

10;12

## **Демонстрация усиления в диэлектрическом черенковском лазере со стержневой замедляющей системой**

© В.А. Августинович, С.Н. Артеменко, А.И. Мащенко,  
А.С. Шлапаковский, Ю.Г. Юшков

НИИ ядерной физики при Томском политехническом университете,  
Томск, Россия

Технион — Израильский институт технологий,  
32000 Хайфа, Израиль

E-mail: yuyu@npi.tpu.ru

*Поступило в Редакцию 29 сентября 2009 г.*

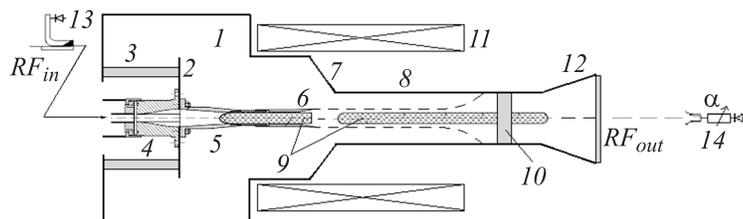
Сообщается о первых результатах экспериментов по демонстрации усиления мегаваттных наносекундных СВЧ-импульсов в черенковском лазере с диэлектрическим стержнем и трубчатым умеренно релятивистским электронным пучком. Пучок генерировался в компактном модуле линейного индукционного ускорителя; в качестве источника входного сигнала использовался резонансный СВЧ-компрессор трехсантиметрового диапазона длин волн. Со стержнем из кварца получены максимальное усиление  $\sim 12.5$  dB и максимальная выходная мощность  $\sim 16$  MW при длительности импульса  $\sim 4$  ns на частоте 9.388 GHz. Приведены зависимости коэффициента усиления от мощности компрессора для различных значений ускоряющего напряжения и тока.

Конфигурация черенковского лазера на основе линейного индукционного ускорителя (ЛИУ) и диэлектрической стержневой антенны как замедляющей структуры, названная в [1,2] антенной-усилителем, представляет интерес для исследования в связи с проблемой создания управляемых компактных источников СВЧ-излучения со сверхвысоким уровнем импульсной мощности ( $10^7$ – $10^9$  W). В антенне-усилителе умеренно релятивистский трубчатый электронный пучок усиливает рабочую моду стержневой антенны — азимутально-несимметричную моду  $HE_{11}$ . Пучок генерируется в компактном модуле ЛИУ с полым кромочным катодом и полым катододержателем, который одновременно служит волноводом возбуждения диэлектрической антенны. СВЧ-тракт для ввода усиливаемого сигнала размещается внутри высоковольтного

электрода ЛИУ и легко сопрягается с внешним СВЧ-источником, поскольку в ЛИУ высоковольтный электрод с внешней стороны находится под потенциалом земли.

В настоящей работе возможность усиления волны  $HE_{11}$  диэлектрического стержня охватывающим его трубчатым пучком впервые подтверждена экспериментально. При этом в качестве источника входного сигнала использован резонансный СВЧ-компрессор, формирующий импульсы длительностью  $\sim 4$  ns и мощностью от 0.3 до 1.7 MW. Мегаваттный уровень мощности наилучшим образом подходит для усилителя на сильнооточном пучке с небольшим (до 20 dB) коэффициентом усиления: такой уровень заметно превышает уровень шумов пучка, генерируемого взрывоэмиссионным катодом, и позволяет получить выходную мощность порядка 100 MW. Малая длительность импульса по сравнению с длительностью пучка также является положительным фактором, поскольку способствует фазовой стабильности усиленного сигнала. Разработанный специально для настоящих экспериментов СВЧ-компрессор трехсантиметрового диапазона длин волн, а также СВЧ-тракт для возбуждения диэлектрического стержня через катододержатель ЛИУ были описаны в работе [3].

Схематическое изображение антенны-усилителя, соответствующее экспериментам, в которых было продемонстрировано усиление входного сигнала, представлено на рис. 1. Эксперименты проводились в режиме однократных импульсов. Амплитуда ускоряющего напряжения ЛИУ варьировалась в диапазоне 280–380 kV при токе 1–2 kA и длительности импульса  $\sim 150$  ns по основанию. В экспериментах использовались кварцевые стержни (измеренное в трехсантиметровом диапазоне значение  $\epsilon \approx 3.8$ ) диаметром 16 mm, равным внутреннему диаметру катододержателя. Катод из нержавеющей стали играл роль согласующего конического рупора для возбуждения моды  $HE_{11}$ . Эмитирующая кромка катода находилась в области однородного магнитного поля. Диаметр кромки, определяющий расстояние между пучком и стержнем, составлял 23 mm, диаметр трубы дрейфа — 39 mm. Величина ведущего магнитного поля в большинстве экспериментов составляла  $\sim 2.7$  T. Приемная антенна для регистрации усиленного СВЧ-сигнала располагалась на оси системы на расстоянии  $\sim 5$  m от выходного окна. Во входном СВЧ-тракте был установлен направленный ответвитель с детектором для регистрации отраженных сигналов; этот же детектор фиксировал и просачивающийся в ответвитель прямой сигнал—импульс, генерируемый компрессором.



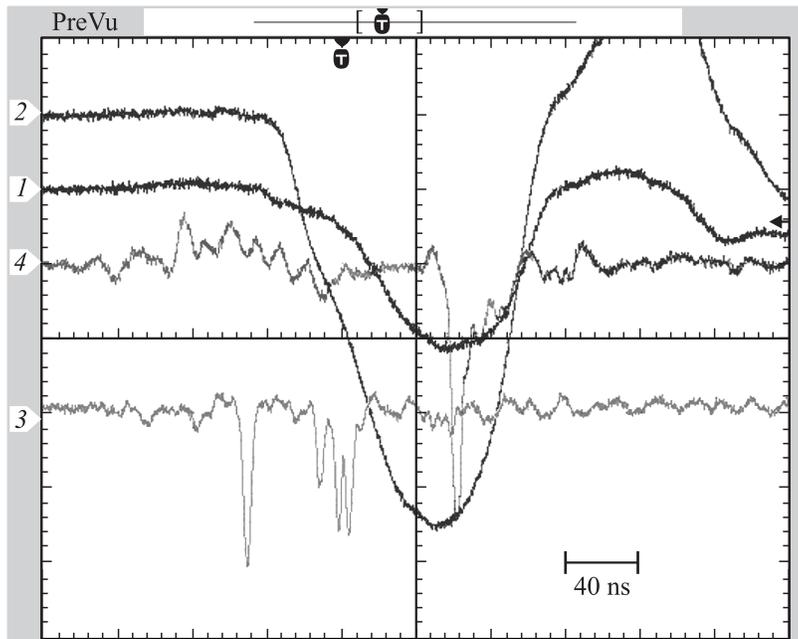
**Рис. 1.** Схема и геометрия эксперимента: 1 — вакуумная камера ЛИУ; 2 — высоковольтный фланец; 3 — изолятор ЛИУ; 4 — волноводный переход (с прямоугольного на круглый) с радиопрозрачным вакуумным окном внутри высоковольтного электрода ЛИУ; 5 — катододержатель; 6 — кромочный катод; 7 — анод; 8 — труба дрейфа; 9 — кварцевые стержни; 10 — втулка-держатель из оргстекла; 11 — соленоид; 12 — конический рупор с вакуумным окном; 13 — детектор входного и отраженного СВЧ-сигнала; 14 — приемная антенна с аттенуатором и детектором для регистрации прошедшего (усиленного) СВЧ-сигнала. Трубчатый электронный пучок изображен пунктиром.

Заметим, что схема эксперимента, показанная на рис. 1, несколько отличается от первоначально предложенной схемы антенны-усилителя [2]. Видно, что кварцевый стержень целиком находится в вакуумном объеме, так что излучение в свободное пространство обеспечивает выходной конический рупор (его диаметр 60 mm), а не диэлектрическая антенна поверхностной волны. Такая конфигурация эксперимента позволяет продемонстрировать возможность усиления в принципе. Другое, более существенное, отличие, как видно из рис. 1, это „разрыв“ кварцевого стержня. По сути, использовались два стержня: один, вставленный в катод и катододержатель, обеспечивал прохождение входного СВЧ-импульса (для пустого волновода диаметром 16 mm критическая частота превышает частоту сигнала). Конец этого стержня располагался на расстоянии  $\sim 2$  mm от плоскости кромки катода внутри катода. Взаимодействие же электронного пучка с синхронной волной происходило на участке второго стержня. Величина зазора между стержнями варьировалась от 2.5 до 9 см. При изменении зазора соответственно изменялась длина пространства взаимодействия: от  $\sim 34$  до  $\sim 27.5$  см (если определять координату выходной границы области взаимодействия по отклонению силовой линии магнитного поля на 0.5 mm на радиусе пучка).

Указанный разрыв стержня, фактически, позволил осуществить демонстрацию усиления. Действительно, в случае сплошного стержня, как показывают результаты численного моделирования антенны-усилителя [4], на поверхности стержня внутри пучка имеется узкая область, в которой сосредоточено сильное тангенциальное электрическое поле. Максимум поля, в соответствии с [4], находится на расстоянии  $\sim 3$  мм от плоскости кромки катода и достигает  $\sim 60$  кВ/см. Такое поле приводит к пробое по поверхности диэлектрика и появлению плазмы в области между кромкой катода и стержнем, которая препятствует передаче входного сигнала. Это подтвердили эксперименты, проводившиеся поначалу со сплошным длинным стержнем, — в этих экспериментах не было зафиксировано никакого СВЧ-сигнала с приемной антенны, если задержка между подачей входного сигнала и началом импульса напряжения ЛИУ превышала определенную величину. В то же время в случае только одного короткого стержня внутри катода, конец которого находился на глубине  $\sim 2$  мм от плоскости кромки, входной СВЧ-сигнал всегда проходил к приемной антенне. По мере выдвигания стержня за плоскость кромки катода процент прошедших импульсов уменьшался и уже при длине выступающей части  $\sim 30$  мм доходил практически до нуля. Разрыв стержня привел к устранению этого эффекта.

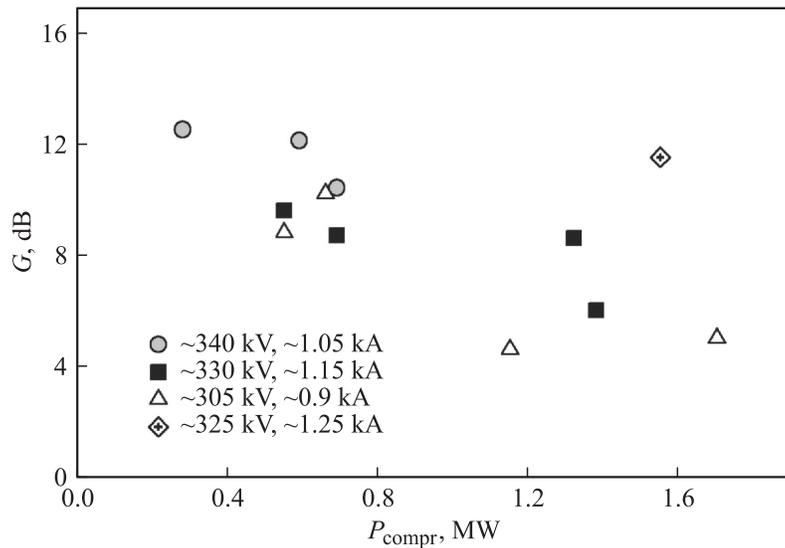
Предотвращая появление плазмы, разрыв стержня, вместе с тем, приводил к появлению обратной связи, достаточной для возникновения СВЧ-генерации. В отсутствие входного сигнала генерация наблюдалась при большой величине зазора между стержнями в диапазоне напряжений ЛИУ 360–380 кВ при токе 1.6–2 кА. При этом генерация всегда возникала при токе не менее 0.75 от максимального его значения, так что длительность генерируемых импульсов составляла  $\sim 40$  нс. Мощность генерируемого излучения, по грубым оценкам, была не менее единиц мегаватт. Генерация подавлялась, когда на торец стержня на входе в область взаимодействия был приклеен согласующий наконечник. Все эксперименты по демонстрации усиления были выполнены с указанным наконечником.

Эксперименты проводились на одной из двух рабочих частот СВЧ-компрессора [3] — 9388 МГц. Типичные импульсы напряжения и тока ЛИУ и сигналы с СВЧ-детекторов, соответствующие режиму усиления, представлены на рис. 2. Видно, что длительность СВЧ-импульса, поступающего в приемную антенну, совпадает с длительностью сигнала компрессора. Сдвиг по времени меж-



**Рис. 2.** Характерная осциллограмма для режима усиления наносекундных СВЧ-импульсов. Лучи: 1 — ток ЛИУ ( $\sim 0.66$  kA/div), 2 — напряжение ( $\sim 61$  kV/div), 3 — падающий (первый пик) и отраженные СВЧ-сигналы, 4 — усиленный СВЧ-импульс.

ду входным СВЧ-сигналом и сигналом с приемной антенны всегда был одним и тем же, независимо от величины задержки входного сигнала относительно начала импульса напряжения ЛИУ. Мощность сигнала с приемной антенны определялась по калибровочной кривой СВЧ-детектора и ослаблению аттенюатора. Величина усиления рассчитывалась как отношение измеряемой мощности, поступающей в приемную антенну, к мощности, поступающей в приемную антенну при выключенном ЛИУ, для данной мощности на выходе СВЧ-компрессора. Так, для осциллограммы, приведенной на рис. 2, определенный таким образом коэффициент усиления  $G \approx 11.5$  dB. Погрешность измерения коэффициента составляет, по оценкам, менее 2 dB.



**Рис. 3.** Измеренный коэффициент усиления в зависимости от мощности компрессора для различных значений напряжения и тока ЛИУ в момент входа СВЧ-сигнала в область взаимодействия. Величина зазора между кварцевыми стержнями — 9 см. Величина ведущего магнитного поля для точки, обозначенной ромбом, — 1.35 Т, для всех остальных случаев — 2.7 Т.

В основном усиление входных сигналов было зарегистрировано в диапазоне напряжений 320–340 кВ при токах 1–1.3 кА. На рис. 3 представлена выборка результатов, полученных для примерно одинаковых значений напряжения и тока во время взаимодействия, которая иллюстрирует зависимость усиления от входной мощности. Видно, что максимальное усиление  $\sim 12.5$  дБ соответствует минимальной мощности компрессора. Снижение коэффициента усиления с ростом входной мощности указывает на то, что усилитель работает в нелинейном режиме, и длина участка взаимодействия явно больше оптимальной. Об этом говорит и то, что в случае, когда зазор между стержнями был 2.5 см, максимальное зафиксированное усиление составило  $\sim 7.7$  дБ. Т.е. при большей на 6.5 см длине области взаимодействия получено меньшее усиление. Это согласуется также и с результатами численного

моделирования [4], из которых следует, что длина области взаимодействия порядка 27–28 см (рис. 3) для входной мощности  $\sim 0.2$  MW уже превышает оптимальную длину.

Чтобы определить выходную мощность антенны-усилителя по измеряемым в эксперименте коэффициенту усиления и мощности компрессора, необходимо учитывать потери при прохождении СВЧ-сигнала от выхода компрессора к входу в пространство взаимодействия. При этом наиболее значительными, очевидно, являются потери на отражение от области разрыва кварцевого стержня, так что принципиальная демонстрация усиления в данных экспериментах достигнута за счет некоторого снижения выходной мощности. Существенно, что потери на отражение различны в отсутствие и при наличии электронного пучка, поэтому для выходной мощности возможна только оценка на основании данных „холодных“ измерений. Такая оценка дает значение максимальной полученной выходной мощности  $\sim 16$  MW. Заметим, что этот результат (он соответствует точке, обозначенной ромбом на рис. 3, т.е. величине усиления  $\sim 11.5$  dB при мощности компрессора  $\sim 1.55$  MW) был получен при значении ведущего магнитного поля, вдвое меньшем, чем в остальных случаях. Подробное исследование зависимости усиления от магнитного поля, однако, в настоящей работе не проводилось.

Таким образом, в работе определены условия, выполнение которых обеспечивает принципиальную работоспособность перспективной конфигурации диэлектрического черенковского мазера — антенны-усилителя. В частности, установлено, что плазма, образующаяся в результате пробоя по поверхности кварцевого стержня в прикатодной области, препятствует прохождению входного СВЧ-сигнала вдоль стержня. Продемонстрировано усиление наносекундных импульсов СВЧ-компрессора на частоте 9388 MHz с коэффициентом усиления до 12.5 dB. Оценка максимальной полученной мощности выходных импульсов антенны-усилителя дает величину  $\sim 16$  MW. При этом электронный КПД прибора (с учетом провисания потенциала тонкостенного электронного пучка в трубе дрейфа) составляет  $\sim 5\%$ . Очевидно, что длина пространства взаимодействия в проведенных экспериментах была больше оптимальной. Необходимы дальнейшие исследования зависимости коэффициента усиления и выходной мощности от длины однородной области ведущего магнитного поля, а также и от величины этого поля. Кроме того, очень важно продемонстрировать усиление и на второй рабочей частоте СВЧ-компрессора — 9156 MHz [3].

В заключение, заметим, что при меньшем ускоряющем напряжении не исключается и возможность работы со сплошным диэлектрическим стержнем без образования плазмы на его поверхности, так как при этом уменьшается продольная составляющая электрического поля внутри пучка вблизи катода. Поэтому заслуживает внимания конфигурация антенны-усилителя со стержнем большего диаметра, либо из материала с большей диэлектрической проницаемостью, в которой при данных частотах поддерживался бы синхронизм волны  $HE_{11}$  с пучком меньшей энергии.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-08-01150).

Авторы выражают признательность И. Шамилоглу (Prof. Edl Schamiloglu) за поддержку и интерес к работе, а также И.И. Винтизенко за полезные дискуссии.

## Список литературы

- [1] Шлапаковский А.С. // Письма в ЖТФ. 1999. Т. 25. В. 7. С. 43–50.
- [2] Shlapakovski A.S. // SPIE Proc. 1999. V. 3702. P. 108–113.
- [3] Августинович В.А., Артеменко С.Н., Шлапаковский А.С. // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 3. С. 91–96.
- [4] Shlapakovski A.S., Jiang W., Schamiloglu E. // 14th SHCE Proceedings. 14th Symposium on High-Current Electronics. Tomsk, Russia, 10–15 September, 2006. Изв. вузов. Физика. 2006. № 11. Приложение. P. 417–420.