

Модулятор на динатронном эффекте для электронных пушек

А.В. Агафонов

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

Введение

В процессе исследований режимов самоподдерживающейся вторичной эмиссии электронов в устройствах со скрещенными ЕхВ-полями с целью разработки высокоэффективных релятивистских магнетронов [1–2] и создания электронных пушек с промежуточным накоплением пучка [3–4] основное внимание уделялось анализу динамики формируемых интенсивных электронных пучков с доминирующим влиянием пространственного заряда в простых по геометрии магнетронных пушках, представляющих собой коаксиальный диод, находящийся во внешнем магнитном поле, у которого катодом служил внутренний электрод. 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. Оказалось, что в зависимости от интенсивности потока, прикладываемого напряжения, характерного времени изменения параметров и др. возможно существование режимов работы диода с частичным или полным самогашением вторичной эмиссии.

Общим для процессов, рассмотренных в работах [1–4], являлось то, что после некоторого переходного процесса такие интегральные характеристики, как напряжение на диоде, ток во внешней цепи, число частиц в ускоряющем промежутке, выходили на примерно постоянный уровень, в то время как внутри ускоряющего промежутка возникали динамически равновесные регулярные структуры электронных потоков с большими (сравнимыми с внешним) вариациями электрических полей.

Для решения некоторых из поставленных в [1–4] задач весьма 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 вторичноэмиссионным катодом и с внешней цепью способно работать в режиме автогенератора на достаточно высоких частотах.

Приведены результаты численного моделирования работы модулятора (автогенератора), принцип работы которого основан на использовании динатронного эффекта. Расчеты проведены на модели внешней цепи со сосредоточенными элементами, но достаточно легко обобщаются на случай распределенных элементов. Модуляторы предлагаемой конструкции отличаются компактными размерами и могут легко интегрироваться в конструкции электронных пушек для получения модулированных интенсивных пучков, а также использоваться для других приложений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 00-02-16182.

Инверсный магнетронный диод как автогенератор

Как правило, при анализе нестационарной динамики интенсивных пучков в подобных устройствах не рассматривается внешняя цепь, а режим работы по тем или иным причинам

выбирается из условия аperiодической зарядки емкости, которую представляет собой диод. В то же время включение в схему расчетов внешней RLC -цепи с источником напряжения $V_0(t)$ является необходимым, в особенности при моделировании нестационарных процессов.

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, аperiодической зарядки. В инверсном магнетронном диоде, в котором катодом служит внешний электрод, эти колебания могут усиливаться и переходить в самоподдерживающийся режим (автогенератор) в некоторой области параметров.

С физической точки зрения, картина процессов достаточно проста и, вообще говоря, является просто проявлением динаatronного эффекта, использовавшегося ранее в электролампах.

Предположим, что с внешнего электрода диода непрерывно эмиттируются электроны (например, в результате термоэмиссии) с заметным током. При нарастании напряжения на диоде через RL -цепочку эмиттируемые электроны не могут вернуться на катод и накапливаются в 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 их 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.

Результаты численного моделирования

Ниже 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 трапецеидальная 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 (слева) и тока во внешней цепи (справа). Динамика изменения числа первичных (“b”) и вторичных (“e”) электронов в ускоряющем

промежутке приведена слева на рис. 2, справа показано вспыхивающее поведение тока вторичной эмиссии (в амперах).

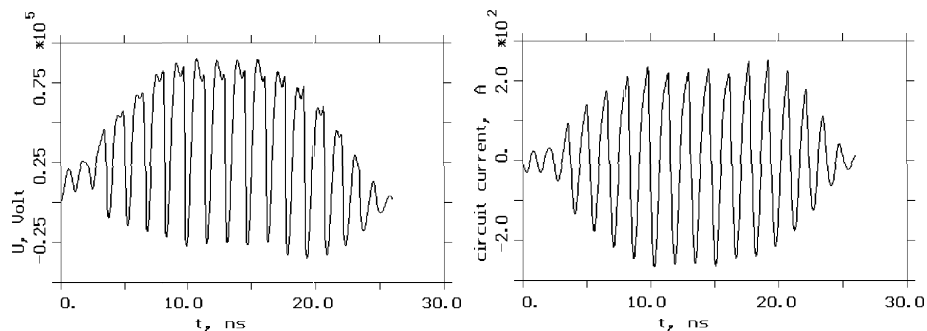


Рис. 1: Поведение напряжения на магнетронной пушке и тока во внешней цепи.

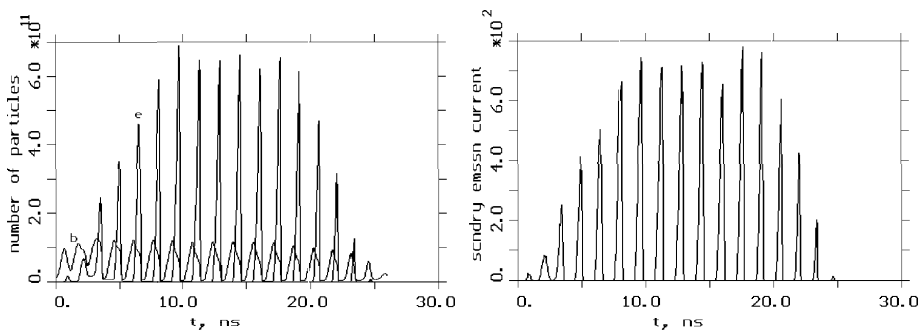


Рис. 2: Динамика изменения числа первичных и вторичных электронов в ускоряющем промежутке и поведение тока вторичной эмиссии.

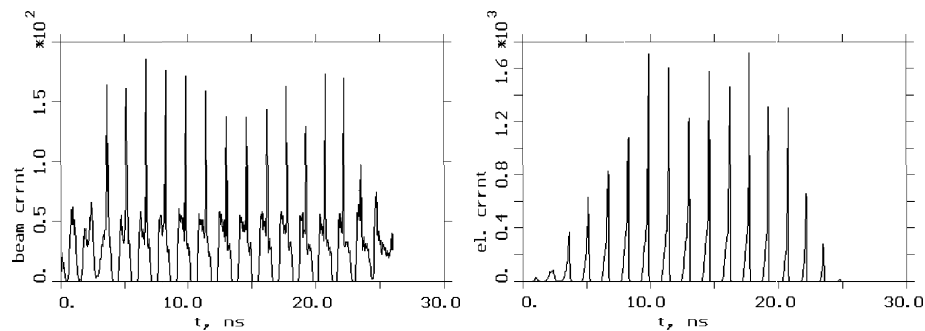


Рис. 3: Поведение токов первичного пучка и вторичных электронов, возвращающихся на катод.

Соответствующая временная структура токов обратной бомбардировки катода пучками первичных и вторичных электронов показана на рис. 3 слева и справа соответственно.

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.

Подобные модуляторы, отличающиеся компактными размерами и возможностью плавной регулировки характеристик, могут найти широкое применение. В частности, они легко интегрируются в конструкции электронных пушек с дополнительными катодными узлами, предназначенных для формирования модулированных пучков.

Заключение

Предложена схема и показана возможность использования инверсного магнетронного диода с внешней цепью как перспективного компактного модулятора (автогенератора) для различного рода приложений.

Список литературы

- [1] Agafonov A.V., Fedorov V.M., Tarakanov V.P. – Proceed. of 1997 Particle Accelerator Conf., Vancouver, Canada. 1997, v. 2, 1299 – 1301.
- [2] Agafonov A.V., Fedorov V.M., Tarakanov V.P. – Proceed. of 12th International Conference on High-Power Particle Beams, Haifa, Israel, 1998.
- [3] Агафонов А.В. – Труды 2-го семинара памяти В.П. Саранцева. Дубна, ОИЯИ, 1998. D9-98-153, 105 – 109.
- [4] Агафонов А.В., Лебедев А.Н. – Труды 3-го семинара памяти В.П.Саранцева. Дубна, ОИЯИ, сентябрь, 1999.
- [5] Kotetashwily P.V., Rybak P.V., Tarakanov P.V. Institute of General Physics, Moscow, Preprint № 44, 1991.