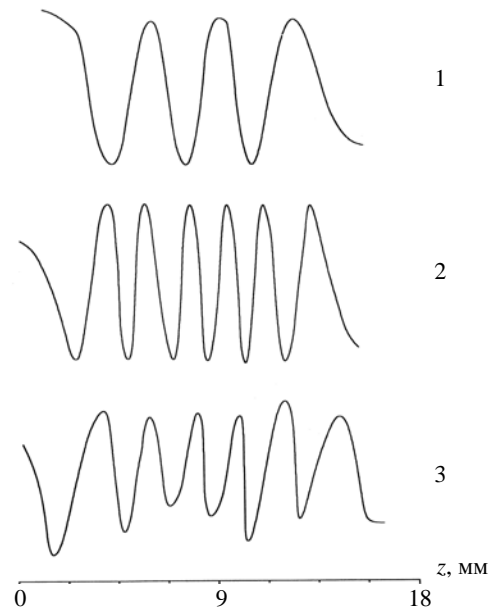


Рис. 2. Характер изменения квадрата напряженности электрической составляющей основной гармоники электромагнитного поля, распространяющейся вдоль поверхности периодической структуры: 1 – $\psi_0 = 0,42\pi$; 2 – $\psi_0 = 0,57\pi$; 3 – $\psi_0 = 0,69\pi$

Для клинотронов, создаваемых на все более короткие волны, максимум на зависимости $P(\Delta)$ удаляется от π -вида колебаний генерации за счет создания все более мелкоструктурной периодической структуры и проявления влияния все возрастающих относительных величин неоднородности. В результате анализа около сорока образцов клинотронов, возбуждаемых в диапазоне 40...220 ГГц, был установлен характер смещения максимального значения мощности, генерируемой клинотроном в диапазоне его электрической перестройки, – в зависимости от сдвига фазы на период структуры. Результаты анализа представлены на рис. 3. Точками обозначены экспериментальные результаты, линией показано усредненное значение наблюдаемой зависимости. Значения сдвига фаз на период системы для 1-й отрицательной пространственной гармоники ψ_0 в за-

висимости от частоты f генерации клинотрона показаны вдоль отрицательной оси ординат. Данные измерений по обнаружению нарушения синусоидальности в распределении поля основной пространственной гармоники (рис. 2) неплохо соответствуют результатам исследований, показанным на рис. 3.

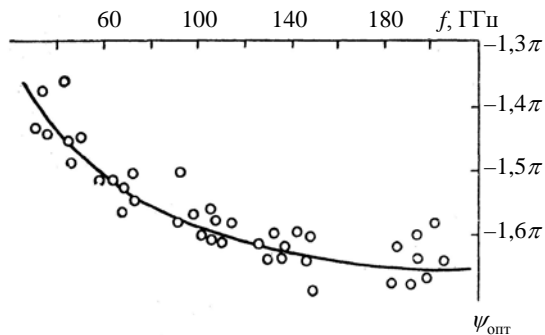


Рис. 3. Характер сдвига фазы 1-й отрицательной гармоники, соответствующей максимальному значению генерируемой мощности в области перестройки клинотрона, для клинотронов, генерирующих в диапазоне частот 35...220 ГГц

Следует отметить, что уже первые опыты по созданию генераторов типа ЛОВ в коротковолновой части мм диапазона указали на существенное влияние не потерь в скин-слое материала периодической структуры, а качества спая проводников ее образующей с матрицей [6]. В этой работе впервые в зарубежной литературе отмечается, что в некоторых случаях для получения устойчивой генерации необходимо было направлять электронный поток под углом к поверхности периодической структуры – использовать клинотронный эффект. При прохождении пучка параллельно поверхности периодической структуры возбудить колебания в ЛОВ не удавалось. Аналогичный вывод относительно повышения эффективности взаимодействия за счет наклона пучка к поверхности периодической структуры сделан авторами монографии [4, с. 60]

Таким образом, при создании источников колебаний с длительным взаимодействием электронного потока с полями периодической структуры в ЛОВ, клинотроне, ГДИ или оротроне к мелкоструктурным элементам генераторов предъявляются все более жесткие требования. Важное значение имеют не столько малые поперечные геометрические размеры электронного потока (которые в некоторой мере могут быть компенсированы с помощью клинотронного эффекта не очень тонкого пучка), сколько повышенные требования к структуре границы электронного потока, прилегающей к поверхности периодической структуры. Как известно, повышение качества структуры этой границы достигается, в частности, увеличением поперечного размера анодного отверстия

диодной пушки, использованием асимметрии расположения электронной оптики относительно канала пространства взаимодействия и, естественно, повышением напряженности магнитного поля, сопровождающего электроны пучка [5]. Клинотронный эффект является лишь средством, ослабляющим влияние неоднородности распределения плотности тока в пучке, в частности, падения плотности тока на границе пучка, прилегающей к поверхности периодической структуры.

Результаты исследований, приведенные на рис. 2, 3, демонстрируют трудности в продвижении рабочего диапазона генераторов к колебаниям π -вида – в область повышенного сопротивления связи электронов с гармоникой поверхностной волны. Этими исследованиями продемонстрированы требования к все возрастающей точности изготовления периодических структур, поиску новых технологических приемов их изготовления и контролю их качества.

Естественно, наряду с трудностями преодоления барьера между мм и субмм диапазонами электромагнитных волн, имеется и ряд других не менее значительных препятствий, изучение которых требует серьезных экспериментальных исследований. Однако необходимость преодоления рассмотренных трудностей для выполнения поставленной задачи – перехода на работу генераторов в субмм диапазоне – неоспорима.

Библиографический список

1. *Отчет* за 2005 г. по Программе фундаментальных исследований Президиума РАН № 29 «Электромагнитные волны терагерцевого диапазона». Раздел 2.1. Источники терагерцевого излучения [Электронный ресурс] / Рос. акад. наук. – Электрон. текстовые дан. – Новосибирск, 2005. – Режим доступа: <http://kinetics.nsc.ru/center/public/rep05.pdf>. – Загл. с экрана.
2. *Vacuum electronic high power terahertz sources* / J. H. Booske, R. J. Dobbs, C. D. Joye et al. // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2011. – 1, N 1. – P. 54–75.
3. *Альтшулер Ю. Г.* Лампы малой мощности с обратной волной / Ю. Г. Альтшулер, А. С. Татаренко. – М.: Сов. радио, 1963. – 296 с.
4. *Лампы* обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / Е. М. Гершензон, М. Б. Голант, А. А. Негирев и др. – М.: Радио и связь, 1985. – 136 с.
5. *Клинотрон* / Г. Я. Левин, А. И. Бородкин, А. Я. Кириченко и др.; под ред. А. Я. Усикова. – К.: Наук. думка, 1992. – 200 с.
6. *Karp A.* Backward-wave oscillator experiments at 100 to 200 kilomegacycles / A. Karp // *Proc. of the IRE*. – 1957. – 45, N 4. – P. 496–503.
7. *Mertdith R.* A range of 2 and 1 millimeter waveguide components / R. Mertdith, J. H. Preece // *IEEE Trans. M.T.T.* – 1963. – MTT-11. – P. 332–338.
8. *Кириченко А. Я.* Визуализация поля в ближней зоне излучателей СВЧ с помощью вибрирующей струны / А. Я. Кириченко, О. А. Суворова // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2000. – 5, № 1. – С. 31–35.

Рукопись поступила 26.05.2015.

A. Ya. Kirichenko

TWO REASONS WHICH COMPLICATE THE DEVELOPMENT OF SUBMILLIMETER ELECTROMAGNETIC WAVE CLINOTRONS

Nowadays there are a lot of research, aimed at creation of sources of electromagnetic oscillations in the submillimeter range. Along with the search for new methods of generation, the attention is paid to the possibilities involved into known generators with long-term interaction of electron beam with the electromagnetic fields produced by periodical structures (clinotrons and generators of diffraction radiation). The fineness of the elements of such generators are often wrongly considered as the main obstacle for the creation of such generators. On the basis of experimental study of clinotrons operating in the millimeter-wave range of generation, two reasons that hamper the effective generation clinotrons in the submillimeter wavelength region are shown: decrease of the current density of the electron beam in the vicinity of the surface of the periodic structure, and dispersion of geometrical parameters of the periodic structure.

Key words: clinotron angle, electron beam structure, a layer of depleted electrons, exponential decay of the field, π -oscillations, defects of the periodic structure.

О. Я. Кириченко

ПРО ДВІ ПРИЧИНИ, ЩО УСКЛАДНЮЮТЬ ОСВОЄННЯ СУБМІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ КЛІНОТРОНАМИ

На цей час здійснюються дослідження, спрямовані на створення джерел електромагнітних коливань субміліметрового діапазону. Поряд з пошуком нових методів генерації вивчаються можливості давно відомих генераторів з тривалою взаємодією електронного потоку з полями періодичних структур – кліноотронів і генераторів дифракційного випромінювання. Основною перешкодою на шляху створення таких генераторів часто помилково вважається дрібноструктурність їх елементів. На основі експериментальних досліджень кліноотронів, що перекривають міліметровий діапазон генерації, продемонстровано дві причини, що ускладнюють ефективну генерацію кліноотрона в субміліметровому діапазоні довжин хвиль: зниження густини струму на межі електронного потоку, що прилягає до поверхні періодичної структури, і розкид геометричних параметрів періодичної структури.

Ключові слова: кліноотронний кут; структура пучка; шар, збіднений електронами; експоненціальне спадання поля; π -вид коливань; дефекти періодичної структури.