

УДК 537.53

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ РЕЖИМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПОТОКОВ В ИНВЕРСНЫХ КОАКСИАЛЬНЫХ ДИОДАХ

А. В. Агафонов

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва

Приведены результаты исследования нестационарных режимов формирования электронных потоков в обычном и инверсном коаксиальных диодах с вторичной электронной эмиссией. Показано, что в инверсных диодах поток сильно неустойчив по отношению к малым изменениям напряжения, что ведет к сильной модуляции напряжения на диоде вплоть до перехода в режим автогенератора.

Results of computer simulations of nonstationary effects of electron flow formation are given for direct and inverted-polarity secondary-emission coaxial diodes. It is shown that the flow in inverted-polarity diodes is strongly unstable with respect to small voltage variations, thereby securing deeper modulation of the voltage on the diode up to transition to the regime of self-excited oscillator.

ВВЕДЕНИЕ

На основе исследований режимов самоподдерживающейся вторичной эмиссии электронов в устройствах со скрещенными $E \times B$ -полями [1–3] в работе [4] было предложено использовать управление вторичной эмиссией электронов для захвата и накопления частиц внутри магнетронного диода как промежуточной стадии формирования короткоимпульсного пучка с большим зарядом. Для управления (инициации и гашения) вторичной эмиссией использовались ее пороговые характеристики, зависимость от угла падения и энергии частиц. Привлекательным казалось использование инверсного коаксиального диода, в котором катодом является внешний электрод. При одинаковых внешних размерах это позволяло рассчитывать на большие токи с катода в инверсной геометрии. Исследование нестационарных режимов работы инверсных магнетронных диодов показало, что в некотором диапазоне параметров подобное устройство с вторично-эмиссионным катодом и с внешней цепью способно работать в режиме автогенератора на достаточно высоких частотах.

ИНВЕРСНЫЙ МАГНЕТРОННЫЙ ДИОД С ВТОРИЧНОЙ ЭМИССИЕЙ

Рассмотрим вначале случай, когда в магнетронном диоде нет эмиссии частиц и он представляет собой емкость C , заряжаемую напряжением $V_0(t)$ от источника напряжения через дополнительную RL -цепочку. В общем случае зарядка емкости осуществляется в колебательном режиме с собственной частотой затухающих колебаний $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$, где $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$; $\delta = R/2L$ — постоянная затухания.

Если в диоде используется катод со вторичной эмиссией электронов, то эти колебания напряжения на диоде могут представлять собой «затравку» для развития вторичной эмиссии (например, при падении напряжения, когда в ускоряющем промежутке присутствует достаточное количество частиц). В обычном магнетронном диоде, в котором внутренним электродом служит катод, эти колебания способствуют более быстрому развитию процесса вторичной эмиссии, однако характеристики диода и формируемого в нем потока незначительно отличаются от случая, например, аperiodической зарядки. В инверсном магнетронном диоде, в котором катодом служит внешний электрод, эти колебания могут усиливаться и переходить в самоподдерживающийся режим.

Для иллюстрации на рисунках приведены результаты расчетов для магнетронного диода с радиусом анода $r_A = 0,66$ см, радиусом катода $r_K = 1,06$ см, находящегося во внешнем магнитном поле $B_0 = 3$ кГс. Для примера выбрана трапециевидальная форма импульса внешнего напряжения с временем нарастания и спада $V_0(t)$ по 8 нс и плоской вершиной длительностью 8 нс. Амплитуда напряжения на внешнем источнике составляла 50 кВ. Для данного варианта расчетов, иллюстрирующего возможность работы магнетронного диода в режиме автогенератора, выбран постоянный ток эмиссии первичного пучка с катода 30 А. Уменьшение тока эмиссии первичного пучка приводит к изменению средней составляющей напряжения и его модуляции. Расчеты проведены по электромагнитному коду КАРАТ [5] в двумерной $r - \theta$ -геометрии.

На рис. 1 показано поведение напряжения на диоде. Вспышечное поведение тока вторичной эмиссии иллюстрируется рис. 2. Соответствующая временная структура токов обратной бомбардировки катода пучками первичных и вторичных электронов показана на рис. 3. Частота колебаний напряжения на диоде примерно равна собственной частоте цепи и, соответственно, по крайней мере в некотором диапазоне, может регулироваться внешними параметрами. Амплитуда колебаний и среднее напряжение также могут регулироваться выбором некоторых из существующих параметров, в частности, магнитным полем и током эмиссии первичного пучка.

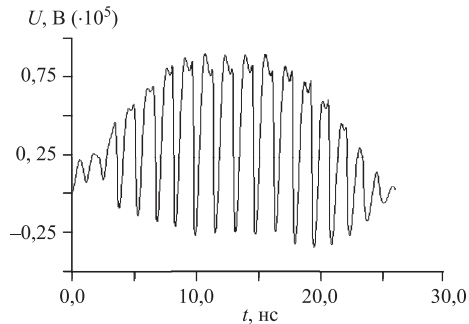


Рис. 1. Поведение напряжения на магнетронной пушке

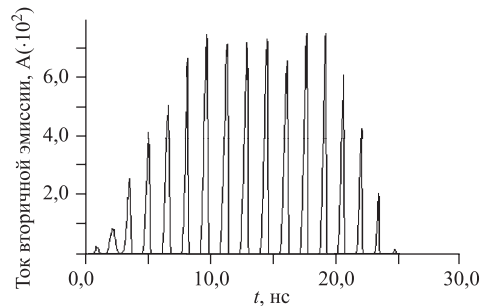


Рис. 2. Динамика тока вторичной эмиссии

С физической точки зрения картина процессов достаточно проста. Предположим, что с внешнего электрода диода непрерывно эмитируют электроны (например, в результате термоэмиссии) с заметным током. При нарастании напряжения на диоде через RL -цепочку эмитируемые электроны не могут вернуться на катод и накапливаются в

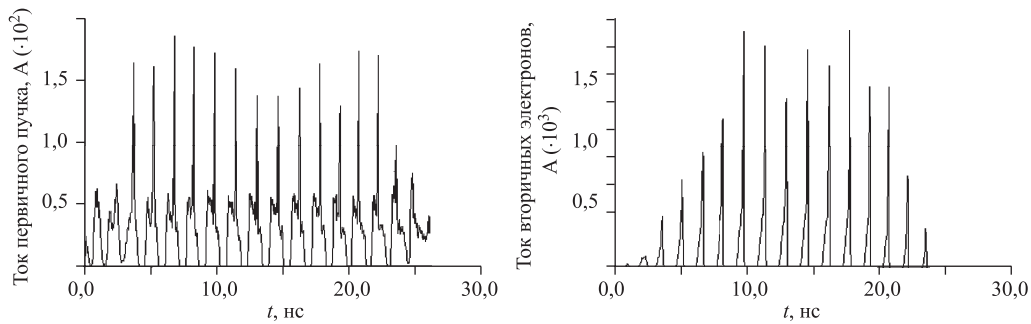


Рис. 3. Поведение токов первичного пучка и вторичных электронов, возвращающихся на катод

ускоряющем промежутке. Спад напряжения на диоде должен привести к возникновению тока вторичной эмиссии, который еще сильнее «подсаживает» напряжение на диоде, в результате чего ускоряющий промежуток может быть вообще очищен от всех присутствующих в нем электронов, если напряжение сменит знак, или от некоторой части, если знак напряжения не меняется. Разница в поведении «прямого» и инверсного диодов заключается в том, что, во-первых, в диоде прямой полярности нужно вернуть электроны поперек магнитного поля на меньший радиус, где расположен катод, а в инверсном — на больший, что существенно легче. Во-вторых, более развитая поверхность катода (внешний электрод) в инверсном диоде позволяет кратковременно снимать с нее большие токи вторичной эмиссии и тем самым обеспечивать более глубокую модуляцию напряжения на диоде. После сброса заряда, существовавшего в ускоряющем промежутке, емкость (диод) вновь начинает заряжаться и, если эмиссия затравочного пучка непрерывна, процесс повторяется.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 03-02-17301).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Agafonov A. V., Fedorov V. M., Tarakanov V. P.* Dynamics of magnetic insulation violation in smooth-bore magnetrons // Proc. of 1997 Particle Accelerator Conf., Vancouver, Canada, 1997. V. 2. P. 1299–1301.
2. *Agafonov A. V., Fedorov V. M., Tarakanov V. P.* Electron beam modulation and leakage currents during self-sustaining secondary emission in magnetron guns // Proc. of the 12th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams, Haifa, Israel, 1998. V. 2. P. 885–888.
3. *Агафонов А. В.* Интенсивные электронные пучки в скрещенных полях // Тр. II Науч. семинара памяти В.П. Саранцева. Дубна, 1998. С. 105–109.
4. *Агафонов А. В., Лебедев А. Н.* Накопление и захват электронных пучков в скрещенных полях // Тр. III Науч. семинара памяти В.П. Саранцева. Дубна, 2000. С. 60–67.
5. *Tarakanov P. V.* User's Manual for Code KARAT. Springfield, 1992.