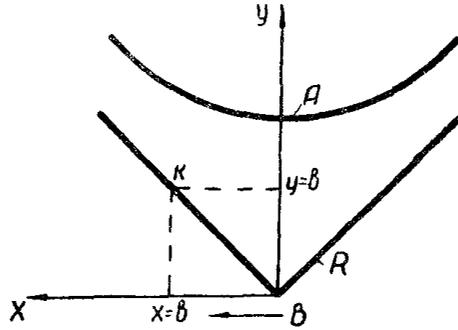


Для того чтобы электрон совершал гармонические колебания вдоль оси x , потенциал по оси x должен изменяться по закону $V \sim -x^2$. Это имеет место в гиперболическом поле

$$V = K(y^2 - x^2). \quad (1)$$

Требуемую конфигурацию поля можно осуществить с помощью электродов, имеющих форму гиперболических цилиндров [2], или электродов, поперечное сечение которых показано на фиг. 1.



Фиг. 1.

Положим, что электрод A имеет высокий положительный потенциал относительно электрода R , из точки K которого эмитируются электроны. Вдоль оси x приложено однородное магнитное поле B , которое препятствует попаданию электронов на ускоряющий электрод A . Электрическое поле по оси z $E_z = 0$.

Уравнения движения электронов, без учета влияния их объемного заряда, для данной системы имеют следующий вид:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -2 \frac{e}{m} K x, \quad (2a)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = 2 \frac{e}{m} K y - \frac{e}{m} B \frac{dz}{dt}, \quad (2б)$$

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{e}{m} B \frac{dy}{dt}. \quad (2в)$$

Пренебрегая начальными тепловыми скоростями электронов и полагая при $t=0$

$$x = b, \quad y = b, \quad z = 0, \quad (3)$$

получим решение уравнений (2 а, б, в,)

$$x = b \cdot \cos \omega_0 t, \quad (4)$$

$$y = \frac{\omega_c^2}{\Omega^2} b \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega_c^2} \cos \Omega t \right), \quad (5)$$

$$z = \frac{\omega_c}{\Omega} \frac{\omega_0^2}{\Omega^2} b (\Omega t - \sin \Omega t), \quad (6)$$

где

$$\omega_0 = \sqrt{2 \frac{e}{m} K}, \quad (7)$$

$$\omega_c = \frac{e}{m} B, \quad (8)$$

$$\Omega = \sqrt{\omega_c^2 - \omega_0^2}. \quad (9)$$

Из (4—6) следует, что электрон, совершая по оси x гармонические колебания с угловой частотой ω_0 , одновременно перемещается вдоль системы в направлении оси z , описывая траекторию, которая в плоскости yoz имеет вид циклоиды.

Максимальное смещение в направлении y равно:

$$y_{\max} = \frac{\omega_c^2 + \omega_0^2}{\Omega^2} b. \quad (10)$$

Смещение в направлении z , соответствующее одному периоду движения ($\Omega t = 2\pi$):

$$z_0 = 2\pi \frac{\omega_c \omega_0^2}{\Omega^3} b. \quad (11)$$

Таким образом, если создать высокочастотное поле между электродами, то при достаточной их длине можно обеспечить многократность взаимодействия электронов с высокочастотным полем, что, как известно, является одним из условий получения высоких к. п. д.

Для экспериментальной проверки возможности применения гармонических колебаний электронов для генерации сверхвысоких частот были изготовлены две лампы, имеющие устройство, показанное схематически на фиг. 2. Принцип работы этих ламп аналогичен принципу работы строботрона [3] и заключается в следующем. Электроны эмитируются катодом K через щель в отражателе R_1 и ускоряются электродом A , имеющим положительный потенциал V_a относительно катода. Однородное магнитное поле B , устраняющее попадание электронов на ускоряющий электрод A , направлено перпендикулярно к плоскости симметрии электродов. Отражательные электроды R_1 и R_2 , имеющие отрицательный потенциал $-V_R$, связаны с двухпроводной линией, которую можно настраивать перемещением короткозамыкающей перемычки M .

При своем движении в междуэлектродном пространстве электроны будут возбуждать колебания, частота которых будет равна частоте гармонических колебаний электронов. Под действием высокочастотного поля происходит „рассортировка“ электронов, вылетающих из катода. Электроны, вылетевшие из катода в неблагоприятной фазе, будут ускоряться высокочастотным полем и попадать на отражатель R_2 . Электроны благоприятной фазы после выхода из пространства взаимодействия собираются коллектором C , на который подан потенциал, приблизительно равный $1/2 V_a$.

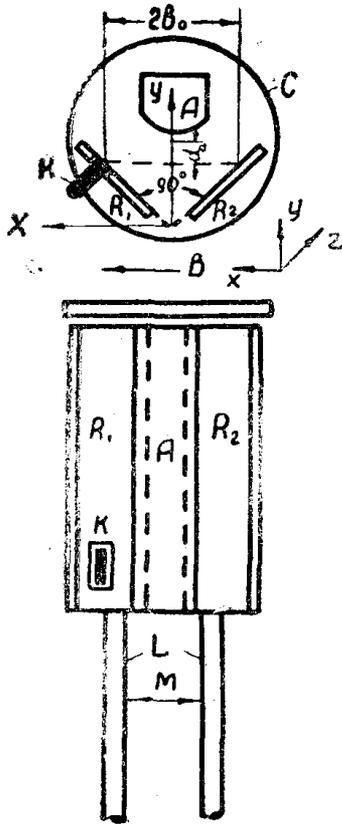
Частота гармонических колебаний электронов определяется электростатическим полем междуэлектродного пространства и не зависит от величины магнитного поля. Электростатическое поле в поперечном сечении лампы подбирается таким, чтобы распределение потенциала соответствовало выражению (1).

Тогда частота электронных колебаний

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2 \frac{e}{m} K}. \quad (12)$$

Постоянную K можно определить из (1), полагая, что при $x=0$ и $y_1^2 = b + d_a$, $V = V_a$. Подставляя полученное выражение в (12), имеем

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{2 \frac{e}{m} \cdot \frac{V V_a}{b + d_a}} = 0,945 \cdot 10^5 \frac{\sqrt{V V_a}}{b + d_a}. \quad (13)$$



Фиг. 2. Схематическое устройство лампы.

K —катод, A —ускоряющий электрод, R_1, R_2 —отражатели, C —коллектор, L —двухпроводная линия, M —короткозамыкающая перемычка. Лампа помещена в однородное магнитное поле B , имеющее направление, указанное стрелкой.

Для того, чтобы электроны не попадали на ускоряющий электрод A , величина магнитного поля B должна быть не меньше некоторого „критического“ значения $B_{кр}$. Величину критического магнитного поля можно найти из условия

$$y_{\text{тах}} \leq b + d_a. \quad (15)$$

Подставляя выражение $y_{\text{тах}}$ из (10) и используя (7, 8, 9), получим

$$B_{кр} = \sqrt{\frac{2m}{e}} \sqrt{\frac{2b + d_a}{d_a} \cdot \frac{V V_a}{b + d_a}} = 3,37 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{2b + d_a}{d_a} \cdot \frac{V V_a}{b + d_a}} \left(\frac{b_0}{\text{м}^2} \right). \quad (16)$$

Так как электроды R_1 и R_2 имеют отрицательный потенциал, то величина b в формуле (13) будет меньше, чем геометрический размер лампы b_0 .

Интегрируя выражение

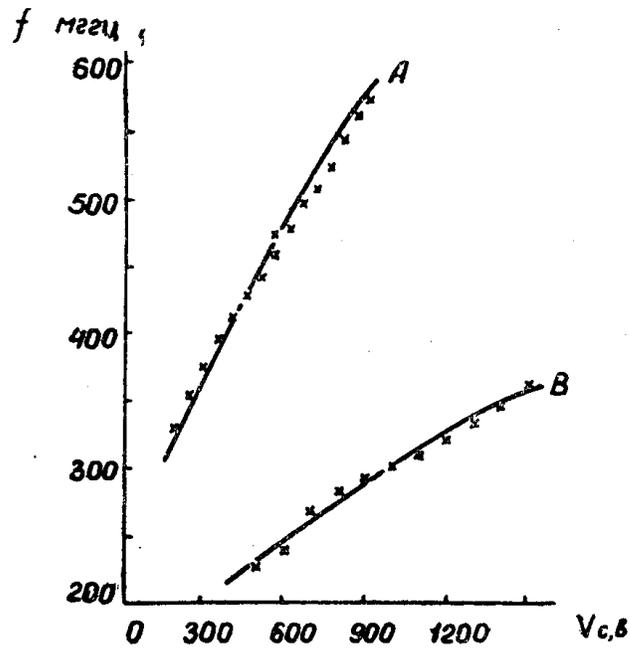
$$-V_R = \int_s^{b_0} \frac{\partial u}{\partial x} dx, \text{ можно найти, что}$$

$$b = b_0 \sqrt{1 - \left(\frac{b_0 + d_a}{b_0} \right)^2 \frac{V_R}{V_a}}. \quad (14)$$

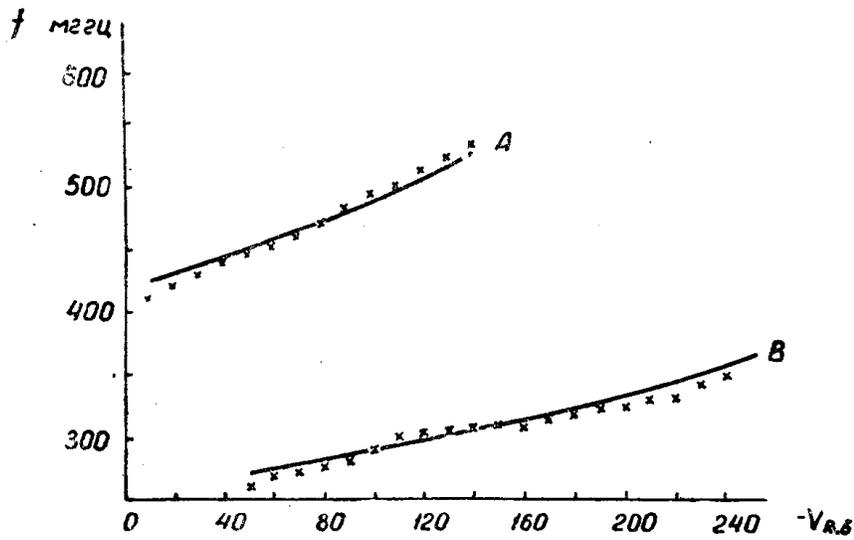
Полученные выражения показывают, что частота колебаний зависит от величины ускоряющего напряжения V_a и потенциала отражателей $-V_R$. Эти зависимости графически представлены на фиг. 3а и 3б для ламп, имеющих размеры $b_0 = 4 \text{ мм}$, $d_a = 1 \text{ мм}$ (лампа № 1) и $b_0 = 7 \text{ мм}$, $d_a = 3,5 \text{ мм}$ (лампа № 2).

Как видно из приведенных графиков, результаты измерений имеют вполне удовлетворительное соответствие с данными расчета по формулам (13—14).

Как видно из фиг. 4, данные расчета по формуле (16) хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными для лампы, имеющей размеры $b_0=4$ мм, $d_a=1$ мм, при $V_R=0$.



Фиг. 3а. Зависимость генерируемой частоты от ускоряющего напряжения.
 — теоретическая кривая, х— экспериментальные точки.
 А—лампа № 1 $b_0=4$ мм, $d_a=1$ мм, $V_R=-50$ в
 В—лампа № 2 $b_0=7$ мм, $d_a=3,5$ мм, $V_R=-75$ в



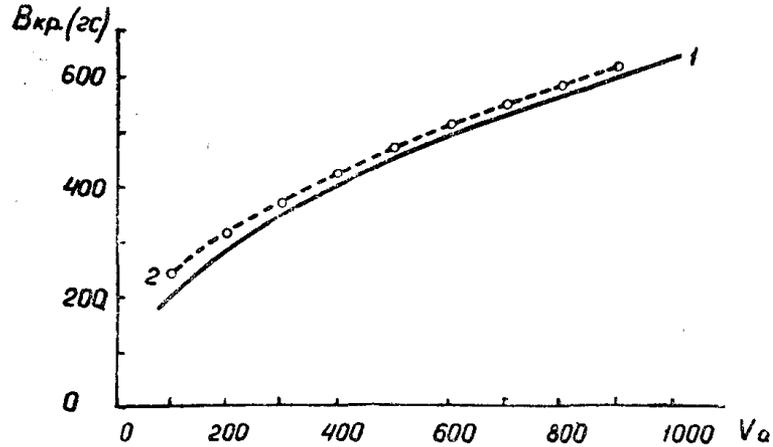
Фиг. 3б. Зависимость генерируемой частоты от потенциала отражателей.
 — теоретическая кривая, х— экспериментальные точки.
 А—лампа № 1 $b_0=4$ мм, $d_a=1$ мм, $V_a=500$ в
 В—лампа № 2 $b_0=7$ мм, $d_a=3,5$ мм, $V_a=850$ в

Следует отметить, что величину критического магнитного поля можно найти из чисто энергетических соображений без знания формы электронных траекторий.

Согласно закону сохранения энергии можно написать:

$$\frac{1}{2} m \left[\left(\frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \right] = eV,$$

если положить, что электроны покидают катод с нулевой скоростью.



Фиг. 4. Зависимость величины критического магнитного поля от ускоряющего напряжения при $V_R = 0$.
1 — расчетная кривая, 2 — экспериментальная кривая.

Принимая во внимание, что для критических условий при

$$y = b + d_a, \quad x=0, \quad \frac{dy}{dt} = 0, \quad V = V_a,$$

получим

$$\frac{1}{2} m \left[\left(\frac{dx}{dt} \right)_{x=0}^2 + \left(\frac{dz}{dx} \right)_{y=b+d_a}^2 \right] = eV_a. \quad (17)$$

Из уравнения (26)

$$\frac{dz}{dt} = \omega_c (y - b). \quad (18)$$

Составляющая скорости электрона, совершающего гармонические колебания с амплитудой b вдоль оси x , будет, очевидно, равна:

$$\frac{dx}{dt} = -\omega_0 b \sin \omega_0 t. \quad (19)$$

Подставляя (18) и (19) в выражение (17), после необходимых преобразований получим

$$B_{кр} = \sqrt{2 \frac{m}{e}} \sqrt{\frac{2b + d_a}{d_a}} \frac{\sqrt{V_a}}{b + d_a}.$$

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

а) Получение и использование гармонических колебаний электронов для генерации сверхвысоких частот возможно в лампах, имеющих простую конструкцию, не требующую большой точности изготовления.

б) Благодаря электронной настройке рабочая частота лампы может изменяться в широких пределах; практически генератор может перекрывать диапазон частот 1:2 без механической перестройки.

в) Нагруженная добротность колебательной системы у подобных генераторов может быть очень низкой, что позволяет получить полосу электронной настройки между точками половинной мощности порядка 10—15%.

г) Многократность взаимодействия электронов с высокочастотным полем обеспечивает возможность получения достаточно высоких к. п. д. (порядка 20—30%).

Указанные достоинства позволяют говорить о целесообразности разработки такого рода ламп для применения в радиоприемниках связи с частотной модуляцией, лабораторных сигнал-генераторах и других радиотехнических устройствах СВЧ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин В. И. Дециметровые и сантиметровые волны, т. I, Москва, 1939
2. Фогель Я. и Брауде С. ЖЭТФ, XVI, 187, 1946.
3. H. Alfvén and D. Romell, Proc. IRE, 42, 1239, 1954.

Стр.	Строка	Напечатано	Следует читать
3	11 стр.	10^{16}	10^{-6}
9	9 стр.	$5 \cdot 10^{-9}$ сек	$5 \cdot 10^{-9}$ сек
11	1 стр.	$2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек	$2 \div 3 \cdot 10^{-8}$ сек
29	6 стр.	10^{-6} см/сек	10^6 см/сек
29	2 стр.	большой	большин
30	3 стр.	10^{-6} сек	10^{-6} сек
32	6 стр.	спаянности	спайности
33	17 стр.	10^{-8} сек	10^{-8} сек
34	3 стр.	10^{-6} сек	10^{-6} сек
34	4,5 стр.	$10^{-4} - 10^{-1}$ сек	$10^{-4} - 10^{-1}$ сек
34	19 стр.	10^{-8} и 10^{-6} см/сек	10^{-8} сек и 10^6 см/сек
56	форм. 9	В конце фигурной скобки следует — 1.	
65	3 стр.	формулу	форму
91	5 стр.	1350 ом и $R_T = 30 \text{ ком}$	$R_T = 1350 \text{ ом}$ $R_T = 30 \text{ ком}$
107	6 стр.	$\tau = 10^{-6}$ сек	$\tau = 10^{-6}$ сек
109	16 стр.	образцов	микротвердости образцов
111	4 стр.	E	$E_{пр}$
112	рис. 9, 5 стр.	поле однородное	поле неоднородное
116	12 стр.	Винчелла	Винчелл
123	7 стр.	спаянность	спайность
128	32 стр.	40 мол %	90 мол %
170	1 стр.	ангенса	тангенса
217	15 стр.	При введении примесей типа внедрения	При введении примесей в твердые растворы типа внедрения
218	24 стр.	Измерялась зависимость	Определялась зависимость
219	8 стр.	хлористый рубидий	бромистый калий
219	22 стр.	хранения из монокристаллов	хранения монокристаллов
220	фиг. 2	В точке начала координат слева по оси $\lg z$ следует поставить — 12	
228	1 стр.	выражение	выражение
228	5 стр.	огла	тогда
228	6 стр.	арфора	фарфора
228	7 стр.	каркасном	в каркасном
228	8 стр.	етальной	детальной
228	16 стр.	гатушек	катушек
228	форм. 3	C_g	C_g
242	2 стр.	Из фиг. 1	Из диаграммы плавкости
244	11—12 стр.	рентгенограммы смещены	рентгенограммы сплава смещены
251	24 стр.	с ионизованном	с ионизированным
301	7 стр.	монизирующих	ионизирующих
302	18 стр.	-процентного	50-процентного
306	9 стр.	95% монокристалла	95% плотности монокристалла
325	24 стр.	группы	II группы
332	6 стр.	$10^7 - 10^8$ ом/сек	$10^7 - 10^8$ см/сек
343	1 стр.	„438—1“	„ИЗВ—1“
394	8 стр.	Co	Co