

*ИЗВЕСТИЯ
ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ*

РАДИОФИЗИКА

Том XVII

ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК

ИЗДАНИЕ ГОРЬКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО
РАДИОФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА

1 9 7 4

К НЕЛИНЕЙНОЙ ТЕОРИИ СВЧ ГЕНЕРАТОРОВ, ОСНОВАННЫХ НА ИНДУЦИРОВАННОМ ЧЕРЕНКОВСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ*

З. Н. Кротова, Ю. С. Чертков

Одним из физических механизмов, лежащих в основе действия релятивистских СВЧ генераторов, является индуцированное черенковское излучение электронных потоков (см., в частности, экспериментальные работы [1, 2]). Настоящее сообщение содержит результаты расчетов, предпринятых с целью проследить эволюцию оптимальных параметров таких генераторов—устройств типа ЛБВ, ЛОВ, оротрона — при изменении энергии электронов от слабoreлятивистских до ультрарелятивистских значений.

Расчеты проводились для следующей упрощенной модели: электронный пучок на отрезке конечной длины $z \in [0, L]$ подвергается действию волны $E = E_0 \cos(\omega t - hz)$, имеющей постоянные амплитуду и фазовую скорость; фокусировка пучка осуществляется сильным продольным магнитным полем, препятствующим поперечным смещениям электронов; электронный ток достаточно мал для того, чтобы полем высокочастотного пространственного заряда можно было пренебречь. При этих допущениях движение каждого электрона описывается системой уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d\gamma}{d\zeta} &= \alpha_{\parallel} \cos \vartheta, \\ \frac{d\vartheta}{d\zeta} &= \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - 1}} - \frac{1}{\beta_{\Phi}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где γ — отношение энергии электрона \mathcal{E} к его энергии покоя \mathcal{E}_0 , $\vartheta = \omega t - hz$ — фаза волны, β_{Φ} — отношение фазовой скорости волны ω/h к скорости света в вакууме c , $\alpha_{\parallel} = eE_0 \lambda / \mathcal{E}_0$ — постоянный коэффициент, пропорциональный амплитуде волны ($\lambda = \lambda/2\pi$, e — заряд электрона, $\lambda = 2\pi c/\omega$ — длина волны излучения в вакууме), $\zeta = z/\bar{\lambda}$ — независимая переменная, пропорциональная координате z .

Предполагалось, что на входе системы, при $z = 0$, все электроны имеют одинаковые энергии $\mathcal{E}(0) = \mathcal{E}_{вх}$ и образуют стационарный поток, т. е. равномерно распределены по фазе влета $\vartheta(0) = \vartheta_{вх}$. Соответственно КПД взаимодействия электронного потока с волной определяется выражением

* Работа доложена на VI Межвузовской конференции по электронике СВЧ в Минске (1969 г.).

$$\eta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\gamma_{\text{вх}} - \gamma(\zeta_{\text{вх}}, \vartheta_{\text{вх}})}{\gamma_{\text{вх}} - 1} d\vartheta_{\text{вх}}, \quad (2)$$

где $\gamma_{\text{вх}} = \mathcal{E}_{\text{вх}}/\mathcal{E}_0$, $\zeta_{\text{вх}} = L/\lambda$.

На основании соотношений (1), (2) для каждого значения начальной энергии электронов численным методом были определены максимальный КПД и соответствующие оптимальные значения параметров α_{\parallel} , L/λ и $\epsilon = (v_{\text{вх}} - v_{\text{ф}})/v_{\text{вх}}$ ($v_{\text{вх}} = c\sqrt{1 - \gamma_{\text{вх}}^{-2}}$ — начальная скорость электронов). Результаты расчетов приведены на рис. 1, где $U = (\mathcal{E}_{\text{вх}} - \mathcal{E}_0)/e$.

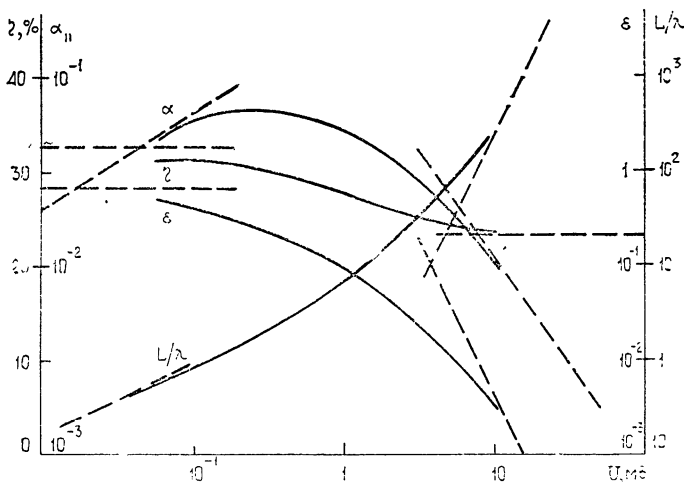


Рис. 1. Зависимость максимального КПД и оптимальных значений параметров α_{\parallel} , ϵ и L/λ от энергии электронов.

При $\gamma_{\text{вх}} \rightarrow 1$ и $\gamma_{\text{вх}} \rightarrow \infty$ максимальные значения КПД стремятся к постоянным пределам, а оптимальные значения параметров α_{\parallel} , L/λ и ϵ к асимптотам (пунктирные линии на рис. 1), которые могут быть определены на основании уравнений (1), если пренебречь в них членами высокого порядка малости по параметрам $\gamma_{\text{вх}} - 1$ или, соответственно, $\gamma_{\text{вх}}^{-1}$. Для систем со слабoreлятивистскими ($\gamma_{\text{вх}} - 1 \ll 1$) и ультрарелятивистскими ($\gamma_{\text{вх}} \gg 1$)* электронными пучками на основании асимптотических уравнений были определены не только максимальные значения КПД, но и была исследована в довольно широкой области зависимости КПД от параметров, пропорциональных длине системы и амплитуде волны, при оптимальном выборе расстройки синхронизма ϵ (рис. 2). В слабoreлятивистской области (рис. 2 а) рассмотрение было ограничено случаем не слишком большой амплитуды волны — такой, когда скорость ни одного из электронов при его торможении переменным полем не падает до нуля.

Определенные на основании уравнений (1), (2) оптимальные величины E_0 и L в соответствии с элементарными физическими соображениями удовлетворяют соотношению $E_0 L \sim U$. С ростом начальной энергии электронов оптимальное значение относительной длины системы L/λ увеличивается в слабoreлятивистской области пропорционально \sqrt{U} , а в ультрарелятивистской области пропорционально U^2 ; соответственно оптимальное значение параметра $E_0 \lambda$ в слабoreлятивистской области возрастает пропорционально \sqrt{U} , а в ультрарелятивистской области падает обратно пропорционально U . Эти закономерности согласуются с общими принципами подобия слабoreлятивистских и ультрарелятивистских [3] СВЧ приборов, основанных на индуцированном черенковском излучении электронов.

С ростом U из-за уменьшения параметра расстройки синхронизма ϵ необходимо — во избежание падения КПД — снижать относительный разброс скоростей электронов. Однако соответствующие значения допустимого разброса энергий электронов $\Delta \mathcal{E}_{\text{вх}}$ при любом значении их средней энергии $\mathcal{E}_{\text{вх}}$ в соответствии с [3] удовлетворяют усло-

* Подробный анализ поведения параметров генераторов когерентного электромагнитного излучения в области ультрарелятивистских энергий электронов содержится в [3, 4].

вию $\Delta \varepsilon_{\text{вх}}/\bar{\varepsilon}_{\text{вх}} \ll 1$. Так, например, если параметры α , L/λ и ε являются оптимальными для отбора энергии у средней энергетической фракции ультрарелятивистского электронного потока, то КПД, равный половине максимального, имеет место для фракции, энергии которых отличаются от средней на $\delta \varepsilon_{\text{вх}} \approx \pm 0,2 \bar{\varepsilon}_{\text{вх}}$.

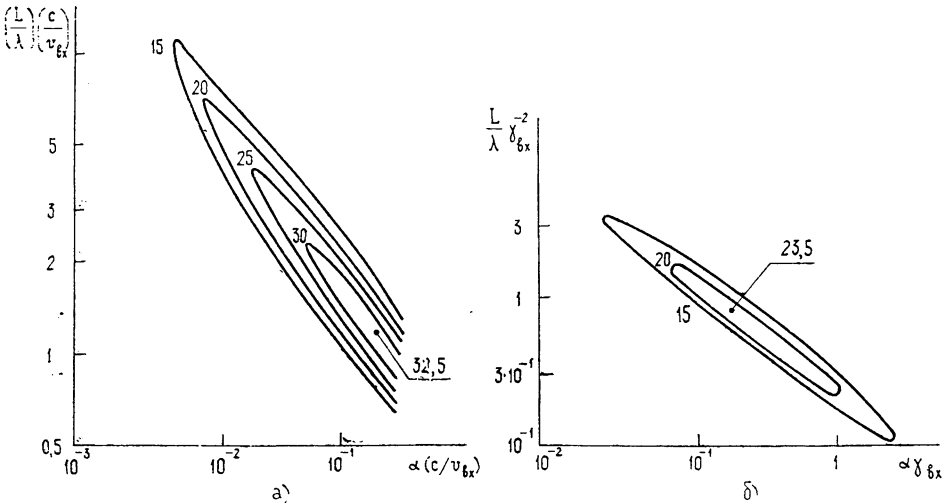


Рис. 2. Линии равного КПД на плоскости параметров, пропорциональных амплитуде волны и протяженности системы, при оптимальных значениях расстройки синхронизма (а—слаборелятивистская, б—ультрарелятивистская энергия электронов).

Специальные расчеты показали, что КПД системы в сильной степени зависит от продольной структуры переменного поля. Так, например, если амплитуда волны линейно растет в направлении движения электронов $\alpha_{\parallel} = \alpha_{\parallel}(\xi) = (z/L)\alpha_0$, то в слаборелятивистском пределе максимальный КПД составляет 52% при $\alpha_0 = 0,1(v_{\text{вх}}/c)$, $L/\lambda = 5(v_{\text{вх}}/c)$, $\varepsilon = 0,3$, а в ультрарелятивистском пределе максимальный КПД равен 48% при $\alpha_0 = 0,54 \gamma_{\text{вх}}^{-1}$, $L/\lambda = 30 \gamma_{\text{вх}}^2$, $\varepsilon = 9 \gamma_{\text{вх}}^{-2}$.

Приведенные результаты могут быть использованы, строго говоря, лишь для расчета устройств с заданной структурой высокочастотного поля, а именно, для расчета СВЧ генераторов с высокочастотными резонаторами. Однако описанные здесь закономерности поведения оптимальных параметров справедливы, очевидно, и для других черенковских СВЧ генераторов и усилителей [4].

Авторы благодарны А. В. Гапонову и М. И. Петелину за внимание к работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. A. Nation, Appl. Phys. Lett., 17, № 11, 491 (1970).
2. Н. Ф. Ковалев, М. И. Петелин, М. Д. Райзер, А. В. Сморгонский, Л. Э. Цопп, Письма в ЖЭТФ, 18, № 4, 232 (1973).
3. М. И. Петелин, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, 13, № 10, 1586 (1970).
4. Н. Ф. Ковалев, А. В. Сморгонский, Радиотехника и электроника (в печати).

Научно-исследовательский радиофизический институт

Поступила в редакцию
16 июля 1973 г.