

- [3] Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1966. С. 155, 184, 406, 424.
 [4] Рыжов О. С. // ПМТФ. 1961. № 2. С. 15.
 [5] Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. С. 82, 273, 325.
 [6] Елеукий А. В., Палкина Л. А., Смирнов В. М. Явления переноса в слабоионизированной плазме. М.: Атомиздат, 1975. С. 117.
 [7] Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике. М., ИЛ, 1957. С. 301.
 [8] Руденко О. В., Солуян С. И. Теоретические основы нелинейной акустики. М., Наука, 1975. С. 88.

Физико-технический институт
 им. А. Ф. Иоффе АН СССР
 Ленинград

Поступило в Редакцию
 8 июня 1989 г.

09; 10

Журнал технической физики, т. 80, в. 11, 1990

ПОЛУЧЕНИЕ МОЩНОГО СВЧ ИЗЛУЧЕНИЯ ДИАПАЗОНА МИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН В ЧЕРЕНКОВСКОЙ ЛБВ С РЕЛЯТИВИСТСКИМ СИЛЬНОТОЧНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ¹

Э. Б. Абубакиров, И. Е. Ботвинник, В. Л. Братман, Д. В. Виноградов,
 Г. Г. Денисов, В. И. Казача, А. К. Красных, М. М. Офицеров,
 Э. А. Перельштейн, А. И. Сидоров

1. До сих пор эксперименты по усилению сигналов диапазона миллиметровых волн релятивистскими электронными пучками проводились главным образом с разновидностями мазеров на свободных электронах (МСЭ) — убитронами [2, 3] и мазерами на циклотронном авторезонансе [4] (исключение составляли работы [5, 6], в которых исследовались ЛБВ на пространственной гармонике волны и твистрон). В то же время ясно, что для получения большой

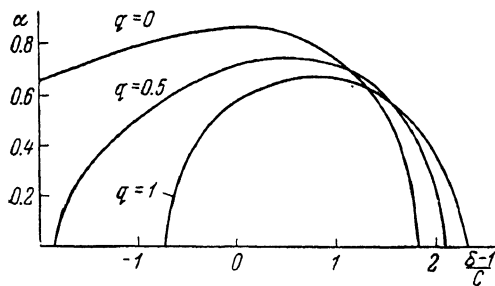


Рис. 1. Зависимость инкремента нарастающей волны от расстройки синхронизма.

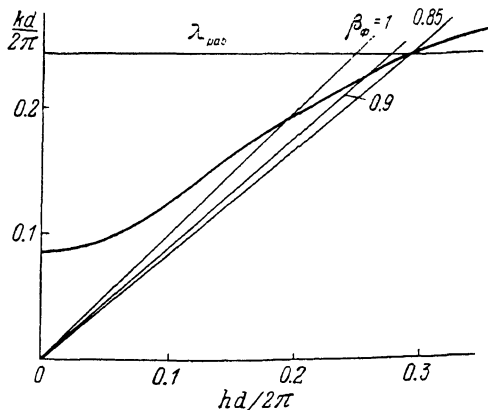


Рис. 2. Дисперсионная диаграмма ЛБВ.

импульсной мощности излучения при сравнительно небольшой средней мощности одними из наиболее простых и эффективных в указанном диапазоне являются приборы, основанные на индуцированном черенковском излучении прямолинейных электронных потоков [7, 8].

При разработке СВЧ усилителей необходимо учитывать, что в приборах с сильноточными электронными пучками в ряде случаев существенна роль высокочастотного пространственного заряда. Неблагоприятное влияние связанных с ним эффектов на КПД меньше в приборах с непрерывным взаимодействием электронов с полем синхронной волны (типа ЛБВ) по сравнению с секционированными приборами (типа клистрона), содержащими участки дрейфа, где синхронная волна отсутствует. Следует отметить, что в миллиметровом диапазоне при короткой

¹ Часть результатов работы докладывалась на VII Всесоюзном симпозиуме по сильноточной электронике [1].

длительности импульсов тока черенковская ЛБВ имеет преимущества также и перед различными разновидностями МСЭ усилителей в величине достижимого погонного усиления волны. Дело в том, что в МСЭ для достижения большого доплеровского преобразования частоты колебательная скорость электронов не должна быть слишком большой $\beta_1 \ll \gamma^{-1}$, где $\beta_1 = v_1/c$ — отношение поперечной скорости к скорости света, $\gamma = \varepsilon/mc^2$ — нормированная энергия частицы; соответственно в МСЭ сравнительно невелика проекция скорости электрона на электрическое поле поперечной волны, т. е. мал коэффициент связи электронов с волной $\kappa \sim \beta_1$ [9]. В черенковских приборах при работе на замедленной основной волне возможно достижение существенно больших коэффициентов связи $\kappa \sim 1$ [8, 4]. Более высокому погонному усилению волны соответствуют меньшая чувствительность к разбросу параметров частиц и более высокий электронный КПД.

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований черенковских релятивистских ЛБВ 8-миллиметрового диапазона, в ходе которых получены высокие значения коэффициента усиления и выходной мощности излучения.

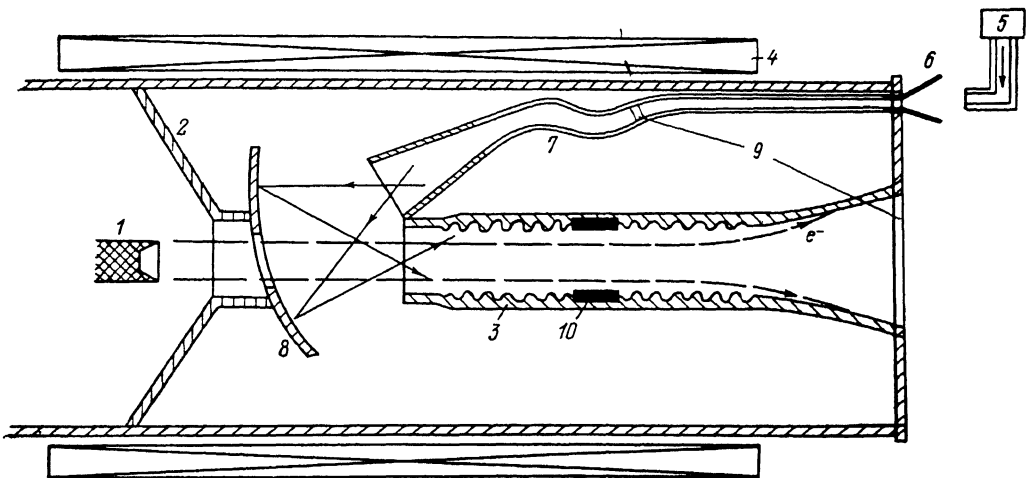


Рис. 3. Схема эксперимента.

1 — катушка, 2 — анод, 3 — замедляющая система, 4 — соленоид, 5 — магнетрон, 6 — аттенюатор, 7 — волновой преобразователь, 8 — рефлектор с отверстием для электронного пучка, 9 — вакуумные окна, 10 — СВЧ поглотитель.

2. Характеристики черенковских ЛБВ с сильнооточными релятивистскими электронными пучками могут быть рассчитаны на основе сформулированной в работах [7, 10] системы уравнений движения частиц и возбуждения синхронной частицам волны

$$\begin{aligned} \frac{dw}{d\zeta} &= \operatorname{Re} (F + i\sigma J) e^{i\theta}, \\ \frac{d\theta}{d\zeta} &= w^{-2} - \delta, \\ \frac{dF}{d\zeta} &= -I \cdot J, \quad J = \int_0^{2\pi} e^{-i\theta} d\theta_0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $w = \gamma/\gamma_0$, $F = 2\gamma_0 e E_z / mc^2 k$ — безразмерная амплитуда поля синхронной волны, $\theta = \omega t - kz$ — фаза электронов относительно волны, $\zeta = kz/2\gamma_0^2$ — продольная координата, h — продольное волновое число синхронной волны, $\delta = 2\gamma_0^2 ((h/k) - 1)$ — начальная расстройка синхронизма, $\sigma = (eI_0/mc^3) [4\gamma_0^2 T / \pi(\gamma_0^2 - 1)^{3/2}]$ — параметр пространственного заряда, I_0 — электронный ток, T — коэффициент депрессии, $I = 2\gamma_0^3 Z I_0 / \pi mc^2$ — параметр тока, Z — сопротивление связи электронов с волной.

Граничные условия к уравнениям (1), соответствующие отсутствию модуляции пучка и подаче на вход ЛБВ электромагнитной волны, имеют вид

$$w(0) = 1, \quad \theta(0) = \theta_0, \quad F(0) = F_0. \quad (2)$$

Начальные фазы частиц θ_0 равномерно распределены в интервале $[0, 2\pi]$. Электронный КПД взаимодействия определяется выражением

$$\eta = 1 - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} w(\theta_0, \zeta_k) d\theta_0, \quad (3)$$

где ζ_k — нормированная длина прибора.

Согласно уравнениям (1), (2), в режиме малого сигнала $|F| \ll 1$ нарастание волны описывается зависимостью

$$F = \frac{F_0}{\rho} \exp\left(\alpha \frac{\pi\sqrt{3}}{2} \frac{C}{\gamma_0^2} \frac{z}{\lambda}\right), \quad (4)$$

где коэффициенты ρ и α определяются расстройкой синхронизма и параметром пространственного заряда (в отсутствие пространственного заряда при точном синхронизме $\rho=3$, $\alpha=1$) (рис. 1); $C=(2\pi I)^{1/2}$ — аналог классического параметра Пирса; $q=2\pi c/C^2$.

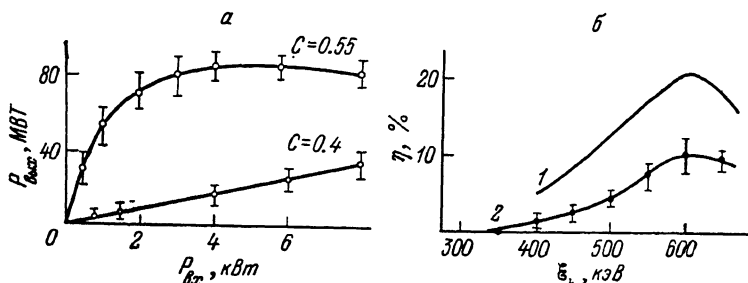


Рис. 4. Результаты эксперимента.

а — зависимость выходной мощности от входного сигнала, б — зависимость КПД от энергии электронов для $C=0.55$ (1 — расчет, 2 — эксперимент).

Полоса усиления в линейном режиме определяется соотношением $\delta=1 \pm C$, чему соответствует диапазон частот

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{C}{\gamma_0^2 (1 - v/v_r)}, \quad (5)$$

v — скорость электронов, $v_r=(d\omega)/(dk)$ — групповая скорость электромагнитной волны.

3. Первая серия наших экспериментов с релятивистскими черенковскими ЛВВ миллиметрового диапазона [1] была проведена в ИФФ АН СССР на ускорителе «Синус-5». В этих экспериментах использовались трубчатые электронные пучки с энергиями частиц 350—650 кэВ, током 1.5—2 кА, длительностью 5 нс, формировавшиеся взрывоэмиссионным инжектором на основе коаксиального диода с магнитной изоляцией. Для фокусировки пучка использовалось однородное продольное магнитное поле с индукцией 1—2.0 Тл.

В качестве рабочей волны была выбрана замедленная симметричная электрическая волна $E_{0,1}$ сверхразмерного круглого волновода с гофрированной боковой стенкой. Фазовая скорость волны на рабочей частоте $\beta_{\phi}=0.83$ близка к скорости электронов, а групповая скорость была не слишком малой $\beta_r \approx 0.5$ (рис. 2).

Входной сигнал на волне $\lambda_{\text{раб}}=8.24$ мм подавался в рабочий волновод через управляемый аттенюатор (с ослаблением 3—30 дБ) с помощью квазиоптического зеркала (рис. 3). Для предотвращения паразитного самовозбуждения системы использовалось плавное сопряжение гофрированного волновода с выходным рупором (измеренное значение коэффициента отражения по мощности не превышало 0.02). Кроме того, на часть волновода наносилось поглощающее покрытие.

Значение сопротивления связи в эксперименте изменялось в пределах 0.5—1 Ом путем изменения диаметра электронного пучка. Соответствующие значения параметра Пирса и коэффициента α варьировались при этом в пределах $C=0.4$ —0.55 и $\alpha=0.7$ —0.8, а погонное усиление и КПД, согласно расчету, должны составлять 3—4 дБ/см и 20 % соответственно.

В эксперименте при меньшем значении параметра Пирса $C=0.4$ выходная мощность линейно зависела от входной; при значении $C=0.55$ наблюдалось насыщение мощности (рис. 4, а). Измеренное погонное усиление волны совпадало с расчетными значениями. Полный коэффициент усиления был равен $K_{\text{лин}}=48 \pm 2$ дБ в линейном режиме и $k_{\text{нас}}=44 \pm 2$ дБ в режиме насыщения мощности. Максимальная мощность составляла 70—100 МВт при входном сигнале

4 кВт и электронном КПД 8—11 %. Максимальная мощность входного сигнала, при которой уверенно регистрировалось усиление, составляла около 10 Вт. Длительность импульса излучения была близка к длительности импульса тока $\tau_{\text{СВЧ}} \approx 4$ нс.

Полученное в эксперименте значение КПД примерно вдвое ниже теоретического значения (рис. 4, б), что, по-видимому, отчасти объясняется наблюдавшейся азимутальной неоднородностью поля волны, вызванной несовершенством системы ввода излучения в сверхразмерный волновод. Вследствие этой неоднородности на выходе ЛБВ наряду с запланированной модой $E_{0,1}$ наблюдалась также и примесь моды $EH_{1,1}$, которая на рабочей частоте также попадает в полосу синхронизма. Хотя доля этой моды не превышала 5—10 % по мощности, ее наличие приводило к значительной азимутальной неоднородности поля $E_{\text{min}}/E_{\text{max}} \sim 0.5$, что могло уменьшать значение КПД.

Выходное излучение ЛБВ, сфокусированное сферическим зеркалом, использовалось для экспериментов по СВЧ пробое воздуха при атмосферном давлении. Оценка выходной мощности по размерам ионизованной области (диаметр 2 см и продольный размер 5 см) при указанной длительности импульса находится в хорошем соответствии со значением мощности, измеренным с помощью полупроводниковых датчиков на горячих носителях.

4. Вторая серия экспериментов была проведена в ОИЯИ на секции линейного индукционного ускорителя со следующими параметрами: максимальная энергия электронов 1.4 МэВ при токе 1.5 кА и темпе ускорения 0.8 МэВ/м. В этих экспериментах также использовались трубчатые электронные пучки, получаемые со взрывомиссионного инжектора, но с существенно отличающимися параметрами — с энергией частиц 500—800 кэВ, током 0.5—0.7 кА, длительностью порядка 50 нс. Для фокусировки пучка использовалось относительно слабое магнитное поле 0.5—0.7 Тл.

Увеличение энергии и уменьшение электронного тока по сравнению с первой серией экспериментов приводило к снижению параметра Пирса. Несмотря на это, опасность самовозбуждения системы во второй серии экспериментов была выше вследствие существенно большей длительности токового импульса. Поэтому для подавления паразитного самовозбуждения приходилось использовать СВЧ поглотитель, обеспечивающий большее, чем в первой серии экспериментов, затухание волны — до 10—20 дБ.

В соответствии с расчетом в эксперименте было получено погонное усиление волны около 2 дБ/см. При энергии частиц, лежащей в полосе усиления, длительность СВЧ импульса была близка к длительности тока. Как и в первой серии экспериментов, выходное излучение состояло в основном из волны $E_{0,1}$ и небольшой примеси несимметричных волн. После того как в выходной тракт был установлен волновой фильтр в виде отрезка круглого волновода с продольными щелями, пропускающий волну $E_{0,1}$ и подавляющий волны $H_{m,1}$ (в которые преобразуются медленные волны $EH_{m,1}$ на согласованном переходе от гофрированного волновода к гладкому), мощность излучения не уменьшилась (в пределах точности измерений порядка 10 %), а структура поля и его поляризация стали соответствовать «чистой» волне $E_{0,1}$. Длительность импульса излучения была равна 30—40 нс. Максимальная мощность излучения составляла 20—30 МВт при коэффициенте усиления 30—35 дБ и КПД до 8 %.

5. Таким образом, проведенные эксперименты показали возможность и относительную простоту получения в релятивистских черенковских ЛБВ диапазона миллиметровых волн импульсной мощности до 100 МВт при высоком коэффициенте усиления (близком к 50 дБ).

Авторы благодарны Н. Ф. Ковалеву и М. И. Петелину за полезные обсуждения, а также С. В. Фильченкову за помощь в расчетах.

Список литературы

- [1] Ботвинник И. Е., Братман В. Л., Виноградов Д. В. и др. // Тез. докл. VII Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1988. Ч. 1. С. 191—193.
- [2] Gold S. H., Hardesty D. L., Kinkead A. K. et al. // Phys. Rev. Lett. 1984. Vol. 52. N 14. P. 1218—1222.
- [3] Orzechowski T. J., Anderson B. R., Clark J. C. et al. // Phys. Rev. Lett. 1986. Vol. 57. N 17. P. 2172—2176.
- [4] Братман В. Л., Губанов В. П., Денисов Г. Г. и др. // Тез. докл. VI Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1986. Ч. 3. С. 6—8.
- [5] Коровин С. Д., Месяц Г. А., Ростов В. В. и др. // Письма в ЖТФ. 1985. Т. 11. Вып. 17. С. 1072—1076.
- [6] Братман В. Л., Губанов В. П., Денисов Г. Г. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 1. С. 9—14.
- [7] Ковалев Н. Ф., Райзер М. Д., Петелин М. И., Сморгонский А. В. Релятивистская высокочастотная электроника. Горький, 1979. С. 76—113.

- [8] Зайцев Н. И., Иляков Е. В., Ковалев Н. Ф. и др. // Тез. докл. VI Всесоюз. симпозиума по сильноточной электронике. Томск, 1986. Ч. III. С. 26—28.
 [9] Bratman V. L., Ginsburg N. S., Petelin M. I. // Opt. Commun. 1979. Vol. 30. N 3. P. 409—412.
 [10] Ковалев Н. Ф., Сморгонский А. В. // РИЭ. 1975. Т. 20. № 6. С. 1305—1309.

Институт прикладной физики АН СССР
 Горький

Поступило в Редакцию
 22 июня 1989 г.

04

Журнал технической физики, т. 60, в. 11, 1990

© 1990 г.

ЗОНДОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ В СИЛЬНОТОЧНОЙ ДУГЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Ф. Г. Бахит, В. С. Бородин, А. М. Воронов,
 В. Н. Журавлев, Ф. Г. Рутберг

1. В настоящее время широкое применение находят электродуговые установки высокого давления $p=1-1000$ атм. Одним из наиболее существенных элементов таких установок являются электроды, ресурс которых в основном определяется их энергетическим балансом. Для определения теплового баланса электрода необходимо знание приэлектродного падения напряжения. В [1] был выполнен расчет параметров прикатодного слоя на примере импульсного сильноточного дугового разряда высокого давления в водороде. Было показано, что, несмотря на большую величину полного напряжения, приложенного к дуге ($u \sim 1$ кВ), падение напряжения в прикатодном слое весьма невелико и составляет величину $\varphi_c \sim 10$ В. При этом под φ_c понималось напряжение, которое падает в лентгюровском слое и на длине L_c установления ионизационного равновесия. φ_c является удобной характеристикой прикатодного слоя, так как практически не зависит от условий в столбе дуги. Было показано, что при длительностях импульса $\tau \leq 10^{-3}$ с катод может работать при весьма больших плотностях тока $j \sim 10^5$ А/см².

Настоящее сообщение посвящено экспериментальному определению прикатодного и прианодного падений напряжения в разрядах указанного типа в водороде. Поскольку вследствие исключительной узости приэлектродного слоя непосредственная диагностика в пределах слоя практически невозможна, то приэлектродные падения напряжения определяются путем экстраполяции линейного хода потенциала в объеме плазмы на поверхность электродов. Остановимся вначале на результатах зондовых измерений распределения потенциала $\varphi(x)$ и напряженности электрического поля E в сильноточном импульсном разряде в водороде (ток $I \sim 50-80$ кА, $\tau \approx 120$ мкс) при начальном давлении газа в разрядной камере $p_0 \sim 1-10$ атм.

2. Принципиальная схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Разряд осуществлялся от конденсаторной батареи емкостью $C=900$ мкФ, заряженной до напряжения $U_0=5$ кВ. Ток I и длительность τ разряда определялись в основном параметрами внешней цепи: емкостью C , паразитной индуктивностью $L_n=1.26$ мкГн и сопротивлением $R_n=1.23 \cdot 10^{-2}$ Ом подводящих проводов. Разрядная камера состояла из стального цилиндра 1, в который для электроизоляции боковой поверхности вставлялся керамический цилиндр 2 из Al_2O_3 . К торцам цилиндра крепились фланцы 3 с вставленными в них катодным K и анодным A узлами. Уплотнения электродных узлов выполнялись в виде фторопластовых изолирующих втулок 4. Сменные электроды 5 имели диаметр 0.8 см, а их длина варьировалась от 0.5 до 1.5 см. Внутренний диаметр камеры составлял 3 см, а ее длина 4 см. Поджиг разряда осуществлялся с помощью медной проволоочки сечением $1.2 \cdot 10^{-3}$ см². В боковой поверхности камеры имелись два отверстия диаметром 1 см. В одно из них вставлялся пьезоэлектрический датчик давления 6 [2], регистрирующий увеличение давления p в камере в процессе разряда. Второе окно 7 было закрыто плексиглазовой вставкой и служило для зондовой и оптической диагностики. Через это окно вводились два сменных зонда 8, располагавшиеся на различном расстоянии вдоль оси разряда, и регистрировалась динамика развития разряда с помощью СФР камеры. Цилиндрические зонды имели диаметр $d_z=0.8$ мм и длину $l_z=1$ мм. Зонды