

УДК 621.385.6

**ПОТЕНЦИАЛ РЭП И НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ЕГО
ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА ИОНАМИ ДИАФРАГМЕННОЙ
И КОЛЛЕКТОРНОЙ ПЛАЗМЫ**

А. Ф. Александров, В. В. Михеев, В. Ю. Сергиенко
Московский государственный университет, Москва, Россия

А. М. Кузнецов
НИИ новых медицинских технологий, Тула, Россия

Рассмотрены способы экспериментального определения потенциала релятивистского электронного потока (РЭП) в пространстве дрейфа в сильноточном электронном ускорителе и численное восстановление измеряемых сигналов. Показана необходимость учета ускоренного движения ионов при анализе проблем срыва генерации в мощных черенковских СВЧ-приборах.

Обычно в экспериментах по генерации СВЧ-излучения сильноточным релятивистским электронным потоком (РЭП) для создания резкой внешней его границы и защиты поверхности замедляющей электродинамической системы от бомбардировки электронами периферийной части потока пучок диафрагмируют перед пространством взаимодействия. При этом при соответствующем выборе радиуса электронного потока и диафрагмы можно избежать существенной потери тока пучка, так как максимум плотности тока расположен внутри пучка [1], а на периферии его плотность мала. Однако при взаимодействии периферийной части электронного потока с диафрагмой [2], а также при осаждении РЭП на коллектор возможно образование диафрагменной и коллекторной плазмы [3], которая при попадании в рабочий объем СВЧ-прибора может привести к изменению его дисперсионных свойств, а в конечном итоге — к срыву генерации СВЧ-излучения. Скорость распространения такой плазмы изменяется в достаточно широких пределах (от 10^7 до 10^8 см/с) и пропорциональна разности потенциалов между пучком и трубой дрейфа, т. е. скорость разлета плазмы определяется величиной пространственного заряда пучка [4]. К тому же коллекторная плазма может являться источником потока ионов, ускоряемых в сторону канала транспортировки собственным полем пучка. Согласно приведенным в работе [5] оценкам, скорость движения ионов различного сорта, возрастающая с увеличением разности потенциалов между пучком и трубой дрейфа, может составлять $(1 \div 5) \cdot 10^8$ см/с и существенно превышать скорость разлета коллекторной плазмы.

Если в конкретной геометрии эксперимента регистрировать потенциал электронного потока относительно трубы дрейфа, то при нейтрализации пространственного заряда ионами, эмитированными из коллекторной и диафрагменной плазмы, будет наблюдаться и пропорциональное изменение этого потенциала, что позволит судить о скорости распространения ионов и скорости нейтрализации пространственного заряда электронного потока. Измерение потенциала электронного потока, как было отмечено в работе [6], является необходимым в различных схемах автоускорения и важным для генерации СВЧ-излучения. Для разработки пассивных электростатических ондуляторов [7] создание определенной разности потенциалов между электронным потоком и стенкой электродинамической структуры можно выделить в самостоятельную задачу.

Как правило, для измерения разности потенциалов в известных нам работах [4, 6] применялись емкостные делители напряжения. В работе [7] использовался делитель напряжения, собранный по схеме Бурха, обладающей постоянством коэффициента деления независимо от частоты. В других работах, посвященных подобным измерениям, явного указания на схему включения емкостного делителя напряжения не приводится. В связи с

процессом автоматизации физического эксперимента, развитием средств регистрации аналоговых сигналов с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП) решение задачи определения разности потенциалов можно производить несколько иначе.

Ниже излагается методика измерения потенциала электронного потока относительно трубы дрейфа в сильноточном ускорителе электронов, которая заключается в восстановлении сигнала комбинированного емкостно-омического делителя напряжения с малой постоянной времени RC-цепочки, регистрируемого с помощью АЦП, численным методом. Данная методика была использована для регистрации ионов, эмитированных с поверхности плазмы, образующейся при попадании электронов на диафрагму и коллектор, для геометрии, характерной для электродинамических систем СВЧ-генераторов [8].

В предлагаемом способе регистрации провисания потенциала используется комбинированный емкостно-омический делитель напряжения, схема которого представлена на рис. 1. Он состоит из собственного емкостного $C1-C2$ и омического $R1-R2$ делителей напряжения. Емкость $C2$ представляет собой полосу двухстороннего фольгированного стеклотекстолита толщиной 1 мм, свернутую в кольцо и помещенную в трубу дрейфа. Емкость $C1$ образуется между поверхностью электронного потока и внутренней обкладкой $C2$ и зависит от диаметра пучка и ширина обкладки конденсатора $C2$.

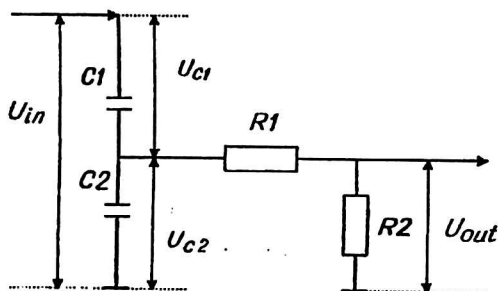


Рис. 1. Схема комбинированного емкостно-омического делителя напряжения

Остановимся на выборе параметров комбинированного делителя напряжения. Аппроксимируя фронт реального импульса ускоряющего напряжения линейной зависимостью, можно рассчитать максимальное выходное напряжение U_{out} комбинированного делителя

$$U_{out} = \frac{U_{0in} \tau_1}{\Delta t} \geq f\left(\frac{\tau_2}{\Delta t}\right), \quad (1)$$

где $f(y) = 1 - \exp(-1/y)$, U_{0in} — амплитуда входного импульса;

Δt — длительность его фронта, $\tau_1 = C1R2$ и $\tau_2 = (C1+C2)(R1+R2)$.

Максимальная величина постоянной времени τ_1 определяется геометрией электродов емкостного датчика и сопротивлением $R2$, согласующим делитель

с волновым сопротивлением кабельной линии (50 Ом). Таким образом, максимальная величина выходного сигнала оказывается зависящей практически только от постоянной τ_2 , и при ее уменьшении монотонно растет.

Комбинированный емкостно-омический делитель представляет собой линейную электрическую цепь, которая описывается простым дифференциальным уравнением

$$C_1 \frac{d}{dt}(U_{in} - U_{C2}) = C_2 \frac{dU_{C2}}{dt} + \frac{U_{C2}}{R_1 + R_2}. \quad (2)$$

Решая уравнение (2) относительно U_{in} , легко получить соотношение для восстановления реального сигнала на входе комбинированного делителя

$$U_m(t) = \frac{\tau_2}{\tau_1} \left\{ U_{out}(t) + \frac{1}{\tau_2} \int_0^t U_{out}(t) dt \right\}. \quad (3)$$

Однако необходимо заметить, что при таком способе восстановления сигнала для АПЦ с числом разрядов N наряду с ошибкой во входном сигнале датчика, которая связана с электромагнитной помехой

$$\Delta U_{in}^{ns} = \frac{\tau_2}{\tau_1} U_{ns} \left(1 + \frac{(t D_t)^{1/2}}{\tau_2} \right), \quad (4)$$

где U_{ns} — характерная величина напряжения помехи;

t — время от начала восстановления сигнала;

D_t — характерное время изменения сигнала, которое лежит в интервале $(25 \text{ нс} \div t)$ (25 нс — дискретность оцифровки сигнала АЦП), существует ошибка восстановления

$$\Delta U_{in}^{int} = \frac{U_{0in}}{2^N K \Delta t} \left(\tau_2 + (t D_t)^{1/2} f\left(\frac{\tau_2}{\Delta t}\right) \right), \quad (5)$$

где K — коэффициент использования разрядной сетки АПЦ (для однополярных сигналов K обычно не превышает 0,4).

Для обеспечения необходимого пространственного разрешения по продольной координате ширина обкладки C_2 должна быть порядка радиуса дрейфовой трубы.

Таким образом, при использовании кабельной линии с волновым сопротивлением 50 Ом постоянная времени τ_1 составила 0,12 нс. Для правильного выбора постоянной времени τ_2 необходимо проанализировать поведение ошибок, связанных с наличием помехи ΔU_{in}^{ns} и с методом восстановления и регистрации ΔU_{in}^{int} .

Суммарная ошибка ожидается минимальной, когда $\Delta U_{in}^{int} \sim \Delta U_{in}^{ns}$. В соответствии с этим условием τ_2 была выбрана 190 нс. Ошибка, связанная с восстановлением входного сигнала, при этом линейно или немного слабее растет со временем интегрирования (5). Следовательно, на реальное

измерение значения потенциала в эксперименте будут накладываться и вышеуказанные ошибки. В связи с этим удобно ввести понятие минимально обнаруживаемого отклонения (минимальная скорость убывания значения разности двух сравниваемых сигналов). Используя решение уравнения (2) для линейного изменения формы входного сигнала (фронта и спада), получаем

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta UK_D}{\tau_1(1 - e^{-\Delta t/\tau_2})}, \quad (6)$$

где ΔU — минимальная величина квантования АЦП по напряжению;

K_D — коэффициент деления регистрирующей цепи.

Сравнивая полученное с помощью (3) значение разности потенциала с расчетным (по значениям тока пучка на коллекторе и ускоряющего напряжения на диоде) и учитывая (6), можно судить о наличии эффекта нейтрализации (если полученный разностный сигнал больше минимально обнаруживаемого отклонения), а следовательно, и использовать для диагностики ионов и плазмы. При обсуждении нижеизложенных результатов эксперимента такое сравнение производится автоматически и о нем упоминаться не будет. Необходимо отметить тот факт, что сравнение надо производить либо в начальные моменты времени, так как изменение потенциала электронного потока может быть связано также и с увеличением радиуса пучка с течением времени (вследствие разлета катодной плазмы поперек ведущего магнитного поля), либо учитывать этот разлет при восстановлении сигнала, опираясь на данные исследований [1]. При обработке результатов описываемых экспериментов был выбран второй путь. Эксперименты были проведены на ускорительном комплексе "Тандем-1" [9] в следующем режиме работы ускорителя: ускоряющее напряжение $U_a = 450$ кВ; ток диода $I_d = 2,3$ кА; ток выведенного пучка $I_b = 0,9-1,4$ кА; длительность импульса $\tau = 2,0-2,5$ мкс; магнитное поле в канале транспортировки пучка $B_0 = 20$ кГс.

Давление остаточных газов во время измерений не превышало 10 торр. Трубчатый электронный пучок формировался в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией с кромочным катодом из графита диаметром $d_c = 4,0$ см. Целью этих экспериментов была регистрация ионов, эмитированных с поверхности плазмы, образующейся при попадании части электронного потока на диафрагму и при осаждении электронов на латунный конический коллектор в конце трубы дрейфа. Диафрагма конической формы была изготовлена из графита толщиной ~ 2 см и внутренним диаметром ~ 40 мм. Угол полураствора конуса в сторону катода с осью симметрии составлял 45° . Одновременно регистрировались сигналы токов диода I_d и пучка I_b в области дрейфа (с помощью омических шунтов), ускоряющего напряжения U_a и потенциалов электронного пучка U_{p1} и U_{p2} (с помощью комбинированных делителей), помещаемых на различных расстояниях от диафрагмы и конического коллектора.

Дальнейшая обработка сигналов комбинированного делителя напряжения и сравнение полученного таким образом экспериментального значения разности потенциалов с расчетным (по данным ускоряющего напряжения U_a и тока пучка I_b) позволили судить о наличии эффекта нейтрализации пространственного заряда пучка.

Экспериментально исследовались три области промежутка диафрагма — коллектор, в которые помещались датчики потенциала (рис. 2). Первая область находилась на расстоянии 6 см от диафрагмы, вторая — на 30 см от первой и третья — на 25 см от второй и на 10 см от начала конического коллектора. При таком положении датчиков можно определить временную задержку начала нейтрализации пространственного заряда в данном месте пространства дрейфа, а по ней оценить скорость распространения ее фронта. Как оказалось, эта скорость существенно зависит от величины разности потенциалов между поверхностью электронного потока и трубой дрейфа, что не противоречит существующим представлениям. В данных экспериментах изменение разности потенциалов производилось как изменение диаметра электронного потока (ток пучка оставался практически постоянным), так и регулировкой тока I_b путем осаждения части этого тока на диафрагму (при постоянном диаметре электронного пучка, равном диаметру диафрагмы). На рис. 3, а, б представлены временные зависимости теоретического значения потенциала Φ_{b1} , экспериментального Φ_{b2} , восстановленного с комбинированного делителя, и их разности $\Delta\Phi_{b3}$ для случая, когда датчик С1 находится около диафрагмы (см. рис. 3, а), а С2 — в середине пространства дрейфа (см. рис. 3, б). Как видно из рис. 3, а, в области 1 отличие теоретического от экспериментального значения разности потенциалов наступает через ~ 500 нс от начала фронта сигнала и имеет довольно резкий спад ~ 60 кВ/мкс, который можно оценить по разностному сигналу $\Delta\Phi_{b3}$, представляющему собой не что иное, как скорость нейтрализации пространственного заряда пучка. Отличие же этих сигналов в области 2 (см. рис. 3, б) наступает несколько позже, еще через 75—100 нс, причем скорость убывания разностного сигнала $\Delta\Phi_{b3}$ ниже 40 кВ/мкс. В данном случае как в области 1 так и в области 2 уверенно регистрируется изменение разности потенциалов, связанное с нейтрализацией пространственного заряда. С экспериментальной точки зрения наибольший интерес представляет пространство, прилегающее к области 2, так как именно здесь обычно располагается электродинамическая структура СВЧ-прибора. Поэтому исследованию этой области было уделено особое внимание. Области 1 и 3 были исследованы частично, но данные, полученные в этих экспериментах, позволяют провести некоторые оценки распространения компенсационного фронта.

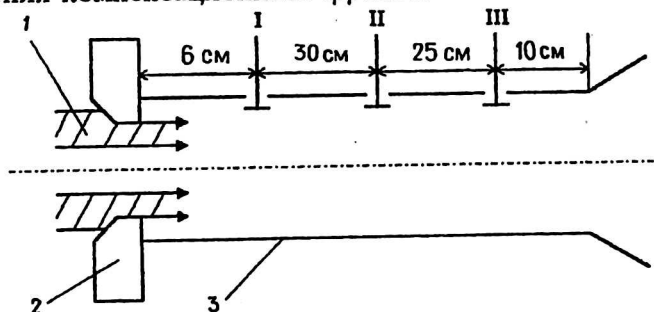
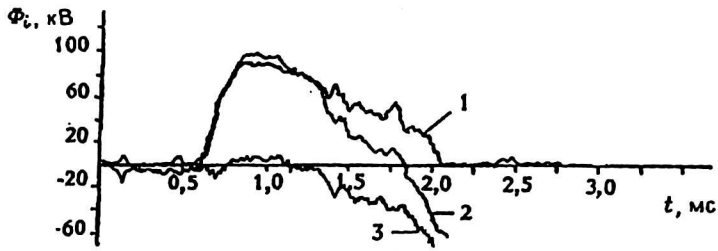
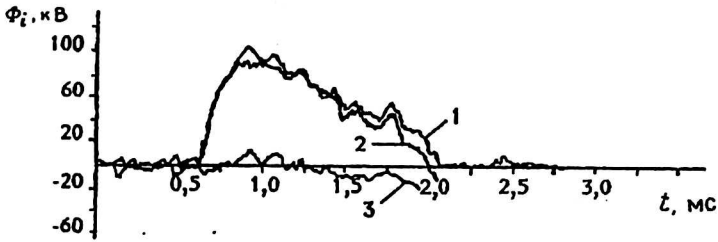


Рис. 2. Схема эксперимента по регистрации провисания потенциала РЭП: 1 — кольцевой электронный поток; 2 — графитовая диафрагма; 3 — труба дрейфа; 1-3 — области измерения потенциала



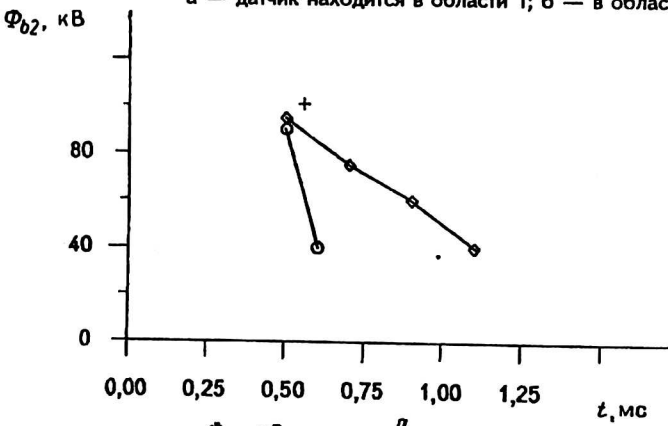
а



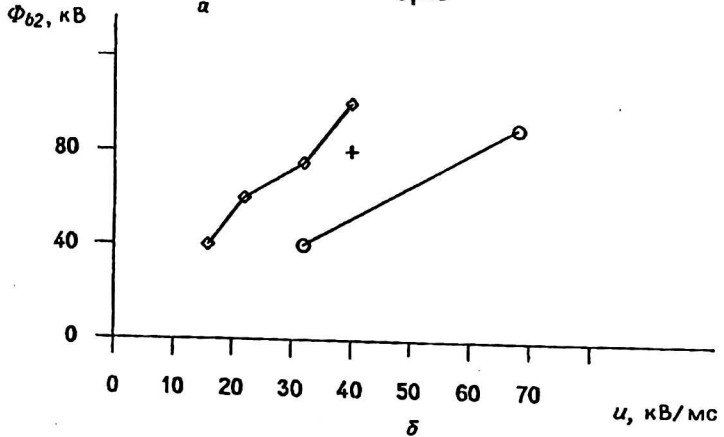
б

Рис. 3. Временные зависимости теоретического значения потенциала Φ_{b1} (1), экспериментального Φ_{b2} (2), восстановленного с комбинированного делителя, и разностного сигнала $\Delta\Phi_{b3}$ (3) (между теоретическим и экспериментальным значением разности потенциалов);

а — датчик находится в области 1; б — в области 2



а



б

Рис. 4. Зависимость времени начала нейтрализации t от потенциала Φ_{b2} , регистрируемого в эксперименте (а); зависимость скорости нейтрализации u от потенциала Φ_{b2} (б); о — область 1; □ — область 2; х — соответствует области 3

Как видно из графиков, представленных на рис. 4, а, время начала нейтрализации пространственного заряда в области 2 сильно зависит от разности потенциалов между стенкой пучка и трубой дрейфа, в то время как в области 1, находящейся в непосредственной близости от диафрагмы, эта зависимость выражена слабее. Что касается скорости убывания разностного сигнала $\Delta\Phi_{b3}$ (см. рис. 4, б), то для областей 1 и 2 наблюдается примерно одинаковый ход зависимости от потенциала Φ_{b2} , однако их численные значения отличаются. Так, в области 1 скорость нейтрализации примерно в два раза превышает скорость нейтрализации в области 2, и при 100 кВ достигает ~ 70 кВ/мкс.

На основании проведенных экспериментальных исследований были сделаны оценки скорости распространения компенсационного фронта пространственного заряда пучка, распространяющегося как со стороны диафрагмы, так и со стороны коллекторной части ускорителя. Эти скорости при значении разности потенциалов 80 кВ (что соответствует диаметрам и токам электронного пучка, наиболее близким к используемым в большинстве наших экспериментов [8] по генерации СВЧ-излучения) практически совпадают и составляют $\sim 2 \cdot 10^8$ см/с. Приведенные оценки почти на порядок расходятся с общепринятыми оценками скорости распространения коллекторной $((2 \div 5) \cdot 10^7$ см/с) и диафрагменной $((4 \div 8) \cdot 10^7$ см/с) плазмы, с которыми часто связывают проблему ограничения длительности генерации в черенковских СВЧ-приборах. На наш взгляд, с помощью разработанной методики регистрировались ионы, эмитированные с поверхности этой плазмы, и именно суммарный заряд ионов образует нарастающий во времени и распространяющийся в пространстве компенсационный фронт, приводящий к эффекту нейтрализации пространственного заряда пучка, что, в свою очередь, может вызвать срыв генерации. Вследствие более высокой скорости движения ионов (превышающей скорость разлета самой коллекторной и диафрагменной плазмы) при анализе проблем срыва генерации в черенковских СВЧ-приборах компенсацию пространственного заряда пучка электронами ионами, эмитированными с поверхности диафрагменной и коллекторной плазмы, необходимо учитывать в первую очередь.

Л и т е р а т у р а

1. Александров А. Ф., Веснин В. Л., Галузо С. Ю., Кубарев В. А., Михеев В. В., Плетюшкин В. А., Сергиенко В. Ю. // Вестник МГУ. Сер. 3. 1990. Т. 31. Вып. 3. С. 32—37.
2. Зайцев Н. И., Кораблев Г. С., Шемякин Б. П. // Физика плазмы, 1981. Т. 7. Вып. 3. С. 560—563.
3. Бугаев С. А., Зайцев Н. И., Ким А. А., Кошелев В. И., Федосов А. И., Фукс М. И. // Релятивистская высокочастотная электроника. — г. Горький, ИПФ АН СССР. 1981. Вып. 2. С. 36—61.
4. Зайцев Н. И., Кораблев Г. С. // ЖТФ. 1982. Т. 52. Вып. 1. С. 160—162.
5. Зайцев Н. И., Кулагин И. С., Нечаев В. Е. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. Вып. 4. С. 779—783.
6. Бугаев С. А., Ким А. А., Кошелев В. И. // ЖТФ. 1979. Т. 19. Вып. 8. С. 1790—1792.

7. Александров А. Ф., Кубарев В. А., Луговский А. В. // ПриЭ. 1992. № 4. С. 705—712.
8. Александров А. Ф., Кузнецов А. М., Михеев В. В., Сергиенко В. Ю. // Прикладная физика. 1997. Вып. 4. С. 3—9.
9. Александров А. Ф., Галузо С. Ю., Канавец В. И., Плетюшкин В. А., Слепков А. И. // ЖТФ. 1980. Т. 50. № 11. С. 2381—2389.

REB POTENTIAL AND ITS SPATIAL CHARGE NEUTRALIZATION BY IONS OF DIAPHRAGM AND COLLECTOR PLASMA

A. F. Aleksandrov, V. V. Mikheev, V. Yu. Sergienko

Moscow State University, Moscow, Russia

A. M. Kuznetsov

SRI of New Medical Technologies, Tula, Russia

Relativistic electron beam (REB) potential experimental determination in the drift space of high current electron accelerator and numerical restoration of measured signals are considered. Necessity for accelerated ions movement taking into account at the analysis of generation breakdown problems in powerful Cerenkov microwave devices is shown.