

**Заславский В.Ю., Гинзбург Н.С., Зотова И.В.,
Сергеев А.С.**

Федеральный исследовательский центр

Институт прикладной физики РАН

Стабилизация азимутальной структуры импульсов черенковского сверхизлучения при использовании двумерно-гофрированных сверхразмерных цилиндрических волноводов

Проведен анализ возможности генерации мощных наносекундных микроволновых импульсов на основе эффекта черенковского сверхизлучения (СИ) протяженных электронных сгустков при прямолинейном движении в сверхразмерных цилиндрических гофрированных волноводах. Для решения проблемы селекции мод по азимутальному индексу предложено использование двумерно-периодических брэгговских структур, которые одновременно выполняют роль замедляющей системы и реализуют двумерную распределенную обратную связь (РОС). В рамках квазиоптического подхода и трехмерного PIC моделирования показана возможность генерации импульсов СИ с азимутально-симметричным распределением выходного излучения.

Ключевые слова: сверхизлучение электронных сгустков, поверхностные волны, периодически-гофрированные волноводные структуры, терагерцовое излучение, квазиоптические волновые пучки

1. Введение

Очевидным методом повышения пиковой мощности генераторов сверхизлучательного типа является использование схем на основе сверхразмерных волноводов. В этом случае основным вопросом для обеспечения когерентности излучения оказывается проблема селекции мод. Перспективным методом решения данной проблемы является использование двумерных брэгговских структур. Для режимов квазистационарной генерации этот метод эффективен как для излучения криволинейных пучков в мазерах на свободных электронах [1], так и для излучения прямолинейных пучков в приборах черенковского типа [2]. В последнем случае двумерная структура играет роль замедляющей системы, над которой могут распространяться поверхностные волны. Цель настоящего сообщения – показать, что подобные двумерно-периодические замедляющие структуры могут быть эффективно использованы для обеспечения азимутальной когерентности импульсов сверхизлучения (СИ). Данная работа инициирована экспериментальными исследованиями черенковского СИ при возбуждении поверхностных волн в сверхразмерных цилиндрических волноводах с традиционной однопериодической гофрировкой. В указанных экспериментах в 2-х миллиметровом диапазоне были получены импульсы СИ с мощностью, которая на порядок превосходит зарегистрированную ранее в этом же диапазоне при наблюдении СИ в одномодовых волноводах.

Однако эти режимы генерации оказались чувствительны к тем или иным нарушениям азимутальной симметрии системы. В частности, небольшая несоосность приводила к деформации диаграммы направленности вследствие возбуждения азимутально-

несимметричных мод. Численное трехмерное PIC моделирование также подтверждает описанную тенденцию.

В данной работе в рамках усредненной квазиоптической модели, а также PIC моделирования показано, что использование двумерно-периодических замедляющих систем позволяет значительно увеличить стабильность генерации импульсов СИ, при котором выходное излучение имеет азимутально-симметричную структуру.

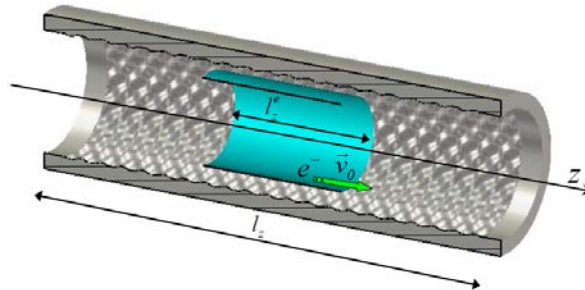


Рис. 1. Схема генерации импульсов СИ при движении протяженного электронного сгустка в сверхразмерном двумерно-периодическом волноводе.

2. Результаты моделирования процесса черенковского СИ в двумерно-периодическом гофрированном волноводе на основе квазиоптической теории и трехмерного PIC кода *CST STUDIO SUITE*

На основе квазиоптической теории [2, 3] было выполнено моделирование процесса СИ в многомодовом волноводе с диаметром $D = 16$ мм для рабочей длины волны $\lambda = 3$ мм. Параметры электронного сгустка и замедляющей системы выбирались следующими: период гофрировки – 2.5 мм, глубина гофрировки – 1.5 мм, длина структуры – 15 см, энергия электронов – 300 кэВ, ток пучка – 5 кА, длительность электронного сгустка – 2 нс. Указанные параметры близки к условиям экспериментов на базе сильноточного ускорителя РАДАН-303 [4].

Формирование импульса СИ показано на рис. 2, где представлены временные

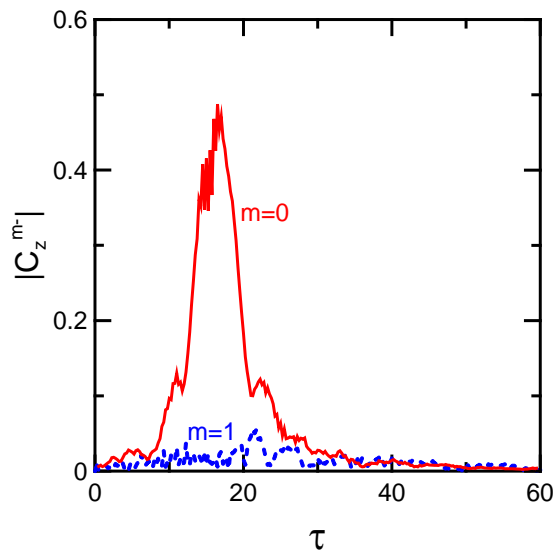


Рис. 2. Моделирование процессов СИ в сверхразмерном цилиндрическом волноводе с двумерно-периодической гофрировкой в рамках квазиоптического подхода. Временные зависимости амплитуд $|\hat{C}_z^{m-}|$ мод с различным азимутальным индексом.

зависимости амплитуд доминирующих азимутальных гармоник. В рассматриваемой ситуации основная доля излучения высвечивается со встречной волной с катодного конца системы. При этом излучение имеет азимутально-симметричную структуру с регулярным фазовым фронтом. Пространственная когерентность излучения в данном случае обеспечивается наличием в двумерно-периодической структуре азимутальных потоков энергии. Пиковая мощность импульсов СИ в данном случае достигает 300 МВт при длительности ~ 1 нс.

Указанные выводы подтверждаются результатами трехмерного PIC моделирования генерации импульсов СИ при возбуждении поверхностной встречной волны в сверхразмерном волноводе. На рис. 3 представлены результаты моделирования при указанных выше параметрах электронного пучка и замедляющей системы. Прямое моделирование демонстрирует возможность эффективной генерации импульса СИ при достаточно большой сверхразмерности ($D/\lambda \sim 5$). При этом использование двумерно-периодической замедляющей системы обеспечивает азимутально-симметричную структуру выходного излучения. На рис. 3а показан импульс СИ, и моделирование показывает, что в выходном излучении представлены моды TM_{0m} , формирующие поверхностную волну. Несимметричные компоненты, например, TM_{11} , пренебрежимо малы. Характерное распределение продольной компоненты поля E_z демонстрирует формирование поверхностной волны, спадающей по радиальной координате по закону, близкому к экспоненциальному. Представленная на рис. 3б продольная компонента магнитного поля H_z соответствует интерференции волн, распространяющихся в азимутальном направлении. В результате, по азимутальной координате формируется стоячая волна из имеющих противоположное направление вращения ТЕ-мод с азимутальным индексом m , равным числу заходов спирали \bar{M} (в исследуемом варианте $\bar{M} = 16$). При полном токе пучка 5 кА и энергии частиц 0.3 МэВ на рабочей частоте ~ 95 ГГц выходная мощность достигала $P \sim 300$ МВт.

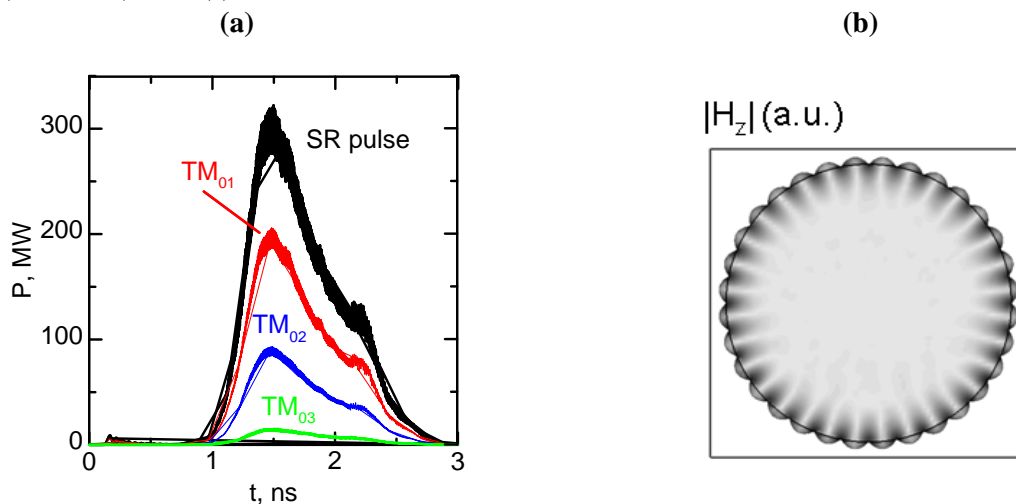


Рис. 3. PIC-моделирование генерации импульсов СИ 3-мм диапазона с возбуждением азимутально-симметричной поверхностной волны в цилиндрическом волноводе с двумерно-периодической замедляющей системой. (а) Импульс черенковского СИ и его разложение по модам регулярного волновода; (б) мгновенное распределение поля H_z внутри пространства взаимодействия в момент, в который достигается максимальная интенсивности импульса СИ (средний радиус волновода $r_0 = 8$ мм, длина $l_z = 15$ см, период гофрировки вдоль продольной координаты z $d_z = 2.5$ мм, глубина гофрировки $\tilde{r} = 2$ мм).

3. Заключение

Таким образом, анализ, проведенной как в рамках усредненного квазиоптического подхода, так и на основе прямого РС моделирования, демонстрирует перспективность использования режима возбуждения поверхностных волн в двумерно-гофрированных замедляющих системах для генерации субгигагерцовых наносекундных импульсов СИ в коротковолновой части миллиметрового диапазона. При этом оказывается возможным эффективное применение сверхразмерных замедляющих систем. Экспериментальные исследования в данном направлении планируется развивать на базе ускорителя РАДАН с дополнительным блоком временной компрессии ускоряющего импульса.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 17-08-01072.

Библиографический список

1. I.V.Konoplev, A.W.Cross, A.D.R.Phelps, W.He, K.Ronald, C.G.Whyte, C.W. Robertson, N.S.Ginzburg, N.Yu.Peskov, A.S.Sergeev, V.Yu.Zaslavsky, M.Thumm. Experimental and theoretical studies of a coaxial free-electron maser based on two-dimensional distributed feedback // *Phys. Rev. E*. 2007. V.76, P.056406.
2. N.S. Ginzburg, A.M. Malkin, A.S. Sergeev, V.Yu. Zaslavsky. Quasi-optical theory of relativistic surface-wave oscillators with one-dimensional and two-dimensional periodic planar structures // *Physics of Plasmas*. 2013. V. 20, P. 113104.
3. N.S. Ginzburg, A.M. Malkin, A.S. Sergeev, and V.Yu. Zaslavsky. Oversized co-axial and cylindrical surface-wave oscillators with two-dimensional periodical grating (quasi-optical model) // *Journal of Applied Physics*. 2013. V.113, P. 104504.
4. G.A.Mesyats, S.D. Korovin, V.V. Rostov, V.G. Shpak, and M.I.Yalandin. The RADAN series of compact pulsed power generators and their applications // *Proc. of the IEEE*, 92 (7), 1166 (2004).