

М. В. Мильчо

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

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

E-mail: astis@ire.kharkov.ua

ГРУППИРОВКА ЭЛЕКТРОНОВ В ГЕНЕРАТОРАХ ТИПА «КЛИНОТРОН». КЛИНОТРОН КАК УМНОЖИТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

Существует проблема создания удобных в эксплуатации и не особенно дорогих генераторов для освоения субмиллиметрового диапазона волн, особенно в его коротковолновой части. Генераторы типа лампы обратной волны (ЛОВ) дают хорошие результаты в длинноволновой части субмиллиметрового диапазона, однако при продвижении в коротковолновую часть диапазона возникают большие трудности. Существующие технологические возможности не позволяют получить необходимые для этого диапазона очень тонкие электронные пучки с большой плотностью тока. Значительно ослабить требования к электронным пучкам можно, используя умножители частоты. Для модуляции электронного пучка по плотности в умножителях частоты можно использовать генератор типа «клиноotron». В клиноотроне широкий и сравнительно толстый ленточный электронный пучок направлен под малым углом к поверхности замедляющей системы и частично рассеивается на этой поверхности. Клиноotron обеспечивает выходную мощность на несколько порядков большую, чем обычные ЛОВ. Это важно для получения хорошей (глубокой) модуляции электронного пучка. Необходимо исследовать процесс группировки электронов в плотные сгустки в генераторах типа «клиноotron» и определить условия использования клиноотрона для модуляции электронов по плотности в умножителях частоты. В работе проводится численное исследование группировки электронов в клиноотроне с помощью разработанной нами ранее специальной программы, учитывающей специфику клиноотронного режима. Исследуется трехмерное движение электронов в ограниченном (не бесконечном) фокусирующем магнитном поле. В результате численного исследования обнаружен эффект послонной группировки электронов в клиноотронных генераторах. Чем дальше расположен электронный слой от поверхности замедляющей системы, тем позже происходит группировка электронов в сгустки в этом слое. Показано, что подбирая режим работы клиноотрона и угол наклона фокусирующего магнитного поля к поверхности гребенки, можно обеспечить формирование плотных электронных сгустков в части пучка уже за пределами замедляющей системы клиноотрона, где должна быть расположена вторая замедляющая система, работающая в режиме отборника мощности. Таким образом, доказана возможность использования клиноотрона при создании умножителей частоты. Ил. 4. Библиогр.: 14 назв.

Ключевые слова: электроника, клиноotron, группировка, умножитель частоты, численный счет.

Эта работа связана с задачей создания генераторов в коротковолновой части субмиллиметрового (субмм) диапазона волн. В настоящее время для этого диапазона могут использоваться генераторы с очень большими рабочими напряжениями (ускорители) или с очень большими магнитными полями, получаемыми с применением сверхпроводящих магнитов. Это сложные и дорогие установки, что ограничивает возможности их использования. Простыми и удобными в эксплуатации являются генераторы типа лампы обратной волны (ЛОВ О) и их разновидность – клиноотроны [1]. Эти генераторы перекрывают длинноволновую часть субмм диапазона. Однако при продвижении в коротковолновую часть диапазона возникают большие трудности. Для генераторов этой части диапазона с рабочими напряжениями в несколько киловольт нужны замедляющие системы с очень малым пространственным периодом (менее 0,01 мм) и очень тонкие ленточные электронные пучки с большой плотностью тока.

Существующие технологические возможности не позволяют выполнить эти высокие требования. Заметим, что современные дорогие зарубежные технологии позволяют частично решить эту проблему, используя мелкоструктурные золотые замедляющие системы, нанесенные на алмазную подложку.

Для продвижения в коротковолновую часть субмм диапазона могут оказаться перспек-

тивными умножители частоты. Важное достоинство умножителей – отсутствие понятия пускового тока. Поэтому даже при невозможности обеспечить высокое качество электронного пучка в умножителе при выполнении резонансных условий и группировке электронов в достаточно компактные сгустки будет возбуждаться выходной сигнал, хотя и с малой мощностью. Для многих применений достаточно выходной мощности порядка единиц милливольт и даже меньше. Для таких случаев могут быть использованы умножители частоты. В литературе обсуждаются возможности использования умножителей разной конструкции для продвижения к более коротким волнам, например [2]. Однако экспериментально исследовано только умножение из сантиметрового диапазона в миллиметровый, например [3].

1. Клиноotron как умножитель частоты. Умножители частоты в субмм диапазоне целесообразно разрабатывать на основе генератора типа «клиноotron». Клиноотроны имеют выходную мощность на несколько порядков больше, чем обычные ЛОВ О. В коротковолновой части миллиметрового диапазона легко получить клиноотроны с выходной мощностью в несколько ватт в непрерывном режиме и в сотни милливольт в длинноволновой части субмм диапазона. Большие амплитуды высокочастотных полей в мощном генераторе позволяют ожидать больших возмущений в движении электронов, что необходимо для

глубокой модуляции пучка. Умножитель может представлять собой двухкаскадный прибор типа «О» [4] (рис. 1).

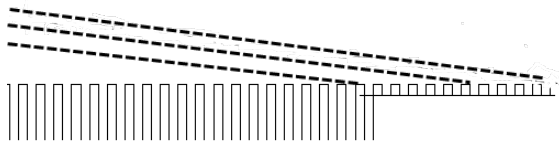


Рис. 1. Схема двухкаскадного клинотрона-умножителя. Показаны две последовательно расположенные гребенки и три тонких слоя ленточного электронного пучка. В этих слоях будем исследовать движение электронов

Первый каскад – мощный клинотрон коротковолновой части миллиметрового или длинноволновой части субмм диапазонов. Электронный пучок, пройдя первый каскад и получив модуляцию по плотности, попадает во второй каскад, работающий в режиме отборника мощности. Этот каскад также может быть выполненным в виде клинотрона, работающего в режиме лампы прямой или обратной волны (ЛБВ или ЛОВ). Очевидно, что для клинотрона в этом каскаде должны быть обеспечены синхронизм электронного пучка с рабочей пространственной гармоникой волны в замедляющей системе и строгая кратность частоты этой волны с частотой модулирующего генератора первого каскада. Эти требования обеспечиваются при разработке конструкции замедляющих систем обоих каскадов и выбором рабочего режима. В этой работе теоретически исследуется процесс группировки электронов в генераторах типа «клинотрон» и показана возможность использования клинотрона для модуляции электронного пучка в умножителе частоты.

2. Особенности группировки электронов в клинотроне. Следует заметить, что возможность использования клинотрона для модуляции электронного пучка не является очевидной. Ведь в клинотроне ленточный электронный пучок специально рассеивается на поверхности замедляющей системы и обычно не выходит за ее пределы. Кроме того, в ЛОВ О электроны собираются в сгустки максимальной плотности примерно в средней части по длине лампы, и при дальнейшем движении электронов группировка уменьшается. После прохождения всей длины лампы группировка электронов может оказаться очень слабой, что не позволит получить большую кратность умножения частоты. Для умножителя необходимо, чтобы компактные сгустки электронов были не только в первом, но и во втором каскаде, удаленном в пространстве от первого.

Проведенные нами в этой работе численные исследования позволили выявить особенность группировки электронов в клинотроне, которую можно назвать эффектом послышной группировки. Чем дальше от поверхности гребенки

расположен слой электронов в пучке, тем позже происходит группировка электронов в сгустки в этом слое. Суть этого явления объясняется довольно просто. Из-за сильно выраженного поверхностного характера замедленной волны слой ленточного электронного пучка, находящийся вблизи поверхности гребенки, оказывается в гораздо более интенсивном высокочастотном поле, чем слой электронов, удаленный от поверхности гребенки. Тонкий слой у поверхности наиболее интенсивно взаимодействует с высокочастотным полем. Электроны этого слоя в оптимальном режиме собираются в наиболее плотные сгустки примерно в средней части по длине клинотрона и при дальнейшем движении оседают на поверхности гребенки. Электроны удаленного слоя находятся в более слабом поле и при движении вдоль замедляющей системы не успевают сгруппироваться в плотные сгустки. Подбирая угол наклона пучка к поверхности гребенки с помощью фокусирующего магнитного поля, можно подобрать такой наклон, что близкая к поверхности гребенки часть пучка будет рассеиваться на гребенке, а удаленная часть пучка – выходить за пределы первого каскада. Электроны удаленного слоя продолжают движение по инерции (уже без поля гребенки). Поскольку эти электроны получили модуляцию по скорости в первом каскаде, они только на некотором расстоянии от первого каскада собираются в плотные сгустки. В этом месте должна быть расположена замедляющая система второго каскада, работающего в режиме отборника мощности.

Эти качественные рассуждения основаны на результатах строгого численного исследования процесса группировки электронов в клинотроне, которые описаны в следующих разделах.

3. Физическая модель и методика исследования. В настоящее время в литературе сохраняется интерес к теоретическому исследованию работы клинотрона и умножителей частоты разной конструкции, например [5–7]. Авторы исследуют сложные процессы установления колебаний, их устойчивость и другие сложные вопросы, поэтому они вынуждены идеализировать процессы, используя простые физические модели для их описания. В частности, высокочастотное поле, как правило, представляется только одной пространственной гармоникой. Движение электронов представляется одномерным [5, 6] или при конкретном расчете задается очень большое значение магнитного поля [7]. Для адекватного анализа процессов в разных слоях тонкого ленточного пучка, проходящего у самой поверхности гребенки и частично оседающего на этой гребенке, нужны более сложные физические модели.

Ранее нами была разработана такая модель, учитывающая специфику движения электронов в генераторах типа «клинотрон», и созданы

соответствующие программы для численного счета [8, 9]. Эти же программы используются нами для анализа группировки электронов в разных слоях тонкого ленточного пучка.

Подробное описание физической модели, ее обоснование и методика численного счета приведены в работах [8, 9]. Здесь мы ограничимся лишь кратким перечислением.

Используется двумерная модель для распределения высокочастотного поля в системе. Обосновываем мы это тем, что клинотроны работают на основной моде волны в замедляющей системе типа «гребенка в волноводе», при котором распределение поля над гребенкой почти двумерное [10, 11]. Кроме того, толщина ленточных пучков в десятки раз меньше их ширины, и поэтому краевыми эффектами при качественных исследованиях можно пренебречь. Движение электронов предполагается трехмерным, как в реальности.

В модели не учитывается пространственный заряд (влияние электронов друг на друга). Обоснование такого упрощения следующее. При существующих в реальных клинотронах рабочем напряжении, токе и фокусирующем магнитном поле пространственный заряд существенно не изменяет движение электронов. Так, оценка пульсаций границ пучка за счет влияния пространственного заряда дает амплитуду пульсаций порядка 0,01 мм для клинотронов миллиметрового диапазона и порядка 0,001 мм для клинотронов субмм диапазона. При этом толщина ленточных пучков много больше – порядка 0,15...0,20 мм.

Реальные пульсации границ пучков в клинотронах намного больше, однако они вызваны не пространственным зарядом пучка, а особенностями электронной пушки. Наличие таких пульсаций границ на входе пучка в систему может учитываться при расчетах в данной модели. Эти пульсации приводят к снижению эффективности взаимодействия электронов с высокочастотным полем и уменьшению электронного КПД, но качественно не изменяют процесса этого взаимодействия.

Анализ проводится в приближении заданного монохроматического поля: считается, что процесс установился, амплитуды высокочастотных полей и их частота постоянны во времени.

Распределение амплитуды полей вдоль замедляющей системы (в направлении движения электронов) может задаваться от близкого к косинусоидальному для клинотронов с согласованными нагрузками на обоих концах замедляющей системы до близкого к постоянному при сильной обратной связи по высокочастотному полю.

Важно отметить, что при использовании клинотрона в качестве модулятора в первом каскаде умножителя частоты нет необходимости

выводить его энергию из прибора, поэтому выходной волновод следует специально выбирать за пределами для частоты модулирующего генератора. При этом вся генерируемая в первом каскаде мощность расходуется на создание интенсивных высокочастотных полей в замедляющей системе. В этом случае существует сильная обратная связь по высокочастотному полю. Поэтому в большинстве исследований предполагаем, что амплитуды полей почти одинаковы на всех резонаторах гребенки.

Для анализа движения электронов проводится прямое численное интегрирование трехмерного уравнения движения электрона в электрическом и магнитном полях. На каждом малом временном интервале влияние магнитного поля (силы Лоренца) учитывается не дискретно (численно), а аналитически. Это обеспечивает выполнение закона сохранения энергии, так как нет накапливающейся ошибки при численном учете влияния поперечного магнитного поля [8].

Для описания распределения электрического высокочастотного поля в гребенке использован метод конформных отображений [12–14], который позволяет точно решить квазистатическую задачу и строго ввести поправки на отличие решения от квазистатики. При этом точно учитываются особенности полей на острых краях металлических элементов. Для полей в любой точке пространства получаются аналитические выражения в замкнутой форме (не в виде рядов), что удобно при вычислениях.

Для быстрого вычисления поля в произвольной точке при численном интегрировании уравнений движения предварительно вычисляются массивы значений амплитуд поперечной и продольной составляющих напряженности электрического поля в 640 точках (по x, y) на одном периоде гребенки. Для вычисления напряженности поля в произвольной точке (x_0, y_0) используется линейная интерполяция по четырём ближайшим к (x_0, y_0) точкам. Поле на произвольном периоде вычисляется по полю на одном периоде, используя теорему Флоке: $E(x + NL, y, \varphi) = E(x, y, \varphi) \exp(jN\varphi)$, где L – период гребенки, φ – фазовый сдвиг рабочего типа волны на периоде L , N – номер периода.

Численные исследования показывают, что если скорость электронов на несколько процентов не совпадает со скоростью любой из пространственных гармоник поля, то нет упорядоченных изменений в движении электронов. Поэтому при анализе движения электронов за пределами замедляющей системы первого каскада предполагается, что электроны движутся только по инерции и не испытывают влияние электрических полей. Взаимодействием с полем замедляющей системы второго каскада при исследова-

нии процессов группировки пренебрегаем, поскольку интенсивность поля здесь на порядки меньше, чем в первом каскаде.

4. Численное исследование процессов группировки. Режим работы клинотрона характеризуется несколькими безразмерными параметрами [8, 9], основной из которых – безразмерная амплитуда напряженности электрического поля

$$A = \frac{e}{m} \frac{E_0}{V_0 \omega},$$

где $\frac{e}{m}$ – отношение заряда электрона к его массе; E_0 – напряженность электрического поля; V_0 – скорость электрона; ω – частота высокочастотного поля.

Напряженность поля E_0 можно связать с мощностью, расходуемой на создание такого поля в резонаторах гребенки с учетом материала резонаторов (медь). Для режима синхронизма электронов с -1 -й пространственной гармоникой поля параметр A записывается таким образом:

$$A = 0,403\lambda^{3/4} \sqrt{\frac{P}{NbU}},$$

где λ – длина волны генерируемых колебаний, мм; N – число щелевых резонаторов в гребенке первого каскада; b – ширина гребенки, мм; U – рабочее напряжение, В; P – мощность потерь энергии в металле гребенки, Вт. Чем больше параметр A , тем короче оптимальная длина замедляющей системы, тем больше электронный КПД и тем больший ток пучка необходим для реализации этого режима.

«Жесткость» магнитной фокусировки задается отношением частоты генерируемых колебаний к циклотронной частоте

$$\frac{\omega}{\Omega} = \frac{107}{H\lambda},$$

где H – напряженность фокусирующего магнитного поля, кЭ; λ – длина волны генерируемых колебаний, мм. Чем меньше этот параметр, тем ближе движение электронов к одномерному.

На рис. 1 условно изображены гребенка первого каскада (модулирующего) и гребенка второго каскада (отборника мощности). Схематически показано расположение трех тонких слоев ленточного электронного пучка: близкого к поверхности гребенки и удаленных от этой поверхности. Проведено подробное численное исследование движения электронов в клинотроне как в пределах замедляющей системы первого каскада, так и при выходе части пучка за ее пределы. Установлено, что чем дальше расположен слой электронов ленточного пучка от поверхности гребенки, тем позже электроны этого слоя собираются в плотные сгустки. Показано, что подбирая режим клинотрона и угол наклона фокуси-

рующего магнитного поля к поверхности гребенки, можно подобрать такое положение, когда часть электронов пучка будет собираться в плотные сгустки уже за пределами гребенки первого каскада. Положением этого сгустка можно управлять, изменяя амплитуду высокочастотного поля (изменяя ток пучка) и угол наклона магнитного поля.

Мы покажем результаты расчетов по анализу группировки электронов в разных частях пучка на конкретном примере, который специально подобран так, чтобы получился результат, удобный для экспериментальной реализации.

Модулирующий генератор – клинотрон 3-мм диапазона ($\lambda \approx 2,8$ мм). При трехкратном умножении частоты ожидается получение сигнала субмм диапазона ($\lambda \approx 0,93$ мм). Гребенка содержит 42 щелевых резонатора. Период гребенки 0,28 мм, а ширина – 3 мм. Рабочее напряжение при фазовом сдвиге на период $\varphi \approx 0,5\pi$ и синхронизме с -1 -й пространственной гармоникой равно $U \approx 3$ 700 В. В таком режиме легко получить выходную мощность порядка нескольких ватт. Считаем, что мощность, расходуемая на создание поля и теряемая в металле гребенки, равна 2 Вт. Индукция фокусирующего магнитного поля 0,6 Тл. При этих параметрах безразмерная амплитуда $A = 0,0018$ и параметр магнитного поля $\frac{\omega}{\Omega} \approx 6$. Толщина ленточного пучка 0,14 мм.

Пучок вбрасывается на расстоянии 0,1 периода гребенки от ее поверхности ($\approx 0,03$ мм). Этот параметр обычно называют прицельным расстоянием.

Близкий к поверхности гребенки слой пучка дает основной вклад в генерируемую клинотроном мощность, поэтому проведем оптимизацию режима для этого слоя. Численно анализируя движение электронов в этом слое, подбираем оптимальные начальную скорость и угол наклона фокусирующего магнитного поля к поверхности гребенки. В оптимальном режиме достигается максимальный электронный КПД, усредненный по всем электронам этого слоя (электроны слоя имеют разные фазы влета в область высокочастотного поля). Оптимальная начальная скорость оказалась равна 1,032 скорости -1 -й пространственной гармоники. Оптимальный угол наклона магнитного поля такой, чтобы при отсутствии высокочастотного поля электроны слоя попадали на поверхность гребенки в области сорокового щелевого резонатора. При этом средний электронный КПД для слоя достигает 8,44 %.

Следует отметить, что полученное сравнительно большое значение КПД характеризует только электронный слой, близкий к поверхности гребенки. Для электронов удаленных слоев КПД оказывается значительно меньше. Вычисления

для реальной толщины пучка показывают, что средний электронный КПД для всего пучка уменьшается примерно в 2–3 раза. Общий КПД всего прибора получается умножением электронного КПД на контурный КПД, который учитывает потери энергии в гребенке и в цепях обратной связи и уменьшает общий КПД еще примерно вдвое. Кроме того, волнистость траекторий электронов и пульсация границ пучка на входе в систему также снижают эффективность взаимодействия электронов с полем, что особенно сильно проявляется в приборах субмм диапазона волн. С учетом указанных поправок вычисленный КПД близок к реальным значениям.

При анализе результатов численного исследования процесса группировки в клинотроне возникают некоторые трудности при представлении результатов на графиках. Это объясняется тем, что клинотрон имеет сравнительно длинную замедляющую систему, содержащую несколько десятков периодов (в нашем примере их 42). Электроны при синхронизме с -1 -й пространственной гармоникой, которая в нашем примере имеет фазовый сдвиг на период $\varphi = 1,5\pi$, проходят всю замедляющую систему за время, примерно равное 30 периодам высокочастотного поля. Для анализа группировки необходимо проследить движение хотя бы 10 электронов, которые вылетают за один период высокочастотного поля. Различие времени вылета между соседними электронами составляет не более 0,1 периода. На графике невозможно отобразить с достаточным разрешением кривые, протяженность которых примерно в 300 раз больше расстояния между соседними кривыми.

Выход из этого положения следующий. Необходимо отражать на графике не координату электрона от времени, а только изменение взаимного расположения электронов. Удобно рассматривать разность между реальным положением электрона и координатой некоторого условного электрона, который движется синхронно с -1 -й пространственной гармоникой поля (представлять взаимное расположение электронов в подвижной системе координат). Рассинхронизм электронов с рабочей гармоникой поля обычно не превышает нескольких процентов, что позволяет выбрать удобный крупный масштаб для графического представления изменений в положении электронов.

Группировка электронов близкого к поверхности гребенки слоя пучка показана на рис. 2. Режим работы этого слоя оптимизирован для получения максимального КПД. По вертикальной оси отложена разность между реальной координатой электрона и положением условного электрона, который движется со скоростью -1 -й пространственной гармоники. Начало отсчета – горизонтальная прямая на рис. 2. По горизонтальной

оси (абсцисс) откладывается положение электронов вдоль гребенки, которая схематически показана внизу (эта величина пропорциональна времени движения электрона).

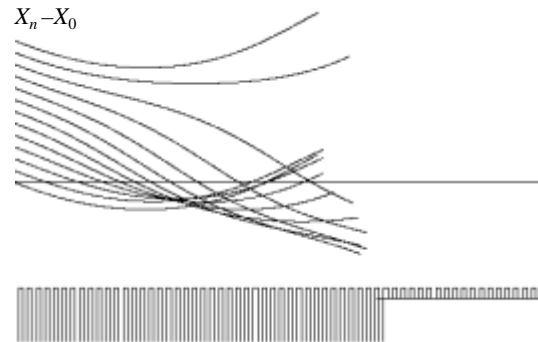


Рис. 2. Группировка электронов в слое, близком к поверхности гребенки. Взаимное положение электронов в подвижной системе координат. Сгусток (пересечение траекторий) расположен примерно в средней части первой гребенки

На рисунке показано движение 12 электронов, которые равномерно влетают в пространство над гребенкой на протяжении одного периода высокочастотного поля. При отсутствии высокочастотного поля их траектории на графике – параллельные прямые. Место пересечения нескольких кривых означает формирование сгустка электронов в этой части пространства. Видно, что формирование сгустка в этом слое происходит примерно в средней части по длине гребенки. Все электроны этого слоя оседают на поверхности первой гребенки (траектория заканчивается при попадании электрона на поверхность гребенки).

На рис. 3 показана группировка электронов в слое, который находится в средней части пучка.

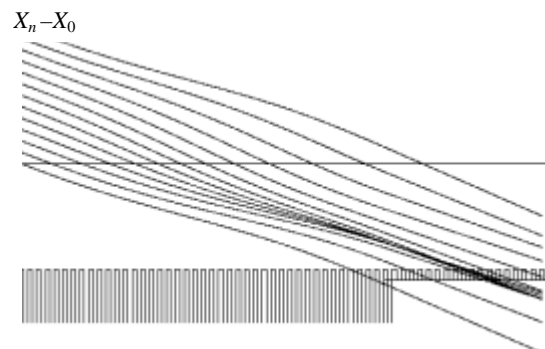


Рис. 3. Группировка электронов в слое, находящемся примерно в средней части ленточного пучка. Сгусток сформировался примерно на границе между первой и второй гребенками

Начальная скорость электронов и угол наклона магнитного поля заданы такими же, как в первом случае. Электроны этого слоя входят в систему на расстоянии 0,35 периода от поверхности гребенки примерно в средней части по

толщине ленточного пучка. При заданном угле наклона магнитного поля этот слой электронов попадет на поверхность гребенки (условную) только в области 140 резонатора. Видно, что электроны этого слоя собираются в сгусток примерно в конце первой гребенки. Все электроны слоя выходят за пределы первой и второй гребенок (не оседают на их поверхностях).

Для того чтобы сгусток попал примерно в среднюю часть второй гребенки, следует использовать слой еще более удаленный от поверхности гребенки. Мы подобрали прицельное расстояние для такого слоя. Оно равно 0,38 периода гребенки. На таком расстоянии от поверхности гребенки электроны слоя входят в область высокочастотного поля. При заданном угле наклона магнитного поля этот слой электронов попадает на условную поверхность гребенки в области 152 резонатора. Группировка электронов в этом слое показана на рис. 4.

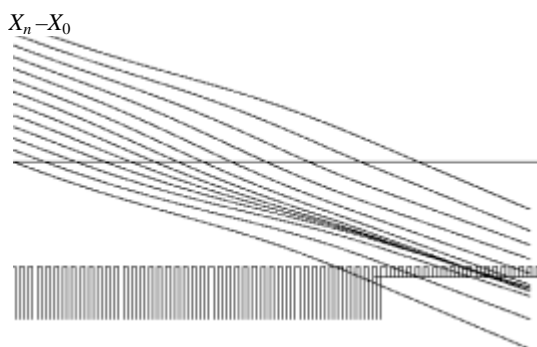


Рис. 4. Группировка электронов в слое пучка, удаленном от поверхности гребенки. Сгусток расположен примерно в средней части второй гребенки

Видно, что электроны этого слоя действительно собираются в сгусток примерно в средней части второй гребенки. Сгусток оказался компактным и довольно долго не распадался при движении вдоль системы. Отметим, что в сгусток удается собрать только около половины электронов слоя.

Важно отметить следующую особенность группировки электронов с помощью клинотрона. Оказалось, что электронный сгусток, который формируется в нужном месте по длине второй замедляющей системы, довольно далеко удален от поверхности второй гребенки. Легко вычислить, что в нашем конкретном примере это удаление составило около 0,07 мм. Для эффективной работы второго каскада в режиме клинотрона желательно, чтобы пучок в области сгустка был близок к поверхности второй гребенки и даже рассеивался на ней. Это условие можно выполнить конструктивно, если немного сместить поверхности двух гребенок относительно друг друга или использовать для фокусировки электронного пучка слабо неоднородное магнитное поле, чтобы приблизить сгусток к поверхности второй гребенки.

Расчеты показывают, что подбирая угол наклона магнитного поля и амплитуду высокочастотного поля (изменяя ток прибора), можно смещать сгусток электронов по длине гребенки второго каскада.

Таким образом, показано, что клинотрон может использоваться для модуляции электронного пучка в умножителях частоты.

Выводы. Проведено численное исследование процессов группировки электронных сгустков в генераторах типа «клинотрон». Установлено, что в режиме с максимальной генерируемой мощностью в слое ленточного пучка, близком к поверхности гребенки, сгусток электронов формируется примерно в средней части по длине гребенки, и при дальнейшем движении все электроны этого слоя оседают на поверхности гребенки. Слои, удаленные от поверхности гребенки, формируются в сгустки тем позже, чем дальше этот слой от поверхности гребенки (эффект послышной группировки). Электроны удаленных от поверхности слоев выходят за пределы гребенки и формируются в сгустки уже на некотором удалении от конца гребенки. Это дает возможность использовать клинотрон для модуляции электронных пучков в умножителях частоты.

При рабочих напряжениях 3...5 кВ и толщине пучков около 0,15 мм такие процессы группировки характерны для клинотронов средней части миллиметрового диапазона волн (3...5 мм). В более коротковолновой части диапазона неоднородность группировки по слоям возрастает, а в более длинноволновом диапазоне – будет заметно проявляться только при использовании более толстых пучков.

В заключение сообщим, что двухкаскадный клинотрон с приведенными выше параметрами модулирующей секции нам удалось реализовать экспериментально и получить умножитель в субмм диапазоне волн на длину волны $\lambda \approx 0,93$ мм. Подробно этот экспериментальный результат будет описан в нашей следующей работе.

Библиографический список

1. *Клинотрон* / Г. Я. Левин, А. И. Бородкин, А. Я. Кириченко и др. / под ред. А. Я. Усикова. – К.: Наук. думка, 1992. – 200 с.
2. *Еремка В. Д.* Умножители частоты с наклонным электронным потоком / В. Д. Еремка // *Радиофизика и электрон.*: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2007. – 12, спец. вып. – С. 81–103.
3. *Еремка В. Д.* Экспериментальное исследование миллиметрового умножителя частоты с высоким коэффициентом умножения / В. Д. Еремка, А. Я. Кириченко // *Тр. ИРЭ АН УССР.* – Х., 1970. – 18. – С. 138–148.
4. *Milcho M. V.* Two-stage oscillators of submillimeter waves / M. V. Milcho, B. P. Yephimov, V. D. Yeryomka // *Proc. SPIE.* – 1994. – 2250. – P. 235–236.
5. *Андрушкевич В. С.* Нелинейная теория клинотрона / В. С. Андрушкевич, Ю. Г. Гамаюнов, Е. В. Патрушева // *Радиотехника и электрон.* – 2010. – 55, № 3. – С. 355–361.

6. Андрушкевич В. С. Нестационарная теория клинотрона / В. С. Андрушкевич, Ю. Г. Гамаюнов, Е. В. Патрушева // Радиотехника и электрон. – 2011. – 56, № 4. – С. 493–499.
7. Одаренко Е. Н. Нелинейная теория неавтономных многомерных электронно-волновых систем миллиметрового диапазона (усилители и умножители) / Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Успехи современной радиоэлектрон. – 2007. – № 10. – С. 33–45.
8. Мильчо М. В. Учет трехмерного движения электронов в генераторах типа «клинотрон». Ч. 1. Методика численного исследования / М. В. Мильчо // Радиофизика и электрон. – 2010. – 1(15), № 3. – С. 83–91.
9. Мильчо М. В. Учет трехмерного движения электронов в генераторах типа «клинотрон». Ч. 2. Анализ реальных приборов / М. В. Мильчо // Радиофизика и электрон. – 2010. – 1(15), № 4. – С. 58–65.
10. Особенности режимов работы генераторов типа «клинотрон» / М. В. Мильчо, Б. П. Ефимов, В. В. Завертанний, В. В. Гончаров // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2005. – 10, № 3. – С. 435–440.
11. Кириленко А. А. Анализ трехмерных замедляющих систем на основе метода обобщенных матриц рассеяния / А. А. Кириленко, С. Л. Сенкевич, С. А. Стещенко // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2007. – 12, спец. вып. – С. 122–129.
12. Мильчо М. В. Метод конформных отображений для расчета высокочастотных электромагнитных полей в замедляющих системах. Ч. 1. Случай больших замедлений / М. В. Мильчо // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2003. – 8, № 1. – С. 136–147.
13. Мильчо М. В. Метод конформных отображений для расчета высокочастотных электромагнитных полей в замедляющих системах. Ч. 2. Электродинамические решения эквивалентные электростатическим / М. В. Мильчо // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2003. – 8, № 2. – С. 259–268.
14. Мильчо М. В. Метод конформных отображений для расчета высокочастотных электромагнитных полей в замедляющих системах. Ч. 3. Анализ конкретных систем / М. В. Мильчо // Радиофизика и электрон.: сб. науч. тр. / Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2003. – 8, № 3. – С. 374–385.

Рукопись постуила 24.03.2015.

M. V. Milcho

ELECTRON BUNCHING IN THE CLINOTRON-TYPE OSCILLATORS. “CLINOTRON” AS A FREQUENCY MULTIPLIER

There is a problem of designing convenient in use and not particularly expensive oscillators for mastering the sub-millimetre waveband. The backward wave oscillators (BWOs) provide good results in the long-wavelength part of the sub-millimetre waveband. However, their advancement in the short-wavelength part of the sub-millimetre waveband causes substantial problems. Existing technological opportunities do not allow to obtain extremely thin high-current-density electron beams necessary for this waveband. Application of the frequency multipliers could weaken requirements to the electron beams considerably. A clinotron-type oscillator can be used for bunching electron beam in the frequency multiplier. In the clinotron oscillator, a wide and comparatively thick sheet electron beam is directed at a small angle to the surface of the slow-wave structure and is partly dispersed on this surface. Clinotron provides output powers a few orders of magnitude greater than conventional BWOs of the same waveband. This is important for obtaining good (i.e., deep) bunch-

ing of an electron beam. In clinotron-type oscillators, it is necessary to investigate the process of dense electron bunching and to clarify the conditions of its use for bunching electron beam in a frequency multiplier. In this article, numerical simulation of electron bunching is conducted in the clinotron by means of our previously in-house designed special computer program, which takes into account the specifics of the clinotron operational regime. Three-dimensional motion of electron is investigated in the finite focusing (guide) magnetic field. As a result of numeral simulations, we find the effect of “layer-by-layer” bunching of the electron beam in a clinotron-type oscillators. The farther an electron layer is located from the surface of the slow-wave structure the later electron bunching in that layer occurs. We show that singling out the clinotron operating regime and the slope angle of the guide magnetic field to the surface of the comb allows one to ensure the formation of dense electron bunches in the part of the beam outside the clinotron slow-wave structure, where the second slow-wave structure (working in the power-catching regime) must be located. Thus, the principal possibility of the clinotron use for designing a frequency multiplier is proved.

Key words: vacuum electron device, clinotron, bunching, frequency multiplier, numerical simulation.

М. В. Мильчо

ГРУПУВАННЯ ЕЛЕКТРОНІВ У ГЕНЕРАТОРАХ ТИПУ «КЛИНОТРОН». КЛИНОТРОН ЯК ПОМНОЖУВАЧ ЧАСТОТИ

Існує проблема створення зручних в експлуатації та не особливо дорогих генераторів для освоєння субміліметрового діапазону хвиль, особливо у його короткохвильовій частині. Генератори типу лампи зворотної хвилі (ЛЗХ) дають гарні наслідки у довгохвильовій частині субміліметрового діапазону, однак при просуванні в короткохвильову частину діапазону з'являються великі труднощі. Існуючі технологічні можливості не дозволяють отримати необхідні для цього діапазону дуже тонкі електронні пучки з великою густиною струму. Значно послабити вимоги до електронних пучків можна, якщо використовувати помножувачі частоти. Для модуляції електронного пучка за густиною у помножувачах частоти можливо використати генератор типу «клинотрон». У клинотроні широкий та порівняно товстий електронний пучок спрямовано під малим кутом до поверхні системи для сповільнення хвиль. Пучок частково розсіюється на цій поверхні. Клинотрон забезпечує вихідну потужність на декілька порядків більшу, ніж звичайні ЛЗХ. Це важливо для отримання доброї (глибокої) модуляції електронного пучка. Необхідно дослідити процес групування електронів у щільні згустки у генераторах типу «клинотрон» та визначити умови використання клинотронів для модуляції електронів за густиною у помножувачах частоти. У роботі проведено числове дослідження групування електронів у клинотроні за допомогою спеціальної програми, яку ми розробили раніше для врахування специфіки клинотроного режиму. Досліджується тривимірний рух електронів в обмеженому (не безкінечному) магнітному полі. У результаті числового дослідження було виявлено ефект пошарового групування електронів у клинотронних генераторах: чим далі розташований шар електронів від поверхні системи для уповільнення хвиль, тим пізніше відбувається групування електронів у згустки в цьому шарі. Показано, що добираючи режим роботи клинотрона та нахил фокусуєного магнітного поля до поверхні гребінки, можна забезпечити формування щільних електронних згустків у частині пучка вже за межами уповільнюючої системи клинотрона, де має бути розташована друга уповільнююча система, яка працює в режимі відбирача потужності. Таким чином, доведено можливість використовувати клинотрон при створенні помножувачів частоти.

Ключові слова: електроніка, клинотрон, групування, помножувач частоти, числовий рахунок.