

электрического тока просто в результате статистических флуктуаций векторной суммы скоростей электронов. Этот спонтанно флуктуирующий ток можно измерить. Он является источником «шума»

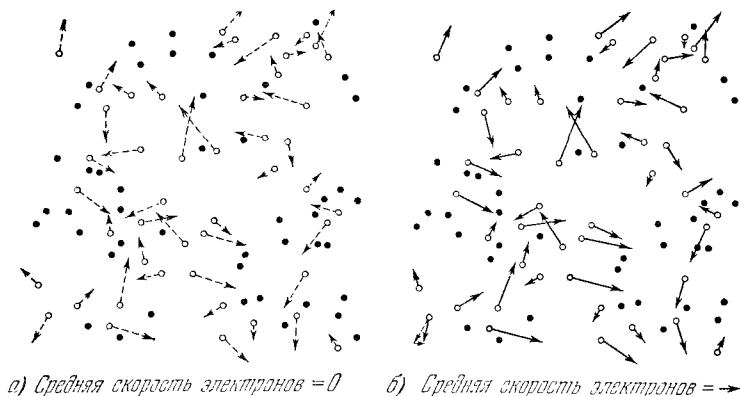


Рис. 4.5. а) Хаотическое распределение примерно равного числа электронов (светлые кружки) и положительных ионов (черные кружки). Скорости электронов показаны векторами и в (а) совершенно случайны. В (б) существует дрейф вправо, представленный вектором скорости →. Эта скорость добавлена к каждой первоначальной скорости электрона, как показано для одного из электронов в левом нижнем углу.

во всех электрических цепях и часто определяет в конечном счете предел чувствительности устройств, регистрирующих слабые электрические сигналы. С этим вопросом вы познакомитесь в т. V нашего курса.

4.5. Где нарушается закон Ома?

Теперь посмотрим, как может нарушаться закон Ома. Предположим, что электрическое поле \mathbf{E} настолько велико, что добавочная скорость, которую приобретает ион между соударениями, сравнима со средней скоростью теплового движения. Это серьезно повлияет на входящее в (16) среднее время между столкновениями, \bar{t}_+ или \bar{t}_- . Времена эти теперь будут функциями \mathbf{E} , а не константами и уравнение (16) станет нелинейным: удвоение величины поля \mathbf{E} не удваивает плотность тока \mathbf{J} , если \bar{t} тоже меняется. Посмотрим, когда такая нелинейность начнется. Наша модель напоминает слабо ионизованный газ. При нормальной плотности средняя длина свободного пробега иона в таком газе имеет порядок 10^{-6} см. Средняя кинетическая энергия хаотического движения — порядка kT , где k — постоянная Больцмана, встречающаяся в кинетической теории газов. Критерий для скорости можно выразить так: мы можем ожидать «неприятностей», если полученная между столкновениями от поля добавочная кинетическая энергия сравнима с kT . Устанавливая между этими энергиями приблизительное равенство

$$eE \cdot 10^{-6} \text{ см} \approx kT \quad (18)$$

и подставляя числа, мы находим $E \approx 80$ ед. ГГСЭ_v/см. Для лабораторных полей это — скромная величина, она составляет 24 кв/см. Предельное поле непосредственно зависит от длины свободного пробега. В ионизованном газе при низком давлении, где длина свободного пробега очень велика, уже при слабых полях могут наблюдаться заметные отклонения от закона Ома.

Очень сильные электрические поля могут привести к более радикальным переменам, например к изменению числа носителей заряда. Как раз это происходит в электрической искре. Уже имеющиеся носители заряда получают от поля столько энергии, что столкновения с другими атомами достаточно разрушительны, чтобы их ионизовать; так образуются новые носители заряда и т. д. Возникающая лавина является катастрофическим нарушением закона Ома!

Мы можем ожидать если не нарушения закона Ома, то по крайней мере нарушения нашей теории еще с одной стороны. Предположим, что поле E приложено только на очень короткое время. Если это время сравнимо или меньше критического времени τ , то, очевидно, нашу картину следует пересмотреть. Для полной наглядности рассмотрим приложенное переменное электрическое поле с периодом, меньшим времени между столкновениями. Тогда реакция носителей будет определяться главным образом их инерцией — инерцией свободных тел. Это — интересная проблема, вам она может в будущем встретиться, и, какова бы ни была ее природа, развитая нами теория для нее не годится. Заметим, однако, что в газе, взятом сейчас в качестве примера, среднее время между столкновениями составляет для положительных ионов что-нибудь около 10^{-8} см/скорость молекул, т. е. имеет порядок 10^{-10} сек, а для электронов — еще меньше. Таким образом, наша теория, несмотря на то, что она была разработана для постоянного поля, должна работать во многих системах, даже при очень быстро меняющихся полях.

Для описанного в разделе 4.2 вакуумного диода закон Ома неприменим. При некоторых условиях, когда приток электронов ограничен их эмиссией с катода, ток практически не зависит от напряжения, если анод находится при положительном потенциале. Если потенциал анода отрицателен, ток равен нулю, так как анод вообще не может испускать электроны. Диод пропускает ток только в одном направлении. Обычно его применяют в качестве выпрямителя переменного тока. В условиях ограничения тока пространственным зарядом (см. задачу 4.25) ток диода пропорционален напряжению в степени $3/2$, а вовсе не в первой степени, как требуется по закону Ома.

Место контакта между двумя полупроводниками или между полупроводником и металлом может быть в высокой степени «не омическим» и даже иметь одностороннюю проводимость, как вакуумный диод. В электронике (как и в других областях) без нелинейных устройств нельзя обойтись. Если бы все на свете стало подчиняться закону Ома, электроника прекратила бы свое существование.