

Промежуточное накопление электронных пучков в пушке со скрещенными полями

А.В. Агафонов, А.Н. Лебедев

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

Введение

Теоретическим и экспериментальным исследованиям динамики прямолинейных пучков с доминирующим влиянием пространственного заряда, которые рассматриваются как новый физический объект, уделяется в последние годы большое внимание. В то же время подобный, но более сложный объект — интенсивные пучки с доминирующим влиянием пространственного заряда в скрещенных $E \times B$ -полях — известны, используются на практике и исследуются длительное время, но без заметных успехов в теории. Физика приборов со скрещенными полями оказалась сложной из-за сильной нелинейности процессов и необходимости учета нестационарных эффектов.

В работе обсуждаются проблемы нелинейной динамики электронных пучков с доминирующим влиянием пространственного заряда в скрещенных $E \times B$ -полях в магнетронной пушке (МП) с целью исследования возможных схем формирования интенсивных электронных пучков для компактных циклических ускорителей и разработки высокоэффективных релятивистских магнетронов. Дан обзор результатов численного моделирования самоорганизации электронного потока в скрещенных полях. Анализируются возможности использования нестационарных эффектов, связанных с нелинейной динамикой пучка и существованием режима самоподдерживающейся вторичной эмиссии в МП со вторично-эмиссионным катодом для захвата и формирования циркулирующего пучка с большим числом частиц с целью дальнейшего ускорения сформированного пучка в компактной системе бетатронного типа. Основная идея состоит в использовании переходных процессов, в результате которых внутри МП формируется циркулирующий азимутально модулированный поток, с последующей его разгруппировкой и отрывом потока от электродов МП посредством профилирования напряжения.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 99-02-17590 и 00-02-1682.

Физические процессы в устройствах со скрещенными полями

Обычно для описания электронного потока в так называемых магнетронных пушках используют стационарные модели либо бриллюэновского потока, в которых отсутствует возможность описания выхода частиц с эмиттирующей поверхности, либо кинетического двухскоростного потока [1]. Для систем, в которых отсутствует вынос электронного пучка в аксиальном направлении (например, магнетронный диод с запертым тем или иным способом электронным потоком в аксиальном направлении), применимость этих аналитических моделей осложняется сильным влиянием предыстории формирования потока. В частности, для таких систем рост напряжения на диоде должен приводить к захвату части эмиттированных частиц внутри ускоряющего промежутка и формированию циркулирующего потока [2].

Накопление заряда в ускоряющем промежутке приводит к существенному снижению тока, снимаемого с катода, по сравнению со значением предельного тока, ограниченного пространственным зарядом I_{C-L} в системах с выносом частиц, поскольку значение радиального электрического поля на поверхности катода зависит уже не только от тока эмиссии, но и от величины заряда, накопленного внутри ускоряющего промежутка.

Разделение потока на две составляющие — циркулирующую в течение многих оборотов и сохраняющую информацию о возможных неоднородностях, и эмиттируемую с катода и возвращающуюся на катод в течение времени порядка периода циклотронного вращения — приводит к возникновению условий для развития азимутальной неустойчивости потока. Однако без обеспечения ряда дополнительных условий эта неустойчивость вызывает лишь слабую азимутальную неустойчивость потока.

Сильная азимутальная модуляция потока, сопровождающаяся возникновением тока утечки на анод, т.е. переход азимутальной неустойчивости в сильно нелинейный режим, в котором обмен энергией и импульсом осуществляется между частицами и вращающимся самосогласованным скрещенным $E \times B$ -полем, возникает если: 1) ток эмиссии первичного пучка не слишком велик и информация о возникающей структуре потока не уносится на катод обратным потоком электронов; 2) существует обратная связь на эмиттирующей поверхности катода, обеспечивающая правильную фазировку эмиттируемых частиц, усиливающая степень азимутальной вариации потока и, соответственно, сброс части эмиттируемых частиц, оказавшихся в неправильных фазах [3].

Обратная связь на эмиттирующей поверхности, способствующая развитию сильной азимутальной неустойчивости, проявляется особенно эффективно при использовании катода с вторичной эмиссией электронов. Резко неоднородный характер вторичной эмиссии, зависящий, в свою очередь, от структуры потока, приводит к формированию знакопеременного во времени радиального электрического поля на данном азимуте катода из-за вращения модулированного потока как целого. Среднее радиальное электрическое поле на катоде в этом случае может быть близко к нулю. При этом эмиссия частиц в неправильных фазах подавляется отрицательным значением поля, а эмиссия частиц, находящихся в правильных фазах, резко усиливается из-за граничных эффектов [4]).

Фактически, подобные системы являются представителем нового класса потоков — потоков с переменным числом частиц. Развитие азимутальной неустойчивости в подобной системе возможно лишь в условиях, когда накопленная в потоке информация не выносится на электроды. В частности, при однородной эмиссии первичного пучка с током, сравнимым с током вторичной эмиссии, неустойчивость развивается слабо.

Показательным примером является развитие неустойчивости в чисто первичном пучке, эмиттируемом однородно по азимуту. Результаты численных расчетов показывают, что в режиме ограничения тока пространственным зарядом азимутальная неустойчивость не развивается вообще. Но она становится сильной, если катод работает в режиме насыщения, т.е. ток эмиссии с катода меньше предельного. При этом нормальная составляющая электрического поля на катоде отлична от нуля, и возникновение слабой азимутальной неустойчивости усиливается, как и в случае неоднородной вторичной эмиссии, за счет правильной фазировки эмиттируемых частиц. Отличие по сравнению со случаем неоднородной вторичной эмиссии состоит лишь в том, что радиальное поле на поверхности катода не знакопеременно.

Отметим еще один эффект, связанный с использованием вторичной эмиссии. Накопление заряда в ускоряющем промежутке может осуществляться в режиме, когда среднее поле на поверхности катода остается существенно меньше поля в ускоряющем промежутке без пучка. Известно, что в приборах сильноточной СВЧ-электроники превышение полем значения около 100 кВ/см на поверхности катода приводит, как правило, к формированию взрывоэмиссионной плазмы. Это позволяет получить большой ток, но одновременно не позволяет осуществлять работу в частотном режиме, ограничивает длительность импульса ВЧ-излучения. Использование эффекта вторичной эмиссии с накоплением пучка позволяет экранировать поле на катоде, не допуская возникновения взрывной эмиссии.

Накопление и захват пучка в скрещенных полях

Условия возможного прерывания тока вторичной эмиссии, например, посредством увеличения внешнего напряжения, что сопровождается первоначальным сбросом части потока и его последующим отрывом от катода (захватом), требуют особого внимания, поскольку позволяют осуществлять процесс накопления и захвата электронного пучка в скрещенных полях, циркулирующего по окружности, из которого электроны не могут ни вернуться на катод, ни достичь анода.

Число частиц в захваченном циркулирующем пучке может быть достаточно велико с позиции возможности их дальнейшего ускорения, в том числе и при высокой частоте циклов, например в системах бетатронного типа, или использования подобных систем в качестве инжекторов для классических ускорителей.

Ниже приведены примеры, иллюстрирующие возможность накопления электронного потока с числом частиц на уровне 10^{12} на сантиметр длины в аксиальном направлении в компактной системе со скрещенными полями с поперечными размерами в несколько сантиметров и при напряжении на уровне 150 кВ. Расчеты проведены по электромагнитному коду КАРАТ [5] в двумерной $r - \theta$ геометрии.

Для дальнейшего ускорения захваченного потока может быть использовано бетатронное поле и разрезные электроды, не препятствующие ни формированию электронного потока, ни проникновению внешнего магнитного поля.

После формирования в МД электронного потока с регулярной структурой полный заряд в системе остается все еще меньше предельного и увеличить его можно, поднимая напряжение на МД. Рост напряжения ведет к перегруппировке потока и изменению азимутальной структуры из-за срыва обратной связи. В течение этого процесса азимутальная модуляция потока исчезает, и поток становится близким к однородному по азимуту. Существенный разброс частиц по импульсам оказывает стабилизирующее воздействие на существование такого потока. Дальнейший рост напряжения вызывает “отрыв” потока от катода. При этом прекращается обратная бомбардировка катода, ток вторичной эмиссии исчезает, ток утечки на анод практически отсутствует, т.е. между электродами МД формируется захваченный циркулирующий поток с большим числом частиц.

На рис. 1 показаны азимутальные структуры потоков в различные моменты времени. Усредненное по азимуту распределение плотности по радиусу в эти два момента времени приведено на рис. 2. Динамика накопления частиц и используемый профиль напряжения показаны на рис. 3.

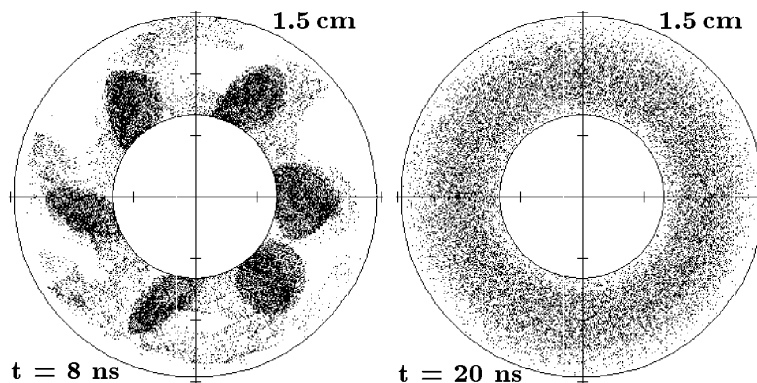


Рис. 1: Конфигурации электронных потоков при $t = 8 \text{ ns}$ и $t = 20 \text{ ns}$.

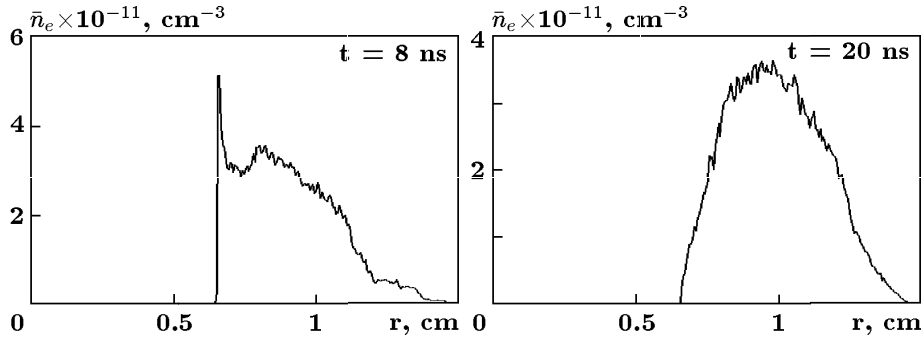


Рис. 2: Усредненные по азимуту радиальные распределения плотности частиц при $t = 8$ нс и $t = 20$ нс.

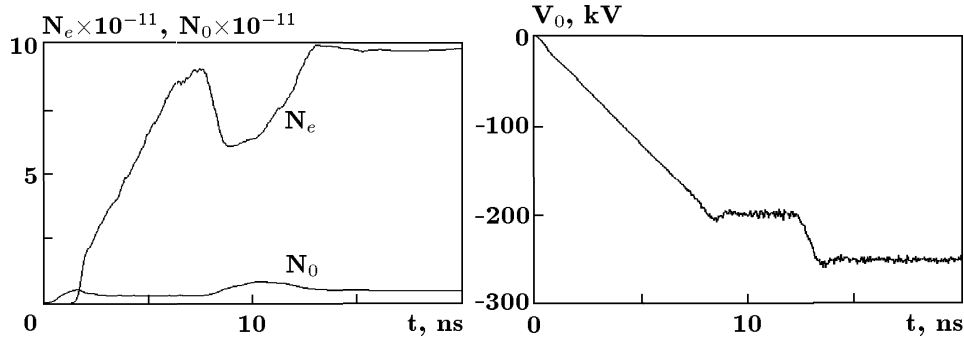


Рис. 3: Динамика накопления вторичных электронов N_{es} и форма напряжения на диоде.

Заключение

Предложена схема и показана возможность накопления и захвата пучка в скрещенных полях. Дан обзор результатов численного моделирования формирования электронных потоков в устройствах со скрещенными полями.

Список литературы

- [1] Agafonov A.V., Voronin V.S. – Proceed. of 1997 Particle Accelerator Conf., Vancouver, Canada. 1997, v. 2, 1302 – 1304.
- [2] Agafonov A.V., Fedorov V.M., Tarakanov V.P. – Proceed. of 1997 Particle Accelerator Conf., Vancouver, Canada. 1997, v. 2, 1299 – 1301.
- [3] Agafonov A.V., Fedorov V.M., Tarakanov V.P. – Proceed. of 12th International Conference on High-Power Particle Beams, Haifa, Israel, 1998.
- [4] Agafonov A.V., Lebedev A.N., Voronin V.S. – Proceed. of the 1995 Particle Accelerator Conf., Dallas, USA. 1995, v. 5, 3269 – 3271.
- [5] Kotetashwily P.V., Rybak P.V., Tarakanov P.V. Institute of General Physics, Moscow, Preprint № 44, 1991.