

01;09;10

©1994 г.

ФОРМИРОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ С УПРАВЛЕНИЕМ ДВИЖЕНИЯ СПИРАЛЕТРАЕКТОРНЫХ УЛЬТРАРЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ

*Е.Д.Науменко, А.М.Прохоров, М.М.Райнер, А.А.Рухадзе,
М.И.Ситнов, Е.Н.Смирнов, В.Н.Сретенский*

С целью развития принципа трансформации спиралетраекторных ультрарелятивистских электронных потоков, предложенного академиком А.Л.Минцем для создания сильноточных ускорителей электронов высокой энергии, обосновываются предложения по продолжению исследований в данном направлении. В связи с этим предложением приводятся физико-технологические и конструктивные соображения по реализации устройств с сильноточными электронными потоками.

Введение

Управляемость электронных потоков и получение электронных сгустков большого заряда неизбежно связаны с поиском технических средств, определяемых возможности трансформации потоков электронов. Реализация принципа трансформации движения релятивистских электронных потоков была предложена А.Л.Минцем на основе использования оригинального электронноформирующего устройства [1]. В этом устройстве трубчатый поток электронов, пересекая зону пространственного переполюсования постоянного во времени магнитного поля (зону каспа), преобразуется в трубчатый спиралетраекторий. Данный принцип был отправным при поисковых исследованиях и разработке методов формирования электронных сгустков большого заряда с целью создания новых типов мощных генераторов СВЧ и сильноточных ускорителей электронов [2-6]. Одновременно и независимо конструкции электронноформирующих устройств с каспом исследовались в Мэрилендском университете США при создании коллективных ускорителей положительно заряженных частиц (см. ссылки в [2,3,6]).

К сожалению, в нашей стране исследования в рассматриваемом направлении были прекращены после кончины А.Л.Минца в 1974 г. и экспериментальные установки разобраны. В США же в результате этих исследований был разработан новый класс мощных приборов СВЧ, получивших название касптронов [7].

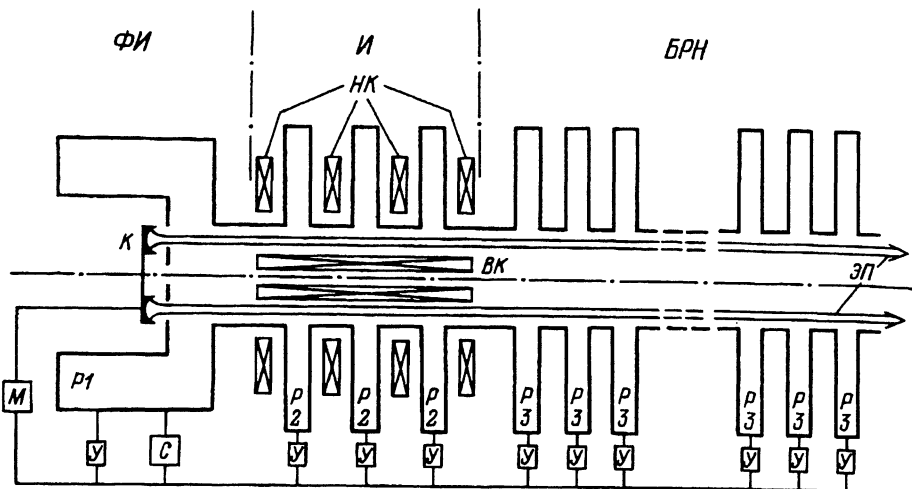


Рис. 1. Структурная схема СТРУМ.

ФИ — форинжектор, И — инжектор, БРН — блок резонаторов накачки, К — катод пушки, P1 — резонатор предварительного ускорения электронов, P2 — резонатор инжектора, P3 — резонатор накачки энергии, М — модулятор пушки (подача инжект-импульсов), С — синхронизатор, У — мощный фазированный усилитель, НК — наружные магнитные катушки, ВК — внутренние магнитные катушки, ЭП — электронный поток.

Авторы настоящей работы считают, что начатые исследования устройств релятивистской электроники на основе спиралевидных траекторий электронов не исчерпали своих больших потенциальных возможностей и полагают необходимым возобновление этих исследований в первую очередь применительно к проблеме создания сильноточных ускорителей.

Ниже за основу при рассмотрении примем схемно-конструктивное решение ускорителя, приведенного на рис. 1. В такой конструкции реализуется упомянутый выше принцип трансформации трубчатого потока электронов в магнитной системе с каспом.

В качестве названия класса обсуждаемого ускорителя введем аббревиатуру СТРУМ — спиралетраекторный резонансный ускоритель Минца (в английской аббревиатуре удобнее пользоваться STREAM — Spiral Trajectories Resonant Electron Accelerator by Minz).

Существенным для СТРУМ является возможность применения электронной пушки Пирса с развитой активной поверхностью кольцеобразного оксиднобариевого подогретого катода. Как показано [8], такие крупногабаритные катоды работают в высоком вакууме при анодном напряжении до 500 кВ (при более высоких напряжениях облако пространственного заряда не защищает катод от ионной бомбардировки) и характеризуются долговечностью порядка тысяч часов при плотности тока эмиссии до 1 А/см^2 . Для экспериментального образца СТРУМ был разработан и изготовлен под руководством Н.А.Иофиса уникальный прессованный оксиднобариевый катод 2. Размеры катода: средний диаметр 40 см, радиальная ширина 2 см, площадь активной поверхности 250 см^2 . При плотности тока эмиссии 400 мА/см^2 средний электронный ток обеспечивается 100 А.

Реализация технических решений, составляющих основу конструкции СТРУМ и рассматриваемых ниже, позволяет значительно (до двух порядков) ослабить ограничения величины электронного тока, связанные с возникновением паразитного самовозбуждения и присущие известным линейным резонансным ускорителям электронов [9].

1. Подавление паразитных автоколебаний в СТРУМ

Автоколебания раскачиваются в системе, состоящей из сгруппированного электронного потока и цепочки связанных ускоряющих резонаторов накачки энергии. Для подавления этих автоколебаний в конструкции СТРУМ предусмотрены два технических решения, устраняющих паразитную обратную связь: первое — максимальное ослабление электромагнитной связи между соседними резонаторами, второе — взаимная расстройка резонаторов на нерабочих видах колебаний при настройке всех резонаторов в резонанс на рабочем виде.

Ослабление электромагнитной связи между соседними резонаторами достигается введением трубок дрейфа, представляющих запердельные волноводы на частоте самовозбуждения. Эффективное подавление паразитной обратной связи достигается также применением индивидуального энергетического питания резонаторов накачки. В традиционных линейных резонансных ускорителях устанавливаются секции, состоящие из связанных резонаторов, и энергия вводится в один из них. В СТРУМ предусмотрено (рис. 1) подключение к каждому резонатору отдельного фазированного мощного усилителя. Конструктивно это усилительный триод с фазированным входным сигналом, электроды которого введены в полость резонатора накачки энергии.

СТРУМ предназначается для работы в режиме большой величины мощности, поэтому КПД установки и, следовательно, КПД блока резонаторов накачки энергии должны иметь высокие значения. Анализ физических процессов приводит к следующим техническим решениям. Зоны ускорения электронов располагаются в рабочих зазорах резонаторов, в промежутках между зазорами поле слабое. Поэтому пролетная длительность электронных сгустков должна быть относительно малой, например составлять одну десятую периода колебаний резонатора. Промежутки между сгустками должны быть свободными от электронного фона. Высокая степень дискретности электронного потока на участке блока резонаторов накачки может быть создана лишь при условии дискретизации потока в пушке форинжектора. Форинжектор традиционного ускорителя формирует в течение импульса однородный поток. Форинжектор СТРУМ должен формировать дуг электронных сгустков — “заготовок” сгустков на участке накачки. Анодное напряжение электронной пушки форинжектора должно иметь форму пачки коротких ивжект-импульсов. Для обеспечения высокого значения КПД резонатора накачки помимо режима пролета, характеризуемого попаданием электронных сгустков в фазы сильного ускоряющего поля в рабочем зазоре, требуется выполнение еще одного условия: отбираемая электронами энергия должна существенно превышать энергию потерь в стенках резонатора. С другой стороны, отношение приращения энергии электронного сгустка к запасу реактивной энергии, накапливаемой в электромагнитном поле резонатора, должно быть ограниченным, в противном случае тыловые электроны сгустка будут ускоряться слабее фронтальных, и это обстоятельство

в совокупности с действием расталкивающих сил вызовет размывание сгустков.

Ослабление электромагнитной связи между резонаторами может оказаться недостаточной мерой для срыва паразитного самовозбуждения, особенно на высших видах колебаний резонаторов с поперечным направлением линий электрического поля [9]. Поэтому, как указывалось выше, в СТРУМ предусматривается еще и расстройка резонаторов накачки для высших видов колебаний. С этой целью необходимо варьировать геометрические размеры от резонатора к резонатору и вводить в резонаторы подстроечные элементы для настройки в резонанс на рабочем виде колебаний.

2. Форинжектор

Форинжектор состоит из кольцевой пушки Пирса и резонатора $P1$ (рис. 1). На участке форинжектора магнитное поле отсутствует. Для выбранной конструкции в пушке устанавливается описанный выше катод K . Первееанс такой пушки может достигать значений $50 \text{ мкА/В}^{3/2}$. Выберем с запасом величину $25 \text{ мкА/В}^{3/2}$ и анодное напряжение 300 кВ . В этом случае ток составит 4 кА , активное сопротивление 750 м , емкость 20 пФ , постоянная времени 1.5 нс , плотность тока эмиссии 16 А/см^2 . Такая плотность тока в инжект-импульсе наносекундной длительности не сокращает долговечность катода. Учитывая постоянную времени пушки и потребности минимальной длительности инжект-импульсов, зададим значение длительности инжект импульсов 10 нс . В этом случае заряд инжект-импульса составит $4 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$, средний ток 100 А и частота следования 2.5 МГц . Поскольку электроны в последующем приобретают многократные ускорения, то к форме инжект-импульсов анодного напряжения пушки серьезные требования не предъявляются.

Инжект-модулятор не принадлежит к числу стандартных источников питания, его конструктивные особенности рассматриваются в разделе 5. Поскольку энергия электронов не выходе пушки составля-

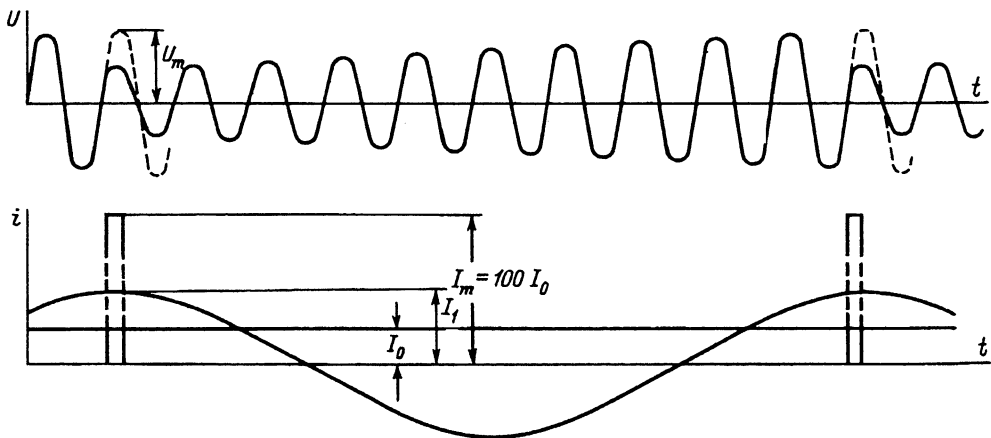


Рис. 2. Графики напряжения на зазоре резонатора $P1$ и электричного тока (инжект-импульсы и первая гармоника тока).

ет 300 кэВ, а на выходе инжектора требуется энергия порядка единиц МэВ, то дополнительное ускорение осуществляется с помощью резонатора $P1$ (рис. 1).

Рабочая частота резонатора $P1$ выбирается равной 25 МГц, превышая частоту следования инжект-импульсов в 10 раз. На рис. 2 приведен график напряжения на рабочем зазоре резонатора $P1$ [10]. При пролете инжект-сгустка электронов напряжение на зазоре снижается скачком. Интервал между пролетом сгустков составляет 10 периодов, в течение которых усилитель энергетического питания резонатора $P1$ увеличивает амплитуду напряжения на зазоре до исходного значения. На графике изображена 1-я гармоника электронного тока, частота которой в 10 раз ниже частоты колебаний резонатора. Заметное снижение амплитуды колебаний в результате пролета электронного сгустка удовлетворяет условию достижения высокого КПД резонатора и также положительно сказывается на устойчивости ускорителя.

3. Инжектор

Длительность инжект-импульсов 10 нс для кольцевой пушки с заданными параметрами и размерами является минимально достижимой. Для форинжектора такие пролетная длительность и геометрическая длина являются удовлетворительными, а на участок накачки энергии необходимо подавать более короткие в пространстве и времени сгустки. Далее будет показано, что требуемое значение пролетной длительности имеет порядок 2 нс. При этом осевая длина должна составлять 60 см. Трубочатые электронные образования с соизмеримой длиной и диаметром будем называть РЭКС — релятивистские электронные кольцеобразные сгустки.

Осевую пространственно-временную компрессию электронного сгустка можно получить с помощью клистронного группирования. Рассмотрим основные соотношения для трубчатого релятивистского потока в цилиндрических координатах. Релятивистский фактор по определению равен

$$\gamma = 1 + \frac{eU_0}{m_0c^2} = (1 - \beta^2)^{-1/2},$$

где eU_0 , m_0c^2 — кинетическая энергия потока электронов, c — скорость света, β_c — скорость электрона. Если траектории электронов параллельны оси z , то $\beta_\rho = 0$ и $\beta_\varphi = 0$, а

$$\beta_z = \beta = (1 - \gamma^{-2})^{1/2}. \quad (1)$$

Электрическое поле в рабочем зазоре клистронного группирователя моделирует энергию электрона по закону $\gamma = \gamma_0(1 + m_\gamma \cos \omega t)$, которая приводит к модуляции по скорости $\beta_z = \beta_{z0}(1 + m_\beta \cos \omega t)$. В ультрарелятивистском случае, когда $eU_0 > 5$ МэВ, m_γ будет $< 1/10$ и в соответствии с формулой (1) представляет ничтожно малую величину — это известный эффект практического отсутствия клистронного группирования прямотраекторного ультрарелятивистского потока электронов.

В работах [3,5] предложено формировать РЭКС из отрезков прямо-траекторного потока, перестраиваемого в спиралетраекторный. Этот прием настолько важен, что термин "спиралетраекторный" введен в название ускорителя. Покажем, что спиралетраекторные потоки эффективно группируются при произвольно высоких значениях энергии электронов в ускорителе СТРУМ. В зоне форинжектора магнитного поля нет и первичные инжект-сгустки имеют форму прямо-траекторных электронных трубок. Магнитная система инжектора составлена из двух серий коаксиально расположенных катушек, наружных по отношению к электронному потоку НК и внутренних ВК. Двойная система катушек необходима для того, чтобы вращение электронов было осецентричным. Из условия равновесного вращения электронов следует соотношение

$$RB_0 = \left(c / \frac{e}{m_0} \right) \gamma \beta_\varphi, \quad (2)$$

где B_0 — значение магнитной индукции на радиусе вращения R .

Запишем выражение закона сохранения обобщенного момента импульса движения электрона, совершающего осецентричное вращение $\beta_\rho = 0$ в осесимметричном магнитном поле,

$$\gamma m_0 \beta_\varphi c 2\pi R - e \Phi_0 = 0, \quad (3)$$

где Φ_0 — магнитный поток, охватываемый вращающимся электроном.

В правой части стоит нуль, поскольку в зоне пушки $\beta_\varphi = 0$ и $\Phi_0 = 0$.

Сопоставление (2) и (3) позволяет получить бетатронное условие Видероэ

$$\Phi_0 = 2\pi R^2 B_0. \quad (4)$$

Для удовлетворения этого условия служат внутренние катушки, которые создают дополнительный магнитный поток. Ток в наружных катушках должен быть подобран так, чтобы радиус вращения электронов имел бы заданную величину. Ток во внутренних катушках должен обеспечивать выполнение условия (4) на всем протяжении инжектора. На выходе инжектора РЭКС покидают магнитное поле и траектории электронов становятся параллельными оси.

Рассмотрим случай постоянного вдоль оси z магнитного поля. Поскольку в рабочем зазоре группирователя инжектора $P2$ (рис. 1) линии электрического поля параллельны оси и электрическое поле не влияет на вращение электронов, то тангенциальная составляющая механической части обобщенного импульса вращения электрона сохраняется постоянной

$$\gamma \beta_\varphi = C, \quad (5)$$

где C — константа, определяемая предыдущим движением электрона.

Из этого выражения следует

$$\beta_z = \left(1 - \frac{\gamma_{\text{stop}}^2}{\gamma^2} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

где $\gamma_{\text{stop}}^2 = C^2 + 1$.

В зазоре группирователя изменяется величина γ . Из (6) следует, что с ростом γ β_z увеличивается, а при уменьшении γ до значения γ_{stop} β_z обращается в нуль. При дальнейшем уменьшении γ электрон отражается в магнитном зеркале. Формулы (1) и (6) аналогичны, но имеют различия. В случае прямолинейных траекторий изменение β_z происходит в результате изменения абсолютной величины β , которая при энергии электронов, превосходящей 5 МэВ, составляет 0.995. В случае спиральных траекторий изменение абсолютного значения скорости β роли не играет. Модуляция β_z определяется изменением отношения β_φ/β_z , т.е. изменением угла подъема спирали.

Структура формулы (6) свидетельствует о том, что модуляция осевой скорости спиралетраекторного электрона совпадает с модуляцией скорости условной гиперчастицы, летящей параллельно оси. Энергия и заряд гиперчастицы равны энергии и заряду электронов, а масса составляет $\gamma_{\text{stop}} m_0$ (не совпадает с реальной массой электрона γm_0). Поэтому метод модуляции спиралетраекторного электронного потока получил название "гиперклисторный" [11]. Формула (6) показывает, что в гиперклистроне глубина модуляции β_z может достигнуть любых значений при сколь угодно высоких значениях энергии электрона. С ростом энергии электронов эффективность группирования спиралетраекторного потока возрастает, поскольку магнитодинамическое притяжение электронов, движущихся по соседним виткам спирали, частично компенсирует осевое кулоновское расталкивание.

Из форинжектора в инжектор вводятся трубчатые электронные образования с пролетной длительностью 10 нс. Эти образования проходят зону каспа магнитного поля, в результате уменьшения осевой составляющей скорости длина сгустка сокращается, но пролетная длительность сохраняет прежнее значение. Под действием механизма гиперклисторного группирования к выходу инжектора пролетная длительность должна быть сокращена до 2 нс. Численные примеры расчетов гиперклисторной осевой компрессии спиралетраекторного РЭКС большого заряда показывают реальность такого преобразования [3,5]. В блок резисторов накачки поступают прямотраекторные РЭКС длиной 60 см.

При работе с трубчатыми спиралетраекторными релятивистскими потоками необходимо вести борьбу с азимутальным группированием электронов, создающим электромагнитные излучения на частоте циклотронного обращения электронов и ее гармониках. Причиной является неустойчивость "отрицательной массы", обусловленная зависимостью циклотронной частоты от энергии электронов. С ростом уровня энергии производная этой функции увеличивается и разброс спектра энергии электронов приводит к возрастающему разбросу значений частот вращения. Эксперименты свидетельствуют, что при энергии порядка 5 МэВ внесение разброса в энергию электронов подавляет нежелательные явления [12].

4. Блок резонаторов накачки энергии

Блок содержит цепочку цилиндрических резонаторов, в которых возбуждены колебания вида E_{010} , разделенных трубками дрейфа. Постоянного магнитного поля на этом участке нет. Энергетическое питание поступает от цепочки мощных фазированных усилителей. Из

инжектора в блок накачки поступает РЭКС с такими параметрами: заряд $4 \cdot 10^{-5}$ Кл, частота следования 2,5 МГц, радиус 20 см, осевая длина 60 см, пролетная длительность 2 нс. Размеры, конструкцию и электрический режим резонатора, как и ранее, будем иллюстрировать численными значениями параметров. Пусть резонатор накачки создаст приращение энергии 1 МэВ на электрон. Для этого амплитуда напряжения на рабочем зазоре должна несколько превышать 1 МВ, осевая протяженность рабочего зазора и осевая высота цилиндрического резонатора могут иметь размер 10 см. Радиус резонатора при частоте настройки 50 МГц составляет 2,3 м. Значение частоты 50 МГц удовлетворяет следующим условиям: 1) частота колебания должна находиться с частотой посылок РЭКС в целочисленном отношении; 2) радиус пролетных отверстий в стенках резонаторов должен быть малым по отношению к длине волны колебаний; 3) отношение пролетной длительности РЭКС к периоду колебаний должно быть малым; 4) массогабаритные показатели резонатора накачки должны быть умеренными; 5) отношение энергии, отбираемой при пролете РЭКС, к энергии, запасенной в поле резонатора, не должно быть излишне большим; 6) то же отношение не должно быть излишне малым с точки зрения КПД резонатора. Условие 1 выполняется: РЭКС следует с интервалом 20 периодов колебаний при одной и той же фазе. Условие 2 выполняется: отношение радиуса пролетного отверстия к длине волны равно 1/30. Выполнение условий 3 и 5 ведет к выбору более низких частот, условий 4 и 6 — более высоких. Компромисс условий 3,5 и 4,6 достигается.

Поскольку на участке резонаторов накачки магнитное поле отсутствует, то силы коллективного электрического поля электронов беспрепятственно увеличивают диаметр РЭКС. Однако при ультрарелятивистских уровнях энергии электронов существует механизм ограничения роста радиальных размеров, который заключается в следующем. Силы электрического поля создают радиальные ускорения электронов, направленные на внешние поверхности РЭКС от оси, что и обуславливает нежелательный эффект. В то же время ускорение РЭКС осевым полем каждого из резонаторов накачки приводит к ступенчатому увеличению релятивистской массы электронов. Радиальная составляющая импульса электрона сохраняется постоянной, и рост релятивистской массы сопровождается уменьшением радиальной скорости электрона. Это ограничивает поперечный разлет РЭКС.

Силы электрического поля электронов увеличивают осевую длину РЭКС. Это нежелательное явление подвергается ограничению в ультрарелятивистской области энергии электронов. Ограничивающий эффект заключается в следующем. Фронтальные электроны РЭКС получают ускорение в направлении движения, но приращение скорости β_z в соответствии с (1) оказывается ничтожным. Тыловые электроны РЭКС под действием сил расталкивания уменьшают скорость в лабораторной системе координат и могут терять релятивизм [13]. Уменьшение скорости необходимо предотвратить путем соответствующего выбора фазы напряжения в рабочем зазоре резонатора накачки. РЭКС должен поступать в резонатор накачки при возрастающем ускоряющем напряжении в зазоре. После вылета сгустка из ускорителя угол поперечного разлета электронов не будет превышать $1/\gamma$ рад [14].

5. Модулятор пушки

Модулятор пушки должен генерировать инжект-импульсы с параметрами: длительность пачки порядка единиц мс, длительность импульса 10 нс, длительность паузы 390 нс, частота посылок 2.5 МГц, напряжение 400 кВ (анодное напряжение 33 кВ плюс падение напряжения на ключевом приборе модулятора), ток 4 кА. Типовых генераторов импульсов с такими параметрами нет, поэтому необходимо показать вариант реализации подобного устройства, обеспечивающий необходимый режим функционирования форинжектора СТРУМ. Высокая частота посылок инжект-импульсов исключает использование ионных ключевых приборов. Остановимся на применении группы включенных параллельно вакуумных модуляторных приборов. Подходящих серийных приборов нет, но разработка их не является затруднительной.

При длительности импульса 10 нс использование схемы с частичным разрядом емкости вызывает сложности с формированием управляющих импульсов. Поэтому целесообразно использовать накопитель в виде отрезка коаксиальной линии. В этом случае важно синхронизировать фронты управляющих импульсов на сетках триодов, а длительность импульсов может превосходить 10 нс. Волновое сопротивление отрезка накопительной линии должно быть равным 100 Ом, длина отрезка 3 м. Структурная схема модулятора представлена на рис. 3. Анод пушки находится под потенциалом корпуса установки. Катод пушки 2 подключается к катодному электроду накопительной коаксиальной линии 3 через группу ключевых триодов 5. Триоды расположены по окружности, диаметр которой совпадает с диаметром катода 40 см. В запертом состоянии триоды должны выдерживать рабочее напряжение 400 кВ. В открытом состоянии при импульсном токе 400 А на ключе падает напряжение 100 кВ, т.е. КПД разряда линии составляет 75%. Внешний электрод коаксиальной линии 4 заряжается до потенциала 400 кВ. Анод пушки 1 имеет кольцевую щель. Для

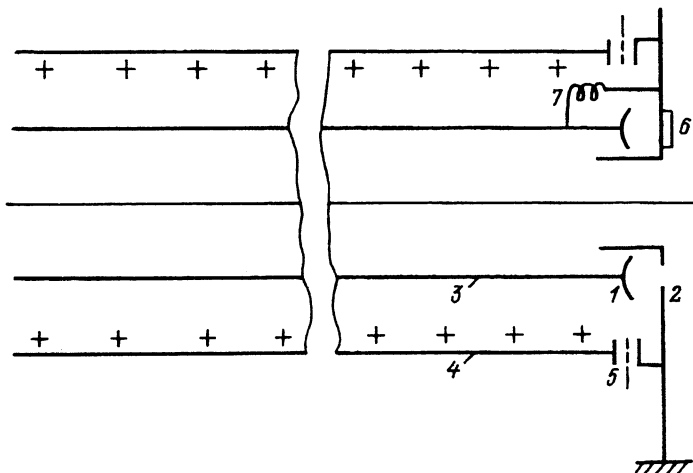


Рис. 3. Структурная схема модулятора пушки (генератор инжект-импульсов).

Цепи заряда не показаны. 1 — катод, 2 — анод; 3 — катодный электрод накопителя энергии; 4 — заряжаемый электрод; 5 — один из группы ключевых триодов; 6 — перемычка анода для экранирования от электронной бомбардировки; 7 — дроссель, выравнивающий потенциалы катода и анода в интервалах между импульсами.

того чтобы потенциалы по обе стороны щели были равными, предусмотрены перемычки 6. Для защиты этих перемычек от электронной бомбардировки необходимо предусмотреть экраны, соединенные с катодом. Небольшие разрывы стенок трубчатого электронного потока должны затягиваться.

6. Области возможного применения СТРУМ

Сравнение проектируемых параметров СТРУМ с параметрами современных мощных сильноточных ускорителей электронов свидетельствует о том, что по энергии импульса СТРУМ (10 МДж) наиболее близок к ускорителю "Аврора" (15 МэВ, 1.5 МА, 120 нс). Это определяет наиболее актуальную область применения СТРУМ в будущем — мощное генерирование потока тормозного гамма-излучения.

При большой мощности электронного потока гамма-конвертор испытывает значительные ударные тепловые и механические нагрузки. Опыт эксплуатации ускорителя "Аврора" [15] указывает на частый выход из строя гамма-конвертора, выполненного в виде пластин из тантала. В качестве причины отказов указывается ударный нагрев. Механическими силами пренебрегаем. Между тем пондеромоторные силы электромагнитных полей между катодом и анодом диодной пушки ускорителя имеют заметную величину. Суммарная энергия электронов одной посылки составляет 2.7 МДж, суммарный механический импульс $9 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. Отсюда сила будет составлять $7 \cdot 10^4 \text{ Н}$, или 7 тонн-сил.

В проектируемом СТРУМ сила много меньше, поскольку импульс растянут во времени и составляет около 30 Н. Однако тепловой режим в СТРУМ много тяжелее, хотя площадь электронной бомбардировки и больше. Поэтому предлагается выполнить гамма-конвертор в виде слоя жидкой ртути, заключенного между бериллиевыми пластинами. Ртуть необходимо прокачивать через охлаждающий теплообменник.

Вариант конструкции СТРУМ, схема которого приведена на рис. 1, не содержит магнитных катушек на финальном участке движения электронов. Поток ускорения электронов, движущихся в свободном от полей пространстве, можно ввести в систему развертки, подобную системе развертки телевизионной трубки. Сканирование гамма-конвертора падающим на него электронным потоком наряду с существенным облегчением режима мишени позволяет осуществлять механическое сканирование некоторого сектора пространства гамма-поток, ось которого совпадает с осью падающего потока электронов. При этом генерируемое гамма-излучение является некогерентным.

Формируемый на выходе СТРУМ электронный поток может быть использован для мощного генерирования когерентных колебаний диапазонов СВЧ, субмиллиметрового и оптического.

Рассмотрим процесс накачки энергии в лазере на свободных электронах (ЛСЭ) оптического диапазона. Поскольку сгустки электронов на выходе СТРУМ имеют форму коротких полых цилиндров, то и "сгустки" оптического излучения должны иметь такую же форму и совпадающие радиальные размеры. Конструкция вигглера может быть выполнена в виде набора постоянных магнитов, образующих знакопеременное поле с радиальными линиями, пересекающими стенки электронных трубок. Оптический резонатор должен быть образован двумя конфокальными зеркалами, каждое из которых имеет форму кольцеобразного желоба. Требуется строгое совпадение размеров и совмещение в пространстве сгустков электронов и фотонов оптического

излучения. Поэтому на участке открытого оптического резонатора должно присутствовать осевое фокусирующее постоянное магнитное поле (траектории электронов прямолинейны). Система магнитных катушек должна отличаться от представленной на рис. 1. Магнитное поле должно присутствовать также и на участке форинжектора. На участке инжектора не требуется размещения внутренних магнитных катушек. Преобразования прямолинейных траекторий в спиральные и снова в прямолинейные должны быть обеспечены изменением направления магнитного поля. На входе и выходе инжектора должны располагаться каспы.

Использование СТРУМ для накачки ЛСЭ по отношению к традиционным ускорителям с тонким цилиндрическим электронным потоком будет обладать двумя достоинствами. Во-первых, использование метода осевой гиперклистронной компрессии электронных сгустков позволит достичь пролетной длительности, измеряемой пикосекундами. Во-вторых, создавая в зонах зеркал оптического резонатора участки спиралетраекторного потока и уменьшая непосредственно у зеркал осевое магнитное поле, можно будет без обычно применяемых квадрупольных магнитных линз надежно обводить электроны вокруг зеркал.

Заключение

Реализация совокупности технических решений, относящихся к конструкции СТРУМ и методам управления движения электронов, открывает перспективы одновременного достижения высоких значений следующих важнейших выходных параметров ускорителя: силы электронного тока, усредненного в импульсе миллисекундной длительности, энергии электронов, КПД, долговечности, наработки на отказ.

Предотвращение раскачки паразитных автоколебаний осуществляется в СТРУМ следующими мерами: высокой степенью дискретизации электронного потока, исключением связи между соседними резонаторами при подаче энергетического питания в каждый резонатор от индивидуального фазированного мощного усилителя, расстройкой резонаторов накачки энергии на частотах высших видов колебаний. Высокая степень дискретизации потока достигается формированием релятивистских электронных кольцеобразных сгустков малой пролетной длительности большого заряда методом осевой гиперклистронной компрессии отрезков спиралетраекторного потока.

Использование электронных потоков с параметрами, которые может обеспечить СТРУМ, многообразно. Выше указаны две области возможного применения СТРУМ. Во-первых, генерирование мощных потоков гамма-излучения с немеханическим сканированием некоторого сектора пространства. Во-вторых, генерирование мощных потоков СВЧ субмиллиметрового и оптического излучения.

Спиралетраекторные потоки электронов нашли широкое применение в усилительных и генераторных приборах гиротронного типа, в частности в касптронах [7], в электронных потоках которых превалирует азимутальное группирование электронов. В электронном потоке СТРУМ важную роль играет осевое гиперклистронное группирование. Ожидается, что развитие техники СТРУМ побудит создание усилительных и генераторных ультрарелятивистских спиралетраекторных клистронов диапазона СВЧ.

Авторы выражают глубокую признательность М.Л.Левину и Р.М.Воронкову за помощь при решении теоретических и технологических задач, связанных с проблемой СТРУМ, а также Л.Л.Гольдину за ценные критические замечания, которые были учтены при подготовке данной работы.

Список литературы

- [1] Минц А.Л., Науменко Е.Д., Стеслицкая И.А. и др. А.С. № 299042. БИ. 1971. № 29. 230 с.
- [2] Минц А.Л., Науменко Е.Д., Райнер М.М. и др. Отчет № 1142 Радиотехнического института им.А.Л.Минца. 1971.
- [3] Минц А.Л., Левин М.А., Науменко Е.Д. // ДАН СССР. 1972. Т. 204. № 4. С. 840.
- [4] Минц А.Л., Левин М.А., Науменко Е.Д., Филимонова Т.Н. // ДАН СССР. 1973. Т. 211. № 5. С. 1085-1088.
- [5] Минц А.Л., Левин М.А., Науменко Е.Д., Филимонова Т.Н. // РиЭ. 1975. Т. 20. № 12. С. 2524-2538.
- [6] Девятков Н.Д., Науменко Е.Д., Пролейко В.М., Сретенский В.Н. // РиЭ. 1985. Т. 30. № 1. С. 185-197.
- [7] Голеницкий И.И., Еремка В.Д., Сазонов В.П. // Обзоры по электронной технике. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1988. Вып. 14(1401). С. 88-98.
- [8] Starpans S. // Proc. IEEE. 1973. Vol. 61. N 3. P. 299-317.
- [9] Бурштейн Э.Л., Воскресенский Г.В. Линейные ускорители электрнов с интенсивными пучками. М.: Атомиздат, 1970.
- [10] Девятков Н.Д., Науменко Е.Д., Пролейко В.М. и др. // ДАН СССР. 1980. Т. 255. № 6. С. 1370-1373.
- [11] Девятков Н.Д., Науменко Е.Д., Сретенский В.Н., Филимонова Т.Н. // РиЭ. 1984. Т. 29. № 7. С. 1401-1415.
- [12] Destler W.W., Hudgins D.W., Kehs R.A. et al. // Trans. IEEE. 1975. Vol. NS-22. N 3. P. 995-1011.
- [13] Науменко Е.Д., Сретенский В.Н., Филимонова Т.Н. // РиЭ. 1978. Т. 23. № 11. С. 2459-2461.
- [14] Науменко Е.Д., Сретенский В.Н., Филимонова Т.Н. // РиЭ. 1984. Т. 29. № 8. С. 1628-1629.
- [15] Bernstein B., Smith Y. // Trans. IEEE. 1973. Vol. NS-20. N 3. P. 294-310.

Институт общей физики
Москва

Поступило в Редакцию
3 февраля 1992 г.
В окончательной редакции
13 января 1994 г.