

©1994 г.

НОВЫЙ БИСТАБИЛЬНЫЙ ДЕФЕКТ С ГЛУБОКИМИ УРОВНЯМИ В $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, ЛЕГИРОВАННОМ Si

М.М.Соболев, И.В.Кочнев, М.И.Папенцев

Физико-технический институт им.А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 11 октября 1993 г. Принята к печати 9 ноября 1993 г.)

Сообщается, что в эпитаксиальном n -слое $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$, выращенном МОС-гидридным методом, обнаружен новый бистабильный дефект, несвязанный с DX -центром. Исследования производили $C-V$ и DLTS-методами на AU -барьере Шоттки, с предварительным изохронным и изотермическим отжигом при двух условиях охлаждения — с приложенным напряжением обратного смещения $U_0 = 0$ и с $U_0 < 0$. Стабильное состояние бистабильного дефекта с энергией термической активации $E1 = E_c - 165$ мэВ и сечением захвата электронов $\sigma_n = 1.07 \cdot 10^{-13}$ см⁻² наблюдается при условии изохронного отжига $U_0 = 0$. Этот уровень близок по параметрам к $E1$ уровню, который образуется при радиационном облучении $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ и связывается с дефектом V_{As} . При изохронном отжиге с $U_0 < 0$ наблюдается метастабильный уровень бистабильного дефекта с $E2 = E_c - 208$ мэВ и $\sigma_n = 2.54 \cdot 10^{-14}$ см². Исследования показывают, что кинетика трансформации дефекта $E1 \rightarrow E2$, 1-го порядка и обусловлена двумя ловушками $E2$ и $E2^*$ с различными темпами отжига. Сделано предположение, что этот дефект представляет собой комплекс, состоящий из вакансии мышьяка и примеси.

1. Введение

Дефекты с конфигурационной бистабильностью в соединениях $A^{III}B^V$ были обнаружены в радиационно облученном InP [1]. В этом материале в зависимости от приложенного напряжения смещения при охлаждении образца ($u_0 = 0$ или $U_0 < 0$) наблюдали изменения в спектрах DLTS (нестационарная спектроскопия глубоких уровней), термостимулированной емкости и фотоемкости. Эти превращения в спектрах при различных условиях охлаждения связывались с трансформацией двух структурных конфигураций дефекта в решетке — метастабильной и стабильной, разделенных барьером и имеющих одно и то же зарядовое состояние. К числу таких дефектов относится и DX -центр [2], контролирующий электрические и оптические свойства n -слоев AlGaAs . Для этого дефекта характерно наличие метастабильного состояния, в которое он может быть переведен при низких температурах. В стабильное состояние DX -центр переходит при нагревании до

температур выше 120 К. Установлено, что этот дефект в стабильном состоянии имеет большую решеточную релаксацию и является ловушкой типа self-trapped. Относительно DX -центра известно также, что он является простым донором замещения, который в этой конфигурации связывает электроны на мелком водородоподобном состоянии. Кроме того, наблюдались также глубокие сильно локализованные состояния $A1$ -симметрии [3]. Существующие экспериментальные данные и результаты теоретических расчетов показывают, что DX -центр может быть как с отрицательной, так и с положительной корреляционной энергией [3-5]. Результаты люминесцентных исследований дают основание считать, что имеются более глубокие уровни, чем это ожидается для простого примесного уровня, описываемого в модели с эффективной массой [6]. При исследовании спектров глубоких уровней в лазерах с квантовой ямой на основе $AlGaAs/GaAs$, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, в слое $Al_{0.25}Ga_{0.75}As$, легированном Si [7], была обнаружена новая метастабильная конфигурация DX -центра с малой решеточной релаксацией, которая проявляется при определенных условиях охлаждения материала ниже 150 К. При охлаждении с другими условиями или нагревании материала DX -центр переходит в стабильную конфигурацию с большой решеточной релаксацией.

В настоящей работе сообщается о новом бистабильном дефекте в эпитаксиальных слоях $AlGaAs$, энергия термической активации которого меньше, чем у DX -центра, и этот дефект не связан с DX -центром. Разрешение вопроса о том, связан ли наблюдаемый нами дефект с DX -центром или нет, имеет принципиальное значение, поскольку позволит уточнить природу DX -центра. Кроме того, если этот бистабильный дефект существует, то он будет влиять на работу приборов, ухудшая их характеристики. В случае полевого транзистора на основе $GaAs/AlGaAs$ -гетероструктур (HEMT) этот дефект должен приводить к гистерезису вольт-амперных характеристик и к увеличению отношения сигнал/шум. Он будет служить источником деградации рабочих характеристик. Знание природы дефекта позволит отработать технологию выращивания эпитаксиальных слоев, не содержащих данных дефектов.

Цель данной работы — изучение трансформации нового бистабильного дефекта, определение его параметров и свойств в слоях $Al_xGa_{1-x}As$, выращенных МОС-гидридным методом.

2. Образцы и экспериментальные методы

Образцы, используемые в данных исследованиях, были выращены МОС-гидридным методом на легированных Sn подложках $GaAs$ при температуре 750° С. Толщина эпитаксиального n -слоя $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, легированного Si , была примерно 1 мкм. На n -подложку $GaAs$ методом термического осаждения с последующим отжигом были нанесены $Au-Ge$ омические контакты. А затем на эпитаксиальный n -слой $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, также методом термического осаждения, — Au -барьер Шоттки.

Исследования бистабильных дефектов в эпитаксиальных слоях $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ производили $C-V$ - и DLTS методами с помощью спек-

тронметра DL4600 фирмы BIO-RAD, работающего в режиме двухстробного интегрирования. Для измерения емкости использовался мост Boonton-728, работающий на частоте 1 МГц. Чувствительность этой установки равна $\Delta C/C_0 \approx 10^{-4}$. Исследования кинетики перехода дефекта из одной конфигурации в другую и определение порядка реакции проводили с помощью изотермического и изохронного отжига при различных фиксированных температурах T_0 и при двух условиях охлаждения — с приложенным напряжением обратного смещения $U_0 < 0$ и с $U_0 = 0$. Предварительно образец нагревался до 350 К и выдерживался 5 мин с $U_0 = 0$, если отжиг проводился при $U_0 < 0$, или с $U_0 < 0$ — при отжиге с $U_0 = 0$, а затем охлаждался до температуры отжига. Изохронный отжиг проводился при фиксированной температуре T_0 в течении 2.5 мин. После отжига образец быстро охлаждался до 80 К и производилось измерение DLTS-спектров. Отсюда определяли зависимость изменения концентрации глубоких уровней $N(t, T)$ от времени изотермического отжига t при условиях $U_0 = 0$ и $U_0 < 0$ и при различных температурах отжига T_0 .

3. Результаты и дискуссия

В эпитаксиальных слоях AlGaAs, выращенных МОС-гидридным методом, нами обнаружены, помимо DX-центра, дефекты, энергия термической активации которых меньше, чем у DX-центра (рис. 1). Эти дефекты в спектрах DLTS, измеренных при подачи на образец импульсов обратного смещения и с условиями изохронного отжига $U_0 = 0$ при $T_0 = 350$ К, дают пики с энергией термической активации $E1 = E_c - 165$ мэВ, сечением захвата электронов $\sigma_n = 1.07 \cdot 10^{-13}$ см⁻² и $E3 = E_c - 214$ мэВ, $\sigma_n = 2.9 \cdot 10^{-16}$ см⁻². Наш уровень $E1$ близок по параметрам к $E1$ -уровню, который образуется при радиационном облучении Al_{0.3}Ga_{0.7}As и связывается с дефектом V_{As} [8]. Параметры этих и других уровней, наблюдаемых в спектрах DLTS и определенных из зависимости Аррениуса (рис. 2), приведены в таблице. На рис. 3 приведены зависимости $[N_d - N_a]$ (N_d и N_a — полные концентрации доноров и акцепторов в эпитаксиальном n -слое AlGaAs) от толщины слоя объемного заряда при различных температурах, полученные из

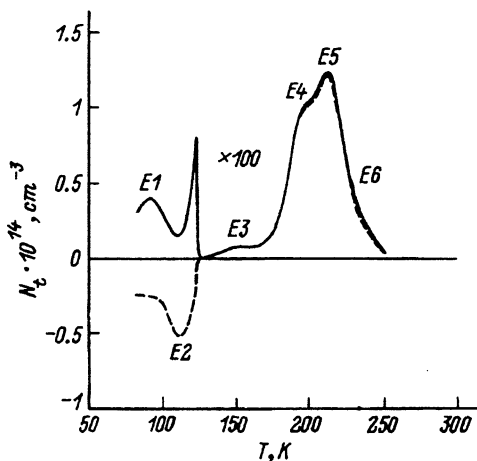


Рис. 1. DLTS-спектры эпитаксиального n -слоя Al_{0.3}Ga_{0.7}As:Si, выращенного МОС-гидридным методом, после изохронного отжига при условии: 1 — $U_0 = 0$ и $T_0 = 350$ К, 2 — $U_0 < 0$ и $T_0 = 350$ К.

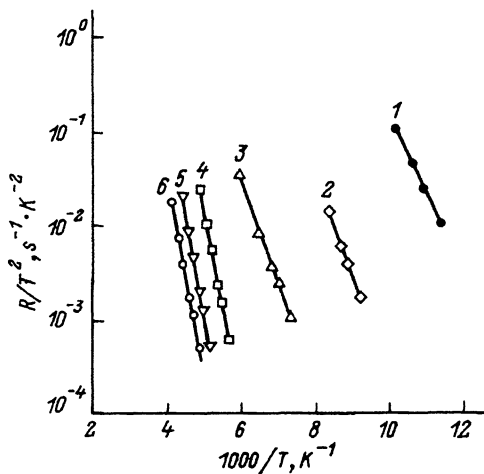


Рис. 2. Зависимости Аррениуса термоэлектронной эмиссии глубоких уровней n -слоя $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As:Si}$: 1 — E_1 , 2 — E_2 , 3 — E_3 , 4 — E_4 , 5 — E_5 , 6 — E_6 .

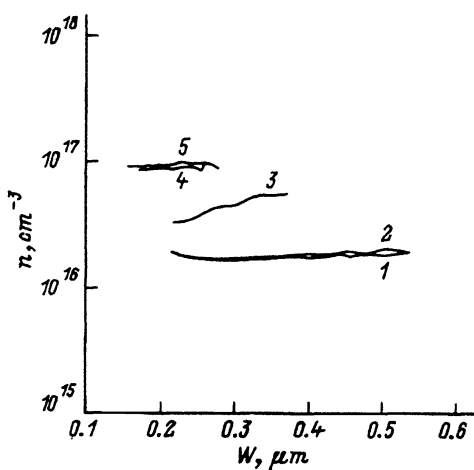


Рис. 3. Эффективные профили концентрации носителей заряда n -слоя $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As:Si}$ при различных температурах измерения, К: 1 — 82, 2 — 120, 3 — 150, 4 — 210, 5 — 300.

C - V -измерений диода на основе барьера Шоттки. Откуда видно, что при увеличении температуры от 80 до 120 К емкость диода не меняется. И, следовательно, уровень E_1 , который проявляется в DLTS-спектрах в этом температурном диапазоне, является истинным, а не артефактом,

Наименование уровня	Энергия активации, эВ	Сечение захвата, см^2	Идентификация	Природа	Данные работ
E_1	0.165	$1.07 \cdot 10^{-13}$	E_1	$V_{\text{As}}+$?	[8]
E_2	0.208	$2.54 \cdot 10^{-14}$			
E_3	0.214	$2.90 \cdot 10^{-16}$			
E_4	0.407	$9.09 \cdot 10^{-13}$	DX	Si_{Ga}	[9]
E_5	0.398	$4.25 \cdot 10^{-14}$	DX	Si_{Ga}	[9]
E_6	0.401	$1.12 \cdot 10^{-14}$	DX	Si_{Ga}	[9]

связанным с температурным изменением емкости. При изохронном отжиге $U_0 < 0$ и $T_0 = 350$ К уровень E_1 , являющийся ловушкой основных носителей, в спектрах DLTS отсутствует. Вместо этого уровня наблюдается новый E_2 , который проявляет себя как ловушка неосновных носителей. Однако как было показано в [10], если исследуемый образец представляет собой сопротивление R , соединенное последовательно с емкостью C -перехода, и $RC\omega > 1$ (ω — угловая частота), то ловушки основных носителей могут проявиться как ловушки неосновных носителей. Для проверки данного положения в работе [10] было предложено при измерении спектров DLTS последовательно с образцом подсоединять различные сопротивления и наблюдать за изменениями в DLTS-спектре. В частности, за уменьшением его амплитуды и смещением температуры перемены знака DLTS-сигнала с отрицательного в положительный. Если это происходит, то DLTS-пик определяется ловушкой основных носителей. В DLTS-спектрах исследуемых нами образцов такие изменения наблюдались. Это дало основание предположить, что наблюдаемая E_2 -ловушка является ловушкой основных носителей с энергией термической активации $E_2 = E_c - 208$ мэВ и сечением захвата электронов $\sigma_n = 2.54 \cdot 10^{-14}$ см². Изменение условий отжига на обратные приводит опять к появлению уровня E_1 в DLTS-спектрах. После изохронного отжига с $U_0 = 0$ и подсветки белым светом при температуре 80 К происходит исчезновение пика уровня E_1 в DLTS-спектре. Изменений в спектрах DX -центра не наблюдается. В спектрах термостимулированной емкости после изохронного отжига с $U_0 = 0$ обнаруживается одна ступенька, которая связывается с DX -центром. Подсветка белым светом приводит к уменьшению высоты этой ступеньки, что связывается с фотовозбуждением носителей с DX -центра в метастабильное состояние. При этом ступеньки, имеющей отношение к E_1 -уровню, мы не наблюдали в наших измерениях, поскольку она должна была проявиться при температурах ниже 80 К, т.е. изменения DX -центра и E_1 -уровня при подсветке с одними и теми же условиями аналогичны. Концентрация DX -центра $N_{DX} = 10^{16}$ см⁻³, что много больше чем концентрация E_1 и E_3 -уровней $N_{E_1} = 2.4 \cdot 10^{13}$ см⁻³ и $N_{E_3} = 7 \cdot 10^{13}$ см⁻³. Отсюда можно сделать вывод о том, что E_1 -уровень является стабильным состоянием нового, обнаруженного нами бистабильного дефекта, не имеющего никакого отношения к DX -центру. Метастабильным состоянием этого дефекта является уровень E_2 . На рис. 4 проведены результаты исследований кинетики термоактивационного перехода бистабильного дефекта из одной конфигурации в другую для двух условий изотермического отжига с $U_0 = 0$ и $U_0 < 0$ и при различных фиксированных температурах отжига T ($E_1 \rightarrow E_2$ и $E_2 \rightarrow E_1$). Эти зависимости показывают, что трансформацию дефекта из конфигурации с уровнем E_1 в конфигурацию с уровнем E_2 ($E_1 \rightarrow E_2$) можно описать как кинетику первого порядка, состоящую из двух участков, обусловленных ловушками с высоким $R(T)$ и медленным $R^*(T)$ темпами, и удовлетворяющих следующему соотношению:

$$N(t, T) = N_0 e^{-R(T)t} + N_0^* e^{-R^*(T)t}, \quad (1)$$

где N_0 , N_0^* — соответственно максимальные концентрации E_1 уровня для быстрого и медленного участков. Трансформация дефектов из

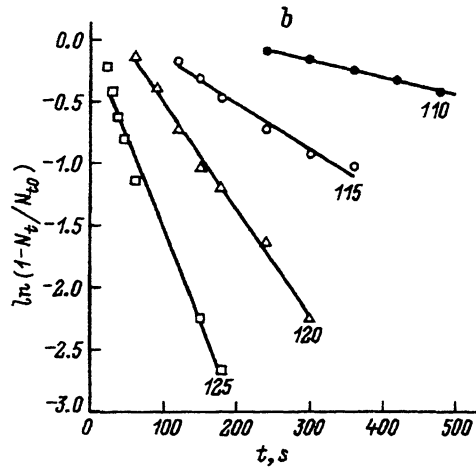
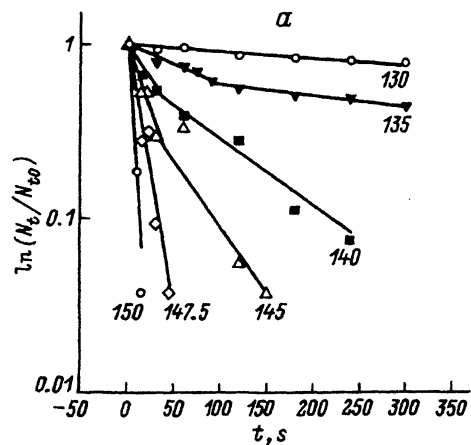


Рис. 4. Кинетика термоактивационного перехода бистабильного дефекта при различных температурах изотермического отжига: а — из E1 в E2 конфигурацию ($U_0 = 0$); б — из E2 в E1 конфигурацию ($U_0 < 0$). Цифры у кривых — температура, К.

конфигурации с уровнем E2 в конфигурацию с уровнем E1 ($E2 \rightarrow E1$) описывается как кинетика первого порядка, удовлетворяющая соотношению

$$N(t, T) = N_0(1 - e^{-R(T)t}), \quad (2)$$

где $R(T)$ — темп перехода дефекта $E2 \rightarrow E1$. Затем из зависимости Аррениуса (рис. 5)

$$R(T) = R_0 e^{-\frac{E_a}{kT}} \quad (3)$$

были определены энергии термической активации E_a и предэкспоненциальные множители R_0 конфигурационных трансформаций бистабильного дефекта $E1 \rightarrow E2$ и $E2 \rightarrow E1$ (здесь k — постоянная Больцмана). Энергия термической активации перехода дефекта $E2 \rightarrow E1$ была равна $E_a(E2 \rightarrow E1) = 231$ мэВ, а предэкспоненциального множителя — $R_0(E2 \rightarrow E1) = 3.35 \cdot 10^7$ с $^{-1}$. Величина $R_0(E2 \rightarrow E1)$ предполагает, что механизм этой трансформации контролируется электронным захватом. При трансформации $E1 \rightarrow E2$ быстрый участок характеризуется ловушкой соответственно с $E_a(E1 \rightarrow E2) = 378$ мэВ и R_0

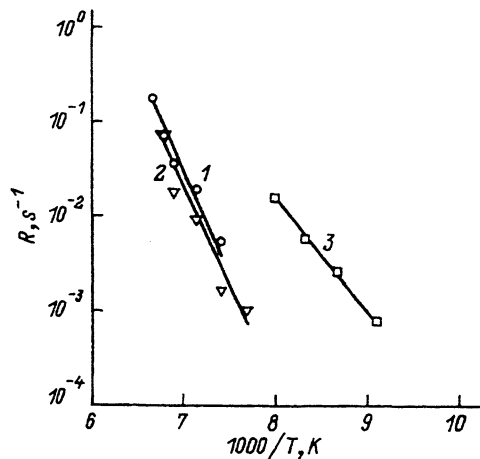


Рис. 5. Зависимость Аррениуса темпа перехода бистабильного дефекта из $E1 \rightarrow E2$ конфигурацию для быстрого (1) и медленного участков (2), из $E2 \rightarrow E1$ конфигурацию (3).

($E1 \rightarrow E2$) = $6.67 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, а медленный — с E_a^* ($E1 \rightarrow E2$) = 391 мэВ и R_0^* ($E1 \rightarrow E2$) = $9.97 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$. При этом порядок предэкспоненциального множителя R_0 ($E1 \rightarrow E2$) может соответствовать процессу эмиссии, который контролирует обратное конфигурационное преобразование дефекта, представляющего собой, по-видимому, комплекс, в состав которого входит примесь и вакансия мышьяка. При эмиссии электрона этот комплекс диссоциирует на примесь и вакансию, а при захвате электрона они вновь ассоциируются.

В [11] нами было показано, что источником деградации лазера GaAs/AlGaAs с квантовой ямой, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии, является процесс переползания дислокаций, связанный с поглощением точечных дефектов, расположенных на гетерогранице, и сопровождаемый генерацией As_{Ga} и V_{Ga} . В этих лазерах в эмиттере и волноводе также был обнаружен $E1$ -дефект, который, по-видимому, связан с вакансией V_{As} и является тем дефектом, концентрация которого увеличивается вблизи гетерограницы и который поглощается при переползании дислокаций. $E1$ -дефект был обнаружен только в AlGaAs, выращенной методом МОС-гидридной эпитаксии, и его появление связано с особенностями этой технологии. Вариации режимов выращивания эпитаксиальных слоев AlGaAs должны позволить определить более точно природу $E1$ -дефекта и управлять его концентрацией, уменьшая его отрицательное воздействие на работу прибора. Другим методом, который представляется нам необходимым для изучения природы $E1$ -дефекта, является радиационное облучение эпитаксиальных слоев AlGaAs, поскольку есть основание предполагать, что данный дефект имеет свойства, близкие к дефектам, образующимся при облучении.

Таким образом, результаты измерений показывают, что в эпитаксиальных n -слоях $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$, легированных Si и выращенных методом МОС-гидридной эпитаксии, нами обнаружен новый бистабильный дефект с энергией термической активации в стабильном состоянии $E1 = E_c - 165 \text{ мэВ}$. Это состояние достигается при условии изохронного отжига $U_0 = 0$. При изохронном отжиге $U_0 < 0$ наблюдается новый метастабильный $E2$ -уровень этого дефекта с $E_c - 208 \text{ мэВ}$. Проведенные исследования показывают, что кинетика трансформации дефекта

$E1 \rightarrow E2$ 1-го порядка и обусловлена двумя ловушками $E2$ и $E2^*$ с различными темпами отжига. Сделано предположение, что дефект представляет собой комплекс, состоящий из вакансии мышьяка и примеси.

Список литературы

- [1] M. Levinson, J.L. Benton, L. Kimerling. Phys. Rev. B, **27**, 6216 (1983).
- [2] P. Mooney. J. Appl. Phys., **67**, R1 (1990).
- [3] T.N. Theis, P.M. Mooney, B.D. Parker. Electron J. Mater. **20**, 35, (1991).
- [4] Y.B. Jia, M.F. Li, J. Zhou, J.L. Gao, M.Y. Kong, P.Y. Yu, K.T. Chan. J. Appl. Phys. **66**, 5632, (1989).
- [5] P. Seguy, P.Y. Yu, M. Li, R. Leon, K.T. Chan. Appl. Phys. Lett., **57**, 2469, (1990).
- [6] J. Kang, Q. Huang. J. Appl. Phys., **72**, 1395, (1992).
- [7] П.Н. Брунков, В.П. Евтихеев, С.Г. Конников, Е.Ю. Котельников, М.И. Папенцев, М.М. Соболев. ФТП, **24**, 1978, (1990).
- [8] D.V. Lang, R.A. Longan, L.C. Kimerling. Phys. Rev. B, **15**, 4874, (1977).
- [9] P.K. Bhattacharya, S. Dhar. Semicond. Semimet., **26**, 143 (1988).
- [10] A. Broniatowski, A. Blossie, P.C. Srivastava, J.C. Bourgoin. J. Appl. Phys., **54**, 2907 (1983).
- [11] М.М. Соболев, А.В. Гитцович, М.И. Папенцев, И.В. Кочнев, В.С. Явич. ФТП, **26**, 1760 (1992).

Редактор В.В. Чалдышев

