

10;12

## Эффект смены знака дрейфа зарядов в многорезонаторном магнетроне

© В.Б. Байбурин, К.В. Каминский, М.П. Беляев

Саратовский государственный технический университет  
E-mail: kaminskykv@gmail.com

Поступило в Редакцию 16 апреля 2009 г.

Рассмотрены траектории электронов в многорезонаторном магнетроне при неоднородном магнитном поле, экспоненциально возрастающем от катода к аноду. Показано, что при неоднородности магнитного поля подобного вида возможна смена направления дрейфа заряда на противоположный, что приводит к нарушению условий синхронизма.

PACS: 05.45.Pq, 11.40.-q, 41.20.Jb, 84.40.Fe

Известны работы, например [1,2], в которых показана возможность улучшения характеристик магнетронных приборов за счет введения линейной неоднородности магнитного поля. Представляет интерес рассмотрение процессов в многорезонаторном магнетроне при экспоненциальном изменении магнитного поля в пространстве взаимодействия.

Рассмотрим схему цилиндрического магнетрона с экспоненциально меняющимся магнитным полем и сравним результаты расчетов со случаем магнетрона с постоянным полем.

Согласно [3], уравнения движения зарядов в многорезонаторном магнетроне в двумерном случае в полярной системе координат  $(r, \varphi)$  можно записать в виде:

$$\begin{cases} dr/dt = v_r, \\ d\varphi/dt = v_\varphi, \\ dv_r/dt = rv_\varphi^2 + E_r - \Omega r v_\varphi, \\ dv_\varphi/dt = \frac{1}{r} \Omega v_r + \frac{1}{r^2} E_\varphi - 2 \frac{1}{r} v_r v_\varphi, \end{cases} \quad (1)$$

где  $E_r$  и  $E_\varphi$  — компоненты электрического поля в радиальном и азимутальном направлении соответственно,  $\Omega$  — циклотронная частота.

Для определенности рассмотрим четырехрезонаторный магнетрон, работающий в режиме  $\pi$ -вида колебаний. Тогда для компонент поля

можно записать следующие уравнения:

$$\begin{cases} E_r = E_d + E_0 e^r \cos(\beta\varphi) \sin(\omega t), \\ E_\varphi = -E_0 e^r \sin(\beta\varphi) \sin(\omega t), \end{cases} \quad (2)$$

где  $\beta$  — постоянная распространения,  $\omega$  — частота высокочастотного поля,  $E_0$  — амплитуда высокочастотного поля,  $E_d$  — постоянное электрическое поле в магнетроне.

Для  $E_d$  можно записать

$$E_d(r) = U_0(r), \quad (3)$$

где  $U_0 = U_a / \ln(r_a/r_c)$ ,  $U_a$  — анодное напряжение,  $r_c$  — радиус катода,  $r_a$  — радиус анода.

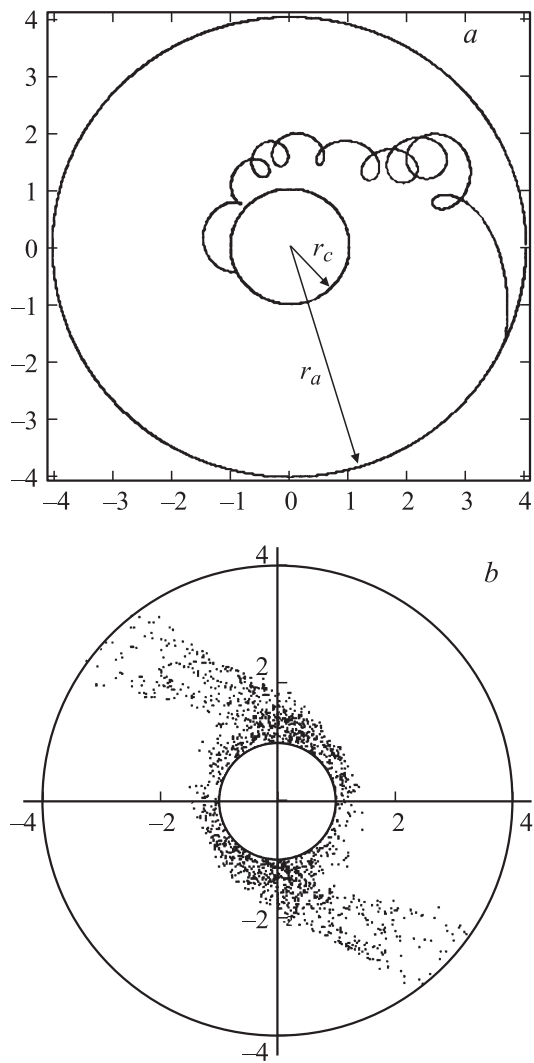
Зададим закон изменения циклотронной частоты (а следовательно, и индукции магнитного поля) следующим образом:

$$\Omega(r, \varphi) = \Omega_0 \exp(\alpha r), \quad (4)$$

где  $\Omega_0$  — некоторая постоянная величина,  $\alpha$  — некоторая константа.

Значения безразмерных параметров в уравнениях (1)–(4) выбирались таким образом, чтобы они соответствовали номинальному режиму генерации многорезонаторного магнетрона (например, для магнетрона 700 AD: радиус катода — 0.4 см; радиус анода — 1.74 см; анодное напряжение — 12 кВ; индукция магнитного поля — 0.065 Т; анодный ток — 10 А; частота генерации — 700 МГц, выходная мощность — 40 кВт). Значение константы  $\alpha$  в уравнении (4) было задано так, чтобы величина циклотронной частоты к аноду возрастала в 4 раза по сравнению со значением на катоде. При имитационном моделировании использовались 5000 крупных частиц. Уравнения движения решались методом Рунге–Кутты 4-го порядка точности с шагом интегрирования по времени 0.005 (это соответствует 1/500–1/1000 циклотронного периода) для каждой крупной частицы.

На рис. 1, а представлена траектория заряда в случае, когда индукция магнитного поля постоянна во всем пространстве взаимодействия, схематично показаны анод и катод, обозначены радиус катода  $r_c$  и анода  $r_a$ . По осям координат на рис. 1, а отложены безразмерные величины  $r$ . График суммарного наведенного тока во времени показан на рис. 1, с: по оси абсцисс отложено время в единицах безразмерного



**Рис. 1.** Траектория заряда в магнетроне с постоянным полем (*a*). Форма электронного облака при постоянном магнитном поле (*b*). Изменение суммарного наведенного тока во времени (*c*).

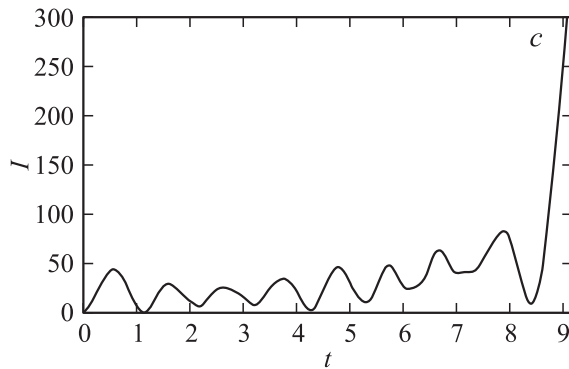
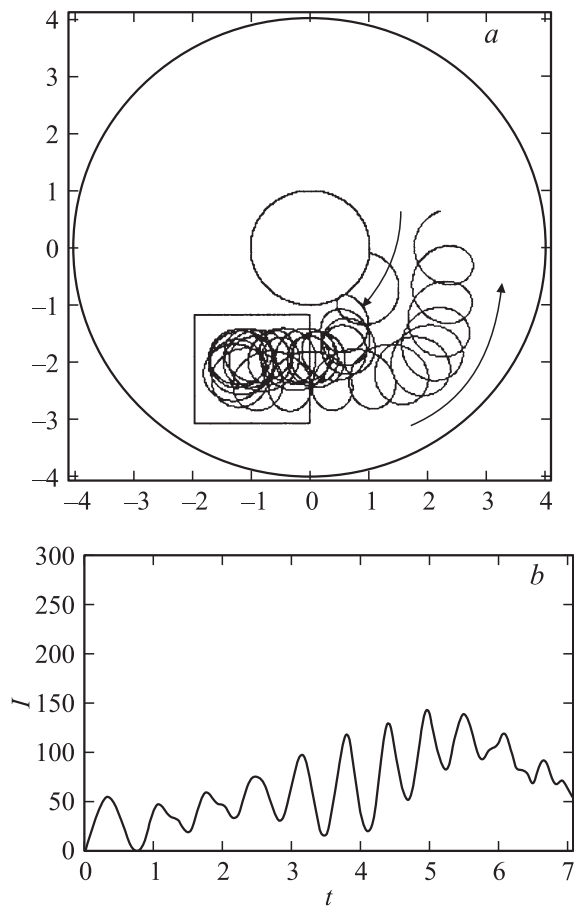


Рис. 1 (продолжение).

циклотронного периода, по оси ординат — безразмерная величина наведенного тока. Видно, что в момент достижения зарядом анода происходит резкий рост наведенного тока. На рис. 1, *b* показана типичная конфигурация электронного облака (5000 частиц) в рабочем режиме магнетрона в виде сформировавшихся „электронных спиц“.

На рис. 2, *a* представлена типичная траектория заряда в номинальном режиме работы магнетрона с магнитным полем, изменяющемся согласно (4). Видно, что изменяется направление дрейфа заряда в пространстве взаимодействия на противоположное, при этом направление вращения заряда при движении по циклоиде остается неизменным.

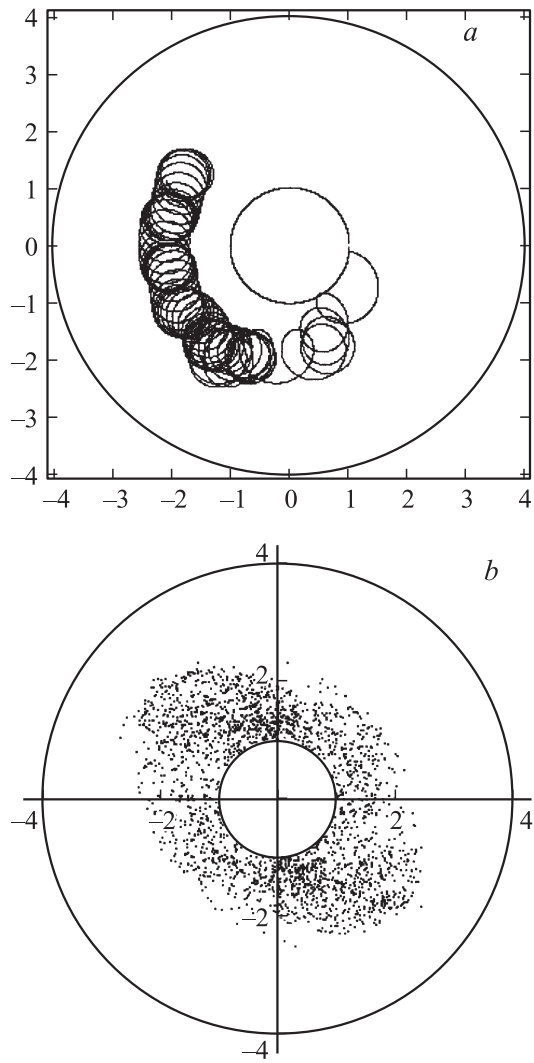
Установленный эффект является следствием двух фундаментальных эффектов: эффекта электрического дрейфа, пропорционального  $E/H$ , и эффекта дрейфа в неоднородном магнитном поле [4], пропорционального  $\text{grad } H/H$  (или  $\text{grad } \Omega/\Omega$ ). При заданном законе (4) изменения магнитного поля градиент магнитного поля вблизи катода незначителен, и преобладает электрический дрейф, но под действием тангенциальной составляющей высокочастотного поля циклоида сдвигается к аноду и попадает в область существенного изменения магнитного поля, и здесь начинает преобладать магнитный дрейф. В области, обведенной прямоугольником на рис. 2, *a*, скорости обоих видов дрейфа в некоторый момент времени сравниваются и компенсируют друг друга (циклоидальная орбита не смещается), а затем начинает преобладать магнитный дрейф (против часовой стрелки). Естественно, при этом условия синхронизма



**Рис. 2.** Траектория заряда в магнетроне с магнитным полем, изменяющемся согласно (4) (a). Изменение суммарного наведенного тока во времени (b).

электронов с высокочастотной волной нарушаются, наведенный ток падает (рис. 2, b), соответственно лавинообразно уменьшается амплитуда высокочастотного поля на резонаторах, генерация срывается.

Чтобы учесть влияние срыва генерации на характер электронных траекторий, необходимо с момента поворота траектории в расчетах



**Рис. 3.** Траектория заряда в магнетроне с учетом существенно уменьшенной амплитуды высокочастотного поля (*a*). Форма электронного облака при магнитном поле, изменяющемся согласно (4) (*b*).

вести уменьшенную амплитуду высокочастотного поля пропорционально уменьшению наведенного тока. На рис. 3, *a* приведена отдельная траектория заряда с учетом существенно уменьшенной амплитуды высокочастотного поля. Видно, что после уменьшения амплитуды поля заряд смещается к катоду и начинает дрейфовать, по существу, под действием только статического электрического поля (электрический дрейф).

На рис. 3, *b* показана форма электронного облака (5000 частиц), соответствующая изложенному механизму срыва генерации. Видно, что электроны не долетают до анода.

Эффект смены знака дрейфа, описанный в работе, желательно учитывать при проектировании приборов магнетронного типа. В работах [1,2] для улучшения характеристик магнетронов, в частности КПД, использовано магнитное поле, индукция которого возрастает к аноду. Если в уравнении (4) величину константы  $\alpha$  выбрать соответствующей возрастанию магнитного поля к аноду на 10% по сравнению со значением на катоде, то, основываясь на расчете наведенного тока, можно для анализируемого магнетрона получить увеличение КПД приблизительно на 10%. Однако введение чрезмерного увеличения индукции магнитного поля может привести к срыву генерации.

Следует отметить, что указанный эффект, наряду с модуляцией анодного напряжения, может быть использован в качестве „ключа“, отключающего и включающего процесс генерирования, при условии электронного управления неоднородностью магнитного поля, например с помощью соленоида, одетого на полюсный наконечник с цилиндрическим отверстием, в котором расположен подвижный сердечник, обеспечивающий однородное магнитное поле при положении внутри наконечника и неоднородное поле при выдвинутом положении.

## Список литературы

- [1] Байбурин В.Б., Умнов С.Г. // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 1980. В. 11 (321). С. 68–69.
- [2] Байбурин В.Б., Кудрин И.В. // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. 1977. № 7. С. 50–56.
- [3] Байбурин В.Б., Каминский К.В. // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2007. Т. 15. № 16.
- [4] Арцимович Л.А., Сагдеев Р.З. Физика плазмы для физиков. М.: Атомиздат, 1979.