

Гигантское инжекционное магнитосопротивление

Эффект гигантского магнитосопротивления наблюдается в гетероструктурах гранулированная пленка / полупроводник при развитии лавинного процесса [13, 14]. Экспериментальные исследования были проведены на образцах, содержащих пленки SiO_2 с наночастицами Co, выращенных на подложках n-GaAs ($\text{SiO}_2(\text{Co})/\text{GaAs}$) и n-Si ($\text{SiO}_2(\text{Co})/\text{Si}$), и на образцах, содержащих пленки TiO_2 с подслоями островков Co на подложках n-GaAs ($\text{TiO}_2(\text{Co})/\text{GaAs}$). В гетероструктурах $\text{SiO}_2(\text{Co})/\text{GaAs}$ наблюдался эффект гигантского инжекционного магнитосопротивления (IMR) в области развития лавинного процесса (Рис. 1). Эффект IMR имел положительные значения и обладал температурно-пиковым характером. Температурная локализация эффекта зависела от концентрации Co и сдвигалась приложенным электрическим полем (Рис. 2). Для гетероструктур $\text{SiO}_2(\text{Co})/\text{GaAs}$ с 71 at.% Co значение IMR достигало 1000 ($10^5\%$) при комнатной температуре, что на два-три порядка выше максимальных значений гигантского магнитосопротивления (GMR) в магнитных металлических мультислойных структурах и туннельного магнитосопротивления (TMR) в структурах на основе магнитных туннельных контактов. С другой стороны, для гетероструктур $\text{SiO}_2(\text{Co})/\text{Si}$ магнитосопротивление очень мало (4%), а для пленок $\text{SiO}_2(\text{Co})$ оно имело отрицательные величины. На температурной зависимости плотности тока инжекции j для структуры $\text{SiO}_2(\text{Co})/\text{GaAs}$ в области существования эффекта IMR наблюдалась особенность в виде провала (Рис. 3). На образцах $\text{TiO}_2(\text{Co})/\text{GaAs}$ эффект инжекционного магнитосопротивления был

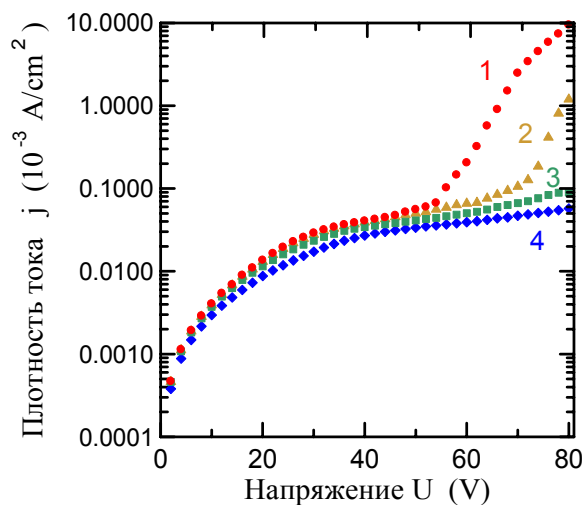


Рис. 1. Вольт-амперная зависимость в случае инжекции электронов в полупроводник для структуры $\text{SiO}_2(\text{Co})/\text{GaAs}$ с 71 at.% Co при различных значениях магнитного поля: (1) $H = 0$, (2) 5 kOe, (3) 10 kOe, (4) 15 kOe. H параллельно поверхности пленки $\text{SiO}_2(\text{Co})$.

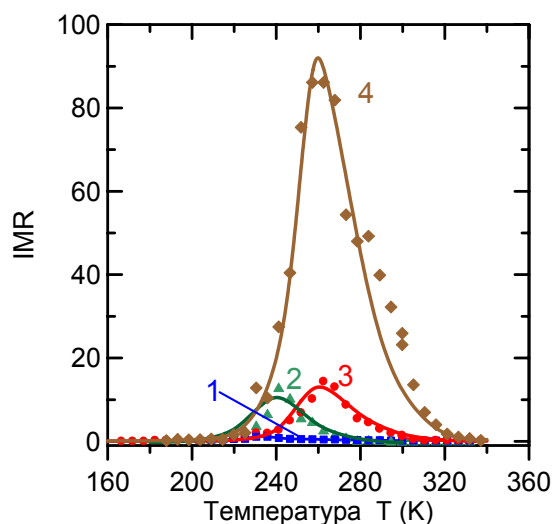


Рис. 2. Температурные зависимости IMR для структуры $\text{SiO}_2(\text{Co})/\text{GaAs}$ с $x = 71$ at.% Co в касательном магнитном поле $H = 10$ kOe при приложенных напряжениях: (1) $U = 40$ V, (2) 50 V, (3) 60 V, (4) 70 V. Сплошные линии – теоретические кривые.

значительно менее выражен.

Объяснение эффекта IMR основано на теоретической модели лавинного процесса, который запускается электронами, прошедшими спин-зависимый потенциальный барьер в обогащенном слое в полупроводнике вблизи интерфейса, и контролируется магнитным полем путем изменения высоты и прозрачности этого барьера [14, 15]. Формирование обогащенного электронного слоя в зоне проводимости полупроводника рассмотрено в приближении самосогласованного поля. Спин-зависимый потенциальный барьер в обогащенном слое образуется благодаря обменному взаимодействию между электронами обогащенного слоя в полупроводнике и d -электронами Co. Эффективное обменное взаимодействие и спин-зависимый потенциальный барьер для инжектированных электронов найдены в однокольцевом по электронным функциям Грина приближении диаграммного разложения (Рис. 4).

Наличие локализованных электронных состояний в обогащенном слое приводит к большим значениям высоты барьера и к его температурно-пиковой зависимости (Рис. 5). В результате

ударной ионизации, запускаемой прошедшими через барьер электронами, образуются дырки, которые двигаются в направлении барьера и аккумулируются в его области. Присутствие дырок в области барьера понижает его высоту, что увеличивает электронный ток, проходящий через барьер. Рост электронного тока, в свою очередь, приводит к увеличению концентрации дырок в барьерной области и т.д. Благодаря сформировавшейся положительной обратной связи, незначительные вариации высоты и прозрачности барьера приводят к большим изменениям протекающего тока. В теоретической модели рассмотрено распределение электрического поля до порога лавинного процесса и изменение поля в каналах тока при развитии лавины. Рост электронного тока сопровождается образованием слоя с большой напряженностью электрического поля вблизи области барьера. Такое перераспределение электрического поля уменьшает порог наступления лавинного процесса, делая его более вероятным в слое с сильным

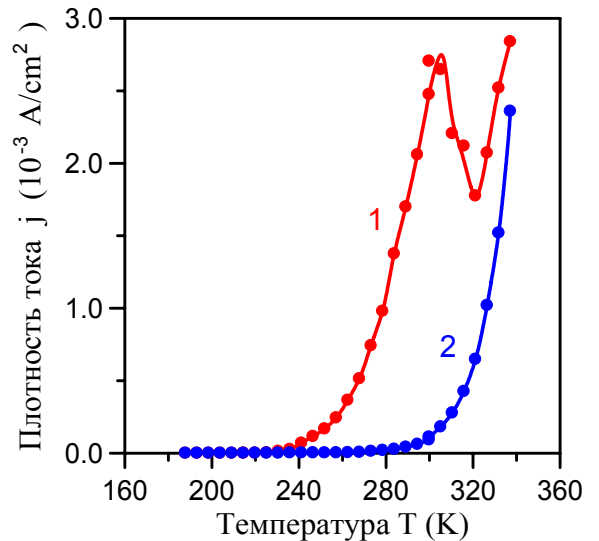


Рис. 3. Температурные зависимости плотности тока инжекции j для $\text{SiO}_2(\text{Co})/\text{GaAs}$ с концентрацией Co 71 at.% при напряжении $U = 70$ V. (1) В отсутствии магнитного поля, (2) в магнитном поле $H = 10$ kOe. H параллельно поверхности пленки $\text{SiO}_2(\text{Co})$.

$$J^{(eff)} = J_0 + J_0 \text{ (loop with arrow)} + J_0 \text{ (loop with arrow)}$$

Рис. 4. Эффективное обменное взаимодействие $J^{(eff)}$, выраженное через затравочное J_0 , в однокольцевом приближении по электронным функциям Грина со спином \uparrow и \downarrow .

электрическим полем. Приложенное магнитное поле уменьшает прозрачность барьера и увеличивает его высоту, что ведет к понижению кинетической энергии инжектированных электронов, подавляя наступление ударной ионизации и уменьшая концентрацию дырок. Развитая модель объясняет наблюдаемые экспериментальные результаты и температурно-пиковый характер эффекта IMR. Максимумы IMR пиков соответствуют одиночному обменно-расщепленному уровню в обогащенном слое. Ширина температурных пиков обратно пропорциональна поверхностному распределению частиц Co на интерфейсе. В противоположность этому, в структурах $\text{SiO}_2(\text{Co})/\text{Si}$ обогащенный слой имеет малую толщину без локализованных состояний, является туннельно-прозрачным и не влияет на протекающий ток.

IMR эффект можно распространить на структуры с другими полупроводниками. Гетероструктуры ферромагнетик / полупроводник с квантовыми ямами, содержащими спин-поляризованные локализованные электроны в полупроводнике около интерфейса, могут рассматриваться как перспективные комнатно-температурные спиновые инжекторы. При развитии лавинного процесса эти гетероструктуры, содержащие

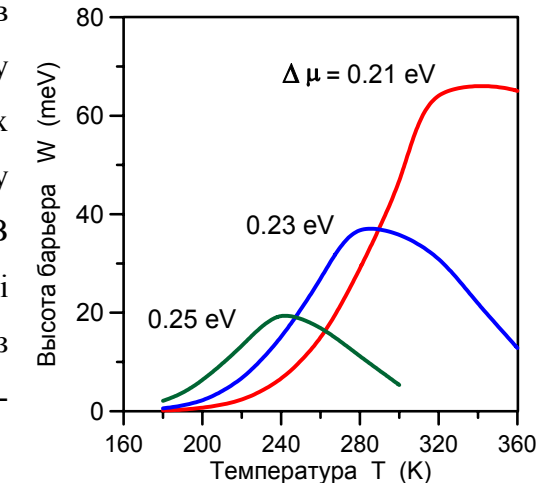


Рис. 5. Температурные зависимости высоты потенциального барьера W для структуры гранулированная пленка / полупроводник для различных значений разности химических потенциалов на интерфейсе $\Delta\mu = 0.21; 0.23; 0.25$ eV. Концентрация электронов n_0 в полупроводнике равна $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ при $T = 300$ К.

дырочные ловушки в области спин-зависимого потенциального барьера в квантовых ямах, могут применяться как эффективные магнитные сенсоры.