

01;09;10

©1995 г.

ВЛИЯНИЕ РАЗБРОСА НАЧАЛЬНЫХ ЭНЕРГИЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА ДИНАМИКУ ВОЗБУЖДЕНИЯ И УСТАНОВИВШИЙСЯ РЕЖИМ ЛСЭ ГЕНЕРАТОРА

А.В.Савилов

Институт прикладной физики РАН,
603600, Нижний Новгород, Россия
(Поступило в Редакцию 18 мая 1994 г.)

Исследуется влияние разброса электронов по начальным энергиям на спектр и эффективность установившегося режима ЛСЭ генератора с резонатором, обладающим невысокой добротностью. Показано, что сравнительно большой (на пределе гидродинамической стадии усиления) разброс энергий обеспечивает значительное увеличение критического перехода к многочастотному режиму без заметного снижения достижимого электронного КПД.

Рассмотрим лазер на свободных электронах с резонатором, обладающим невысокой добротностью, который обеспечивает обратную связь для собственных продольных мод электродинамической системы, лежащих в широкой (по сравнению с полосой усиления) области частот. При достаточном превышении электронным током стартового значения в таком генераторе на начальной (линейной) стадии возбуждается одновременно большое количество продольных мод, находящихся в полосе усиления. При этом спектр стационарного (установившегося) режима генератора является результатом конкуренции этих мод на нелинейной стадии возбуждения и определяется величиной единственного параметра L , характеризующего надпороговость режима и пропорционального длине пространства взаимодействия генератора и кубическому корню из тока ^[1]. При небольшом превышении этим параметром стартового значения L_{st} установившийся режим оказывается одночастотным, причем возбуждается мода, имеющая максимальное линейное усиление за проход по пространству взаимодействия. Такую моду далее будем называть основной. Возбуждаясь быстрее остальных, она подавляет на нелинейной стадии всех конкурентов. Однако с увеличением параметра надпороговости динамика конкуренции продольных мод усложняется, и при превышении им критического значения L_{cr} установившийся режим перестает быть одночастотным. При этом процесс возбуждения генератора, а также спектр

и эффективность установившегося режима описываются сложной системой нестационарных уравнений [1-3]. Однако, как было показано в работе [4], в случае достаточно низкой добротности резонатора, когда спектр собственных "горячих" мод системы неэквидистантен, критическое значение параметра надпороговости L_{cr} может быть найдено с помощью более простой модели двух продольных мод. Переход к многочастотной генерации определяется устойчивостью одномодового стационара основной моды к возбуждению любой другой (паразитной) продольной моды. В настоящей работе этот подход обобщается на случай разброса по начальным энергиям электронов.

Рассмотрим взаимодействие двух мод в ЛСЭ в рамках асимптотических уравнений малого КПД [5]. Пусть в генераторе взаимодействуют с электронным пучком и между собой две продольные моды, основная и паразитная, с частотами ω и $\tilde{\omega}$, соответствующими расстройками синхронизма

$$\Delta = C^{-1}(1 - \omega/hv_e), \quad \tilde{\Delta} = C^{-1}(1 - \tilde{\omega}/\tilde{h}v_e).$$

Здесь

$$C = \left[\frac{eI}{mc^3 \kappa^2 \mu N \gamma_0} \right]^{1/3}$$

— параметр усиления Пирса, h и \tilde{h} — продольные волновые числа соответствующих модам комбинационных волн, v_e — скорость электронов, I — электронный ток, κ и μ — коэффициент связи электронов с волной и параметр инерционной группировки частиц [5]. Как и в [4], предположим, что основная мода, расстройка которой соответствует максимальному усилению в линейном режиме, находится в одномодовом стационаре; в то же время паразитная мода имеет произвольную расстройку и малую амплитуду. Тогда стационар основной моды в пренебрежении воздействия на нее паразитной моды описывается следующей системой уравнений, совпадающих с уравнениями резонансной ЛБВ:

$$\frac{du}{dz} = \text{Im} \alpha \exp(i\theta), \quad (1)$$

$$\frac{d\theta}{dz} = u, \quad (2)$$

$$\frac{d\alpha}{dz} + i\Delta\alpha = 2i \int_{-\infty}^{+\infty} f(u_0) \langle \exp(-i\theta) \rangle_{\theta_0} du_0, \quad (3)$$

где u — нормированная разность между текущей энергией частицы и средней начальной энергией электронов потока, z — нормированная координата, α — нормированная амплитуда основной моды, θ — фаза частицы относительно фазы комбинационной волны основной моды.

Начальные условия к системе (1)–(3) имеют вид

$$u(0) = u_0, \quad \theta(0) = \theta_0, \quad (4)$$

где разброс начальных энергий частиц описывается функцией распределения $f(u_0)$, а начальные фазы электронов любой энергетической фракции распределены равномерно в интервале $[0, 2\pi)$.

При этом в стационарном состоянии имеет место граничное условие

$$\alpha(0) = R\alpha(L), \quad (5)$$

где R — коэффициент отражения, $L = hlC$ — параметр надпороговости (нормированная длина генератора).

Электронный КПД генератора определяется соотношениями

$$\eta = \frac{C}{\mu(1 - \gamma_0^{-1})} \tilde{\eta}, \quad \tilde{\eta} = \int_{-\infty}^{+\infty} f(u_0) \langle u \rangle_{\theta_0} du_0. \quad (6)$$

Расстройка основной моды соответствует максимальному линейному усилению и определяется из линейного решения уравнений (1)–(4). Так, в пределе большой длины L это решение имеет вид $\alpha \sim \exp(\Gamma z)$, где $\Gamma(\Delta)$ является решением уравнения [6]

$$\Gamma + i\Delta = -i \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{f(u_0)}{(\Gamma + iu_0)^2} du_0, \quad (7)$$

которое в отсутствие разброса переходит в известное дисперсионное соотношение ЛСЭ. Рассмотрим для простоты здесь и далее “прямоугольное” распределение электронов по начальным энергиям

$$f(u_0) = \frac{1}{2D} \begin{cases} 1, & -D \leq u_0 \leq D, \\ 0, & u_0 < -D \text{ и } u_0 > D. \end{cases}$$

В этом случае имеем дисперсионное соотношение

$$(\Gamma + i\Delta)(\Gamma^2 + D^2) = -1, \quad (8)$$

которое совпадает с дисперсионным соотношением для ЛСЭ без разброса, но с пространственным зарядом [7]. В отсутствие разброса усиление максимально при $\Delta = 0$. С увеличением разброса расстройка основной моды увеличивается, при большом разбросе она оказывается порядка величины D .

Рассмотрим теперь условия возбуждения паразитной продольной моды на фоне установившегося состояния основной моды. Считая амплитуду паразитной моды $\tilde{\alpha}$ малой, для текущего усиления $\tilde{g} = \tilde{\alpha}/\tilde{\alpha}(0)$ получим уравнение [4]

$$\frac{d\tilde{g}}{dz} + i\tilde{\Delta}\tilde{g} = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} f(u_0) \langle \Phi \exp(-i\theta) \rangle_{\theta_0} du_0, \quad (9)$$

в котором поведение функции $\Phi(z, \theta_0, u_0)$ определяется амплитудами обеих мод и фазой частицы относительно фазы основной моды

$$\frac{d^2\Phi}{dz^2} = \frac{\tilde{g}}{2i} \exp(i\theta) + \Phi \text{Re}\{\alpha \exp(i\theta)\}. \quad (10)$$

Начальные условия к уравнениям (9), (10) имеют вид

$$\Phi(0) = \Phi'(0) = 0, \quad \tilde{g}(0) = 1. \quad (11)$$

Система уравнений (9)–(10) совместно с (1)–(5) определяет линейное усиление паразитной моды с произвольной расстройкой $\tilde{\Delta}$ в условиях, когда электронный пучок промодулирован основной модой. Как показано в [4], установившийся режим генератора остается одномодовым, если для любой паразитной моды это усиление меньше потерь, определяемых величиной R^{-1} . Критическое значение параметра надпороговости, таким образом, определяется условием

$$\max_{\tilde{\Delta}} |\tilde{g}(z = L, \tilde{\Delta})| < R^{-1}, \quad (12)$$

которое в отсутствие разброса дает оценку [4]

$$L_{cr} = 2.9 (R^{-1} - 1)^{1/3}. \quad (13)$$

Рассмотрим вопрос о влиянии разброса частиц по начальным энергиям на величину L_{cr} и КПД установившегося режима генератора.

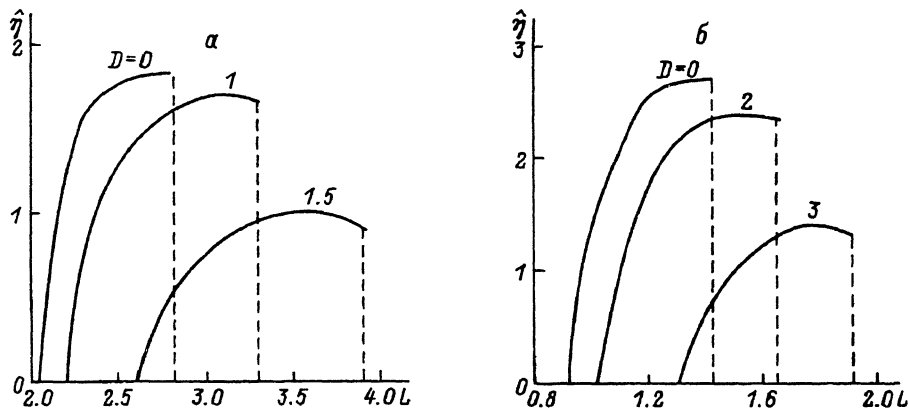


Рис. 1. Приведенный электронный КПД ЛСЭ $\hat{\eta}$ в установившемся одночастотном режиме при различных величинах разброса D в зависимости от параметра надпороговости L .

Максимальные значения L соответствуют переходу к многочастотной генерации. $R = 0.5$ (а), 0.9 (б).

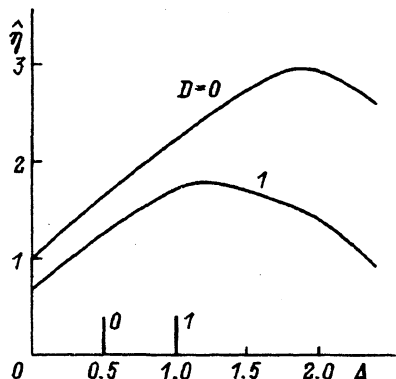


Рис. 2. Приведенный КПД $\hat{\eta}$ стационарного режима генератора ($L = 3.2$, $R = 0.5$) как функция расстройки рабочей моды Δ в отсутствие разброса $D = 0$ и при $D = 1$.

Вертикальные линии — расстройки основных, наиболее быстро возбуждающихся мод.

Для этого исследуем систему уравнений (1)–(5), (9)–(12) численно. На рис. 1 приведены зависимости приведенного КПД η в одномодовом стационаре основной моды от параметра надпороговости L при разных разбросах D для случаев как низкой ($R = 0.5$), так и довольно высокой ($R = 0.9$) добротности генератора. При этом рассматриваются только одночастотные установившиеся режимы. Параметр L , таким образом, ограничен как снизу, так и сверху

$$L_{st}(R, D) < L < L_{cr}(R, D),$$

где его критическое значение определяется критерием (12). Видно, что при достаточно большом разбросе энергий, который соответствует границе между гидродинамической и кинетической стадиями усиления $DL \sim \pi$, КПД уменьшается лишь незначительно, в то время как критическая длина заметно возрастает. Этот эффект понятен из рис. 2, где приведены зависимости КПД одномодового стационара от расстройки рабочей моды Δ при $L = 3.2$, $R = 0.5$ в отсутствие разброса $D = 0$ и при разбросе $D = 1$. Вертикальные линии указывают соответствующие расстройки основной моды. Слабая чувствительность КПД установившегося режима к разбросу связана с тем, что расстройка основной моды не совпадает с расстройкой, соответствующей максимальному КПД. С введением разброса появляются два фактора, препятствующие снижению КПД: во-первых, в соответствии с дисперсионным соотношением (8) увеличивается расстройка основной моды и, во-вторых, повышается эффективность взаимодействия потока с волной для части электронов потока, начальная энергия которых меньше средней ($u_0 < 0$). По этим причинам КПД основной моды в установившемся режиме практически не меняется, хотя максимизированный по расстройке КПД падает почти вдвое.

Таким образом, достаточно большой разброс начальных энергий частиц практически не снижает электронный КПД и заметно повышает критическое значение параметра надпороговости. Тем самым разброс позволяет (при фиксированной длине генератора) увеличить рабочий ток с сохранением одночастотного режима генерации, что, как следует из соотношения (6), соответствует повышению выходной мощности излучения. Дальнейшее увеличение разброса наряду с увеличением критического значения параметра надпороговости приводит к значительному снижению эффективности генератора.

Автор признателен В.Л. Братману за внимание к работе и полезное обсуждение ее результатов.

Список литературы

- [1] Гинзбург Н.С., Сергеев А.С. // ЖТФ. 1991. Т. 61. Вып. 6. С. 133–140.
- [2] Antonsen T.M., Jr., Levush B. // Phys. Fluids B. 1989. Vol. 1. N 5. P. 1097–1108.
- [3] Levush B., Antonsen T.M., Jr. // Nucl. Instr. and Meth. 1989. Vol. A285. P. 136–143.
- [4] Братман В.Л., Сапилов А.В. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 6. С. 134–145.
- [5] Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Ковалев Н.Ф. и др. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, 1979. Вып. 1. С. 249–274.
- [6] Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Петелин М.И., Сморгонский А.В. // Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, 1979. Вып. 1. С. 217–248.
- [7] Лопузин В.М. Возбуждение электромагнитных колебаний и волн электронными потоками. М.: Гостехиздат, 1953. 324 с.