

Использование фотонного кристалла для усиления и вывода колебаний, индуцированных безионной пучково-плазменной неустойчивостью

Н. С. Фролов^{1,2*}

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.,
Научно-образовательный центр «Системы искусственного интеллекта и нейротехнологии»
Россия, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77

²Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского
Россия, 410012, Саратов, ул. Астраханская, д. 83

(Статья поступила 30.06.2018; Подписана в печать 10.09.2018)

В настоящей работе предложена новая схема СВЧ-устройства виркаторного типа, в которой скомбинированы механизмы генерации электромагнитного излучения в верхнем диапазоне СВЧ спектра (порядка 30 ГГц) и усиления индуцированных колебаний за счет взаимодействия с периодической электромагнитной структурой фотонного кристалла. В рамках численного полностью электромагнитного трехмерного моделирования методом частиц в ячейке была показана эффективность такого взаимодействия в виде роста амплитуд Фурье-спектра в интересующем диапазоне частот, что соответствует усилению конкретного типа быстрых спиральных волн, реализующихся в электронных пучках в следствие развития безионной пучково-плазменной неустойчивости.

PACS: 84.40.Fe; 84.70.+p УДК: 537.533.9; 537.531.

Ключевые слова: релятивистский электронный пучок, пучково-плазменная неустойчивость, фотонный кристалл, численное моделирование, модель частиц в ячейке.

ВВЕДЕНИЕ

Пучково-плазменная неустойчивость является важным фундаментальным явлением, активно изучаемым как теоретически, так и экспериментально [1]. Это явление состоит в продольных колебаниях пространственного заряда и электромагнитного поля при распространении интенсивного электронного пучка в дрейфовой камере, заполненной нейтральной плазмой. Большое количество работ посвящено исследованиям и многочисленным применениям пучково-плазменной неустойчивости. В частности, пучково-плазменная неустойчивость используется в СВЧ-генераторах и усилителях, для возбуждения пучково-плазменных разрядов для применения в различных технологических сферах [2, 3].

В последнее время исследователи рассматривали пучково-плазменную неустойчивость в присутствии ионного фона, обеспечивающего квазинейтральность пучково-плазменной системы и появление восстанавливающей силы, действующей на возмущенные плазменные электроны. Считается, что стационарный ионный фон, обеспечивающий квазинейтральность пучково-плазменной системы и возникновение восстанавливающей силы, действующей на электроны плазмы, отклоненные от положения равновесия, требуется для развития пучково-плазменной неустойчивости [4–6]. Возникает важный вопрос: развивается ли пучково-плазменная неустойчивость в случае, когда электронный пучок взаимодействует со стационарной однокомпонентной горячей плазмой элек-

трона без ионов, например, заключен в ловушку или создан каким-то другим способом? И каковы особенности пучково-плазменной неустойчивости в такой системе?

В своих предыдущих исследованиях А.Е. Дубинов совместно с коллегами [7] показали интересные явления — возбуждение пучково-плазменной неустойчивости в отсутствие ионов при взаимодействии интенсивного электронного пучка с дополнительным электронным пучком, реализующим сжатое состояние, которое действует как сверхплотная заряженная плазма. Последнее играет роль своего рода нелинейной активной среды для развития колебаний пространственного заряда [7, 8]. За счет взаимодействия между движущимся электронным потоком с высокой энергией и сжатым состоянием дополнительного пучка оказывается возможным возбуждать продольные волны объемного заряда при развитии конвективной пучковой плазменной неустойчивости в отсутствие ионов. Примечательно, что возбуждаемые колебания объемного заряда лежат в более высоком диапазоне микроволнового электромагнитного спектра (около 18–40 ГГц). Проблема, однако, состоит в том, что электромагнитные волны, вызванные колебаниями пространственного заряда, характеризуются чрезвычайно малыми амплитудами.

В то же время одна из наиболее развитых областей современной электроники связана с исследованием различных искусственных метаматериалов, а именно фотонных кристаллов. Многие недавние исследования, как теоретические, так и экспериментальные, показывают интересные свойства подобных материалов, а именно их способность концентрировать электромагнитную энергию и управлять направлением ее потоков [9]. Так, идея объединить классические конфигурации различных СВЧ-устройств со структу-

*E-mail: phrolovns@gmail.com

рой фотонного кристалла была заявлена профессором В.Г. Барышевым и его коллегами в работе [10]. Кроме того, недавно было показано, что введение выходной структуры фотонного кристалла в классическую конструкцию аксиального виркатора демонстрирует значительное увеличение мощности за счет эффективного извлечения микроволн и правильного взаимодействия с пучком [11].

В настоящей работе предлагается новая схема СВЧ-устройства, в которой выраженные на высоких частотах СВЧ спектра волновые свойства безыонной пучково-плазменной неустойчивости проявляются гораздо сильнее за счет прохождения возбужденного пучка сквозь периодическую структуру фотонного кристалла. Так, индуцированные колебания объемного заряда усиливаются за счет взаимодействия электронного пучка с собственными модами фотонного кристалла. Данная система была детально изучена с помощью численного трехмерного полностью электромагнитного моделирования с использованием математического метода частиц в ячейке на основании совместного и самосогласованного решения релятивистских уравнений движения частиц и уравнений Максвелла в узлах пространственной сетки. В ходе работы была проведена оценка изменения характеристик выходного излучения, а именно спектрального состава и уровня амплитуд Фурье-спектра колебаний пространственного заряда и показана эффективность использования периодической электродинамической структуры типа фотонный кристалл в данной конструкции СВЧ прибора.

1. СХЕМА СВЧ-ПРИБОРА

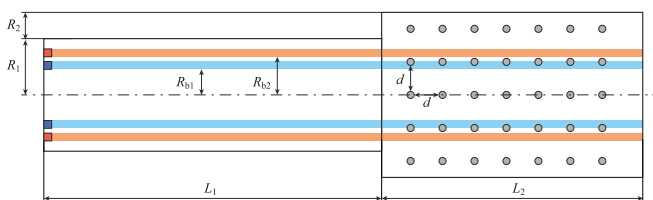


Рис. 1: Схематическое изображение предложенного СВЧ-прибора, в котором комбинируется механизм возбуждения высокочастотных колебаний за счет развития пучково-плазменной неустойчивости и механизм их усиления за счет взаимодействия с собственными волнами фотонного кристалла

В настоящей работе с применением собственного программного кода для реализации численного трехмерного полностью электромагнитного моделирования пучково-плазменных систем с помощью метода частиц в ячейке, был проведен анализ возможности усиления волн индуцированных при взаимодействии двух дрейфующих моноэнергетических релятивистских электронных пучков с различными уровнями энергии частиц и внутренними радиусами R_{b1} и R_{b2} ($R_{b1} < R_{b2}$)

соответственно в виркаторной системе, проиллюстрированной на рис. 1. Базовая конструкция прибора во многом аналогична пучково-плазменной системе, изученной в работе [7], где была впервые показана возможность реализации неустойчивого состояния в отсутствии ионов. Примечательно, что внутренний внутренний пучок с радиусом R_{b1} находится в сжатом состоянии электронного пучка и образует электронную активную среды для развития неустойчивости во внешнем пучке радиусом R_{b2} . Кроме того, СВЧ-прибор состоит из двух цилиндрических волноводных камер конечной длины $L_1 = 88$ мм и $L_2 = 70$ мм, разных радиусов $R_1 = 15$ мм и $R_2 = 22$ мм, соответственно. Предполагается, что в такой конструкции на скачке радиуса камер дрейфа изменяется критический ток пучка (большой радиус соответствует меньшему значению предельного тока в вакууме [12]). Толщина обоих пучков составляет $D = 2$ мм. Дрейфовые камеры разделены сеточным электродом, а вывод СВЧ колебаний электромагнитного поля осуществляется через открытую границу волноводной камеры большего радиуса. Два кольцевых релятивистских электронных пучка, внешний (обозначен оранжевым на рис. 1) и внутренний (обозначен голубым на рис. 1). Внутренний и внешний релятивистские пучки инжектируются с энергией $V_{b1} = 400$ кВ и $V_{b2} = 1200$ кВ соответственно с кольцевых эмитирующих поверхностей, расположенных на рис. 1 слева. В рамках проведенного исследования рассмотрена модель инжекции пучка с фиксированным током, составляющим $I_{b1} = 12$ кА для внутреннего пучка и $I_{b2} = 1.5$ кА для внешнего пучка. Для удержания пучков применяется однородное внешнее продольное магнитное поле $B_0 = 5$ Тл. Таким образом, понятно, что при указанных параметрах системы за счет скачка радиуса внутренний пучок с меньшей энергией инжекции сформирует в первой дрейфовой камере плазмоподобное «сжатое» состояние, которое можно интерпретировать как горячую однокомпонентную заряженную плазму, в то время как внешний пучок с гораздо более высокой энергией и меньшим током будет распространяться вдоль всего пространства дрейфа и взаимодействовать через общее электромагнитное поле со сжатым состоянием внутреннего пучка. Из работы [7] также известно, что развивающаяся в ходе описанного взаимодействия безыонная пучково-плазменная неустойчивость индуцирует в обоих пучках колебания пространственного заряда, которые реализуются в виде быстрых спиральных волн. Так, частота колебаний возмущения плотности пространственного заряда лежит в диапазоне выше 30 ГГц, однако их амплитуда сравнительно невелика. Для усиления колебаний плотности пространственного заряда во второй камере дрейфа была вставлена серия периодически расположенных в пространстве металлических штырей толщиной $\delta = 1$ мм и расстоянием между соседними штырями $d = 8.5$, формирующих структуру типа фотонный кристалл. Расстояние между штырями примерно соответствует длине волны возму-

щения плотности пространственного заряда, которую необходимо усилить.

При анализе систем, содержащих релятивистские электронные пучки, обязательным является учет многих факторов, которые могут быть незначительными для слаборелятивистских систем. В частности, к таким относится влияние как сильного внешнего продольного поля, служащего для фокусировки пучка, так и собственного магнитного поля, индуцированного быстрыми заряженными частицами электронного потока. Поэтому в данном случае проводимый численный анализ опирается на численные методы, включающие само согласованное решение системы уравнений Максвелла и уравнения движения заряженных частиц в трех измерениях.

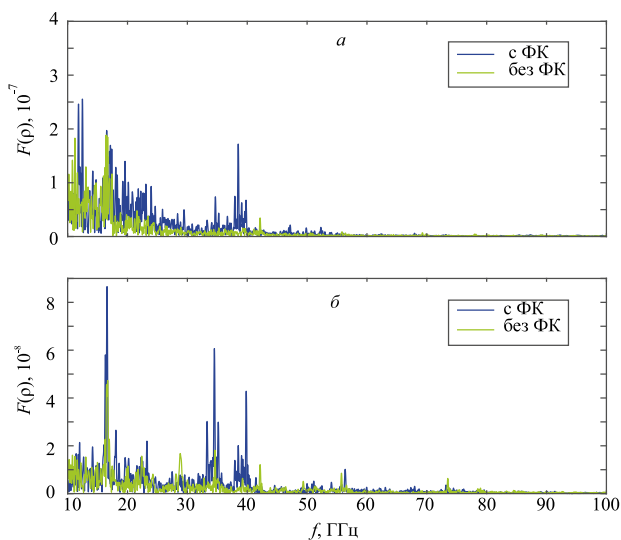


Рис. 2: Фурье–спектры колебаний плотности пространственного заряда во внутреннем (а) и внешнем (б) пучках в случае наличия и отсутствия фотонного кристалла (ФК), показанного на графиках синими и зелеными кривыми соответственно

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе исследований, изложенных в настоящей работе, был проведен численный анализ колебаний, которые возникают при взаимодействии релятивистских электронных пучков в системе, описанной в предыдущем разделе, а также проведено сопоставление результатов в случае наличия и отсутствия в системе периодической структуры типа фотонный кристалл.

На рис. 2 приведено сравнение Фурье–спектров колебаний плотности пространственного заряда в обоих пучках в случае отсутствия и наличия фотонного кристалла. Спектры посчитаны по временному ряду колебаний длительностью 50 нс после завершения переходного процесса длительностью 20 нс. Из рисунка видно, что в случае отсутствия фотонного кристалла во внутреннем пучке (рис. 2,а, зеленая кри-

вая) возбуждаемые колебания лежат в частотном диапазоне до 20 ГГц, а наиболее выраженная спектральная компонента соответствует 16.5 ГГц. В то же самое время, интенсивная спектральная составляющая на частоте 16.5 ГГц присутствуют и спектре колебаний плотности пространственного заряда внешнего пучка, при этом возбуждая ряд гораздо менее интенсивных высших гармоник данной частоты (рис. 2,б, зеленая кривая).

Внедрение в рассматриваемую СВЧ–систему штыревой структуры фотонного кристалла приводит к заметным улучшениям. А именно, как видно из рисунков 2,а,б, происходит усиление колебаний в желаемом диапазоне электромагнитного спектра — выше 30 ГГц — где система имеет потенциал к генерации колебаний плотности пространственного заряда за счет внутренних механизмов, связанных с развитием безионной пучково–плазменной неустойчивости и возбуждением быстрых спиральных волн. Усиление колебаний в данном частотном диапазоне происходит за счет взаимодействия возмущенного по плотности внешнего электронного пучка в первой секции камеры дрейфа, с собственными волнами фотонного кристалла. Взаимодействие электронного пучка с фотонным кристаллом при близком совпадении частот возмущения в пучке и собственных мод фотонного кристалла обеспечивает эффективный и самосогласованный энергообмен между электронным пучком и электромагнитным полем, которое хорошо концентрируется в зазорах периодической структуры фотонного кристалла. Следует отметить, что усиление колебаний наблюдается не в одном конкретном частотном диапазоне, а сразу в нескольких. Это соответствует тому, что пучки эффективно взаимодействуют сразу с несколькими высшими модами фотонного кристалла.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложена новая схема СВЧ–устройства, в которой индуцированные колебания объемного заряда усиливаются за счет взаимодействия электронного пучка с модами фотонного кристалла. Была построена трехмерная полностью электромагнитная численная модель с применением метода крупных частиц, основанная на самосогласованном решении релятивистских уравнений движения частиц и уравнений Максвелла, для описания динамических процессов генерации электромагнитного излучения в данной системе. В рамках проведенных численных экспериментов с помощью метода частиц в ячейке был показан полезный эффект от внедрения в систему периодической структуры типа фотонный кристалл для усиления быстрых спиральных волн, вызванных возмущением плотности пространственного заряда и развитыми вследствие развития безионной пучково–плазменной неустойчивости. В частности, было показано, что близкое соответствие характерного периода

структуры длине волны возмущения вызывает усиление соответствующего типа колебаний за счет взаимодействия с собственными модами фотонного кристалла и повышению эффективности энергообмена между пучком и электромагнитным полем.

Несмотря на то, что полученные выводы получены в ходе численного анализа, предполагается, что данная схема может быть реализована в виде экспериментального макета. Поэтому в заключении хотелось бы отметить несколько важных моментов, касательно реализации данной системы. Развитие эффектов взаимодействия двух пучков в системе предусматривает наличие сильного внешнего магнитного поля. Понятно, что с точки зрения практического использования это накладывает дополнительные энергозатраты. Поэтому подбор оптимальной конфигурации параметров внешнего магнитного поля является отдельной технической задачей и остался за рамками проведенного исследования. Также хотелось бы отметить

другую проблему, важную для устройств электроники больших мощностей, где пучки с высокой энергией взаимодействуют с электродинамическими структурами — перегрев и разрушение металлических элементов. Оценка показывает, что в нашем случае, нагрев металлических штырей является не будет приводить к их разрушению при данной энергии частиц и длительности импульса. Однако, при рассмотрении пучков с большей энергией рекомендуется увеличить толщину штырей на 0.5-0.7 мм.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 16-32-60107) и Совета по грантам Президента РФ для государственной поддержки молодых ученых–кандидатов наук (проект МК-1163.2017.2).

-
- [1] *De Jagher P. C., Sluijter F. W., Hopman H. J.* Phys. Rep. 1998. **167**, N 4. P. 177.
 - [2] *Bogdankevich I. L., Ivanov I. E., Strelkov P. S.* Plasma Phys. Rep. 2010. **36**. P. 762.
 - [3] *Walton S. G., Muratore C., Leonhardt D., Fernsler R. F., Blackwell D. D., Meger R. A.* Surface and Coatings Technology. 2004. **186**, N 1. P. 40.
 - [4] *Eliasson B., Shukla P. K., Dieckmann M. E.* Plasma physics and controlled fusion. 2006. **48**, N 12B. P. B257.
 - [5] *Bret A., Gremillet L., Dieckmann M. E.* Physics of Plasmas. 2010. **17**. N 12. 120501.
 - [6] *Donets E. D., Donets E. E., Syresin E. M., Dubinov A. E., Makarov I. V., Sadovoy S. A., Saikov S. K., Tarakanov V. P.* Plasma Phys. Rep. 2009. **35**. P. 54.
 - [7] *Dubinov A. E., Petrik A. G., Kurkin S. A., Frolov N. S., Koronovskii A. A., Hramov A. E.* Physics of Plasmas. 2016. **23**, N 4. P. 042105.
 - [8] *Ignatov A. M., Tarakanov V. P.* Physics of plasmas. 1994. **1**. N 3. P. 741.
 - [9] *Yasumoto K.* Electromagnetic theory and applications for photonic crystals. CRC Press, 2005.
 - [10] *Baryshevsky V. G., Gurinovich A. A.* arXiv preprint. 2009. arXiv:0903.0300.
 - [11] *Frolov N. S., Kurkin S. A., Koronovskii A. A., Hramov A. E.* IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC). 2016. P. 1.
 - [12] *Трубецков Д. И., Храмов А. Е.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. М.: Физматлит, 2004.

Application of photonic crystal structure to amplify and output microwave oscillations induced by the beam-plasma instability in the absence of ions

N. S. Frolov^{1,2}

¹Research and education center «Artificial Intelligence Systems and Neurotechnology»
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. Saratov 410054, Russia

²Saratov State University, Saratov 410012, Russia
E-mail: phrolovns@gmail.com

In this paper, a new scheme of a microwave device of the vircator type is proposed, in which the mechanisms of generation of electromagnetic radiation in the upper range of microwave spectra (of the order of 30 GHz) and the amplification of induced oscillations due to interaction with a periodic electromagnetic system of a photonic crystal are combined. In the framework of numerical electromagnetic three-dimensional modeling by the particle-in-cell method, the efficiency of such an interaction is shown in the form of an increase in the amplitude, which corresponds to the enhancement of a particular type of fast vortex waves arising in electron beams as a result of the beam-plasma instability in the absence of ions.

PACS: 84.40.Fe; 84.70.+p

Keywords: relativistic electron beam, beam-plasma instability, photonic crystal, numerical simulation, particle-in-cell model.

Received 30 June 2018.

Сведения об авторе

Фролов Никита Сергеевич — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (452) 99-88-32, e-mail: phrolovns@gmail.com.