

УДК 537.9

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ
ВОЛЬТ-АМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛЁНОК PbSnTe:In
В МАГНИТНОМ ПОЛЕ
В РЕЖИМЕ ИНЖЕКЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ КОНТАКТОВ**

Д. В. Ищенко, В. С. Эпов

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: ischenkod@isp.nsc.ru*

Исследованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) плёнок PbSnTe:In с содержанием олова $x \approx 0,29$ при гелиевых температурах в режиме монополярной инжекции из контактов и ограничения пространственным зарядом в магнитном поле до 4 Тл. Анализ полученных ВАХ показал, что при увеличении магнитного поля от 0 до 4 Тл происходит трансформация наблюдаемых особенностей ВАХ. Предложено обоснование связи данных особенностей с наличием многоуровневой системы ловушек, расположенных в запрещённой зоне.

Ключевые слова: твёрдый раствор PbSnTe:In, магнитное поле, инжекция из контактов, эпитаксиальные плёнки.

DOI: 10.15372/AUT20160504

Введение. В работах [1, 2] показано, что при температуре 4,2 К в высокоомных плёнках PbSnTe:In (СОТ:In) наблюдаются инжекционные токи, ограниченные пространственным зарядом. В [3] приведены данные об особенностях вольт-амперных характеристик (ВАХ) плёнок СОТ:In, которые определяются плотностью состояний и энергетическим положением ловушек, в области напряжений $U_{ПЗЛ}$ с быстрым увеличением тока, соответствующих полному заполнению ловушек (ПЗЛ).

В работе [4] представлено, что величина и ориентация магнитного поля сильно влияют на ВАХ образцов, смещая величину $U_{ПЗЛ}$, что приводит к сдвигу ВАХ по оси напряжений как влево, так и вправо относительно ВАХ без магнитного поля. Было сделано предположение, что такой сдвиг ВАХ происходит за счёт изменения эффективной диэлектрической проницаемости (ёмкости) плёнок в магнитном поле, однако подробные исследования не проводились.

Поэтому представляет интерес влияние магнитного поля на ВАХ в области быстрого нарастания тока. В данной работе комплексно исследовано влияние магнитного поля на ёмкость структур и энергетическое положение ловушек в запрещённой зоне.

Описание эксперимента. В экспериментах исследовались три различных типа структур для изучения ВАХ, ёмкости и фотосигнала.

Измерения ВАХ проводились на структуре в форме диска Корбино. На поверхности плёнки $Pb_{1-x}Sn_xTe:In/BaF_2$ толщиной около 1 мкм с содержанием олова $x \approx 0,29$ сформированы два контакта. Внешний контакт диаметром 0,2 см отделён от центрального зазором длиной 30 мкм. Магнитное поле варьировалось в диапазоне от 0 до 4 Тл и было направлено перпендикулярно плоскости подложки. В качестве источника магнитного поля в ходе всех представленных экспериментов использовался сверхпроводящий соленоид. Измерения осуществлялись в сосуде Дьюара при $T = 4,2$ К в режиме полного экраниро-

вания фонового излучения. Напряжение на структуру подавалось с источника постоянного напряжения и изменялось с постоянной скоростью 0,63 мВ/с.

Использование экспериментальной структуры в геометрии диска Корбино позволило значительно уменьшить холловское поле, действующее в поперечном направлении, и исключить его влияние на траекторию движения инжектированных носителей заряда.

Инжекционные структуры с зазором 32 мкм применялись для исследования влияния магнитного поля на ёмкость плёнок СОТ:In. Магнитное поле изменялось от 0 до 4 Тл. Измерения проводились с помощью фазочувствительного усилителя переменного напряжения. Для настройки фазы усилителя на ёмкостную компоненту тока при комнатной температуре и для нормировки выходного сигнала на величину измеряемой ёмкости на место образца подключалась эквивалентная нагрузка, которая представляла собой параллельно соединённые активное сопротивление и ёмкость различных номиналов. Настройка фазы осуществлялась путём минимизации измеряемого напряжения при включении в цепь вместо образца только активного сопротивления, а нормировка выходного сигнала — только ёмкости. Также проверялась точность настройки измерительной цепи варьированием параметров эквивалентной нагрузки и частоты генератора, которая изменялась в пределах 1–10 кГц. В контрольных измерениях использовались частота тестирующего сигнала $f = 4000$ Гц с амплитудой 50 мВ и дополнительное постоянное напряжение смещения $U_{см} = 1,5$ В.

Исследование влияния магнитного поля на фотосигнал проводилось на холловских структурах с размерами рабочей области 500 мкм в продольном направлении и 200 мкм в поперечном. Образец располагался в жидком гелии в экранированной от фонового излучения камере. На входе камеры установлен оптический фильтр, который не пропускал излучение в области фундаментального поглощения PbSnTe:In, но был прозрачен для терагерцового излучения. Во время измерений использовалась комбинированная засветка светодиоидом с длиной волны $\lambda = 0,64$ мкм и лазерным излучением с $\lambda = 200$ или 138,5 мкм. Источником терагерцового излучения служил лазер на свободных электронах, работающий в квазинепрерывном режиме. Магнитное поле варьировалось в диапазоне от 0 до 4 Тл.

Экспериментальные результаты. На рис. 1 представлены экспериментальные ВАХ, полученные при различных значениях магнитного поля B . Из рисунка видно, что область резкого возрастания тока, которая определяется напряжением полного заполнения

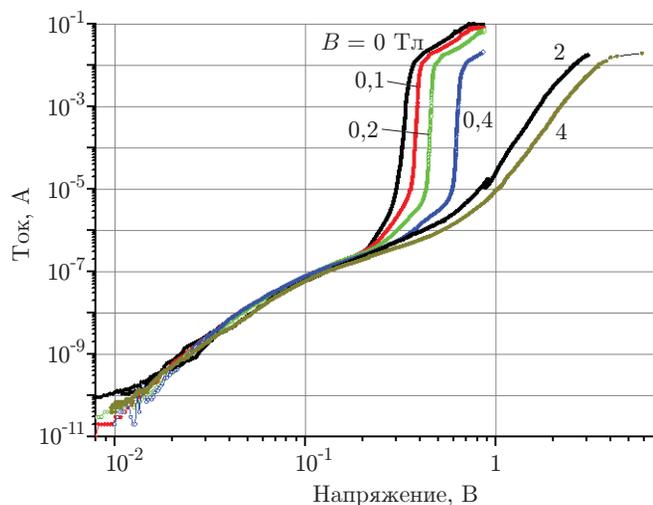


Рис. 1

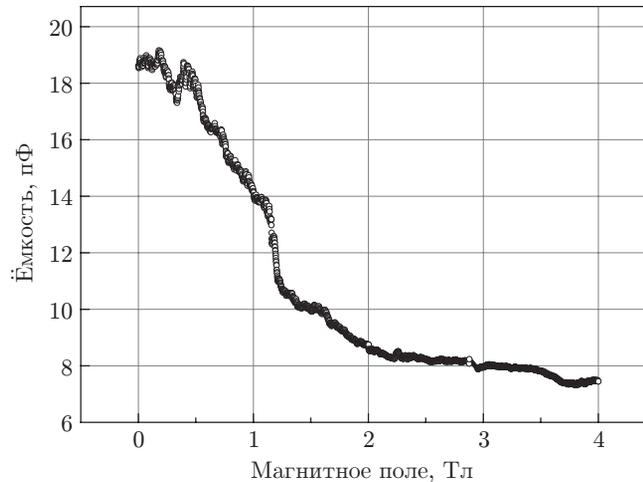


Рис. 2

ния ловушек $U_{\text{ПЗЛ}}$, смещается с ростом магнитного поля в сторону бóльших напряжений. Максимальная величина приложенного напряжения лимитировалась потребляемой мощностью, т. е. разогревом образца.

На рис. 2 показана зависимость ёмкости структуры от величины магнитного поля. Видно, что при увеличении магнитного поля от 0 до 4 Тл ёмкость структуры уменьшается примерно в 2,5 раза (с 18 до 7 пФ).

На рис. 3 приведена зависимость относительного сопротивления образца от приложенного магнитного поля при комбинированной засветке светодиоидом с $\lambda = 0,64$ мкм и лазерным излучением с $\lambda = 200$ или 138,5 мкм. Стрелками обозначены положения пиков, наблюдаемых на разных кривых.

Обсуждение результатов. Для каждой ВАХ была рассчитана зависимость нормированной производной тока от напряжения методом численного дифференцирования по формуле $y'/y = (1/I(U))/(dI(U)/dU)$. Шаг изменения напряжения $dU = 2,5$ мВ. Полученные зависимости представлены на рис. 4. Напряжение полного заполнения ловушек определяется максимальным зарядом $Q_{\text{ПЗЛ}}$, захваченным на ловушки, и ёмкостью C структуры ($U_{\text{ПЗЛ}} = Q_{\text{ПЗЛ}}/C$). При напряжениях, близких к $U_{\text{ПЗЛ}}$, наблюдается резкий рост тока, что приводит к появлению пика на производной y'/y . Следовательно, можно предполо-

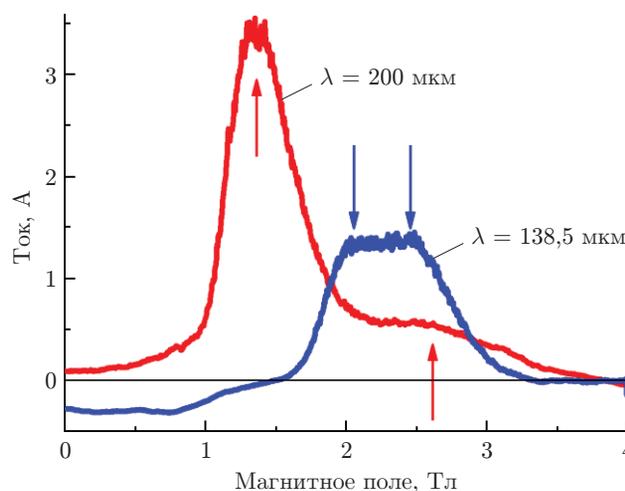


Рис. 3

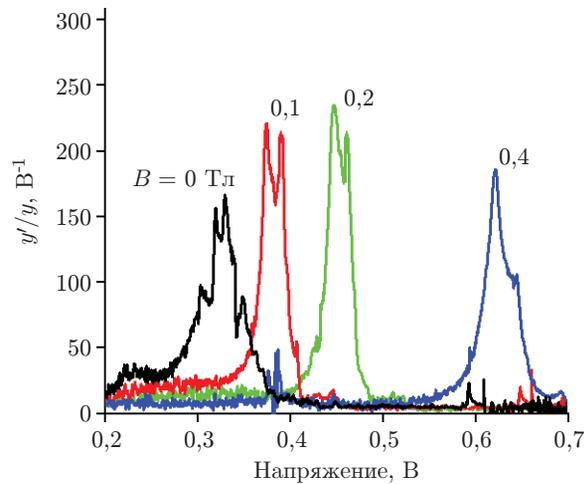


Рис. 4

жить, что каждому пику соответствует один заполненный уровень. Вклад в ВАХ вносят несколько уровней, при этом вклад одного уровня может значительно отличаться от вклада другого уровня, что определяется его параметрами. Хорошо различимыми на общем фоне оказываются три–четыре уровня. Из рисунка видно, что с увеличением магнитного поля происходит как трансформация пиков, так и их сдвиг в область больших напряжений. Величина сдвига достигает 0,4 В для зависимости, полученной при $B = 0,4$ Тл.

Под действием магнитного поля происходит уменьшение ёмкости структуры (см. рис. 2) и, как следствие, при фиксированном напряжении на структуре величина инжектированного заряда становится меньше. Соответственно для достижения величины $Q_{\text{ПЗД}}$ необходимо приложить большее напряжение, что обуславливает общий сдвиг ВАХ вправо.

Зависимости фотосигнала от магнитного поля (см. рис. 3) имеют ярко выраженный резонансный характер. В отсутствие магнитного поля засветка светодиодом с $\lambda = 0,64$ мкм приводит к генерации электронно-дырочных пар. При этом основная часть электронов захвачена на ловушки, расположенные в запрещённой зоне, и не участвует в переносе тока. Ток в основном обеспечивается дырочной составляющей. Засветка терагерцовым излучением освобождает часть электронов с уровней, которые рекомбинируют, и происходит уменьшение дырочного тока. В магнитном поле осуществляется сдвиг уровня дна зоны проводимости на величину $\hbar\omega_c/2$ (ω_c — циклотронная частота, \hbar — постоянная Планка). При определённой величине магнитного поля энергия терагерцового излучения совпадает с энергией залегания уровня в запрещённой зоне, что влечёт за собой резонансный выброс электронов в зону проводимости и их последующую рекомбинацию. В результате наблюдаются пики на зависимостях относительного изменения сопротивления от магнитного поля (см. рис. 3). Наличие нескольких размытых пиков свидетельствует о том, что имеется многоуровневая система ловушек, однако основной вклад вносят лишь несколько уровней (групп уровней).

Заключение. Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что влияние магнитного поля на транспорт носителей заряда является сложным. Во-первых, при приложении магнитного поля к образцу уменьшается ёмкость структуры. В нашем случае при изменении магнитного поля от 0 до 4 Тл ёмкость структуры снижается в 2,5 раза. Во-вторых, экспериментальные результаты подтверждают, что магнитное поле изменяет энергетические положения ловушек относительно дна зоны проводимости.

Таким образом, влияние магнитного поля на особенности ВАХ в режиме инжекции из контактов, возможно, связано с изменениями ёмкости структур и энергетического положения системы ловушек относительно дна зоны проводимости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Акимов Б. А., Никорич А. В., Хохлов Д. Р., Чесноков С. Н.** Проводимость сплавов $\text{Pb}_{0,75}\text{Sn}_{0,25}\text{Te}(\text{In})$ при комбинированном воздействии электрического и магнитного полей // Физ. и техн. полупроводников. 1989. **23**, вып. 4. С. 668–672.
2. **Акимов А. Н., Ерко В. Г., Климов А. Э. и др.** Токи инжекции в узкозонном диэлектрике $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ // Физ. и техн. полупроводников. 2005. **39**, вып. 5. С. 563–568.
3. **Klimov A. E., Shumsky V. N.** Shallow traps and the space-charged-induced limitation of the injection current in PbSnTe:In narrow-gap ferroelectric // Phys. B: Condensed Matter. 2009. **404**, N 23–24. P. 5028–5031.
4. **Klimov A., Sherstyakova V., Shumsky V.** Giant magnetoresistance in narrow-gap ferroelectric-semiconductor PbSnTe:In // Ferroelectrics. 2009. **378**, N 1. P. 101–110.

Поступила в редакцию 30 марта 2016 г.
