

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА СПЕКТР ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ МОНОКРИСТАЛЛОВ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

© 2005 М.Н. Левин, А.В. Татаринцев, М.А. Дронов, А.В. Каданцев, Г.И. Котов¹

Воронежский государственный университет

¹Воронежская государственная технологическая академия

Поступила в редакцию 07.11.05

Методом нестационарной спектроскопии глубоких уровней обнаружен эффект изменения спектра поверхностных электронных состояний в монокристаллах арсенида галлия в результате кратковременного воздействия слабого (~ 4 кОе) импульсного магнитного поля. Эффект полностью отсутствует при предварительной обработке кристаллов арсенида галлия в парах селена, приводящей к существенному снижению исходной плотности поверхностных электронных состояний.

ВВЕДЕНИЕ

Ранее сообщалось о чувствительности приповерхностных слоев полупроводниковых кристаллов к воздействию относительно слабых (< 10 кОе) импульсных магнитных полей (ИМП) [1-3]. Наблюдались ИМП-индуцированные изменения однородности состава [1], сорбционной способности [2], и химической активности поверхности полупроводников [3]. Изменение физико-химических свойств приповерхностных слоев связывалось с инициацией магнитным полем спин-зависимых реакций дефектов в немагнитных кристаллах [4]. Можно ожидать, что реакции дефектов приводят к изменению энергетического спектра связанных с этими дефектами глубоких уровней (ГУ), что позволяет исследовать воздействие ИМП на дефектную подсистему полупроводников хорошо разработанными прецизионными методами нестационарной спектроскопии ГУ (DLTS).

В данной работе представлены результаты исследования воздействия ИМП на дефектную подсистему монокристаллов GaAs методом DLTS.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовались две партии пластин GaAs(100) n-типа проводимости с уровнем легирования $2.6 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, полученных

способом Чохральского. Все пластины подвергались химико-динамической полировке в растворе $\text{H}_2\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 5 : 1 : 1$, с последующим снятием остаточного окисла в растворе $\text{HCl} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 10$ и промывкой в деионизованной воде. Пластины одной из двух партий пластин обрабатывались в парах селена по способу [5] для снижения плотности поверхностных электронных состояний (ПЭС). Образцы для измерения спектров DLTS представляли собой диоды Шоттки с алюминиевыми электродами, термически напыленными на исследуемую поверхность. Для обеспечения омического контакта на тыльную сторону пластин наносилась индий-галлиевая эвтектика, которая обеспечивала также тепловой контакт к рабочему столику измерительной установки. Измерения спектров DLTS проводились на автоматизированной установке для емкостной спектроскопии полупроводников, описанной в [6].

Обработка кристаллов GaAs ИМП осуществлялась серией симметричных треугольных импульсов магнитного поля с амплитудой $H = 4 \text{ кОе}$, длительностью $\tau = 4 \times 10^{-5} \text{ s}$ и частотой следования $f = 50 \text{ Hz}$, формируемых разрядом батареи конденсаторов через малоиндуктивный соленоид. Длительность обработки ИМП составляла $t = 40 \text{ s}$.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИМПУЛЬСНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА СПЕКТР ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СОСТОЯНИЙ МОНОКРИСТАЛЛОВ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис.1 представлены исходные DLTS спектры ГУ кристаллов GaAs, не подвергавшихся воздействию ИМП. Исходные DLTS спектры имели три четко выраженных пика ГУ с энергиями $E_c - 0.38 \pm 0.02$ eV, $E_c - 0.57 \pm 0.02$ eV, и $E_c - 0.85 \pm 0.02$ eV, где E_c – энергетическое положение дна зоны проводимости полупроводника.

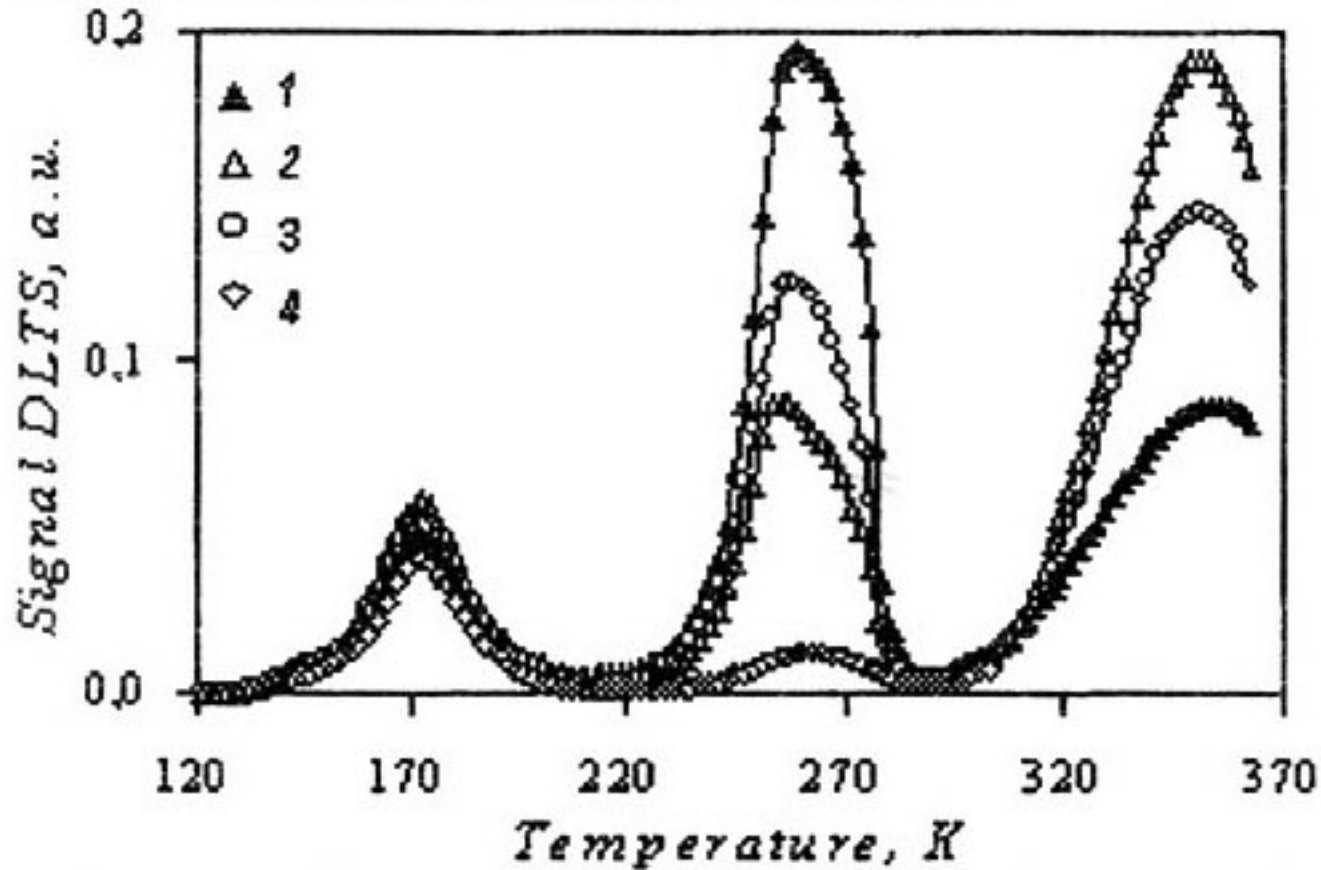


Рис.1. DLTS спектры контактов Шоттки Al-GaAs до воздействия ИМП: 1; 2; 3 – без обработки и 4 – с обработкой пластин GaAs в парах селена, соответственно. Режимы измерения DLTS: $t_1/t_2 = 10$ ms / 210 ms; напряжение и время заполнения ГУ электронами $V_d = 2$ V и $t_0 = 10$ ms; напряжение обеднения $V_{rev} = -0.2$; -1 ; -2 V для спектров 1 и 4; 2; 3, соответственно.

Зависимости амплитуды пиков от значения обратного напряжения V_{rev} , подаваемого на диод Шоттки при переключении его из режима прямого смещения при заполнении ГУ электронами в неравновесное обеднение для разрядки уровней, позволяют сделать вывод о характере пространственного распределения ГУ. Снижение амплитуды центрального пика DLTS с ростом V_{rev} свидетельствует о спаде концентрации ловушек, ответственных за этот уровень, вглубь полупроводника. Такие ловушки считаются поверхностными электронными состояниями (ПЭС), ответственными за закрепление уровня Ферми на поверхности кристалла GaAs [7]. Отсутствие зависимости амплитуды низкотемпературного пика и рост амплитуды высокотемпературного пика с повышением V_{rev} указывают на то, что соответствующие низкоэнергетические уровни распределены равномерно в пре-

делах области неравновесного обеднения, а концентрация высокоэнергетических уровней возрастает вглубь полупроводника.

Обработка перед формированием контакта Шоттки Al-GaAs поверхности кристалла GaAs в парах селена приводит к резкому снижению амплитуды пика, создаваемого ПЭС, что обусловлено реконструкцией поверхности кристалла при формировании на ней гетерограницы Ga_2Se_3 -GaAs [8]. Амплитуда остаточного пика становится независимой от напряжения V_{rev} , что свидетельствует об однородном пространственном распределении глубоких уровней, ответственных за наличие этого пика в спектре DLTS. Остаточный центральный пик, низкотемпературный пик и высокотемпературный пик с указанными выше энергиями могут быть идентифицированы как известные [9] в кристаллах арсенида галлия объемные электронные уровни EL6, EL3, и EL2, соответственно.

Воздействие ИМП на структуру Al-GaAs приводит к необратимому температурному сдвигу центрального пика в спектре DLTS (см. рис.2). Этот температурный сдвиг соответствует новому энергетическому распределению

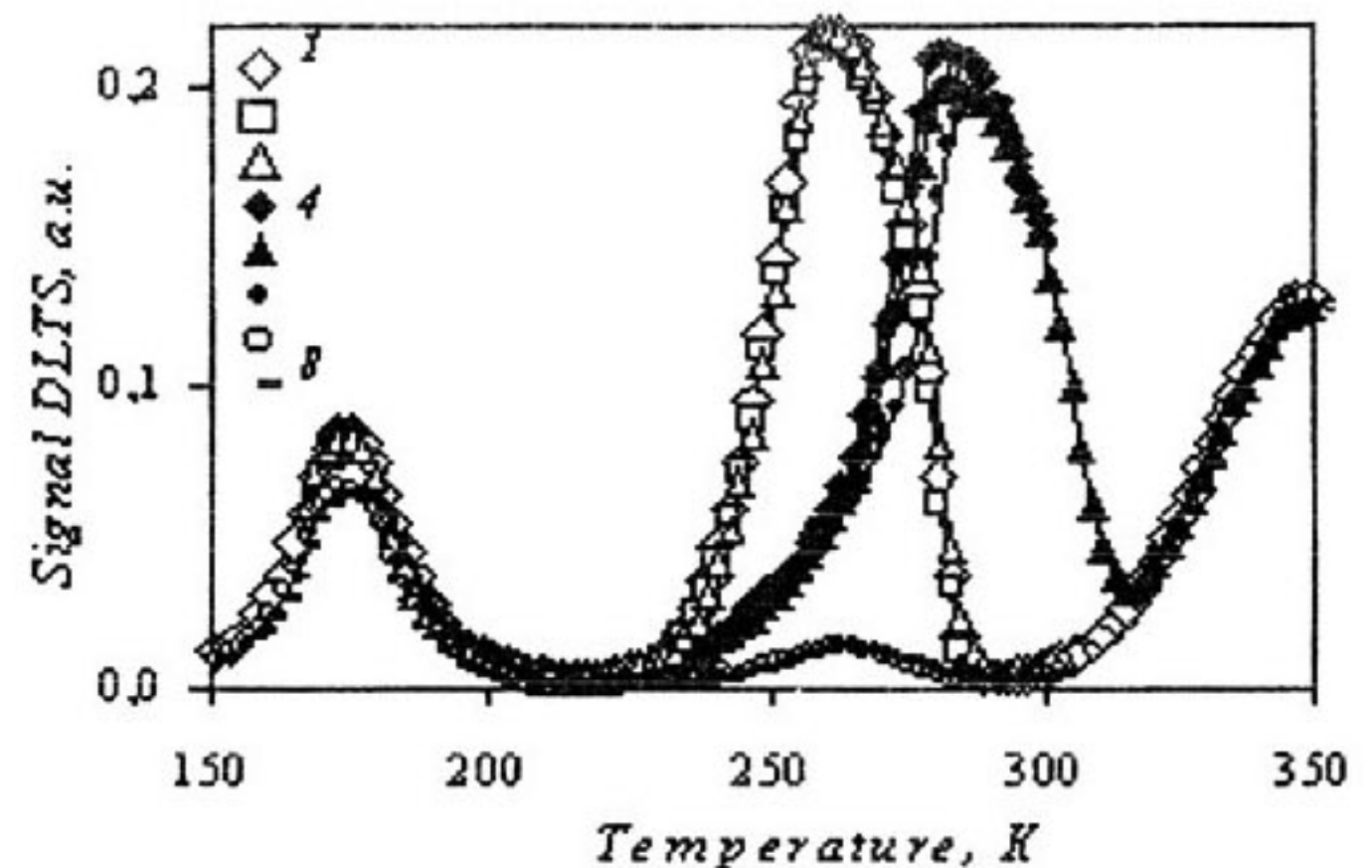


Рис. 2. Влияние обработки ИМП на DLTS спектры контактов Шоттки Al-GaAs: 1; 2; 3 – исходные спектры, измеренные до воздействия ИМП с интервалом в 5 дней; 4; 5; 6 – через 1; 3 и 7 суток после ИМП, соответственно. Спектры 7 и 8 измерены на образцах с предварительной обработкой пластин GaAs в парах селена до и через 3 суток после воздействия ИМП. Режимы измерения DLTS: $t_1/t_2 = 10$ ms / 210 ms; $V_d = 2$ V; $t_0 = 10$ ms; $V_{rev} = -0.2$ V для всех спектров.

плотности ПЭС с энергетическим положением максимума плотности при $E_c - 0.65 \pm 0.02$ eV.

Основной результат данной работы заключается в обнаружении необратимого изменения спектра ГУ в результате обработки кристалла GaAs ИМП. Воздействие ИМП приводило к изменению температурного положения пика ПЭС, как это показано на рис. 2. Положения и амплитуды пиков EL6 и EL2 в результате воздействия ИМП не менялись. Другими словами, чувствительными к воздействию ИМП оказались только поверхностные электронные состояния. Спектры DLTS пластин GaAs, предварительно обработанных в парах селена, не менялись в результате воздействия ИМП.

Таким образом, что относительно слабые ИМП, энергетическое воздействие которых незаметно на тепловом фоне, могут инициировать реакции дефектов в приповерхностных слоях кристаллов GaAs. При этом ИМП инициирует реакции не любых, а лишь определенных дефектов. Реконструкция приповерхностного слоя GaAs в результате обработки в парах селена делает поверхность нечувствительной к воздействию ИМП. Анализ наблюдавшегося эффекта на микроскопическом уровне в настоящее время не представляется возможным, поскольку не установлена микроскопическая природа исходных дефектов с ГУ. Однако, существование обнаруженного эффекта не противоречит предложенной в [4] концепции решеточного магнетизма, индуцированного дефектами, допускающей возникновение спонтанных орби-

тальных токов в протяженных областях решетки деформированных дефектами. Наличие поверхности, как двумерного дефекта, деформирующего кристалл, является фактором, способствующим возбуждению ИМП реакции дефектов в приповерхностных слоях, приводящей в итоге к изменению свойств поверхности кристалла. Обнаруженный эффект открывает возможность проведения системных исследований воздействия ИМП на дефектную подсистему полупроводниковых кристаллов хорошо разработанными прецизионными методами нестационарной спектроскопии глубоких уровней.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин М.Н., Семенова Г.В., Сушкова Т.П. // ДАН. 2003. Т. 388. № 5. С. 608-610.
2. Левин М.Н., Татаринцев В.А., Косцова О.А. и др. // ЖТФ. 2003. Т. 73. № 10. С. 85-87.
3. Левин М.Н., Семенова Г.В., Татаринцев А.В. и др. // ПЖТФ. 2005. Т. 31. № 17. С. 89-94.
4. Belyavsky V.I., Levin M.N. // Phys. Rev. B. 2004. V. 70. P. 104101 (8).
5. Сысоев Б.И., Безрядин Н.Н., Котов Г.И. и др. // ФТП. 1995. Т. 29. № 1. С. 24-32.
6. Каданцев А.В., Котов Г.И., Левин М.Н. и др. // ПТЭ. 2004. № 6. С. 138-139.
7. Hughes G.J., Roberts L., Henry O.M., et al. // Mater. Sci., Eng. B. 1991. V. 9. P. 37-41.
8. Агапов Б.Л., Арсентьев И.Н., Безрядин Н.Н. и др. // ФТП. 1999. Т. 33. № 6. С. 712715.
9. Markov A.V., Polyakov A.Y., Smirnov N.B. et. al. // Solid St. Electron. 2002. V. 46. P. 269277.