

А. Я. Кириченко, В. М. Яковенко

*Институт радиофизики и электроники им. А. Я. Усикова НАН Украины,
12, ул. Ак. Проскуры, Харьков, 61085, Украина
E-mail: ire@ire.kharkov.ua*

В работе кратко представлено результаты по созданию вакуумных широкодиапазонных генераторов электромагнитных волн в миллиметровом диапазоне электромагнитного спектра и по исследованию эффекта повышения энергообмена электронного потока с замедленной волной при его наклоне на поверхность периодической структуры. Эти исследования были начаты в Институте радиофизики и электроники Академии наук Украины в 1956 году. Указано на резонансное влияние этих исследований на работы, проводимые в других институтах при разработке генераторов других типов. Указано на особенности возбуждения электромагнитного излучения при падении электронного потока под скользящими углами не только на поверхность периодических структур, но также на гладкие и шероховатые металлические поверхности при возбуждении переходного излучения. Приведены характеристики разработанных клинотронов и результаты их мелкосерийного производства, обеспечивающих радиофизические исследования и разработку электронной и радиотехнической аппаратуры. Табл. 3. Библиогр.: 30 назв.

Ключевые слова: генераторы, электромагнитные волны, электронный пучок, клинотрон, угол наклона.

Два года тому назад на Международной конференции CriMiCo-2004 в Севастополе (Крым) прозвучал доклад под кратким названием «Расчет и оптимизация по КПД гироклинотрона». Работа была выполнена профессором А. А. Кураевым и А. К. Сеницыным - сотрудниками Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники [1]. В том же году ими была опубликована работа [2], в которой более подробно рассмотрены вопросы, затронутые в докладе на конференции. Странное сочетание слагаемых в названии какого-то нового неизвестного до этого широкой научной публике устройства или прибора - между греческими словами *γυροειδ* (кружусь) и *τροπιδ* (возбуждаю), в значительной мере знакомых для присутствующих в зале, затерялось слово явно не греческого происхождения. В английском языке существует слово *clean* (чистый), что могло бы подтвердить английское или американское происхождение названия этого прибора. Однако и в русском языке существует широко распространенное слово - *клин*. Стоит вспомнить хотя бы известную поговорку «Клин клином вышибают». В ином, но также близком сочетании, можно встретиться со словом *клин* в научной литературе в начале 80-х гг. в «Докладах академии наук Украины» - ортоклинотронный эффект [3].

В действительности, русское слово *клин* вошло в лексикон разработчиков и исследователей электронных приборов сверхвысоких частот (СВЧ) ровно 50 лет тому назад (с конца 1956 г.). Именно тогда лампа обратной волны (ЛОВ), самого коротковолнового на то время радиодиапазона, была продемонстрирована в Институте радиофизики и электроники Академии наук Украины (ИРЭ АН УССР). Поначалу (по крайней мере, первых пару десятков лет) сочетание слова *клин* с греческим *трон* было лишь на устах исследователей и разработчиков СВЧ аппаратуры, да иногда

встречалось в научно-технических отчетах или в научных публикациях ограниченного пользования. Однако к электровакуумному СВЧ генератору миллиметрового диапазона под названием - клинотрон был проявлен интерес широкого круга исследователей, которые пытались понять особенности «клинотронного эффекта» и возможностей его использования в разрабатываемых ими устройствах. Этот эффект привлек внимание широкого круга теоретиков, пытающихся на кончике пера объяснить явление повышения энергообмена при нарушении коллинеарности между направлением движения заряженных частиц и вектором напряженности электрического поля. Ведь до настоящего времени оптимальными условиями взаимодействия электронов с переменным электрическим полем считается совпадение направления скорости электрона с направлением распространения волны при наличии в ней компоненты электрического поля параллельной ее распространению. А в первой половине двадцатого века, когда были изобретены лампа бегущей (ЛБВ) (1942 г), а затем и ЛОВ (1952 г.), направление движения электронного потока параллельно поверхности, замедляющей электромагнитную волну, было насколько естественным, что ни у кого даже в мыслях не могло появиться, что может быть что-то отличное от этих представлений. У заместителя научного руководителя по выполнению одной из научно-исследовательских разработок (под шифром «Боксит» [4]) Григория Яковлевича Левина, любителя неожиданных проявлений в физических экспериментах, сразу же после обнаружения исполнителями научной разработки генерации электромагнитных волн миллиметрового диапазона при нарушении параллельности между направлением перемещения электронного потока и поверхности периодической системы в лампах обратной волны О-типа (ЛОВ О) родилось представление о клине. Так как такое физи-

ческое проявление было нетривиальным, он сразу же дал ему название клинофронного эффекта. И сразу же оформил и направил в Комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР заявку на изобретение, а к концу 1956 г. она была признана изобретением нового типа ЛОВ. В то время это изобретение не предназначалось для широкой публикации, и было опубли-

ковано лишь больше чем через полтора десятка лет [5]. Г. Я. Левин настоятельно просил дать этому типу ЛОВ О название клинофрон. Эксперты и патентоведы не согласились с этим названием. Однако в отчетах и научных публикациях такое название было закреплено за новым типом ЛОВ О миллиметрового диапазона, создаваемых в ИРЭ АН УССР.

Институт радиобезопасности и электроники АН УССР

УТВЕРЖДАЮ:

Директор ИРЭ АН УССР

/Усиков/ *А. Я. Усиков*

"30" марта 1957 г.

ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

ПО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ "РАЗРАБОТКА
МЕТОДОВ СОЗДАНИЯ ШИРОКОДИАПАЗОННЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ВОЛН"

шифр "БОКСИТ"

Работа выполнена в лаборатории поглощения радиоволн
ИРЭ АН УССР.

научный Руководитель зав. лабораторией кандидат
физико-математических наук А. Я. УСИКОВ. *А. Я. Усиков*

Заместитель научного руководителя кандидат физико-
математических наук Г. Я. ЛЕВИН. *Г. Я. Левин*

Основные исполнители:

профессор ГЕРМАН В. Л. *В. Л. Герман*
ст. инженер ЛЫСОВ Г. В. *Г. В. Лысов*
ст. инженер БОРОДКИН А. И. *А. И. Бордкин*
инженер КИРИЧЕНКО А. Я. *А. Я. Кириченко*

Исполнители:

Ст. инженер теор. отдела КАНЕР Э. А. *Э. А. Канер*
мл. научный сотрудник теор. отдела КАНТОВИЧ В. М.
мл. научный сотрудник теор. отдела ФИЛИПОВ Ю. Ф. *Ю. Ф. Филипов*
инженеры лаборатории ГЛЕБОВ Н. А.
ПРОНИНА И. Г. *И. Г. Пронина*
ЕВТУШЕНКО А. А. *А. А. Евтушенко*

Союз Советских
Социалистических
Республик



Комитет по делам
изобретений и открытий
при Совете Министров
СССР

О П И С А Н И Е ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

341113

Зависимое от авт. свидетельства № —

Заявлено 17.XII.1956 (№ 462923/26-25)

с присоединением заявки № —

Приоритет —

Опубликовано 05.VI.1972. Бюллетень № 18

Дата опубликования описания 23.VI.1972

М. Кл. Н 01j 25/00

УДК 621.385.6(088.8)

Автор
изобретения

Г. Я. Левин

Заявитель

ЛАМПА ОБРАТНОЙ ВОЛНЫ

2

Изобретение относится к радиотехнике, в частности к лампам обратной волны с продольным магнитным полем.

В известных лампах обратной волны с продольным магнитным полем для генерации радиоволн миллиметрового диапазона имеют место сравнительно низкие к.п.д. и мощность, что ведет к ограничению использования ламп в схемах генерации.

В предлагаемой лампе обратной волны поверхность взаимодействия ее замедляющей системы расположена под острым углом к оси параксиального электронного пучка, что позволяет увеличить к.п.д. и мощность за счет использования широких пучков эмиттируемых электронов.

На чертеже представлена схема предлагаемой лампы.

На схеме приняты следующие обозначения: эмиттер 1; электронная пушка 2; замедляющая система 3; поглощающая нагрузка 4; выходное устройство 5 лампы.

Широкий пучок электронов, создаваемый электронной пушкой 2, направляется в лампе не параллельно поверхности ее замедляющей системы 3, выполненной, например в виде периодической структуры (гребенки), а под определенным углом, зависящим от геометрии лампы. В результате при взаимодействии электронного пучка с полем замедляющей системы в выходном устройстве 5 лампы происходит автоматическое формирование электронного потока на выходе лампы с высоким к.п.д., что позволяет получить значительные мощности в широком диапазоне длин волн.

Предмет изобретения

Лампа обратной волны с продольным магнитным полем для генерации радиоволн миллиметрового диапазона, отличающаяся тем, что, с целью повышения к.п.д. и увеличения мощности, поверхность взаимодействия замедляющей системы лампы расположена под острым углом к оси параксиального электронного пучка.

Когда в 1957 г. в статье А. Карпа [6] появилось сообщение о разработке им лампы обратной волны, возбуждаемой на волнах в коротковолновой части миллиметрового диапазона, мало кто обратил внимание на следующее его замечание: «...На более длинных волнах максимальный диапазон перестройки и наибольшая выходная мощность получаются в том случае, когда маг-

нитное поле и электронный поток параллельны плоскости полосок и ток на коллектор максимален. Но на коротких волнах наилучшие рабочие характеристики получались в том случае, когда электронный поток составлял некоторый угол с плоскостью полосок, а ток через коллектор был значительно меньше своего максимального значения». Могло ли это замечание о генерации

мощности в 3 - 6 мВт (не измеряемой, а лишь предполагаемой, исходя из приближенных расчетов) кого-либо заинтриговать, когда в ИРЭ АН УССР в клинотроне, наклонив ленточный электронный поток на поверхность периодической системы в генераторе типа ЛОВ, получали десятки и сотни милливольт электромагнитной мощности в области миллиметровых волн? Конечно нет.

Объяснение влияния наклона пучка на повышение генерируемой мощности А. Карп изложил, исходя из наличия удельных омических потерь в замедляющей системе, все возрастающих по мере повышения генерируемой частоты. А так как пусковой ток изменяется пропорционально кубу потерь, то это требовало, по его мнению, уменьшения длины пространства взаимодействия электронного потока с замедленной волной. Уменьшение длины пространства взаимодействия, по мнению А. Карпа, и производилось путем наклона пучка на периодическую систему, при этом часть электронов пучка не доходила до коллектора, а оседала на поверхность периодической системы. Тем самым уменьшалась длина пролета электронов, передающих энергию замедленной волне, в пространстве взаимодействия.

Естественно, такое простое и несколько грубоватое объяснение эффекта, наблюдаемого А. Карпом, никак не могло удовлетворить разработчиков, обнаруживших клинотронный эффект годом ранее в исследованиях свойств ЛОВ О в миллиметровом диапазоне волн. Поэтому начались активные поиски более аргументированного объяснения этого эффекта. С этого времени были предприняты многочисленные попытки для объяснения природы этого явления. Первая версия по объяснению этого эффекта была предпринята одним из ответственных исполнителей темы «Боксит» по разработке генераторов миллиметрового диапазона, весьма эрудированным профессором В. Л. Германом в приложении к научно-техническому отчету. Он попытался объяснить клинотронный эффект, исходя из самых общих представлений энергообмена электронов с электромагнитным полем в неограниченном пространстве как для поля, так и для электронного потока. Результаты этого поиска были изложены в «Приложении» к научно-техническому отчету по теме «Боксит» [4], законченной к 1957 г. в ИРЭ АН УССР.

К объяснению такой особенности возбуждения электромагнитных волн в периодических системах и возможностей использования ее в других типах генераторов СВЧ с целью повышения эффективности их работы сразу же обратились специалисты в области СВЧ электроники. В первую очередь к этому были привлечены теоретики, работающие в ИРЭ АН УССР, Э. А. Канер, В. М. Конторович, Ю. В. Корниенко, В. Я. Малеев

[7,8]. Специалисты, занимающиеся непосредственно разработкой источников электромагнитных колебаний в области миллиметровых волн, из Москвы (А. С. Победоносцев, А. С. Тагер), Саратова (В. Н. Шевчик, В. С. Андрушкевич), Горького (А. В. Гапонов) не только пытались использовать эффект неколлинеарности между скоростью электронного потока и фазовой скоростью распространения электромагнитной волны с целью повышения эффективности работы разрабатываемых ими электровакуумных устройств, но и выполнили целый ряд теоретических исследований для выяснения природы этого явления. К сожалению, результаты этих исследований мало известны, так как они были опубликованы в изданиях для служебного пользования. Поэтому теоретические исследования физических причин клинотронного эффекта продолжаются до настоящего времени [9,10].

Интерес к клинотронному эффекту подогревался исследованиями и в других областях физики. Следует отметить, что с начала 60-х гг. прошлого века при усиленном изучении зависимости интенсивности переходного излучения от угла падения электронов на мишень как теоретически, так и экспериментально был обнаружен эффект повышения переходного излучения при скользющем падении пучка на поверхность плоской серебряной мишени [11,12]. При скользющем угле падения пучка на мишень порядка $\varphi \sim 0,5^\circ$ максимум интенсивности излучения превосходил в сотни раз переходное излучение, наблюдаемое при нормальном падении пучка на эту поверхность. Наблюдаемый эффект авторами объяснялся дополнительным возбуждением в этом случае поверхностных плазмонов. Через десять лет после обнаружения клинотронного эффекта была предпринята попытка объяснить аномальное поведение интенсивности переходного излучения при наличии границы в зависимости от угла падения электрона на металлическую мишень. При рассмотрении возбуждения поверхностных волн заряженной частицей, движущейся вдоль границы раздела вакуум - поглощающая немагнитная среда, было установлено, что при скользщем падении пучка на поверхность пластины спектральная плотность энергии возбуждения поверхностных волн на несколько порядков превосходила интенсивность переходного излучения [13]. Эту особенность, наблюдаемую в то время при изучении угловых зависимостей интенсивности переходного излучения теоретиками и экспериментаторами, авторы объяснили рассеянием поверхностной волны на возможных неровностях серебряной пластины.

Середина прошлого века ознаменована всплеском интереса в области электроники к вопросам улучшения характеристик известных

электронных СВЧ устройств, в плане повышения уровня генерируемой ими мощности и в повышении их рабочих частот. Наряду с этим было повышено внимание к изучению эффектов возбуждения электромагнитного излучения, таких как черенковское, переходное, тормозное, циклотронное. Эти исследования были направлены на поиски путей, которые могли бы позволить преодолеть трудности, возникающие при создании источников электромагнитных колебаний на все более короткие волны. А такими препятствиями на этом пути было снижение до уровня существующих технических возможностей размеров электродинамических систем и инерционность электронов. Не случайно в это же время возник интерес и к излучению Смита - Парселла [14] и появление первых работ, по так называемому, дифракционному излучению [15]. Исследователи дифракционного излучения часто пытались считать его родственным эффекту Смита-Парселла. В этих работах подразумевалась возможность получить взаимодействие электронов пучка с некоторым электромагнитным полем в объеме электродинамической системы в виде открытого квазиоптического резонатора, вместо взаимодействия с поверхностными полями замедляющих систем, т. е. принципов, заложенных в работу ламп бегущей и обратной волн. Однако уже в первых опытах Смита и Парселла была обнаружена необходимость наклона электронного потока на поверхность дифракционной структуры для возбуждения электромагнитного излучения. Специальными исследованиями зависимости интенсивности излучения Смита-Парселла от угла падения пучка на дифракционную решетку было установлено, что при падении электронного потока на реальную дифракционную решетку под некоторым небольшим углом к излучению Смита-Парселла добавляется излучение, обусловленное взаимодействием электронов с веществом решетки типа переходного и тормозного [16]. Это привело к установлению экспериментального факта - возрастанию мощности излучения при наклонном падении электронов на дифракционную решетку типа «эшелетт» и в несколько раз большем, чем предсказывала феноменологическая теория.

Позже была предпринята попытка получения строгого решения задачи об излучении плоского монохроматического электронного пучка, пересекающего под произвольным углом φ ($0 \leq \varphi \leq \pi$) бесконечно тонкую идеально проводящую решетку [17]. К сожалению, задача была слишком идеализирована. То, что в точное теоретическое исследование идеализированной электродинамической задачи было заложено, то и получено. Угол наклона пучка приводил лишь к снижению интенсивности излучения.

Так что же произошло полвека назад?

Научно-техническая разработка под шифром «Боксит» [4] была предложена в ИРЭ с целью выяснения возможности создания гетеродинных источников колебаний миллиметрового диапазона с электрической перестройкой их частоты (без использования каких-либо дополнительных мер по механической подстройке). Эта работа под названием «Разработка методов создания широкодиапазонных измерительных генераторов миллиметрового диапазона волн» должна была быть выполненной в течение 1956 г. Основная задача состояла в выяснении возможности перекрытия всего миллиметрового диапазона минимальным количеством источников колебаний. Поручая эту работу ИРЭ, заказчики учитывали опыт, накопленный коллективом еще в стенах Физикотехнического института АН УССР по созданию магнетронов миллиметрового диапазона длин волн и небольших попыток по расширению диапазона их электрической перестройки [18].

Так как руководитель разработки А. Я. Усиков и его заместитель по разработке Г. Я. Левин уже не раз обращались к вопросу выяснения возможности расширения электрической перестройки в магнетронах, в первую очередь было решено провести такие исследования на генераторах М-типа. Однако через три-четыре месяца после нескольких неудач с разработкой карматрона миллиметрового диапазона было решено реализовать ЛОВ О, тем более, что такие попытки за рубежом уже существовали. Решить проблему таким образом настоятельно рекомендовал один из изобретателей ЛОВ М. Ф. Стельмах. [19]. При этом он обратил внимание на разработку, выполненную Р. Компфнером и Н. Вильямсом в миллиметровом диапазоне волн [20].

К выполнению этой работы в качестве ответственных исполнителей был привлечен профессор В. Л. Герман и три молодых экспериментатора А. И. Бородин, Г. В. Лысов и А. Я. Кириченко. Опыт по разработке источников колебаний О-типа в Институте до этого отсутствовал. Основные элементы разрабатываемого макета не имели аналогов ни в техническом, ни в технологическом планах Института; их надо было разрабатывать с нуля. Задание по созданию общей конструкции макета ЛОВ О было возложено на Г. В. Лысова. А. И. Бородину была поручена разработка электронно-оптической системы, А. Я. Кириченко - выбор типа электродинамической системы и ее расчет. К работе по конструированию электронной пушки была привлечена Л. А. Кутовая (Лысова). Она должна была также совместно с Р. В. Старченко и И. Г. Прониной проводить эксперименты по согласованию широкополосного выходного устройства. Когда выяснилось, что согласованные по-

глощающие нагрузки, используемые разработчиками ЛОВ О сантиметрового диапазона, работают не эффективно в миллиметровой ЛОВ О, к разработке специальной поглощающей нагрузки был привлечен Г. С. Михайлов.

На основных исполнителей были возложены также обязанности откачки, тренировки и испытаний создаваемых макетов. Тренировка и испытания ЛОВ опирались на многолетний опыт работы с магнетронами А. Я. Усикова и Г. Я. Левина, который они передавали молодежи. Особое внимание при этом уделялось точной юстировке макета в однородном магнитном поле электромагнита, которая производилась обязательно при пониженном токе на анод в магнетроне. Затем макет жестко фиксировался. Только после этого можно было форсировать режим, повышая напряжение и магнитное поле, и приступать к исследованиям - поиску генерируемого сигнала. Аналогичная методика была применена и к юстировке макетов ЛОВ. Отличие заключалось лишь в установке положения макета в магните по максимуму тока на коллектор. Первые два-три макета ЛОВ О не подавали признаков жизни, несмотря на то, что испытания их проводились несколько суток подряд. И лишь когда случай заставил улучшить юстировку при повышенных значениях тока и напряжения, был обнаружен слабый, но уверенный сигнал генерации ЛОВ О. Оказалось, что при появлении сигнала на экране осциллографа ток на коллекторе был не максимальный. За что поначалу экспериментатор, проводивший тренировку макета, получил нагоняй, но потом все уладилось. Пришлось совершенствовать процесс тренировки макетов при слабом токе, дополнив предварительную юстировку более тонкой, осуществляемой при повышенном токе с катода.

После обнаружения сигнала на «удачном» макете были отремонтированы, подвергнуты дополнительной тренировке и макеты, в которых сигнал на выходе генератора ранее не обнаруживался. Они также оказались способными излучать колебания в миллиметровой области электромагнитного спектра, когда электронный поток проходил не параллельно поверхности периодической системы, а под некоторым небольшим углом к этой поверхности, частично оседая на ней. К концу выполнения задания по теме «Боксит» созданные макеты генераторов излучали электромагнитные волны в нескольких точках миллиметрового диапазона каждый в полосе частот 10 - 15% при выходной мощности в несколько ватт в длинноволновой области и сотни милливатт в коротковолновой области миллиметрового диапазона. Полученные результаты намного превосходили условия технического задания. Так полученные мощности на два порядка превышали

мощности, сформулированные в техническом задании.

В последующие годы производилось совершенствование конструкции клинотронов, улучшение технологии их изготовления с целью повышения эффективности энергообмена электронного пучка с электромагнитным полем. Кроме использования режимов, которые применялись в других генераторах с длительным взаимодействием, таких как рекуперация, использование отражений от концов периодической системы, превращающее клинотрон в резонансный клинотрон [21], а при повышенной резонансности - в генератор на резонаторе с поверхностной волной [22], проведены также исследования, не применявшиеся до того времени при изучении характеристик приборов с длительным взаимодействием, направленные на снижение стартовых токов клинотрона и повышение его выходной мощности и КПД, - работа в неоднородном фокусирующем магнитном поле [23] и при раздвоении электронного пучка [24]. При этом удалось повысить КПД генератора, расширить полосу электрической перестройки, изучить возможности генерирования в субмиллиметровой области.

По требованию заказчиков устройствам придавались специальные режимы работы. Так по требованиям Института атомной энергии им. И. В. Курчатова были разработаны клинотроны для диагностики плазмы, одновременно излучающие в четырех точках миллиметрового диапазона: 2, 4, 8, 16 мм с уровнем мощности не меньше 0,5 Вт на каждой из длин волн [25]. Проведены исследования по созданию клинотронов, использующих периодические системы, непосредственно излучающие энергию через квазиоптический вывод в свободное пространство, с целью прямого питания квазиоптических трактов [26]. На базе клинотрона созданы умножители частоты с высоким коэффициентом умножения [27].

Естественно, что при создании макетов клинотрона по отдельным разработкам пришлось поставлять отдельные образцы по просьбам исследователей. Расширился коллектив исследователей клинотронного эффекта, в 1960 г. был создан специальный отдел «Широкодиапазонного генерирования» под руководством Г. Я. Левина. В этом же году Комитет по Ленинским премиям за работы в области радиофизики и электроники наградил А. Я. Усикова, И. Д. Трутня, А. Н. Чернеца, Г. Я. Левина и Е. М. Кулешова Ленинской премией.

В 1960 г. при ИРЭ АН УССР было создано Опытное производство для изготовления мелкими сериями приборов и устройств, разработанных в научных отделах Института. В 1970 г. в Опытное производство была передана из научного отдела широкодиапазонного генерирования

Института документация на производство мелкими сериями клинотронов со следующими характеристиками (табл. 1).

Таблица 1

Диапазон волн, мм	Выходная мощность, Вт	Анодное напряжение, кВ	Плотность тока, А/см ²	Магнитное поле, кЭ
8 - 9	10 - 30	1,5 - 2,5	4	3
4 - 4,5	1 - 4	2 - 3,5	4	3
2 - 2,3	0,1 - 1	2,5 - 3,5	7	3

К этому времени были разработаны клинотроны, генерирующие волны и в субмиллиметровой области электромагнитного спектра. Характеристики таких генераторов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Диапазон волн, мм	Выходная мощность, Вт	Анодное напряжение, кВ	Анодный ток, мА
0,84 - 0,98	0,1	3,0 - 5,0	120 - 190
0,76 - 0,87	0,05	3,5 - 5,0	120 - 160

С начала 1970-х гг. Опытное производство начало выпуск мелких серий клинотронов, работающих во всех точках миллиметрового диапазона, и поставляло их по требованию заказчиков под названием ЛОВ-8, ЛОВ-4 и ЛОВ-2. Эти несекретные названия вытесняли название клинотрон. И в настоящее время даже сотрудники ИРЭ НАН Украины, использующие эти генераторы, чаще всего называют их ЛОВ. До начала девяностых годов прошлого века Опытным производством Института ежегодно создавалось и поставлялось потребителям свыше 50 макетов клинотронов, обеспечивающих исследования в миллиметровой области электромагнитного спектра в учреждениях Советского Союза от Вильнюса до Новосибирска и Красноярска. В табл. 3 представлена информация о поставках пакетированных в магниты (ПА) и не пакетированных клинотронов, изготовленных цехом опытных образцов Специального конструкторского бюро Института в течение 6 лет (1979 - 84 гг.)

Таблица 3

Тип ЛОВ	1979	1980	1981	1982	1983	1984
ЛОВ 8ПА	10	14	7	11	9	4
ЛОВ 8	4	-	-	1	1	-
ЛОВ 4ПА	13	16	10	16	14	4
ЛОВ 4	1	-	-	3	1	1
ЛОВ 2ПА	18	22	33	23	31	10
ЛОВ 2	2	3	3	7	-	2
Общее кол-во ЛОВ	41/7	52/3	50/3	50/11	54/2	28/3

Этим производством было направлено на предприятия и в учреждения Советского Союза для использования в разворачивающихся в то время исследованиях в миллиметровой области электромагнитного спектра свыше 1000 макетов клинотронов. Кроме этого, отделом широкодиапазонного генерирования в это же время разрабатывались и поставлялись макеты клинотронов по специальным требованиям заказчиков: с малой изрезанностью амплитудно-частотной характеристики при электрической перестройке, с расширенной полосой электрической перестройки, со специальным квазиоптическим выводом для питания квазиоптических устройств, с повышенным уровнем мощности, с пониженными массогабаритными показателями и т. п. Естественно, что все научные подразделения Института, интересующиеся миллиметровой областью электромагнитного спектра, имели в своем аппаратном арсенале клинотроны с необходимыми выходными характеристиками. И на сегодня эти макеты можно обнаружить во многих подразделениях Института, хотя не все из них находятся в рабочем состоянии. Следует отметить, что основные выходные характеристики этих генераторов на то время намного превосходили параметры зарубежных карсинотронов и отечественных ЛОВ О. Даже в настоящее время по некоторым характеристикам клинотронные генераторы сохраняют свои преимущества.

Интересно вспомнить о том, что тайна открытия клинотронного эффекта иногда облакалась баснями о случайных непродуманных или неграмотных действиях студента, который неправильно выполнил указания старших товарищей и нарушил принципы разработки или испытаний ЛОВ О миллиметрового диапазона. Одну из таких версий изобразил научный сотрудник Саратовского государственного университета Н. М. Советов в своей художественной повести «На обратной волне» [28]. Им, естественно, открытие клинотронного эффекта было перенесено в стены Саратовского университета и связывалось с действиями студента, которые повлекли за собой неправильную установку пушки в устройстве. Однако такая ошибка могла привести не к наклону электронного потока на периодическую систему, а лишь к искажению его статической структуры. Такой перекося приводит лишь к увеличению радиуса спирального перемещения отдельных электронов потока. Это отмечается и на стр. 60 монографии известных разработчиков миллиметровых ЛОВ О из производственного объединения «Исток» [29]. «Спиральное движение электронов возникает также вследствие того, что при юстировке ЛОВ в магнитном поле для увеличения эффективности взаимодействия элект-

тронный пучок приходится пускать под некоторым углом к замедляющей системе».

Необходимость наклона электронного потока на поверхность плоских периодических систем для повышения эффективности энергообмена электронов с полями электродинамических систем в генераторах типа О миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов сейчас является неоспоримым фактом. Используют этот эффект также и разработчики генераторов дифракционного излучения или оротрона. Однако для объяснения необходимости наклона пучка на поверхность периодической системы до настоящего времени ученые придерживаются двух мнений. Одни считают причиной проявления этого эффекта нарушение статичности пучка, а другие пытаются обнаружить некоторые новые особенности в динамике взаимодействия электронного потока с полями периодической системы. Такой дуализм не разрушен и монографией под названием «Клинотрон», опубликованной разработчиками этого генератора в 1992 г. [30].

1. Кураев А. А., Синицын А. К. Расчет и оптимизация по КПД гироклинотрона // Материалы 14-ой Международной Крымской конференции (СпiMiCo-2004) «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». Севастополь 2004 г. - С.215-216.
2. Кураев А. А., Синицын А. К. Перспективы повышения мощности коротковолновых гиротронов // Радиотехника. - 2004. - №9. - С.48-53.
3. Кириченко А. Я., Солодовник В. А. Об ортоклинотронном эффекте в лампе обратной волны // Докл. АН УССР. - 1980. - №1. - С.64-67.
4. Отчет о НИР «Боксит» / "Разработка методов создания широкодиапазонных измерительных генераторов миллиметрового диапазона волн". Рук. А. Я. Усиков. - Харьков: Ин-т радиопроизводства и электрон. АН УССР. - 1957. - 168 с.
5. А. с. № 341113 (462923/26-25) от 17 декабря 1956 г. Лампа обратной волны / Г. Я. Левин // Открытия. Изобретения. - 1972. - №25. - 201 с.
6. Kaip A. Backward-wave oscillator experiments at 100 to 200 Kilomegacycles // Proc. IRE. - 1957. - 45, N4. - P.496-503.
7. Канер Э. А., Конторович В. М. О влиянии коэффициентов отражения на работу лампы с бегущей волной // Тр. ИРЭ АН УССР. - Харьков. - 1959. - 7. - С.5-14.
8. Конторович В. М., Малеев В. Я. Взаимодействие наклонного электронного пучка с поверхностной волной (теория клинотрона) // Тр. ИРЭ АН УССР, г. Харьков. - 1959. - 7. - С.32-52.
9. Одаренко Е. Н., Шматько А. А. Самовозбуждение колебаний в резонансных генераторах О-типа с длительным взаимодействием при наклонном магнитоэстатическом поле // Радиотехника и электроника. - 1992. - 37, №2. - С.303-310.
10. Manzhos S., Schunemann K., Sosnitsky S., Vavriv D. Clinotron: a promising source for THz regions // Радиофизика и радиоастрономия. - 2000. - 5, №3. - С.265-273.
11. Blanckenhagen P., Boersch H., Fritzsche D. et al. Transition radiation, bremsstrahlung and plasmastrahlung von Ag-targets // Physics Letters. - 1964. - 11, N4. - P.296-297.
12. Boersch H., Dobberstein P., Fritzsche D., Sauerbrey G. Transition radiation, bremsstrahlung und plasmastrahlung // Zeitschrift fur Physik. - 1965. - 187, N2. - P.97-118.
13. Пахомов В. Е., Фетисов Е. П. О возбуждении поверхностных волн движущимся зарядом // Журн. эксперимен. и теорет. физики. - 1967. - 53, №3(9). - С.965-977.
14. Smith S. J., Purcell E. M. Visible light from localized surface charges moving across a grating // Phys. Rev. - 1953. - 92, N4. - P.1069-1073.
15. Третьяков О. А., Третьякова С. С., Шестопалов В. П. Излучение электромагнитных волн электронным пучком, движущимся над дифракционной решеткой // Радиотехника и электроника. - 1965. - 10, №7. - С.1233-1242.
16. Bachheimer J. P. Experimental investigation of the interaction radiation of a moving electron with a metallic grating: the Smith-Purcell effect // Phys. Rev. B. Solid State. - 1972. - 6, N8. - P.2985-2994.
17. Прокопчук Ю. А. Излучение электромагнитных волн электронным пучком, пересекающим дифракционную решетку // Радиотехника. - 1971. - Вып.19. - С.96-101.
18. Герман В. Л., Левин Г. Я., Усиков А. Я., Старченко Р. В. О возможной конструкции магнетрона с электронной перестройкой // Тр. отдела радиофизики ФТИ АН УССР. - 1954. - 2. - С.163-164.
19. Стельмах М. Ф. Генераторное устройство микроволнового диапазона. А. с. №172364 (363460/26-9) с приоритетом от 31.05.1948 г. // Бюллетень изобретений и открытий. - 1965. - №13.
20. Kompfner R., Williams N. T. Backward-wave tubes. // Proceedings of the IRE. - 1953. - 41, N11. - P.1602-1611.
21. Ефимов Б. П., Кириченко А. Я., Бужинский А. П. Экспериментальное исследование влияния отражений на частотные характеристики ЛОВ миллиметрового диапазона. // Тр. ИРЭ АН УССР. - Харьков. - 1967. - 15. - С.141-157.
22. Касьяненко А. П., Ефимов Б. П., Коротун Л. И., Кривицкий Б. Я. Генератор с лестничной периодической структурой в волноводе // Электронная техника. Сер.1 Электроника СВЧ. - 1972. - №8. - С.121-122.
23. Кириченко А. Я., Ефимов Б. П. К вопросу о работе ЛОВ О-типа с нежесткофокусированным электронным потоком в неоднородном магнитном поле // Тр. ИРЭ АН УССР. - Харьков. - 1967. - 15. - С.130-140.
24. Бородин А. И., Кириченко А. Я., Кутюкова Л. А. и др. О некоторых возможностях улучшения характеристик клинотрона // Тр. ИРЭ АН УССР. - Харьков. - 1959. - 7. - С.15-31.
25. Ефимов Б. П., Левин Г. Я. Генераторы «белого» радиосвета на волны 16, 8, 4 и 2 мм // Тр. ИРЭ АН УССР. - Харьков. - 1963. - 11. - С.178-183.
26. Бородин А. И., Бузык Л. М., Лысенко Е. Е. и др. Замедляющие системы гребенчатого типа с периодическими неоднородностями // Электронная техника. Сер.1. Электроника СВЧ. - 1979. - №9. - С.3-12.
27. Еремка В. Д., Кириченко А. Я. Экспериментальное исследование миллиметрового умножителя частоты с высоким коэффициентом умножения // Тр. ИРЭ АН УССР. - Харьков. - 1969. - 18. - С.138-148.
28. Советов Н. На обратной волне. - Саратов: Приволжское кн. изд-во, 1987. - 183 с.
29. Лампы обратной волны миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн / Под ред. Н. Д. Девяткова. - М.: Радио и связь, 1985. - 135 с.
30. Клинотрон. / Под ред. А. Я. Усикова. - Киев: Наук. думка, 1992. - 197 с.

CLINOTRON - 50

А. Я. Кириченко, В. М. Яковенко

The paper outlines the results on both creation of vacuum broadband oscillators in millimeter wavelength range of electromagnetic spectrum and study of increasing effect of energy-exchange between electron stream and slow wave when inclining the stream with respect to a surface of periodic structure. These works were started at the Institute of Radiophysics and Electronics, National Academy of Sciences of Ukraine, in 1956. Resonant influence of these studies upon the works, carried out at other institutes on

developed other types of oscillators, has been pointed out. Peculiarities of electromagnetic radiation exciting at grazing incidence of electron stream not only on a surface of periodic structures but also on smooth and rough surfaces at excitation of transition radiation are underlined. The work presents both characteristics of the developed clinotrons and results of small-batch production of them, which provided for radiophysical investigation and development of electronic and radioengineering technology.

Key words: oscillators, electromagnetic waves, electron stream, clinotron, angle slope.

КЛИНОТРОНУ - 50

О. Я. Кириченко, В. М. Яковенко

В роботі коротко подано результати створення вакуумних широкодіапазонних генераторів електромагнітних хвиль в міліметровому діапазоні електромагнітного спектра та по дослідженню ефекта підвищення енергообміну електрон-

ного потоку з сповільненою хвилею, коли його нахилити на поверхню періодичної структури. Ці дослідження було започатковано в Інституті радіофізики та електроніки Академії наук України ще у 1956 році. Зазначено резонансний вплив цих досліджень на роботи, що проводились в інших інститутах, де розроблялися генератори інших типів. Указано на особливості збудження електромагнітного випромінювання у випадках, коли потік електронів падав під кутами, що повзають, не лише на поверхню періодичної структури, але і на гладкі або шорсткі поверхні при збудженні перехідного випромінювання. Подано характеристики створених клінотронів та результати їх малосерійного виробництва, які забезпечили радіофізичні дослідження спеціалістів, що займалися розробкою електронної і радіотехнічної апаратури.

Ключові слова: генератори, електромагнітні хвилі, електронний пучок, клінотрон, кут нахилу.

Рукопись поступила 2 декабря 2006 г.