

## ОРТОКЛИНОТРОННЫЙ ЭФФЕКТ

А. Я. Кириченко

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

Экспериментально показана возможность повышения эффективности возбуждения поверхностной волны ленточным электронным потоком. Потому что электроны пучка движутся по винтовым траекториям, эффект достигается за счет введения пучка под углом к  $E$ -вектору высокочастотного поля в плоскости замедляющей системы (ортоклинотронный эффект). Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 9 назв.

**Ключевые слова:** пучок, магнитное поле, винтовая траектория.

Обнаружение повышения эффективности взаимодействия электронного потока с электромагнитным полем за счет нарушения коллинеарности распространения поверхностной волны и направлением перемещения потока электронов в плоскости перпендикулярной к поверхности плоской периодической системы определило поиски причины этого феномена. Направление перемещения электронного потока определялось направлением силовых линий фокусирующего магнитного поля. Так как для фокусировки пучка использовалось магнитное поле конечной величины, траектории электронов в пучке представляли собой винтовые линии, при движении вдоль которых каждый электрон изменял направление своей скорости вокруг направления ведущего центра спирали. При определении клинотронного угла наклона  $\varphi$  фактически определялся не угол между направлением скорости волны и скорости электрона, а угол между направлением перемещения волны и ведущего центра спиралей, по которым двигались электроны. В связи с этим у исследователей клинотронного эффекта постоянно возникал вопрос о том, к каким последствиям может привести появление угла  $\psi$  между проекцией скорости электронов на поверхность замедляющей системы и направлением вектора напряженности электрической составляющей СВЧ поля, обычно нормальной к периоду системы.

Изучение этого вопроса возникало в двух случаях. В первом случае он возник еще в начале 1960-х гг., когда с целью повышения выходной мощности была поставлена задача по расширению ленточного электронного потока и, следовательно, по развитию поверхности замедляющей системы в поперечном направлении [1]. Электродинамические свойства широкой ( $A > \lambda/2$ ) периодической системы позволяют распространяться волнам с несколькими вариациями поля поперек такой системы ( $A$  - ширина замедляющей системы;  $\lambda$  - длина генерируемой волны в свободном пространстве). С целью подавления воз-

можного возникновения паразитных типов колебаний в этом случае решено было использовать косые гребенки, у которых за счет периодичности полей в направлении распространения электронного потока была бы осуществлена периодичность и в перпендикулярном направлении к нему. По мнению исследователей этот прием мог позволить сохранить одну единственную фазу волны на всей ширине замедляющей системы.

Для импульсного клинотрона, возбуждаемого в 8-мм диапазоне и содержащего периодическую систему шириной  $A = 12 \text{ мм} \sim 1,5 \lambda$ , угловые зависимости выходной мощности  $P$  (сплошная линия) и относительного значения стартового тока  $I_{\text{ст}}/I_{\text{ост}}$  (штриховая линия) ( $I_{\text{ост}}$  - значение пускового тока при  $\psi = 0$ ) представлены на рис. 1. Ширина электронного пучка соответствовала ширине периодической системы. Видно, что максимальная мощность  $P \approx 100 \text{ кВт}$  достигается при угле  $\psi \approx 4^\circ$ , когда стартовый ток минимальный. Следует отметить, что при этом 20% электронов пучка не достигает коллекторного конца замедляющей системы, а выводится из пространства взаимодействия через его боковые стороны, что несколько снижает эффективность энергообмена в этом случае. Это, с одной стороны, указало на необходимость применить в клинотроне "косую гребенку", а с другой, - на необходимость изучить причины повышения энергообмена при неколлинеарности распространения волны и электронного потока.

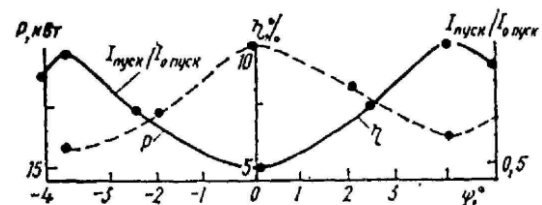


Рис. 1. Зависимость генерируемой мощности  $P$  и КПД  $\eta$  (сплошная кривая), а также стартового тока (штриховая кривая) от угла  $\psi$  поворота пучка в плоскости гребенки

Уже при первых исследованиях особенностей работы клинотрона было отмечено, что смена расположения полюсов магнитного поля у пушечного и коллекторного концов периодической структуры с южного  $S$  на северный  $N$  и наоборот влияет на эффективность работы генератора. Не зная этого, иногда у потребителей даже появлялись претензии о недостижении выходных характеристик клинотрона паспортных данных используемых ими генераторов. Это был второй случай, требовавший более детальных исследований влияния угла  $\psi$  между направлением внешнего магнитного поля, удерживающего электронный поток от расхождения и определяющего направление перемещения электронов, и направлением вектора напряженности электрической составляющей волны на поверхности периодической структуры [2,3]. Принимая во внимание то, что учет влияния статических поперечных возмущений траекторий электронов на взаимодействие электронного потока с поверхностной электромагнитной волной позволил объяснить некоторые изменения в выходных характеристиках приборов О-типа и привел к обнаружению новых эффектов [4-7], было решено учесть влияние перемещение электронов к коллектору в клинотроне по винтообразной траектории. При использовании конечного значения фокусирующего магнитного поля такие траектории электронов в приборах с длительным взаимодействием пучка с полем являются вполне естественными. В первую очередь было решено изучить влияние на стартовый режим ЛОВ О-типа нарушения коллинеарности между ведущим центром электронного потока, в котором электроны перемещаются по винтовым траекториям, и вектором напряженности  $\vec{E}$  высокочастотного электрического поля в плоскости замедляющей системы, т. е. в плоскости, перпендикулярной той, в которой наблюдается клинотронный эффект [8].

**1. Основные соотношения.** Рассмотрим особенности энергообмена электрона с поверхностным полем при наличии некоторого угла  $\psi$  (в плоскости замедляющей системы при  $x = 0$ ) между осью винтовой траектории электрона и вектором  $\vec{E}$  поверхностной волны замедляющей системы (рис. 2). В приближении синхронизма движения электрона и поверхностной волны, при котором электрон находится при фиксированной фазе волны на протяжении, по крайней мере, витка винтовой траектории, зависимостью поля от времени можно пренебречь. При этом вектор-функцию, задающую траекторию электрона, представим в виде

$$\vec{r} = a \cos t \vec{i} + a \sin t \vec{j} + bt \vec{k}, \quad (1)$$

а вектор-функцию поля

$$\vec{E} = -\vec{E}_0 \sin \psi e^{-\gamma(x+z)} \vec{j} + E_0 \cos \psi e^{-\gamma(x+z)} \vec{k}, \quad (2)$$

где  $a$  - радиус вращения электрона;  $b = h/2\pi$  ( $a < b$  для приборов О-типа);  $h$  - шаг винтовой траектории;  $t$  - угол поворота электрона вокруг оси  $z$ ;  $\chi$  - расстояние оси винтовой траектории от поверхности замедляющей системы;  $E_0$  - амплитуда напряженности электрического поля на поверхности замедляющей системы;  $\gamma$  - постоянная распространения в направлении, нормальном к поверхности плоской замедляющей системы.

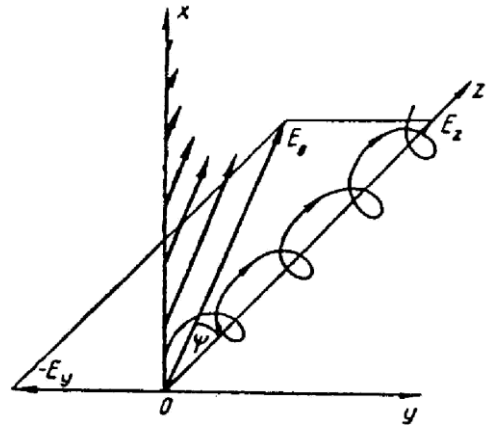


Рис. 2. Траектория электрона в поле поверхностной волны

При слабом энергообмене поля с электроном траекторию последнего (как и заданное поле) можно считать неизменным. Это позволяет искать работу  $A$  заданного силового поля на длине одного витка в виде криволинейного интеграла

$$A = e \int_s \vec{E} d\vec{r}. \quad (3)$$

Решение уравнения (3) при подстановке в него (1) и (2) выражается через модифицированные функции Бесселя нулевого  $I_0(\gamma a)$  и первого  $I_1(\gamma a)$  порядка в виде

$$A = E_0 2\pi a \sin \psi I_1(\gamma a) + E_0 2\pi b \cos \psi I_0(\gamma a). \quad (4)$$

При выполнении соотношения

$$|\operatorname{tg} \psi_0| = \frac{a}{b} \frac{I_1(\gamma a)}{I_0(\gamma a)} \quad (5)$$

$A$  достигает экстремума, причем при  $\psi_0 > 0$  наблюдается максимум энергообмена, а при  $\psi_0 < 0$  - минимум.

Следовательно, для обеспечения максимального энергообмена между электроном и направлением внешнего магнитного поля должен существовать отличный от нуля угол  $\psi_0$  в плоскости  $x = 0$  между осью винтовой траектории

электрона и  $E$ ;  $\psi_0$  зависит от характеристик винтовой траектории  $a$  и  $b$  и от характера спада поля от поверхности замедляющей системы  $\gamma$ .

Изменение направления вращения электрона, выражающееся в изменении знака параметра  $t$  и превращающее правовращающуюся винтовую траекторию в левовращающуюся, меняет знак угла  $\psi_0$ . Так как  $I_0(\gamma a)$  и  $I_1(\gamma a)$  - монотонные функции и всегда  $I_0(\gamma a) > I_1(\gamma a)$ , то с ростом  $\gamma a$  значение  $\psi_0$  стремится к  $\text{arctg } a/b$ , т. е. при заданных  $a/b$  максимально возможное значение угла наклона соответствует углу, под которым винтовая линия пересекает образующую цилиндра, на который она навивается.

**2. Условия постановки эксперимента.**

Для экспериментального обнаружения ортоклиноотронного эффекта изучалось взаимодействие ленточного электронного потока с замедленной волной плоской периодической системы в длинноволновой области миллиметрового диапазона волн. Электронный поток формировался диодной электронно-оптической системой с плоскопараллельными электродами. Ограничение потока от рассеивания в пространстве взаимодействия осуществлялось с помощью однородного фокусирующего магнитного поля, на много превышающего бриллюэновское значение.

Отношение  $a/b$  винтовой траектории произвольного электрона в рассматриваемом случае не зависит от ускоряющего напряжения и индукции магнитного поля, а полностью определяется углом встрела электрона в пространство взаимодействия, т. е. зависит от особенностей электронно-оптической системы. В опытах для граничных электронов пучка  $a/b \sim 0,1$ . Изменение направления вращения электронов с образованием право- или левовращающейся винтовой траектории осуществлялось при изменении направления фокусирующего магнитного поля, создаваемого электромагнитом, с  $H_{NS}$  на  $H_{SN}$ .

При изменении направления движения электронного потока в пространстве взаимодействия ЛОВ (в плоскости  $x = 0$ ) о характере изменения эффективности энергообмена потока с полем можно судить по изменению стартового тока  $I_{ст}$ . При этом предполагается соответствие минимального стартового тока максимальной мощности на выходе автогенератора. В связи с этим в эксперименте изучалась зависимость стартового тока  $I_{ст}$  от направления распространения электронного потока, определяемого углом  $\psi$ . Эксперименты проводились на двух макетах, использующих замедляющие системы типа гребенки с одинаковым периодом и различающихся шириной замедляющих систем и размерами попереч-

ного сечения электронного потока. Основные геометрические размеры системы и потока приведены в таблице.

Таблица

№ макета	Длина гребенки $L$ , мм	Ширина гребенки $M$ , мм	Равновесная толщина электронного потока $2x_0$ , мм	Ширина электронного потока $2y_0$ , мм
1	12	3	0,4	3
2	40	10	0,2	5

Ввиду того, что циклотронный радиус вращения электронов плавно уменьшается к центру электронного потока, наблюдаемое в эксперименте значение угла  $\psi_0$  можно было ожидать немного меньшим расчетного по соотношению (5).

**3. Результаты эксперимента.** Характер зависимости стартового тока  $I_{ст}$  от положения электронного потока, определяемого углом  $\psi$ , иллюстрируется рис. 3.

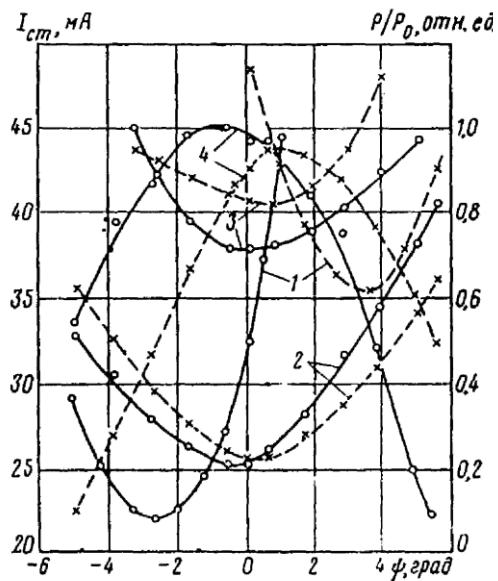


Рис. 3. Зависимость стартового тока (кривые 1,2,3) и мощности (кривая 4) от направления движения электронного потока, определяемого углом  $\psi$ : 1 - макет №2,  $H=3500$  Гс; 2 - макет №1,  $H=3500$  Гс; 3 - макет №1,  $H=1500$  Гс; 4 - макет №1,  $H=3500$  Гс

Кривая 1 принадлежит макету №2, в котором ширина периодической системы в два раза превышает ширину электронного потока. Кривые 2 и 3 получены на макете №1, в котором ширина периодической системы и потока равны, т. е. для наиболее типичного случая возбуждения периодической системы в клинотроне. Кривые получены при разных значениях внешнего магнитного поля. Сплошными кривыми приведены стартовые зависимости, соответствующие возбуждению

системы электронами с левовращающимися винтовыми траекториями (магнитное поле  $H_{NS}$ ), пунктирными - правовращающимися ( $H_{SN}$ ). Минимальный стартовый ток достигается при движении электронного потока под некоторым углом  $\psi_0$  относительно нормали к периоду замедляющей системы. Для кривых 1 этот угол достигает 3 - 3,5• при расчетном значении для граничных электронов потока, равном 4,7•. Разница в значениях стартовых токов при  $\psi = 0$  и  $\psi = \psi_0$  достигает 25 - 30%.

При возбуждении периодической системы электронными потоками, имеющими ширину, равную ширине системы (кривые 2 и 3), особенности стартовых зависимостей сохраняются, однако проявляются они менее четко. Так угол, при котором наблюдается минимум стартового тока не превышает 1 - 1,5•, Разница в значениях  $I_{ст}$  при  $\psi = 0$  и  $\psi = \psi_0$  составляет всего несколько процентов. Это связано в основном с тем, что часть электронов потока при  $\psi \neq 0$  выходит из прос-транства взаимодействия в направлении  $u$ , не доходя до конца замедляющей системы. Кроме того, проявление этого эффекта ухудшается из-за неоднородности  $E$  в направлении оси  $u$ .

На изменение эффективности энергообмена пучка, удерживаемого от расхождения магнитным полем конечной величины, с полем периодической системы существенное влияние оказывает величина магнитного поля. Для установления влияния угла  $\psi$  на макете №1 были проведены исследования характера зависимости  $I_{ст} = f(\psi)$  для двух магнитных полей с напряженностью магнитного поля  $H = 3500$  Гс (кривая 1) и с  $H = 1500$  Гс (кривая 2). Сравнение кривых 2 и 3 показывает, что снижении индукции магнитного поля приводит к более четкому проявлению минимума на кривых  $I_{ст} = f(\psi)$  в соответствии с соотношением (5), хотя и в этом случае угол  $\psi_0$  меньше расчетного значения.

Аналогичные зависимости  $I_{ст} = f(\psi)$  наблюдаются и при возбуждении периодической системы, расположенной на одном из зеркал открытого квазиоптического резонатора, независимо от того связана возбуждаемая волна с полем открытого резонатора или нет. Примечательно, что в этих экспериментах оптимальное положение электронного пучка можно легко наблюдать визуально по следу от пучка на поверхности периодической системы.

Во всех исследуемых случаях с изменением  $\psi$  меняется и уровень выходной мощности возбуждаемых колебаний, так что максимальная

мощность достигается при  $\psi = \psi_0 \neq 0$ . Для примера на рис. 3 приведена одна из таких зависимостей  $P = f(\psi)$ , полученная при  $H = 3500$  Гс (кривая 4).

**Выводы.** Проведенными исследованиями показано, что с целью оптимального возбуждения полей в периодической системе типа гребенка электронный поток должен быть направлен под некоторым углом  $\psi = \psi_0 \neq 0$  в плоскости периодической системы. Обнаруженная в этих исследованиях особенность, связанная с повышением эффективности энергообмена пучка с полем замедленной волны при нарушении коллинеарности направления распространения электронного потока с направлением вектора напряженности электрической составляющей электромагнитного поля в плоскости замедляющей системы, была названа ортоклиноотронным эффектом (в отличие от клиноотронного эффекта). При этом угол  $\psi = \psi_0 \neq 0$  получил название ортоклиноотронного угла. Физическая причина такой особенности, по-видимому, связана с тем, что, как известно, максимальный энергообмен электрона с полем волны наблюдается при совпадении скорости перемещения электрона с направлением вектора электрической составляющей волны. Так как поле при удалении от поверхности замедляющей системы резко спадает, а электроны меняют направление своей скорости относительно ведущего центра спиральной траектории при удалении от поверхности замедляющей системы, то совпадение направления перемещения электрона и вектора напряженности электрической составляющей должны быть как можно более близким в области максимального поля, т. е. на поверхности замедляющей системы. Угловое расхождение между ними при удалении электрона от поверхности системы оказывает меньшее влияние на интегральный энергообмен пучка. Можно предполагать, что подобные факторы обуславливают повышение эффективности энергообмена электронов с электромагнитными полями и в гироклиноотроне [9] по сравнению с эффективностью энергообмена в обычных гиротронах.

Как было установлено последующими исследованиями, для снижения влияния фактора выхода пучка из пространства взаимодействия до прохождения электронов на коллектор при  $\psi \neq 0$  и более эффективного использования ортоклиноотронного эффекта, следует использовать "косые" гребенки.

1. Величко А. Ф., Левин Г. Я. О возможности повышения КПД и мощности клиноотронных генераторов миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов // Тр. ИРЭ АН УССР. - Харьков. - 1964. - 12. - С.153-156.

2. Кириченко А. Я., Солодовник В. А. Об ортоклиноotronном эффекте в лампе обратной волны // Докл. АН УССР. Сер.А. Физ.-мат. и техн. науки. - 1980. - №1. - С.64-67.
3. Кириченко А. Я., Солодовник В. А. Влияние угла встречи электронного потока на стартовый ток лампы обратной волны // Радиотехника и электроника. - 1981. - 24, №1. - С.127-131.
4. Андрушкевич В. С. Влияние формы статических траекторий электронов на работу ЛОВ О-типа в линейном режиме // Вопросы электроники СВЧ.- Саратов: Изд-во Саратов. ун-та. - 1964. - 1. - С.35-46.
5. Кириченко А. Я. Влияние пульсаций границы электронного потока на пусковые характеристики ЛОВ // Тр. ИРЭ АН УССР. - Харьков. - 1964. - 12. - С.162-173.
6. Цвык А. И. Влияние динамических и статических смещений электронов на стартовые токи генератора дифракционного излучения // Изв. вузов. Радиофизика. - 1978. - 21, №8. - С.1216.-1219.
7. Русин Ф. С., Синенко Л. А. Влияние пульсаций электронного потока на работу оротрона // Радиотехника и электроника. - 1979. - 24, №7. - С.1396-1404.
8. А. с. 341113 СССР, МКИ. Н 01j 25/00. Лампа обратной волны / Г. Я. Левин // Открытия. Изобретения. - 1972. - №18. - 201 с.
9. Кураев А. А., Симицын А. К. Перспективы повышения мощности коротковолновых гиротронов // Радиотехника. - 2004. - Вып. 9. - С.48-53.

## THE ORTOCLINOTRON EFFECT

A. Ya. Kirichenko

A possibility of increasing the efficiency of the surface wave excitation by a band electron beam is demonstrated in the experiment. The beam consists of electrons moving along helical trajectories and the effect is achieved by introducing the beam at an angle to the high frequency electric vector within the plane of the slow-wave structure (the ortoclinotron effect).

**Key words:** beam, magnetic field, spiral path.

## ОРТОКЛИНОТРОНИЙ ЕФЕКТ

О. Я. Кириченко

Подано експериментально можливість підвищення ефективності збудження поверхневої хвилі електронним потоком у вигляді стрічки. Тому що електрони пучка рухаються по гвинтовим траєкторіям, ефект досягається за рахунок введення пучка під кутом до вектора  $\vec{E}$  височастотного поля в площині сповільнюючої системи (ортоклиноotronний ефект).

**Ключові слова:** пучок, магнітне поле, гвинтова траєкторія.

*Рукопись поступила 14 февраля 2007 г.*