

ДИНАМИКА РЭП ВО ВНЕШНЕМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

А.Е. Наурызбасв

Приводятся результаты численного моделирования динамики квазистационарного релятивистского электронного пучка в плотном газе при наличии внешнего продольного магнитного поля. Полученные результаты сравниваются с решением уравнения огибающей.

В различных физических задачах внешнее магнитное поле используется для фокусировки /1/, транспортировки /2/ или компрессии /3/ релятивистских электронных пучков (РЭП). Например, для осуществления эффективного ускорения ионов на циклотронной волне необходимо получить устойчивый электронный пучок во внешнем магнитном поле по всей длине транспортировки /4/. Изменение радиуса РЭП в газе при наложении внешнего продольного магнитного поля можно описывать с помощью уравнения огибающей /5/, однако для более детального исследования динамики РЭП необходимы численные методы /6, 7/.

В настоящей работе используется предложенная в /6/ модель, в которой учитываются магнитная самофокусировка, многократное рассеяние электронов, действие на пучок внешнего ведущего магнитного поля. Рассматривается распространение аксиально-симметричного квазистационарного (нейтрализованного по заряду и без обратных плазменных токов) самофокусирующегося РЭП в цилиндрической трубе, заполненной плотным газом, при наличии внешнего продольного однородного магнитного поля. Радиальная динамика РЭП полностью определяется собственным самосогласованным и внешним продольным магнитными полями и рассеянием электронов в газе (радиационными потерями, торможением и энергетическим разбросом частиц пучка пренебрегается). Данное рассмотрение соответствует инжекции РЭП с замагниченного катода.

Предполагается, что ток пучка I много меньше критического альфвеновского тока I_A . Это позволяет применять параксиальное квазистационарное приближение $|V_r|, |V_a| \ll V_z, V \cong V_z = \text{const}$. Здесь $I_A = mc^3 \times \chi \gamma \beta / e$, m и e – масса покоя и заряд электрона, $\beta = V/c$, $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$, c – скорость света, V_r, V_a, V_z – компоненты скорости электрона V .

РЭП моделируется набором макрочастиц с заданными в плоскости инжекции распределением по поперечным скоростям и ступенчатым профилем плотности тока

$$j(r) = \begin{cases} j_0, & 0 \leq r \leq R_0 \\ 0, & r > R_0. \end{cases}$$

В условиях азимутальной симметрии уравнения движения для i -ой частицы имеют вид:

$$\gamma m d^2 r_i / dt^2 = -e\beta B(r_i) + M_i^2 / \gamma m r_i^3 - \gamma m r_i (\Omega / 2\gamma)^2 + \chi_i, \quad dM_i / dt = \eta_i,$$

где $i = 1, 2, \dots, N$; $B(r) = 2I(r)/rc$ – собственное самосогласованное азимутальное поле пучка; $I(r)$ – ток пучка внутри трубки радиуса r ; $\Omega = eB_0/mc$ – циклотронная частота вращения во внешнем продольном однородном магнитном поле B_0 ; χ и η – случайные силы, связанные с рассеянием электронов; $M = \gamma m r V_a + m\Omega r^2 / 2 = \text{const}$ – обобщенный момент (инвариантная величина в отсутствие рассеяния). Записанное в таком виде условие сохранения обобщенного момента является аналогом теоремы Буша в электронике /8/.

Для характеристики интенсивности рассеяния введем, используя результаты работы /6/, длину рассеяния L , определяемую из соотношения $\Delta V^2 = V_0^2 \Delta z / L$, где V_0^2 – средний квадрат поперечной скорости частиц пучка с равновесной (беннетовской) температурой.

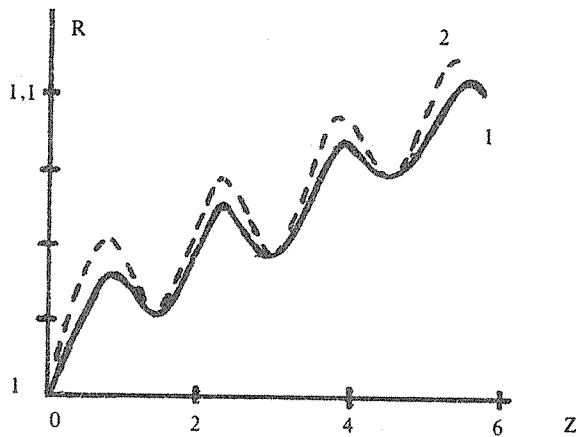


Рис. 1. Изменение радиуса горячего РЭП в зависимости от длины распространения: 1 – результат моделирования, 2 – решение уравнения огibaющей.

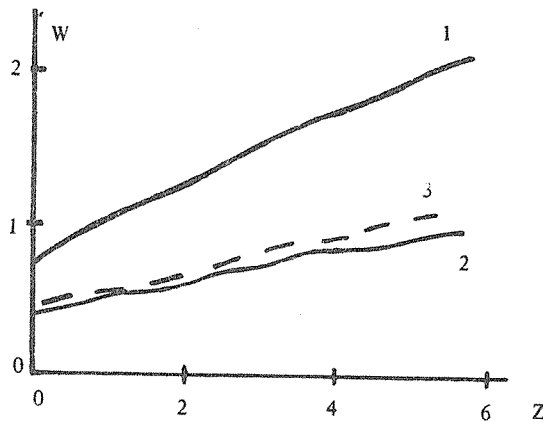


Рис. 2. Изменение поперечной энергии горячего РЭП в зависимости от длины распространения: 1 – полная энергия; 2 – радиальная энергия; 3 – азимутальная энергия.

В качестве радиуса РЭП брался среднеквадратичный радиус с нормировкой $R(z=0) = 1$. Начальная температура задавалась как бэннетовской W_0 , так и отличной от нее $W \neq W_0$. В выбранной нормировке длина волны циклотронных колебаний, характеризующей внешнее магнитное поле, $\lambda_c = \pi/\Omega$, а длина волны бета-тронных колебаний, характеризующей собственное азимутальное магнитное поле пучка, $\lambda_\beta = 2\pi$.

Результаты расчетов в случае сильного внешнего магнитного поля $\lambda_c < \lambda_\beta$ и сильного рассеяния электронов $L = 2 < \lambda_\beta$ показывают, что внешнее магнитное поле ограничивает радиальное движение РЭП, поэтому совершается меньшая работа против сжимающей силы собственного магнитного поля пучка, а рассеяние приводит в основном к сильному изотропному разогреву пучка.

Распространение горячего пучка $W/W_0 = 1,7$ сопровождается осцилляциями радиуса на циклотронной частоте и его медленным расширением. На рис. 1 показано изменение радиуса, а на рис. 2 – изменение поперечной температуры РЭП в зависимости от длины z . Видно, что решение уравнения огibaющей хорошо согласуется с результатом численного моделирования. Поперечная температура РЭП изотропно возрастает в 2,6 раза. Фазовый портрет горячего пучка остается симметричным относительно оси $V_r = 0$, однако появляется большое количество частиц с большими значениями радиальных скоростей. Профиль плотности тока постепенно размывается, особенно на периферии пучка, и принимает колоколообразную форму. При этом уменьшения плотности тока в центре пучка не наблюдается.

Таким образом, в данной работе приведены результаты численного моделирования распространения РЭП в газе при наличии внешнего продольного магнитного поля. В случае сильного внешнего магнитного поля наблюдается сильный изотропный разогрев пучка без существенного его расплывания. В случае сильного рассеяния электронов получены расчетные значения изменения радиуса и поперечной температуры РЭП в зависимости от длины z . Уравнение огибающей хорошо описывает изменение радиуса пучка во всех рассмотренных случаях.

Автор признателен А.А. Рухадзе и Г.А. Сорокину за внимание к работе и полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Freeman J. R., Poukey J. W. J. Appl. Phys., 43, 4010 (1972).
2. Агафонов А. В. и др. ЖТФ, 44, 1909 (1974).
3. Жаринов А. В., Чихачев А. С. ПМТФ, 4, 3 (1980).
4. Дэвидсон Р. Теория заряженной плазмы. М., Мир, 1978.
5. Lee E. P., Cooper R. K. Part. Accel., 7, 83 (1976).
6. Наурызбаев А. Е., Сорокин Г. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 7, 45 (1987).
7. Рошаль А. С. Моделирование заряженных пучков. М., Атомиздат, 1979.
8. Абрамян Е. А., Альтеркоп Б. А., Кулешов Г. Д. Интенсивные электронные пучки. М., Энергоатомиздат, 1984.

Институт общей физики АН СССР

Поступила в редакцию 22 июля 1988 г.