

ты $E_{||}$, E'_{11} и E'_{12} . При этом из (1) выделяются «продольный» и «поперечный» законы Ома:

$$j_{||} = \sigma_{||} E_{||}, \quad j_{\perp} = \sigma_{\perp} \left(E'_{11} - \frac{3v_e m_e c}{2e^2 H^2} [H \nabla_{\perp} T] \right),$$

а градиент ионного давления уравновешивается колловским полем $E'_{12} = \nabla_{\perp} p_i / e n$ (см. Холла эффект).

Для нестационарных процессов, характерные времена n -рых значительно больше обратных величин ионной циклотронной и ленгмюровской частот, соотношение (1) обобщается добавлением в левую часть слагаемого $(m_e e^2 n) \partial j / \partial t$.

В слабоионизованной плазме дополнит. вклад в плотность тока даёт сила трения между заряд. компонентами и нейтральной составляющей. В ионосферной плазме при расчёте НЧ-процессов учитывают также вклад силы тяжести. Для трёхкомпонентной ионосферной плазмы (электроны, один сорт ионов и один сорт нейтралов), пренебрегая разл. между продольной и поперечной проводимостями и термосилой, О. о. з. обычно записывают в виде

$$\frac{m_e n_e j}{e^2 n_e} + \frac{m_e}{e^2 n_e} \frac{\partial j}{\partial t} = E' - \frac{\nabla p_i}{e n} + \frac{m_i}{e c} g + \frac{m_e}{e} (v_{en} - v_{in})(u - u_n), \quad (2)$$

где g — ускорение силы тяжести, u_n — скорость движения нейтральной составляющей, v_{en} , v_{in} — частоты соударений с нейтралами соответственно электронов и ионов, $v_e = v_{en} + v_{ei} + m_e v_{in} / m_i$ — полная частота соударений электрона, определяющая время передачи их импульса тяжёлым частицам $\tau_e = 1/v_e$.

Соотношения (1) и (2) справедливы при малых плотностях тока, когда плазму можно считать линейной проводящей средой. При больших плотностях тока развиваются нелинейные режимы и необходимо учитывать индуцированные в плазме нелинейные токи. Напр., для слабонелинейных дрейфовых волн в бесстолкновительной плазме нелинейное обобщение соотношения (1) имеет вид

$$j = \frac{cT}{H} [h \nabla_{\perp} n] + \frac{m_e m c^2}{H^2} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{c}{H} [Eh] \nabla_{\perp} \right) E_{\perp},$$

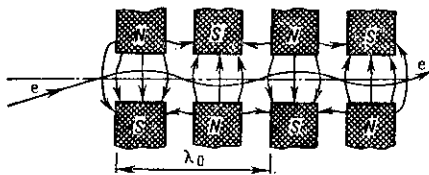
где h — единичный вектор, направленный вдоль магн. поля H .

Лит.: Альвен Х., Фельтхаммар К.-Г., Космическая электродинамика, пер. с англ., 2 изд., М., 1967; Франк-Каменецкий Д. А., Лекции по физике плазмы, 2 изд., М., 1968; Грановский В. Л., Электрический ток в газе, М., 1971; Голант В. Е., Жилинский А. П., Сахаров И. Е., Основы физики плазмы, М., 1977.

Н. С. Ерохин.

ОНДУЛЯТОР (франц. *ondulateur*, от *onde* — волна), устройство, в к-ром создаются эл.-магн. поля, действующие на движущиеся в нём заряд. частицы с периодич. силой, удовлетворяющей условию: среднее за период значение силы равно нулю. Движущаяся заряд. частица, попав в О., совершает периодич. колебат. движение и испускает *ондуляторное излучение*. Заряд. частицу в О. можно считать возбуждённым *осциллятором*, движущимся равномерно и прямолинейно. Наиб. распространённые траектории заряд. частицы — синусоиды и спирали.

Схема ондулятора со знакопеременным магнитным полем. Траектория частиц (электрона e) лежит в плоскости, перпендикулярной рисунку. λ_0 — длина периода траектории частицы.



По виду создаваемых полей О. делятся на два типа. В О. 1-го типа поля периодически изменяются в пространстве или во времени [знакопеременное магн. поле (рис.), винтовое магн. поле, ВЧ-электрич. поле, поле

эл.-магн. волны и т. д.]. В О. 2-го типа действуют статич. фокусирующие магн. и электрич. поля (однородное магн. поле, скрещенные однородные электрич. и магн. поля, квадрупольное электрич. поле и т. д.). Длина периода траектории частицы в О. 1-го типа задаётся периодом поля О. и в релятивистском случае не зависит от её энергии. В О. 2-го типа длина периода траектории частицы определяется фокусирующими свойствами полей (градиентом, величиной), амплитудой колебания частицы (задаётся углом и координатой её вхождения в О.), энергией частицы. О. делят также на статические (постоянные во времени электрич. и магн. поля) и динамические (быстро изменяющиеся во времени эл.-магн. поля).

Природные О. — кристаллы. Усреднённое внутрикристаллич. электрич. поле является фокусирующим для заряд. частицы (см. *Каналирование заряженных частиц*) и в то же время — периодич. ф-цией расстояния, отсчитываемого вдоль прямой, пересекающей кристаллографич. плоскости. Поэтому, если угол и координата вхождения частицы в кристалл таковы, что она пересекает кристаллографич. плоскости, то кристалл подобен О. 1-го типа. Длина периода траектории частицы в этом случае определяется межплоскостным расстоянием и углом между вектором ср. скорости частицы и кристаллографич. плоскостями. Если же нач. условия таковы, что частицы попадают в режим плоскостного или осевого каналирования, то кристалл подобен О. 2-го типа.

О. нашли широкое применение: они могут служить источниками ондуляторного излучения, использоваться в *лазерах на свободных электронах*, в быстродействующих системах индикации протонных пучков высоких энергий, в системах управления параметрами пучков заряд. частиц, использующих фокусирующие свойства О. и радиац. трение частиц, возникающее при испускании ими ондуляторного излучения. О. могут использоваться в масс-сепараторах хим. элементов и их изотопов, в ондуляторных линейных ускорителях заряд. частиц, в ондуляторных группирователях пучков заряд. частиц. Комбинации О. 1-го и 2-го типов (напр., О. с винтовым и с соленоидальным магн. полями) могут использоваться в масс-спектрометрах, системах ввода ионов в магн. ловушки, в системах, создающих регулируемый угл. разброс пучков частиц. Во мн. установках может оказаться целесообразным применение О. с плавно меняющимися параметрами — длиной периода траектории частицы, величинами магн. и электрич. полей и т. д. В таком О. можно, напр., добиться увеличения времени резонансного взаимодействия частиц с эл.-магн. волной, расширения диапозона частот спектра спонтанного ондуляторного излучения.

В О. с переменным магн. полем могут использоваться как пост. магниты с чередующимися знаками полюсов (рис.), так и электромагниты. В О. на основе электромагнитов, представляющих собой две спирали, сдвинутые друг относительно друга на половину шага намотки и питаемые противоположно направленными токами, создаются винтовые (циркулярно поляризованные) магн. поля; такие О. наз. спиральными. Комбинируя спиральные О. с одинаковым и разным направлением намотки обмоток, с одинаковым и разным шагом намотки и регулируя токи в обмотках, можно оперативно изменять величину магн. поля О. и вид его поляризации (изменять циркулярную поляризацию магн. поля на линейную или эллиптическую, а также создавать совокупность циркулярно поляризованных полей с разл. направлениями вращения и разными периодами). Такими методами можно генерировать ондуляторное излучение с разл. свойствами на основной и на высших гармониках.

В О., используемых в источниках ондуляторного излучения (генерация ондуляторного излучения на высших гармониках), в ондуляторных линейных электронных, протонных, ионных ускорителях, в масс-се-