

# ЭЛЕКТРОННЫЕ ПУЧКИ ДЛЯ МАЗЕРОВ НА ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ И ЛАЗЕРОВ НА СВОБОДНЫХ ЭЛЕКТРОНАХ

В. Н. МАНУИЛОВ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

## ELECTRON BEAMS FOR CYCLOTRON RESONANCE MASERS AND FREE ELECTRON LASERS

V. N. MANUILOV

*The methods of producing intense helical electron beams for the sources of powerful coherent radiation, i.e., cyclotron resonance masers and free electron lasers, are described. The basic physical phenomena, which affect the quality of electron flows being formed by adiabatic and non-adiabatic electric and magnetic fields, are reviewed.*

*Описаны способы формирования интенсивных винтовых электронных пучков для источников мощного когерентного излучения – мазеров на циклотронном резонансе и лазеров на свободных электронах. Изложены основные физические явления, определяющие качество электронных потоков, формируемых адиабатическими и неадиабатическими электрическим и магнитным полями.*

[www.issep.rssi.ru](http://www.issep.rssi.ru)

## ВВЕДЕНИЕ

Вся история создания источников интенсивного когерентного излучения радиодиапазона связана с продвижением во все более короткие волны и увеличением их мощности. Энергия электромагнитного поля в таких системах черпается из активной среды, представляющей собой свободные (движущиеся в вакууме) электроны. Открытие в конце 1950-х годов механизма когерентного излучения классических электронов-осцилляторов [1], совершающих помимо поступательного движения еще и колебания относительно некоторого центра (ведущего центра) с частотой  $\omega_0$ , позволило заполнить существовавший провал мощности в области длин волн  $\lambda$  короче 1 см. Наиболее перспективной оказалась активная среда из электронов, вращающихся в однородном магнитном поле  $B_0$  с циклотронной частотой

$$\omega_H = \frac{eB_0}{m}.$$

Здесь  $e$  – заряд,  $m = \gamma m_0$  – релятивистская масса электрона,  $m_0$  – масса покоя,  $\gamma$  – релятивистский фактор, связанный с энергией электронов  $eU_0$  соотношением  $\gamma = 1 + eU_0/m_0c^2$  ( $c$  – скорость света). В таких приборах, получивших название мазеров на циклотронном резонансе (МЦР) [1], электроны излучают на частоте  $\omega$ , близкой к  $\omega_H$  или ее гармоникам. Легко оценить, что для слабoreлятивистских пучков ( $\gamma \approx 1$ ) с энергией электронов порядка десятков килоэлектронвольт соответствующая циклотронной частоте длина волны

$$\lambda [\text{мм}] \approx \frac{110}{B_0 [\text{кГс}]}.$$

Современные сверхпроводящие магниты позволяют получать в большом объеме  $B_0 \approx 60\text{--}70$  кГс, а импульсные соленоиды – до 200 кГс, и наиболее удачная разновидность МЦР – гиротроны [1], разработанные большим коллективом под руководством академика

А.В. Гапонова-Грехова, позволили освоить весь миллиметровый диапазон и даже значительную часть субмиллиметрового диапазона при мощности импульсного и непрерывного излучения от сотен киловатт до 1–2 МВт.

Дальнейшего укорочения длины волны наиболее просто достичь, разогнав активную среду из электронов до релятивистских (близких к скорости света) скоростей. Тогда из-за эффекта Доплера частота излучения  $\omega$  примерно в  $2\gamma^2$  раз превышает частоту  $\omega_0$  колебаний электрона, что дает возможность освоить не только субмиллиметровый диапазон, но и далее, по крайней мере вплоть до инфракрасного и ультрафиолетового [2]. Соответствующие приборы получили общее название лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) [2]. Для ЛСЭ осциллирующие в магнитном поле электроны также остаются наиболее перспективным вариантом активной среды с точки зрения уменьшения  $\lambda$ , по крайней мере при умеренных (до нескольких мегаэлектронвольт) энергиях частиц<sup>1</sup> [3]. Соответствующая разновидность ЛСЭ носит название мазеров на циклотронном авторезонансе (МЦАР) [3]. Хотя параметры электронных пучков для МЦР и МЦАР существенно различаются, тем не менее и в том и в другом случае активной средой является так называемый винтовой электронный пучок (ВЭП) большой (сотни киловатт) и сверхбольшой (до сотен мегаватт) мощности, и проблемы формирования электронного потока имеют много общего.

### ЧТО ТАКОЕ ВИНТОВОЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК

Винтовые электронные пучки – это потоки электронов, движущихся по спиральным траекториям (рис. 1) в однородном магнитном поле  $B_0$ . Любая из таких траекторий характеризуется четырьмя параметрами: частотой вращения  $\omega_H$ , положением оси спирали  $R_0$  – и двумя составляющими скорости: продольной к оси спирали  $v_{\parallel}$  и поперечной  $v_{\perp}$ . По  $v_{\perp}$  легко определить и радиус вращения  $r_{\perp} = v_{\perp}/\omega_H$ . Вместо  $v_{\parallel}$  и  $v_{\perp}$  можно задавать полную скорость  $v$  и питч-фактор  $g = v_{\perp}/v_{\parallel}$ .

Обычно толщина пучка много меньше поперечных размеров пространства, в котором он движется. Поэтому можно пренебречь изменением потенциала поперек потока. Тогда в любой плоскости величина

$$v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2 = \text{const.} \quad (1)$$

Несмотря на постоянство энергии, компоненты скорости у различных электронов могут различаться. Для характеристики этого фактора вводят еще относительные

<sup>1</sup> При больших энергиях преимущество приобретают системы, где электрон совершает вынужденные колебания в знакопеременном магнитном поле, – убитроны [3].

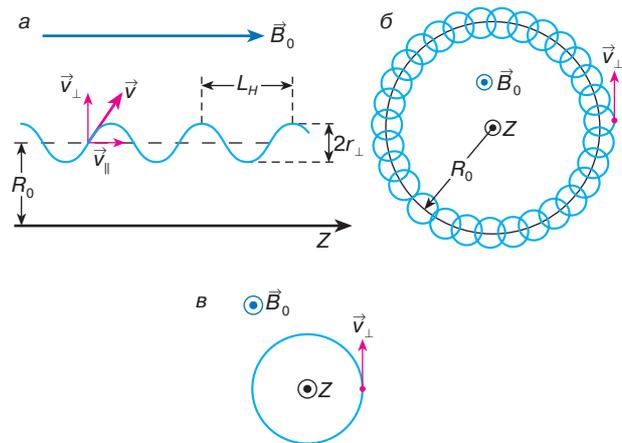


Рис. 1. Проекция винтовой электронной траектории на меридиональную (а) и азимутальную (б, в) плоскости. Случай (в) соответствует вращению электронов вокруг оси симметрии системы

разбросы продольных и поперечных скоростей  $\delta v_{\parallel}$  и  $\delta v_{\perp}$ . Из (1) легко получить, что

$$\delta v_{\parallel} = g^2 \delta v_{\perp}.$$

Поэтому для характеристики разброса скоростей достаточно одной из двух указанных величин. Чаще более удобной оказывается  $\delta v_{\perp}$ . Для эффективного преобразования энергии электронного потока в энергию электромагнитного излучения (высокочастотное (ВЧ) поле)  $\delta v_{\parallel}$  и  $\delta v_{\perp}$  должны быть достаточно малы. Обычно для удовлетворительной работы МЦР и МЦАР достаточно обеспечить  $\delta v_{\perp} < 20\text{--}30\%$ .

Винтовые электронные пучки, как правило, формируются в аксиально-симметричных статических электрическом и магнитном полях. При этом возможны два варианта расположения потока относительно оси аксиальной симметрии  $z$  (см. рис. 1). В гиротронах используется поливинтовой электронный поток, в котором радиус  $R_0 \gg \lambda$ ,  $r_{\perp}$  (рис. 1, б). В других разновидностях МЦР (гироскоп, гиротроны с большой орбитой) и МЦАР электронная орбита охватывает ось симметрии системы ( $R_0 = 0$ , рис. 1, в). Величина  $R_0$  определяется из условия эффективного преобразования энергии пучка в энергию ВЧ-поля.

В МЦР энергия электромагнитного поля черпается из энергии вращательного движения электронов, поэтому желательны достаточно большие величины  $g$ , по крайней мере  $g > 1$ . В МЦАР в энергию поля преобразуется как энергия вращения, так и энергия продольного движения, а большое преобразование частоты  $\omega_H$  порядка  $2\gamma^2$  раз вследствие эффекта Доплера возможно лишь при условии, когда скорость продольного движения

(вдоль вектора которой излучается в данном случае волна) близка к скорости света. Поэтому  $g < 1/\gamma$ .

## СПОСОБЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВИНТОВЫХ ПУЧКОВ

Любой электронный поток начинает свою жизнь с катода – электрода, на котором находится источник электронов – эмиттер. Выход электронов из твердого тела (эмиттера) называется эмиссией электронов. В мощных источниках СВЧ-излучения используются два вида эмиссии: термоэлектронная либо взрывная [4]. Первая основана на преодолении потенциального барьера на границе твердого тела частью электронов, имеющих в нагретом до температуры порядка 1500–2000°С теле достаточно большую тепловую энергию, вторая – на явлении автоэлектронной эмиссии<sup>2</sup> из большого числа существующих на поверхности эмиттера микроострий и их последующем взрыве из-за локального перегрева эмиссионным током (см. подробнее [4]). Получающееся в результате одного из этих двух процессов облако электронов вытягивается из области эмиттера ускоряющим полем второго электрода – анода и преобразуется (формируется) затем в электронный пучок с нужной формой электронных траекторий. Диодный промежуток катод–анод, в котором первоначально образуется электронное облако, называется еще электронной пушкой.

Обычно ВЭП формируются двумя путями. В первом случае сначала формируется прямолинейный электронный поток, а затем электронам придается вращательное движение, во втором электроны получают начальную вращательную скорость сразу после выхода из катода электронной пушки. Далее и в том и в другом случае ча-

<sup>2</sup> Автоэлектронная эмиссия основана на туннельном эффекте прохождения электронов сквозь узкий потенциальный барьер, образующийся под действием сильного электрического поля  $E > E_{\min} \approx 10^9$  В/м.

стицы попадают в нарастающее слабонеоднородное (адиабатическое) магнитное поле, где их вращательная скорость увеличивается до требуемой величины (рис. 2).

Естественными пространственными масштабами винтовой траектории являются ее шаг  $L_H = 2\pi v_{\perp} / \omega_H$  и радиус ларморовской орбиты  $r_{\perp} = v_{\perp} / \omega_H$  (см. рис. 1). Если они намного меньше характерных масштабов неоднородностей электрического и магнитного полей  $L_E, L_B$ , то есть

$$L_E, L_B \gg r_{\perp}, L_H, \quad (2)$$

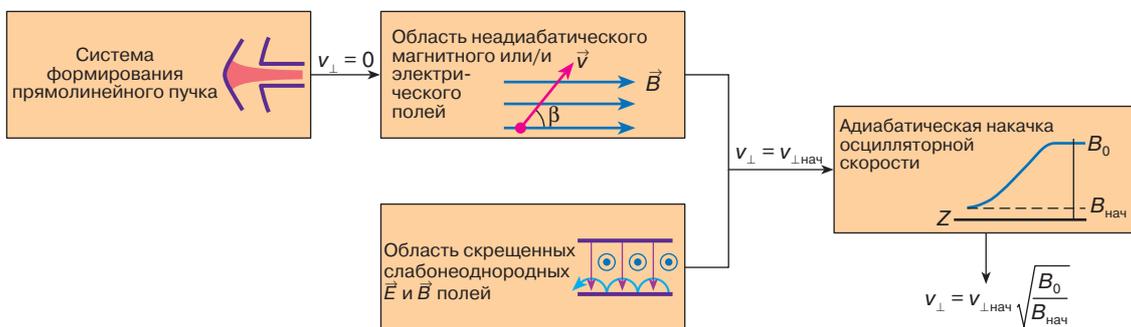
то такие поля называются адиабатическими. В этом случае движение электрона можно представить в виде быстрого циклотронного вращения со скоростью  $v_{\perp}$  по ларморовской окружности радиуса  $r_{\perp}$  вокруг центра окружности (ведущего центра с радиусом-вектором  $\mathbf{R}$ ) и медленного дрейфа ведущего центра со скоростью  $d\mathbf{R}/dt$ . То есть радиус-вектор электрона  $\mathbf{r}$  и скорость  $\mathbf{v}$ :

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_{\perp} + \mathbf{R}, \quad \mathbf{v} = \mathbf{v}_{\perp} + \frac{d\mathbf{R}}{dt}. \quad (3)$$

При выполнении условий (2) сохраняется также адиабатический инвариант

$$J_{\perp} = \frac{m^2 v_{\perp}^2}{2eB} = \text{const}. \quad (4)$$

Из последнего соотношения следует, что закрутить первоначально прямолинейный пучок в слабонеоднородном поле нельзя (при выполнении (4) из равенства  $v_{\perp} = 0$  в прямолинейном пучке следует  $v_{\perp} = 0$  далее в любой точке системы). Поэтому все системы формирования ВЭП делятся на два класса: адиабатические – с плавно меняющимися полями, для которых выполнены неравенства (2), и неадиабатические – с быстрым изменением полей. Адиабатические системы нашли широкое применение в гиротронах [1], в остальных



**Рис. 2.** Блок-схема неадиабатической (вверху) и адиабатической (внизу) систем формирования винтового пучка

случаях, как правило, используются неадиабатические системы.

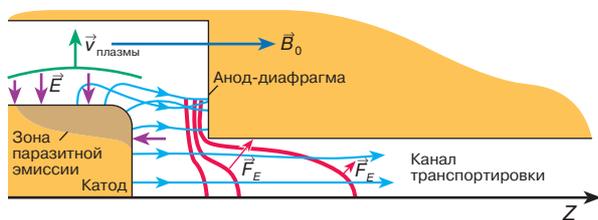
## НЕАДИАБАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ

### Формирование прямолинейного пучка — это просто?

Следует отметить, что идеально прямолинейный пучок электронов, движущихся в магнитном поле, создать нельзя, и частицы всегда, помимо движения вдоль магнитного поля, участвуют и во вращательном движении. Для последующего формирования винтового пучка с малым разбросом вращательных скоростей прямолинейный поток должен иметь малые величины  $v_{\perp}$  и малую толщину (см. ниже). Проще всего сформировать тонкий прямолинейный поток, используя явление взрывной эмиссии электронов из холодного катода, возникающей при взрыве микронеровностей (острий) на его поверхности (см. подробнее [4, 5]). Образующаяся при этом около катода плотная плазма с концентрацией до  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  является источником электронов, обеспечивающим огромные плотности токов ( $10^7 \text{ А/см}^2$  и выше). В результате токи в сотни и тысячи ампер легко получать даже с катодов малого (порядка 1 мм) размера простейшей формы в присутствии однородного магнитного поля. Пример подобной системы приведен на рис. 3. Здесь эмиссия происходит со всех участков катода, где электрическое поле  $E > E_{\text{мин}} \approx 10^9 \text{ В/м}$ . Вследствие этого очень большая доля периферийных электронов (см. рис. 3) стартует под большим углом к магнитному полю и приобретает недопустимо большие скорости вращения. Для снижения  $v_{\perp}$  пучок приходится диафрагмировать, то есть пропускать в канал транспортировки только приосевые электроны (см. рис. 3).

Диод со взрывной эмиссией характеризуется низкой стабильностью тока во времени<sup>3</sup> и быстрым переключением (за время порядка  $10^{-7}$ – $10^{-6}$  с) промежутка

<sup>3</sup> Это связано с неодновременностью взрывов микроострий.



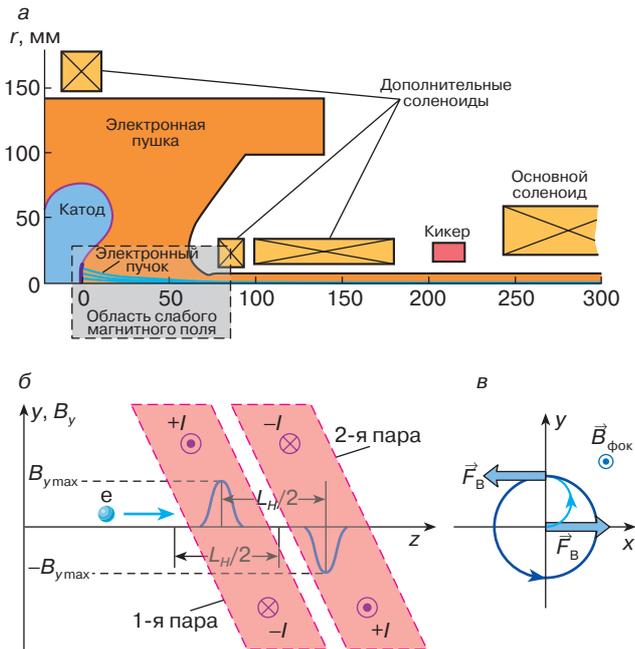
**Рис. 3.** Система формирования прямолинейного пучка с взрывоэмиссионным катодом. Красным цветом отмечены эквипотенциали в области диафрагмы, Голубым – траектории электронов, зеленым – граница катодной плазмы

катод–анод токопроводящей катодной плазмой, распространяющейся поперек магнитного поля (см. рис. 3) [4, 5]. Поэтому в высокостабильных длинноимпульсных (длительность импульса излучения больше  $10^{-6}$  с) источниках излучения необходимо использовать термоэлектронную эмиссию. В этом случае типичная величина плотности тока даже в импульсных системах не превышает  $5\text{--}10 \text{ А/см}^2$ , и для получения больших токов приходится существенно увеличивать размеры катода (до десятков миллиметров в поперечнике).

Для последующей закрутки пучка с малым разбросом вращательных скоростей диаметр пучка не должен превышать долей миллиметра. Поэтому первичное формирование прямолинейного потока проводят в сферической пушке (пушке Пирса, рис. 4, а) со сходящимися траекториями, а далее сжимают пучок в нарастающем магнитном поле со степенью сжатия по площади  $\alpha \approx 200\text{--}1000$ . Указанное значение  $\alpha$  приводит к двум трудностям. Во-первых, магнитное поле  $B_k$  на катоде пушки оказывается в  $\alpha$  раз меньше, чем в системе закрутки, и на практике часто не превышает  $10\text{--}20 \text{ Гс}$ . Это существенно увеличивает чувствительность системы формирования прямолинейного пучка к небольшим возмущениям магнитного поля. Во-вторых, даже малые паразитные вращательные скорости, приобретаемые в окрестности катода (в частности, за счет тепловых скоростей), увеличиваются затем в сжимающемся поле в  $\sqrt{\alpha}$  раз. Наконец, слабое  $B$  неспособно удержать пучок в канале транспортировки от расплывания и попадания на стенки под действием собственного кулоновского поля пучка. Поэтому для снижения роли перечисленных факторов используют, во-первых, максимально возможные темпы увеличения магнитного поля для получения больших  $B$  уже сразу за входом в канал (устанавливают дополнительные катушки, рис. 4, а), где кончается действие электростатического поля, и, во-вторых, магнитное сопровождение, при котором во всей области малого магнитного поля выполняется условие  $v \uparrow \uparrow B$  (электронная траектория совпадает с соответствующей магнитной силовой линией, см. рис. 4, а) для снижения паразитной закрутки пучка.

### Как заставить электрон вращаться

Электрон начинает вращаться, если он влетает в поперечное к направлению движения неадиабатическое магнитное поле, то есть ситуация аналогична вбрасыванию частицы под углом к  $B$  (см. рис. 2). Среди множества систем закрутки простотой и гибкостью настройки выделяется так называемый кикер (от англ. to kick – ударять, бить, см. рис. 4, б), где электроны закручиваются поперечным магнитным полем  $p$  пар длинных проводников (рамок) с током. Обычно используется  $p = 2$ , так



**Рис. 4.** Общий вид системы формирования прямолинейного пучка с термокатодом (а), распределение поперечного  $B_y$  магнитного поля кикера (б) и траектория электрона в поперечной плоскости кикера (в) в одном из практических вариантов МЦР. Стрелками указаны направления силы Лоренца при прохождении 1-й и 2-й пар проводников с током  $I$

как после получения поперечного импульса от поля первой пары электрон начинает вращаться по окружности, центр которой смещен от оси на радиус вращения (см. фиолетовую полуокружность на рис. 4, в). Вторая пара проводников расположена через полшага электронной траектории и увеличивает поперечный импульс электронов еще вдвое, в результате электрон увеличивает радиус орбиты также вдвое, а центр ее уже совпадает с осью симметрии.

Если электроны на входе в кикер имеют паразитную скорость  $v_{\perp}$ , то из-за разных фаз вращения частицы входят в поперечное поле  $B_y$  под разными углами и приобретают разные скорости вращения, то есть образуется разброс  $\delta v_{\perp}$ . К аналогичному эффекту приводит и разница в  $y$ -координате частиц, так как при большой толщине пучка разные электроны испытывают воздействие существенно разных по амплитуде полей и по-разному закручиваются. Именно поэтому для снижения  $\delta v_{\perp}$  электронный пучок на входе в кикер должен иметь как малую толщину, так и малую паразитную поперечную скорость.

## АДИАБАТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ФОРМИРОВАНИЯ

### Движение электрона в скрещенных электрическом и магнитном полях

Чтобы сразу придать электронам вращательное движение, достаточно использовать скрещенные ( $\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$ ) однородные магнитное и электрическое поля, то есть выпустить электрон с катода плоского диода, помещенного в однородное магнитное поле, направленное вдоль поверхности электродов (см. рис. 2). Пусть электрон выходит с катода с начальной скоростью  $v_0$ . Дрейфовая скорость в однородных полях  $\mathbf{E}_k$  и  $\mathbf{B}_k$  (индекс “к” относится к поверхности катода)

$$\frac{d\mathbf{R}}{dt} = \frac{[\mathbf{E}_k, \mathbf{B}_k]}{B_k^2}.$$

Тогда из (3) следует, что

$$\mathbf{v}_0 = \frac{[\mathbf{E}_k, \mathbf{B}_k]}{B_k^2} + \mathbf{v}_{\perp}. \quad (5)$$

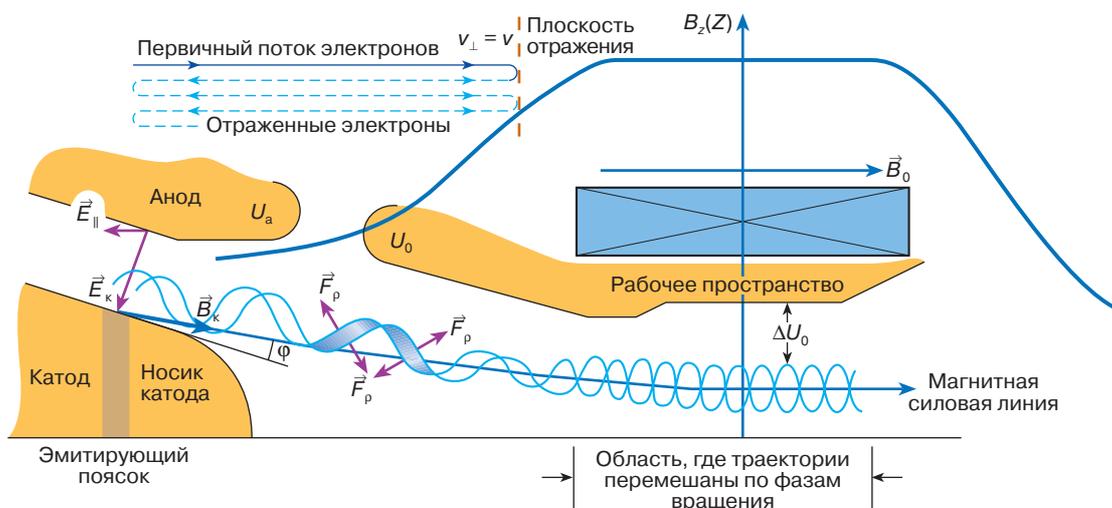
Обычно  $v_0 \ll |[\mathbf{E}_k, \mathbf{B}_k]/B_k^2|$ , и тогда из (5) легко получаем, что скорость вращения в области катода

$$v_{\perp k} = \frac{E_k}{B_k}, \quad (6)$$

а электрон движется по циклоиде. Для этого движения есть простая механическая аналогия: точно так же движется точка на ободе катящегося по плоскости без проскальзывания колеса. Если далее бросить (инжектировать) электрон в область с адиабатически нарастающим магнитным полем, то его скорость вращения может быть увеличена до требуемой величины в соответствии с законом сохранения поперечного адиабатического инварианта (4). Но в диоде нет силы, выводящей электрон в нарастающее поле  $\mathbf{B}$ . Для ее создания достаточно наклонить магнитное поле относительно поверхности катода на угол  $\varphi$ . Тогда появится компонента поля  $\mathbf{E}_{\parallel}$  вдоль магнитного поля, которая и инжектирует пучок в нарастающее поле  $\mathbf{B}$ . В конце концов в области однородного поля  $B_0$  траектория электрона приобретает вид, изображенный на рис. 1, а, б. В результате мы приходим к конструкции магнетронно-инжекторной пушки (МИП) [1] (рис. 5).

### Нужна ли электронам продольная скорость?

В МЦР в энергию электромагнитного поля преобразуется только энергия вращательного движения электронов. И с этой точки зрения желательно формировать пучки с возможно большим значением питч-фактора  $g = v_{\perp}/v_{\parallel}$  (в пределе  $g \rightarrow \infty$  и  $v_{\parallel} \rightarrow 0$ ). Однако этому препятствует несколько причин. Во-первых, необходима



**Рис. 5.** Схема адиабатической магнетронно-инжекторной пушки (меридиональное сечение) и распределение в ней магнитного поля. Вверху схематически изображено движение захваченного в адиабатическую ловушку электрона

замена отработавшей активной среды в рабочем пространстве. Во-вторых, электронный пучок понижает потенциал в месте своего нахождения (происходит провисание потенциала, см. рис. 5). Как легко оценить, величина провисания потенциала

$$\Delta U_0 \sim \frac{I}{v_{||}}$$

Поэтому при малых  $v_{||}$  область взаимодействия не в состоянии пропустить большой заряд пучка (потенциал в пучке стремится к потенциалу катода  $U = 0$ ), часть электронов отражается от рабочего пространства, а пучок становится неустойчивым (см. подробнее [4, 5]).

Наконец, электроны пучка имеют разброс вращательных скоростей  $\delta v_{\perp}$ . Это также вызывает отражение части электронов пучка от рабочего пространства при попытке реализовать чрезмерно большие величины  $g$ . Из-за разброса скоростей всегда находятся электроны с вращательной энергией больше средней, у которых при движении в нарастающем магнитном поле скорость  $v_{\perp}$  становится равной полной ( $v_{\perp} = v = \sqrt{2eU_0/m_0}$ , см. рис. 5) в некоторой плоскости еще в области нарастающего магнитного поля, а компонента скорости вдоль магнитного поля  $v_{||}$  обращается в нуль. Такие частицы далее поворачивают обратно к катоду. Говорят, что происходит отражение от магнитного зеркала. Но и на эмиттер эти электроны попасть тоже не могут (для этого они должны двигаться обратно в точности по своим первичным траекториям, а это маловероятно). Поэтому электроны начинают совершать продольные колебания (см. рис. 5). Колеблющиеся электроны создают

ВЧ-поле, которое часть электронов ускоряет. Эти частицы уже имеют достаточную для попадания на катод энергию и начинают бомбардировать его. В результате катод греется, увеличивается эмиссионный ток и еще больше электронов захватывается в ловушку. Развивается лавинный процесс неуправляемого нарастания тока, и пучок становится неустойчивым. Таким образом, скоростной разброс является основным фактором, ограничивающим значение  $g$  и в конечном итоге эффективность преобразования энергии электронов пучка в энергию электромагнитного поля.

### Скоростной разброс в адиабатических системах

Скоростной разброс в МИП появляется в силу многих причин. Рассмотрим наиболее важные из них.

Одной из удивительных особенностей магнетронно-инжекторных пушек является то, что, согласно формуле (5), величина  $v_{\perp k}$  определяется не сложением энергий, а сложением скоростей. Это обуславливает значительно большую, чем в прямолинейных пучках, величину разброса за счет начальных тепловых скоростей  $v_T$ . В самом деле, при сложении энергий

$$v = \sqrt{\frac{2eU_0}{m_0} + v_T^2},$$

поэтому  $v_T$  дает поправку второго порядка малости в скоростной разброс. В то же время из (5) следует, что

$$v_{\perp k} = \frac{E_k}{B_k} - v_0 = \frac{E_k}{B_k} - v_T.$$

то есть в нашем случае поправка первого порядка. Несложные оценки показывают, что соответствующая компонента скоростного разброса может достигать нескольких процентов.

Еще более неожиданной оказывается величина вклада в скоростной разброс от поля пространственно-го заряда пучка. Вызванный им прирост  $\delta v_{\perp}$  становится доминирующим уже при токе эмиссии  $I$  порядка 0,1 от максимального тока пушки, получающегося в режиме ограничения тока пространственным зарядом (режим с нулевым электрическим полем на катоде, см. [4]). Хотя, казалось бы, при таких  $I$  электрическое поле на катоде лишь слегка ослаблено полем пространственного заряда пучка и пространственный заряд должен вносить малую поправку в  $\delta v_{\perp}$ .

Быстрый рост скоростного разброса при увеличении  $I$  связан с двумя причинами. Во-первых, пространственный заряд приводит к неоднородной экранировке электрического поля на катоде. Поскольку над левым краем эмиттера проходит только часть, а над правым – весь эмитируемый ток, поле над левым краем ослабляется в меньшей степени, чем над правым (см. формулу (6)). Но самое главное, что электроны, выходящие из разных точек эмиттера, двигаются почти синфазно и электронные траектории образуют регулярные пересечения, следующие через каждые полпериода электронной траектории (см. рис. 5). В этом случае сила  $F_p$  со стороны поля пространственного заряда пучка непрерывно тормозит электроны, стартующие с левого края эмиттера (скорость вдоль магнитного поля  $v_{\parallel}$  падает), и ускоряет стартующие с правого ( $v_{\parallel}$  растет) до тех пор, пока электронные траектории не перемешаются по фазам вращения (см. рис. 5). Поскольку  $v_{\perp}^2 + v_{\parallel}^2 = \text{const}$ , скорость  $v_{\perp}$  у “левых” электронов увеличивается, а у “правых” уменьшается. Фактически наблюдается хорошо известное в физике явление резонанса.

Уменьшить последний механизм образования разброса можно меняя угол наклона  $\phi$  магнитного поля  $\mathbf{B}_k$  к поверхности катода. На практике лучше всего себя зарекомендовали пучки с  $\phi > 18^\circ$ . Здесь пересечения в прикатодной области вообще отсутствуют или слабо выражены, и область регулярных пересечений сдвигается далеко в нарастающее магнитное поле, где пучок уже имеет большую скорость и соответственно меньшую плотность объемного заряда. Поэтому увеличение разброса оказывается существенно ослабленным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы не полностью описали проблемы, возникающие при создании активной среды в виде винтового электронного потока. В частности, для адиабатических МИП в последнее время получены данные, указывающие на существенную роль нестационарных процессов при формировании винтовых пучков, даже когда на “макроскопическом” уровне поток остается устойчивым. Не отражены и перспективы считавшегося долгое время нецелесообразным использования режима ограничения тока пространственным зарядом в адиабатических системах.

В неадиабатических системах по-прежнему актуален поиск новых систем закрутки пучка. Далеко не исчерпаны и методы снижения паразитных вращательных скоростей на предварительной стадии формирования прямилинейного потока.

Тем не менее здесь изложены современные подходы к решению проблемы формирования активной среды для основанных на магнитотормозном механизме излучения электронов мощных лазеров на свободных электронах и мазеров на циклотронном резонансе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гапонов-Грехов А.В., Петелин М.И. Мазеры на циклотронном резонансе // Наука и человечество. М., 1980. С. 283–297.
2. Братман В.Л., Гинзбург Н.С. Лазеры на свободных электронах // Физическая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1980. Т. 2. С. 564–566.
3. Братман В.Л., Гинзбург Н.С., Петелин М.И. Лазеры на свободных электронах: Перспективы продвижения классических электронных генераторов в коротковолновые диапазоны // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1980. Т. 44, № 8. С. 1593–1602.
4. Литвинов Е.А. Сильноточные релятивистские электронные пучки. Ч. 1: Физика пучков // Соросовский Образовательный журнал. 1998. № 6. С. 100–105.
5. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1984. 432 с.

*Рецензент статьи* А.Н. Диденко

\* \* \*

Владимир Николаевич Мануилов, доктор физико-математических наук, доцент кафедры электроники радиофизического факультета Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Область научных интересов – сверхвысокочастотная электроника, электронная оптика интенсивных электронных пучков. Автор свыше 140 научных публикаций и шести изобретений.