

09;12

Когерентное сложение мощности наносекундных релятивистских СВЧ-генераторов

© А.А. Ельчанинов,¹ А.И. Климов,¹ О.Б. Ковальчук,¹ Г.А. Месяц,² И.В. Пегель,¹
И.В. Романченко,¹ В.В. Ростов,¹ К.А. Шарыпов,³ М.И. Яландин³

¹ Институт сильноточной электроники СО РАН,
634055 Томск, Россия
e-mail: rostov@ife.hcei.tsc.ru

² Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН,
119991 Москва, Россия
e-mail: mesyats@sci.lebedev.ru

³ Институт электрофизики УрО РАН,
620016 Екатеринбург, Россия
e-mail: yalandin@ier.uran.ru

(Поступило в Редакцию 30 апреля 2010 г.)

Экспериментально показана возможность создания двухканального наносекундного релятивистского СВЧ-генератора со стабильностью фаз в каждом канале, достаточной для когерентного сложения их электромагнитных полей. В эксперименте вакуумные диоды двух независимых сверхизлучательных ламп обратной волны диапазона частот 10 GHz были подключены к общему источнику напряжения с фронтом субнаносекундной длительности, что обеспечивало фиксацию начальной фазы электромагнитных колебаний. Измеренные значения разброса разности фаз электромагнитных колебаний между каналами составляют единицы процентов от периода колебаний.

Введение

В течение последних нескольких десятков лет в релятивистской СВЧ-электронике остаются актуальными исследования по увеличению импульсной мощности СВЧ-излучения [1]. Как показали эти исследования, возможности для наращивания мощности исчерпывают себя даже при малой (порядка единиц наносекунд) длительности СВЧ-импульсов и ограничиваются СВЧ-разрядом в вакуумных электродинамических системах и элементах передающих трактов. Для практических приложений важно повышать пиковую мощность за счет увеличения КПД таких устройств при сохранении массы и габаритов установок.

Как известно [2–4], наибольшие удельные характеристики достигаются в режиме сверхизлучения коротких электронных пучков в протяженных замедляющих системах релятивистских ламп обратной волны (генераторы СИ-ЛОВ). Так, в диапазонах 3–10 и 38 GHz были получены гигаваттные уровни мощности излучения. При этом коэффициент преобразования мощности электронного пучка в мощность электромагнитной волны мог достигать 50% в случае низких магнитных полей и превышать 100% в сильном магнитном поле при энергетическом КПД до 20%.

Между тем энергетические возможности импульсно-периодических сильноточных ускорителей, применяемых в таких СВЧ-источниках, используются далеко не полностью. Главным образом это обусловлено тем, что внутреннее сопротивление генератора высоковольтных импульсов, в качестве которого обычно используется

коаксиальная формирующая линия (ФЛ) со встроенным трансформатором Тесла [5], существенно меньше импеданса коаксиального диода с магнитной изоляцией (КДМИ), являющегося нагрузкой генератора и формирующего трубчатый электронный пучок. Поэтому представляет интерес разработка установок, в которых несколько (N) СВЧ-генераторов подключаются параллельно к одному, сравнительно низкоимпедансному источнику высоковольтных импульсов. В этом случае можно не только более эффективно использовать энергию источника питания, но и нарастить плотность потока мощности в свободном пространстве пропорционально N^2 за счет когерентного сложения электромагнитных полей излучения отдельных каналов при условии синхронизации фазы СВЧ-колебаний всех генераторов такой многоканальной системы.

Известным способом синхронизации фаз в многоканальной системе СВЧ-источников является использование усилительных схем [6]. В этом случае отдельные усилительные каналы связываются по фазе входным сигналом задающего СВЧ-источника сравнительно малой мощности. Однако релятивистские усилители с сильноточными электронными пучками намного сложнее генераторов [7,8] и поэтому широкого распространения не получили. Предпринимались попытки синхронизации нескольких генераторов посредством их электродинамической связи на высокой частоте [9] с целью установления фазированных колебаний за время переходного процесса. Как оказалось, возможности для электродинамического навязывания фазы в генераторе ограничены.

Настоящая работа посвящена созданию установки на основе двух релятивистских СИ-ЛОВ диапазонов частот 10 GHz, запитываемых от общего источника высоковольтных импульсов с фиксированным и достаточно крутым фронтом нарастания напряжения. Задача экспериментов заключалась в измерении стандартного отклонения разности фаз СВЧ-колебаний между каналами от импульса к импульсу. Выбор длительности фронта напряжения был продиктован результатами наших предыдущих экспериментов с использованием обостряющих разрядников либо ферритовых обострителей в коаксиальных линиях перед КДМИ и СИ-ЛОВ на 3.6 и 10 GHz [10,11]. Эти эксперименты показали возможность фиксации фазовой структуры СВЧ-импульсов по отношению к фронту питающего высоковольтного импульса с точностью порядка стандартного отклонения самой длительности этого фронта.

В ходе предшествующих работ существенное развитие получила техника формирования стабильных высоковольтных наносекундных импульсов напряжения, а также методы диагностики с пикосекундным разрешением [12–14]. Например, особое внимание было уделено изучению условий стабилизации формирования сильноточных электронных пучков независимыми взрывоэмиссионными катодами, на которые подавался расщепленный импульс ускоряющего напряжения. Было показано [15], что несмотря на некоторое нарастание задержки тока относительно субнаносекундного фронта напряжения по мере увеличения числа импульсов (что обусловлено сглаживанием микрорельефа эмиссионной поверхности катодов) в двух идентичных вакуумных диодах электронные пучки инжектируются со взаимным временным разбросом в единицы пикосекунд. Примечательно, что эта величина оказалась существенно меньше соответствующего отклонения в каждом канале, что свидетельствует о почти синхронном сдвиге фронтов нарастания тока от импульса к импульсу.

Схема эксперимента

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Источником ускоряющих высоковольтных импульсов является импульсно-периодический генератор СИНУС-200. Маслонаполненная ФЛ с волновым сопротивлением 30Ω заряжается до напряжения 550 kV с помощью встроенного трансформатора Тесла. ФЛ коммутируется на передающую коаксиальную линию неуправляемым азотным разрядником с принудительной прокачкой газа. Типичное стандартное отклонение пробивного напряжения разрядника при частоте следования импульсов до 100 Hz не превышает 2%.

Эксперименты проводились как в режиме редко повторяющихся импульсов, так и в импульсно-периодическом режиме пакетами длительностью от единиц, до нескольких десятков секунд. Сформированный импульс напряжения с длительностью на полувысо-

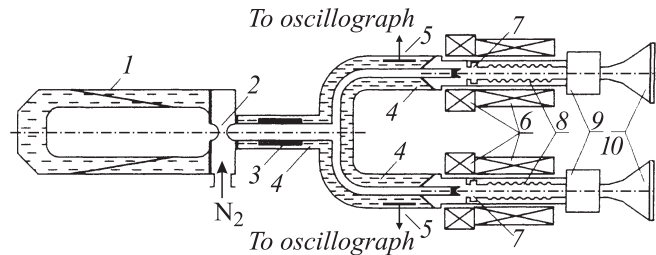


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с параллельными СИ-ЛОВ: 1 — генератор высоковольтных импульсов СИНУС-200, 2 — искровой разрядник с продувкой газа, 3 — ферритовый обостритель, 4 — передающие коаксиальные линии, 5 — емкостные делители напряжения, 6 — обмотки соленоидов постоянного тока, 7 — резонансные рефлекторы, 8 — замедляющие системы, 9 — преобразователи волны TM_{01} в волну TE_{11} круглого волновода, 10 — рупорные антенны с вакуумными окнами.

те 9 ns и фронтом около 2 ns поступал на обостритель в виде отрезка коаксиальной передающей линии с ферритовым заполнением [16]. Далее импульс с длительностью фронта 0.5 ns (при измерении участка между уровнями 0.2–0.8 от пикового напряжения) подавался по коаксиальному тракту с масляной изоляцией через Т-образный коаксиальный тройник и 90-градусные повороты на два КДМИ, формирующие трубчатые электронные пучки с током 2.5 kA и кинетической энергией частиц 300 keV.

Формирование и транспортировка пучков через замедляющие системы обеспечивалась двумя одинаковыми соленоидами постоянного тока, создающими магнитное поле 0.55 T в замедляющей системе и 0.7 T в области катода. Обмотки соленоидов имели масляное охлаждение, были включены последовательно и питались от выпрямителя, подключенного к преобразователю сетевой частоты 50 Hz/400 Hz мощностью 100 kW. Таким образом, СВЧ-генераторы работали в области сравнительно малых магнитных полей, ниже циклотронного резонанса. Как и в предыдущих экспериментах с аналогичным уровнем ускоряющего напряжения [2,10,11], оптимальный импеданс КДМИ в СИ-ЛОВ составляет величину около 120Ω . Для улучшения согласования в передающих линиях имеется ступенчатое повышение волнового сопротивления до 75Ω . Металлодиэлектрические катоды диодов изготовлены из фольгированного стеклотекстолита, их диаметр 30 mm, толщина кромки 0.2 mm. Геометрия замедляющей системы с длиной 25 периодов гофрировки и резонансным рефлектором оптимизировалась в численном эксперименте с помощью РИС-кода КАРАТ [17]. Мощность генерируемых импульсов в каждом канале достигала 300 MW. Для вывода излучения рабочая волна TM_{01} в каждом из каналов преобразовывалась с помощью конвертора [18] в волну TE_{11} круглого волновода, которая излучалась рупорной антенной в свободное пространство в виде гауссова волнового пучка. Используются идентичные конические рупорные антенны с диаметром полиэтилен-

нового выходного окна 400 mm при расстоянии между осями антенн 500 mm.

Методики измерения характеристик двухканального СВЧ-источника

СВЧ-излучение рупорных антенн ослаблялось с помощью апертурных аттенуаторов (рис. 2) с коэффициентом ослабления около 40 dB. Аттенуаторы выполнены в металлическом корпусе с диаметром юветы по размеру окна (400 mm), заполненной 95-процентным этиловым спиртом и закрытой диэлектрическим окном оптимальной толщины с целью уменьшения отражения СВЧ-излучения. Во внешней металлической стенке каждого аттенуатора выполнено отверстие связи со стандартным волноводом сечением 23×10 mm. В волноводах сигналы выравнивались дополнительно по амплитуде волноводными аттенуаторами и с помощью коаксиально-волноводных переходов передавались для регистрации по широкополосным коаксиальным кабелям TCOM-600. Для получения амплитуды сигнала, приемлемой для измерений, в кабельных линиях использовались широкополосные коаксиальные аттенуаторы фирм Radiall и Barth Electronics.

Для измерений использовались схемы, изображенные на рис. 2. В схеме, представленной на рис. 2, *a*, регистрировались радиосигналы каждого из каналов раздельно. В схеме на рис. 2, *b* выполнялась регистрация суммарного радиосигнала. А в случае схемы на рис. 2, *c* регистрировался продетектированный суммарный радиосигнал каналов. Использовался цифровой осциллограф Tektronix TDS6154C с аналоговой полосой 15 GHz и периодом дискретизации 25 ps, а для схемы на рис. 2, *c* — осциллограф TDS 6604 с полосой 6 GHz и периодом дискретизации сигнала 50 ps. Осциллографы запускались по фиксированному уровню на крутом участке фронта импульса напряжения.

Для оценки погрешности измерения разности фаз прямым методом, представленным на рис. 2, *a*, сигнал от одной из антенн разделялся и подавался одновременно на два канала осциллографа. Стандартное отклонение для времени задержки между сигналами в двух каналах составило около 1 ps.

В методах, представленных на рис. 2, *b, c*, для оценки разброса разности фаз из данных о разбросе амплитуд суммарного сигнала предполагалось наличие приблизительно одинаковых огибающих $U(t)$ и амплитуд сигналов U_0 ($U_0 = U_{\max}(t)$) в каждом из каналов. Суммарный сигнал $U_S(t)$ выражается через разность фаз $\delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ следующим образом:

$$U_S(t) = 2U(t) \cos\left(\frac{\delta\varphi}{2}\right) \sin\left(\omega t + \frac{(\varphi_1 + \varphi_2)}{2}\right), \quad (1)$$

где ω — средняя за импульс угловая частота СВЧ-колебаний. Обозначим для краткости $U_{S0} =$

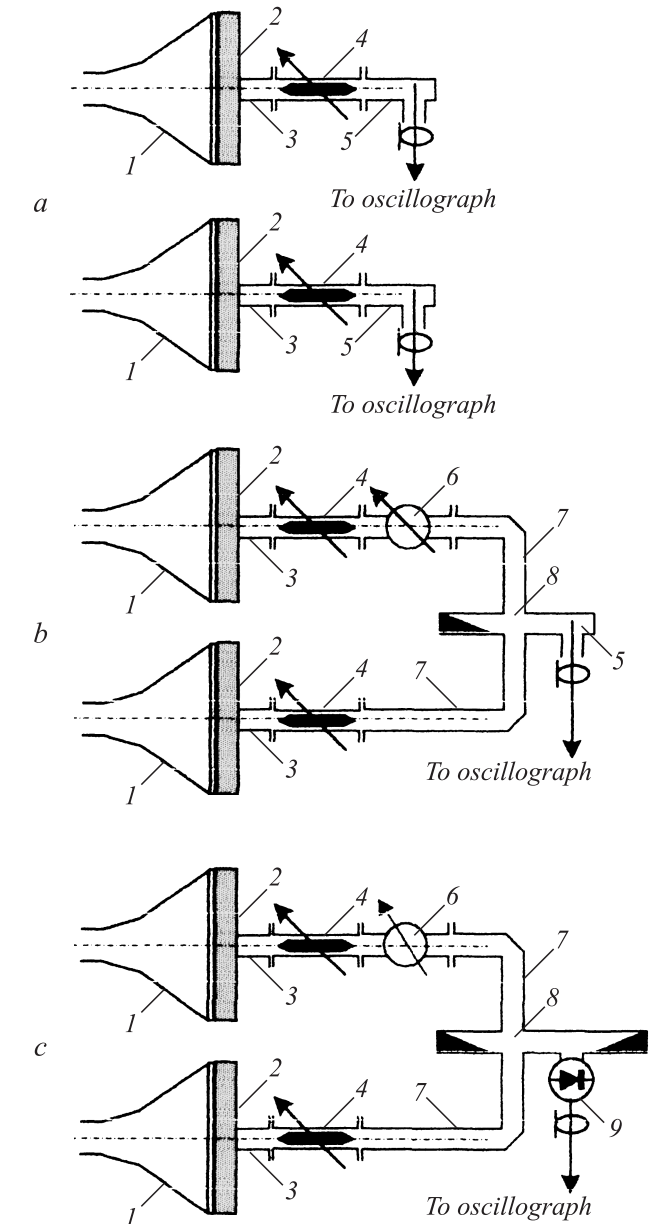


Рис. 2. Схемы измерений характеристик СВЧ-импульсов: *a* — при регистрации радиосигналов в каналах, *b* — при регистрации суммарного радиосигнала на несущей частоте, *c* — суммарного продетектированного сигнала. 1 — излучающие рупорные антенны с вакуумными окнами, 2 — жидкостные апертурные аттенуаторы, 3 — выходные волноводы аттенуаторов, 4 — волноводные аттенуаторы, 5 — коаксиально-волноводные переходы, 6 — фазовращатель, 7 — волноводы, 8 — двойной волноводный тройник, 9 — СВЧ-детектор.

$= 2U_0 \cos(\delta\varphi/2)$, выражение для отдельной i -й реализации принимает вид

$$\delta\varphi^{(i)} = 2 \arccos\left(\frac{U_{S0}^{(i)}}{2\langle U_0 \rangle}\right), \quad (2)$$

где $\langle U_0 \rangle$ — среднее значение по выборке. Здесь предполагается, что стандартное отклонение $\sigma_{U_{S0}}$ амплитуд

суммарного сигнала U_{S0} , определяется в основном разбросом $\delta\varphi$, а флуктуации амплитуды U_0 в каналах от импульса к импульсу малы и незначительно влияют на результаты измерений.

Измерения выполнялись для режима, когда $\langle\delta\varphi\rangle \approx \pi/2$ и $\langle U_{S0}\rangle \approx 2^{1/2}\langle U_0\rangle$, поскольку в синфазном режиме при $\langle\delta\varphi\rangle \approx 0$ не определяется знак разности фаз. Необходимая разность фаз устанавливалась с помощью волноводного фазовращателя, включенного в один из двух волноводных измерительных каналов (рис. 2, *b*). Для этого случая, используя соотношения (1) и (2), нетрудно получить выражение, которое и использовалось для обработки радиосигналов:

$$\sigma_{\delta\varphi} \approx \frac{\sqrt{2}\sigma_{U_{S0}}}{\langle U_0\rangle} \approx \frac{2\sigma_{U_{S0}}}{\langle U_{S0}\rangle}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\delta\varphi}$ — стандартное отклонение разности фаз $\delta\varphi$.

В случае измерения $\sigma_{\delta\varphi}$ по схеме, представленной на рис. 2, *c*, к двойному волноводному тройнику подключался детектор на основе термоэмиссионного СВЧ-диода 6Д16Д. СВЧ-мощность на входе детектора определялась по его калибровке и зарегистрированному видеосигналу на выходе. Измерения выполнялись аналогично предыдущему случаю в режиме $\langle\delta\varphi\rangle \approx \pi/2$. При этом усредненный по выборке суммарный протестированный сигнал определяется соотношением $\langle P_{S0}\rangle \approx 2\langle P_0\rangle$, где P_{S0} — амплитуда мощности суммарного сигнала, P_0 — амплитуда мощности в каждом канале. Тогда вместо (2) можно записать выражение:

$$\delta\varphi^{(i)} = 2 \arccos\left(\frac{P_{S0}^{(i)}}{4\langle P_0\rangle}\right)^{1/2}, \quad (4)$$

которое использовалось для статистической обработки сигналов.

Кроме трех описанных методик измерений применялась еще одна, основанная на обработке интерференционной картины сложения полей. Для этого использовалась газоразрядная индикаторная панель размером 1×1 м с неоновыми лампами МН-3 (дискретность около 30 мм), размещаемая на расстоянии 2.5 м от антенн. Это расстояние приблизительно с трехкратным запасом соответствует дальней волновой зоне. Изображение газоразрядного свечения от каждого импульса фотографировалось фотоаппаратом с открытым затвором. Поскольку излучение каждой антенны является линейно-поляризованным, формируемая интерференционная картина должна иметь структуру полос, ориентированных вдоль направления электрического поля.

Положение максимума с номером n вдоль координаты x , поперечной к направлению поляризации, можно в параксиальном приближении записать в виде:

$$\frac{kl}{R} x_n + \delta\varphi = 2\pi n, \quad (5)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ — волновое число (λ — длина волны в свободном пространстве), $l = 500$ мм — расстояние

между осями волновых пучков, R — радиус кривизны поверхности постоянной фазы, который близок к 2.5 м.

В соответствии с (5) обработка цифровых изображений для последовательности импульсов позволяла связать перемещения максимумов Δx_n от импульса к импульсу с девиацией разности фаз между каналами.

Результаты экспериментов

На рис. 3 приведены осциллограммы, зарегистрированные по схеме, представленной на рис. 2, *a*. На рис. 3, *a* показана типичная осциллограмма импульса напряжения в одном из КДМИ. Рис. 3, *b* иллюстрирует повторяемость сигналов, включая один из радиосигналов. Измерения показали, что частота, соответствующая максимуму спектра радиосигналов, составляет 10 GHz. Для выборки в 100 импульсов полный разброс положения регистрируемых радиоимпульсов по времени относительно фронта импульса напряжения не превышал 35 ps при стандартном отклонении 7.5 ps. При регистрации одновременно двух радиосигналов (рис. 3, *c*) на двух каналах осциллографа измерение стандартного отклонения разности фаз выполнялось вблизи смены полярности сигнала.

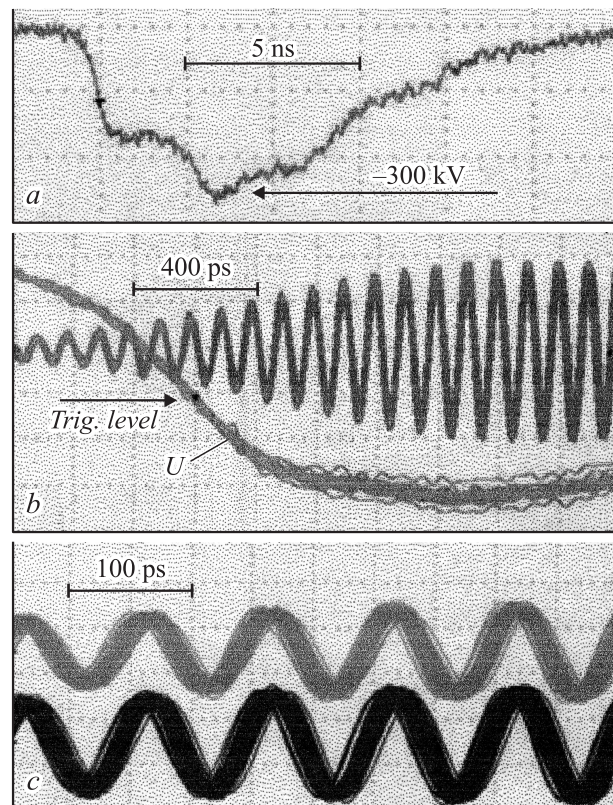


Рис. 3. Осциллограммы: *a* — импульса напряжения на КДМИ, *b* — серии из 20 импульсов напряжения и радиосигналов одного из СВЧ-генераторов при частоте повторения импульсов 5 Hz (стрелкой указан уровень запуска осциллографа), *c* — серии из 100 радиосигналов при частоте следования 50 Hz в двух каналах при измерении стандартного отклонения разности фаз СВЧ-колебаний, составившего $\sigma_t = 2.2$ ps.

лов при частоте следования импульсов 50 Hz. Измерения показали, что стандартное отклонение относительного запаздывания фаз σ_t лежит в пределах 1.4–2.4 ps, в среднем составляет 1.9 ps ($\sigma_{\delta\varphi} = 1.9\pi/50 \approx 0.12 \text{ rad}$) и существенно меньше величины, измеренной для любого из каналов относительно фронта импульса напряжения.

При измерении по схеме, приведенной на рис. 2, b, стандартное отклонение, вычисленное в соответствии с (3) по измеренным осциллографом значениям $\sigma_{U_{50}}$ и $\langle U_{50} \rangle$ по выборкам из 100 последовательных импульсов при частоте их следования 30 Hz, составило 0.12 rad. Сравнение этой величины с результатами измерений стандартного отклонения амплитуд сигналов в отдельном канале: $\sigma_{U_0} \approx 0.035 \langle U_0 \rangle$, а также амплитуд смешанных радиосигналов: $\sigma_{U_{50}} \approx 0.06 \langle U_{50} \rangle$ показывает, что уровень $\sigma_{\delta\varphi} \approx 0.12$ радиан мог быть завышен и оце-

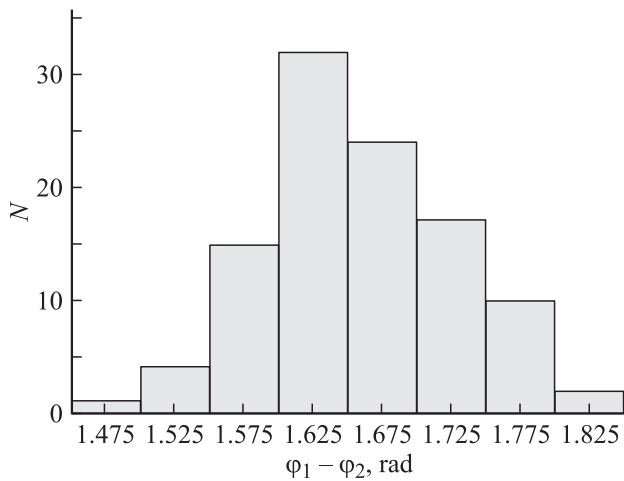


Рис. 4. Гистограмма распределения импульсов по разности фаз СВЧ-колебаний двух СИ-ЛОВ, построенная по результатам измерений в случае детектирования суммарного радиосигнала. Число импульсов равно 100.

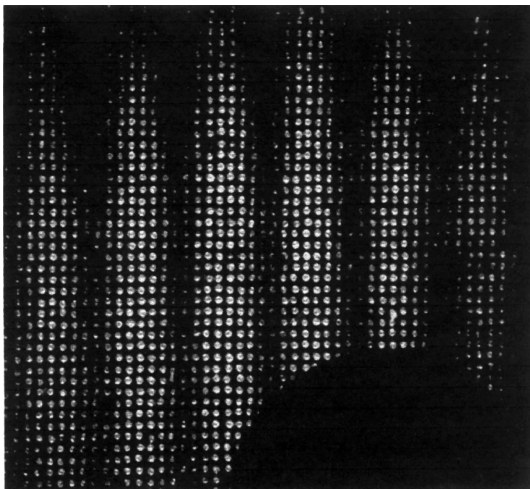


Рис. 5. Картина свечения индикаторной панели под действием СВЧ-излучения.

Результаты измерений разброса разности фаз СВЧ-колебаний двух СИ-ЛОВ

Схема измерения	Размер выборки (импульсы)	Измеренное значение $\sigma_{\delta\varphi}$, rad (погрешность)
Рис. 2, a	100	0.12 ($\pm 35\%$)
Рис. 2, b	100	0.11 ($\pm 20\%$)
Рис. 2, c	100	0.08 ($\pm 20\%$)
Интерференционный метод	20	0.044 ($\pm 20\%$)

нивается величиной $\sim 20\%$ вследствие нестабильности амплитуд радиосигналов в каждом из каналов.

Результаты статистической обработки с использованием соотношения (4) разброса амплитуд детектированного суммарного сигнала, зарегистрированного в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2, c, в режиме однократных импульсов, представлены в виде гистограммы на рис. 4 и соответствуют $\sigma_{\delta\varphi} \approx 0.084 \text{ rad}$.

На рис. 5 показано свечение индикаторной панели под действием СВЧ-излучения. Отчетливо видна картина интерференции полей от двух источников. Результат обработки 20 цифровых ее изображений с применением формулы (5) вместе с результатами других измерений приведен в таблице.

Совокупность результатов измерений стандартного отклонения $\sigma_{\delta\varphi}$ разными методами позволяет заключить, что в условиях эксперимента его среднее значение составляло около 0.1 rad или 1.6 ps, что значительно меньше периода колебаний, равного 100 ps. Оценки погрешностей в таблице являются приблизительными. В первых трех случаях учитывается возможность завышения по нескольким причинам, которые обсуждались выше. Приведенное в таблице наименьшее из всех зарегистрированных значение $\sigma_{\delta\varphi}$, относящееся к четвертому методу, могло быть обусловлено недостаточно большой выборкой (20 импульсов). При этом „неудачные“ реализации с увеличенным разбросом разности фаз СВЧ-колебаний, оказались редкими, а в подавляющем числе импульсов наблюдалась устойчивая интерференционная картина.

Заключение

В заключение следует отметить, что полученный в результате измерений разброс разности фаз СВЧ-колебаний достигнут при длительности фронта импульса напряжения на КДМИ, существенно превышавшей период колебаний. Действительно, только на крутом участке фронта (между уровнями 0.2–0.8 U_{max}) укладывается примерно 5 периодов СВЧ-колебаний. Стандартное отклонение некоторой фиксированной фазы в каждом из каналов (типично 7.5 ps) заметно превышало взаимное отклонение (в среднем 1.6 ps). В целом такая же картина была отмечена нами в предыдущем эксперименте, демонстрирующем пикосекундную стабильность двух

параллельных сильноточечных электронных пучков. Таким образом, деление пополам высоковольтного импульса напряжения позволяет обеспечить взаимную синхронизацию лучше, чем в каждом канале. С учетом прежних результатов этот факт можно объяснить тем, что малое отклонение формы импульса, навязываемое статистическим разбросом в работе высоковольтного газового разрядника, после деления на две части приводит примерно к одинаковому смещению фронта тока пучка на каждом из каналов.

Жесткая взаимосвязь формируемой СВЧ-фазы в микроволновом импульсе и фронта тока на катоде, вероятно, обусловлена динамикой формирования импульса сверхизлучения вблизи коллекторного края системы. Так, известно, что фронт тока пучка, формируемый на крутом участке нарастания импульса напряжения, испытывает обострение по мере его распространения вдоль протяженной замедляющей системы. Измеренная высокая взаимная фазовая стабильность двух источников и устойчивая интерференционная картина суммированного излучения позволяет надеяться на возможность получения в перспективе весьма высокой плотности потока мощности СВЧ-излучения, которая могла бы соответствовать одноканальному источнику с импульсной мощностью более 10 GW. Действительно, энергетические возможности высоковольтных наносекундных генераторов допускают формирование идентичных ускоряющих импульсов не только в двух каналах, как это сделано в настоящей работе, но и в многоканальной системе.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 08-02-12019, 08-02-00183), программы фундаментальных исследований Президиума РАН „Проблемы физической электроники, пучков заряженных частиц и генерации электромагнитного излучения в системах большой мощности“, а также интеграционного проекта ИСЭ СО РАН — ИЭФ УрО РАН по разделу „Физико-технические аспекты получения стабильной генерации мощных микроволновых импульсов в релятивистских черенковских электронно-волновых системах“.

Список литературы

- [1] Benford J., Swegle J.A., Schamiloglu E. High power microwaves. Taylor & Francis, 2007. 531 p.
- [2] Elchaninov A.A., Korovin S.D., Rostov V.V. et al. // Laser and Particle Beams. 2003. Vol. 21. P. 187–196.
- [3] Коровин С.Д., Месяц Г.А., Ростов В.В. и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. Вып. 3. С. 68–74.
- [4] Korovin S.D., Eltchaninov A.A., Rostov V.V. et al. // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 74. N 1. P. 016 501(1)–016 501(8).
- [5] Mesyats G.A., Korovin S.D., Gunin A.V. et al. // Laser and Particle Beams. 2003. Vol. 21. P. 197–200.
- [6] Wharton C.B., Butler J.M., Furukawa S., Baretto G. // Proc. 8th Int. Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMS'90). Novosibirsk, USSR, 1990. P. 1229–1240.
- [7] Gold S.H., Hasrdesty D.L., Kinkeak A.K. et al. // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 52. N 14. P. 1218–1221.
- [8] Orzechowsky T.J., Anderson B., Fawley W.M. // Phys. Rev. Lett. 1985. Vol. 54. N 9. P. 889–892.
- [9] Benford J., Levine J. // Proc. 8th Int. Conf. on High-Power Particle Beams (BEAMS'90). Novosibirsk, USSR. 1990. P. 321–328.
- [10] Гришин Д.М., Лобутин С.К., Месяц Г.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. Вып. 19. С. 14–20.
- [11] Rostov V.V., Yalandin M.I., Mesyats G.A. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2009. Vol. 36. N 3. P. 655–660.
- [12] Месяц Г.А., Яландин М.И. // УФН. 2005. Т. 175. № 3. С. 225–246.
- [13] Luybutin S.K., Rukin S.N., Sharypov K.A. et al. // IEEE Trans. Plasma. Sci. 2005. Vol. 33. N 4. Pt 1. P. 1220–1225.
- [14] Klimov A.I., Kovalchuk O.B., Rostov V.V., Sinyakov A.N. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2008. Vol. 36. N 6. P. 661–664.
- [15] Яландин М.И., Реутова А.Г., Ульмаскулов М.Р. и др. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35. Вып. 17. С. 41–49.
- [16] Афанасьев К.В., Ковальчук О.Б., Кутенков В.О. и др. // ПТЭ. 2008. № 3. С. 86–90.
- [17] Тараканов В.П. Математическое моделирование. Проблемы и результаты. М.: Наука, 2003. С. 456–476.
- [18] Виноградов Д.В., Денисов Г.Г. // Изв. вузов. Радиофизика. 1990. Т. 33. № 6. С. 726–732.