

О ВОЗМОЖНОМ ТИПЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПРИ МОНОПОЛЯРНОЙ ИНЖЕКЦИИ

24

В.Б.Сандомирский, А.Г.Ждан

Покажем, что эффект исчезновения локальных уровней при экранировании свободными носителями, теоретически предсказанный в работе [1] и экспериментально наблюдавшийся в работе [2], может приводить при монополярной инжекции из контакта (т.е. в режиме токов, ограниченных пространственным зарядом — ТОПЗ) к S-образной вольт-амперной характеристике.

Рассмотрим тонкий диэлектрический слой толщиной L , в котором имеется высокая концентрация N_t моноэнергетических электронных ловушек глубиной E_t . Инжектируемые из контакта электроны распределяются между ловушками и зоной проводимости. Свободные электроны экранируют ловушки и E_t уменьшается. При критическом напряжении $V = V_1$, когда концентрация свободных электронов станет достаточно большой $n = n_1$, начнется лавинообразное уменьшение E_t и увеличение n вследствие освобождения электронов из ловушек, а на вольт-амперной характеристике появится область отрицательной проводимости. Этот процесс является, в сущности, моттовским переходом, вызванным инжекцией [3].

Получим вольт-амперную характеристику рассматриваемого диэлектрического диода в рамках простейшей модели ТОПЗ [4]. Исходная система уравнений имеет вид:

$$j = q\mu n(V/L), \quad (1)$$

$$CV/qL = n + n_t, \quad (2)$$

$$n_t = \frac{nN_t \theta(E_t)}{n + N_{ct}}; \quad N_{ct} = N_c e^{-E_t/kT} = N_{ct}^0 e^{n/\bar{n}}; \quad \theta(z) = \begin{cases} 1, & z > 0 \\ 0, & z < 0 \end{cases}, \quad (3)$$

$$E_t = E_{t0} - kT \frac{n}{\bar{n}}; \quad \bar{n} = \frac{m\epsilon(kT)^2}{2\pi^3 \hbar^2 q^2}, \quad (4)$$

где j — плотность тока, μ — подвижность электронов, $C = \epsilon/4\pi L$ — межэлектродная геометрическая емкость, ϵ — диэлектрическая проницаемость, q и m — заряд и масса электрона, N_c — эффективная плотность

состояний в зоне проводимости. Феноменологическое выражение (4) для сдвига уровня можно получить аналитически аппроксимируя численную кривую, полученную в работе [5]. Подставляя уравнение (3) в (2) и дифференцируя полученное выражение по n , имеем соответственно:

$$CV/qL = n + [nN_t \theta(E_t)] / (n + N_{ct}^0 e^{n/\bar{n}}), \quad (5)$$

$$\frac{C}{qL} \frac{dV}{dn} = 1 + N_t \left\{ \frac{N_{ct}^0 e^{n/\bar{n}} (\bar{n} - n)}{(n + N_{ct}^0 e^{n/\bar{n}})^2} \theta(E_t) - \frac{n}{n + N_{ct}^0 e^{n/\bar{n}}} \delta(E_t) \right\}. \quad (6)$$

Подставляя $n(V)$, определенную из формулы (5), в уравнение (1) получим вольт-амперную характеристику $-i(V)$. Из равенства (6) следует, что всегда существует область $dV/dn < 0$, которой отвечает область отрицательной проводимости на вольт-амперной характеристике. Качественно функция $n(CV/qL)$ изображена на рисунке. Соответствующие характерные точки:

$$n_1 = \bar{n} \left(\frac{E_{t0}}{kT} - \ln \frac{N_c}{\bar{n}} \right); \quad (7a) \quad V_1 = \frac{qL}{C} \left[\bar{n} \left(\frac{E_{t0}}{kT} - \ln \frac{N_c}{\bar{n}} \right) + \frac{N_t}{2} \right]; \quad (7б)$$

$$n_2 = \bar{n} E_{t0} / kT; \quad (7в) \quad V_2 = \frac{qL}{C} \bar{n} E_{t0} / kT. \quad (7г)$$

Отметим, что вследствие сдвига уровней обычная область резкого нарастания тока на вольт-амперной характеристике токов, ограниченных пространственным зарядом после заполнения ловушек в данном случае переходит в S-образную, т.е. $V_1 = V_{зп}$ — напряжения заполнения ловушек.

Оценка характерного времени развития флуктуации в области неустойчивости дает:

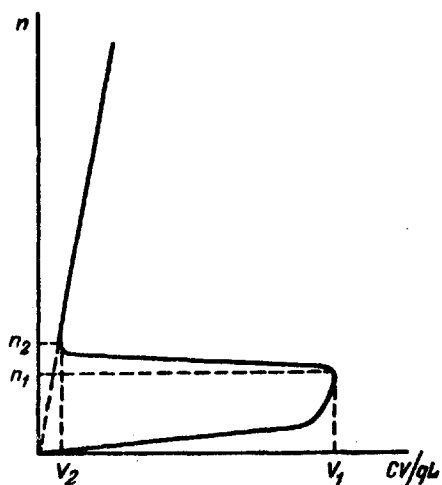
$$\Delta t = \frac{\tau_{t0} e^{-E_{t0}/kT}}{[N_t / (2\pi \ln N_c / \bar{n}) - 1]}, \quad (8)$$

где $\tau_{t0} = \frac{1}{\langle v S_t \rangle N_c}$, v — тепловая скорость электрона, а S_t — сечение захвата ловушки.

Аналогичный моттовский переход (металлизация при инжекции) может осуществляться и в системе с высокой концентрацией слабо ионизованных доноров. Если последняя достаточно велика, то система будет неустойчива и перейдет в состояние с высокой проводимостью уже при $V = 0$. Другими словами, оказывается, что $V_2 < 0$.

Аналогичные по природе эффекты могут возникать и вследствие действия контактных полей и эффекта поля (металлизация приконтактной или приповерхностной области, или всего высокоомного слоя, если он достаточно тонкий).

Разумеется, что подобные явления могут происходить и в комбинации сударной ионизацией, двойной инжекцией, эффектом Пула – Френкеля и т.д., приводя к S-образной вольт-амперной характеристике и металлизации системы.



Оценим толщину диэлектрического слоя, при которой возможна металлизация при инжекции, используя формулу (76). Полагая $V_1/L = 5 \cdot 10^6$ в/см, $N \approx 10^{19} - 10^{21}$ см⁻³ $> n(E_{10}/kT)$, получаем $L \approx 10^{-5} + 10^{-7}$ см. Таким образом, данный эффект, по-видимому, может реализоваться в очень тонких сильно дефектных слоях.

Можно предположить, что известное явление переключения в стеклообразных полупроводниках [6] связано с металлизацией при инжекции, облегченной эффектом Пула – Френкеля.

Авторы благодарят В.Л.Бонч-Бруевича за полезные обсуждения.

Институт радиотехники
и электроники
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
18 декабря 1968 г.

Литература

- [1] В.Л.Бонч-Бруевич. ФТТ, 2, 177, 1959.
- [2] А.А.Рогачев. ФТТ, 8, 187, 1965.
- [3] Дж. Займан. Принципы теории твердого тела. М., Изд. Мир, 1966, стр. 178.
- [4] R. S. Muller. Solid State Electr., 6, 25, 1963.
- [5] В.Л.Бонч-Бруевич, В.Б.Гласко. Оптика и спектроскопия, 14, 495, 1963.
- [6] Б.Т.Коломиец, Э.А.Лебедев. Радиотехника и электроника, 8, 2097, 1963; S. R. Ovshinsky. U. S. patent, № 3271-591, cl. 307-885, 1963.