

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ, СОЗДАННЫХ ОБРАБОТКОЙ В ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ И γ -ОБЛУЧЕНИЕМ Co^{60} , НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕЛЕГИРОВАННОГО n-GaAs

Н.Ф.Курилович¹⁾, Т.А.Прохоренко¹⁾, В.К.Шешолко¹⁾, Ю.А.Бумай²⁾, А.Г.Ульяшин²⁾

¹⁾ИФТТП НАНБ, 220072, г. Минск, ул. П.Бровки 17, (0172)84-12-29,

²⁾БГПА, 220027, г.Минск, Пр. Скорины 65, (0172)32-77-85

Исследовано влияние предварительной обработки в течение 4 часов при $T=673\text{ K}$ в водородной плазме (гидрогенизации) на изменение под действием γ -облучения Co^{60} электрических параметров монокристаллического нелегированного GaAs n-типа ($n_0=5\cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$, $\mu_0=4,0\cdot 10^3\text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$). Методики исследования: эффект Холла и DLTS. Гидрогенизация кристаллов до облучения приводит к незначительному изменению n и μ и качественному изменению DLTS-спектров, что вызвано частичной пассивацией электрически активных дефектов, ответственных за процессы рассеяния и удаления носителей заряда, а также образованием новых дефектов в результате взаимодействия водорода с дефектами структуры кристалла. В облученных γ -квантами кристаллах n-GaAs наблюдается уменьшение с концентрации и подвижности носителей заряда с ростом дозы облучения. В спектрах DLTS гидрогенизированных и негидрогенизированных кристаллов появляется пик, интенсивность которого растет с ростом Φ . Этот пик связывается с известной в литературе ловушкой для электронов E1 с энергетическим уровнем $E_c-0,12\text{ эВ}$. С ростом Φ концентрация этого дефекта возрастает в гидрогенизированных и негидрогенизированных кристаллах. В дозовой зависимости μ облученных негидрогенизированных кристаллов, измеренной при $T=100\text{ K}$, наблюдается сначала уменьшение μ с ростом дозы Φ , а затем, после прохождения через минимум, возрастание μ . Такое anomalous возрастание μ с ростом Φ объясняется возрастанием зарядового состояния некоторого доминирующего дефекта при прохождении уровня Ферми через его уровень. Определено энергетическое положение данного дефекта в запрещенной зоне: $E_d=E_c-0,12\pm 0,05\text{ эВ}$. В гидрогенизированных кристаллах глубина минимума зависимости $\mu(\Phi)$ меньше, чем в негидрогенизированных кристаллах, что означает уменьшение концентрации доминирующего дефекта в данном зарядовом состоянии в результате частичной его пассивации водородом. Результаты, полученные с помощью DLTS, хорошо коррелируют с результатами, полученными из измерений эффекта Холла: концентрация ловушки E1 в гидрогенизированных предварительно кристаллах возрастает с ростом Φ медленнее, чем в негидрогенизированных кристаллах, что также свидетельствует о частичной пассивации этого дефекта атомами водорода

I. Введение

Гидрогенизация GaAs, приводящая к пассивации как мелких примесей, так и глубоких дефектов, представляет большой интерес с точки зрения ее технологического применения, а также с точки зрения фундаментальных исследований процессов формирования комплексов в материале. Нейтрализация мелких примесей и уменьшение концентрации более глубоких дефектов атомарным водородом в GaAs была показана в работах [1-5]. С другой стороны, были обнаружены новые, связанные с водородом глубокие дефекты [6,7] и мелкие акцепторы [5] в обработанном в водородной плазме (гидрогенизированном) GaAs. Введение глубоких дефектов посредством γ -облучения в гидрогенизированный GaAs может быть полезным для лучшего понимания поведения водорода в GaAs и его роли в формировании комплексов. Работы по исследованию пассивации водородом в арсениде галлия, главным образом, посвящены пассивации водородом собственных дефектов в эпитаксиальных пленках [8-11]. В данной работе исследуется влияние гидрогенизации и γ -облучения Co^{60} на электрические свойства монокристаллического арсенида галлия, методами эффекта Холла и DLTS-спектроскопии.

II. Основная часть

В качестве объекта исследования были

лялись из измерений эффекта Холла по стандартной методике в температурном интервале 77–291 K. Толщина исследуемых образцов составляла около 1 мм. Для исследований методом НЕСГУ создавались тестовые вертикальные диоды Шоттки методами фотолитографии и последующего напыления Al. Контакт к обратной стороне пластины создавался путем напыления Al с подслоем V для улучшения адгезии. Диоды Шоттки создавались на основе монокристаллического GaAs с $n \approx (5\div 7)\cdot 10^{15}\text{ см}^{-3}$. Обработка водородом объемных образцов GaAs выполнялась в плазме тлеющего разряда в реакторе для ионной очистки установки ВУП-5 при напряжении между электродами 700 В, плотности тока 44 мкА/см^2 , температуре образцов, расположенных непосредственно на катоде, 400°C в течение 4 ч. После остывания до 250°C кристаллы извлекались из реактора. Доза атомарного водорода, внедренного в образцы, $4,0\cdot 10^{18}\text{ ион/см}^2$ оценивалась из плотности ионного тока приблизительно, так как водород вводится из плазмы тлеющего разряда в виде H^+ , H_2^+ , H^0 . Проводя оценку диффузионной длины L_n проникновения атомарного водорода при обработке в течение $t = 4\text{ ч}$ при 400°C для коэффициента $D_n = D_0$ (где $D_0 = 0,02\text{ см}^2/\text{с}$, $E_a = 0,3\text{ эВ}$ [10]), k - постоянная Больцмана, T - температура, получим $L_n = (D_n t)^{1/2}$ (где $D_n = D_0 \exp(-E_a/kT)$)

при комнатной температуре поэтапно до доз $1.92 \cdot 10^{18}$ квант/см² ($1,2 \cdot 10^9$ Р).

После обработки в водородной плазме кристаллов n-GaAs концентрация и подвижность носителей заряда в них незначительно снизились во всем исследуемом интервале температур. Водород, внедренный в кристаллы GaAs, легко связывается в комплексы с мелкими донорами [10], однако ввиду малой энергии связи комплексы "малый донор-водород" при температуре гидрогенизации 400°C распадаются, а атомарный водород в основном взаимодействует с глубокими примесями и дефектами структуры, увеличивая количество электрически активных дефектов, что приводит к изменению электрических параметров обработанного водородом материала. Известно [11] что введение водорода в кристаллы слаболегированного и полужизолирующего GaAs не приводит к существенному изменению его электрических свойств. В данной работе мы также имеем случай слаболегированного кристалла GaAs, и глубина проникновения водорода в исследуемые кристаллы незначительна (по нашим оценкам она составляет приблизительно ~10% от общей толщины исследуемых кристаллов). Следовательно, взаимодействие водорода с дефектами (концентрация которых в нелегированном материале невелика) в данном случае происходит лишь в приповерхностной области кристалла, поэтому наблюдаемое изменение электрических параметров монокристаллов GaAs незначительно. Дозовые зависимости изменения концентрации основных носителей заряда в гидрогенизированных и негидрогенизированных кристаллах арсенида галлия, облученных при комнатных температурах гамма-квантами Co^{60} , измеренные при температурах 291 и 100 К имеют линейный характер вплоть до доз $9 \cdot 10^{17}$ квант/см². Судя по линейному характеру зависимости $\ln n = f(\Phi)$, в удалении носителей заряда участвует преимущественно один радиационный дефект, концентрация которого намного превышает концентрации всех остальных дефектов, вводимых облучением. Дозовые зависимости подвижности носителей заряда, измеренные при комнатной температуре ($T=291$ К), идентичны для гидрогенизированных и негидрогенизированных кристаллов GaAs, подвижность носителей заряда монотонно уменьшается с ростом дозы. Дозовая зависимость подвижности, измеренной при криогенных температурах (100 К), имеет немонотонный характер для образцов, не обработанных в водородной плазме в отличие от образцов, обработанных в водородной плазме. В негидрогенизированных кристаллах μ сначала уменьшается с ростом дозы облучения, проходит через минимум, затем возрастает с ростом дозы, не достигая исходного значения, и при больших дозах опять уменьшается. Различия в зависимостях $\mu(\Phi)$, измеренных при 291 и 100 К, определяется различием в наборе механизмов рассеяния носителей заряда при указанных температурах. Так при $T=291$ К над всеми другими видами рассеяния преобладает

низованные центры. Поскольку подвижность при $T=100$ К определяется преимущественно рассеянием носителей заряда на ионизованных центрах, то изменение величины подвижности с ростом дозы γ -квантов при 100 К отражает изменение концентрации всей совокупности имеющихся в кристалле заряженных центров, в том числе и радиационных дефектов. Однако концентрация дефектов с ростом дозы увеличивается. Таким образом, наблюдаемое возрастание подвижности с ростом Φ после прохождения через минимум в негидрогенизированных кристаллах может означать общее уменьшение зарядового состояния совокупности имеющихся в кристалле дефектов, т.е. уменьшение концентрации дефектов, находящихся в прежнем зарядовом состоянии. Уменьшение зарядового состояния данного дефекта происходит в результате ионизации дефекта при прохождении уровня Ферми через его энергетический уровень в запрещенной зоне. При облучении кристалла положение уровня Ферми в запрещенной зоне меняется с ростом дозы облучения: он смещается вглубь запрещенной зоны. Когда уровень Ферми приближается к энергетическому уровню дефекта, начинается его ионизация. При дальнейшем облучении уровень Ферми смещается ниже положения энергетического уровня доминирующего дефекта, ионизация данного дефекта заканчивается — увеличение зарядового состояния данного дефекта прекращается; теперь главную роль в рассеянии носителей заряда играет конкурирующий процесс увеличения с ростом дозы концентрации того же дефекта, но уже в ином зарядовом состоянии (так как дефект с данным энергетическим уровнем полностью ионизован), и процесс накопления дефектов с более глубокими энергетическими уровнями в запрещенной зоне и меньшей концентрацией. В результате при дозах $>10^{18}$ см⁻² имеем слабую дозовую зависимость $\mu(\Phi)$, где μ снижается с ростом дозы. Более слабая дозовая зависимость $\mu(\Phi)$ и отсутствие минимума на ней в гидрогенизированных образцах при температуре измерения 100 К свидетельствует о том, что концентрация рассеивающих ионизованных центров, находящихся в данном зарядовом состоянии, в этих кристаллах меньше, чем в негидрогенизированных кристаллах в результате частичной их пассивации водородом.

Для определения положения энергетического уровня доминирующего радиационного дефекта, обуславливающего изменение электрических параметров в облученном гамма-квантами арсениде галлия была построена зависимость скорости удаления носителей заряда от положения уровня Ферми $\ln(\Delta n/\Delta \Phi) = f(E_F)$ для негидрогенизированного кристалла. Скорость удаления носителей заряда оставалась постоянной, пока положение уровня Ферми не достигло значения $E_c - 0,125$ эВ. При этом концентрация носителей заряда начинает возрастать. При дальнейшем облучении носителей заряда рез минимум. Таким образом, положение

имеет в запрещенной зоне энергетический уровень $E_c - 0,125 \pm 0,005$ эВ.

DLTS-спектры в гидрогенизированном и негидрогенизированном арсениде галлия отличаются друг от друга, однако, и в одном и в другом спектре присутствует один и тот же пик, принадлежащий дефекту с энергией активации 0,8 эВ, который представляет собой известный в литературе дефект EL2. После облучения гамма-квантами в DLTS-спектрах гидрогенизированного и негидрогенизированного кристаллов GaAs появляется новая полоса, принадлежащая дефекту с энергией активации 0,12 эВ и известному в литературе как ловушка для электронов E1 в кристаллах GaAs. DLTS-спектры, снятые после гамма-облучения, показали, что с ростом Ф концентрация дефекта с энергией активации 0,12 эВ возрастает, причем для гидрогенизированных кристаллов GaAs это возрастание происходит медленнее, чем для негидрогенизированных кристаллов, что свидетельствует о частичной пассивации водородом доминирующего радиационного дефекта с энергетическим уровнем $E_c - 0,125 \pm 0,005$ эВ.

III. Заключение

Методом эффекта Холла обнаружено, что в облученном γ -квантами гидрогенизированном и негидрогенизированном монокристаллическом арсениде галлия доминирующим радиационным дефектом является дефект с уровнем $E_c - 0,125 \pm 0,005$ эВ. Аномальный ход дозовой зависимости подвижности, заключающийся в возрастании подвижности с ростом Ф после некоторой дозы связан с увеличением зарядового состояния этого доминирующего дефекта при прохождении уровня Ферми через его уровень. DLTS-спектры

показали, что при облучении γ -квантами кристаллов GaAs в его кристаллической структуре появляется дефект с энергией активации 0,12 эВ, концентрация которого растет с ростом дозы облучения. Этот дефект ассоциируется с известной в литературе ловушкой для электронов E1. Обе методики исследования показали, что предварительная гидрогенизация перед облучением приводит к частичной пассивации этого дефекта атомарным водородом

Список литературы

1. Pearton S.J. // Mater. Sci. Forum. 1994. V. 148-149. P.393.
2. Pan N., Bose S.S., Kim M.N., Stillman G.E., Chambers F., Devane G., Ito C.R., and Feng M. // Appl Phys Lett. 1987. V. 51. P.596.
3. Pan N., Lee B., Bose S.S., Kim M.N., Hughes J.S., Stillman G.E., Arai K.-ichi and Nashimoto Y. // Appl Phys Lett. 1987. V. 50. P. 1832.
4. Weber F., Bantien F. And Pearton S.J. // Mater. Sci. Forum. 1986. V. 10-12. P.579.
5. McCluskey F.P., Preiffer L., West K.W., Lopata J., Lamont Schnoes M. And Dautremont-Smith W.C. // Appl Pys Lett. 1989. V. 54. P. 1769.
6. Leitch A.W.R., Prescha Th. And Weber J. // Phys Rev. 1992. V. B 45. P. 14400.
7. Cho H.Y., Kim E.K., Min S., Kim J.B. and Jang J. // Appl. Phys. Lett. 1988. V. 53. P. 856.
8. Омеляновский Э.М., Поляков А.Я. // Высокочистые вещества. 1988. №7. С. 5.
9. Lagowski J., Kaminska M., Parsey J.M., Gatos H.C., Lichtensteiger M. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 41, N 11. P. 1078.
10. Pearton S.J. // Hydrogen in III-V Compound Semiconductors. Materials Science Forum. 1994. V. 148 - 149. P. 493.
11. Омеляновский Э.М., Пахомов А.В., Поляков А.Я. // ФТП. 1987. Т. 21, вып 5. С. 842.

THE ENFLUENCE OF DEFECTS, CREATED BY PREPARATION IN HYDROGEN PLASMA AND γ -IRRADIATION CO⁶⁰ ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF UNDOPED N-GAAS

N.F.Kurilovich¹), N.F.Prokhorenko¹), V.K.Shesholko¹), Yu.A.Bumai²), A.G.Ulyashin²)

¹)Institute of Solid State and Semiconductor Physics, 17 P.Brovki Str., 220072 Minsk, Belarus, (0172)841229

²)Belarussian State Polytechnic Academy, 65 F. Scfryna Ave., 220027 Minsk, Belarus (0172)327785

The enfluence of exposition to a hydrogen plazma (hydrogenation) on the electrical properties alteration under γ -irradiation in bulk GaAs have been investigated with Hall-method and DLTS-spectroscopy. Crystals hydrogenation before irradiation leads to insignificant alteration of n and μ and to qualitative DLTS-spectra alteration. This connected with particulary passivation of defects, that are responsible for carriers scattering and removing and with creation of some new hydrogen-related defects. Carriers concentration decreases with dose increasing monotonously in hydrogenated and nonhydrogenated crystals. Carriers mobility meashured at $T=100$ K decreases with dose increasing nonmonotonously: at the beginning it decreases with dose increasing, than growth with dose increasing after investigation of any minimal value and than again decreases at high doses. This dependence is connected with some main defect ionization related with Fermi level location in the band gap. The energetic levels position of main defect was detected, it is equal $E_D = E_c - 0,125 \pm 0,005$ eV. The DLTS-spectra demonstrate the radiation defects with activation energy is equal 0,12 eV creation in crystals irradiated with γ -rays. This defect is associated with well-known defect E1. It is shown that crystals hydrogenation before irradiation leads to particulary passivation of electrically active defects in irradiated crystals. It is investigated the good agriment betwing Hall-results and DLTS-spectroscopy results

