

КОНЦЕПЦИЯ МНОГОСГУСТОЧНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КИЛЬВАТЕРНОГО УСКОРИТЕЛЯ

И.Н. Онищенко

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина*

E-mail: onish@kipt.kharkov.ua

Рассматривается схема нового типа двухпучкового ускорителя, основанного на возбуждении кильватерного поля в прямоугольном диэлектрическом резонаторе последовательностью релятивистских электронных сгустков и ускорении сгустков этой последовательности, смещающихся в ускоряющую фазу возбужденного поля при соответствующей расстройке частоты следования сгустков относительно частоты основной собственной моды резонатора.

1. ВВЕДЕНИЕ

Ускорители заряженных частиц, как уникальные инструменты для решения проблем переднего края физики высоких энергий, характеризуются чрезмерными размерами и стоимостью, требующими для их создания усилий многих стран (LHC, CLIC, ILC и другие будущие коллайдеры). Для применения ускорителей во многих областях человеческой деятельности уменьшение их размеров и стоимости также становится существенным. Этим мотивируются исследования и разработки, направленные на поиск и внедрение новых высокоградиентных методов ускорения в физику и технику ускорителей. Наиболее обещающим среди них является ускорение кильватерными полями, возбуждаемыми в плазменной или диэлектрической структуре интенсивным сгустком или мощным лазерным импульсом.

В работе обсуждается схема ускорителя электронов, основанного на нетрадиционном принципе ускорения. Он является разновидностью двухпучкового ускорителя, в котором электронные сгустки ускоряются кильватерными полями, возбуждаемыми в диэлектрической структуре регулярной последовательностью сгустков релятивистских электронов. Кильватерные поля (черенковское излучение), возбуждаемые в диэлектрических структурах последовательностью релятивистских электронных сгустков в ТГц-диапазоне, где отсутствуют мощные источники электромагнитных полей для ускоряющих структур, рассматриваются как перспективные для новых методов ускорения. По темпу ускорения (более 1 ГэВ/м) они занимают промежуточное положение между традиционными методами с металлическими структурами (менее 0,1 ГэВ/м) и плазменными кильватерными (до 100 ГэВ/м). Однако, несмотря на ограничение темпа ускорения из-за пробоя по сравнению с плазменным вариантом, диэлектрическая форсажная секция в будущих коллайдерах имеет преимущество, так как лишена проблем с позитронным кильватерным плечом коллайдера и с ионным коллапсом, неизбежных для плазменной форсажной секции.

Для увеличения амплитуды ускоряющего поля (темпа ускорения) предлагается использовать совместно три подхода:

- "многосгусточную" концепцию [1, 2], заключающуюся в увеличении кильватерного поля благодаря суммированию когерентных кильватерных полей отдельных сгустков последовательности;
- "многомодовую" концепцию [3, 4], заключающуюся в увеличении кильватерного поля благодаря суммированию многих эквидистантных поперечных кильватерных мод, возбуждаемых в диэлектрической структуре прямоугольного сечения;
- "резонаторную" концепцию [5, 6], заключающуюся в увеличении кильватерного поля благодаря использованию резонатора для устранения эффекта групповой скорости [7, 8] так, чтобы энергия возбуждаемого кильватерного поля не покидала диэлектрическую структуру в течение всей последовательности сгустков.

Для решения проблемы инжекции ускоряемых сгустков возбужденными кильватерными полями предусматривается возбуждающие и ускоряемые сгустки получать из одной и той же последовательности сгустков путем введения расстройки между частотой следования сгустков и частотой основной собственной моды структуры.

Для компенсации полей пространственного заряда сгустков и заряженной внутренней поверхности диэлектрика предполагается заполнять пролетный канал плазмой.

2. "МНОГОСГУСТОЧНАЯ" КОНЦЕПЦИЯ

Нами впервые было показано теоретически и экспериментально [1, 2], что регулярная последовательность коротких релятивистских электронных сгустков с умеренным зарядом каждого когерентно возбуждает в диэлектрической структуре кильватерное поле такой же амплитуды, как и один сгусток с эквивалентным суммарным зарядом, при условии, что частота следования сгустков совпадает с частотой основной собственной моды структуры. Кроме того, на этой частоте должно выполняться условие черенковского резонанса – фазовая скорость возбуждаемой волны должна быть равной скорости сгустка.

На Рис.1 приведена суммарная амплитуда возбуждаемого кильватерного поля в зависимости от числа сгустков в последовательности, т.е. от длительности импульса пучка при частоте следования

сгустков $f_{ce} = 2805$ Гц. Видно, что максимальное число сгустков, кильватерные поля которых складываются когерентно, равно $N_{max} = 3000$. Прекращение роста обусловлено не полным совпадением частоты следования сгустков и частоты волны, а также нелинейностью взаимодействия волна-частица для слаборелятивистских сгустков.

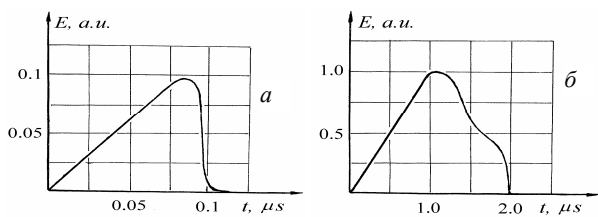


Рис.1. Осциллограммы импульса кильватерного поля ($\lambda = 10$ см), возбужденного последовательностью *a* – $N = 300$ сгустков, *б* – $N = 6000$ сгустков. Частота следования сгустков $f_{ce} = 2805$ Гц

3. "МНОГОМОДОВАЯ" КОНЦЕПЦИЯ

Для цилиндрической геометрии в выражении для возбуждаемого кильватерного поля в [1] содержится суммирование по поперечным модам, однако, анализ суммирования по ним не проведен. Существенное увеличение амплитуды кильватерного поля показано в [3] для плоской геометрии, в которой возбуждаемые моды эквидистантны $\omega_m = (m+1/2)\omega_0$ (ω_0 – частота основной моды). На Рис.2 представлены: схема плоской геометрии диэлектрической структуры (*a*); частоты собственных мод структуры (*б*); спектр спонтанно возбуждаемых мод (*в*); форма суммарного спонтанного кильватерного поля за гауссовым сгустком с зарядом 2 нКл/мм, энергией 30 МэВ, длиной 3,0 мм, прошедшим расстояние 100 см в 2D-волноводе (*г*). Видно, что суммирование возбуждаемых 20 мод с заметной и сравнимой амплитудой (это определяется длиной сгустка) приводит к «пикированию» формы поля (вместо косинусоиды основной моды образуется последовательность знакопеременных пиков) с соответствующим увеличением его амплитуды.

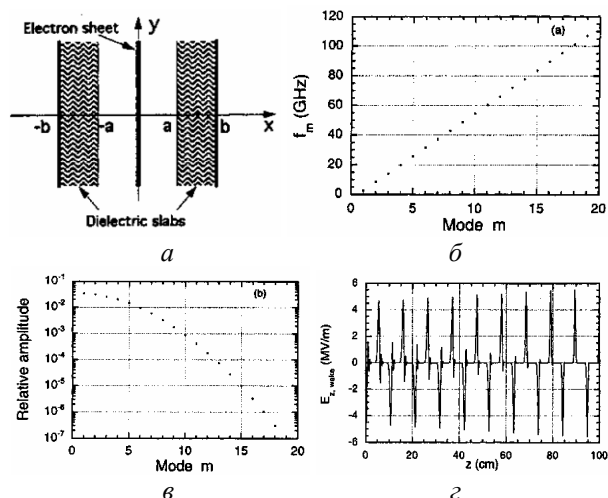


Рис.2

Результат совместного когерентного суммирования возбуждаемых мод всех сгустков последовательности ("многосгусточная" концепция + "многомодовая" концепция) для плоской геометрии пока-

зывает [3], что эффект «пикирования» кильватерного поля сочетается с когерентным суммированием (вынужденное черенковское излучение) полей отдельных сгустков, если частота их следования совпадает с частотой основной моды. На Рис.3,а показан линейный рост амплитуды пиков для 10 влетающих в диэлектрический волновод сгустков с приведенными выше параметрами. В результате «пикирования» амплитуда поднялась до 7 МэВ/м, а для 10 сгустков она увеличилась на порядок, так что тестовый 11-й сгусток, инжектируемый соответственно в ускоряющую фазу с максимальной амплитудой, будет испытывать темп ускорения почти 90 МэВ/м (Рис.3,б).

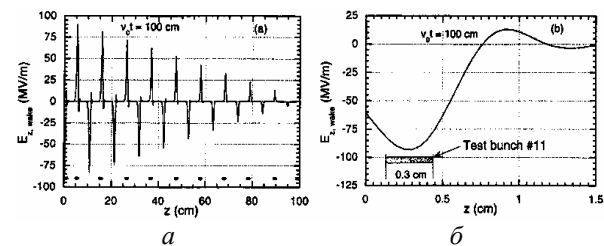


Рис.3

Для металлического волновода прямоугольного сечения с частичным диэлектрическим заполнением [4], например, с 2 диэлектрическими пластинами вдоль узких или вдоль широких сторон, поперечные моды неэквидистантны. Электронные сгустки, инжектируемые в прямоугольную волноводно-диэлектрическую структуру, возбуждают электромагнитное поле, которое может быть представлено в виде суммы LSM- и LSE-волн. Каждое из семейств LSM- и LSE-волн, в свою очередь, состоит из четных и нечетных мод. При инжекции электронных сгустков вдоль оси симметрии системы возбуждаются только нечетные моды, у которых составляющая E_z возбуждаемого поля на оси отлична от нуля. При заданных поперечных размерах металлического волновода с диэлектрическим заполнением фазовый синхронизм возбуждаемой волны и электронных сгустков пучка может быть достигнут изменением толщины диэлектрических пластин.

Для диэлектрических структур, представленных на Рис.4, нами были рассчитаны дисперсионные зависимости $f(k_z)$ для первых десяти нечетных пространственных гармоник LSM-волны (Рис.5).

Как видно из приведенных графиков, расстояния между дисперсионными кривыми в случае структуры 1^{10} типа существенно меньше, чем в случае структуры 2^{10} типа. Поэтому при возбуждении кильватерных полей сгустком конечной длины, определяющей возбуждаемый частотный диапазон, следует ожидать, что в первом случае будет возбуждаться большее количество гармоник и, следовательно, суммарная амплитуда поля должна быть больше. Вторым фактором, определяющим эффективность возбуждения, является коэффициент связи электронного сгустка с возбуждаемыми гармониками, который в структурах 2^{10} типа значительно выше, чем в структурах 1^{10} типа. Кроме того, теоретически рассчитанные частоты возбуждаемых гармоник показывают, что во втором случае возбуждаемые гармоник более эквидистантны, чем в первом.

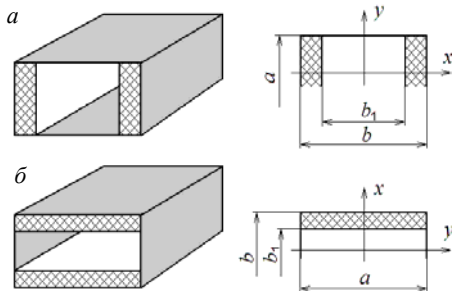


Рис.4. Диэлектрические пластины (а) – вдоль узких ($1^{йй}$ тип); (б) – вдоль широких стенок волновода ($2^{ой}$ тип)

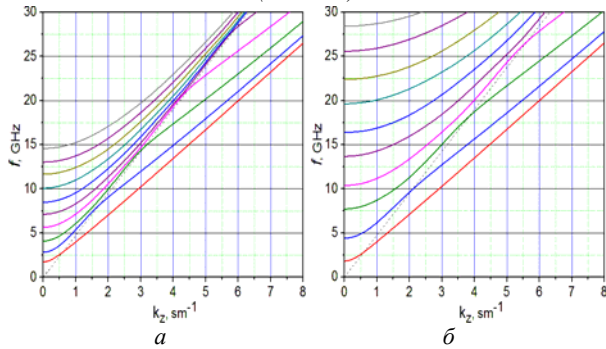


Рис.5. Дисперсионные характеристики прямоугольных волноводно-диэлектрических структур $1^{ой}$ типа (а) и $2^{ой}$ типа (б)

4. "РЕЗОНАТОРНАЯ" КОНЦЕПЦИЯ

Для волноводного случая поле, возбуждаемое инжектируемым на входе в волновод сгустком, состоит из переходного излучения, возникающего на входной границе, черенковского излучения в безграничном волноводе и так называемой волны «гашения» [7, 8] (Рис.6). Суть последнего заключается в том, что возбуждаемое поле выносится по волноводу с групповой скоростью, так что длина цуга черенковского излучения за сгустком определяется разностью фазовой (равной скорости сгустка) и групповой скоростью излучения.

Это приводит к тому, что для последовательности сгустков [9] не все сгустки дают вклад в суммарное поле, так как начиная с номера сгустка $N_{max} = 1 + L/\Delta z (v_0/v_g - 1)$, где L – длина волновода; Δz – расстояние между сгустками; v_0 – скорость сгустков; v_g – групповая скорость кильватерной волны, суммарное поле начинает убывать из-за эффекта групповой скорости.

На Рис.7 это иллюстрируется для многомодового режима: а – поле одного сгустка; б – поле последовательности сгустков. На Рис.7,а видно «пикирование» с увеличением амплитуды кильватерного поля при многомодовом возбуждении. На Рис.7,б показан линейный рост амплитуды кильватерного поля с номером сгустка в результате суммирования кильватерных полей отдельных сгустков вплоть до N_{max} . Инжекция последующих сгустков за линией групповой скорости первого сгустка приводит к уменьшению амплитуды суммарного кильватерного поля.

В резонаторном варианте [5, 6] эта проблема отсутствует, т.е. все сгустки последовательности дают одинаковый вклад в увеличение амплитуды кильватерного поля, растущего пропорционально числу сгустков N_b .

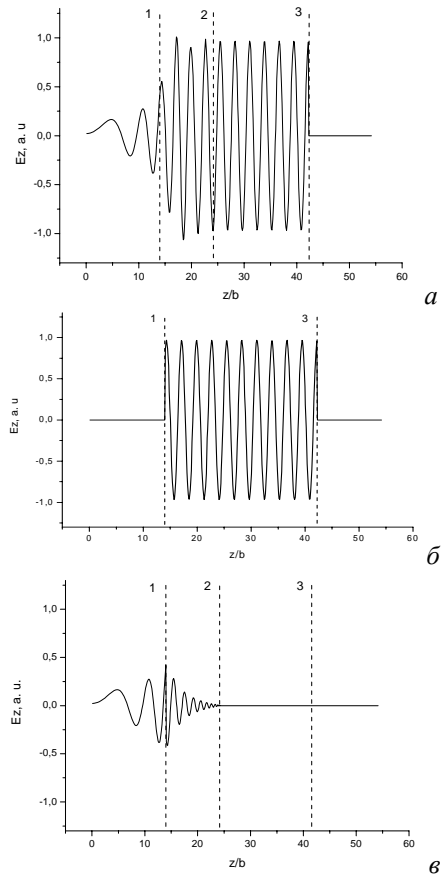


Рис.6. Основная мода кильватерного поля за сгустком в волноводе: а – суммарное излучение; б – черенковское излучение с волной «гашения»; в – переходное излучение. 1 – $z = z_{cp}$; 2 – $z = z_{перед}$; 3 – положение сгустка

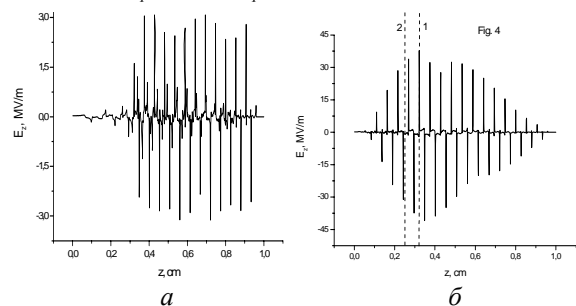


Рис.7. Многомодовое (50 мод) кильватерное поле в волноводе: а – один сгусток; б – последовательность сгустков $N_b > N_{max}$; 1 – $z = z_{Nmax}$; 2 – $z = z_{cp, 1-го сгустка}$

При этом потери энергии сгустка растут с его номером, так что суммарные потери энергии пропорциональны N_b^2 . Для обеспечения суммирования кильватерных (черенковских) полей сгустков, полей поперечных мод и резонаторного режима, т.е. функционирования всех трех концепций, необходимо выполнение резонансных условий, из которых вытекают условия на длину и поперечный размер диэлектрического резонатора. Длина резонатора должна быть кратной числу полуволн основной моды и при длине резонатора

$$L = N\lambda\sqrt{\beta_0^2 \epsilon - 1}, \quad \beta_0 = v_0/c,$$

где N – номер продольной моды, находящейся в черенковском резонансе с пучком, продольные моды с $l = Nm$ автоматически являются эквидистантными,

что обеспечивает пикирование поля и увеличение его амплитуды. Для выполнения условий «многосгусточной» концепции поперечный размер резонатора должен выбираться согласно выражению $a = v_0 / 2f \sqrt{\beta_0^2 \varepsilon - 1}$. Для сгустков с энергией 4 МэВ, частотой следования 2,85 ГГц, $\varepsilon = 2,1$, $N=3$ резонатор должен иметь $L = 15,68$ см и $a = 5,05$ см.

На Рис.8 показаны рассчитанные собственные частоты резонатора с указанными выше параметрами и черенковские частоты сгустка (кружки). Видно, что в черенковском резонансе с пучком находится продольная мода с $N = 3$ (основная собственная) и все моды с $l = Nm$.

Результат возбуждения кильватерного поля в резонаторе при выполнении указанных резонансных условий представлен на Рис. 9. Видно, что для первой порции из 5 сгустков (см. Рис.9,а), пока влияние отраженной волны еще не сказывается, в резонаторе устанавливается такое же продольное распределение поля, как и в случае инжекции в волновод. Затем (см. Рис.9,б – для 101 сгустков, прошедших резонатор) устанавливается одинаковая по длине резонатора картина поля с амплитудой, линейно растущей с числом прошедших сгустков.

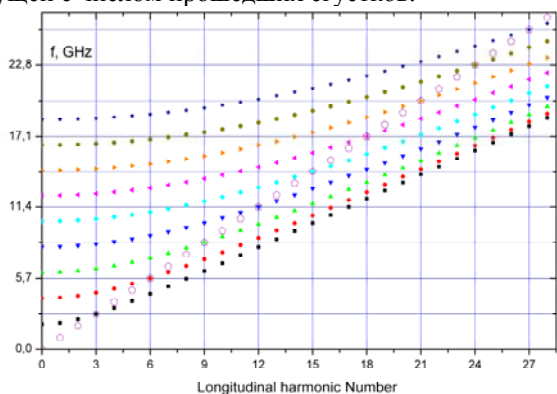


Рис.8. Собственные частоты резонатора с указанными выше параметрами и черенковские частоты сгустка (кружки)

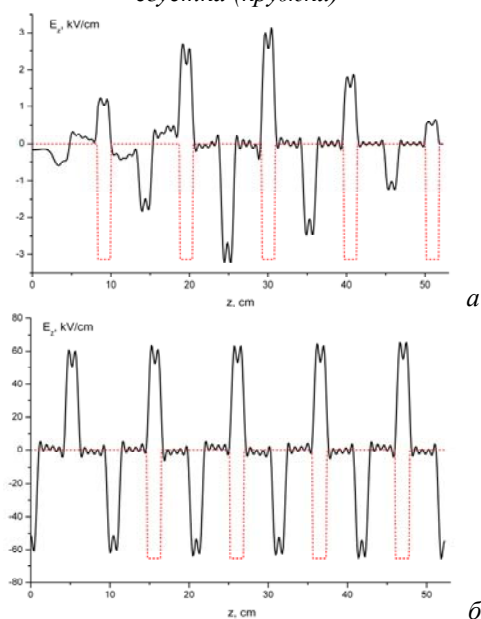


Рис.9. Продольное распределение кильватерного поля в резонаторе: а – 5 сгустков, б – 101 сгусток. Красная линия – положение сгустков

Таким образом, теоретически показана состоятельность применения совместно всех трех концепций для увеличения амплитуды возбуждаемого кильватерного поля.

Отдельной проблемой для повышения темпа ускорения является увеличение коэффициента трансформации.

5. КОНЦЕПЦИЯ ИНЖЕКЦИИ УСКОРЯЕМЫХ СГУСТКОВ

Формирование ускоряемых сгустков обеспечивается расстройкой Δf частоты следования сгустков f_{cs} и частоты основной резонансной собственной моды диэлектрического резонатора f_0 , т.е. $\Delta f = f_{cs} - f_0 \neq 0$. Следовательно, возбуждающие и ускоряемые сгустки получаются из одной и той же последовательности, и отпадает необходимость в отдельном инжекторе ускоряемых сгустков. Следует заметить, что ускоряемые сгустки оказываются в разных фазах ускоряющего поля, что приводит к размытию их энергетического спектра. Для точечных сгустков легко показать, что при расстройке Δf число возбуждающих сгустков равно $N_{max} = (1/4) \times (f_{cs} / \Delta f)$. Следующая порция сгустков окажется в ускоряющих фазах.

6. ПЛАЗМЕННАЯ ТРАНСПОРТИРОВКА СГУСТКОВ В ПРОЛЕТНОМ КАНАЛЕ

При уменьшении поперечных размеров диэлектрической структуры с большим ε возникает проблема прохождения сгустков по узкому пролетному каналу из-за зарядки внутренней поверхности диэлектрика. Для компенсации полей пространственного заряда используется плазма, инжектируемая извне или получаемая ионизацией нейтрального газа самими сгустками.

7. СХЕМА МНОГОСГУСТОЧНОГО КИЛЬВАТЕРНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УСКОРИТЕЛЯ

Схема кильватерного ускорителя, реализующая все три концепции, – «многосгусточную», «многомодовую» и «резонаторную», – для увеличения амплитуды возбуждаемого кильватерного поля, и концепцию формирования ускоряемых сгустков из части последовательности возбуждающих сгустков за счет расстройки частоты следования сгустков и частоты кильватерного поля, представлена на Рис.10.

Сгустки релятивистских электронов, получаемых на линейном резонансном ускорителе электронов «Алмаз-2», инжектируются в диэлектрическую структуру, основным элементом которой является медный прямоугольный волновод внутренним сечением $8,5 \times 18$ см и длиной 75 см, вдоль узких или широких сторон которого располагаются пластины из фторопласта. Толщина диэлектрических пластин составляет 2,19 см для структуры 1¹⁰ типа и 1,67 см для структуры 2¹⁰ типа. Выходной торец волновода был герметично закрыт фторопластовой пластиной толщиной 10 мм, что позволяет создавать в волноводе необходимый вакуум и выводить СВЧ-излучение из диэлектрической структуры для проведения соответствующих измерений. Длина ди-

электрика в обоих случаях равна 53,42 см, что примерно на 25 см меньше длины волновода. Свободный от диэлектрика отрезок волновода используется для отклонения электронного пучка поперечным магнитным полем, чтобы предотвратить его попадание на фторопластовую пластину выходного окна.

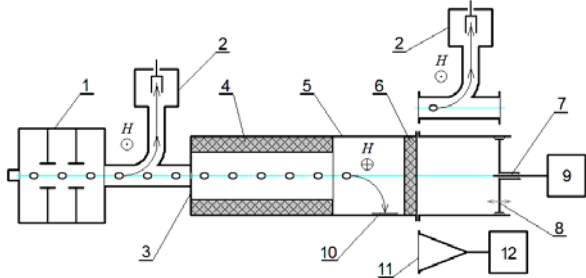


Рис.10. Схема установки: 1 – ускоритель электронов; 2 – магнитные анализаторы; 3 – диафрагма; 4 – диэлектрические пластины; 5 – прямоугольный медный волновод; 6 – фторопластовая заглушка; 7 – СВЧ-зонд; 8 – короткозамыкающий плунжер; 9 – осциллограф; 10 – стеклянная пластина для регистрации энергетического спектра сгустков; 11 – рупорная антенна; 12 – измеритель мощности

Для создания резонаторной системы к выходному торцу волновода присоединяется короткозамкнутый отрезок волновода таких же поперечных размеров. Короткозамыкателем служит подвижный плунжер, в центре которого расположен высокочастотный зонд, регистрирующий E_z -компоненту поля.

Топография продольных и поперечных составляющих СВЧ-полей, возбуждаемых в полуограниченной волноводно-диэлектрической структуре, измеряется с помощью подвижных радиочастотных зондов. Измерения средней мощности СВЧ-излучения проводятся с помощью измерителей мощности МЗ-52 и МЗ-54 в пяти различных частотных диапазонах: (2...4), (2...10), (8...12), (12...17) и (17...25) ГГц.

Потери энергии электронами пучка оцениваются по изменению энергетических спектров релятивистского электронного пучка до и после прохождения им волноводно-диэлектрической структуры, которые измеряются с помощью магнитных анализаторов,

расположенных на выходе ускорителя и на выходе структуры. Для этой же цели используются отпечатки пучка, отклоненного поперечным магнитным полем, на стеклянных пластинах, помещенных внутри волновода вблизи его выходного торца.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. I. Onishchenko, V. Kiselyov, F. Linnik, et al. The wake-field excitation in plasma-dielectric structure by sequence of short bunches of relativistic electrons // *Proc. of the Particle Accelerator Conference*, May 1-5, 1995, Dallas, Texas, USA, p.782-783.
2. V. Kiseljov, A. Linnik, V. Mirny, et al. Dielectric Wake-Field Generator // *Proc. of the 12-th International Conference on High-Power Particle Beams*, Haifa, Israel, June 7-12, 1998, v.2, p.756-759.
3. T.B. Zhang, J.L. Hirshfield, T.C. Marshall, and B. Hafizi // *Phys. Rev. E* 56. 1997, с.4647.
4. T.C. Marshall, N.I. Onishchenko, G.V. Sotnikov. Wake Fields Excitation in a Semi-Infinite Rectangular Dielectric Waveguide by a Train of Electron Bunches // *Advanced Accelerator Concepts, Eleventh Workshop, Stony Brook NY, 21-26 June 2004*; AIP Conference Proceedings №737, p.698-707.
5. T.C. Marshall, J.-M.Fang, J.L. Hirshfield, S.J. Park // *AAC Ninth Workshop, AIP Conf. Proc. №569* (AIP, New York, 2001), p.316.
6. T.C. Marshall, I.N. Onishchenko, G.V. Sotnikov. 3-d analysis of wake field excitation in a dielectric loaded rectangular resonator // *Proc. of 12-th Advanced Accelerator Concepts Workshop, Lake Geneva Wisconsin, 10-15 July 2006*, v.877, p.888-894.
7. I.N. Onishchenko, D.Yu. Sidorenko, G.V. Sotnikov. Structure electromagnetic field excited by an electron bunch in semi-infinite dielectric-filled waveguide // *Phys. Rev. E* 65, 2002, 066501, p.1-11.
8. J.H. Kim, J. Han, V. Yoon, S.Y. Park Theory of wakefields in a dielectric-filled cavity // *Phys. Rev. Special topics – Accelerators and beams* 13, 2010, 071302, p.1-13.
9. N.I. Onishchenko, G.V. Sotnikov // *Problems Atomic Sci. and Tech.* 2004, №4, p.109.

Статья поступила в редакцию 05.10.2011 г.

CONCEPT OF MULTI-BUNCH DIELECTRIC WAKEFIELD ACCELERATOR

I.N. Onishchenko

The scheme of a new type two-beam accelerator is considered that is based on wakefield excitation in the rectangular dielectric resonator by a sequence of relativistic electron bunches for accelerating the sequence tail by means of its displacing into accelerating phase due to the proper detuning of bunch repetition frequency relative to the frequency of principle eigen mode of the resonator.

КОНЦЕПЦІЯ БАГАТОЗГУСТКОВОГО ДІЕЛЕКТРИЧНОГО КІЛЬВАТЕРНОГО ПРИСКОРЮВАЧА

I.M. Onіщенко

Розглядається схема нового типу двухпучкового прискорювача, заснованого на збудженні кільватерного поля в прямокутному діелектричному резонаторі послідовністю релятивістських електронних згустків і прискорення згустків цієї послідовності, які зміщуються в прискорюючу фазу збудженого поля при відповідній розстройці частоти проходження згустків відносно частоти основної власної моди резонатора.