

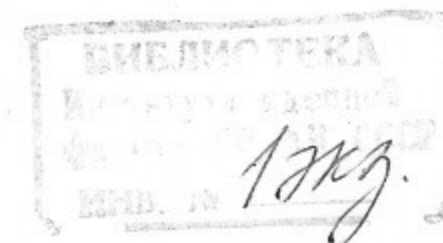


Б.12

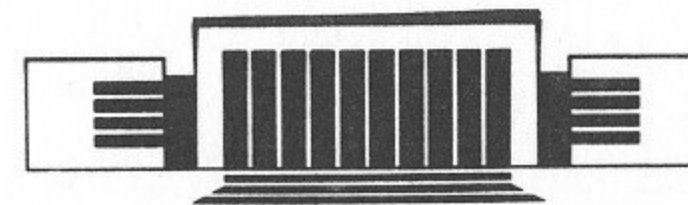
Государственный научный центр
Российской Федерации
Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера

Е.Г. Бабкин, В.Е. Балакин, В.Ф. Ключев,
А.Н. Лукин, А.В. Минков, О.В. Пирогов,
С.Л. Самойлов, Н.Г. Хавин,
В.Д. Шемелин, Г.И. Яснoв

РЕЗОНАТОР
БЕГУЩЕЙ ВОЛНЫ НА 14 ГГц
С МОЩНОСТЬЮ ВЫШЕ 100 МВт



ИЯФ 95-48



НОВОСИБИРСК

+

Резонатор бегущей волны на 14 ГГц с мощностью выше 100 МВт

Е.Г.Бабкин, В.Е.Балакин, В.Ф.Клюев, А.Н.Лукин,
А.В.Минков, О.В.Пирогов, С.Л.Самойлов,
Н.Г.Хавин, В.Д.Шемелин, Г.И.Яснов

ГНЦ РФ "Институт ядерной физики
им.Г.И.Будкера СО РАН", 630090, Новосибирск, Russia

Аннотация

Представлены результаты разработки и экспериментального исследования резонатора бегущей волны на рабочую частоту 14 ГГц. Резонатор предназначен для испытания элементов волноводного тракта СВЧ системы линейного коллайдера ВЛЭПП на высокую мощность. Описан выбор и расчет конструкции, технология подготовки рабочей поверхности, меры по обеспечению СВЧ и вакуумных требований. Максимальная достигнутая мощность в волноводном кольце составила 120 МВт при сечении волновода $17 \times 8 \text{ мм}^2$. Приводятся данные по испытанию выходных окон и ответвителей.

Traveling Wave Resonator Testing Above 100 MW at 14 GHz

Ye.G.Babkin, V.E.Balakin, V.F.Klyuyev, A.N.Lukin,
A.V.Minkov, O.V.Pirogov, S.L.Samoilov, N.G.Khavin,
V.D.Shemelin, G.I.Yasnov

The Budker Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, Russia

Abstract

Development and experimental study of a traveling wave resonator with a work frequency of 14 GHz at the level above 100 MW is described. The resonator is intended for testing RF system elements of the linear collider VLEPP at the operational level of power. A choice and calculation of design, technique of preparing the work surface, measures to meet RF and vacuum requirements, are discussed. Higher power obtained to date is 120 MW in the waveguide cross-section of $17 \times 8 \text{ mm}^2$. Data of testing output windows and directional couplers are presented as well.

©ГНЦ РФ "Институт ядерной физики им.Г.И.Будкера СО РАН"

1 Введение

При разработке СВЧ системы линейного коллайдера ВЛЭПП возникла необходимость испытаний отдельных элементов выходного тракта клистрона, и прежде всего выходных окон, на высоком уровне мощности. В настоящий момент выходные СВЧ окна в нашем диапазоне частот не позволяют вывести всю мощность, которую способен отдать генератор. Разрушение окна на работающем клистроне приводит к нарушению в нем вакуума и выходу прибора из строя.

Испытания элементов тракта удобно проводить на таком устройстве, которое не ухудшает работу клистрона при пробоях и разрушениях испытуемых элементов. В качестве такого устройства применяют [1] резонатор бегущей волны (РБВ). При сравнительно небольшой мощности генератора СВЧ, отделенного от РБВ окном, работающем в малонапряженном режиме, в резонансном кольце можно получить на порядок большую циркулирующую мощность, проходящую через испытуемый элемент.

Использование РБВ представляет интерес также с точки зрения рекуперации энергии. При возбуждении ускоряющей секции нерассеянная в ней мощность может быть возвращена на ее вход с целью повышения накапливаемой мощности. Правда, возможности этого приема для разработанной секции ВЛЭПП [2] ограничены из-за большого затухания в ней, но могут быть использованы для более коротких секций и для сверхпроводящих структур.

Известны результаты испытаний аналогичного резонансного кольца на частоту 11.4 ГГц [3], где была достигнута мощность 300 МВт.

2 Характеристики резонатора бегущей волны

Подробный анализ характеристик РБВ сделан в работе Штейна [4] и в более ранних работах [5, 6 и др.]. Нами была использована методика этих расчетов, и некоторые формулы были уточнены [7].

Схема резонатора бегущей волны представлена на рис. 1. Резонатор представляет собой свернутый в кольцо волновод, возбуждаемый через отверстия связи направленного ответвителя от источника СВЧ мощности (подробнее — см. раздел 3). Можно показать, что коэффициент усиления по мощности при резонансе имеет вид

$$K = \frac{C^2}{(1 - T\sqrt{1 - C^2})^2},$$

где C — переходное ослабление входного направленного ответвителя (НО), T — коэффициент передачи кольца по напряжению за один оборот волны.

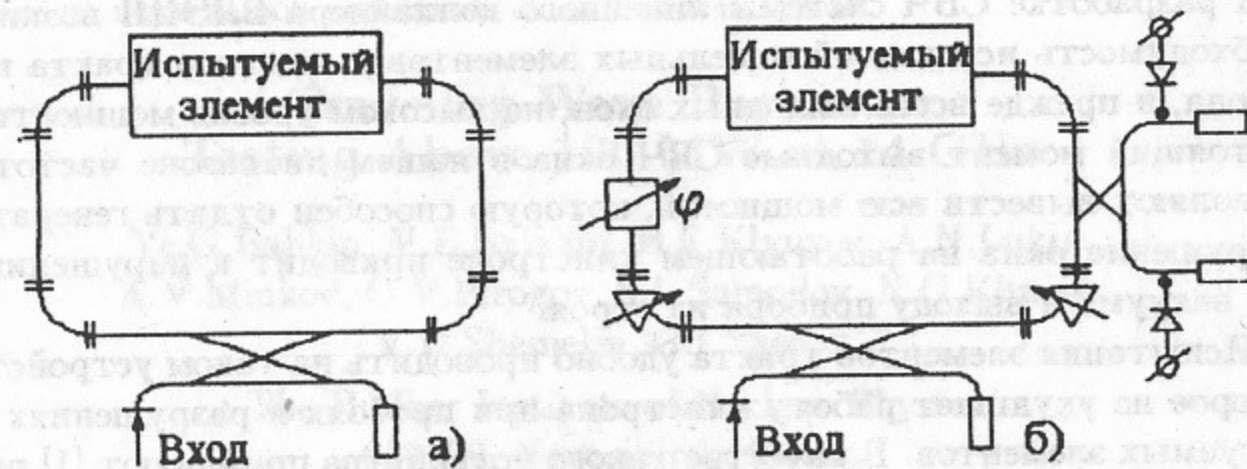


Рис. 1. Схема простейшего РБВ (а) и РБВ с фазовращателем, измерительным ответвителем и компенсаторами неоднородностей для испытаний элементов СВЧ тракта (б).

При оптимальной связи

$$C = C_{opt} = \sqrt{1 - T^2}$$

и

$$K = 1/C_{opt}^2.$$

При увеличении затухания в резонаторе, например, при установке в кольцо элемента с повышенным затуханием, величина K уменьшится и

заметно улучшить ее изменением переходного ослабления не удастся, поскольку она находится вблизи максимума — рис. 2. Таким образом, один и тот же входной ответвитель можно использовать при испытаниях элементов с различным затуханием — хотя он будет неоптимальным, его оптимизация не даст заметного выигрыша в усилении. Диапазон значений параметров, использованный на рис. 2, соответствует величинам, рассчитанным для нашего резонансного кольца.

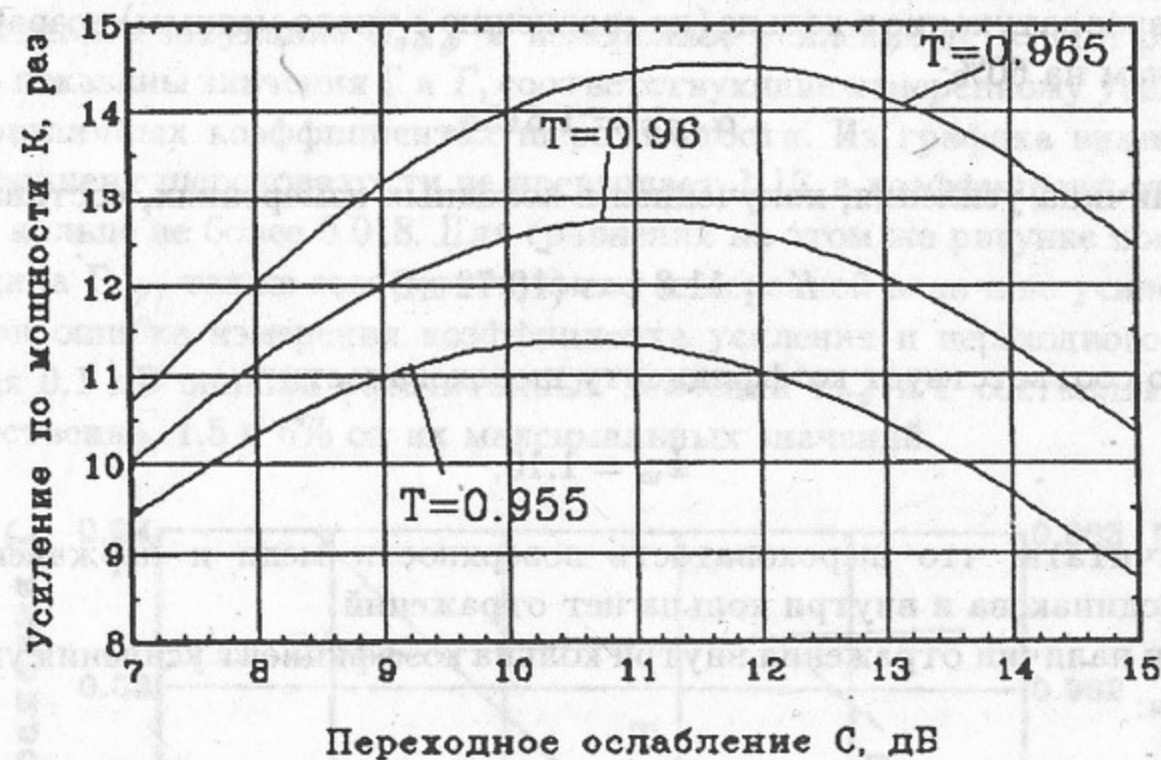


Рис. 2. Зависимость усиления по мощности от переходного ослабления НО при разных затуханиях в кольце.

Затухание в прямоугольном волноводе [8]

$$\alpha = \frac{k_w k \Delta}{b} \left[\frac{1}{\sqrt{K_0}} \left(\frac{1}{2} + \frac{b f_{кр}^2}{a f^2} \right) \right], \quad (2.1)$$

где k_w — коэффициент шероховатости поверхности волновода,

$k = \omega/c$ — коэффициент фазы волны,

c — скорость света в вакууме,

$\Delta = \sqrt{2/\omega\sigma}$ — толщина скин-слоя,

a и b — ширина и высота сечения волновода,

$K_0 = 1 - (f_{кр}/f)^2$ — волноводный коэффициент,

$f_{кр}$ и f — критическая и рабочая частота волновода,

$\omega = 2\pi f$,

σ - удельная проводимость,

для меди $\sigma = 58 \text{ МСм/м}$, $\Delta = 66/\sqrt{f}$ (мкм, f - в МГц).

Геометрическая длина кольца по средней линии волновода составляет $L = 1.261 \text{ м}$. С учетом того, что часть волноводного кольца: фланцы, вставки для подключения вакуумных насосов, а также вставка, установленная для настройки резонатора на рабочую частоту, выполнены из нержавеющей стали, имеющей потери в 6.6 раза больше, чем медь, — эффективное затухание в кольце (по сравнению с чисто медным) возрастает более чем на 60%:

$$\alpha_{эфф} = 1.613\alpha.$$

Величина усиления, полученная в холодных измерениях, составляет

$$K = 11.8 \text{ раз (10.72 дБ)}.$$

Это соответствует коэффициенту шероховатости

$$k_{ш} = 1.15,$$

если считать, что шероховатость поверхности меди и нержавеющей стали одинакова и внутри кольца нет отражений.

При наличии отражения внутри кольца коэффициент усиления уменьшается:

$$K = C^2 \left| \frac{1 - T\sqrt{1 - C^2}\sqrt{1 - \Gamma^2}e^{-j\phi}}{1 - 2T\sqrt{1 - C^2}\sqrt{1 - \Gamma^2}e^{-j\phi} + T^2(1 - C^2)e^{-2j\phi}} \right|^2, \quad (2.2)$$

где Γ - модуль коэффициента отражения, ϕ - набег фазы на длине кольца. Величина T связана с затуханием $\alpha_{эфф}$ и длиной кольца L :

$$T = e^{-\alpha_{эфф}L}.$$

Максимум выражения (2.2) по ϕ достигается при $\phi = 0$ (с точностью до $2\pi n$), если Γ не превышает некоторой критической величины $\Gamma_{кр}$. Если $\Gamma > \Gamma_{кр}$, то максимум усиления достигается при

$$\phi = \pm \arccos \left[\frac{1}{2} \left(T\sqrt{1 - C^2}\sqrt{1 - \Gamma^2} + \frac{1}{T\sqrt{1 - C^2}\sqrt{1 - \Gamma^2}} - \Gamma\sqrt{T^2(1 - C^2) + \frac{1}{T^2(1 - C^2)(1 - \Gamma^2)} - 2} \right) \right],$$

а резонансная кривая становится двугорбой (имеет два максимума).

Ослабление сигнала за один проход по кольцу нами не измерялось, поэтому определить коэффициент шероховатости напрямую не представляется возможным. Можно, однако, определить диапазон величин, в котором находятся Γ и $k_{ш}$, так как ими ограничивается усиление, и диапазон изменения T в зависимости от $k_{ш}$.

Исходными величинами считаем переходное ослабление $C = 12.8 \text{ дБ}$, эффективное затухание $\alpha_{эфф}$ и измеренное усиление $K = 11.8 \text{ раз}$. На рис. 3 показаны значения Γ и T , соответствующие измеренному усилению при различных коэффициентах шероховатости. Из графика видно, что коэффициент шероховатости не превышает 1.15, а коэффициент отражения в кольце не более 0.018. Для сравнения на этом же рисунке показана величина $\Gamma_{кр}$, также соответствующая измеренной величине усиления.

При ошибке измерения коэффициента усиления и переходного ослабления 0.1 дБ ошибки рассчитанных значений $\Gamma_{кр}$ и Γ составляют, соответственно, 1.5 и 6% от их максимальных значений.

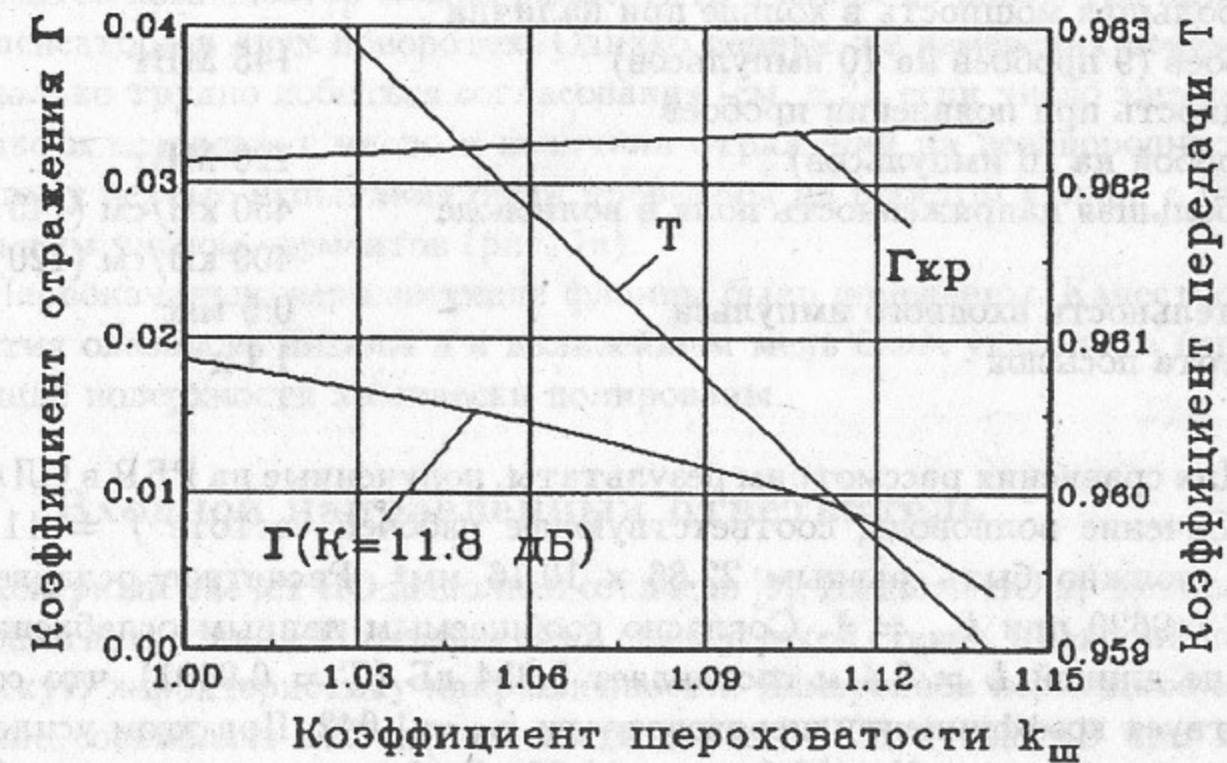


Рис. 3. Диапазон возможных значений коэффициентов отражения и шероховатости.

В таблице 1 сведены измеренные и рассчитанные характеристики РБВ. Для удобства здесь же приведены максимальные результаты, достигнутые при испытаниях.

усиление достижимо при условии покрытия внутренней поверхности нержавеющей фланцев медью.

Другая возможность увеличить усиление не меняя затухание и отражение в тракте состоит в изготовлении ответвителя с большим, оптимальным для имеющихся потерь, переходным ослаблением. Принимая, реальное значение затухания $\alpha_{эф}$, при $k_{ш} = 1.10$ и $\Gamma = 0.010$ можно получить $K = 12.5$ раз при $C = 10.9$ дБ. Таким образом, оптимизация входного НО увеличила бы коэффициент усиления на 6%, покрытие медью сильно поглощающих нержавеющей поверхностей — на 60%. При модернизации РБВ следует найти технологию надежного меднения нержавеющей поверхностей.

3.2 Измерительный направленный ответвитель

Для измерения мощности волны, распространяющейся в РБВ, и коэффициента отражения в его тракте рассматривалось два варианта измерительных НО.

3.2.1 Ответвитель со связью по широкой стенке

Этот НО имеет два вторичных волновода, расположенных перпендикулярно главному волноводу, и элементы связи в виде крестообразного отверстия в каждом из двух мест пересечения главного и вторичных волноводов. При правильном выполнении отверстия связи система обладает высокой направленностью и широкой полосой [9], однако из-за невыполнения жестких допусков на размеры и из-за необходимости установки керамики для герметизации отверстий связи по вакууму была получена направленность 6–7 дБ при переходном ослаблении 40–50 дБ.

После проведения настройки удалось улучшить направленность до 20 дБ с ухудшением рабочей полосы. Фактически в этом варианте реализовано два ответвителя — для прямой и обратной волны. Удалось показать [7], что при правильном выборе расстояния между отверстиями связи $l = n\lambda_g/2$ можно уменьшить ошибку измерения модуля коэффициента отражения до величины, определяемой только погрешностью детекторных головок и следующими за ними в схеме измерительными приборами. Из-за недостаточно высокого переходного ослабления этот вариант НО использовался лишь до уровня нескольких мегаватт в предварительных испытаниях.

3.2.2 Ответвитель с запредельными отверстиями связи

Для измерения мощности на уровне выше 100 МВт использовался ответвитель с переходным ослаблением около 80 дБ. Ответвитель представляет собой два волновода, связанных через отверстия в узкой стенке двумя запредельными трубками с диаметром равным высоте сечения волновода. Со стороны измерительного волновода трубки герметизировались керамическими дисками. Для измерения прямой и обратной волны требуется подключение детекторных головок к соответствующим каналам вторичного волновода.

3.3 Фазовращатель

Фазовращатель служит для настройки РБВ в резонанс. В данной конструкции резонатора он представляет собой отрезок волновода изменяемого сечения за счет растяжения и сжатия широких стенок, в результате чего меняется электрическая длина фазовращателя. Для осуществления возможности деформации широкая стенка волновода на рабочем участке имеет уменьшенную толщину и небольшой предварительный прогиб и на ней имеются захваты ("ласточкин хвост"), к которым прикладывается усилие от механизма, управляемого электродвигателем. Сдвиг фазы на рабочей длине волны λ_0 определяется выражением

$$\Delta\varphi = 2\pi \left[\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{к1}}\right)^2} - \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{к2}}\right)^2} \right] \frac{l_{\phi}}{\lambda_0},$$

где l_{ϕ} — длина рабочего участка ($l_{\phi} = 160$ мм), $\lambda_{к1} = 34.46$ мм и $\lambda_{к2} = 34.09$ мм — пределы изменения критической длины волны за счет деформации.

Измерение и расчет показали, что таким образом фаза сдвигается на 14° , что соответствует перестройке резонатора на 8.4 МГц. При необходимости большей величины перестройки изменяется толщина медной прокладки с шагом 1 мм (6.8 МГц).

Фазовращатель не использовался в проведенных экспериментах, т.к. решено было минимизировать длину резонансного кольца. Грубая настройка на резонансную частоту проводилась с помощью вставок, а более точная настройка на резонанс выполнялась перестройкой частоты клистрона.

3.4 Компенсатор отражения

Компенсатор отражения выполнен в виде четырех расположенных в широкой стенке волновода гибких диафрагм, настраиваемых винтами. Неоднородность, создаваемая каждой диафрагмой, примерно соответствует стержню $\phi 5$ мм, вводимому в центр широкой стенки. Согласно измерениям, для создания возмущения $|\Gamma| = 0.1$ такой стержень должен вводиться на глубину до 1 мм, рис. 4. Для надежной настройки в резонатор устанавливаются два компенсатора. Расстояния между центрами диафрагм составляют $5/8\lambda_g = 17.5$ мм.

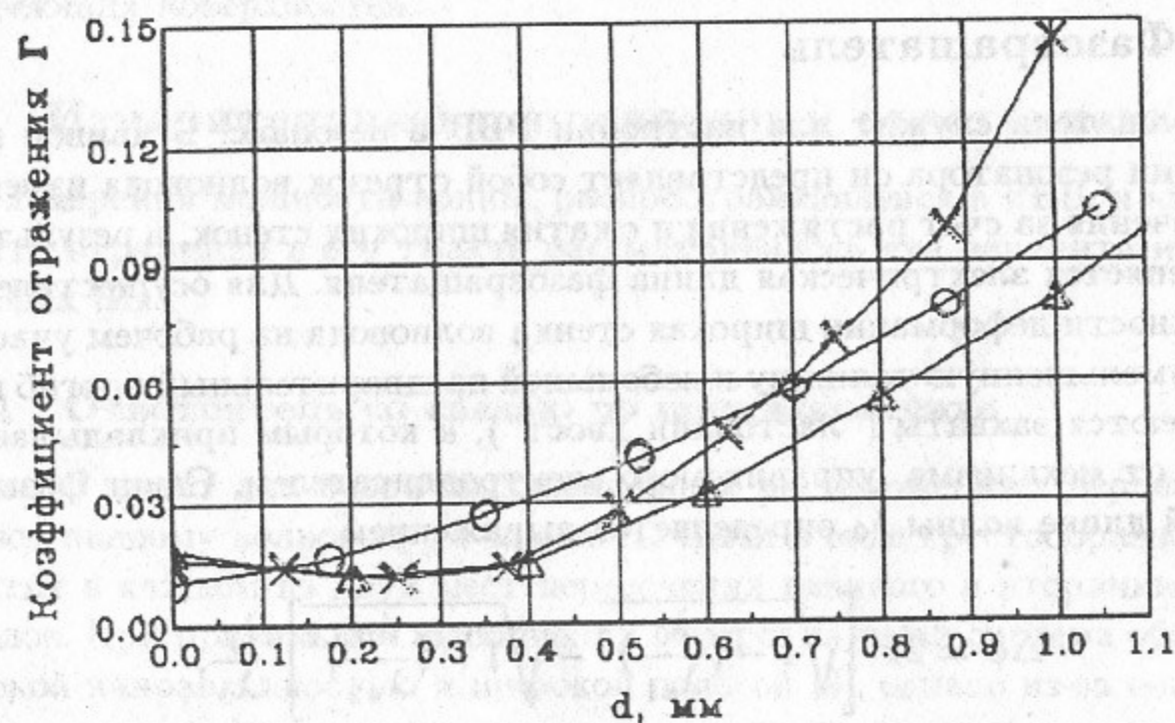


Рис. 4. Влияние стержня в широкой стенке на коэффициент отражения. х – стержень $\phi 3$, о – стержень $\phi 4$, Δ – стержень $\phi 5$; d – глубина погружения.

Введение стержня в узкую стенку при небольшом погружении было бы предпочтительнее по электрической прочности, однако для получения $|\Gamma| \approx 0.1$ требовалось его погружение на глубину до 6 мм, и конец стержня оказывался в достаточно сильном электрическом поле. Кроме того, большая глубина погружения неудобна конструктивно.

4 Технологическая подготовка деталей для достижения высокой мощности

4.1 Уплотнения

Вакуумные медные прокладки в местах стыковки волноводов обеспечивают в то же время и СВЧ-контакт. Используемые прокладки представляют собой короткие отрезки того же волновода, из которого собирается резонатор, они фрезеруются с внешней стороны для точной посадки во фланец. Конструкция фланца и прокладки схематически показана на рис. 5.

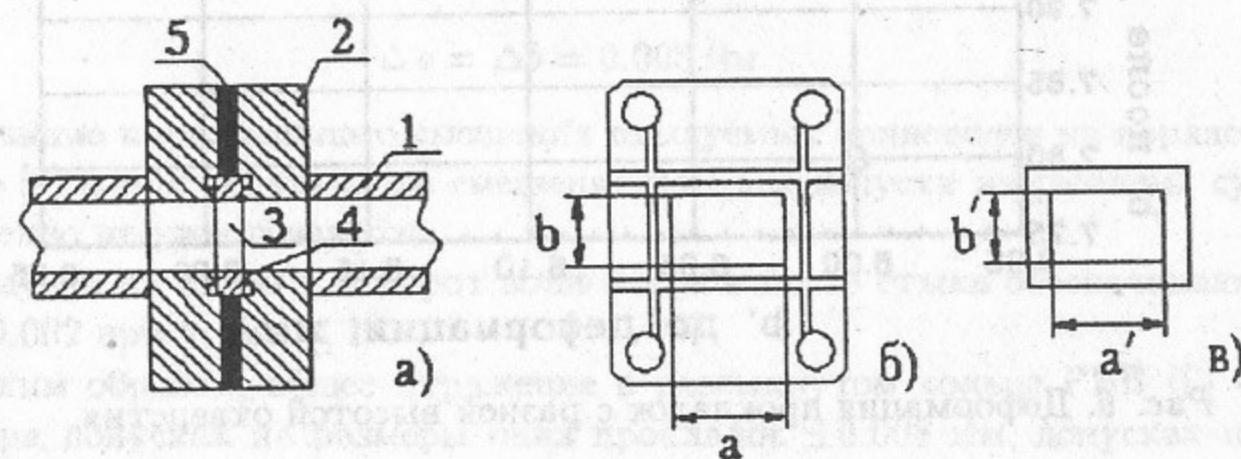


Рис. 5. Узел стыковки волноводов: а – узел в сборе; б – фланец; в – прокладка. 1 – волновод; 2 – фланец; 3 – прокладка; 4 – уплотняющий зуб; 5 – проставка.

Уплотнение на вакуум достигается путем деформации медной прокладки. При этом, в зависимости от величины деформации уплотняющим зубом 4 (см. рис.5), изменяются внутренние размеры прокладки a' и b' . Эти размеры могут отличаться от исходных размеров внутреннего сечения волноводного фланца a и b . На выступающей прокладке возникает отражение, а кромка прокладки на широкой стенке может быть местом пробоя.

Была измерена зависимость высоты отверстия прокладки b' после сжатия от ее же величины до сжатия для прокладок толщиной $\delta = 3$ и 4 мм. Результаты измерений представлены на рис. 6. Из графика видно, что если прокладка имеет высоту, равную высоте отверстия волноводного фланца, то после сжатия она выступает на 0.08 – 0.10 мм с каждой стороны. Практика показала что для того, чтобы после сжатия прокладка была "заподлицо" с поверхностью волновода, необходимо

увеличить полную высоту отверстия на 0.11 – 0.12 мм по сравнению с высотой отверстия фланца. Разброс положения точек можно объяснить несимметричной установкой прокладки (люфт в посадочном гнезде).



Рис. 6. Деформация прокладок с разной высотой отверстия.

Величина деформации прокладки в направлении вдоль волновода была одинаковой для всех стыков и составляла 0.4 мм. Этого достаточно для вакуумного уплотнения и этим обеспечивается одинаковость деформации в направлении поперек оси волновода. Использовались прокладки различной толщины — от 2.4 до 4 мм для настройки резонатора на рабочую частоту. Для ограничения деформации величиной 0.4 мм применялись проставки 5 (рис. 5) соответствующей толщины.

4.2 Волноводные фланцы

При замыкании волновода в кольцо эффективный коэффициент отражения, т.е. отношение напряжений обратной и прямой волны, составляет [4] $\Gamma_{эфф} \approx K\Gamma$. При разумной величине $\Gamma_{эфф}$, например, $\Gamma_{эфф} = 0.1$ и K порядка 10 необходимо иметь отражение на разомкнутом кольце $\Gamma \approx 0.01$.

Точность выполнения размеров фланца, задающих положение уплотняющей прокладки (рис. 5), определяется допустимой величиной отражения на одном стыке. При 20 – 30 стыках (каждая прокладка – 2 стыка),

чтобы обеспечить общее отражение $|\Gamma| < 0.01$ необходимо иметь отражение на одном стыке не более

$$|\Gamma_1| \approx 0.01/\sqrt{25} = 0.002.$$

Отражение, возникающее из-за допуска на размеры сечения волновода [9],

$$|\Gamma_\partial| \approx 4 \cdot \Delta a/a,$$

если допуски на Δa и Δb выбраны одинаковой величины.

Считая $|\Gamma_1| = |\Gamma_\partial|$, получаем при $a = 17$ мм

$$\Delta a = \Delta b = 0.008 \text{ мм.}$$

Влияние параллельного смещения стыкуемых волноводов на порядок слабее [9] и при допусках на смещение 0.01 мм допуски на размеры существенно не ужесточаются.

Допуски на излом и поворот волноводов в месте стыка обеспечивают $|\Gamma| \approx 0.002$ при углах $\leq 1^\circ$.

Таким образом, общее отражение в разомкнутом кольце РБВ $|\Gamma| < 0.01$ при допусках на размеры окна прокладок ± 0.008 мм, допусках на смещение ± 0.01 мм и на углы $\pm 0.1^\circ$.

4.3 Внутренние поверхности волноводов

Поверхности волноводных отрезков после пайки фланцев для удаления царапин обрабатывались вольфрамовой проволокой диаметром 150 мкм, промывались трихлорэтиленом в ультразвуковой ванне и химически полировались.

Фланцы из нержавеющей стали первоначально были помеднены, но после пайки медь частично отошла от подложки и при первых испытаниях края медного покрытия были местом пробоя. Медь удалили вольфрамовой проволокой и нержавеющей фланцы химически полировали.

Для отдельных двухсторонних нержавеющей фланцев, служащих для ввода откачки и для выравнивания длины кольца, проводилась электрохимическая полировка.

Уплотняющие медные прокладки также были электрохимически полированы.

5 Экспериментальные результаты

5.1 Испытания прямого отрезка

Коэффициент усиления по мощности в резонаторе определялся по данным измерений входящей в РБВ мощности $P_{вх}$ и мощности на нагрузке P_n согласно выражению [7]

$$K = \frac{1}{C^2} \left[1 - \sqrt{1 - C^2} \sqrt{\frac{P_n}{P_{вх}}} \right] \quad (5.1)$$

Было проведено 2 серии тренировок РБВ с прямым отрезком волновода в качестве испытуемого элемента, каждая тренировка длилась около 100 часов.

В первой серии РБВ располагался так, что широкие стенки волноводов были горизонтальны, а кольцо находилось в вертикальной плоскости.

В результате тренировки мощность в отдельных импульсах достигала 100 МВт. Сравнительно стабильная работа — 1 пробой на 10 импульсов — была при 70 МВт (320 кВ/см или 250 кВ на 8 мм зазора).

После разборки следы пробоев были видны как на нержавеющей стали так и на медных прокладках. Следы имеют вид пятен диаметром около 1 мм. На стенках волновода следов пробоя не было обнаружено.

Было замечено, что значительно большее число следов пробоя находилось на фланцах и прокладках со стороны нижней широкой стенки волновода, чем со стороны верхней стенки. Это можно объяснить оседанием пыли на стенки волновода в процессе сборки и от качки и влиянием частиц пыли на инициацию пробоя.

Во второй серии испытаний РБВ располагался в горизонтальной плоскости, а широкие стенки волновода были вертикальны. Аналогичный прием был использован ранее [10] при установке керамических окон, плоскость окна располагалась вертикально для повышения электрической прочности.

Тренировка также велась около 100 часов и был достигнут уровень 120 МВт при пробоях примерно в каждом десятом импульсе и уровень 145 МВт в отдельных импульсах. Характерный вид сигналов представлен на рис. 7. Результаты, представленные в таблице 1, касающиеся коэффициента усиления и предельной мощности, относятся именно ко второй серии испытаний прямого отрезка. Остальные данные являются

общими для всех экспериментов. После разборки следы пробоев были обнаружены не только на фланцах и прокладках, но и в прямолинейном отрезке. Они располагались группами с интервалами в половину длины волны, что свидетельствовало о наличии стоячей волны. Кроме того, на нижней, узкой стенке была замечена пыль, также сгруппированная с интервалами $\lambda_g/2$. При этом, по оценкам, КСВН внутри кольца составлял всего лишь около 1.05.

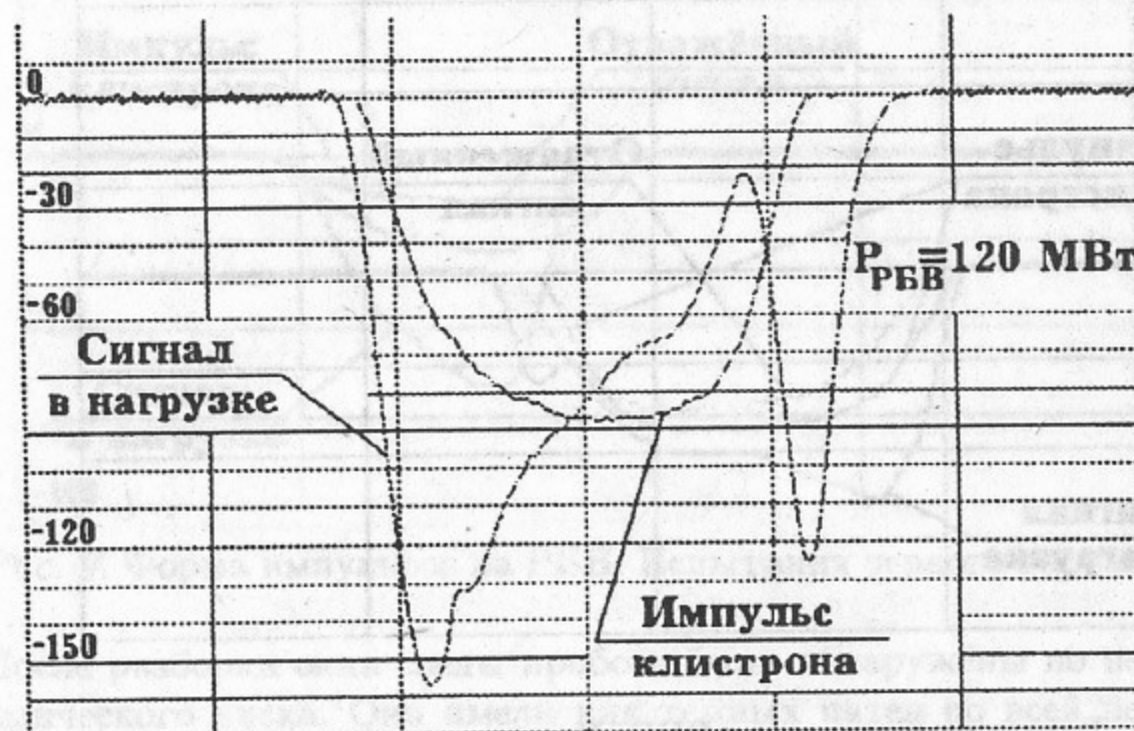


Рис. 7. Форма импульсов на РБВ. Испытания отрезка волновода.

5.2 Испытания направленного ответвителя

Для испытаний был взят измерительный НО с переходным ослаблением 76 дБ, представляющий собой два волновода, связанных через две трубки и отверстия в узких стенках, и герметизированных керамикой со стороны вторичного волновода.

Поскольку длина НО была меньше прямого промежутка, в который он был поставлен, пришлось вставить добавочные волноводы для выравнивания. При этом число нержавеющей стали фланцев увеличилось, выросли потери а также число отражений в кольце. В результате измеренный коэффициент усиления составил 7.8 раза по мощности в холодных измерениях и около 6 на высоком уровне мощности.

После обычной тренировки был достигнут уровень 50 – 60 МВт (доля пробоев 0.1). Импульс, соответствующий этой мощности, измерялся прямо с испытуемого ответвителя. Кроме этого измерялись падающая мощность и мощность в нагрузке (рис. 8).



Рис. 8. Форма импульсов на РБВ. Испытания направленного ответвителя.

После разборки следов пробоя в ответвителе замечено не было. По-видимому, пробивались другие участки РБВ из-за наличия стоячей волны между неоднородностями.

5.3 Испытания окон

В составе РБВ было проведено испытание двух вариантов окна. В обоих случаях использовались полуволновые сверхразмерные окна $\phi 66$ мм с керамикой А995 в первом варианте и с керамикой ВК-94 — во втором.

В первом варианте после сборки РБВ с окном внутреннее отражение в резонансном кольце было выше критической величины [4], что выразилось в раздвоении частотной характеристики резонатора. Работа велась на правом пике резонанса при усилении в кольце около 5. Ограничение пробоями произошло на уровне 10 - 12 МВт, что соответствует ограничению, полученному ранее [11], когда на выходе клистрона стояло окно

той же конструкции, но с керамикой ВК-94.

Сигналы, полученные при испытаниях первого варианта, показаны на рис. 9.

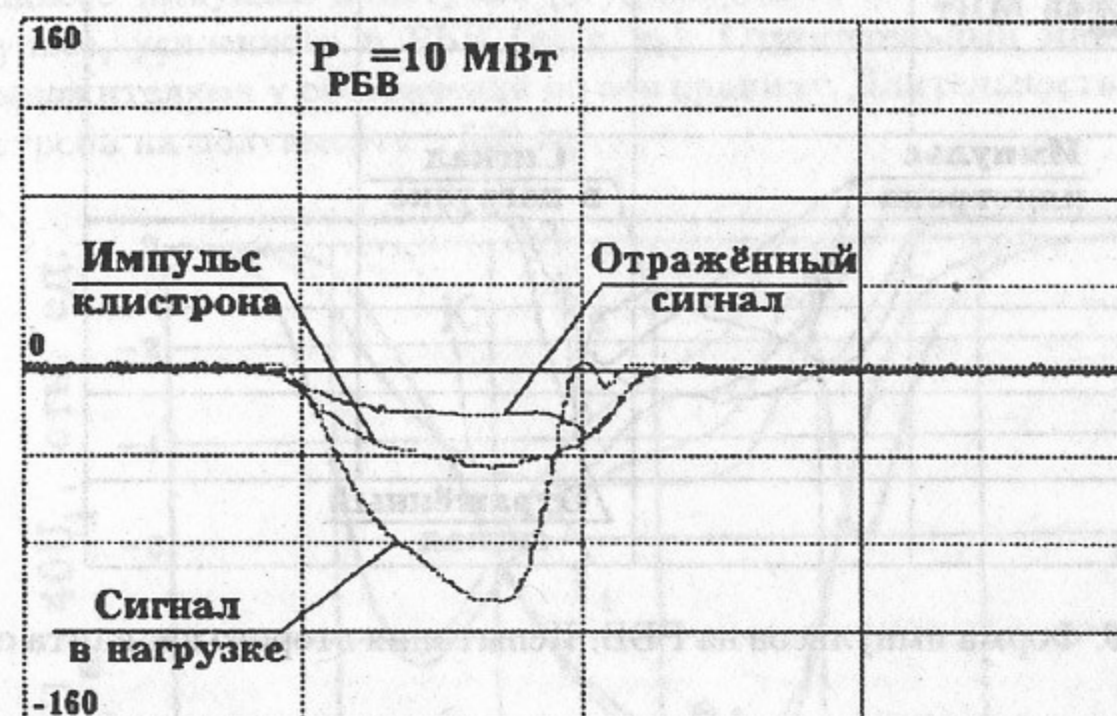


Рис. 9. Форма импульсов на РБВ. Испытания первого варианта окна.

После разборки окна следы пробоев были обнаружены по периметру керамического диска. Они имели вид темных пятен по всей периферии диска и отдельных линий, направленных по вектору электрического поля моды H_{11} круглого волновода, и сосредоточенных, в основном, у противоположных стенок, соответствующих этому полю.

В конструкции второго варианта были сделаны изменения с целью предотвращения мультиакторного разряда. Резонатор удалось настроить в холодных измерениях на усиление $K = 10.4$, в горячих испытаниях усиление по мощности составляло 8 - 9 раз. Типичная величина мощности, проведенной через окно после тренировки, равнялась 35 - 40 МВт, в отдельных импульсах - до 50 МВт.

Следы пробоев были значительно слабее, чем в первом варианте, также располагались на периферии диска и имели вид отдельных темных пятен, расположенных несимметрично справа и слева от центральной силовой линии электрического поля волны H_{11} .

Осциллограммы, записанные при испытаниях второго варианта, представлены на рис. 10.

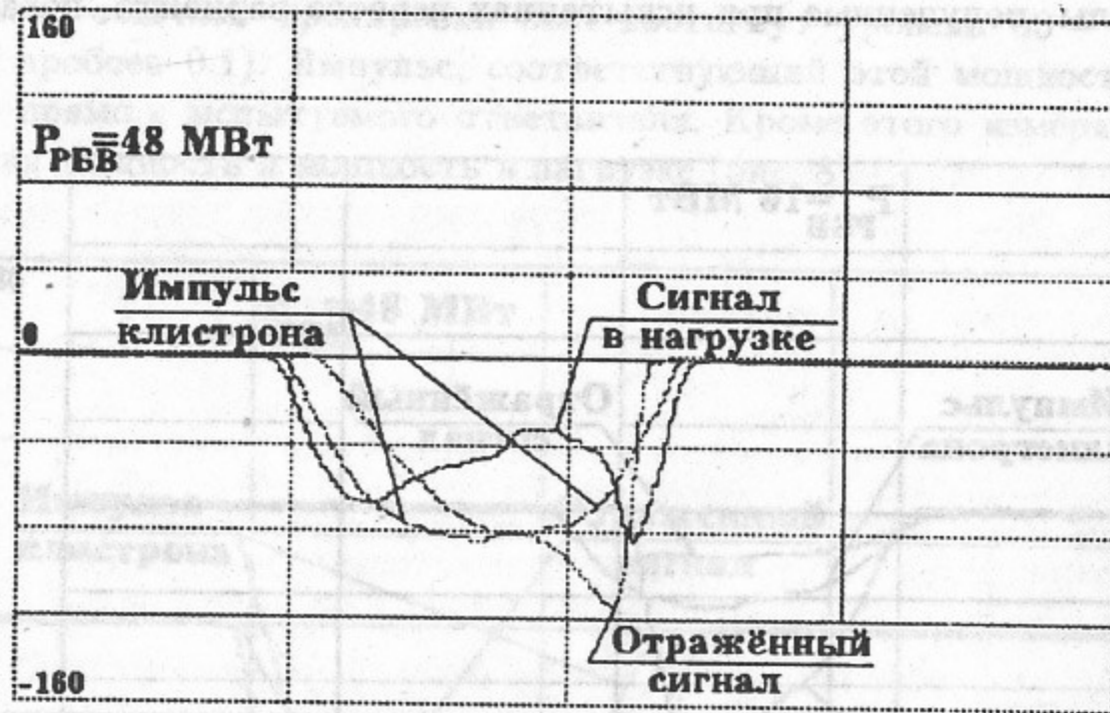


Рис. 10. Форма импульсов на РБВ. Испытания второго варианта окна.

6 Компьютерное моделирование

Импульс мощности, проходящей в нагрузку, служит основным критерием настройки РБВ в резонанс. Наряду с величиной входной мощности он служит для определения величины мощности, циркулирующей в кольце, формула (5.1).

Показанные на рис. 7 – 10 осциллограммы импульсов волны, проходящей в нагрузку, отличаются от импульса, имеющего вид двух резких пиков на переднем и заднем фронте, представленного в [3]. Отличие формы импульса на нагрузке связано с тем, что выходной импульс клистрона в нашем случае имел колоколообразную форму, т.е. длительности фронтов сравнимы с полной длительностью импульса. Более того, эта форма изменяется при изменении режима работы клистрона, при подстройке в резонанс с РБВ или при изменении мощности.

Было сделано компьютерное моделирование для импульса клистрона, близкого по форме к экспериментальному. Модель процесса накопления мощности в резонаторе рассматривает уровни мощности на входе кольца после направленного ответвителя и мощности в нагрузке с шагом по времени, равным времени оборота волны в кольце. Моделирование показало

качественное совпадение с экспериментом. На рис. 11 представлены результаты моделирования для эксперимента с прямым отрезком — результаты последнего см. на рис. 7. Масштаб по оси ординат разный для выходного импульса клистрона (K), импульсов на нагрузке (l_0 и l_1) и импульса, усиленного в РБВ (a_0 и a_1). Относительный масштаб указан множителями у обозначений по оси ординат. Длительность импульса клистрона на полувысоте – 500 нс.

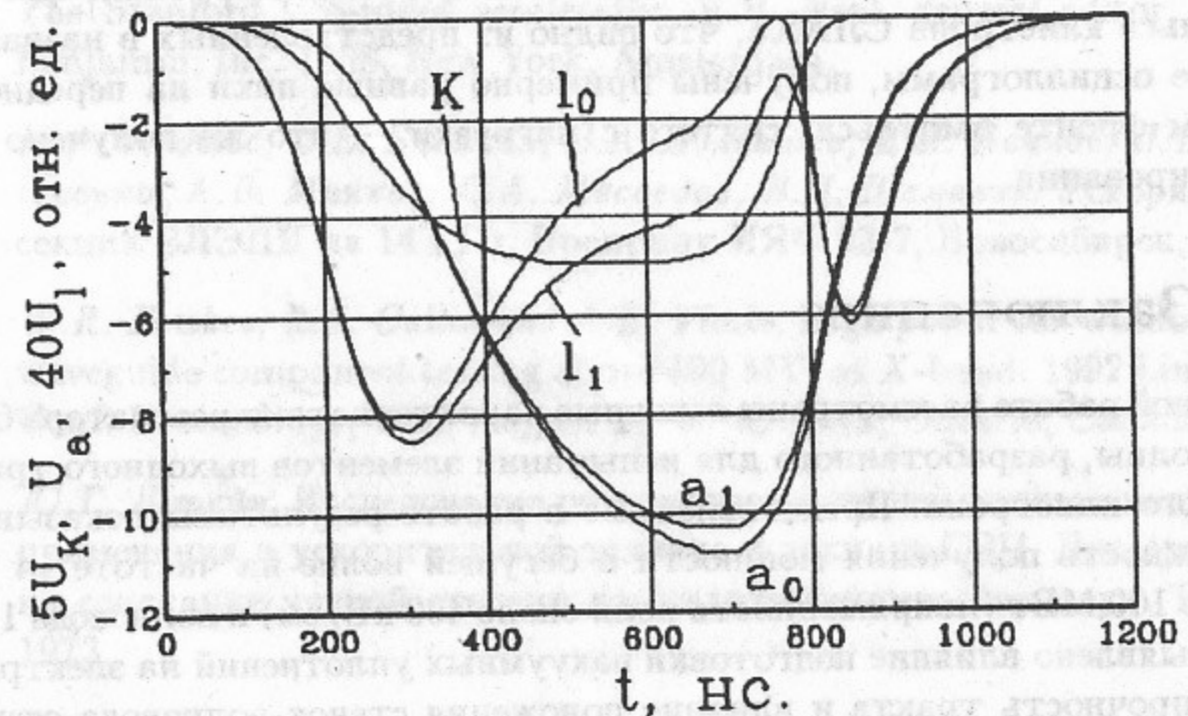


Рис. 11. Моделирование импульсов, полученных при испытаниях прямого отрезка волновода. Обозначения в тексте.

При моделировании принято, что согласование переходного ослабления C с коэффициентом передачи T неоптимально. Кривые a_0 и l_0 соответствуют настройке в резонанс, а для кривых a_1 и l_1 набег фазы за оборот составляет 1° (отстройка 0.51 МГц). Для случая с отстройкой сигнал с нагрузки между двумя пиками не достигает нуля, как и в эксперименте. Обычно в эксперименте на высоком уровне мощности не удавалось настроить сигнал с нагрузки в нуль между пиками даже плавной перестройкой частоты с шагом около 0.1 МГц, но сравнительно легко такая настройка выполнялась на малом уровне мощности.

Моделирование показало высокую чувствительность формы волны, проходящей в нагрузку, к крутизне фронтов усиливаемого импульса. Справедливость формулы (5.1), использованной для расчета мощности, обращающейся в кольце, также проверена в модели для колоколообраз-

ного импульса. Ошибка этой формулы, связанная с незавершенностью переходного процесса, составляет около 1%, если величина мощности в нагрузке P_n измеряется в точке перегиба импульса волны в нагрузке. В модели получено также уменьшение коэффициента усиления по сравнению с холодными измерениями (с импульсом 100 мкс), связанное с незавершенностью переходного процесса и наблюдавшееся в эксперименте.

Модель была проверена по экспериментальным данным работы [3] и показала хорошее соответствие. При этом при разной крутизне фронтов импульса клистрона СЛАКа, что видно из представленных в названной работе осциллограмм, получены примерно равные пики на переднем и заднем фронте импульса, снятого с нагрузки — это же получено при моделировании.

7 Заключение

В данной работе рассмотрены основные характеристики резонатора бегущей волны, разработанного для испытаний элементов выходного тракта мощного клистрона. Представленные в работе результаты показывают возможность получения мощности в бегущей волне на частоте 14 ГГц свыше 100 МВт (напряженность поля около 400 кВ/см) в волноводе 17×8 мм². Выявлено влияние подготовки вакуумных уплотнений на электрическую прочность тракта и влияние положения стенок волновода относительно горизонтальной плоскости. Освоенная методика "бесконтактного" измерения параметров РБВ позволяет измерять коэффициент усиления и затухание испытываемых элементов без включения в кольцо измерительных ответвителей, которые могут вносить дополнительные потери и отражения в РБВ.

В результате испытаний элементов тракта выяснены их электрическая прочность: для измерительного направленного ответвителя — 60 МВт, для выходного окна клистрона — 40 МВт, и их слабые места.

Сделано компьютерное моделирование процесса накопления мощности в резонансном кольце при его импульсном возбуждении с учетом формы импульса. Выявлено влияние процесса накопления энергии в РБВ на форму импульсов в нагрузке и в отраженной волне. Результаты моделирования согласуются с результатами, полученными в эксперименте, и дают возможность определить влияние различных факторов на процесс усиления в импульсном режиме. Модель проверена также путем сравнения с результатами, полученными в СЛАКе.

Резонатор бегущей волны найдет применение при дальнейших работах по повышению мощности высокочастотной системы ВЛЭПП.

Авторы выражают благодарность Н.А. Аржанову, В.Н. Новикову и И.И. Иванову за помощь в работе.

Литература

1. The Stanford two-miles accelerator. R.V. Neal, general editor. W.A. Benjamin, Inc. 1968, New York, Amsterdam.
2. М.А. Авдыев, В.Е. Балакин, В.А. Долгашев, И.И. Иванов, Л.П. Катаенко, А.В. Минков, С.А. Мясоедов, В.Д. Шемелин. Ускоряющая секция ВЛЭПП на 14 ГГц. Препринт ИЯФ 93-7, Новосибирск, 1993.
3. W.R. Fowkes, R.S. Callin and A.E. Vlieks. High power RF window and waveguide component testing above 100 MW at X-band. 1992 Lin. Acc. Conf. Proceedings, 1992 August 24-28, Ottawa, Ontario, Canada.
4. Ю.Г. Штейн. Исследование резонаторов бегущей волны с целью их применения в ускорительной технике и технике СВЧ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Томск, 1973.
5. S.J. Miller. The traveling wave resonator and high power microwave testing. The Microwave Journal. September, 1960, p.50.
6. F.J. Tischer. Resonance properties of ring circuits. IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, January, 1957, p.51.
7. Е.Г. Бабкин. Настройка и испытание резонатора бегущей волны. Дипломная работа, НГУ, Новосибирск, 1994.
8. Н.Д. Семенов. Техническая электродинамика. "Связь", М., 1973.
9. А.Л. Фельдштейн, Л.Р. Явич, В.П. Смирнов. Справочник по элементам волноводной техники. ГЭИ, М.-Л., 1973.
10. M.A. Allen et al. Reliability and lifetime predictions of SLC klystrons. SLAC-PUB-4863, March 1989 (A).
11. V.E. Balakin, S.Yu. Kazakov et al. Experiments with VLEPP klystron. Report at the Linear Collider Conf. (LC95), Tsukuba, Japan, 1995.

*Е.Г. Бабкин, В.Е. Балакин, В.Ф. Кляев,
А.Н. Лукин, А.В. Мунков, О.В. Пирогов,
С.Л. Самойлов, Н.Г. Хавин, В.Д. Шемелин, Г.И. Яснев*

**Резонатор бегущей волны на 14 ГГц
с мощностью выше 100 МВт**

ИЯФ 95-48

Ответственный за выпуск С.Г. Попов
Работа поступила 30.05.1995 г.

Сдано в набор 5.06.1995 г.

Подписано в печать 20.06.1995 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1.7 печ.л., 1.4 уч.-изд.л.

Тираж 200 экз. Бесплатно. Заказ № 48

Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротапинтере ГНЦ РФ "ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН",
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.