

УДК 621.385.6

ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК МСЭ-ГЕНЕРАТОРА С БРЭГГОВСКИМ РЕЗОНАТОРОМ

*А. В. Елжов^а, Н. С. Гинзбург^б, А. К. Каминский^а, С. В. Кузиков^б,
Н. Ю. Песков^б, Э. А. Перельштейн^а, С. Н. Седых^а,
А. П. Сергеев^а, А. С. Сергеев^б*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия

В ОИЯИ совместно с ИПФ РАН разрабатывается МСЭ-генератор с брэгговским резонатором. На его базе создан СВЧ-стенд для исследования ресурса ускоряющих структур электрон-позитронных коллайдеров. Выходное устройство МСЭ должно обеспечивать сброс электронного пучка, минимизацию отражений СВЧ-волны, устранение пробоев на выходном окне. Большинство требований удастся удовлетворить при использовании длинного сверхразмерного волновода в тракте транспортировки СВЧ-пучка. В этом случае из-за квазипериодического преобразования волнового пучка (эффекта Тальбо) можно пространственно разделить места сброса электронного пучка и вывода излучения из вакуумного объема. Обсуждаются также схемы генераторов субмиллиметрового диапазона и компрессора импульса СВЧ-мощности.

An FEM oscillator with Bragg resonator is developed at JINR jointly with IAP, RAS. A test facility based on the FEM oscillator has been created for investigation of lifetime of accelerating structures of electron-positron colliders. The FEM output system should provide collecting of the electron beam, minimization of wave reflections, elimination of breakdown at the output window. One can manage to meet the majority of these requirements by employing a long oversized waveguide inside the wave beam transport line. Due to quasi-periodic wave beam transformation (Talbot effect) the positions of electron beam collection and the radiation extraction from vacuum volume can be spatially separated. Schemes of submillimeter wave generation and power pulse compressor are discussed as well.

ВВЕДЕНИЕ

Высокоэффективный узкополосный мазер на свободных электронах (МСЭ) может служить источником СВЧ-мощности, пригодным для испытания высокоградиентных ускоряющих структур линейных электрон-позитронных коллайдеров. В ОИЯИ совместно с ИПФ РАН разрабатывается и исследуется МСЭ-генератор с брэгговским резонатором, работающий на частоте 30 ГГц (соответствующей коллайдеру CLIC [1]). На его базе создан СВЧ-стенд и готовится эксперимент [2] по исследованию ресурса материала ускоряющей структуры коллайдера по отношению к импульсному СВЧ-нагреву.

Стенд включает в себя: ускоритель электронов, МСЭ-генератор, тестовый резонатор (ТР), канал транспортировки излучения из МСЭ в ТР, системы контроля параметров электронного пучка и СВЧ-излучения. Канал транспортировки излучения состоит из сверхразмерных волноводов и рупоров, пары зеркал специальной формы, преобразователей МСЭ-пучка в гауссов и обратно и преобразователя типа волны TE_{11} в TE_{01} . Для запитки ТР актуально повышение инжектируемой в него мощности СВЧ-излучения. Для

этого исследуются возможности повышения мощности МСЭ-генератора [3]. Для сокращения потерь мощности необходима, в частности, оптимизация выходного устройства МСЭ. Данной задаче и посвящен следующий раздел.

1. ОПТИМИЗАЦИЯ ВЫВОДА СВЧ-МОЩНОСТИ ИЗ МСЭ

В процессе наладки стенда выяснилось, что основными факторами, ограничивающими величину мощности в тестовом резонаторе, являются отражения от различных участков тракта транспортировки и электрические пробой на вакуумных окнах и зеркалах. Оба эти фактора, в свою очередь, влияют на параметры выходного импульса МСЭ.

Пробой на окнах обусловлены, во-первых, неоднородностью распределения электрического поля в поперечном сечении окна и, во-вторых, сбросом электронного пучка МСЭ-генератора вблизи окна. Для решения комплекса новых проблем выбрана конструкция с существенно удлиненным выходным волноводом МСЭ. Чтобы минимизировать отражения от выходного окна и для решения проблемы пробоев, в численном моделировании и в холодных измерениях была проведена двухпараметрическая оптимизация тракта. При этом в расчетах учитывался эффект эволюции и самовоспроизведения профиля волнового пучка при изменении длины волновода (эффект Тальбо) [4].

В моделировании исследовалась пространственная зависимость фактора свертки — численного показателя совпадения поперечных распределений поля падающей волны в данном участке волновода и на выходе излучающего рупора. Пучок, обладающий в начале гауссовым профилем, представляет собой суперпозицию нескольких собственных мод. Из квазипериодического характера фактора свертки (рис. 1), рассчитанного для волновода, используемого в эксперименте, видно, что начальное поперечное распределение падающей волны воспроизводится на длине ~ 90 см.

В численном моделировании изучался также фактор свертки для отраженной волны. Его величина соответствует доле СВЧ-мощности, отраженной от окна и попавшей обратно в излучающий рупор. Поэтому минимальное отражение от окна назад в генератор и минимальная амплитуда СВЧ-поля на окне могут служить критериями для оптимизации положения окна в волноводе.

Обе расчетные зависимости для длины волновода, близкой к периоду воспроизведения, показаны линиями 1, 2 на рис. 2. Линиями 3, 4 показаны измеренные зависимости коэффициентов прохождения и отражения соответственно, полученные при тех же размерах излучающего рупора и волнопроводов. При измерениях распределения отраженной волны использовалась металлическая отражающая пластина, а излучающий рупор перемещался внутри волновода. Хотя измеренный коэффициент передачи волны и расчетная

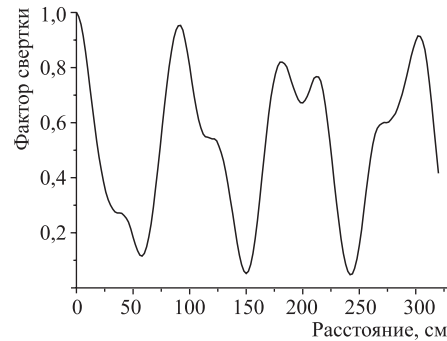


Рис. 1. Преобразование волнового пучка в сверхразмерном волноводе

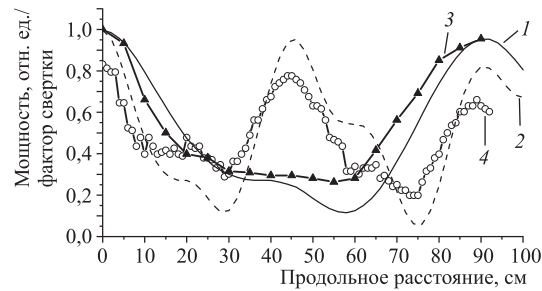


Рис. 2. Расчет и холодные измерения для пространственных зависимостей прямой и отраженной волн в выходном волноводе МСЭ. 1, 2 — расчетные зависимости фактора свертки для прямой и отраженной волн; 3, 4 — измеренные зависимости коэффициентов прохождения и отражения

свертка функций распределения не являются тождественными величинами, видно хорошее соответствие расчетных и экспериментальных зависимостей.

2. ДРУГИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ МСЭ

В настоящее время изучаются несколько схем продвижения МСЭ-установки к большим пиковым мощностям и в субмиллиметровый диапазон длин волн.

На протяжении нескольких лет нами совместно с коллективами других институтов — ИПФ РАН (Нижний Новгород), БГУ (Минск, Белоруссия), Стратсклайдский университет (Глазго, Великобритания) и др. — анализировались различные схемы МСЭ-генераторов, которые позволили бы создать высокоэффективные источники субмиллиметрового диапазона, используя низкоэнергетичные (~ 1 МэВ) пучки электронов. Известна схема, когда для этого используется мощная волна обратной связи из источника миллиметрового излучения, выполняющая роль электромагнитного вигглера. Однако эффективности таких двухступенчатых коротковолновых источников получались весьма низкими, в основном из-за того, что для генерации субмиллиметрового излучения используется электронный пучок с большим энергетическим разбросом. Поскольку в схемах, обсуждаемых в данной работе, в цепи обратной связи генератора миллиметрового диапазона применяется брэгговский резонатор, то появляется возможность пространственно разделить области генерации миллиметровых и субмиллиметровых волн.

Первая схема, основанная на однопроходном усилении с предварительной группировкой на частоте субгармоники, рассматривается и обосновывается в [5]. Во второй схеме используется обратная связь на высокой частоте и, следовательно, не нужна предварительная группировка пучка. Поэтому высокочастотная часть может быть размещена перед низкочастотной (относительно направления распространения пучка). Преимущество этой схемы состоит в том, что пучок не возмущается мощной низкочастотной волной. В высокочастотном резонаторе применяются зеркала, принцип работы которых основан на эффекте Тальбо. Одно зеркало расщепляет волновой пучок на два подобных парциальных пучка и имеет постоянное отражение, близкое к единице. Второе зеркало обеспечивает регулировку фазы одной из двух парциальных отраженных волн и включает два вспомогательных волновода. Коэффициент отражения может регулироваться от 0 до 1

посредством механического смещения отражающей поверхности. Это позволяет оптимизировать добротность резонатора. Существенное удобство в использовании обусловлено тем, что для вывода высокочастотного и низкочастотного излучений применяются разные волноводы.

На основе подобного резонатора можно построить активный компрессор СВЧ-импульсов, представляющий собой перспективный способ существенного повышения пиковой выходной мощности генератора. Вместо передвижного зеркала должны быть установлены разрядные трубки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптимизация выходной системы МСЭ с использованием эффекта Тальбо позволяет уменьшить потери мощности при запитке тестового резонатора. Проанализировано несколько схем МСЭ-генератора субмиллиметрового диапазона и компрессора мощности миллиметровых МСЭ.

Работа поддержана грантами РФФИ №№ 03-02-16530, 02-02-17438.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Delahaye J.-P. et al.* CLIC, a 0.5 to 5 TeV e^\pm Linear Collider // Proc. of EPAC'98, Stockholm, June 1998. P. 58.
2. *Елзов А. В. и др.* Стенд для исследования ресурса имитатора ускоряющей структуры коллайдера CLIC при воздействии мощного импульсного излучения // Докл. на V Науч. семинаре памяти В. П. Саранцева, Дубна, 23–24 сент. 2003 г.
3. *Elzhov A. V. et al.* Possible Ways of Improvement of a FEM Oscillator with Bragg Resonator // Strong Microwaves in Plasmas. Nizhny Novgorod, 2003. V. 1. P. 190.
4. *Denisov G. G., Kuzikov S. V.* Microwave Systems Based on Controllable Interference of Paraxial Wavebeams in Oversized Waveguides // Strong Microwaves in Plasmas. Nizhny Novgorod, 2000. V. 2. P. 960.
5. *Savilov A. V., Peskov N. Yu., Kaminsky A. K.* Submillimeter Moderately-Relativistic Free-Electron Maser // Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 507. P. 162.