

Резонансный фазоинвертор миллиметрового диапазона длин волн, переключаемый пучком электронов

© А.Л. Вихарев, А.А. Вихарев, А.М. Горбачев, О.А. Иванов, В.А. Исаев, С.В. Кузиков, М.А. Лобаев

Институт прикладной физики РАН,
603950 Нижний Новгород, Россия
e-mail: ioleg@appl.sci-nnov.ru

(Поступило в Редакцию 17 октября 2008 г.)

Представлены результаты исследования мощного фазоинвертора миллиметрового диапазона длин волн, переключаемого пучком электронов. Действие фазоинвертора основано на эффекте изменения фазы отраженной от СВЧ-резонатора волны, в зависимости от того, находится резонатор в резонансе или нет. Проведено численное моделирование нескольких конструкций фазоинвертора и экспериментально продемонстрирована их работа на низком уровне мощности. В экспериментах характерное время изменения фазы электромагнитной волны составляло 30 ns. Показано, что наряду с электронным пучком существенное влияние на величину и время изменения фазы отраженной волны оказывает приэлектронная плазма.

PACS: 84.90.+a

Введение

Метод пассивной компрессии, широко используемый для получения мощных коротких СВЧ-импульсов в ускорительной технике, реализован в резонансных и распределенных линиях задержки (SLED-II и DLDS) [1–3]. В этих устройствах сжатие импульса достигается при быстром изменении на 180° фазы СВЧ-генератора, возбуждающего резонатор или длинную линию задержки. В сантиметровом диапазоне длин волн для этого обычно используются клистроны, допускающие быстрое (за несколько наносекунд) изменение фазы излучаемой волны. Некоторые СВЧ-источники миллиметрового диапазона (например, магнетрон [4]) не позволяют быстро изменять фазу генерируемого излучения. Поэтому актуальной задачей представляется разработка электропрочного и быстродействующего фазоинвертора миллиметрового диапазона длин волн.

В настоящей работе рассматривается конструкция фазоинвертора, обладающего резонансными свойствами и изменяющего фазу отраженной от него волны, в зависимости от того, находится резонатор в резонансе или нет. Хорошо известно, что фаза отраженной от СВЧ-резонатора волны зависит от величины отстройки частоты падающей волны от резонансной частоты резонатора. Действительно, коэффициент отражения волны от резонатора определяется выражением [5]:

$$R = 1 - \frac{2\beta}{(1 + \beta)(1 + 2iQ_L \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0})}, \quad (1)$$

где $\beta = Q_0/Q_e$, Q_0 — собственная добротность, Q_e — добротность связи, $Q_L = Q_0Q_e/(Q_0 + Q_e)$ — нагруженная добротность резонатора, ω_0 — резонансная частота резонатора, ω — частота падающей волны. При этом, если собственная добротность резонатора превышает добротность связи ($Q_0 \gg Q_e$), то отраженные от резона-

тора вне резонанса и в резонансе волны имеют одинаковые амплитуды и находятся с противофазе. Эту особенность резонаторов можно использовать при разработке фазоинвертора СВЧ-волн. Так, если находящийся в резонансе резонатор быстро вывести из резонанса (изменить его резонансную частоту или внести поглощение), то, согласно (1), это приведет к сдвигу фазы отраженной от него волны на величину $\Delta\varphi = \pi$. Характерное время изменения фазы отраженной волны τ_{ph} зависит от соотношения между временем создания возмущения τ_i и временем установления колебаний в резонаторе:

$$\tau_r = Q_L/\omega_0. \quad (2)$$

В случае, когда $\tau_i < \tau_r$, характерное время изменения фазы равно $\tau_{ph} \approx \tau_r$, если $\tau_i > \tau_r$, то это время равно $\tau_{ph} \approx \tau_i$. Например, при добротности резонатора $Q_L = 10^2 - 10^3$ и частоте $f_0 = 34$ GHz характерное время установления колебаний в резонаторе составляет $\tau_p = 0.5 - 5$ ns. Поэтому при низкой добротности резонатора время изменения фазы будет определяться в основном временем создания возмущения.

В сантиметровом диапазоне длин волн предлагаются различные методы быстрого изменения резонансной частоты резонатора:

- а) путем создания плазмы в размещаемых в резонаторе газоразрядных трубках [6];
- б) изменением диэлектрической проницаемости или проводимости размещаемых в резонаторе полупроводников с помощью излучения лазера [7];
- в) введением в резонатор пучка электронов [8].

При использовании первых двух методов необходимо, чтобы поле на поверхности газоразрядных трубок или полупроводника было достаточно низким, чтобы обеспечить необходимую электропрочность, и одновременно достаточно высоким, чтобы обеспечить эффективную перестройку частоты резонатора. Для удовлетворения

этих противоречивых требований используются сложные электродинамические конструкции резонаторов и переключателей [9]. Кроме того, уменьшение геометрических размеров объемных резонаторов при переходе в миллиметровый диапазон длин волн делает практически невозможным, например, использование для этих целей газоразрядных трубок.

Перспективы использования электронного пучка в качестве активного переключателя для компрессоров СВЧ-импульсов диапазона 3 см были продемонстрированы в работе [8], в которой было показано, что такой ключ имеет высокую электропрочность и короткое (~ 1 ns) время переключения. Применение электронного пучка для изменения частотных характеристик резонатора в коротковолновом диапазоне длин волн также является привлекательным. В этом случае при малых размерах резонатора нет необходимости размещать в резонаторе дополнительные элементы, а электронная пушка может быть расположена вне резонатора. При этом электропрочность фазоинвертора будет определяться параметрами „пустого“ резонатора в вакууме, что в значительной мере снимает ограничения на величину коммутируемой СВЧ-мощности. Кроме того, инжекция электронов может производиться непосредственно в пучность стоячей волны в резонаторе, что существенно повышает эффективность перестройки частоты резонатора и снижает требования к величине тока пучка.

В настоящей работе представлены результаты исследования резонансного фазоинвертора миллиметрового диапазона длин волн, переключаемого пучком электронов. Проведены численное моделирование и экспериментальная проверка работы различных конструкций фазоинверторов на низком уровне мощности.

1. Расчет параметров фазоинвертора

1.1. Расчет резонатора фазоинвертора

Основу фазоинвертора составляет резонатор, возбуждаемый на моде H_{01} круглого волновода. Как известно, эта мода, имеющая нулевое электрическое поле на стенках волновода, обладает низкими омическими потерями и высокой электропрочностью. Рассматривалось несколько вариантов конструкции фазоинвертора. Все они представляли собой отрезок круглого волновода, ограниченный двумя отражателями: входным и выходным. В качестве входного отражателя использовалась закритическая диафрагма, через которую осуществлялась связь резонатора с входным волноводом. Выходной отражатель представлял собой диафрагму, внутри которой размещался катод. Коэффициент отражения от выходного отражателя подбирался близким к единице. Частотная характеристика и распределение электрического СВЧ-поля в фазоинверторе рассчитывались методом FDTD [10]. Используемые при расчетах схемы резонаторов и соответствующие им распределения электрического поля представлены на рис. 1.

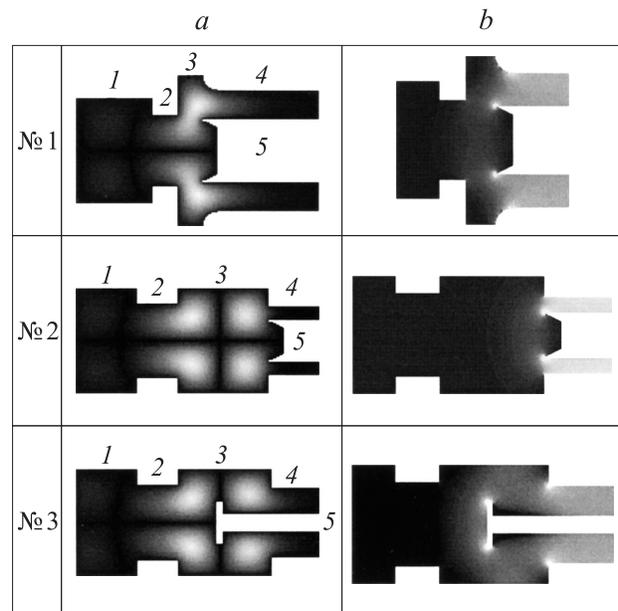


Рис. 1. Различные типы фазоинверторов, переключаемых электронным пучком: 1 — входной волновод; 2, 4 — входная и выходная диафрагмы, 3 — резонатор, 5 — катод. *a* — распределение среднеквадратического электрического СВЧ-поля в резонаторе; *b* — распределение модуля статического электрического поля в резонаторе.

В первом варианте (№ 1) конструкции выходным отражателем являлся катод, при этом его кромки находились практически в пучности поля возникающей в резонаторе стоячей волны. Поэтому влияние катода на параметры резонатора в этой конструкции особенно велико. Во второй конструкции (№ 2) отражение происходило в основном от выходной диафрагмы, что позволяло изменять положение катода относительно резонатора без существенного изменения характеристик последнего. В третьей конструкции (№ 3) *T*-образный катод располагался в центре резонатора, так что эмитированные с его поверхности электроны оказывались в непосредственной близости от пучностей СВЧ-поля. При этом сам катод находился в узлах поля и не оказывал влияния на структуру полей в резонаторе и его добротность.

Характерный вид резонансной кривой и зависимость фазы отраженной от резонатора волны от частоты приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что отстройка от резонанса приводит к изменению фазы отраженной от резонатора СВЧ-волны на величину $\Delta\varphi = 180^\circ$. По характерной ширине резонансной кривой находилась нагруженная добротность резонатора, а по ее глубине определялся параметр $\beta = Q_0/Q_e$. Размеры входной диафрагмы подбирались таким образом, чтобы обеспечить значения параметра $\beta > 20$. В этом случае амплитуды волн, отраженных от резонатора вне резонанса и в резонансе, практически совпадают. Собственная доброт-

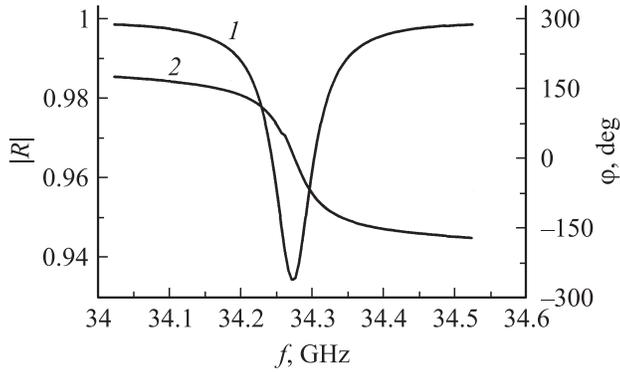


Рис. 2. Зависимость амплитуды 1 и фазы 2 отраженной от резонатора СВЧ-волны от частоты.

ность Q_0 определялась проводимостью медных стенок резонатора, которая принималась в расчетах равной $\sigma = 58 \cdot 10^6 \text{ 1}/\Omega \cdot \text{cm}$. Расчеты показали, что для обеспечения такого параметра β при омической добротности $Q_0 = 10^4$ значение коэффициента отражения падающей волны от входной диафрагмы должно превышать значение $R \geq 0.9$.

Для создания электронного пучка использовался катод с острыми краями (радиус кривизны 0.1–0.2 mm), на который подавался импульс высокого напряжения отрицательной полярности с амплитудой $U = 50\text{--}100 \text{ kV}$ и длительностью $\tau = 100 \text{ ns}$. Известно, что при достаточно высоком напряжении происходит усиление поля на острых краях катода, приводящее к возникновению автоэлектронной эмиссии. Расчет статического поля в фазоинверторе был проведен при напряжении на катоде, равном $U = 50 \text{ kV}$. Распределение модуля статического электрического поля для различных вариантов конструкции фазоинвертора приведено на рис. 1, b. Как показывают расчеты, максимальная напряженность электрического поля достигается вблизи острой кромки катода и составляет величину $|E| \approx 500 \text{ kV/cm}$, достаточную для возникновения автоэлектронной эмиссии. Сравнение рис. 1, a и 1, b показывает, что силовые линии электростатического поля сосредоточены вблизи пучностей электромагнитной волны возбуждаемой в резонаторе фазоинвертора. Поэтому можно полагать, что основная часть электронов, вылетевших с катода в результате автоэлектронной эмиссии, будет перемещаться вдоль силовых линий в область пучности СВЧ-поля в резонаторе. В результате эти электроны будут эффективно взаимодействовать с полем моды H_{01} , приводя к изменению резонансной частоты резонатора.

1.2. Параметры электронного пучка, необходимые для изменения фазы отраженного сигнала

Рассмотрим параметры электронного пучка, необходимые для изменения фазы отраженной от резонатора

электромагнитной волны. Для этого оценим концентрацию N_e (общее число N_Σ) электронов, необходимую для вывода резонатора из резонанса (сдвига частоты на полуширину резонансной кривой $\Delta f_{0.5}$) при инжекции пучка в резонатор. Сдвиг резонансной частоты Δf , вызванный появлением электронов в резонаторе, можно оценить на основании теории возмущений [11]:

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{1}{2N_c} \frac{\int_{V_{pl}} N_e E_q^2 dV}{\int_{V_r} E_q^2 dV}, \quad (3)$$

где f_0 — собственная частота резонатора, N_c — критическая концентрация электронов (для $f_0 = 34 \text{ GHz}$, $N_c = 1.4 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$), V_r и V_{pl} — объемы резонатора и области, занимаемой электронами соответственно, E_q — напряженность электрического поля возбуждаемой моды резонатора. Предположим, резонатор для фазоинвертора имеет добротность $Q_L = 3 \cdot 10^2$ и объем $V_r = 3 \text{ cm}^3$. В этом случае оценки по формуле (3) дают следующие результаты:

1. при инжекции пучка в максимум электрического поля общее число электронов в резонаторе должно превышать величину $N_\Sigma \geq 2N_c V_r A / Q_L$, где A — формфактор, определяемый распределением поля в резонаторе (для моды H_{01} , $A \approx 0.5$). Подставляя остальные параметры, получаем оценку общего числа электронов $N_\Sigma \geq 10^{11}$;

2. при инжекции пучка равномерно в объем резонатора концентрация электронов должна превышать $N_e \geq 2N_c / Q_L \approx 9 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, а общее число электронов $N_\Sigma \geq 2 \cdot 10^{11}$.

Оценим необходимые для создания такого количества электронов параметры электронного пучка. Величину тока пучка можно определить из формулы:

$$I(A) = eN_c S V_e = eN_\Sigma V_e / L, \quad (4)$$

где e — заряд электрона, S и L — площадь поперечного сечения и длина электронного пучка соответственно, $V_e = 5.92 \cdot 10^7 \sqrt{U}$ — скорость электронов, U — напряжение на катоде. Расчеты показали, что при $U \sim 100 \text{ kV}$ и длине пучка $L \sim 1 \text{ cm}$ для достижения величины $N_\Sigma \geq 10^{11}$ ток пучка должен превышать значение $I \geq 300 \text{ A}$.

Предельный ток автоэлектронной эмиссии, который может быть получен в конструкции данного типа, определяется выражением [12]:

$$I_b = \left(\frac{mc^3}{2e} \right) \frac{(\gamma_a^{2/3} - 1)^{3/2}}{\ln(r_A/r_C)}, \quad (5)$$

где $\gamma_a = 1 + eU/mc^2$ — релятивистский фактор, r_A — радиус анода, r_C — радиус катода. Из формулы (5) для характерных параметров фазоинвертора $U = 100 \text{ kV}$, $r_A = 0.8 \text{ cm}$, $r_C = 0.4 \text{ cm}$ получаем значение $I_b \approx 600 \text{ A}$.

2. Экспериментальная проверка работы фазоинвертора на малом уровне мощности

2.1. Схема экспериментальной установки и параметры электронного пучка

Работа фазоинвертора с переключением пучком электронов проверялась экспериментально на низком уровне мощности. Схема эксперимента приведена на рис. 3. На вход фазоинвертора подавался непрерывный сигнал на частоте $f_0 = 34.272$ GHz от диагностического генератора 1. Излучение генератора на моде H_{10} прямоугольного волновода трансформировалось в моду H_{01} круглого волновода и через модовый фильтр 5 поступало на вход резонатора 7. Отраженная от фазовращателя электромагнитная волна по измерительному волноводному тракту подавалась на смесительный детектор 17 для сравнения с фазой опорного излучения от СВЧ-генератора. Ответвление части мощности генератора в опорный тракт осуществлялось направленным ответвителем 15. Величина отраженной от фазовращателя мощности $P(t)$ контролировалась с помощью детектора 16, подключенного к измерительному волноводному тракту через направленный ответвитель с переходным ослаблением 13 dB и учитывалась при обработке сигнала с фазового детектора 17. На расположенный в резонаторе катод 9 от генератора высоковольтных импульсов 13 подавались импульсы с амплитудой 100 kV и длительностью 100 ns. Фазоинвертор откачивался ионизационным насосом до давления $p = 10^{-5}$ Торг. В экспериментах использовались катоды из меди и нержавеющей стали. Ток электронного пучка измерялся поясом Роговского 12, калиброванным с помощью безиндукционного шунта.

На начальной стадии экспериментов исследовалась возможность достижения в разработанных конструкциях параметров электронного пучка, необходимых для эффективной перестройки частоты фазоинвертора. Ха-

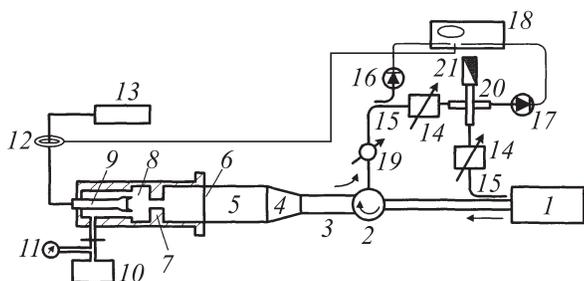


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 — СВЧ-генератор, 2 — циркулятор, 3 — трансформатор моды $H_{10} \rightarrow H_{01}$, 4 — конус, 5 — модовый фильтр, 6 — безотражательное кварцевое окно, 7 — подвижная диафрагма, 8 — резонатор, 9 — катод, 10 — насос, 11 — вакуумметр, 12 — пояс Роговского, 13 — генератор высоковольтных импульсов, 14 — аттенюатор, 15 — направленный ответвитель, 16, 17 — СВЧ-детектор, 18 — осциллограф, 19 — фазовращатель, 20 — двойной тройник, 21 — согласованная нагрузка.

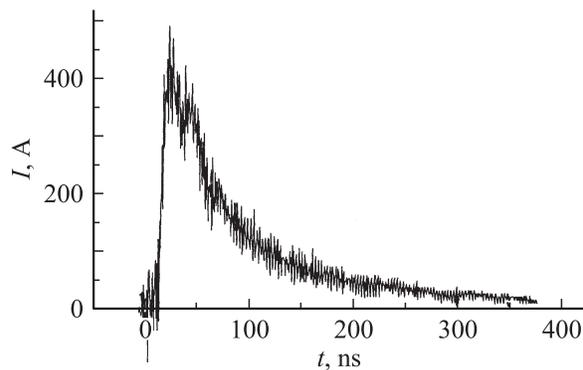


Рис. 4. Характерная осциллограмма сигнала с пояса Роговского (медный катод).

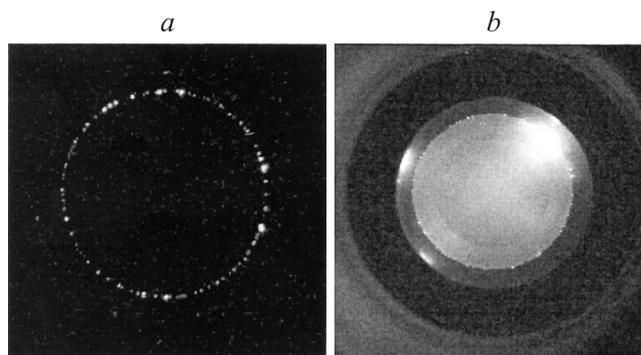


Рис. 5. Фотографии медного катода в момент подачи высоковольтного импульса: *a* — катодные пятна, *b* — катодные пятна и плазма.

актерная осциллограмма тока приведена на рис. 4. Измерения показали, что ток пучка достигает значений 400–500 А и имеет длительность ~ 50 –100 ns, это совпадает с приближенной оценкой тока, сделанной по формуле (5).

На рис. 5 приведены фотографии катода, сделанные в момент подачи на него высоковольтного импульса. На рис. 5, *a* хорошо видны катодные пятна, возникающие на заостренных краях катода. Согласно существующим представлениям [13], эти пятна представляют собой плазменные образования, возникающие при взрыве микроострий на катоде вследствие автоэлектронной эмиссии. Именно эти образования являются основными источниками электронов в пучке. Эксперименты показали, что иногда на поверхности резонатора (в местах попадания электронного пучка) образуется плазма (см. рис. 5, *b*). Возникновение плазмы также может приводить к изменению резонансной частоты фазоинвертора. При этом время, в течение которого фазоинвертор находится в переключенном состоянии, определяется временем распада этой плазмы.

На следующем этапе изучалось влияние электронного пучка на параметры резонатора. В этом эксперименте использовался фазоинвертор № 1, приведенный на

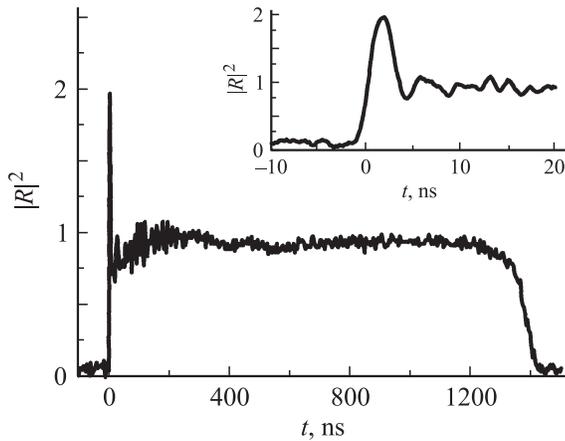


Рис. 6. Характерная осциллограмма отраженного сигнала от резонатора фазоинвертора первой конструкции при подаче на катод высоковольтного импульса.

рис. 1. Выходной отражатель фазоинвертора состоял из диафрагмы диаметром $D_e = 16$ mm и катода диаметром $D_c = 8$ mm, который фактически является частью резонатора. При этом размер катода подбирался таким, чтобы силовые линии статического поля проходили через пучность электрического СВЧ-поля, обеспечивая тем самым наибольшее влияние электронного пучка на частоту резонатора.

При подаче на катод высоковольтного импульса в резонатор инжектировался пучок электронов. Это приводило к изменению резонансной частоты резонатора, его выходу из резонанса и соответственно возрастанию отраженного сигнала.

Характерная осциллограмма отраженного от фазоинвертора сигнала приведена на рис. 6. Из рисунка видно, что ввод электронного пучка приводит к полному выходу резонатора из резонанса, при этом характерное время переключения не превышало нескольких наносекунд. Пик на фронте переключения связан с излучением энергии, накопленной в резонаторе. Отметим также, что время, в течение которого фазоинвертор находился в переключенном состоянии, составляло $1.3\text{--}1.4\ \mu\text{s}$ и определялось временем распада образующейся под воздействием электронного пучка плазмы. Таким образом, электронный пучок с током $I \sim 400$ А приводит к сдвигу собственной частоты резонатора на величину, превышающую ширину его резонансной кривой.

2.2. Измерение фазы отраженного сигнала

Определение фазы отраженной от фазоинвертора волны при инъекции пучка электронов проводилось для конструкций, изображенных на рис. 1 (№ 2 и 3). Экспериментально измеренные значения параметров резонатора для этих конструкций составляли $Q_L = 320$, $\beta = 18\text{--}20$ и находились в хорошем соответствии с результатами расчетов. Амплитуда отраженной волны при

таких параметрах фазоинвертора достигала значений 0.9 от падающей. Фаза отраженного сигнала находилась из интерференционных измерений. Интерференционный сигнал возникал при суммировании излучения измерительного и опорного тракта, которое осуществлялось в E -плече двойного тройника 20, и регистрировался фазовым детектором 17, рис. 3. Напряжение на выходе детектора зависело как от мощности исследуемой и опорной электромагнитных волн $P(t)$ и P_0 , так и от разности фаз этих волн $\varphi(t)$ [14]:

$$U(t) \sim P_0 + P(t) + 2\sqrt{P_0 P(t)} \cos(\varphi(t) + \varphi_0). \quad (6)$$

Здесь φ_0 — начальная фаза, устанавливаемая фазовращателем 19. Для балансировки мощности измерительного и опорного тракта в каждом из волноводных трактов устанавливались аттенюаторы 14. Начальная разность фаз между излучением опорного и измерительного плеча интерферометра изменялась с помощью фазовращателя 19 и могла устанавливаться равной 0 или 180° . В первом случае выходной сигнал с детектора максимален, а во втором — равен нулю.

При подаче на катод фазоинвертора (№ 2, рис. 1) высоковольтного импульса в резонатор инжектировался пучок электронов и происходило образование приэлектродной плазмы. Это приводило к выходу резонатора из резонанса, изменению фазы отраженной от него волны и соответственно амплитуды сигнала в выходном канале интерферометра. При этом характерное время изменения фазы зависело от местоположения катода. Характерные осциллограммы сигналов с фазового детектора для фазоинвертора второго типа при различных расстояниях катода от резонатора приведены на рис. 7, а.

Эксперименты показали, что при большом расстоянии между катодом и резонатором (кривая 3) на осциллограмме можно выделить две характерных стадии изменения фазы. На начальной стадии происходит быстрое изменение фазы, определяемое непосредственным воздействием пучка электронов. Однако этого воздействия недостаточно для изменения фазы на 180° . На более поздней стадии происходит изменение резонансной частоты, связанное с возникновением приэлектродной плазмы и ее диффузией в пучность электромагнитной волны, возбуждаемой в резонаторе фазоинвертора. Появление плазмы приводит к полной расстройке резонатора и изменению фазы отраженного сигнала на величину, близкую к 180° . При уменьшении расстояния между катодом и резонатором время диффузионного разлета существенно сокращается, обе стадии сближаются и переключение фазы происходит более быстро (кривые 1 и 2 на рис. 7, а). Характерное время переключения фазы в этом эксперименте составляло $30\text{--}40$ ns. Таким образом, проведенные эксперименты показали, что для быстрого и эффективного переключения фазы необходимо располагать катод максимально близко к пучности волны.

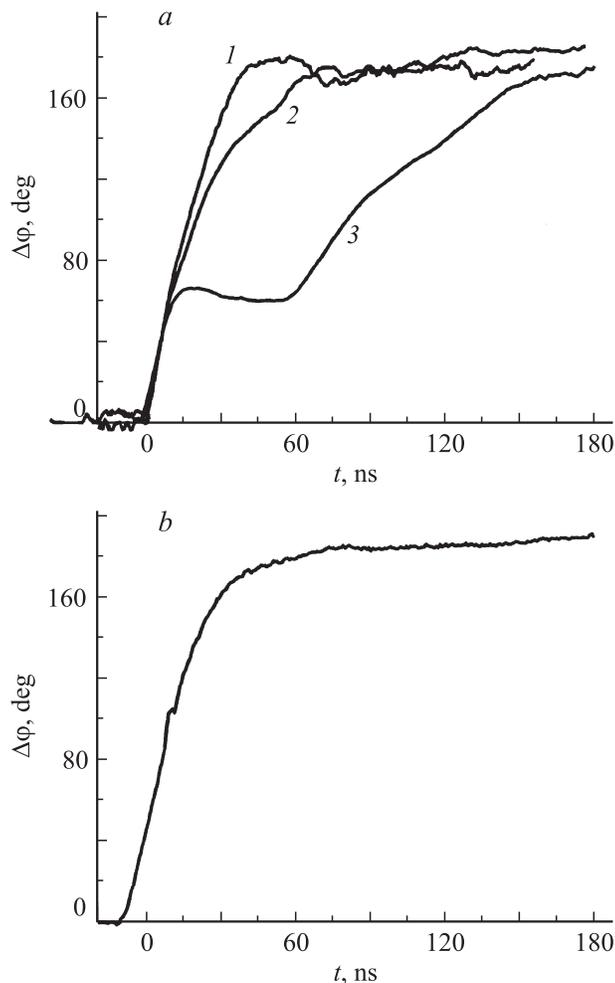


Рис. 7. Характерные осциллограммы сигнала с фазового детектора: *a* — фазоинвертор второго типа, катод вдвинут внутрь резонатора: 1 — на 3.3, 2 — на 1.3 mm, 3 — катод выдвинут из резонатора на 3 mm; *b* — фазоинвертор с *T*-образным катодом.

Этому условию удовлетворяет третий тип фазоинвертора (см. рис. 1). В этой конструкции использовался *T*-образный катод, который вводился в центр резонатора в область узла поля электромагнитной волны. Расчеты и эксперименты показали, что при таком расположении катод практически не оказывает влияния на электродинамические характеристики резонатора. В то же время в такой конструкции большая часть площади катода находится в непосредственной близости от пучностей резонансной моды, что позволяет обеспечивать более быстрое взаимодействие вылетевших с катода электронов и прикатодной плазмы с электромагнитным полем в резонаторе. Распределение статического электрического поля в фазоинверторе приведено на рис. 1 (№ 3). Расчеты показали, что вблизи плоской части катода преобладает E_z -компонента, а в области катододержателя и периметра расширенной части E_r -компонента электрического поля. Однако электрическое поле между катодной ножкой (диаметр 2 mm) и корпусом фазоинвертора

(диаметр 9.2 mm) в области выходной диафрагмы при используемых в расчетах параметрах также оказывается достаточно большим.

Для фазоинвертора с *T*-образным катодом были проведены измерения фазы отраженной электромагнитной волны при подаче на катод импульса высокого напряжения. Характерные осциллограммы отраженного сигнала приведены на рис. 7, *b*. Из рисунка видно, что фаза отраженного сигнала неравномерно изменяется в течение времени переключения. После быстрого переключения происходит некоторое замедление изменения фазы отраженной волны, так что полное время переключения на 180° составляет $\sim 30\text{--}40$ ns. Причина такого замедления может быть связана с пробоем промежутка выходная диафрагма–катододержатель (см. рис. 1, *b*). Действительно, наблюдения за катодом в момент подачи на него высоковольтного импульса показали, что за областью расширенной части катода возникает яркое свечение приэлектродной плазмы. Возможным путем устранения этого недостатка может быть модификация формы катода с целью получения более высоких статических полей вблизи его кромок и усовершенствование конструкции катододержателя с целью предотвращения возникновения токов утечек и пробоя.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали как принципиальную работоспособность резонансного фазоинвертора, так и возможность оптимизации его характеристик. Например, для увеличения амплитуды отраженной от резонатора в резонансе волны собственную добротность резонатора фазоинвертора необходимо увеличить до значений $Q_0 = (1.5\text{--}2) \cdot 10^4$. При этом выбором диаметра входной диафрагмы можно получить нагруженную добротность $Q_L = 200\text{--}300$ и значения параметра $\beta = 50\text{--}70$. Коэффициент отражения СВЧ-волны будет иметь в этих условиях величину порядка 0.95–0.97. Дальнейшее уменьшение времени переключения фазы, как показывают предварительные расчеты, может быть осуществлено путем оптимизации формы, расположения и размеров катода.

В работе предложено несколько конструкций фазоинверторов, переключаемых электронным пучком. Продемонстрирована работоспособность этих конструкций на низком уровне мощности с характерным временем изменения фазы СВЧ-излучения ~ 30 ns. Показано, что наряду с электронным пучком существенное влияние на величину и время изменения фазы отраженной волны оказывает приэлектродная плазма.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 05-08-50246.

Авторы выражают благодарность Н.Г. Колганову за помощь в разработке конструкции катода.

Список литературы

- [1] *Wilson P.B., Farkas Z.D., Ruth R.D.* // Proc. of Linear Accel. Conf. Albuquerque, NM, 1990. SLAC-PUB-5330.
- [2] *Farkas Z.D., Hogg H.A., Loew G.A., Wilson P.B.* // Proc. of the 9th Int. Conf. of High Energy Accelerators. 1974. SLAC-PUB-1453.
- [3] *Farkas Z.D.* // IEEE Trans. Microwave Theory. Tech. 1986. Vol. 34. P. 1036.
- [4] *Nezhevenko O.A., Yakovlev V.P., Hirshfield J.L.* et al. // Proc. of the 1999 Particle Accelerator. Piscataway, New Jersey, 2000. Vol. 2. P. 1049.
- [5] *Pippard A.B.* The physics of vibration. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. 656 p.
- [6] *Vikharev A.L., Gorbachev A.M., Ivanov O.A.* et al. // Proc. of the 11th Advanced Accelerator Concepts Workshop. Stony Brook, New York, 2004. AIP Conf. Proc. Vol. 737. P. 790.
- [7] *Tantawi S.G., Ruth R.D., Vlieks A.E., Zolotarev M.* // VII Workshop on Advanced Accelerator Concept, 1996.
- [8] *Birx D.L., Scalapino D.J.* // J. Appl. Phys. 1980. Vol. 51. P. 3629.
- [9] *Vikharev A.L., Ivanov O.A., Gorbachev A.M.* et al. // NATO Science Series II. Vol. 203. „Quasi-Optical Control of Intense Microwave Transmission“ / Ed. by J.L. Hirshfield, M.I. Petelin. 2005. P. 199–216.
- [10] *Taflove A.* Advances in computational electrodynamics. The Finite-Difference Time-Domain Method. Boston, London: Artech House, 1998. 724 p.
- [11] *Голант В.Е.* Сверхвысокочастотные методы исследования плазмы. М.: Наука, 1968. 327 с.
- [12] *Bygaev S.P., Iiin V.P., Koshelev V.I.* et al. // Proc. of Relativistic Electronics. Gorky, 1979. P. 5–75.
- [13] *Месяц Г.А., Прокуроровский Д.И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
- [14] *Чернушенко А.М., Майбородин А.В.* Измерение параметров электронных приборов дециметрового и сантиметрового диапазона длин волн. М.: Радио и связь, 1986. 328 с.