

## Экспериментальное исследование клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии

Е. Е. Лысенко, О. Ф. Пишко, С. А. Чурилова

*Радиоастрономический институт НАН Украины  
61002, Харьков, ул. Краснознаменная, 4*

*Статья поступила в редакцию 18 января 2000 г.*

Описана конструкция клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии, получены экспериментальные дисперсионные характеристики и диаграммы направленности излучения приборов с замедляющими системами различной геометрии, проведено сравнение их с теоретическими результатами. Показано, что физические принципы работы такого генератора можно полностью объяснить особенностями возбуждения полей в открытых многоступенчатых замедляющих системах, содержащих в спектре собственных волн быстрые пространственные гармоники. Предложена методика и даны рекомендации по выбору геометрии многоступенчатых замедляющих систем приборов различных диапазонов длин волн. Приведенные рабочие характеристики клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии двухмиллиметрового диапазона показывают перспективность таких приборов в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах.

Описано конструкцію клінотрона з розподіленням квазіоптичним виводом енергії, одержано експериментальні дисперсійні характеристики та діаграми спрямованості випромінювання приладів зі сповільнюючими системами різної геометрії, проведено їх порівняння з теоретичними результатами. Показано, що фізичні принципи роботи такого генератора можна повністю пояснити особливостями збудження полів у відкритих багатоступінчастих сповільнюючих системах, що містять у спектрі власних хвиль швидкі просторові гармоніки. Запропоновано методику та надано рекомендації щодо вибору геометрії багатоступінчастих сповільнюючих систем приладів різних діапазонів довжин хвиль. Наведені робочі характеристики клінотрона з розподіленням квазіоптичним виводом енергії двохміліметрового діапазону вказують на перспективність таких приладів у міліметровому та субміліметровому діапазонах.

Теоретическое и экспериментальное изучение особенностей возбуждения многоступенчатых замедляющих систем (ЗС) [1-3] показало возможность создания качественно нового электровакуумного генератора с длительным взаимодействием – вывод энергии в нем осуществляется на быстрых гармониках поля системы.

Такой прибор был реализован с использованием открытых многоступенчатых систем и получил название клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии [4]. Мощность этого генератора сосредоточена в основном лепестке диаграммы направленности (ДН), которая формируется в свободном пространстве над ЗС в плоскости, перпендикулярной ее поверхности. Геометрия ЗС определяет частотный диапазон генерации прибора, его режим работы и выбирается так, чтобы в оптимальном режиме работы генератора основной лепесток ДН формировался по нормали к поверхности ЗС.

Вывод энергии непосредственно из пространства взаимодействия по всей длине ЗС исключает потери мощности, присущие локальному волноводному выводу энергии, которые связаны с затуханием в ЗС и выходном

волноводе, возбуждением высших типов колебаний и ответвлением части мощности в канал для вбрасывания электронного пучка в пространство взаимодействия [4]. Кроме того, квазиоптический вывод энергии клинотрона упрощает согласование прибора с квазиоптическими линиями передачи, которые широко используются в коротковолновой части миллиметрового и в субмиллиметровом диапазонах длин волн.

В настоящей работе описана конструкция клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии, представлены результаты экспериментальных исследований приборов миллиметрового диапазона с различной геометрией ЗС и проведено их сравнение с теоретическими данными. Приведены рабочие характеристики клинотрона двухмиллиметрового диапазона.

### Конструкция прибора и методика экспериментальных исследований

Основным требованием, предъявляемым к конструкции клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии, является



обеспечение условий для непосредственной связи пространства взаимодействия со свободным пространством. Конструкция прибора, удовлетворяющая указанному требованию, приведена на рис. 1.

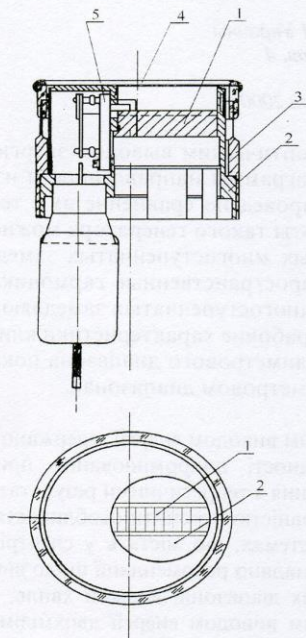


Рис. 1. Конструкция клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии

Многоступенчатая гребенчатая ЗС (1) располагается в основании цилиндрической рачотки в корпусе клинотрона (2). Вакуумный объем в приборе создается при помощи медного стакана (3), дно которого представляет собой слюдяную пластину, прозрачную для СВЧ излучения, (4) и находится на расстоянии нескольких миллиметров от поверхности ЗС, что обеспечивает формирование ДН излучения в свободном пространстве. Ленточный электронный пучок формируется диодной электронной пушкой (5) и удерживается в пространстве взаимодействия продольным магнитным полем. Конструкция предусматривает водяное охлаждение прибора.

Экспериментально исследовались дисперсионные характеристики клинотронов, измерялись их ДН и мощность излучения. Установка для проведения этих исследований содержала стабилизированный блок питания и приемную часть, которая изменялась в зависимости от исследуемых характеристик.

Дисперсионные характеристики приборов представлялись в координатах  $\kappa=f(b)$ , где  $\kappa=d/\lambda$

( $d$  – период ЗС,  $\lambda$  – длина волны),  $b = \psi/2\pi$  ( $\psi$  – сдвиг фазы на периоде  $d$ ). Для построения этих характеристик измерялась зависимость длины волны генерируемых колебаний от ускоряющего напряжения и затем делался пересчет [5]. Приемная часть установки состояла из рупора, волномера, детектора и осциллографа.

Исследование ДН клинотрона проводилось путем измерения продольной ( $E$ -плоскость) и поперечной ( $H$ -плоскость) составляющих поля излучения на различных расстояниях от поверхности ЗС (рис. 2). Излучаемое поле принималось зондом – открытым концом стандартного волновода прямоугольного сечения [6], который перемещался в двух взаимно перпендикулярных направлениях. С детектора сигнал зонда подавался на усилитель постоянного тока и синхронно с перемещением регистрировался самописцем. Для предотвращения переизлучений металлические поверхности установки покрывались поглотителем, коэффициент отражения которого в миллиметровом диапазоне не превышал 0.1.

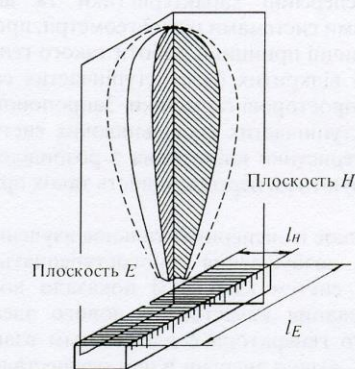


Рис. 2. Схематическое изображение диаграммы направленности и апертуры излучения клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии

Мощность излучения генератора определялась с помощью квазиоптического измерителя мощности. Измерения проводились в ближней зоне излучения.

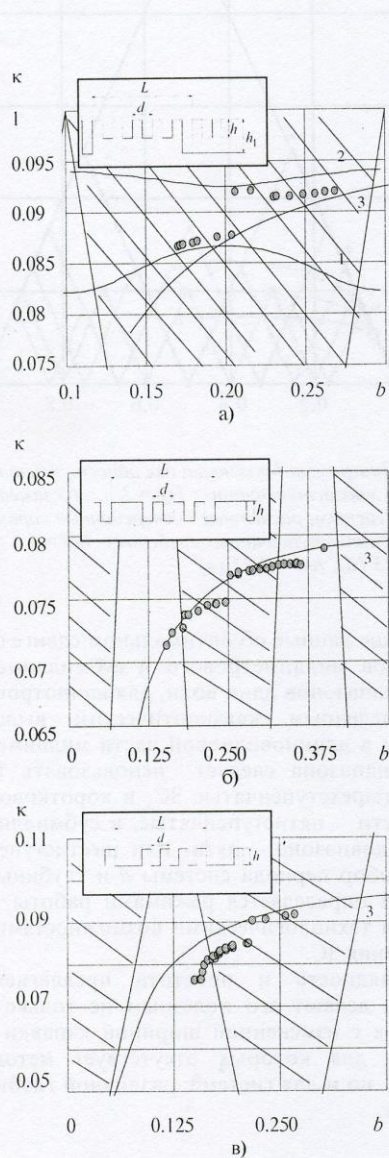
#### Дисперсионные характеристики

Экспериментальные исследования приборов проводились в миллиметровом диапазоне длин волн. В клинотронах использовались много-



ступенчатые ЗС типа “гребенка” с неоднородностями в виде либо ламели увеличенной ширины, либо канавки увеличенной глубины или ширины.

На рис. 3, а представлена диаграмма Бриллюэна 3-мм клинотрона с пятиступенчатой



**Рис. 3.** Дисперсионные характеристики клинотронов с замедляющими системами различной геометрии: а) – канавки увеличенной глубины, б) – ламели увеличенной ширины, в) – канавки увеличенной ширины. (1, 2) – расчетные кривые пятиступенчатой системы, (3) – расчетные кривые одноступенчатых систем, точки – экспериментальные данные

гребенкой шириной 5 мм, периодом  $d = 0.28$  мм, глубиной канавки  $h = 0.68$  мм, неоднородность представляла собой канавку увеличенной глубины  $h_1 = 1.5h$ . Для многоступенчатых систем подобной геометрии разработаны методы и алгоритмы расчета дисперсионных характеристик [1,2]. Согласно теории дисперсионная характеристика многоступенчатой ЗС имеет полосы пропускания и непропускания. Число полос пропускания определяется количеством канавок  $Q$  в периоде  $L$ , а разрывы дисперсионной характеристики соответствуют сдвигу фазы на периоде  $\psi = \beta d = \pi \kappa / Q$ , где  $\beta$  – постоянная распространения в ЗС,  $\kappa = 1, 2, \dots, Q$ . На рис. 3, а показаны участки расчетной дисперсионной характеристики рассматриваемой пятиступенчатой гребенки во второй (кривая 1) и третьей (кривая 2) полосах пропускания, область быстрых волн заштрихована. Здесь же приведена дисперсионная характеристика одноступенчатой системы и экспериментальные данные, представленные точками. Из диаграммы видно, что прибор возбуждался во второй и третьей полосах пропускания и разрыв дисперсионной характеристики наблюдался при значении  $b \approx 0.2$ , что соответствует теоретическим выводам. Экспериментальные области возбуждения быстрых волн хорошо согласуются с расчетной дисперсионной характеристикой.

На рис. 3, б, в приведены дисперсионные характеристики клинотронов, в которых ЗС представляли собой четырехступенчатые гребенки с неоднородностями в виде ламели увеличенной ширины, равной  $1.5d$  (рис. 3, б – 8-мм диапазон), и в виде канавки увеличенной ширины равной  $1.5d$  (рис. 3, в – 3-мм диапазон). Параметры ЗС следующие:  $d = 0.6$  мм,  $h = 1.73$  мм (8-мм диапазон) и  $d = 0.29$  мм,  $h = 0.67$  мм (3-мм диапазон), ширина систем составляет 5 мм. Там же приведены расчетные дисперсионные характеристики одноступенчатых гребенок (сплошные кривые) и экспериментальные данные. Согласно теории ЗС с различной глубиной канавок число полос пропускания определяется количеством канавок в периоде  $L$ . В соответствии с этой теорией, в рассматриваемых четырехступенчатых системах должно было возбуждаться четыре полосы, а разрывы дисперсионной характеристики должны наблюдаться при  $b = 0.125, 0.25, 0.375$ . Для 8-мм клинотрона в эксперименте наблюдались три полосы пропускания. Разрывы дисперсионных характеристик соответствовали значениям  $b \approx 0.25$  и  $0.375$ . При  $b < 0.125$  прибор не возбуждался. В клинотроне 3-мм диапазона наблюдались две полосы пропускания с разрывом дисперсионной характеристики при  $b \approx 0.25$ . Таким образом, положение точек разрыва дисперсионных характеристик систем с различной геометрией подчиняется одному и тому же закону.



В 3-мм клинотроне количество областей возбуждения меньше, что, по-видимому, связано с ростом пусковых токов при уменьшении длины волны.

Из рис. 3 видно, что в рабочей области приборов с многоступенчатыми ЗС различной геометрии крайние точки дисперсионных характеристик, соответствующие точкам разрыва, расположены вблизи дисперсионных характеристик одноступенчатых систем. Это позволяет использовать диаграмму Бриллюэна и дисперсионные характеристики одноступенчатых систем для анализа и предварительного выбора геометрии многоступенчатых ЗС в клинотронах с распределенным квазиоптическим выводом энергии. При этом следует обеспечить излучение по нормали к поверхности ЗС в режиме максимальной мощности на необходимой частоте. Ранее для клинотронов с волноводным выводом энергии был экспериментально установлен оптимальный сдвиг фазы на периоде системы, при котором наблюдается максимум генерируемой мощности для различных участков миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов. Он соответствует  $\psi_{\text{опт}} = 2b \sim 0.5\pi$  и выше в длинноволновой части миллиметрового диапазона,  $\psi_{\text{опт}} \sim 0.4\pi$  в коротковолновой части этого диапазона и  $\psi_{\text{опт}} \sim (0.3 \div 0.4)\pi$  в субмиллиметровом диапазоне. Эти данные необходимо учитывать при выборе геометрии систем.

На рис. 4 приведена диаграмма Бриллюэна для одноступенчатой ( $Q=1$ ) и многоступенчатых ( $Q=2, 3, \dots, 6$ ) ЗС, на которую нанесены дисперсионные характеристики одноступенчатых систем нескольких геометрий, часто используемых в экспериментах (а –  $h/d = 1.6$ ; б –  $h/d = 2.23$ ; в –  $h/d = 3.17$ ). В случае одноступенчатой системы вся дисперсионная кривая лежит в области медленных волн (внутри треугольника диаграммы), отделенной от области быстрых волн линиями скольжения. Для многоступенчатых систем ( $Q \geq 2$ ) дисперсионные характеристики пересекают линии скольжения, попадая в область быстрых волн, в которой работают клинотроны с распределенным квазиоптическим выводом энергии. Для систем с разным соотношением  $h/d$  и  $Q$  области быстрых волн существенно отличаются. Точки разрывов соответствуют точкам пересечения дисперсионных характеристик одноступенчатых систем с линиями, проведенными через вершины треугольников диаграммы Бриллюэна параллельно оси  $k$ . Точки пересечения дисперсионных характеристик с линиями, проведенными через точки  $b = 0.5; 0.33; 0.25; 0.2$  и  $0.17$ , отвечают углу излучения  $90^\circ$  для систем с  $Q = 2, 3, 4, 5, 6$  соответственно. Учитывая приведен-

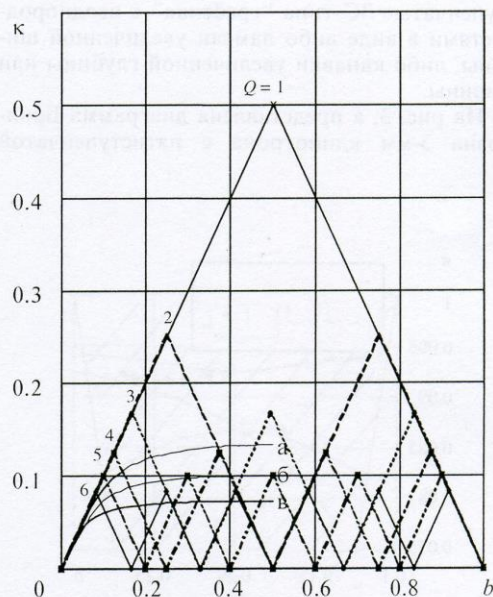


Рис. 4. Диаграмма Бриллюэна для одноступенчатой ( $Q=1$ ) и многоступенчатых ( $Q = 2, \dots, 6$ ) замедляющих систем; расчетные дисперсионные характеристики одноступенчатых гребенок с  $h/d = 1.6$  (а),  $h/d = 2.23$  (б),  $h/d = 3.17$  (в)

ные выше данные об оптимальном сдвиге фазы приборов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн, для клинотронов с распределенным квазиоптическим выводом энергии в длинноволновой части миллиметрового диапазона следует использовать трех- или четырехступенчатые ЗС, в коротковолновой части – пятиступенчатые, в субмиллиметровом диапазоне – пяти- или шестиступенчатые. Выбор периода системы  $d$  и глубины канавки  $h$  определяется режимами работы приборов и технологическими возможностями изготовления ЗС.

Наглядность и простота предлагаемого анализа делают его полезным не только для гребенок с измененной шириной канавки или ламели, для которых отсутствует методика расчета, но и для систем с различной глубиной канавок.

#### Диаграмма направленности

Принцип работы клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии позволяет рассматривать его как активную антенну с электрическим сканированием, в которой ЗС является излучающей апертурой, а



угол излучения изменяется при электронной перестройке прибора по частоте (рис. 2).

Для расчета ДН такого прибора можно использовать известную формулу для решетки излучателей с питанием элементов по закону бегущей волны с замедленной фазовой скоростью [7]. Она в основном определяется множителем решетки вида

$$f(\varphi) = \frac{\sin[NkL/2(n' - \cos \varphi)]}{N \sin[kL/2(n' - \cos \varphi)]} \quad (1)$$

Здесь  $k=2\pi/\lambda$  – волновое число в свободном пространстве;  $n'=\beta/k$  – коэффициент замедления решетки;  $N$  – число излучателей в решетке;  $L$  – расстояние между излучателями;  $\varphi$  – угол, отсчитываемый от оси вдоль ЗС. Излучателями в многоступенчатой ЗС являются неоднородности. Максимум излучения будет наблюдаться в направлении, для которого разность фаз колебаний, пришедших от соседних излучателей, кратна  $2\pi$ . Угол максимального излучения определяется из соотношения

$$\varphi = \arccos(n'_0 - n\lambda/L), \quad (2)$$

где  $n'_0$  – коэффициент замедления нулевой гармоники,  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Расчеты показали, что изменение частоты действительно приводит к сканированию ДН, причем при перемещении ее в пространстве происходит изменение формы главного лепестка. По мере отклонения от нормали к поверхности решетки он расширяется и становится несимметричным относительно направления  $\varphi$  [8].

Оценить полуширину главного лепестка ДН по нулевому уровню мощности в  $E$ - и  $H$ -плоскостях ( $\alpha_E$  и  $\alpha_H$  соответственно) можно следующим образом [9]:

$$\sin \alpha_E \approx \lambda/l_E, \quad \sin \alpha_H \approx \lambda/l_H, \quad (3)$$

где  $l_E$  – длина,  $l_H$  – ширина ЗС.

Экспериментальное исследование зависимости квадрата электрического поля ( $E^2$ ) от координаты вдоль и поперек ЗС для различных расстояний от поверхности показало, что ДН имеет один лепесток как в  $E$ -, так и в  $H$ -плоскости, причем его угол наклона зависит от частоты. Угловые размеры ДН в  $E$ - и  $H$ -плоскостях близки к расчетным оценкам и соответствуют длине и ширине ЗС. Это свидетельствует о том, что ДН формируется в свободном пространстве непосредственно ЗС. Для подтверждения этого стенки цилиндрической расточки в корпусе, расположенные между гребенкой и слюдяным окном, закрывались цилиндрической поглощающей вставкой, вы-

полненной из графита. Сравнение результатов измерений распределения поля в свободном пространстве и уровней генерируемой мощности для приборов с поглощающей вставкой и без нее показало их полную идентичность. Следовательно, стенки корпуса прибора не влияют ни на характер, ни на величину поля излучения. Замена в приборе многоступенчатой ЗС на одноступенчатую показала, что в этом случае направленное излучение не формируется – излучение носит случайный характер, обусловленный случайными неоднородностями и краевыми эффектами [4].

#### Экспериментальные характеристики клинотрона двухмиллиметрового диапазона

Ниже приведены результаты экспериментального исследования клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии 2-мм диапазона. В приборе использовалась пятиступенчатая гребенчатая ЗС длиной 20 мм, шириной 5 мм ( $d = 0.22$  мм,  $h = 0.48$  мм,  $d/h = 2.18$ ), в которой через 1.1 мм располагались канавки глубиной 0.96 мм. Система возбуждалась ленточным электронным потоком размером  $0.2 \times 5.0$  мм<sup>2</sup>. На рис. 5 представлена зависимость длины волны  $\lambda$  и выходной мощности  $P$  клинотрона от ускоряющего напряжения. При изменении ускоряющего напряжения в пределах 3.2–3.8 кВ длина волны изменялась от 2.39 до 2.27 мм, т. е. полоса перестройки составляла

$P, \text{ Вт}; \lambda, \text{ мм}$

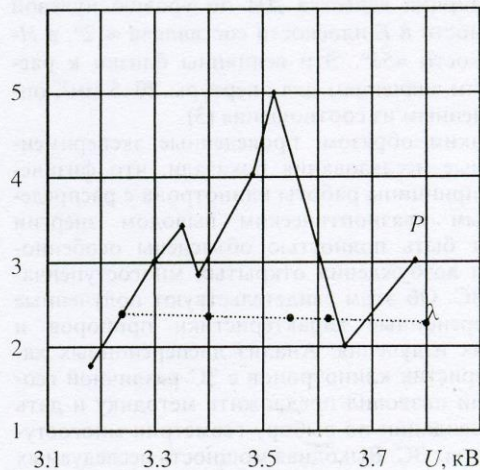


Рис. 5. Экспериментальная зависимость длины волны  $\lambda$  (----●----) и выходной мощности  $P$  (—●—) клинотрона от ускоряющего напряжения  $U$



≈5%. Мощность излучения измерялась квазиоптическим измерителем мощности и при напряжении 3.55 кВ и токе 200 мА составляла ≈5 Вт. Исследование ДН прибора осуществлялось с помощью зондовых измерений, описанных выше. В диапазоне перестройки при различных расстояниях от поверхности ЗС наблюдался один основной максимум как в продольном, так и в поперечном распределении поля. Для примера на рис. 6, а, б приведено распределение поля излучения прибора соответственно в *E*- и *H*-плоскости при напряжении ≈3.55 кВ на расстоянии 84 мм от поверхности ЗС (*x* – координата вдоль оси ЗС, *y* – поперек оси). Угол максимального излучения изменялся в пределах ±10° при изменении ускоряющего напряжения от 3.2 кВ до 3.8 кВ и был близок к 90° при напряжении 3.55 кВ. Рассчитанные (по формуле (2)) и измеренные углы максимума излучения приведены в таблице. Можно видеть, что они находятся в удовлетворительном соответствии.

Таблица. Углы излучения

Рабочее напряжение <i>U</i> , кВ	Угол излучения φ°, расчет	Угол излучения φ°, эксперимент
3.2	82	80
3.3	87	83
3.4	95	89
3.6	98	91
3.8	102	105

Ширина лепестка ДН по уровню нулевой мощности в *E*-плоскости составляла ≈12°, в *H*-плоскости ≈53°. Эти величины близки к расчетным значениям для апертуры 20×5 мм<sup>2</sup>, определенным из соотношения (3).

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показали, что физические принципы работы клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии могут быть полностью объяснены особенностями возбуждения открытых многоступенчатых ЗС. Об этом свидетельствуют полученные дисперсионные характеристики приборов и ДН их излучения. Анализ дисперсионных характеристик клинотронов с ЗС различной геометрии позволил предложить методику и дать рекомендации по выбору геометрии многоступенчатых ЗС. Выходная мощность исследуемых клинотронов двухмиллиметрового диапазона превышает значения мощности, полученные при тех же условиях на клинотронах с волноводным выводом энергии, что говорит о перспективности таких приборов. Замена волноводного вывода энергии на распределенный

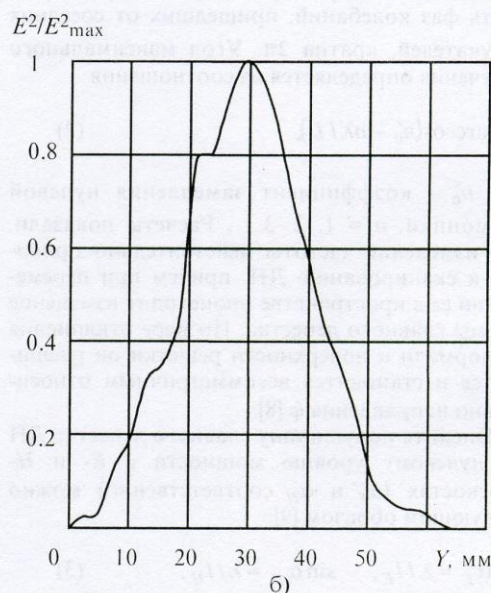
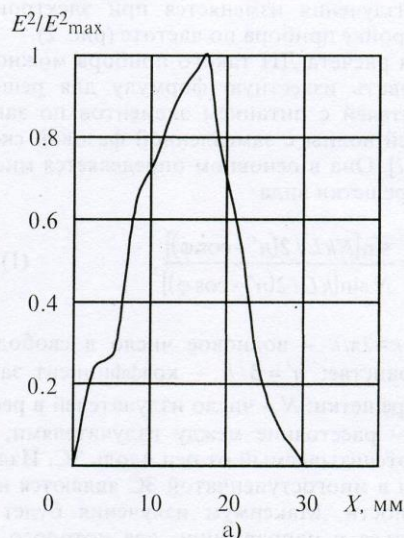


Рис. 6. Распределение поля излучения 2-мм клинотрона с распределенным квазиоптическим выводом энергии в *E*- (а) и *H*-плоскости (б)

квазиоптический представляется особенно эффективной при уменьшении длины волны, когда существенно возрастают потери в волноводах и ЗС, что приводит к значительным потерям выходной мощности приборов.

#### Литература

1. А. И. Бородкин, Л. М. Бузик, Е. Е. Лысенко, Р. А. Силин, С. А. Чурилова. Электронная техника, Серия 1, Электроника СВЧ, 1979, в. 9, с. 3-12.



2. Л. М. Бузик, О. Ф. Пишко. Радиотехника и электроника. 1996, 41, №4, с. 1-8.
3. О. Ф. Пишко, С. А. Чурилова. Расчет дисперсионных характеристик открытых многоступенчатых гребенок. Препринт ИРЭ АН УССР. Харьков, 1985, №292, 22 с.
4. Г. Я. Левин, А. И. Бородин, А. Я. Кириченко, А. Я. Усиков, С. А. Чурилова. Клинотрон. Под ред. А. Я. Усикова. Киев, Наукова думка, 1992, 200 с.
5. Ю. Г. Альшулер, А. С. Татаренко. Лампы малой мощности с обратной волной. Москва, Советское радио, 1963, 296 с.
6. И. В. Лебедев. Техника и приборы СВЧ. Москва, Высшая школа, 1970, 440 с.
7. О. Н. Тершин, В. М. Седов, А. Ф. Чаплин. Синтез антенн на замедляющих структурах. Москва, Связь, 1980, 136 с.
8. Н. Л. Гурбич, Е. Е. Лысенко, О. Ф. Пишко, С. А. Чурилова. Исследование излучающих структур типа многоступенчатых гребенок. Труды Первой всесоюзной научно-технической конференции "Устройства и методы прикладной электродинамики". Москва, Изд-во МАИ, 1988, с. 97.
9. Ф. З. Фрадин. Антенны сверхвысоких частот. Москва, Сов. радио, 1957, 467с.

### Experimental Research of Clinotron with Distributed Quasioptical Power Output

Ye. Ye. Lysenko, O. F. Pishko, S. A. Churilova

The design of the clinotron with a distributed quasioptical power output is described. The experimental dispersion characteristics and directional patterns for the device with the slow-wave structures of different geometry are presented. The results of experimental research and the theoretical data are compared. It is shown that the physical principles of the work of such oscillator may be explained completely by the peculiarities of field excitation in open multi-stage slow-wave structures which contain the rapid space harmonics in their own wave spectrum. The method is proposed and the recommendations are given for choosing the multi-stage slow-wave structure geometry of the devices at different frequency ranges. The operating performances of the two-millimeter wave clinotron with a distributed quasioptical power output are presented. These performances show that for the millimeter and submillimeter frequency range such devices are promising.