

# Исследование фазовой стабильности СВЧ системы фотоинжекторного ускорителя

И.В. Бандуркин<sup>1</sup>, А.А. Вихарев<sup>1</sup>, И.М. Летавин<sup>1,2</sup>, К.В. Минеев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** В докладе приводятся результаты исследования фазовой стабильности СВЧ системы запитки резонаторной секции фотоинжекторного ускорителя ИПФ РАН в режиме, близком к проектному. Обосновывается целесообразность применения технических решений, позволяющих обеспечить синхронизацию момента эмиссии электронов с ускоряющей фазой электрического поля в резонаторе. Приводятся результаты моделирования запитки резонаторной структуры. Даются рекомендации по модернизации катодного узла.

**Ключевые слова:** фотоинжектор, ускоритель электронов, СВЧ резонатор, пролетный клистрон.

## 1. Введение

Ускоренные пучки электронов находят широкое применение в различных областях современной науки и техники, включая генерацию когерентного излучения в лазерах на свободных электронах (ЛСЭ), где качество этих пучков имеет решающее значение при реализации наиболее перспективных схем ЛСЭ. Одним из эффективных методов получения моноэнергетичных и узконаправленных пучков является использование фотоинжекторных ускорителей.

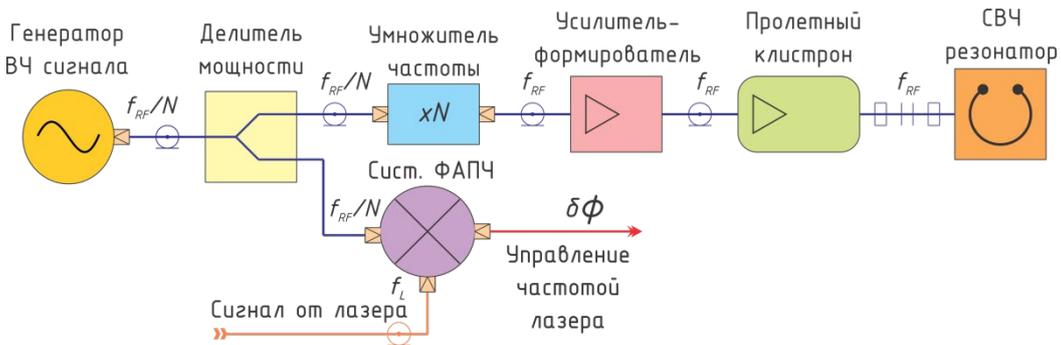
Фотоинжекторный ускорительный комплекс, разработанный в ИПФ РАН, рассчитан на ускорение электронных сгустков с зарядом до 100 пКл и длительностью около 10 пс до энергии частиц порядка 3,5 МэВ [1-3]. Ключевым элементом данной системы является СВЧ ускоряющая структура, питаемая от многолучевого импульсного клистрона КИУ-111 с выходной мощностью до 5 МВт. Эффективность работы фотоинжектора во многом зависит от эффективности накопления СВЧ энергии в резонаторе ускоряющей структуры, а также от точности синхронизации момента эмиссии электронов с фотокатода в ускоряющую фазу СВЧ поля. Настоящая работа посвящена исследованию влияния фазовой стабильности СВЧ системы на эффективность работы фотоинжектора.

## 2. Исследование фазовых характеристик клистрона

СВЧ сигнал запитки, возбуждающий резонаторную секцию ускоряющей структуры, в общем случае представляет собой последовательность коротких прямоугольных радиоимпульсов со скважностью более  $10^4$ . Принимая во внимание существенно меньшее значение постоянной времени резонаторной секции, чем длительность единичного импульса, каждый импульс следует рассматривать независимо. Для точной синхронизации электронного пучка с ускоряющим полем необходимо, чтобы фаза колебания несущей частоты оставалась постоянной на протяжении всего импульса.

Стабильность фазы СВЧ сигнала запитки напрямую зависит от схемотехнической реализации СВЧ тракта, в том числе от качества его согласования с резонаторной секцией. В настоящее время в ИПФ РАН для формирования СВЧ сигнала запитки применяется схема, изображенная на рисунке 1. Генератор непрерывного ВЧ сигнала

создает опорный сигнал на частоте 98 МГц, который посредством делителя мощности с одного плеча отводится на систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), привязывающую к нему частоту субгармоники лазера, а с другого плеча поступает на умножитель с кратностью  $N=25$ , образуя рабочую частоту  $f_{RF} = 2450$  МГц. Усилитель-формирователь формирует из непрерывного сигнала короткие импульсы и поднимает мощность сигнала до рабочего уровня пролетного клистрона. Усиленный до 5 МВт сигнал с выхода клистрона запитывает вход СВЧ резонатора ускоряющей структуры.



**Рисунок 1.** Схема СВЧ тракта фотоинжекторного ускорительного комплекса ИПФ РАН

В приведенной схеме каждый активный узел является источником фазовой нестабильности, проявляющейся как в виде стохастических флуктуаций, так и выраженным дрейфом фазы, по сравнению с которым непостоянством групповой скорости модулированного сигнала и коэффициента затухания в линии передачи можно пренебречь.

Измерения показали, что случайное отклонение фазы на выходе усилителя-формирователя относительно его входного сигнала, имеющего уровень фазовых шумов в  $-100$  дБн/Гц при отстройке на  $10$  кГц, на протяжении всей длительности  $10$  мкс импульса не превышает  $\delta\varphi = 1^\circ$ , поэтому основной вклад в общую фазовую нестабильность СВЧ тракта вносит нестабильность фазы на выходе пролетного клистрона, обусловленная сильной зависимостью режима электронно-волнового взаимодействия в клистроне от параметров импульса напряжения на его катоде.

Высоковольтный импульсный модулятор клистрона КИУ-111 спроектирован на базе формирующей линии, представляющей собой накопительную батарею конденсаторов, разряжающуюся на катод по приходу внешнего управляющего сигнала. Максимальное рабочее напряжение модулятора составляет  $55$  кВ с возможностью получения последовательности импульсов длительностью  $7$  мкс с периодом следования до  $10$  Гц.

Был проведен анализ фазовой стабильности на выходе клистрона в режиме, близком к проектному. Высокоскоростным осциллографом RIGOL DS70504 регистрировались опорный сигнал  $S(t)$  напрямую с выхода усилителя формирователя и информационный сигнал  $R(t)$  с выхода клистрона КИУ-111 через волноводную измерительную антенну. Цифровая обработка производилась с помощью математического аппарата аналитического сигнала, представляющего собой комплексный сигнал, действительная часть которого совпадает с исходным действительным сигналом, а мнимая часть находится в квадратуре с действительной.

Представим опорный и информационный сигналы в виде:

$$S(t) = A_S \cos(\omega t + \varphi_0), \quad R(t) = A_R \cos(\omega t + \varphi_0 + \Delta\varphi(t)), \quad (1)$$

где  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  – несущая частота,  $A_S$  и  $\varphi_0$  – начальные амплитуда и фаза опорного сигнала,  $A_R$  – амплитуда информационного сигнала, а  $\Delta\varphi(t)$  – сдвиг фазы сигнала

$R(t)$  относительно сигнала  $S(t)$ .

Ему соответствует комплексный сигнал:

$$\hat{S}(t) = A_S e^{j(\omega t + \varphi_0)}, \quad \hat{R}(t) = A_R e^{j(\omega t + \varphi_0 + \Delta\varphi(t))}. \quad (2)$$

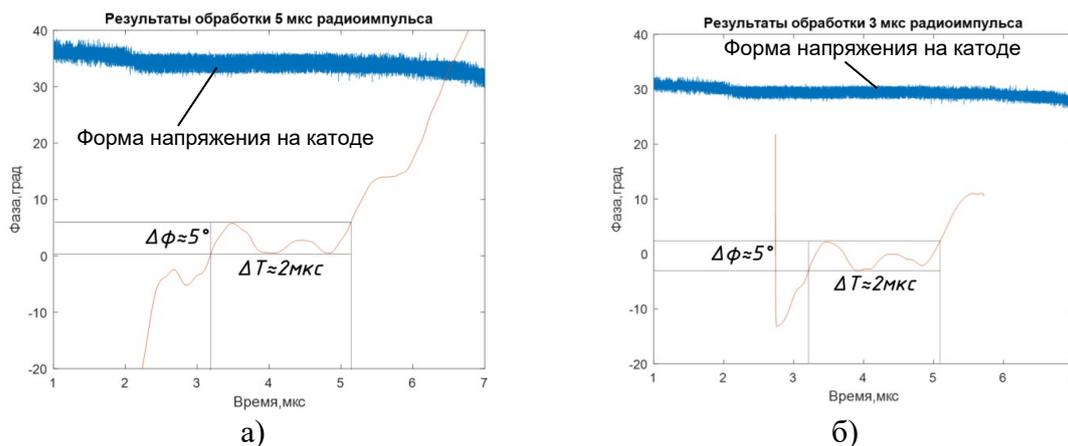
Чтобы оставить только зависимость сдвига фазы от времени, информационный сигнал необходимо умножить на комплексно сопряженный опорный сигнал:

$$\hat{R}_\varphi(t) = \hat{R}(t)\hat{S}^*(t) = A_S A_R e^{j\Delta\varphi(t)}, \quad (3)$$

тогда набег фазы можно рассчитать по формуле:

$$\Delta\varphi(t) = \text{arctg} \frac{\text{Im} \hat{R}_\varphi(t)}{\text{Re} \hat{R}_\varphi(t)}. \quad (4)$$

В процессе измерений были получены серии осциллограмм радиоимпульсов с длительностью 3 и 5 мкс при одинаковой длительности импульса высокого напряжения на катоде в 7 мкс. Квадратурная обработка показала высокую повторяемость результатов, поэтому на рисунке 2 представлены результаты цифровой обработки только двух опытов, сверху синим показан питающий импульс. Из рисунка 2 видно, что в обоих случаях существует участок длительностью порядка 2 мкс, внутри которого фаза выходного сигнала относительно опорного изменяется в пределах 5 градусов. Этот участок совпадает с наиболее плоским участком импульса напряжения на катоде, что свидетельствует об определяющей роли стабильности питающего клистрон высоковольтного импульса в стабильности фазы СВЧ сигнала на выходе.

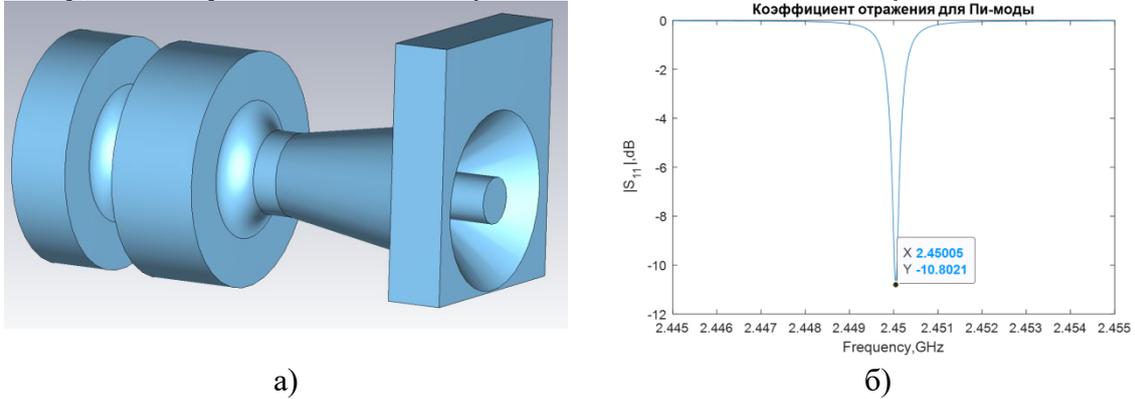


**Рисунок 2.** Примеры результатов квадратурной обработки для импульсов двух длительностей: 5 мкс (а) и 3 мкс (б)

При высокой повторяемости момента начала формирования импульса с сохранением постоянства фазового сдвига на выходе клистрона относительно его входа возможно осуществление фазовой коррекции с помощью электронного фазовращателя, устанавливаемого перед СВЧ входом усилителя-формирователя. Также целесообразно управлять эмиссией фотоэлектронов по команде с логического блока, имеющего информацию о текущей фазе СВЧ поля в резонаторе в реальном времени. Для этого не обязательно использовать высокоскоростные аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС), работающие на частотах, сопоставимых с несущей частотой, а достаточно организовать выделение квадратурных сигналов аппаратным способом с последующей оцифровкой в базовой полосе частот (единицы МГц), при этом систематический долговременный дрейф фазы может быть скомпенсирован электронным фазовращателем.

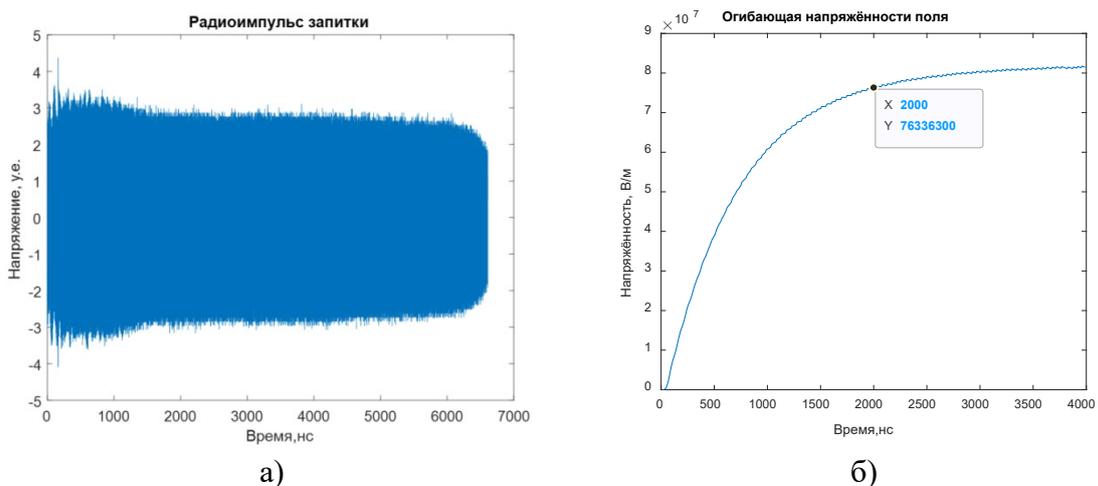
### 3. Исследование ускоряющей структуры

Второй блок решаемых задач связан с согласованием клистрона и ускоряющей структуры фотоинжектора. Ускоряющая структура представляет собой СВЧ резонатор из двух ячеек – четвертьволновой и полуволновой, где могут возбуждаться рабочая  $\pi$ -мода на частоте 2,45 ГГц и побочная 0-мода, имеющая резонансную частоту около 2,43 ГГц (рисунок 3). Для тонкой регулировки частотного согласования резонаторной структуры с запитывающим СВЧ колебанием резонатор имеет подвижную заднюю стенку, способную изменять свой прогиб и смещаться вдоль четвертьволновой ячейки.



**Рисунок 3.** а – эскиз исследуемой резонаторной секции, б – график коэффициента отражения  $S_{11}$ , где выделена частота рабочей моды

Было проведено моделирование запитки резонаторной структуры. В качестве ускоряющего напряжения использовался сигнал с клистрона, зарегистрированный высокоскоростным осциллографом. Приведенные на рисунке 4 результаты показывают, что переходный процесс выхода на уровень 90% энергии длится около 2 мкс, что совпадает с предыдущими тестами структуры. После 2 мкс в резонаторе достигается требуемая напряжённость электрического поля более 75 МВ/м, когда можно эмитировать с фотокатода электроны. Данное значение коррелирует с величиной участка фазовой стабильности, следовательно, зная начальную фазу ускоряющего колебания данного участка и скорректировав её на 5 градусов, можно успешно эмитировать электроны в его конце.



**Рисунок 4.** а – запитывающий импульс, б – переходный процесс по 90% энергии в исследуемой структуре

В последующем планируется провести моделирование получения качественного пучка электронов. Для этого необходимо составить две модели – модель импульса УФ

лазера и модель облучаемой зоны фотокатода, эмитируемой электронный пучок. Наиболее реалистичным является импульс с гауссовской огибающей длительностью 10 пс.

Для начальных испытаний и первичной тренировки всего фотоинжекторного комплекса в качестве фотокатода будет использоваться медная стенка первой ячейки резонатора. Количество испускаемых фотокатодом частиц характеризуется квантовой эффективностью, которая для монокристаллической меди равна  $5 \cdot 10^{-5}$ . По нашим оценкам, под действием УФ лазера должны эмитироваться пучки электронов с зарядом около 10 пКл. Сейчас в разработке уже находятся гораздо более эффективные конструкции, например, легированная азотом нанокристаллическая многослойная алмазная плёнка, имеющая на два порядка выше квантовую эффективность (в районе  $10^{-3}$ ). В дальнейшем планируется внедрение такой плёнки в ускорительную структуру в качестве фотокатода с возможностью получения электронного сгустка до 100 пКл.

### Заключение

В процессе исследования было рассмотрено несколько вариантов схем синхронизации, в том числе схемы, когда система ФАПЧ захватывает частоту субгармоники УФ лазера и привязывает к ней несущую СВЧ сигнала запитки. Исходя из потребности в небольших пределах (несколько МГц) перестраивать частоту СВЧ сигнала отдано предпочтение схеме, где задающей частотой выступает именно частота СВЧ сигнала (рисунок 1).

Результаты измерений фазовой стабильности СВЧ линии показывают, что существует участок длительностью не менее 2 мкс, внутри которого фаза СВЧ сигнала на выходе клистрона относительно опорного входного сигнала случайным образом изменяется в пределах не более 5 градусов (влиянием фазового шума опорного сигнала можно пренебречь в силу его малости по сравнению со случайными флуктуациями фазы сигнала на выходе клистрона). Этого участка вполне достаточно для обеспечения синхронизации момента эмиссии электронного пучка в ускоряющую фазу электрического поля в резонаторной секции. В дальнейшем планируется довести рабочий режим до стационарного участка в 5 мкс, где фаза выходного сигнала клистрона остается постоянной относительно сигнала на его входе.

Исследование выполнено в рамках проекта РНФ №21-72-30027.

### Список литературы

1. Разработка фотоинжекторного ускорительного комплекса в ИПФ РАН: состояние исследований и перспективы / А.А.Вихарев, А.Л.Вихарев, Е.И.Гачева и др. // Известия вузов. Радиофизика 2020. №5-6. С. 477 – 487.
2. Фотоинжекторный комплекс в ИПФ РАН: расчетные параметры и текущая стадия разработки / А.В.Афанасьев, И.В.Бандуркин, А.А.Вихарев и др. // Известия Российской академии наук. 2023. №5. С. 670-674.
3. Расчёт и тестирование резонатора фотопушки и бипериодической ускоряющей структуры с бегущей волной для фотоинжектора в ИПФ РАН / И.А.Ашанин, И.В.Бандуркин, Н.Ю.Былинский и др. // Известия вузов. Радиофизика 2023. №7-8. С. 555 – 565.