

6. Tishkov V.S., Gaiduk P.I., Shiryaev S.Yu., Nylandsted Larsen A. // Appl. Phys. Lett. 1996. V.68. P.655.
7. Nobili D., Solmi S., Parisini A. et al. // Phys. Rev. 1994. B49. P.2477.
8. Nylandsted Larsen A., Lundsgaard Hansen J., Schou-Jensen R. et al. // Phys. Scripta. 1993. V.54. P.208.
9. Fridel J. Dislocations. New York, 1964.
10. Hansen M. Constitution of Binary Alloys. New York, 1958. P.156.

Поступила в редакцию 09.06.97.

УДК 621.315.592

О.П.ЕРМОЛАЕВ, В.В.ЛИТВИНОВ, С.А.ХАКИМ (Egunem)

ПРЫЖКОВАЯ ПРОВОДИМОСТЬ ВБЛИЗИ ПЕРЕХОДА ДИЭЛЕКТРИК-МЕТАЛЛ В ГЕРМАНИИ, “ЛЕГИРОВАННОМ” РАДИАЦИОННЫМИ ДЕФЕКТАМИ

The low temperature (down to $\sim 1,6\text{K}$) electric conductivity of germanium “doped” by radiation defects is investigated in the region of the dielectric-metal transition. The conclusion is made that the dielectric-metal transition is a Mott transition.

В последние десятилетия исследование электронных явлений в неупорядоченных системах заняло одно из центральных мест в физике конденсированной среды. Это обусловлено как практическим применением таких систем, так и успехами теоретического описания неупорядоченного состояния.

Особое место в физике неупорядоченных систем занимает проблема перехода диэлектрик-металл (ПДМ) и связанное с этим изменение электронных свойств. Обычно в качестве модели для изучения ПДМ использовались полупроводниковые материалы, легированные металлургически в процессе выращивания. Основными объектами являлись хорошо изученные полупроводники IV группы Ge и Si, легированные примесями III и V групп. Концентрация примеси, однородность ее распределения и степень компенсации отличаются для различных образцов вблизи ПДМ. Более высокая однородность распределения примесей получается при трансмутационном легировании полупроводников.

Особый интерес вызывают исследования низкотемпературной проводимости и ПДМ в кристаллических полупроводниках, свойства которых полностью определяются радиационными дефектами (РД). Удобным объектом для экспериментального изучения явлений прыжковой проводимости и перехода диэлектрик-металл может служить германий, структурно разупорядоченный радиацией. Облучение кристаллического германия быстрыми реакторными нейтронами приводит к тому, что после *n-p*-конверсии свойства материала определяются мелкими радиационными акцепторами с уровнями $E_V+0,016$ эВ [1]. Таким образом, варьировать концентрацию радиационных акцепторов в одном образце можно достаточно плавно и в очень широких пределах (вплоть до перехода в металлическое состояние), изменяя интегральный поток быстрых реакторных нейтронов. Однородность полученного таким способом материала высока вследствие достаточно малых сечений взаимодействия быстрых нейтронов с германием. Исследование отжига такого материала позволяет изучать и ПДМ с “металлической” стороны на “диэлектрическую” в одном и том же образце.

Настоящая работа посвящена изучению особенностей прыжковой проводимости в области перехода диэлектрик-металл в германии, “легированном” радиационными дефектами с уровнями $E_V+0,016$ эВ.

Эксперименты проводились на образцах германия с концентрацией сурьмы $3 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Образцы облучались различными флюенсами быстрых

реакторных нейтронов ($\Phi=10^{17}-10^{19}$ см⁻²) в кадмиевых пенах с толщиной стенок 0,5 мм для ослабления влияния факторов, связанных с ядерным легированием медленными (тепловыми) нейтронами. Измерялась температурная зависимость удельного сопротивления в диапазоне 1,6–300 К. Концентрация дефектов определялась из измерений коэффициента Холла.

Из рис.1 видно, что при концентрации РД $N_{\text{рд}} > 5 \cdot 10^{16}$ см⁻³ в области низких (гелиевых) температур наблюдается прыжковая проводимость с переменной длиной прыжка (variable range hopping), зависящая от температуры по закону

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp[-(T_0/T)^{0.5}], \quad (1)$$

где σ_0 – коэффициент, слабо зависящий от температуры. Согласно теории Шкловского–Эфроса [2,3], зависимость (1) свидетельствует о наличии в спектре плотности состояний кулоновской щели на уровне Ферми. В рамках этой модели

$$T_0 = 2,8e^2/(k\alpha\kappa), \quad (2)$$

где e – заряд электрона, k – постоянная Больцмана, α – радиус локализации волновой функции носителей заряда, κ – диэлектрическая проницаемость.

Модель кулоновской щели основывается на том, что вследствие кулоновского взаимодействия электронов плотность локализованных состояний на уровне Ферми изменяется по закону [3]

$$g(E) = g_0(E - E_F)^2, \quad g_0 = \beta e^{-6\kappa^3}, \quad (3)$$

где β – численный коэффициент, E_F – уровень Ферми.

Ширина кулоновской щели Δ может быть оценена из соотношения [2,3]

$$\Delta = 0,5k(T_0 T^*)^{0.5}, \quad (4)$$

где T^* – максимальная температура, начиная с которой наблюдается отклонение от закона (1).

Значения величин T_0 и T^* находились нами в результате анализа экспериментальных кривых (см. рис.1). Величина Δ определялась из соотношения (4).

Из зависимости ширины кулоновской щели от концентрации радиационных дефектов (рис.2) видно, что значение Δ уменьшается при приближении к ПДМ. В работе [4] было показано, что в германии, “легированном” радиационными дефектами, величина критической концентрации дефектов при ПДМ $N_C = N_{\text{рд}} = 1 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Кулоновская щель “схлопывается” в окрестности ПДМ, что согласуется с моделью Шкловского–Эфроса. Следует, однако, отметить, что для образца 8 (см. рис.1) соотношение (1) выполняется (хотя и с меньшей точностью) до температуры $T^* \cong 30$ К, что, по-видимому, уже не может быть связано с влиянием кулоновской щели Шкловского–Эфроса, так как $kT^* > \Delta$. В работе [5] показано, что вид плотности состояний (3) аналогичный тому, который приводит к модели кулоновской щели, может иметь плотность состояний в области хаббардовской щели. Для симметричных хвостов зон плотность состояний около уровня Ферми приближенно имеет вид

$$g(E) \approx a + b(E - E_F)^2, \quad (5)$$

где a и b – постоянные [5]. При малых a и не очень низких температурах отсюда следует соотношение (1). Этот факт может свидетельствовать о том, что переход диэлектрик–металл в германии, “легированном” радиационными дефектами, может быть переходом Мотта–Хаббарда. Отметим, что в работе [6] также наблюдалось выполнение соотношения (1) для германия с РД при $T \geq 20$ К, однако эта особенность авторами не обсуждалась.

Величина $\rho_0 = 1/\sigma_0$ находилась из кривых рис.1 экстраполяцией низкотемпературных прямолинейных участков кривых $\rho(T)$ к бесконечной температуре. При возрастании $N_{\text{РД}}$, т.е. с приближением к ПДМ, величина ρ_0 уменьшается, стремясь к предельному значению ρ_{min} , (см. рис.2). Полученное значение ρ_{min} согласуется с данными [4]. Определенная экспериментально величина $[\rho_{\text{min}}]^{-1} = 9 \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}$ оказывается близкой к расчетному значению моттовской минимальной металлической проводимости [7]

$$\sigma_M = 0,026e^2/(hd_c) \cong 10 \text{ (Ом}\cdot\text{см)}^{-1}, \quad (6)$$

где $d_c = 0,62(N_c)^{-1/3}$ — среднее расстояние между примесями (дефектами).

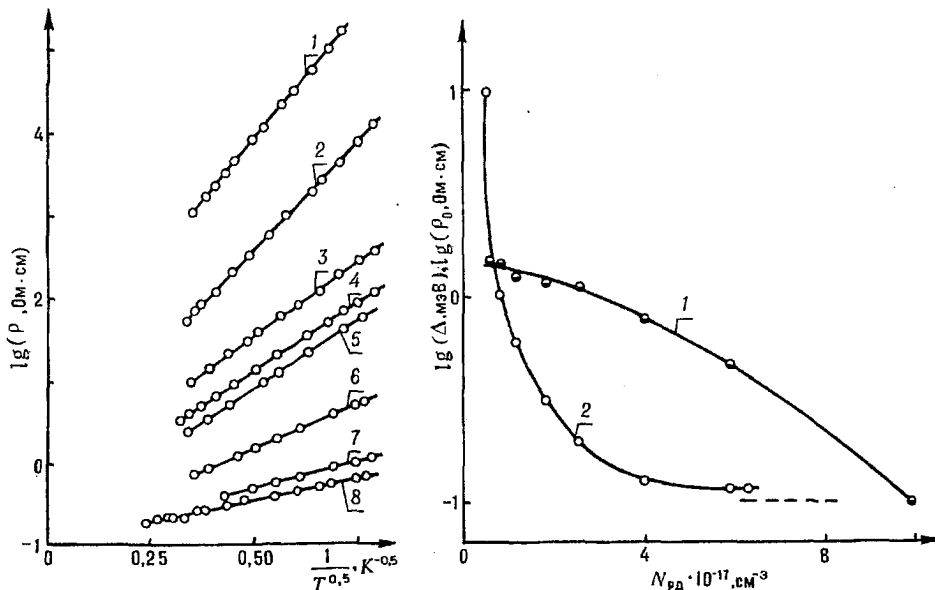


Рис.1. Температурная зависимость удельного сопротивления. Концентрация РД в образцах $N_{\text{РД}} \cdot 10^{-17}, \text{ см}^{-3}$: 1 — 0,6; 2 — 0,9; 3 — 1,2; 4 — 1,8; 5 — 2,6; 6 — 4,0; 7 — 5,9; 8 — 6,3.

Рис.2. Зависимость ширины кулоновской щели Δ (1) и прыжкового сопротивления ρ_0 (2) от концентрации дефектов. Пунктирная линия — расчетное значение σ_M .

Отметим, что в настоящее время имеются три основных теоретических модели ПДМ: моттовская [7], перколяционная (см., напр., [2]) и скейлинговая [8]. В последние годы для ряда неупорядоченных систем в соответствии с предсказанием скейлинговой теории экспериментально обнаружен непрерывный характер ПДМ. В то же время ряд исследований подтверждает моттовскую концепцию минимальной металлической проводимости. Выполнены работы (см., напр., [9]), в которых пересматривается интерпретация экспериментов по изучению ПДМ с целью показать, что они не противоречат моттовской концепции минимальной металлической проводимости.

Отмеченные особенности низкотемпературных электрических свойств такой неупорядоченной системы, как германий, "легированный" радиационными дефектами с мелкими уровнями, по-видимому, могут свидетельствовать о применимости моттовской концепции минимальной металлической проводимости.

Настоящая работа была частично поддержана международной программой INTAS-94 №4435.

1. Dobrego V.P., Ermolaev O.P., Tkachev V.D. // Phys. stat. sol. (a). 1977. V.44. №2. P.435.

2. Шкловский Б.И., Эфрос А.Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М., 1979.

3. Они же. // ФТП. 1980. Т.14. В.5. С.825.
4. Ермолаев О. П. // Весті АН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 1995. №1. С.70.
5. Звягин И. П. Кинетические явления в неупорядоченных полупроводниках. М., 1984.
6. Кожух М. Л., Липкина Н. С. // ФТП. 1987. Т.21. В.2. С.284.
7. Мотт Н. Ф. Переходы металл-изолятор. М., 1979.
8. Abrahams E., Anderson P. W., Licciardello D. C., Ramakrishnan T. V. // Phys. Rev. Lett. 1979. V.42. №10. С.673.
9. Mobius A. // J. Non. Cryst. Solids. 1987. V.97-98. Pt.1. P.225.

Поступила в редакцию 09.06.97.

УДК 621.382.537

В.М.БОРЗДОВ, М.М.ВРУБЕЛЬ, С.Г.МУЛЯРЧИК, А.В.ХОМИЧ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССОВ РАССЕЯНИЯ НА ВОЛЬТ-АМПЕРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАНСНЫХ ТУННЕЛЬНЫХ ДИОДОВ

The possibility to use Monte-Carlo method for simulation of electron scattering processes in the quantum well of double barrier resonant tunneling diode is discussed.

Особенностям процессов резонансного туннелирования электронов через двухбарьерные резонансно-туннельные структуры (ДБРТС) на основе GaAs к настоящему времени посвящено достаточно большое количество работ (см., напр., [1-3]). Это связано прежде всего с тем, что подобные исследования являются научной основой для разработки и проектирования новых высокоскоростных полупроводниковых приборов [4].

Известно, что на резонансное прохождение электронов через систему потенциальных барьеров значительное влияние могут оказывать процессы их рассеяния, поскольку эти процессы могут приводить к изменению энергии туннелирующих электронов и нарушению когерентности электронных волн и, как следствие, к изменению вероятности резонансного туннелирования. Поскольку на аналитическом уровне строгий теоретический анализ данных эффектов выполнить достаточно сложно, весьма перспективным представляется использование для этой цели численного метода Монте-Карло, подтвердившего свою эффективность при решении задач, связанных с моделированием процессов переноса носителей заряда в квантоворазмерных полупроводниковых приборных структурах [5-7].

В работе [7] с помощью метода Монте-Карло изучалось, в частности, влияние рассеяния туннелирующих электронов на ионизированной примеси и полярных оптических фононах на вольт-амперную характеристику (ВАХ) ДБРТС со структурой AlAs/GaAs/AlAs. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными показало их хорошее совпадение. Однако это совпадение обусловлено не только учетом влияния рассеяния, но и введением в расчетные формулы определенных на основе эксперимента поправочных коэффициентов. При этом полученные в [7] результаты представлены таким образом, что остается неясным, какой именно из отмеченных факторов оказывает доминирующее влияние на изменения ВАХ.

Цель настоящей работы — оценить степень влияния процессов рассеяния на перенос электронов в рамках описанной в [7] схемы, предполагающей изменение направления движения и энергии электрона при рассеянии и не учитывающей возможности нарушения когерентности электронных волн.

Рассматривались симметричные двухбарьерные AlGaAs/GaAs/AlGaAs диоды со следующими параметрами: толщина барьеров и ширина квантовой ямы составляли 5 нм, концентрация донорной примеси в контактах $N_D = 10^{21} \text{ м}^{-3}$,