

**А. Н. Кулешов**

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

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

E-mail: [jeanalexkh@gmail.com](mailto:jeanalexkh@gmail.com)

## РАЗРАБОТКА КОМПАКТНЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО И СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ

Компактные источники электромагнитного излучения коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов нашли широкое применение при спектральном анализе веществ. Наиболее мощными в указанных диапазонах являются вакуумные электронные приборы, и проблемы дальнейшего повышения генерируемой мощности вместе с повышением частоты генерируемых колебаний, также как и перестройки частоты колебаний в широких пределах, не теряют своей актуальности. В работе представлены результаты исследований, направленные на разработку компактных клинотронов субмиллиметрового диапазона, а также описаны результаты расчетов по увеличению выходной мощности клинотронов путем взаимодействия с гибридными объемно-поверхностными модами неоднородных замедляющих систем. Во второй части работы представлены результаты исследований низковольтных режимов работы мазеров на циклотронном резонансе. Также приведены результаты исследований по формированию ленточных винтовых электронных пучков для планарных мазеров на циклотронном резонансе, в которых возможна плавная перестройка частоты генерируемого колебания путем изменения расстояния между зеркалами резонатора подобно генераторам дифракционного излучения. Ил. 7. Библиогр.: 50 назв.

**Ключевые слова:** клинотрон, мазер на циклотронном резонансе, ленточный винтовой электронный пучок, магнитная формирующая система, гибридные объемно-поверхностные моды неоднородных замедляющих систем.

Субмиллиметровые (субмм) волны представляют значительный интерес для огромного числа приложений, таких как радиолокация и высокоскоростная связь, радиоастрономия и астрофизика, физика атмосферы, дистанционное сканирование с высокой разрешающей способностью и выявление спрятанного оружия или угрозы, биология и изучение веществ во всех агрегатных состояниях, физика плазмы и много других [1]. В частности, одним из примеров применения субмм электромагнитного излучения является колебательная спектроскопия, которая позволяет установить молекулярную структуру химических соединений и получить данные о химических свойствах веществ, особенно тех, которые не могут быть охарактеризованы химическими методами [2].

Одним из технически слабо оснащенных участков спектра, иногда именуемым «терагерцевым провалом», остается субмм диапазон [3]. В настоящее время в субмм спектроскопии преимущественно используются широкополосные, перестраиваемые управляющим напряжением монохроматические генераторы – лампы обратной волны (ЛОВ), перекрывающие всю коротковолновую часть миллиметрового диапазона и субмм диапазон вплоть до 0,2 мм [4]. Однако в ЛОВ мощность электромагнитного излучения на выходе падает до единиц милливатт уже начиная с длины волны 1 мм. В связи с этим перспективными в субмм диапазоне являются клинотроны [5], у которых мощность выше, чем в традиционных ЛОВ, больше чем на порядок при тех же параметрах электронной перестройки частоты генерируемых колебаний. С целью еще большего увеличения мощности клинотронов проводятся исследования, направленные на замену волноводного вывода на квазиоптический [6], а также

на работу с использованием гибридных объемно-поверхностных мод неоднородной замедляющей системы [7].

В то же время самыми мощными источниками субмм диапазона являются мазеры на циклотронном резонансе (МЦР) [8], основанные на индуцированном излучении свободных электронов в вакууме, движущихся по циклотронным траекториям. Наряду с высокой выходной мощностью, такие приборы выгодно отличаются высокой стабильностью частоты, что определяется высокой добротностью резонаторов МЦР. Однако главными недостатками МЦР являются отсутствие плавной перестройки по частоте и громоздкость установок, что препятствует их широкому применению, например в спектроскопии [9]. Уменьшение габаритов как самих приборов, так и их электрических систем питания может быть осуществлено при переходе к низким ускоряющим напряжениям с одной стороны, и работе на гармониках циклотронной частоты с другой. С целью осуществления плавной перестройки частоты МЦР наиболее эффективными методами являются: перестройка по магнитному полю при работе на модах резонатора, отличающихся продольным индексом, которые близки по частоте [10], и механическая перестройка частоты [11, 12] путем изменения расстояния между зеркалами открытого резонатора, как и в случае с генератором дифракционного излучения.

В данной работе в разд. 1 изложены результаты по разработке компактных магнитных фокусирующих систем для формирования интенсивных ленточных электронных пучков субмм клинотронов, а также приведены результаты анализа транспортировки электронного потока в провисающем магнитном поле таких систем.

В разд. 2 представлены результаты численного моделирования, направленные на увеличение выходной мощности субмм клинотронов при переходе на гибридные объемно-поверхностные моды неоднородной замедляющей системы.

Разд. 3 посвящен разработке низковольтных МЦР как с традиционной схемой и поливинтовым электронным пучком (ВЭП), так и в случае с планарной конфигурацией и ленточным ВЭП.

**1. Фокусирование интенсивных электронных ленточных пучков субмм клинотронов.** В черенковских приборах субмм диапазона эффективное взаимодействие интенсивного электронного потока с медленными волнами электродинамических систем осуществляется на определенных расстояниях порядка десятков микрометров, что оправдывает серьезные требования к системам формирования и транспортировки электронных пучков. Клинотронный режим, при котором пучок наклонен к поверхности замедляющей системы, является наиболее выгодным, что подтверждается как существенно большими уровнями мощности клинотронов по сравнению с традиционными ЛОВ [13], так и результатами исследования клинотронного режима работы в генераторе дифракционного излучения (ГДИ) [14, 15] и оротроне [16]. Однако такой режим приводит к уменьшению средней длины пролета электронов пучка в слое, в котором сосредоточено высокочастотное поле замедляющей системы прибора и, как следствие, к росту стартовых токов. Длина пролета электронов пучка в эффективном слое ВЧ-поля замедляющей системы клинотрона может быть увеличена в случае фокусировки пучка в слабонеоднородном (провисающем) магнитном поле [17], как показано на рис. 1.

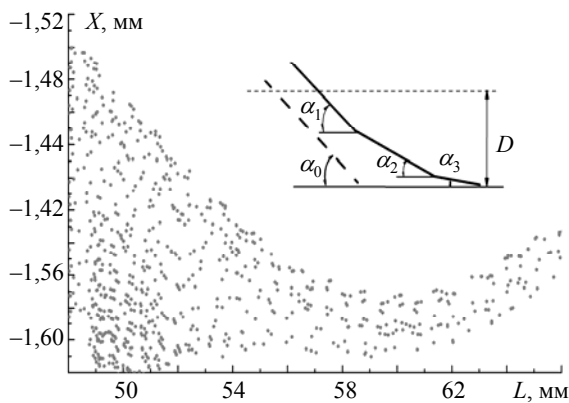
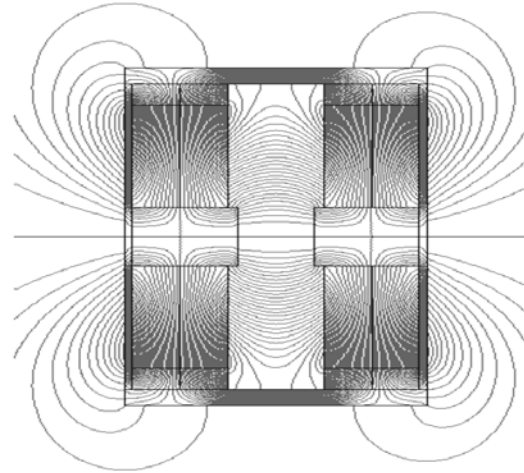


Рис. 1. Профиль электронного пучка в слабонеоднородном магнитном поле и сравнение траекторий движения электрона в случае однородного магнитного поля и слабонеоднородного

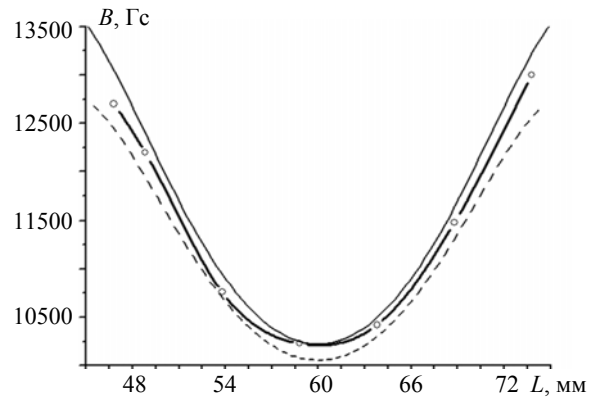
В клинотронах фокусировка электронного пучка в слабонеоднородном магнитном поле при смещении генератора от оси магнитной сис-

темы повышает эффективность взаимодействия электронного пучка с полем поверхностной волны. Это является результатом увеличения средней длины пролета электронов в эффективном слое ВЧ-поля электродинамической системы за счет искривления траектории движения, как показано на рис. 1, а как следствие, возможно повышение выходной мощности генератора [17].

Для фокусировки интенсивного ленточного электронного пучка клинотронов субмм диапазона требуется обеспечить достаточно высокое постоянное магнитное поле порядка 1 Тл и выше. В работе [18] изложены результаты, позволившие создать достаточно простую и компактную многосекционную магнитную фокусирующую систему (МФС) для клинотрона 400 ГГц, обеспечивающую в зазоре 32 мм магнитное поле до 1,2 Тл, как показано на рис. 2. При этом масса системы не превышает 10 кг.



а)



б)

Рис. 2. Распределение силовых линий магнитного поля (а) и величины индукции поля (б) в зазоре МФС: с магнитопроводом (сплошная), без магнитопровода (пунктир), экспериментальные измерения (линия с точками)

Построение оптимизированных магнитных систем из постоянных магнитов и расчет создаваемых ими магнитных полей возможны как

с помощью метода многолучевого разбиения пространства совместно с принципом геометрического подобия [19], так и в результате численных расчетов в программах *SuperFish* [20] и *CST Electromagnetic Studio* [21]. Изготовление магнитных систем из блоков сложной формы с заданным направлением вектора намагниченности магнитного материала требует большого расхода дорогостоящих редкоземельных магнитов и тщательного отбора применяемого магнитотвердого материала, что может быть минимизировано путем использования полюсных наконечников и экранов в виде магнитопроводов из железа и других магнитомягких материалов [18].

Разработанная МФС была успешно применена при построении клинотрона на диапазон частот от 340...410 ГГц [22]. В генераторе была применена высокопереванная диодная электронная пушка, формирующая тонкий ленточный электронный поток без компрессии сечением  $0,15 \times 2,5 \text{ мм}^2$ . Импрегнированный барий-оксидный катод обеспечил плотность тока электронного пучка до  $150 \text{ А/см}^2$ , что является достаточным для эффективной генерации колебаний в рассматриваемом диапазоне. Экспериментальные параметры генерируемых сигналов клинотрона измерялись с помощью квазиоптического волномера, основанного на интерферометре Майкельсона, для определения частоты колебаний, а измерение мощности производилось болометрическим методом при помощи калиброванного измерителя мощности. Полученные зависимости при электронной перестройке по частоте приведены на рис. 3.

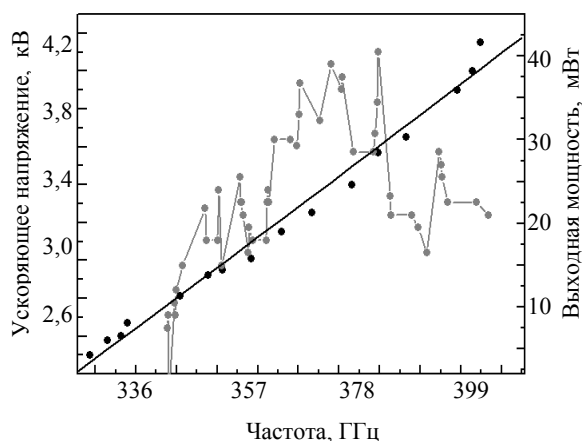


Рис. 3. Рабочие характеристики клинотрона 400 ГГц диапазона: частотная характеристика (черный), энергетическая характеристика (серый)

Клинотрон 400 ГГц возбуждался в диапазоне ускоряющих напряжений 2,6...4,3 кВ при следующих параметрах тока и напряжения накала:  $1,3...1,5 \text{ А} \times 5,0...6,8 \text{ В}$ . При этом рабочий ток изменялся в пределах 40...200 мА, а пусковой ток

составил всего 61 мА при накале  $1,35 \text{ А} \times 5,7 \text{ В}$ . При повышении тока накала на 0,08 А мощность генерируемых колебаний повышается в среднем в два раза. Это создает перспективы повышения выходной мощности в процессе тренировки электронного прибора, так как на данный момент предел по току накала еще не достигнут.

**2. Взаимодействие с гибридными объемно-поверхностными модами неоднородной гребенки для повышения мощности субмм клинотронов.** Для уменьшения потерь и увеличения добротности электродинамической системы генераторов, основанных на излучении Вавилова–Черенкова, в терагерцевом диапазоне, предлагается использование многоступенчатых замедляющих систем, как показано на рис. 4 [5, 6]. В спектре собственных колебаний многоступенчатой системы возникают объемные волны, отрывающиеся от ее поверхности (область таких колебаний на рис. 4, а закрашена серым цветом). Поэтому при расположении металлического экрана над такой замедляющей системой возможно обеспечение обратной связи по отраженной объемной волне [7].

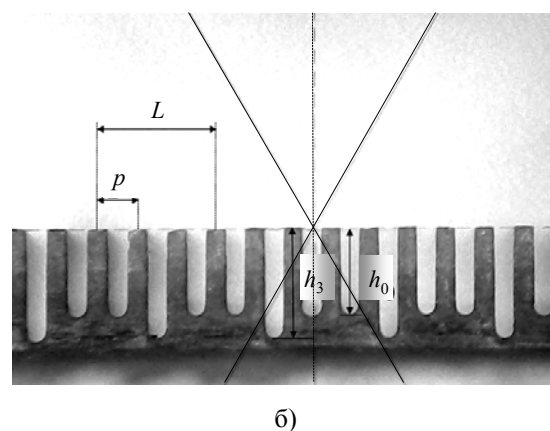
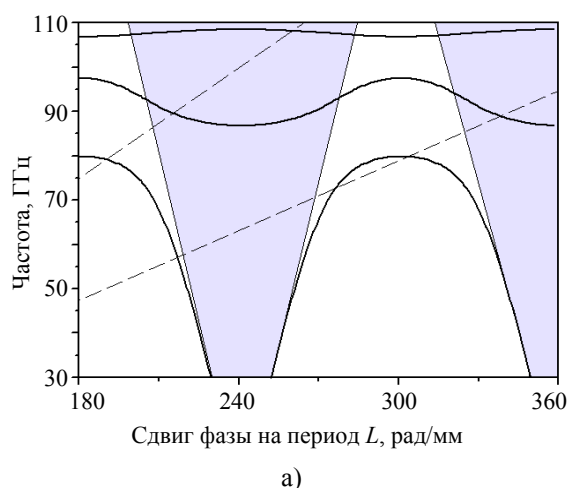


Рис. 4. Дисперсионная характеристика трехступенчатой гребенки (а), а также характерные размеры и вид замедляющей системы, изготовленной электроискровым методом (б)

Подобно ладертрону и ГДИ, в такой системе возможно уменьшение затухания прямой волны и увеличение добротности системы при высоком сопротивлении связи рабочей моды с электронным потоком. При этом обратная связь осуществляется как за счет обратной волны, так и за счет отражений. На данном этапе происходит подготовка экспериментального макета клинотрона 3-мм диапазона с трехступенчатой гребенкой для проведения «горячих» исследований.

**3. Разработка низковольтных гиротронов с поливинтовыми и ленточными электронными пучками.** В настоящее время ведется активный поиск эффективных генераторов субмм диапазона как твердотельных [23], так и электронно-вакуумных [24]. Однако проблема «терагерцевого провала» до сих пор ставит исследователей в области спектрального анализа перед сложным вопросом выбора либо маломощного и компактного генератора типа ЛОВ [13, 25, 26], клинотрона [5, 27], оротрона [28, 29], ГДИ [27, 30] и др., у которых начиная с 300 ГГц и выше по частоте мощность генерируемых колебаний не превышает нескольких сотен милливатт, либо достаточно мощных, но громоздких и дорогих приборов на магнитотормозном излучении, таких как МЦР [31–33] и лазеры на свободных электронах [34, 35].

Одним из решений представляется разработка компактных МЦР средней мощности [36]. Уменьшения габаритов магнитных систем МЦР можно добиться как за счет новых технологий в производстве сверхпроводящих магнитов, так и за счет перехода на гармоники циклотронной частоты [37]. Уменьшения же размеров самих ламп можно достичь при переходе на пониженные рабочие напряжения [38–42].

В частности, в работе [41] представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований низковольтного МЦР на диапазоне ускоряющих напряжений 2...4 кВ. В исследованном МЦР низковольтная магнетронно-инжекторная пушка (МИП) формировала поливинтовой электронный пучок в адиабатически нарастающем магнитном поле [43, 44]. Винтовой электронный пучок возбуждал моды  $TE_{11q}$  цилиндрического резонатора, как показано на рис. 5.

В ходе экспериментального исследования низковольтного МЦР перестройка по частоте осуществляется за счет изменения магнитного поля при постоянном ускоряющем напряжении. Индукция магнитного поля изменялась в пределах 0,28...0,33 Тл. Исходя из экспериментальных результатов [41] режимы генерации в низковольтном МЦР на различных модах имеют точки пересечения, благодаря чему возможна плавная перестройка частоты генерации в пределах мод цилиндрического резонатора с количеством ва-

риаций электромагнитного поля по длине резонатора до 7. Это соответствует частотному диапазону 8...9,3 ГГц, для колебаний с высшей частотой кольца по краям резонатора перестают быть закритическими и дифракционная добротность резонатора для этих колебаний резко снижается.

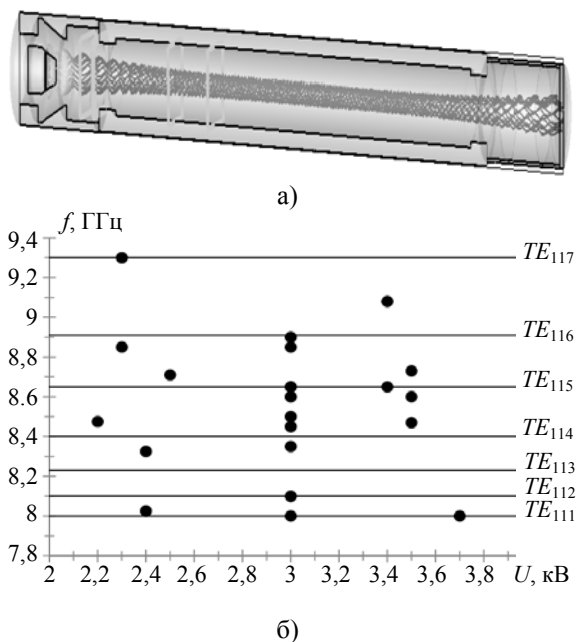


Рис. 5. Низковольтный МЦР в разрезе с траекторией электронов поливинтового пучка (а) и результаты экспериментальных исследований по возбуждению мод  $TE_{11q}$  (б)

В работе [42] на основании анализа экспериментальных исследований низковольтного режима работы МЦР предложен механизм группировки электронов в нерелятивистском случае в слабонеоднородном по сечению магнитном поле. Для реализации предложенного механизма необходимо небольшое провисание магнитного поля в области резонатора МЦР, как показано на рис. 6.

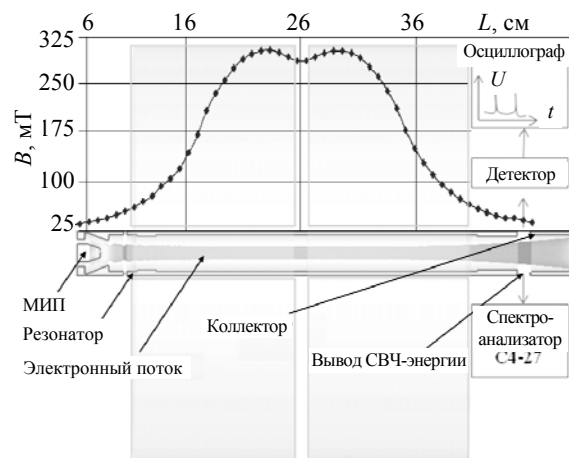


Рис. 6. Схема экспериментальных исследований низковольтного МЦР и профиль магнитного поля

В работе [42] показано, что группировка осуществляется за счет неустойчивости отрицательной массы электронов пучка. Следует отметить, что подобное явление неустойчивости отрицательной массы очень часто наблюдается в канале дрейфа пучка в адиабатическом нарастающем магнитном поле. Исследование воздействия одной из разновидностей неустойчивости отрицательной массы [45] – электростатической циклотронной неустойчивости – на формирование ВЭП, показало, что данная неустойчивость может приводить к образованию магнитных пробок и к энергетическому разбросу электронов в ВЭП, а как следствие, к существенному снижению КПД гиротрона [46].

В настоящее время ведутся работы по разработке МЦР с планарной геометрией, что приведет к многократному увеличению диапазона перестройки частоты за счет механического изменения расстояния между зеркалами [47–49]. В гиротронах с планарной геометрией необходимо сформировать и транспортировать ленточный ВЭП с величиной питч-фактора, превышающей единицу. Для этих целей разработана планарная МИП в адиабатически нарастающем магнитном поле [50]. Планарная МИП рассчитана на ускоряющее напряжение в диапазоне 1...6 кВ в зависимости от величины магнитного поля в области эмиттера. Исходя из результатов траекторного анализа [50] для данного диапазона ускоряющих напряжений максимальный ток пучка был выбран 300 мА. При дальнейшем увеличении первеанса пучка в нем возникают деформации, вызванные силами пространственного заряда, которые при формировании ленточных электронных пучков в скрещенных полях могут приводить к развитию диокотронной неустойчивости, связанной с поперечными волнами в пучке, что в случае большой протяженности пучков приводит к существенным искажениям их геометрии. Уменьшить влияние указанной неустойчивости возможно путем оптимизации распределения напряженности электрического поля в МИП наряду с углом наклона эмитирующей поверхности относительно линий магнитного поля, а также оптимизацией распределения магнитного поля и распределения напряженности электрического поля в области эмиттера.

В настоящее время нашей группой ведутся экспериментальные исследования параметров сформированных низковольтных ленточных ВЭП, в том числе и с использованием открытого резонатора. При исследовании параметров ленточного ВЭП в открытом резонаторе важно, чтобы пучок целиком попадал в каустику резонатора и весь взаимодействовал с электромагнитным полем резонатора на одной из его мод, как показано на рис. 7.

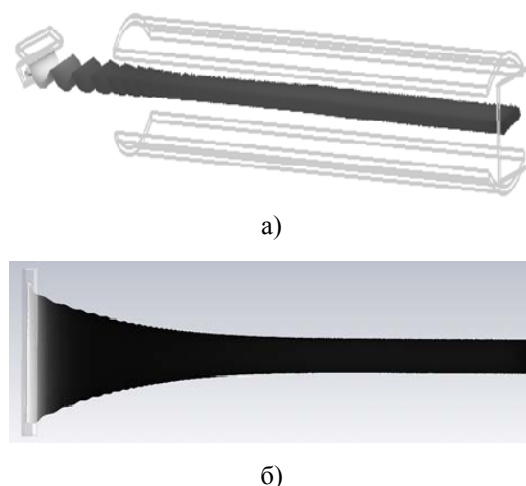


Рис. 7. Схема МЦР с открытым резонатором и ленточным винтовым пучком (а) и результаты траекторного анализа по формированию ленточного винтового пучка планарной МИП (б)

В заключение автор благодарит д-ра техн. н. Б. П. Ефимова, канд. физ.-мат. н. Э. М. Хуторяна, С. С. Пономаренко, С. А. Кишко за значительную помощь в подготовке материалов и полезные обсуждения. Также автор благодарит коллектив отдела вакуумной электроники Института радиопизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины за помощь в проведенных исследованиях, а особенно В. В. Завертанного, А. Ф. Забродского, Л. А. Кириченко, Т. В. Кудинову, С. А. Власенко, В. В. Олешко и В. Е. Ярмач.

**Выводы.** Приведены экспериментальные и теоретические результаты по разработке компактных вакуумных электронных генераторов средней мощности коротковолновой части миллиметрового и субмм диапазонов. Результаты расчетов взаимодействия интенсивных электронных потоков с гибридными объемно-поверхностными волнами неоднородных замедляющих систем клинотронов показывают возможность существенного уменьшения омических потерь и, как следствие, значительное повышение мощности генерируемых колебаний в указанных диапазонах. Экспериментальные результаты исследования низковольтного режима работы 8 ГГц гиротрона показывают возможность существенного уменьшения габаритов генераторов типа МЦР. Результаты моделирования и экспериментальных исследований параметров ленточных винтовых электронных пучков для МЦР с открытыми резонаторами, в том числе с планарной геометрией, свидетельствуют о возможности разработки генераторов на циклотронном резонансе с механической перестройкой частоты в широких пределах.

#### Библиографический список

1. Siegel P. THz technology: An overview / P. Siegel // Intern. J. of High Speed Electronics and Systems. – 2003. – 13, N 2. – P. 351–394.



2. *Накамото К.* ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений / К. Накамото; пер. с англ. под ред. Ю. А. Пентина. – М.: Мир, 1991. – 535 с
3. *Sirtori C.* Applied physics: Bridge to the terahertz gap / C. Sirtori // *Nature*. – 2002. – 147, N 5. – P. 132–133.
4. *BWO Generators for THz Dielectric Measurements* / G. A. Komandin, A. M. Prokhorov, S. V. Chuchupal et al. // *IEEE Trans. on THz Sci. and Tech.* – 2013. – 3, N 4. – P. 440–444.
5. *Клиноotron* / Г. Я. Левин, А. И. Бородин, А. Я. Кириченко и др.; под ред. А. Я. Усикова. – К.: Наук. думка, 1992. – 196 с.
6. *Лысенко Е. Е.* Экспериментальное исследование клиноотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии / Е. Е. Лысенко, О. Ф. Пишко, С. А. Чурилова // *Радиофизика и радиоастрономия*. – 1999. – 4, № 1. – С. 13–19.
7. *Колебания* в генераторе О-типа при возбуждении объемно-поверхностной моды резонатора с периодически неоднородной гребенкой / Э. М. Хуторян, С. С. Пономаренко, С. А. Кишко и др. // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. – 2013. – 21, № 2. – С. 9–19.
8. *Гапонов А. В.* Индуцированное излучение возбужденных клас-ических осцилляторов и его использование в высоко-частотной электронике / А. В. Гапонов, М. И. Петелин, В. К. Юлпатов // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 1967. – 10, № 9–10. – С. 1414–1453.
9. *Operation of Continuously Frequency-Tunable Second-Harmonic CW 330-GHz Gyrotron for Dynamic Nuclear Polarization* / A. C. Torrezan, M. A. Shapiro, J. R. Sirigiri et al. // *IEEE Trans. on Electron Devices*. – 2011. – 58, N 8. – P. 2777–2783.
10. *Dumbrajs O.* Frequency Tunable Gyrotron FU CW VA for Measuring Hyperfine Split of Positronium / O. Dumbrajs, T. Idehara // *J. Infrared Milli Terahz Waves*. – 2010. – 31, N 11. – P. 1265–1270.
11. *МЦР-генераторы* с механической перестройкой частоты / И. И. Антаков, С. Н. Власов, В. А. Гинцбург и др. // *Электронная техн. Сер. 1. Электрон. СВЧ*. – 1975. – № 8. – С. 20–25.
12. *140-GHz Gyrotron Experiments Based on a Confocal Cavity* / Wen Hu, M. A. Shapiro, K. E. Kreicher, R. J. Temkin // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 1998. – 26, N 3. – P. 366–374.
13. *Лампы* обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн / Е. М. Гершензон, М. Б. Голант, А. А. Негирев, В. С. Савельев; под ред. Н. Д. Девяткова. – М.: Радио и связь, 1985. – 137 с.
14. *Нерубенко В. В.* Исследование ГДИ в миллиметровом диапазоне длин волн / В. В. Нерубенко, А. И. Цвык // *Радиотехника: науч.-техн. сб. / Харьков. гос. ун-т*. – X, 1971. – Вып. 19. – С. 107–113.
15. *ГДИ* с наклоном фокусирующего магнитостатического поля / А. И. Цвык, А. В. Нестеренко, В. Н. Желтов, Э. М. Хуторян // 11-я Междунар. конф. СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы конф. – Севастополь, 2001. – С. 193–194.
16. *Махалов П. Б.* Теория оротрона с наклонным электронным пучком / П. Б. Махалов, А. Э. Федотов // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2008. – 13, № 7. – С. 62–67.
17. *Транспортровка* нерелятивистских электронных потоков в слабонеоднородных магнитных фокусирующих полях клиноотронов субмиллиметрового диапазона / С. С. Пономаренко, С. А. Кишко, А. Н. Кулешов и др. // *Вестник ХНУ. Сер. Радиофизика и электрон.* – 2012. – Вып. 21, № 1038. – С. 77–82.
18. *Завертанный В. В.* Магнитная фокусирующая система интенсивных электронных пучков для клиноотронов субмиллиметрового диапазона / В. В. Завертанный, С. А. Кишко, С. С. Пономаренко // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика*. – 2012. – 20, № 5. – С. 112–120.
19. *Капитонов В. Е.* Оптимизация магнитных фокусирующих систем методом синтеза / В. Е. Капитонов // *Электрон. миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов: сб. науч. тр.* – К.: Наук. думка, 1992. – С. 172–178.
20. *Poisson Superfish* is a collection of programs for calculating static magnetic and electric fields and radio-frequency electromagnetic fields in either 2-D Cartesian coordinates or axially symmetric cylindrical coordinates [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://laacg1.lanl.gov/laacg/services/download\\_sf.phtml](http://laacg1.lanl.gov/laacg/services/download_sf.phtml). – Загл. с экрана.
21. *3D EM Field Simulation – CST Computer Simulation Technology* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.cst.com](http://www.cst.com). – Загл. с экрана.
22. *400-GHz Continuous-Wave Clinotron Oscillator* / S. S. Ponomarenko, S. A. Kishko, V. V. Zavertanniy et al. // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2013. – 41, N 1. – P. 82–86.
23. *Samoska L. A.* An Overview of Solid-State Integrated Circuit Amplifiers in the Submillimeter-Wave and THz Regime / L. A. Samoska // *IEEE Trans. on THz Sci. Tech.* – 2011. – 1, N 1. – P. 9–24.
24. *Vacuum Electronic High Power Terahertz Sources* / J. Booske, R. J. Dobbs, C. D. Joye et al. // *IEEE Trans. on THz Sci. Tech.* – 2011. – 1, N 1. – P. 54–75.
25. *Millimeter and Submillimeter Wave Spectroscopy of Solids* // *Topics in Applied Physics* / Ed. G. Gruner. – Berlin: Springer-Verlag, 1998. – B. 74. – 287 p.
26. *Terahertz BWO-Spectroscopy* / B. Gorshunov, A. Volkov, I. Spektor et al. // *Intern. J. Infrared and Millimeter Waves*. – 2005. – 26, N 9. – P. 1217–1240.
27. *Вертий А. А.* Поляризация атомных ядер / А. А. Вертий, И. М. Карнаухов, В. П. Шестопалов. – К.: Наук. думка, 1990. – 232 с.
28. *Русин Ф. С.* Оротрон как генератор миллиметрового диапазона / Ф. С. Русин, Г. Д. Богомолов // *Электрон. больших мощностей*. – 1968. – Вып. 5. – С. 38.
29. *Terahertz Orotrons and Oromultipliers* / V. L. Bratman, B. S. Dumes, A. E. Fedotov et al. // *IEEE Tran. Plasma Sci.* – 2010. – 38, N 6. – P. 1466–1471.
30. *Генераторы* дифракционного излучения / В. П. Шестопалов, А. А. Вертий, Г. П. Ермак и др. – К.: Наук. думка, 1991. – 320 с.
31. *Гапонов-Грехов А. В.* Мазеры на циклотронном резонансе / А. В. Гапонов-Грехов, М. И. Петелин // *Наука и человечество*. – 1980. – С. 283–297.
32. *Nusinovich G. S.* Introduction to the Physics of Gyrotrons / G. S. Nusinovich. – Baltimore: John Hopkins University Press, 2004. – 352 p.
33. *Цимринг Ш. Е.* Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков / Ш. Е. Цимринг. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2012. – 576 с.
34. *Маршалл Т. С.* Лазеры на свободных электронах / Т. С. Маршалл; пер. с англ. под ред. А. Н. Сандалова. – М.: Мир, 1987. – 240 с.
35. *O'Shea P.* Free-Electron Lasers: Status and Applications / P. O'Shea, H. P. Freund // *Science*. – 2001. – 292, N 23. – P. 1853–1858.
36. *Idehara T.* Development and Applications of High-Frequency Gyrotrons in FIR FU Covering the sub-THz to THz Range / T. Idehara, S. P. Sabchevski // *J. Infrared Milli Terahz Waves*, 2012. – 33, N 7. – P. 667–694.
37. *Development of a Compact sub-THz Gyrotron FU CW CI for Application to High Power THz Technologies* / T. Idehara, J. C. Mudiganti, L. Agusu et al. // *J. Infrared Milli Terahz Waves*. – 2012. – 33, N 7. – P. 724–744.
38. *Технологический* гиротрон с низким ускоряющим напряжением / А. Л. Гольденберг, М. Ю. Глявин, Н. А. Завольский, В. Н. Мануилов // *Изв. вузов. Радиофизика*. – 2005. – 68, № 10–11. – С. 835–841.
39. *Efficient low-voltage operation of a CW gyrotrons oscillator at 233 GHz* / M. K. Hornstein, V. S. Bajaj, R. G. Griffin, R. J. Temkin // *IEEE Trans. Plasma Sci.* – 2007. – 35, N 1. – P. 27–30.
40. *Low-voltage gyrotrons* / M. Yu. Glyavin, N. A. Zavolskiy, A. N. Sedov, G. S. Nusinovich // *Phys. Plasmas*. – 2013. – 20, iss. 3. – 033103 (7 p.)
41. *Возбуждение* мазера на циклотронном резонансе при низких ускоряющих напряжениях / Б. П. Ефимов, С. А. Кишко, А. Н. Кулешов и др. // *Вестн. ХНУ. Сер. Радиофизика и электрон.* – 2010. – Вып. 17, № 942. – С. 81–86.

42. *Low-Voltage Cyclotron Resonance Maser* / S. A. Kishko, S. S. Ponomarenko, A. N. Kuleshov et al. // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2013. – 41, N 11, P. 1–5.
43. *Yefimov B. P. Adiabatic Magnetron Injection Gun for Low-Voltage Gyrotron* / B. P. Yefimov, A. N. Kuleshov, V. F. Zhiglo // Digest of Intern. Vacuum Electronic Conf. (IVEC 2007). – Kitakyushu, 2007. – P. 265–266.
44. *Кулешов А. Н. Формирование электронных потоков с криволинейным движением для приборов типа ЛСЭ и МЦР* / А. Н. Кулешов, Б. П. Ефимов // Радиофизика и электрон.: сб. научн. тр. Ин-т радиофизики и электрон. НАН Украины. – Х., 2008. – 13, спец. вып. – С. 301–314.
45. *Динамические процессы в винтовых электронных потоках гиротронов* / О. И. Лукша, Д. Б. Самсонов, Г. Г. Соминский, С. В. Семин // Журн. техн. физики. – 2013. – 83, вып. 5. – С. 132–140.
46. *Запечалов В. Е. Гиротрон: пределы роста мощности и КПД* / В. Е. Запечалов // Изв. вузов. Радиофизика. – 2006. – 49, № 10. – С. 864–871.
47. *Исследования планарных мазеров с пространственно распределенными двумерными обратными связями* / А. В. Аржанников, В. Б. Бобылев, Н. С. Гинзбург и др. // Вопросы атомной науки и техники. Плазменная электрон. и новые методы ускорения. – 2003. – № 4. – С. 5–8.
48. *High-Power Terahertz-Range Planar Gyrotrons with Transverse Energy Extraction* / N. S. Ginsburg, I. V. Zotova, A. S. Sergeev et al. // Phys. Rev. Lett. – 2012. – 108, Iss. 10. – 105101 (4 p.)
49. *Разработка 75 ГГц планарного гиротрона с поперечным выводом энергии* / С. А. Кишко, А. Н. Кулешов, М. Ю. Глявин и др. // Радиотехника и электрон. – 2014. – 59, № 4. – С. 450–457.
50. *Магнетронно-инжекционная пушка для планарного мазера на циклотронном резонансе* / С. А. Кишко, А. Н. Кулешов, С. С. Пономаренко, Б. П. Ефимов // Вестн. ХНУ. Сер. Радиофизика и электрон. – 2012. – Вып. 21, № 1038. – С. 83–88.

*Рукопись поступила 09.09.2013 г.*

A.N. Kuleshov

#### DEVELOPMENT OF COMPACT MEDIUM POWER SOURCES OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF MILLIMETER AND SUBMILLIMETER RANGES

Compact sources of electromagnetic radiation of both short part of millimeter and sub-millimeter ranges are widely used in spectroscopy. Most powerful devices in these regions are VEDs

and the problems of further increase of both VED output power and frequency as well as frequency tuning in wide range are actual. Research results dedicated to the development of compact clintotrons in sub-millimeter range and also simulation results on clintotron output power increase considering the interaction of intense electron beam with hybrid space-surface modes of inhomogeneous SWS have been presented. The second part of the paper is dedicated to research results of low-voltage CRM. Also the research results on the generation of ribbon helical electron beam for planar CRM, which is capable to frequency tuning in wide range by changing the distance between the resonators mirrors such as in diffraction radiation oscillator, are presented.

**Key words:** clintotron, cyclotron resonance maser, ribbon helical electron beam, magnetic focusing system, hybrid space-surface modes of inhomogeneous grating.

О. М. Кулешов

#### РОЗРОБКА КОМПАКТНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ МІЛІМЕТРОВОГО ТА СУБМІЛІМЕТРОВОГО ДІАПАЗОНІВ

Компактні джерела електромагнітного випромінювання короткохвильової частини міліметрового та субміліметрового діапазонів знайшли широке застосування у спектральному аналізі речовин. Найбільш потужними у вказаних діапазонах є вакуумні електронні прилади, і проблеми подальшого підвищення потужності та частоти коливань, що генеруються, також як і перебудова частоти коливань у широких межах, не втрачають своєї актуальності. У роботі подано результати досліджень, що спрямовані на розробку компактних клинотронів субміліметрового діапазону, а також описано результати розрахунків з підвищення вихідної потужності клинотронів завдяки взаємодії з гібридними об'ємно-поверхневими модами неоднорідних систем, що сповільнюють хвилі. У другій частині роботи подано результати досліджень низьковольтних режимів роботи мазерів на циклотронному резонансі. Також наведено результати досліджень з формування стрічкових гвинтових електронних пучків для планарних мазерів на циклотронному резонансі, у яких можлива плавна перебудова частоти коливань, що генеруються, змінюючи відстані між дзеркалами резонатора подібно до генераторів дифракційного випромінювання.

**Ключові слова:** клинотрон, мазер на циклотронному резонансі, стрічковий гвинтовий електронний пучок, магнітна система, що формує пучок, гібридні об'ємно-поверхневі моди неоднорідних систем, що сповільнюють.