

СВЧ/ТГц структуры и компоненты высокой мощности для применений в физике ускорителей

Разработка нового высокоградиентного метода ускорения пучков заряженных частиц является перспективной задачей современной физики. Настоящая работа посвящена одному из возможных решений этой фундаментальной проблемы – разработке кильватерных ускоряющих структур на основе генерации излучения Вавилова-Черенкова в диэлектрике. Использование недавно полученных СВЧ высокопрочных материалов (микроволновая керамика, кварц и CVD алмаз) позволяет обеспечить рекордные значения ускоряющих полей в подобных структурах (более 100 МВ/м в СВЧ диапазоне и более 1 ГВ/м в ТГц диапазоне). Использование сегнетоэлектрических материалов с нелинейными свойствами и малыми СВЧ потерями потенциально позволяет разработать управляемую ускорительную структуру с возможностью подстройки частоты ускоряющего поля.

Ключевые слова: ускоритель, ускорительная структура, диэлектрик, сегнетоэлектрик

Разработка нового метода ускорения пучков заряженных частиц с темпами ускорения до ГВ/м в диапазоне частот до 1 ТГц является фундаментальной проблемой, и включает в себя как физику ускорителей, так и физику твердого тела, а также и такие новые направления, как терагерцовая оптика и техника соответствующих источников излучения и систем ТГц диагностики.

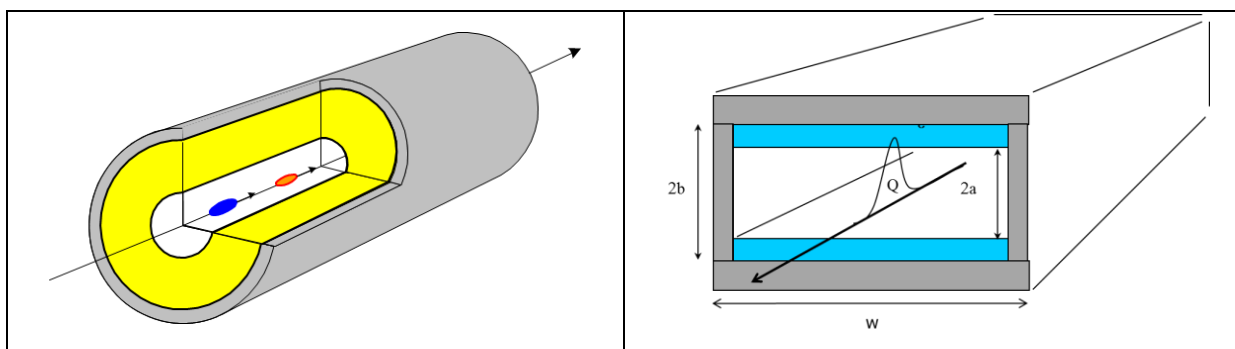


Рисунок 1. Цилиндрическая и прямоугольная структуры с диэлектрическим заполнением и вакуумным каналом вдоль оси для пролета пучка.

Решение проблемы создания ускорительной структуры на принципе кильватерного ускорения необходимо в первую очередь для реализации проектов будущих линейных коллайдеров. Ускоряющие градиенты уровня $> \text{ГВ/м}$ продемонстрированы в различных кильватерных схемах ускорения: в плазменных методах с лазерной накачкой [1] и с ведущим электронным сгустком [2], а также в структурах с диэлектрическим заполнением [3,4]. Предлагаемое использование структур ТГц диапазона на основе алмаза [5-7] (в силу его экстремальных электропрочных и теплопроводящих свойств) позволяет также применить методы кильватерного ускорения для решения проблем создания источников ультракоротких

импульсов рентгеновского излучения с недостижимыми в настоящее время параметрами [8]. Из реализуемых в настоящее время новых методов ускорения и соответствующих технологий, которые уже были продемонстрированы на практике и показали существенные ускоряющие градиенты, следует отметить кильватерные ускорители на структурах с диэлектрическим заполнением из высокопрочного материала (алмаз, кварц и микроволновая керамика), возбуждаемые пучком заряженных частиц (электронов или протонов) [5-8], рис. 1 и рис. 2.

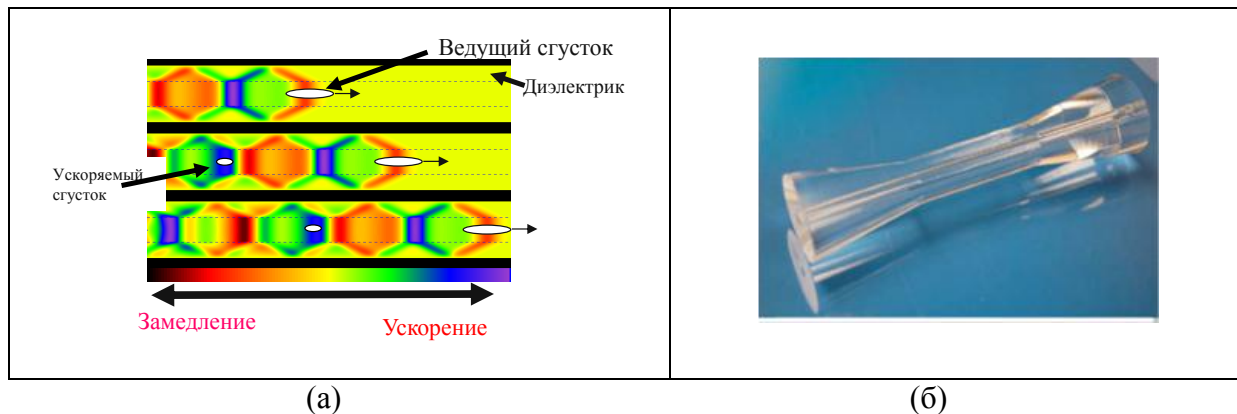


Рисунок 2. (а) Структура продольного (ускоряющего) поля для трех последовательных положений ведущего и ускоряемого полей; заполнение ускоряющей структуры на частоту 11.4 ГГц, выполненное из кварца.

Интерес к задачам генерации излучения Вавилова-Черенкова в структурах с диэлектрическим заполнением связан с целым рядом преимуществ, которые подобные структуры имеют в применении к кильватерным методам ускорения в их сравнении (при коротком импульсе генерации) со структурами, разработанными по стандартной технологии (волновод без заполнения с периодической замедляющей системой на основе диафрагм) [4]. Прежде всего, отметим простоту изготовления структур на основе диэлектрика: в своей основе это просто цилиндрический, диэлектрический волновод (керамический, или же изготовленный из искусственного алмаза или кварца), окруженный, в свою очередь, проводящим металлическим (как правило, медным) волноводом [4-6], рис.1.

Важным достоинством структуры с заполнением является то, что максимальное значение электрического поля СВЧ волны достигается на оси структуры, а не на границе диафрагм, как в традиционных ускорительных секциях. Структура с диэлектрическим заполнением не содержит периодических, резонансных элементов, требующих удовлетворения крайне жестким допускам на геометрию системы. Последнее обстоятельство особенно существенно при разработке и производстве ускорительных структур на частоты 10 - 30 ГГц, например, при проектировании и экспериментальном тестировании металлических структур CLIC в CERN на частоту 12 ГГц [5].

К важным достоинствам структур с заполнением следует также отнести и возможность подавления паразитных, дипольных (HEM₁₁) мод, приводящих к отклонению пучка от оси структуры и, как следствие, к потере или самого генераторного сгустка, или же (при его неполном прохождении структуры) части

электронов. Отметим также, что структуры с заполнением гораздо менее чувствительны к развитию поперечных (VBU) неустойчивостей по сравнению с цельнометаллическими структурами [5,6].

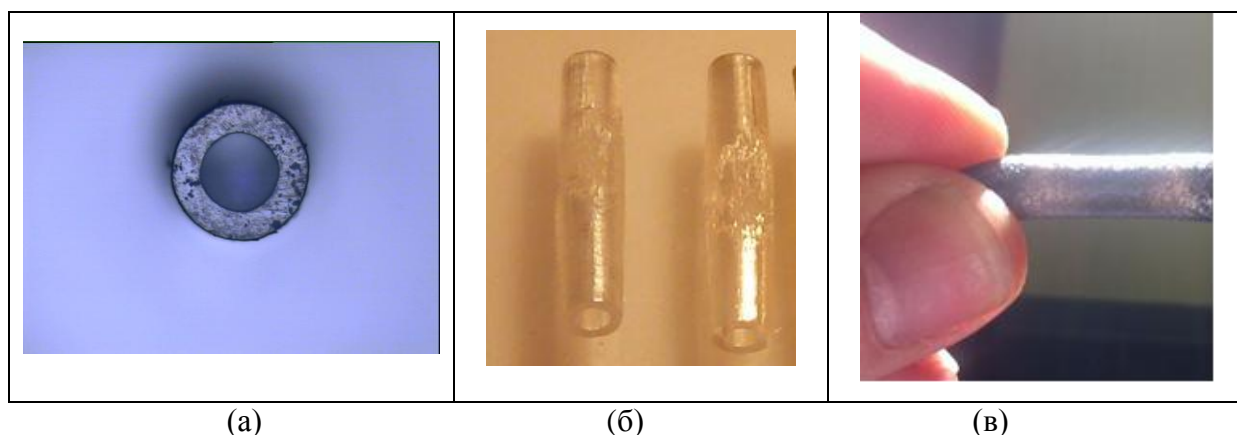


Рисунок 3. Фотографии диэлектрического (алмаз) заполнения кильватерных структур ТГц и Ka-band диапазонов. (а) монокристаллический алмаз, диаметр -755 мкм (б) структуры из монокристалла алмаза в процессе обработки, длина 3.99 мм; (в) структуры на 34 ГГц на основе CVD алмаза оптического качества.

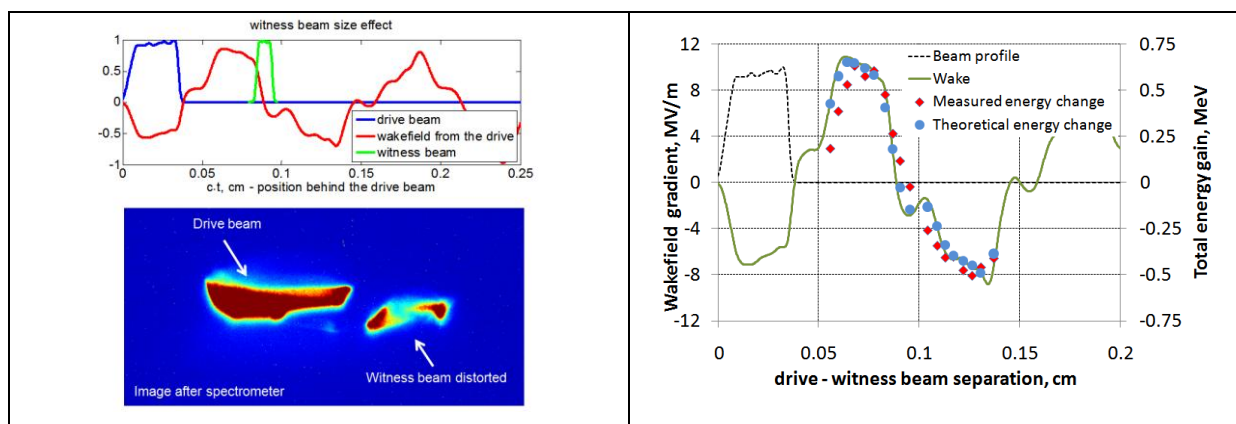
Остановимся на результатах моделирования и разработки прототипов ускоряющих структур с диэлектрическим заполнением и данных экспериментальных исследований указанных структур на пучках высокоэнергетических ускорителей ANL/AWA и BNL/ATF. В последние годы впервые разработана технология и созданы первые образцы кильватерных ускорительных структур на основе алмазного заполнения (как из поликристаллического материала, так и из монокристалла алмаза) [6-8], рис. 3.

На основе разработанного комплекса программ для оптимизации параметров кильватерных ускоряющих структур ТГц и ГГц диапазонов с заполнением из диэлектрика показано, что при генерации излучения Вавилова-Черенкова высокоэнергетическим релятивистским электронным пучком амплитуда импульса продольного кильватерного поля может превышать 1 ГВ/м (при длине импульса <1 нс) [3,5], а в диапазоне частот 10-30 ГГц – 100 МВ/м (при длине импульса <10 нс) [4-6].

В эксперименте впервые продемонстрированы как генерация, так и кильватерное ускорение в ТГц диапазоне в структуре на основе алмаза, причем данные эксперимента показали хорошее совпадение с данными численного моделирования [7], рис. 4. В диапазоне частот 26 ГГц в рамках экспериментального исследования на ускорителе AWA в структурах с алмазным заполнением впервые получены кильватерные ускоряющие поля с амплитудой более 300 МВ/м при длительности импульса поля $\tau \sim 35$ нс, причем эффектов СВЧ пробоя в указанном эксперименте не наблюдалось.

Выполнен аналитический расчет кильватерных полей и оптимизированы параметры структуры при реализации схемы ускорения с высоким коэффициентом трансформации энергии от генераторного высокоэнергетического пучка (и их последовательности) к ускоряемому пучку [9]. Разработана схема проведения подобного эксперимента на основе многосгустковой последовательности с профилированной функцией зарядовой плотности [9]. В рамках пучкового

эксперимента впервые продемонстрирован процесс передачи энергии от генераторной последовательности к ускоряемому сгустку с коэффициентом трансформации $R > 2$, а также для последовательности из двух сгустков с коэффициентом $R = 3.4$, близким к теоретическому пределу $R < 4$ [9].



(a)

(б)

Рисунок 4. (а) Кильватерное поле и позиции генераторного и ускоряемого сгустков.; (б) Данные измерений кильватерного поля и данные моделирования по результатам измерения энергии. Красные точки соответствуют измерениям, синие – расчету.

Предложен новый метод контроля частоты ускоряющей моды кильватерной ускорительной структуры с заполнением на основе использования дополнительного сегнетоэлектрического слоя заполнения структуры, и выполнен аналитический расчет полей в структуре с подобным заполнением [10]. Численный анализ показал возможность корректировки частоты ускоряющего поля в пределах 500-700 МГц в диапазоне частот 12-20 ГГц для TM_{01} ускоряющей моды структуры с заполнением [10].

Разработана и выполнена управляемая ускоряющая структура с дополнительным нелинейным (сегнетоэлектрическим) слоем на частоту 14 ГГц, и осуществлено комплексное экспериментальное исследование параметров указанной структуры в рамках экспериментов на ускорителе АВА [11]. Проведена демонстрация возможности контроля частоты ускоряющей моды кильватерной структуры в пределах 15 МГц/0С при вариации ее температуры в пределах 500С, что соответствует диапазону полупериода (половине длины волны) ускоряющего кильватерного поля. В рамках эксперимента на малой СВЧ мощности показана возможность быстрой ($t \sim 10-100$ нс) коррекции частоты ускоряющей моды структуры за счет параметрического воздействия постоянным электрическим полем на диэлектрическую проницаемость нелинейного слоя заполнения [11].

Композитный сегнетоэлектрический материал [12], разработанный первоначально для реализации управляемой структуры с диэлектрическим заполнением [10-11], нашел свое применение и для ускорительных структур с внешним СВЧ источником питания (без кильватерной генерации). На основе композитного нелинейного материала, состоящего из BST сегнетоэлектрика и Mg-содержащей линейной керамики, были разработаны высокомошнные (100-500 МВт) фазовращатели и тюнеры для систем

управления СВЧ мощностью линейного ускорителя на частотах 1.3 ГГц, 11.4 ГГц и 34.0 ГГц соответственно. Указанные устройства были выполнены в виде прототипов и продемонстрированы экспериментально на СВЧ стенде малой мощности.

В настоящей работе теоретически и экспериментально изучены процессы генерации электромагнитного излучения короткими сильноточными пучками электронов в регулярных волноводных структурах с диэлектрическим заполнением. Данная область исследования является определяющей как для задач генерации излучения Вавилова-Черенкова последовательностями сильноточных электронных сгустков, так и для применений этого излучения в реализации новых методов ускорения пучков заряженных частиц и разработке источников ультракоротких импульсов рентгеновского излучения.

Библиографический список

1. Geddes C. G. R., Toth Cs., Van Tilborg J., Esarey E. et al. High-quality electron beams from a laser wakefield accelerator using plasma-channel guiding . Nature. 2004. V. 431. P. 538-541.
2. Blumenfeld I., Clayton C. E., Decker F.J., Hogan M.J. et al. Energy doubling of 42 GeV electrons in a metre-scale plasma wakefield accelerator // Nature. 2007. V. 445. P. 741.
3. Thompson M.C. et al. Breakdown limits on Gigavolt-per-Meter Dielectric Wakefields. Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100. P. 21.
4. Gai W. Advanced Accelerating Structures and Their Interaction with Electron Beams AIP Conf. Proc. N.Y.. 2009. V.1086. P. 3-11.
5. A. Kanareykin. Cherenkov Radiation and Dielectric Based Accelerating Structures: Wakefield Generation, Power Extraction and Energy Transfer Efficiency. Journal of Physics, Conf.Ser. 2010. v. 236. P. 012032.
6. A.Kanareykin. New Advanced Dielectric Materials for Accelerator Applications // Proc. 14th Advanced Accelerator Concept Workshop AAC'10. AIP Conference Proceedings, N.Y. 2010. V.1299. P.286-291.
7. Antipov S., Jing C., Kanareykin A., Yakimenko V. et al. Experimental demonstration of wakefield effects in a THz planar diamond accelerating structure. 2012. Appl. Phys. Lett. 100, P. 132910.
8. S. Antipov, C. Jing, M. Fedurin, W. Gai, A. Kanareykin, et al. Experimental Observation of Energy Modulation in Electron Beams Passing through Terahertz Dielectric Wakefield Structures, Phys. Rev. Lett. 2012. 108, P. 144801.
9. C. Jing, A. Kanareykin, J. Power, et al. Observation of Enhanced Transformer Ratio in Collinear Wakefield Acceleration. Phys. Rev. Lett. 2007. V.98. P. 144801.
10. А.М.Альтмарк, А.Д.Канарейкин, И.Л.Шейнман. Управляемая кильватерная ускорительная структура с диэлектрическим заполнением // Журнал технической физики. 2005, Т.75. С. 89-98.
11. C. Jing, A. Kanareykin, J. G. Power, M. Conde et al. Experimental Demonstration of Wakefield Acceleration in a Tunable Dielectric Loaded Accelerating Structure. 2011. Phys. Rev. Lett. v.106, P. 164802.
12. A. B. Kozyrev, A.D. Kanareykin, E. A. Nenasheva, et al. Observation of an anomalous correlation between permittivity and tunability of a doped (Ba,Sr)TiO₃ ferroelectric ceramic developed for microwave applications. 2009. Appl. Phys. Lett. 95, P. 012908.