

09;10;12

Механизм ограничения длительности микроволнового импульса релятивистской ЛОВ

© С.Д. Коровин, Г.А. Месяц, И.В. Пегель,
С.Д. Полевин, В.П. Тараканов

Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

Поступило в Редакцию 3 ноября 1998 г.

Показано, что ограничение длительности импульса релятивистской ЛОВ сопровождается появлением взрывоэмиссионной плазмы на поверхности гофрированной системы. Прекращение генерации может быть объяснено поглощением электромагнитной волны эмитированными из плазмы электронами, радикально усиливающимся присутствием эмитированных из плазмы ионов.

В релятивистских микроволновых генераторах, запитываемых сильноточными релятивистскими электронными пучками (РЭП), при напряженности ВЧ электрического поля на поверхности электродинамической системы $10^5 \div 10^6$ V/cm наблюдается ограничение длительности СВЧ-импульсов на уровне $10^{-8} \div 10^{-7}$ s [1–4]. При этом с ростом мощности излучения длительность импульса уменьшается так, что энергия в нем остается приблизительно постоянной. В настоящее время максимальная энергия в СВЧ-импульсах релятивистских генераторов не превышает нескольких сотен джоулей.

Круг возможных причин данного явления достаточно широк [4–9]. Для черенковских приборов с ведущим магнитным полем при длительности импульсов ~ 10 ns, когда смещение катодной и коллекторной плазмы незначительно, основную роль в укорочении импульса, по-видимому, играет плазма, образующаяся на поверхности замедляющей системы под действием интенсивного ВЧ электрического поля. Источником плазмы могут являться взрывоэмиссионные центры, а также десорбированный с поверхности газ, ионизованный вторично-эмиссионными и рассеянными электронами.

В 3-см релятивистской лампе обратной волны (ЛОВ) с рабочей модой TM_{01} ограничение длительности импульса ~ 10 ns наблюдалось

уже при мощности излучения ~ 300 MW [2]. В качестве одной из причин авторами называлась взрывная эмиссия электронов с поверхности замедляющей структуры и формирование электронной нагрузки.

В 3-см релятивистской ЛОВ при мощности излучения 3 GW [3] длительность СВЧ-импульса составляла лишь 6 ns. Длительность импульсов была обратно пропорциональна их мощности, так что энергия в импульсах сохранялась на уровне 20 J. На поверхности замедляющей системы ЛОВ в местах максимальной напряженности электрического поля наблюдались следы эрозии, такие же как на поверхности металлических взрывоэмиссионных катодов. Это говорит о связи эффекта укорочения СВЧ-импульса со взрывной эмиссией на поверхности электродинамической системы генератора.

Настоящая работа посвящена экспериментальному и численному исследованию процессов, вызывающих ограничение длительности импульсов излучения 3-м релятивистской ЛОВ в условиях, когда влиянием движения катодной и коллекторной плазмы можно пренебречь.

Экспериментальные исследования проводились на сильноточном электронном ускорителе "Синус-6" с длительностью импульса тока 18 ns. Использовалась однородная релятивистская ЛОВ с рабочей модой TM_{01} и длиной волны излучения $\lambda \approx 3.3$ см. Длина замедляющей системы ЛОВ, составленной из отдельных гофр (колец из нержавеющей стали), составляла $L = 9d$, амплитуда гофр $l \approx \lambda/15$, средний радиус $R \approx \lambda/2$, период $d \approx \lambda/2$. Лампа вакуумировалась до 10^{-4} Pa паромасляным насосом.

В оптимальном режиме генерации (катодное напряжение $U = 600$ kV, ток пучка $I = 4.7$ kA, напряженность магнитного поля 26 kOe) мощность излучения составляла около 500 MW. При таком уровне СВЧ-мощности укорочение микроволнового импульса в обычных условиях еще не происходит (рис. 1, а также [3]). Для проверки влияния на длительность импульса взрывной эмиссии одна из гофр замедляющей системы заменялась гофрой той же формы, но с кольцевой графитовой вставкой (рис. 2). Наличие графита в гофрированном волноводе не изменяло его электродинамических свойств, а лишь облегчало условия развития взрывоэмиссионных процессов. Форма импульсов катодного напряжения и тока РЭП оставалась неизменной.

Установка гофры со вставкой вызывала укорочение микроволнового импульса. Наиболее значительное укорочение достигалось при расположении ее вблизи середины замедляющей системы (рис. 3). Длительность

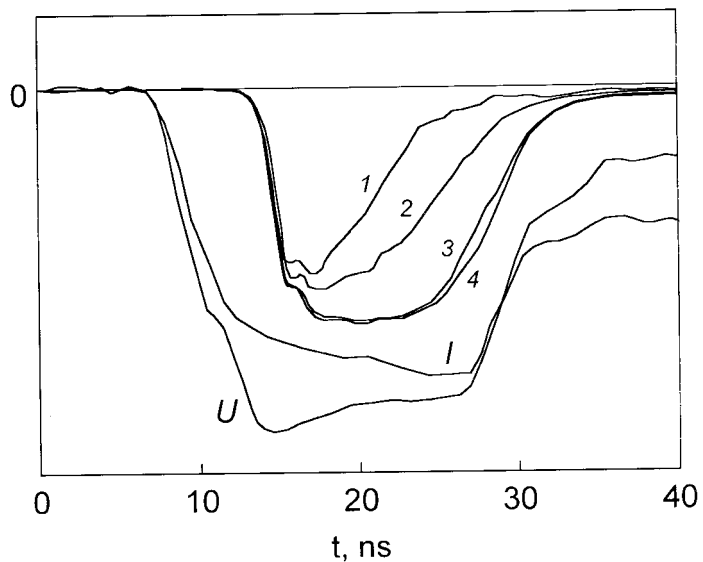


Рис. 1. Осциллограммы тока пучка I , напряжения в диоде U и сигналов с микроволнового детектора (первый импульс после установки гофры с графитовой вставкой): 1 — вставка на 4-й от запредельного сужения гофре, 2 — на 8-й гофре, 3 — на 1-й гофре, 4 — без вставки.

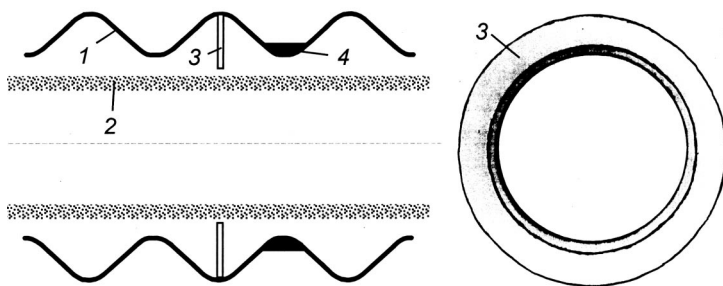


Рис. 2. Автограф электронного тока между гофрами и схема его получения. 1 — гофрировка замедляющей системы, 2 — РЭП, 3 — мишень из винипроза, 4 — графитовая вставка.

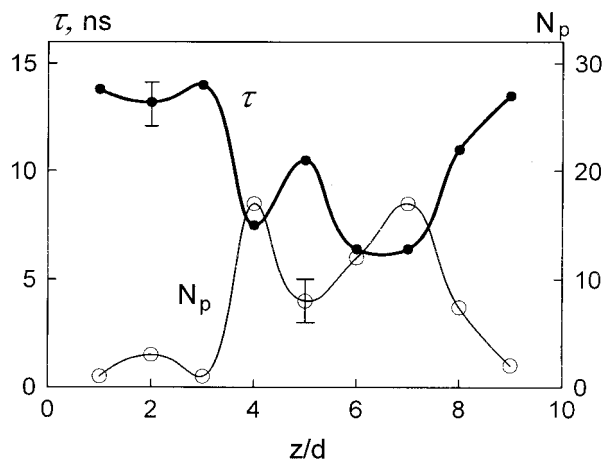


Рис. 3. Зависимость длительности первого микроволнового импульса и числа импульсов, необходимых для восстановления их максимальной длительности, от расстояния между графитовой вставкой и запредельным сужением (в долях периода гофрировки).

СВЧ-импульсов частично восстанавливалась с ростом числа импульсов, сделанных без развакуумирования системы. По-видимому, это связано с ухудшением взрывоэмиссионной способности графита при тренировке ВЧ-полем. При этом большему укорочению первых импульсов соответствовало большее число импульсов, необходимых для частичного восстановления их длительности (рис. 3).

В тех случаях, когда СВЧ-импульс укорачивался, в промежутке между гофрами в окрестности гофры со вставкой наблюдался интенсивный поток электронов, движущихся вдоль силовых линий магнитного поля. Отпечатки на мишени из винипроза (рис. 2) свидетельствуют о высокой плотности тока ($\sim 1 \text{ kA/cm}^2$), которую может обеспечить только взрывная электронная эмиссия.

При теоретическом анализе предполагалось, что укорочение СВЧ-импульса в присутствии взрывоэмиссионной плазмы происходит вследствие прекращения процесса генерации, вызываемого поглощением рабочей электромагнитной волны. При этом предполагалось, что плазма не влияет на электродинамические свойства замедляющей си-

стемы. В такой постановке задачи причина прекращения генерации ЛОВ при частичном поглощении волны может быть связана с увеличением критического тока генератора, ниже которого генерация затухает. Как показало решение одномерной нестационарной задачи, выполненное РС-методом [10], величина критического ЛОВ совпадает с величиной стартового тока. Последняя, как известно, возрастает при поглощении волны.

В одномерных расчетах исследовалось влияние линейного поглощения (поглощенная мощность пропорциональна мощности волны). Моделировались как сосредоточенные, так и распределенные по длине лампы поглотители, "включающиеся" в заданный момент времени. Расчеты показали, что в типичных случаях, при исходном превышении тока пучка над стартовым в 2–3 раза, затухание колебаний происходит за несколько наносекунд, если поглощается порядка половины мощности волны. Наибольшее влияние поглощения наблюдалось, когда сосредоточенный поглотитель размещался вблизи середины замедляющей системы. В этом случае для классической, без учета попутной волны, лампы в пределе полного поглощения волны наблюдался ожидаемый результат — возрастание величины стартового тока в 8 раз. Моделирование подтвердило и тот очевидный факт, что размещение сосредоточенного поглотителя на краю замедляющей системы слабо возмущает внутренний процесс генерации.

Поглощение волны в ЛОВ могут вызывать электроны, эмитированные из образовавшейся на поверхности гофр плазмы. Вместе с тем нетрудно видеть, что нелинейный характер чисто электронного поглощения делает его недостаточным для прекращения генерации. Действительно, для изменения величины стартового тока ЛОВ необходимо, чтобы отношение мощности потерь P_{loss} к мощности, переносимой волной P_w , было конечным при малой величине ВЧ-полей. Мощность поглощения волны электронами пропорциональна плотности тока эмиссии j_{em} и энергии ϵ , набираемой электронами в поле волны. При малой амплитуде поля волны движение электронов можно считать нерелятивистским. В этом случае плотность тока, ограниченная объемным зарядом, $j_{em} \propto E^{3/2}$, а энергия электронов $\epsilon \propto E^2$, где E — напряженность электрического поля волны. Таким образом, $P_{loss} \propto E^{5/2}$. Поскольку мощность волны $P_w \propto E^2$, имеем $P_{loss}/P_w \propto E^{3/2} \rightarrow 0$ при $P_w \rightarrow 0$. Таким образом, чисто электронная нагрузка не может оказывать влияния на стартовый ток ЛОВ.

Кроме того, следует принять во внимание присутствие в системе сильноточного электронного пучка с потенциалом относительно волноводной стенки $\sim 10^5$ V. При падении СВЧ-мощности ниже некоторой величины электрическое поле волны, вытягивающее электроны с поверхности замедляющей системы, полностью компенсируется статическим полем пучка, что делает электронную эмиссию невозможной.

Тем не менее поглощение электромагнитной волны позволяет объяснить прекращение генерации, если учесть, что в соответствующих фаза ВЧ-поля из плазмы на поверхности гофр могут вытягиваться ионы. Величина циклотронного радиуса для ионов значительно больше, чем для электронов, и может быть сравнима с поперечным размером волновода. Поэтому в начальные моменты времени ионы ускоренно движутся по направлению к оси прибора под действием статического поля РЭП, стремясь скомпенсировать его объемный заряд. Для компенсации объемного заряда РЭП с током 5 кА необходимое число однозарядных ионов на единицу длины системы составляет $\sim 10^{12}$ см $^{-1}$. Как показали оценки и численный эксперимент, в случае протонов и углеродных ионов процесс компенсации занимает несколько наносекунд.

Компенсация объемного заряда РЭП приводит к тому, что величина электрического поля, вытягивающего электроны с поверхности электродинамической системы, возрастает до полной амплитудной величины поля волны E_0 . Это ускоряет появление новых эмиссионных центров. К факторам, способствующим лавинообразному развитию взрывной эмиссии, следует также отнести рост тока отдельных эмиссионных центров во времени как $t^{3/2}$.

Одновременно с радиальным движением ионов происходит их накопление в пространстве между гофрами. Основная причина этого заключается в присутствии здесь электронного тока. Электроны, эмитированные с гофр под действием СВЧ-поля, движутся вдоль силовых линий внешнего продольного магнитного поля. Отметим, что в типичной (не сверхразмерной) релятивистской ЛОВ с напряженностью электрического поля на гофрах $10^5 \div 10^6$ V/cm возможен перенос электронов с одной гофры на другую за один период СВЧ-колебания. Поскольку ток электронов ограничен объемным зарядом, они создают в промежутке между гофрами квазистатическое поле, величина которого в среднем за период колебания имеет порядок величины E_0 . Движение ионов в этом поле является ускоренным, и время заполнения ими промежутка между гофрами, как показывают оценки и численный эксперимент,

составляет единицы наносекунд. Происходящий процесс может быть охарактеризован как ВЧ амбиполярная диффузия ионов и электронов. Отметим, что накопление ионов между гофрами может происходить и под действием одного лишь ВЧ-поля; однако в этом случае их продольное движение является циклическим, дрейфовым, и продолжительность процесса составляет сотни наносекунд.

В результате заполнения ионами в промежутке между гофрами образуется квазилинейная плазма. Объемные заряды электронной и ионной компонент в среднем за период СВЧ-колебания взаимно компенсируются, и концентрация плазмы под действием поля волны нарастает во времени. При этом увеличивается мощность, уносимая на стенки электронной компонентной плазмы. Модельный нестационарный расчет для одномерного плоского зазора шириной 1 см с приложенным переменным электрическим полем 500 kV/cm частотой 10 GHz показал, что при односторонней электронной эмиссии и ограничении тока объемным зарядом мощность электронной бомбардировки стенок составляет 28.5 MW/cm² (для сравнения: мощность электронного пучка при постоянном приложенном напряжении той же величины — 380 MW/cm²). При введении эмиссии протонов с плотностью тока 10, 100, 1000 A/cm² средняя мощность бомбардировки возросла соответственно до 0.13, 0.5, 2.2 GW/cm², а время заполнения промежутка ионами составило 4.1, 3.2, 2.8 ns. При этом максимальная концентрация плазмы в промежутке ограничивалась только эмиссионной способностью электрода, которая в расчете могла задаваться произвольно большой, но конечной.

С помощью осесимметричной версии 2.5 и 3-мерного полностью электромагнитного PIC-кода KARAT [11] было выполнено нестационарное численное моделирование распространения волны ТМ₀₁ в синусоидально гофрированном волноводе, на одной из гофр которого задавалась эмиссия электронов и ионов. Моделирование показало, что максимальное поглощение волны (до 50% по мощности) достигается спустя 7 ns с момента запуска волны, при этом характерная концентрация плазмы между гофрами составляет $n \sim 5 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-3}$. С дальнейшим ростом концентрации поглощение волны уменьшается, составляя 30% при $n \sim 3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. По-видимому, это связано с ухудшением проникновения волны в плазму между гофрами (скин-эффект). Следует ожидать, что подобное явление в ЛОВ может приводить к изменению электродинамических свойств замедляющей системы и нарушению режима генерации.

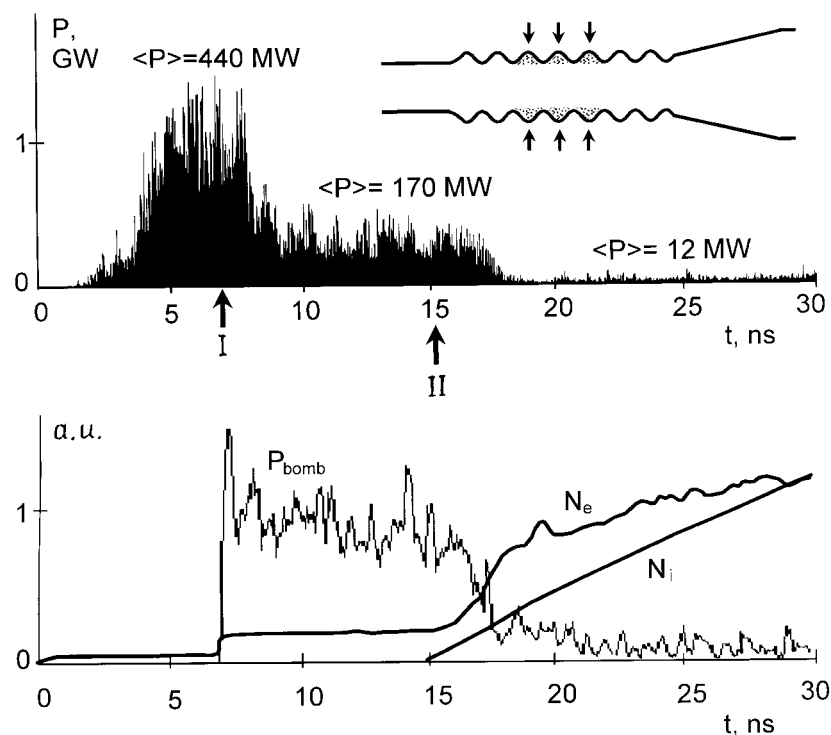


Рис. 4. Расчетные временные зависимости выходной микроволновой мощности, мощности электронной бомбардировки гофр и числа электронов и ионов в ЛОВ при эмиссии электронов и ионов с поверхности замедляющей системы: I — начало эмиссии электронов, II — начало эмиссии ионов.

На практике максимальная концентрация плазмы, по-видимому, определяется количеством вещества, ионизованного при взрывной эмиссии. Отметим, что для компенсации объемного заряда РЭП требуется приблизительно то же число ионов, что и для и существенного поглощения волны, а именно, $10^{11} - 10^{12}$ однозарядных ионов на 1 см длины системы. Для создания такого числа ионов необходима ионизация единиц или десятков кубических микрон вещества, что вполне достижимо при взрывной эмиссии.

Полномасштабный численный эксперимент, выполненный с помощью кода KARAT, показал, что в результате ион-электронной эмиссии с гофр замедляющей системы ЛОВ происходит значительное уменьшение мощности генерации, вплоть до ее полного прекращения. Последнее наблюдалось в том случае, когда не менее двух эмитирующих гофр размещалось вблизи середины лампы. Рис. 4 иллюстрирует случай трех эмитирующих гофр в ЛОВ при исходной мощности генерации ~ 600 MW. Моменты включения электронной и ионной эмиссии разнесены для отдельной демонстрации эффекта их влияния. Включение электронной эмиссии приводит к значительному уменьшению СВЧ-мощности на выходе лампы, однако сам процесс генерации при этом не прекращается, спектр колебаний остается узким. Приблизительно через 3 ns после включения ионной эмиссии мощность излучения падает до уровня ~ 10 MW. При этом наблюдается расплывание спектра колебаний, разрушение характерного для генерирующей ЛОВ фазового портрета пучка, резкое падение мощности электронной бомбардировки гофр. Количество электронов и ионов в электродинамической системе нарастает во времени.

Как отмечалось выше, поглощение даже значительной доли энергии волны в генераторе не приводит к прекращению генерации, если оно сосредоточено вблизи краев прибора. Однако внешне такая ситуация при сильном поглощении также может проявляться как "укорочение" микроволнового импульса. Так, в численном эксперименте при задании ионной и электронной эмиссии на первом от запердельного сужения периоде гофрировки было зафиксировано трехкратное падение микроволновой мощности без прекращения генерации.

Итак, причиной ограничения длительности импульса релятивистской ЛОВ может быть появление взрывоэмиссионной плазмы на поверхности гофр замедляющей системы. Прекращение генерации может быть объяснено поглощением электромагнитной волны эмитированными из плазмы электронами, радикально усиливающимся присутствием эмитированных из плазмы ионов. Таким образом, длительность СВЧ-импульса ограничена в совокупности временем развития взрывной электронной эмиссии на поверхности электродинамической системы и временем заполнения ионами ее объема.

Список литературы

- [1] *Зайцев Н.И., Ковалев Н.Ф., Кораблев Г.С.* и др. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. В. 14. С. 879.
- [2] *Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Коровин С.Д.* и др. // Письма в ЖТФ. 1981. Т. 7. В. 19. С. 1168–1171.
- [3] *Гунин А.В., Кицанов С.А., Климов А.И.* и др. // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 84–88.
- [4] *Александров А.Ф., Галузо С.Ю., Канавец В.И.* и др. // Тез. докл. 4 Всес. симпоз. по сильноточной электронике. Новосибирск, 1982. С. 168–171.
- [5] *Александров А.Ф., Бляхман Л.Г., Галузо С.Ю.* // Релятивистская высоко-частотная электроника. Вып. 3. Горький, 1983. С. 219–240.
- [6] *Mesyats G.A.* // Proc. Course and Workshop on High Power Generation and Applications / Villa Monastera–Varenna, Italy. 1991. P. 345–362.
- [7] *Benford J., Benford G.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1997. V. 25. N 2. P. 311–317.
- [8] *Kovalev N.F., Necaev V.E., Petelin M.I., Zaitsev N.I.* // IEEE Trans. Plasma Sci. 1998. V. 26. N 3. P. 246–251.
- [9] *Loza O.T., Strelkov P.S.* // Dig. Technical Papers, Int. Workshop on High Power Microwave Generation and Pulse Shortening, Edinburg, UK, 1997. P. 103–108.
- [10] *Пегель И.В.* // Изв. вузов. Физика. 1996. № 12. С. 62–83.
- [11] *Tarakanov V.P.* User's Manual for Code KARAT. Springfield: BRA, 1992.