

1.1 Ионный пучок

Начнем с некоторых определений:

Ионы (от греч. идуций) – заряженные частицы, образующиеся из атома (молекулы) в результате потери или присоединения одного или нескольких электронов.

Ионный источник – устройство для получения направленных потоков (пучков ионов); важная часть ускорителей заряженных частиц, масс-спектрометров, ионных микроскопов и др. устройств.

Ионный пучок — направленный поток положит, (одно- или многозарядных) или отрицательных ионов, имеющий обычно малые поперечные размеры по сравнению с длиной и движущийся со скоростью, значительно превышающей хаотические тепловые скорости составляющих его частиц. Применяется в ускорителях, установках термоядерного синтеза, масс-спектрометрах, различных технологических установках микроэлектроники.

Впервые ионный пучок наблюдал Э. Гольдштейн (E. Goldstein) в 1886; в катод газоразрядной трубки были проделаны отверстия, через которые проходили ионы, ускоренные в межэлектродном промежутке и создавали за катодом слабое свечение (т. н. каналовые лучи). Пучок положительных ионов впервые получил в 1910 г. Дж. Дж. Томсон. Он же исследовал воздействие на траекторию пучка электростатического и магнитного полей и открыл, что отклонение ионов в однородном магнитном поле обратно пропорционально их массе. Развитие техники ионных пучков тесно связано с развитием атомной физики. В настоящее время ионный пучок получают с помощью различных ионных источников, и формируют системами электрической и магнитной фокусировки. Ионные пучки могут иметь вид цилиндра, конуса, ленты и т. п. Наиболее важным техническим применением ионных пучков явилось ионное легирование полупроводниковых материалов, идея которого была предложена В. Шокли (1954).

Поведение ионного пучка зависит от начальной направленной скорости ионов, их тепловых скоростей, внешних электрических и магнитных полей, парных столкновений ионов с частицами среды, а также от собственного объемного заряда пучка и магнитного поля его тока. Важным параметром ионного пучка, характеризующим влияние объемного заряда на его свойства является первеанс

$$P = \frac{I}{U^{3/2}}, \quad (1)$$

где I - ток пучка, а U - ускоряющая ионы разность потенциалов. Пучки с постоянным первеансом при одинаковых размерах подобны друг другу. Хотя разброс тепловых (хаотических) скоростей ионов может быть мал по сравнению с их направленной скоростью, часто именно тепловые скорости ограничивают возможную фокусировку ионного пучка, искажая его форму. Это качество пучка характеризуется т. н. эмиттансом, связанным с проекцией фазового объема пучка на плоскость, который примерно равен

$$V_\phi = 2R_0 \sqrt{\frac{2T_i}{Mc^2}}, \quad (2)$$

где R_0 — радиус плазмы, служащей источником ионов с температурой T_i , выраженной единицах энергии, M - масса иона. В отсутствие частиц противоположного знака, осесимметричный ионный пучок расширяется вдоль оси z под действием собственного заряда, и профиль ионного пучка описывается формулой:

$$f\left(\frac{R}{R_0}\right) = 2^{-\frac{3}{4}} I^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M}{e}\right)^{\frac{1}{4}} U^{-\frac{3}{4}} R_0^{-1} z, \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{1}{2} \int_1^x \frac{dy}{\sqrt{\ln y}} \quad (4)$$

Для сохранения формы ионного пучка их объемный заряд должен быть скомпенсирован зарядом частиц противоположного знака. Наиболее распространена «газовая» компенсация объемного заряда в ионном пучке. При столкновении некоторых положительных, ионов пучка с атомами остаточного газа образуются электроны, и относительно медленные положительные ионы. Последние выталкиваются из пучка электрическим полем, а электроны накапливаются в нём, несмотря на то, что этому препятствуют кулоновские столкновения их с первичными ионами. Так достигается не полная, но значительная компенсация объемного заряда в пучке положительных ионов (**Рис. 1, а**). Иначе происходит газовая компенсация объемного заряда в пучке отрицательных ионов (**Рис. 1, б**). В этом случае при малом давлении газа накапливаемые медленные положительные ионы также лишь частично компенсируют объемный заряд ионного пучка. Однако при достаточно большом давлении газа происходит перекомпенсация объемного заряда: за счёт накопления большого числа медленных положительных,

ионов потенциал в пучке изменяет свой знак и происходит «газовая фокусировка» пучка отрицательных ионов.

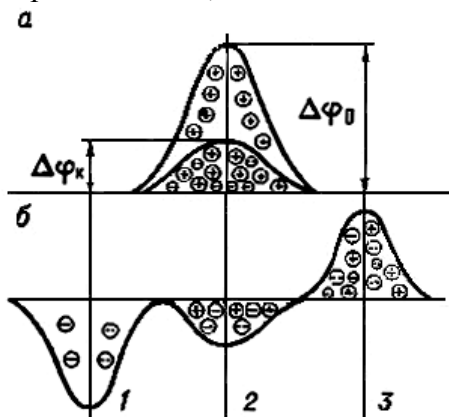


Рис. 1. Радиальное распределение потенциала: а - в пучке положительных ионов до компенсации ($\Delta\varphi_0$) и после неё ($\Delta\varphi_k$); б - в пучке отрицательных ионов при различных давлениях газа: 1 - в высоком вакууме; 2 - при большом давлении, когда пучок в значительной мере компенсирован; 3 - при большом давлении, когда произошло обращение знака потенциала.

Другой способ компенсации объёмного заряда ионного пучка состоит в «принудительном» введении в ионный пучок пучков зарядов противоположного знака, т. е. в совмещении пучков. Так получают синтезированные ион-электронные или ион-ионные пучки с компенсированным объёмным зарядом; при этом одновременно с

компенсацией объёмного заряда часто осуществляется необходимая токовая компенсация. В результате происходит переход к плазменным потокам, называемым в плотных ионных пучках ионно-пучковой плазмой. Из-за немасвелловского распределения скоростей возникают коллективные явления — электронные и ионные колебания. Коллективные эффекты, приводя к изменению фазового объёма, также влияют на транспортировку ионного пучка.

Для получения ионного пучка часто используют ионные источники с газоразрядными ионизационными камерами и тогда отбор ионов осуществляется не с фиксированной поверхности твёрдого тела, а с границы плазмы, перемещающейся при изменении внешних условий или режима работы источника (Рис. 2).

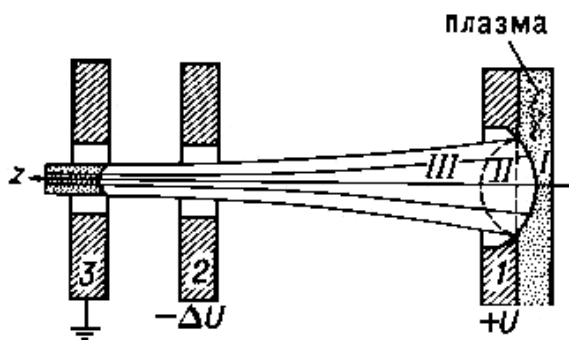


Рис. 2. Система первичного формирования ускоренного пучка ионов, извлекаемых из плазменного источника: 1, 2, 3 — Электроды. I — вогнутая граница плазмы, II — плоская, III — выпуклая.

В этом случае первичное формирование И. п. связано с так называемой плазменной фокусировкой. При увеличении ускоряющей разности потенциалов U граница плазмы из выпуклой (III) становится вогнутой (I), создаются условия

для фокусировки пучка. Электрод 2 с отверстием для пучка, имеющий потенциал ниже потенциала заземлённого электрода 3, удерживает электроны, компенсирующие ионный пучок, и ускоряет сам ионный пучок. В дальнейшем ионные пучки могут фокусироваться с помощью электростатических и магнитных линз. Сжатие ионного пучка связано с его «охлаждением» — уменьшением фазового объёма. Одним из методов охлаждения «горячего» ионного пучка является совмещение его с «холодным» электронным пучком.

В 80-е гг. получают квазистационарные ионные пучки с током до 100 А, импульсные — с током до сотен тысяч А. Важной проблемой остаётся транспортировка таких пучков.

Ионные пучки широко применяются: в ускорителях, установках управляемого ионного термоядерного синтеза, в разнообразных технологических установках, масс-спектрометрии, установках для разделения изотопов, для исследования поверхности твёрдых тел, для сухого травления в технологии микроэлектроники, ионных микроскопах и проекторах и т. д.

Ионный микроскоп — безлинзовый прибор, в котором для получения изображений используется ионный пучок. Последний проходит через объект, полностью или частично прозрачный для ионов данной энергии, фокусируется системой электрических и магнитных полей и образует на люминесцирующем экране или в слое фотоэмульсии увеличенное изображение объекта.

Ионный проектор — безлинзовый прибор для получения увеличенного изображения поверхности (острия) твёрдого тела. Атомы газа, заполняющего прибор, ионизируются в сильном электрическом поле вблизи острия, отдавая ему свои электроны. Образовавшиеся положительные ионы попадают на люминесцентный экран, создавая контрастное изображение поверхности. Разрешающая способность ионного проектора примерно 10^{-10} м⁻¹.