

НОВЫЕ МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

УДК 533.9

УСКОРЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ КИЛЬВАТЕРНЫМИ ПОЛЯМИ, ВОЗБУЖДАЕМЫМИ В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВОЛНОВОДЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОННЫХ СГУСТКОВ (ОБЗОР)

И.Н. Онищенко

ННЦ “Харьковский физико-технический институт”

61108, Харьков, ул. Академическая, 1, Украина;

E-mail: onish@kipt.kharkov.ua

Представлены теоретические исследования, численное моделирование, выполненные и планируемые эксперименты по обоснованию и проверке новой концепции ускорителя, базирующегося на локализованном черенковском излучении релятивистских электронных сгустков в диэлектрическом волноводе. Принципы новой двухпучковой схемы ускорения сводятся к использованию: a – многомодового характера возбуждения черенковского излучения в диэлектрическом волноводе, приводящего к локализации и увеличению кильватерного поля; b – регулярной последовательности сгустков (многобанчевый режим), обеспечивающей суммирование полей когерентно-излучающих сгустков; v – «резонаторной» модели, аналогичной запертой моде с оптическим ключом в лазерной проблеме, которая позволяет снять ограничение на число когерентно-излучающих сгустков.

Фундаментальное явление излучения частицы, равномерно движущейся в среде со сверхсветовой скоростью, известное в литературе как излучение Вавилова-Черенкова, было обнаружено Вавиловым и Черенковым в 1934 г. [1,2] и теоретически истолковано и рассчитано Таммом и Франком в 1937 г. [3]. Еще в 1929 г. С.И. Вавилов обнаружил очень своеобразное явление универсальной синей люминесценции, которое наблюдается у чистых растворителей самой различной природы [4]. В 1933 г. он предложил своему аспиранту П.А. Черенкову исследовать механизм люминесценции растворов ураниловых солей, возбужденных γ -лучами радия, и сравнить его с особенностями свечения этих же веществ при их возбуждении видимым светом и рентгеновской радиацией [5]. Вскоре Черенков обнаружил, что помимо обычной люминесценции ураниловых солей существует и другое чрезвычайное свечение самих растворителей. Оно имело синюю окраску, и его энергия возрастала по мере продвижения в сторону коротких длин волн [1]. Когда выяснилось, что синее свечение не имеет ничего общего с люминесценцией, естественно, возник вопрос о его природе. Заметим, что это свечение в аналогичных опытах наблюдалось еще супругами Кюри, однако, они приняли его за обычную люминесценцию. Уже в [2] Вавилов пришел к выводу, что это свечение вызывается не непосредственно самими γ -лучами, а комптоновскими электронами, обладающими большими скоростями и возникающими при прохождении γ -лучей через исследуемое вещество. Для подтверждения этой гипотезы, по предложению Вавилова, Черенковым были проделаны специальные опыты, в которых он пробовал возбуждать свечение жидкостей пучком электронов (β -лучами, используя эманацию радия) и исследовал влияние магнитного поля. После подтверждения электронной природы но-

вого вида оптического излучения сам Вавилов назвал это явление «эффектом Черенкова». После этого Вавилов подключил к этим работам другого своего ученика, И.М. Франка, который, занявшись теоретической стороной вопроса, предположил, что наблюдаемое свечение вызывается электронами, движущимися в исследуемом веществе со скоростями, превышающими скорость света в среде. Возникающие при этом электромагнитные волны отстают от движущихся электронов, интерферируют между собой и в результате образуют общий конический фронт. Точная классическая теория этого явления была развита И.Е. Таммом и И.М. Франком в 1937 г. [3]. Трудно переоценить это «одно из наиболее выдающихся открытий советской науки в области изучения элементарных частиц» [3]. В 1958 г., спустя почти четверть века после появления первых работ Вавилова и Черенкова, за «открытие и толкование эффекта Черенкова» И.Е.Тамму, И.М. Франку и П.А.Черенкову была присуждена Нобелевская премия. В списке не было С.И. Вавилова, умершего в 1951 г. Нобелевская премия присуждается лишь здравствующим ученым.

«Эффект Черенкова», как принципиально новый элементарный механизм излучения заряженной частицы, имеет большое значение прежде всего в фундаментальной физике – физике высоких энергий, физике пучков заряженных частиц, физике плазмы, космологии, радиофизике и электронике, а также в многочисленных приложениях. Излучение Вавилова-Черенкова является физической основой самого современного научного оборудования, используемого на переднем крае науки и в высоких технологиях. При исследованиях релятивистских частиц, наблюдаемых в космических лучах и получаемых на ускорителях заряженных частиц, этот вид излучения должен учитываться как источник энергетических

потерь. С другой стороны, по его интенсивности и углу между направлениями распространения возбуждающего и возникающего излучения можно определить скорость частицы. Существенное улучшение детектирующих свойств излучения Вавилова-Черенкова происходит при использовании т.н. «параметрического черенковского излучения» [7] (излучение движущейся частицы в стопке диэлектрических пластин), трактуемое также [8,9] как интерференция переходного излучения на скачках диэлектрической проницаемости.

Классическое излучение Вавилова-Черенкова, рассмотрение которого проводится для случая безграничной диэлектрической среды [10,11], проявляет существенные особенности в случае ограниченности диэлектрической среды [12]. Подобная проблема возникает при возбуждении и распространении переходного излучения в случае конечных размеров мишени, на которую падает короткий сгусток релятивистских электронов. В [13] показано, что в условиях, когда поперечные размеры зоны формирования излучения сравнимы с размерами мишени, спектр переходного излучения претерпевает значительные изменения, что существенно видоизменяет широко используемую диагностику электронных пучков, основанную на переходном излучении.

Характерные особенности излучения Вавилова-Черенкова, вызываемые продольной и поперечной ограниченностью диэлектрика, оказываются важными для проблемы кильватерного метода ускорения заряженных частиц, а именно для возбуждения кильватерных полей в ограниченном диэлектрике сверхсветовым электронным сгустком или их регулярной последовательностью [13]. Предполагается, что ведущий сгусток возбуждает в диэлектрике кильватерное поле, а ускоряемые частицы помещаются в ускоряющую фазу этого поля. Кильватерный метод ускорения привлекателен тем, что в нем, во-первых, не требуются внешние источники ВЧ-мощности для ускорения частиц, а во-вторых, благодаря высокоградиентным возбужденным ускоряющим полям, он обеспечивает высокий темп ускорения.

Впервые о возможности использовать электрические поля пространственного заряда в плазме или сильнооточных электронных пучках было сообщено в [14]. Такие поля, возбуждаемые релятивистским электронным сгустком с большим зарядом [15] или коротким интенсивным лазерным импульсом [16] в плазме и называемые кильватерными полями, имеют большую напряженность электрического поля и поэтому рассматриваются как самый перспективный из новых методов ускорения заряженных частиц, позволяющий создавать высокоградиентные (с темпом ускорения $10^6 \dots 10^7$ В/см) ускорители нового поколения, востребованные физикой высоких энергий. Плазменные кильватерные поля, уже реализованные в эксперименте – СССР (ХФТИ), США (ANL), Япония (КЕК), имеют довольно скромные параметры (до 60 МэВ/м) из-за малого числа электронов в сгустке и являются лишь доказательством принципа

[17,18]. В планируемом эксперименте E-157 [19] на Станфордском ускорителе (SLAC) предполагается получить ускоряющее кильватерное поле в плазме несколько сотен мегаэлектронвольт на метр при инжекции в плазму длиной 1.4 м и плотностью 10^{14} см⁻³ электронного сгустка с энергией 30 ГэВ и плотностью, превышающей плотность плазмы. Существует проект [20] коллайдера на энергию 1 ТэВ с темпом ускорения 1 ГэВ/м, разработанный в Институте ядерной физики (Новосибирск). Однако он еще далек от реализации. Большие успехи достигнуты при лазерном возбуждении кильватерных полей в плазме, благодаря созданным компактным тераватным короткоимпульсным лазерным системам (так называемым Т³ лазерам [21]). Так в группе исследователей из КЕК/JAERI/University of Tokyo (Япония) [22] получено ускоряющее поле 15 ГэВ/м на длине 2 см при использовании 2 TW, 90 fsec лазерного импульса. Темп ускорения 30 ГэВ/м (дополнительное ускорение электронов на 18 МэВ на длине 0.6 см) продемонстрирован в эксперименте [23]. Основной проблемой в лазерном методе возбуждения кильватерных полей является малая длина ускорения, ограничиваемая величиной дифракционной (Релеевской) длины. Это ограничение преодолевается при использовании явления самофокусировки, проявляющейся при большой мощности лазерного импульса. В RAL эксперименте [24] с использованием этого эффекта достигнут рекордный ускоряющий градиент - 44 МэВ на длине 0.3 мм. В [25] приведен проект линейного коллайдера на 5 ТэВ (2.5×2.5ТэВ) длиной 1 м, основанного на лазерных кильватерных полях в плазме с плотностью 10^{17} см⁻³.

Дальнейшее продвижение в разработке пучкового кильватерного метода может быть реализовано при использовании регулярной последовательности коротких релятивистских электронных сгустков [26], получаемых, к примеру, на линейных резонансных электронных ускорителях. Если период следования сгустков кратен периоду возбуждаемой плазменной волны, то когерентное сложение полей отдельных сгустков оказывается равным кильватерному полю, возбуждаемому одним сгустком с эквивалентным суммарным зарядом. Создать отдельный электронный сгусток с зарядом такой величины не представляется возможным из-за кулоновского расталкивания. Такой подход позволяет сделать пучковый кильватерный метод ускорения заряженных частиц конкурентным с лазерным кильватерным методом.

Одновременно с исследованием процессов возбуждения кильватерных полей в плазме для разработки новых методов ускорения заряженных частиц проводилось изучение аналогичных процессов в диэлектрике. В отличие от плазмы диэлектрик обладает одним важным принципиальным преимуществом, связанным с его электродинамическими свойствами. В диэлектрическом волноводе (в реальных экспериментах диэлектрик ограничен в поперечном направлении) все радиальные моды синхронны с движущейся релятивистской частицей и поэтому возбу-

ждаются на черенковском резонансе (т.н. «многомодовый режим» возбуждения). Возникающее за частицей кильватерное поле в результате сложения всех возбужденных радиальных мод имеет вид последовательности локализованных коротких импульсов (пиков) большой амплитуды разной полярности. Этот же результат следует из рассмотрения эффекта Черенкова в поперечно-ограниченной диэлектрической среде. В этом случае конус излучения Вавилова-Черенкова «отражается» от боковых стенок и концентрируется в отдельных местах на оси за движущейся частицей. В плазменном волноводе, напротив, возбуждается только основная радиальная мода; остальные радиальные моды имеют фазовую скорость, меньшую скорости частиц, и, в принципе, не могут возбуждаться релятивистской частицей на черенковском резонансе. В результате плазменная кильватерная волна представляет собой гармоническую волну, соответствующую основной радиальной моде, и естественно, имеет значительно меньшую амплитуду по сравнению с диэлектриком.

Для возбуждения интенсивных диэлектрических кильватерных полей необходимо использовать большой заряд возбуждающего электронного сгустка, что может быть достигнуто, как и в плазменном случае, эквивалентной заменой сгустка с большим зарядом последовательностью сгустков с гораздо меньшим зарядом («многобанчевый режим» возбуждения). Частота следования сгустков должна совпадать (или быть кратной) с частотой следования возбуждаемых локальных пиков излучения Вавилова-Черенкова. В этом случае, кроме увеличения амплитуды кильватерного поля из-за многомодового возбуждения, будет дополнительный рост амплитуды поля, обусловленный когерентным сложением полей отдельных сгустков.

Таким образом, использование указанных двух достоинств - многомодового и многобанчевого режимов возбуждения кильватерных полей в диэлектрике - позволяет создавать большие ускоряющие электрические поля, необходимые для разработки сильноградиентных ускорителей нового поколения.

Дополнительным преимуществом диэлектрического варианта является возможность изготовления узлов из диэлектрика как твердого тела с микронной точностью, что особенно важно при многомодульном исполнении.

Отметим и возникающие трудности при реализации ускорения частиц полем кильватерной волны, возбуждаемой в диэлектрике.

Основным недостатком схемы с диэлектрическими кильватерными полями является пробой диэлектрика при сравнительно низких электрических полях. Обнадеживающими являются результаты теоретических исследований [27] пробоя диэлектрика при очень коротких длительностях импульса приложенного напряжения. При длительностях импульса в фемтосекундном диапазоне, а именно такие длительности характерны для кильватерных полей в диэлектрике, напряженности поля, не приводящие к

пробоем из-за туннельной ионизации, могут достигать 1 ГэВ/м.

Кроме этого, серьезной проблемой в рассматриваемой схеме генерации высокоградиентных кильватерных полей является поперечная устойчивость сгустков [28], так называемая неустойчивость «голова-хвост», при которой поперечное электрическое поле кильватерной волны, возбужденной предыдущими сгустками, выбрасывает последующие сгустки и/или ускоряемые сгустки на стенки волновода. Для преодоления этой трудности необходимо использовать внешние системы чередующихся фокусирующих/дефокусирующих квадрупольей.

Диэлектрические системы давно используются как замедляющие структуры для генерации СВЧ-колебаний [29], так как в них довольно просто реализуется Черенковский резонанс между частицей и замедленной электромагнитной волной. В релятивистской области энергий электронного пучка черенковский генератор [30], использующий взаимодействие релятивистского электронного пучка (РЭП) с поверхностной волной на границе диэлектрик-вакуум, является альтернативой современным генераторам коротких длин волн – лазерам на свободных электронах (ЛСЭ). В то же время обращенный эффект Черенкова является физической основой еще одного предложения о создании высокоградиентного ускорителя нового типа на высокие энергии [31].

Однако, использование диэлектрика непосредственно в кильватерном методе ускорения заряженных частиц началось сравнительно недавно [32-36]. Экспериментальное подтверждение возбуждения кильватерных полей в металлическом волноводе с покрытой диэлектрическим слоем внутренней стенкой получено в [32] при использовании 21 МэВ ведущих сгустков с зарядом 2.0...2.6 нС и 15 МэВ тестовых сгустков со значительно меньшим зарядом. В соответствии с теорией в этом эксперименте наблюдались ускоряющие градиенты 0.3...0.5 МэВ/м. Для получения больших ускоряющих полей предложено [33] взять большой заряд сгустка (100 нС и длиной 1 мм), проходящий через покрытый изнутри диэлектриком волновод (внутренний радиус 2.0 мм, внешний радиус 5.0 мм, диэлектрическая проницаемость 3.0). Предсказывается, что пиковое кильватерное поле достигнет 240 МэВ/м, т.е. в 14 раз превышающее поле на SLAC'e.

Когерентное сложение кильватерных полей от отдельных сгустков при использовании последовательности сгустков («многобанчевый» режим) впервые для случая плазмы предложено в [34,35] и показано, что возбуждение плазменной волны в этом случае эквивалентно по амплитуде кильватерного поля возбуждению одним сгустком с суммарным зарядом последовательности сгустков [35]. Для случая диэлектрика впервые эта проблема теоретически рассмотрена в [36], а экспериментально исследована в [37]. В эксперименте использовался цуг сгустков, полученный на 2 МэВ линейном резонансном ускорителе электронов. Цуг состоял из (3...6) 10^3 сгустков, частота следования сгустков 2825 МГц,

диаметр отдельного сгустка 1.0 см, длина 1.7 см, число электронов в сгустке $2 \cdot 10^9$. Внешний и внутренний радиусы диэлектрической трубы длиной 70 см (3.5 см и 1.1 см, соответственно) выбраны так, чтобы частота пиков кильватерного поля совпадала с частотой следования сгустков. По нарастанию интенсивности излучения и электрического поля в диэлектрическом волноводе с увеличением числа сгустков сделан вывод о когерентном сложении полей, возбуждаемых отдельными сгустками. Это подтверждается также измерением потерь энергии электронов (до 500 кэВ) в зависимости от числа прошедших сгустков. Наблюдались электроны, ускоренные в возбужденных полях, что является дополнительным свидетельством наличия возбужденных кильватерных полей.

Соображение об использовании «многомодового» режима для увеличения амплитуды возбуждаемого в диэлектрике кильватерного поля принадлежит авторам работы [38]. Так как в диэлектрическом волноводе фазовая скорость всех возбуждаемых радиальных мод близка к скорости сгустка, возникает возможность когерентной суперпозиции полей этих мод, так что суммарная амплитуда кильватерного поля может быть значительно больше амплитуд отдельных мод. В [38] приведена теория возбуждения кильватерных полей, демонстрирующая оба указанных достоинства – «многомодовый» и «многобанчевый» режимы – для плоского случая (пучок-лист распространяется между двумя диэлектрическими пластинами). Для одного сгустка получена последовательность знакопеременных пиков кильватерного поля. Амплитуда пиков линейно растет с увеличением числа сгустков в последовательности. Возбуждаемый спектр собственных частот волновода ω_n близок к эквидистантному $\omega_n = \omega_0 (n+1/2)$ (ω_0 – частота возбужденной основной моды, n – целое число). Как показано в общем виде для коллинеарного ускорения в кильватерных полях [39], для такого спектра «коэффициент трансформации» (т.е. отношение кильватерного поля к полю, тормозящему ведущий сгусток) может превышать значение 2, следующее из теоремы Вильсона [40]. Это означает, что частица может быть ускорена до энергии, большей удвоенной энергии ведущего сгустка. Этот вопрос пока еще открыт и обсуждается в [41]. Экспериментальное подтверждение теории «многомодового» режима проведено в [42] на цилиндрической геометрии (диэлектрическая труба длиной 110 см и внешним и внутренним диаметрами 33 и 9 мм, соответственно) с 6-МэВ 10-пс сгустком. Измерены 4 собственных возбужденных частоты (23, 27, 31, и 35 GHz), близкие к теоретически рассчитанным.

Цилиндрический случай, более адекватный ряду уже проведенных экспериментов, исследован в [43,44]. Показано, что локализация кильватерного поля в этой геометрии менее выражена и быстро приходит к стохастическому распределению. Это обусловлено, в частности, неэквидистантностью собственных частот для круглой геометрии (неэкви-

дистантность корней функции Бесселя). По этой причине выбирается прямоугольная геометрия волновода, обеспечивающая как эквидистантность собственных частот, так и конечные поперечные размеры волновода, свойственные эксперименту.

Как и для плоской геометрии [38] и в работах [43,44] в цилиндрическом случае проявляется эффект ограниченности диэлектрика в поперечном направлении, проявляющийся как «отражение» конуса излучения Вавилова-Черенкова от боковых стенок волновода и локализация излучения в отдельных местах с увеличенной интенсивностью.

Однако продольная ограниченность, наличествующая в реальных экспериментах, (вход – в случае полуограниченного волновода, вход и выход – в случае резонатора) приводит к не менее важным последствиям при возбуждении излучения Вавилова-Черенкова (т.е. кильватерного поля для ускорения частиц). В [45,12] для цилиндрического полуограниченного диэлектрического волновода и в настоящей дипломной работе для полуограниченного диэлектрического волновода прямоугольного сечения исследовано влияние входной границы на процесс возбуждения. Обнаружены и исследованы два важных эффекта. Первый из них связан с возбуждением переходного излучения электронами при входе в волновод. Это излучение искажает прецизионную структуру создаваемых кильватерных ускоряющих полей и, следовательно, является паразитным. Избежать их негативного влияния можно, используя когерентность возбуждения необходимых черенковских полей (многобанчевый и многомодовый режимы), которая для переходного излучения может и не выполняться. Второй эффект заключается в выносе возбужденного излучения с групповой скоростью от входной границы. При этом групповая скорость определяется, в частности, поперечной неоднородностью. Это означает, что, начиная с некоторого номера, влетающие сгустки «не находят» на входе поля, излученного первым сгустком, и т.д. В результате в когерентном суммировании полей отдельных сгустков участвует ограниченное число сгустков. Их количество определяется разностью между скоростью сгустка и групповой скоростью возбужденных мод. Число сгустков для реальных условий оказывается незначительным, что приводит к ограничению величины кильватерного поля.

Обойти эту существенную трудность предложено в [46] (резонаторная концепция) с использованием хорошо известного в проблеме ЛСЭ так называемого явления летаргии или «запертой моды» [47]. Суть предложения заключается в использовании резонатора, т.е. наличия отражающих концов, между которыми запирается импульс кильватерного поля, возбуждаемый последовательностью коротких сгустков. Параметры резонатора выбираются таким образом, чтобы период кильватерного поля совпадал с расстоянием между сгустками, а длина резонатора выбирается равной кратной полуволне периоду кильватерного поля. В этой ситуации кильватерное поле проходящего сгустка будет распростра-

няться в резонаторе за сгустком, а, отразившись, придет к переднему концу резонатора как раз в момент подхода туда очередного сгустка. Таким образом «память» от переднего сгустка при хорошей добротности резонатора остается надолго, обеспечивая когерентное сложение полей большого числа сгустков. Кильватерные поля остаются хорошо сформированными, так как за исключением самой низкой моды длина резонатора почти кратна половине каждой моды. В результате такого типа прибор представляет собой лазерный резонатор с запертой модой, снабженный «оптическим ключом» в виде проходящих сгустков. Численное моделирование [46] показало, что кильватерные поля отражаются от границ, а их амплитуды возрастают с дополнительными сгустками. Резонаторная концепция позволяет использовать модульную систему ускорителя. По идеальному сценарию, если взять, к примеру, цуг 105 МэВ сгустков каждый с зарядом 1 нКл и расстоянием между сгустками 10.5 см и инжектировать его в резонатор длиной 10.5 см, параметры которого подобраны так, чтобы периодичность поля в нем также была 10.5 см, то в стационаре сгусток будет терять порядка 100 МэВ, поскольку из численного моделирования следует тормозящее его поле 0.95 МэВ/м. Тестовые ускоряемые сгустки помещаются посередине между ведущими сгустками. Увеличивая свою энергию на 100 МэВ при заряде 1 нКл, каждый из них поглощал бы 0.1 Дж. Теорема Вильсона «об отношении 2» ускоряющего поля к тормозящему ведущий сгусток здесь неприменима из-за конечной длительности сгустков и вследствие суперпозиции многих кильватерных полей. Для ускорения тестового сгустка до 1 ТэВ понадобилось бы 10^4 модулей; но гораздо меньше при энергии ведущего сгустка 1 ГэВ.

В [46] также рассмотрен пример для экспериментальной реализации в Йельской лаборатории физики пучков. Его идея сводится к инжекции имеющейся последовательности 6 МэВ сгустков 100 пКл каждый в резонатор длиной 10.5 см, равной расстоянию между сгустками. Этот планируемый эксперимент аналогичен уже имеющемуся [37] и отличается большей тщательностью выбора длины резонатора для проверки рассматриваемой концепции.

Поскольку в реальных экспериментах для пропускания сгустков необходим канал в диэлектрике, решение всех перечисленных электродинамических задач с отверстием становится актуальным. В резонаторном варианте это удалось сделать в [48,49], в которых учтено влияние канала на величину и топографию кильватерного поля, а также рассмотрен процесс ускорения тестовых электронов.

Прямоугольная геометрия, исследованная в [50], представляется актуальной в связи с уникальным проектом [51] ускорителя на диэлектрических кильватерных полях микронного масштаба, разрабатываемого совместно Колумбийским и Йельским университетами и Omega-P, Inc. Суть его заключается в следующем. Новый ускоритель LACARA [52], создаваемый в Брукхевенской национальной лаборато-

рии, основан на ускорении 50 МэВ импульсного электронного пучка лазерным излучением 1 TW CO₂ лазера (10.6-мкм) внутри 2 м, 6 Тл соленоида. В результате получается 100 МэВ вращающийся электронный сгусток с 3% энергетическим разбросом и длительностью 1 пс с частотой лазера, который выполняет один оборот за 35 фс. На выходе в пучковом стоппере смещенный от оси канал вырезает на каждом обороте короткий импульс пучка, что позволяет получить за время импульса лазера 30 микросгустков длительностью 3.5 фс и зарядом 1...3 пКл каждый. С помощью магнитных квадрупольных микросгустки трансформируются в сгустки почти прямоугольного сечения 10×150-мкм. Однако для получения меньшего эмиттанта (1 мм-мрад) пучка предполагается использовать 500 МэВ электронный сгусток с линейного резонансного ускорителя со сверхпроводящими резонаторными структурами, а 5 TW CO₂ лазер применять только для «нарезки» 1 мкм 1 пКл микросгустков. Такой цуг микросгустков инжектируется в планарный диэлектрический волновод чуть больших размеров, где суммирование кильватерных полей отдельных микросгустков приводит к ускоряющим градиентам больше 1 ГэВ/м. Поскольку диэлектрическая структура твердотельная в отличие от плазменной, возможно ее изготовление с микронной точностью, как в случае микросхем и, следовательно, тиражирование для создания многомодульных систем. При энергии ведущего сгустка 500 МэВ создание тераэлектронвольтового ускорителя потребует порядка 1000 модулей.

Кроме указанного выше основного преимущества диэлектрического волновода прямоугольного сечения, связанного с эквидистантностью его собственных возбуждаемых частот, обеспечивающей обострение пиков кильватерного поля, отметим еще несколько других. В прямоугольной структуре может проходить сгусток с большим зарядом. В ней запасается большая энергия. Наконец, она более стабильна к поперечным отклонениям пучка по сравнению с цилиндрической структурой сравнимых поперечных размеров [53].

Работа выполнена при поддержке гранта ДФФД №02.07/325.

ЛИТЕРАТУРА

1. П.А. Черенков. Видимое свечение жидкостей под действием γ -радиации // *ДАН СССР*. 1934, т.2, №8, с.451-454.
2. С.И. Вавилов. О возможных причинах синего γ -свечения жидкостей // *ДАН СССР*. 1934, т.2, №8, с.457-459.
3. И.Е. Тамм, И.М. Франк. Когерентное излучение быстрого электрона в среде // *ДАН СССР*. 1937, т.14, №3, с.107-112.
4. С.И. Вавилов. Замечательный случай фотолюминесценции жидкостей // *Собрание сочинений*. М.: «АН СССР», 1954, т.1, с.284-289. *Zs. f. Phys.* 54, 270, 1929.

5. Л.В. Левшин. *Сергей Иванович Вавилов*. М.: «Наука», 1997, с.198-204.
6. И.М. Франк. Начало исследований по ядерной физике в ФИАНе и некоторые современные проблемы строения атомных ядер // *Успехи физических наук*. 1967, т.91, вып. 1, с.16.
7. Я.Б. Файнберг, Н.А. Хижняк // *ЖЭТФ*. 1957, т.32, №4, с.883.
8. Тер-Микаэлян // *ДАН СССР*. 1960, т.2, с.312.
9. В.Л. Гинзбург, В.Н. Цытович // *УФН*. 1978, №4, с.553.
10. Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшиц. *Электродинамика сплошных сред*. М. 1959, с.439-450.
11. В.Г. Левич. *Теоретическая физика*. М.: «Наука», 1969, т.1, с.945-853.
12. I.N. Onishchenko, D.Yu. Sidorenko, G.V. Sotnikov. Structure of electromagnetic field excited by an electron bunch in a semi-infinite dielectric-filled waveguide // *Physical Review E* 65, 2002, pp.066501-1-11.
13. Н.Ф. Шульга, С.Н. Добровольский. Теория переходного излучения релятивистского электрона в тонкой металлической мишени // *ЖЭТФ*. 2000, т.117, No.4, с.668-672.
14. Ya.B. Fainberg Proc. Symp. CERN: Geneva, 1956, v.1, p.84.
15. Т. Tajima, J.M. Dawson // *Phys. Rev. Lett.* 1979, 43, p.267.
16. P. Chen, J.M. Dawson, R.W. Huff and Katsouleas // *Phys. Rev. Lett.* 1985, 54, p.693.
17. Я.Б. Файнберг, В.А. Балакирев, И.Н. Онищенко, Г.В. Сотников и др. Ускорение заряженных частиц волнами плотности заряда в плазме // *Релятивистская высокочастотная электроника*. Нижний Новгород: Институт Прикладной физики РАН, 1992, вып.7, с.104-142.
18. I.N.Onishchenko. Plasma wakefields for particles acceleration and HF-generation // *Problems of Atomic Science and Technology. Series: «Plasma Physics, Issues»* 3(3), 4(4). 1999, v.2, p.200-205.
19. P. Muggli, R. Assman, B. Blue et al. E-157: A Plasma Wakefield Acceleration Experiment // *Bull. of the APS*. 2000, v.45, No.7, p.234.
20. A.M. Kudryavtsev, K.V. Lotov, and A.N. Skrinsky. Plasma Wake-Field Acceleration for High Energies: Physics and Perspectives // *Nucl. Instr. Methods A*. 1998, v.410, p.388.
21. J.R. Marques et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1996, 43, p.3566.
C.W. Siders et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1996, 76, p.3570.
22. K. Nakajima et al. // *Bull. of the APS*. 1997, v.42, No.3, p.1347.
23. K. Nakajima et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1995, 74, p.4428.
24. A. Modena et al. // *Nature* 1995, 377, p.806.
25. M. Xie et al. // *Proc. 7th Workshop on Advanced Accelerator Concepts*. Lake Tahoe, 1996.
26. А.К. Березин, Я.Б. Файнберг, И.Н. Онищенко и др. Возбуждение кильватерных полей в плазме импульсом релятивистских электронов, содержащих регулируемое количество коротких сгустков // *Физика плазмы*. 1994, т.20, No.7-8, с.663-670.
27. P. Sprangle, B. Hafizi, and R.F. Hubbard. Ionization and pulse lethargy effects in inverse Cherenkov accelerators // *Phys. Rev.* 1997, E 55, No.5, p.5964-5974.
28. S.Y. Park, J.L. Hirshfield. Bunch stability during high-gradient wake-field generation in a dielectric-lined waveguide // *Physics of Plasmas*. 2001, v.8, No.5, p.2461-2465.
29. J.E. Walsh, T.C. Marshal, and Schlessinger. Generation of coherent Cerenkov radiation with an intense relativistic electron beam // *Phys. Fluids*. 1977, v.20, p.709-710.
30. J.E. Walsh, E. Fisch. Radio-frequency-injector driven Cerenkov free laser electron laser. *Nucl. Instrum. Meth. A* 1992, v.318, p.772-774.
31. Н.А. Хижняк, В.Г. Папкович, И.В. Боровский, С.В. Шелков. Ускоряющая структура лазерного ускорителя на высокие энергии // *ВАИТ. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 1987, вып.5(5), с.79-82.
J.A. Edingoffer W.D. Kimura, R.H. Pantel, M.A. Piestrup, and D.Y. Wang // *Phys. Rev.* 1997, A 23, p.1848.
32. W. Gai, P. Schoessow, B. Cole, R. Konecny, J. Rozenzweig, and J. Simpson // *Phys. Rev. Lett.* 1988, 61, p.2756-2758.
33. M. Rosing and W. Gai // *Phys. Rev.* 1990, D 42, p.1829.
34. P. Chen, J.M. Dawson, R.M. Huff, T. Katsouleas // *Phys. Rev. Lett.* 1985, 54, p.693.
35. В.А. Балакирев, Ю.П. Блюх, И.Н. Онищенко, Я.Б. Файнберг // *Физика плазмы*. 1988. т.14, с.218.
36. А.К. Березин, Н.М. Землянский, В.И. Мирный, И.Н. Онищенко, Г.В. Сотников, Я.Б. Файнберг. Теоретические исследования возбуждения кильватерных полей в плазменно-диэлектрических замедляющих средах // *Украинский физический журнал*. 1992, т.37, No 7. с.999-1003.
37. I.N. Onishchenko, V.A. Kiseljov, A.K. Berezin, G.V. Sotnikov, V.V. Uskov, A.F. Linnik, and Ya.B. Fainberg // *Proc. 1995 Particle Accelerator Conf.* pp.782-3 IEEE, 1995.
38. T.B. Zhang, J.L. Hirshfield, T.C. Marshal, B. Hafizi. Stimulated Dielectric Wakefield Accelerator // *Bull. of the APS, Proc. 1997 Particle Accelerator Conf.* 12-16 May, Vancouver, Canada. 1997, 42, No.3, p.1341.
Phys. Rev. 1997, E 56, p.4647-4655.
39. K.L.F. Bane, P. Chen, P.B. Wilson *IEEE Trans // Nucl. Sci.*, 1985, NS-32, p.3524.
40. P.B. Wilson. Proc. of the 13th SLAC Summer Institute on Particle Physics, ed. By E. Brennan // *SLAC Report* 1985, No.296, p.273.
K.L. Bane, P. Chen, and P.B. Wilson // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1985, 32, p.3524.
41. J.G. Power, Wei Gai, and Paul Schoessow. Wake-field excitation in multimode structures by a train

- of electron bunches // *Physical Review E* v.60, No.5, p.6061-6067.
42. T.B. Zhang, T.C. Marshal, J.L. Hirshfield A Cerenkov Source of High-Power Picosecond Pulsed Microwaves // *IEEE Trans. on Plasma Science*. v.26, No.3 p.787-793.
 43. V. Kiselev, A. Linnik, I. Onishchenko, G. Sotnikov et al. Dielectric Wake-Field Generator. 12th Intern. Conf. in High-Power Particle Beams // *BEAMS'98, Haifa, Israel*. June 7-12, 1998, v.I, p.756-759.
 44. S.Y. Park, J.L. Hirshfield // *Phys. Rev.* 2000, E 62, p.1266.
 45. В.А. Балакирев, И.Н. Онищенко, Д.Ю. Сидоренко, Г.В. Сотников. Возбуждение кильватерного поля релятивистским электронным сгустком в полубесконечном диэлектрическом волноводе // *ЖЭТФ*. 2001, т.120, вып.1(7), с.41-51.
 46. T.C. Marshal, J.M. Fang, J.L. Hirshfield, S.Y. Park Multi-mode, Multi-bunch Dielectric Wake Field Resonator Accelerator // *Advanced Accelerator Concepts: 9th Workshop, edited by P.L. Colestock and S. Kelley // AIP Conf. Proc. 569*. 2000, p.316-325.
 47. D.A.G. Deacon, L.R. Elias, J.M.J. Maday, et al. // *Phys. Rev. Lett.* 1977, v.38, p.892.
 48. N.I. Onishchenko, D.Yu. Sidorenko, G.V. Sotnikov Acceleration of electrons by wake fields of a regular train of bunches in a dielectric waveguide of finite length // *УФЖ*. 2003, т.48, No.1 с.17-26.
 49. В.А. Балакирев, И.Н. Онищенко, Д.Ю. Сидоренко, Г.В. Сотников. Ускорение заряженных частиц кильватерными полями в диэлектрическом резонаторе с каналом для возбуждающего сгустка // *Письма в ЖТФ*. 2003, т.29, вып. 14 с.39-45.
 50. Н.И. Онищенко. Возбуждение кильватерного поля электронным сгустком в полубесконечном диэлектрическом волноводе прямоугольного сечения (дипломная работа). 2004.
 51. T.C. Marshal, C. Wang, J.L. Hirshfield. Femtosecond planar electron beam source for micron-scale dielectric wake field accelerator // *Phys. Rev. ST-Accel. And Beams*. 2001, 4, p.121301.
 52. J.L. Hirshfield, C. Wang. Laser-driven electron cyclotron autoresonance accelerator with production of an optically chopped electron beam // *Phys. Rev. E-61, No.6*, p.7252-7255.
 53. A. Tremaine, J. Rosenzweig, P. Schoessow // *Phys Rev.* 1997, E-56, p.7204.

CHARGED PARTICLE ACCELERATION BY WAKEFIELDS EXCITED IN DIELECTRIC WAVEGUIDE BY A SEQUENCE OF ELECTRON BUNCHES (OVERVIEW)

I.N. Onishchenko

Theoretical investigations, simulation, performed and planned experiments are presented on grounding and verification novel accelerator concept, based on localized Cherenkov radiation of relativistic electron bunches in dielectric waveguide. Principles of novel two-beams acceleration scheme are concluded to usage: a – multimode character of excited Cherenkov radiation in dielectric waveguide that leads to localizing and increasing of wakefield; b – regular sequence of electron bunches (multibunch regime) providing summation of fields of coherently radiating bunches; c – «resonator» model, analogical to locked mode with optical switch in laser problem, that allows to remove limitation on the number of coherently radiating bunches.

ПРИСКОРЕННЯ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТОК КІЛЬВАТЕРНИМИ ПОЛЯМИ, ЗБУДЖЕНИМИ В ДІЕЛЕКТРИЧНОМУ ХВИЛЕВОДІ ПОСЛІДОВНІСТЮ ЕЛЕКТРОННИХ ЗГУСТКІВ (ОГЛЯД)

I.M. Онищенко

Представлені теоретичні дослідження, чисельне моделювання, виконані та заплановані експерименти по обґрунтуванню і перевірці нової концепції прискорювача, що базується на локалізованому черенковському випромінюванні релятивістських електронних згустків в діелектричному хвилеводі. Принципи нової двопучкової схеми прискорення зводяться до використання: a – багатомодового характеру збудження черенківського випромінювання в діелектричному хвилеводі, що приводить до локалізації та зростання кильватерного поля; b – регулярної послідовності згустків (багатобанчевий режим), що забезпечує сумачію полів когерентно випромінюючих згустків; c – «резонаторної» моделі, аналогічній запертій моді з оптичним ключем в лазерній проблемі, яка дозволяє уникнути обмеження на число когерентно-випромінюючих згустків.