

образованнем характеристик N - и S -типа можно записать в виде

$$\frac{d}{dT_e} \ln(\sigma P) = 0$$

и

$$\frac{d}{dT_e} \ln\left(\frac{P}{\sigma}\right) = 0$$

или

$$\frac{n^2\mu}{\tau_e} + (T_e - T) \frac{d}{dT_e} \left(\frac{n^2\mu}{\tau_e}\right) = 0, \quad N\text{-тип}, \quad (7.6)$$

и

$$1 - \frac{T_e - T}{\mu\tau_e} \frac{d(\mu\tau_e)}{dT_e} = 0, \quad S\text{-тип}. \quad (7.7)$$

Чтобы придать условиям (7.6) и (7.7) явный вид, надо найти подвижность, концентрацию носителей заряда и время релаксации энергии как функции электронной температуры. Расчеты показывают*), что для ряда веществ условия (7.6) и (7.7) действительно удовлетворяются. Так, в однородном n -GaAs уже при комнатной температуре возникает характеристика N -типа. Участок отрицательной дифференциальной проводимости начинается при напряженности поля \mathcal{E} около 2,3 кВ/см и исчезает при $\mathcal{E} \simeq 10$ кВ/см. В n -Ge, легированном золотом или медью, также возникает такая характеристика в области водородных или, соответственно, азотных температур решетки.

§ 8. Флуктуационная неустойчивость

С точки зрения радиотехники образец с вольтамперной характеристикой N - или S -типа представляет собой активный элемент цепи. При определенных условиях в контуре, содержащем такой элемент, могут возбуждаться незатухающие колебания тока. Частота их зависит от параметров контура. Однако активные элементы, рассмотренные в предыдущих параграфах, обладают одной важной особенностью, отличающей их от других известных в радиофизике: мы, по предположению, имели дело с технологически однородными образцами.

Следует, однако, иметь в виду, что представление о пространственной однородности в среднем не исключает малых локальных отклонений — флуктуаций — концентрации электронов, напряженности поля и т. д. от средних их значений. Эти флуктуации обусловлены, с одной стороны, беспорядочным тепловым движением носителей заряда, с другой — случайными неоднородностями в распределении примесных атомов и других структурных дефектов кристаллической решетки. Когда электронный газ находится в состоянии термодинамического равновесия или близком к нему, наличие флуктуаций обычно слабо влияет на явления переноса. Действительно, флук-

*) В применении к n -GaAs подробный расчет можно найти в книге [2].

туации, связанные с тепловым движением, быстро затухают, а вероятность появления больших флуктуаций невелика. Последнее относится и к случайным неоднородностям в распределении примеси в технологически однородном образце. Сверх того, неоднородности в распределении примесных ионов — как и всякий заряд в полупроводнике или металле — экранируются, что еще более локализует их влияние.

Положение может измениться, если электронный газ достаточно сильно нагрет. Действительно, пусть произошла малая локальная флуктуация напряженности поля $\delta\mathcal{E}(x)$ (рис. 16.12); в силу уравнения Пуассона она сопровождается и флуктуациями плотности заряда $\delta\rho =$

$= \frac{\epsilon}{4\pi} \operatorname{div} \delta\mathcal{E}$. Далее, согласно (7.2) должна появиться и малая флуктуация плотности тока

$$\delta j = \sigma_d \delta\mathcal{E}. \quad (8.1)$$

Как видно из рис. 16.12, при $\sigma_d > 0$ флуктуация плотности тока такова, что приток заряда в область пониженной концентрации его увеличивается, а в область повышенной концентрации — уменьшается, т. е. флуктуация затухает со временем. С другой стороны, при $\sigma_d < 0$ увеличивается (уменьшается) приток заряда в область, где плотность его и без того уже повышена (понижена). Соответственно флуктуация, раз возникнув, должна, казалось бы, разрастаться — во всяком случае до тех пор, пока ее рост не будет ограничен нелинейными эффектами*). В этом рассуждении содержится, однако, одна неточность. Дело в том, что соотношения (7.2) и, следовательно, (8.1) написаны для пространственно однородной

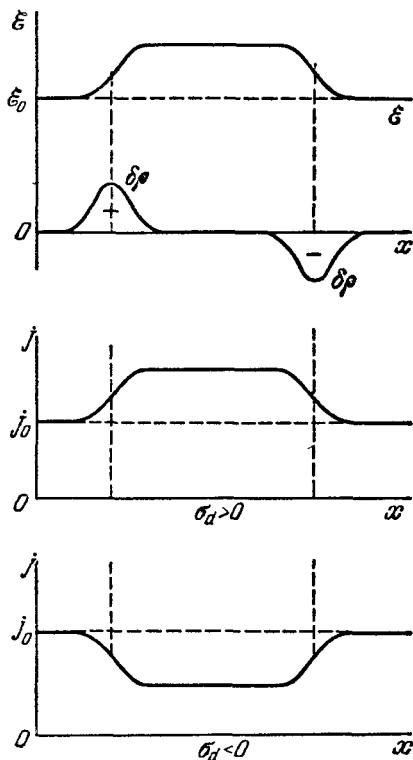


Рис. 16.12. Флуктуации напряженности поля, объемной плотности заряда и плотности тока при положительной и отрицательной дифференциальной проводимости. Через \mathcal{E}_0 и \dot{j}_0 обозначены средние значения напряженности поля и плотности тока.

*) Формально влияние нелинейных эффектов проявится в поправках к формуле (8.1): она вытекает из (7.1) лишь при очень малых (формально — бесконечно малых) значениях δj и $\delta\mathcal{E}$.

системы носителей заряда. При наличии флуктуаций плотности заряда и электронной температуры появляются еще электронные потоки диффузионного и термоэлектрического происхождения, способствующие рассасыванию флуктуации. По этой причине флуктуация начинает расти, лишь если дрейфовая компонента флуктуации плотности тока (8.1) не только антипараллельна $\delta\mathcal{E}$, но и достаточно велика по абсолютной величине: абсолютная величина отрицательной дифференциальной проводимости должна превосходить некоторое критическое значение σ'_d . Для вычисления σ'_d надо исследовать поведение флуктуаций напряженности поля, плотности заряда и т. д. Результат зависит от конкретных особенностей рассматриваемой системы (соответствующие расчеты можно найти в книге [4]).

Коль скоро условие

$$|\sigma_d| > \sigma'_d \quad (8.2)$$

выполняется, газ носителей заряда оказывается неустойчивым относительно развития малых флуктуаций плотности заряда и напряженности поля. Об этом говорят как о флуктуационной неустойчивости системы. В результате распределение плотности заряда, напряженности электрического поля и электронной температуры в технологически однородном образце становится пространственно неоднородным. Иначе говоря, при достаточно большом отклонении от термодинамического равновесия, когда $|\sigma_d|$ достигает значения σ'_d , газ носителей заряда переходит в некоторое новое состояние, в равновесных условиях не наблюдаемое.

§ 9. Электрические домены и токовые шнуры

Исследуем распределение напряженности поля и других физических величин в пространственно неоднородном состоянии, возникающем в результате флуктуационной неустойчивости. С этой целью надо выяснить, какие именно отклонения от постоянных средних значений j , n , \mathcal{E} и T_e «опасны», т. е. не затухают, а нарастают со временем.

Удобно воспользоваться уравнением баланса энергии (7.3'), записав его в виде

$$\Gamma \equiv (j, \mathcal{E}) - P = 0. \quad (9.1)$$

Величина Γ представляет собой отнесенную к единице объема и единице времени разность между энергией, получаемой электронами от поля, и энергией, отдаваемой ими решетке. В результате флуктуаций электронной температуры, плотности заряда и т. д. значение Γ может стать отличным от нуля. При этом существуют две возможности:

а) Знаки $\delta\Gamma$ и δT_e противоположны. При этом случайное уменьшение (увеличение) электронной температуры компенсируется отно-