

07

## Особенности пиннинга уровня Ферми на границе раздела $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ с анодным оксидом и стабилизированным диоксидом циркония

© С.В. Тихов, О.Н. Горшков, И.Н. Антонов, А.П. Касаткин,  
М.Н. Коряжкина

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ,  
Нижний Новгород  
E-mail: mahavenok@mail.ru

Поступило в Редакцию 20 июня 2013 г.

В структурах металл–оксид–полупроводник на основе пленок  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ , полученных методом эпитаксии с использованием металлоорганических соединений, наблюдался пиннинг уровня Ферми на границе раздела  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ /оксид на расстоянии 1.1 eV от потолка зоны проводимости  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ . В этих структурах обнаружено явление долговременной памяти, которое обусловлено поступлением электронов из  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  в анодный оксид и их захватом там глубокими ловушками. Наблюдалось обратимое изменение состояний структур, связанных с этим эффектом памяти, под действием электрического поля или света.

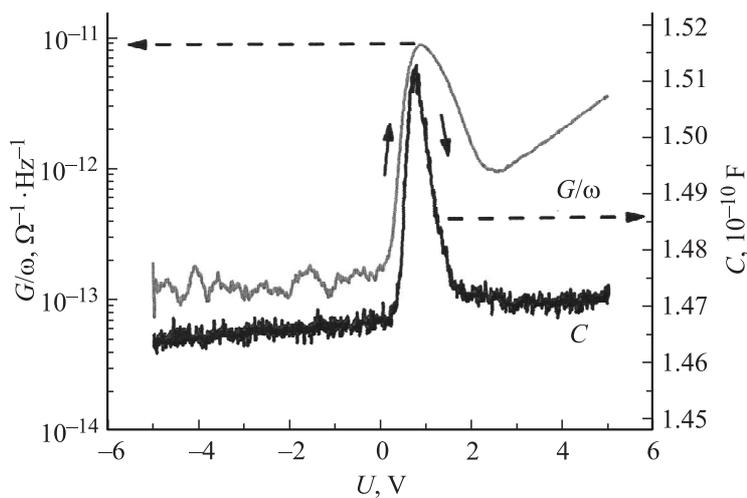
Изучение пиннинга уровня Ферми на границе раздела  $\text{AlGaAs}$  с различными диэлектриками представляет значительный интерес в связи с проблемой создания МДП-транзисторов (МДП — металл–диэлектрик–полупроводник) на основе  $\text{GaAs}$ . Интерес вызван тем обстоятельством, что на гетерогранице эпитаксиальной структуры  $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  пиннинг уровня Ферми может отсутствовать [1], и тогда система М/Д/ $\text{AlGaAs}/\text{GaAs}$  должна вести себя подобно кремниевой МДП-структуре с двухслойным диэлектриком [2]. Наиболее удачные традиционные попытки снижения пиннинга на поверхности  $\text{GaAs}$  были описаны в работах [3,4]. В данной работе изучены особенности пиннинга уровня Ферми в МДП-структурах  $\text{Au}/\text{YSZ}/\text{AlGaAs}/\text{n}^+-\text{GaAs}/\text{Sn}$  (YSZ — англ.: Yttria-Stabilized-Zirconia — стабилизированный оксидом иттрия

диоксид циркония) и Au/AO/AlGaAs/ $n^+$ -GaAs/Sn (АО — анодный оксид).

Исследуемые структуры выполнены на подложке  $n^+$ -GaAs с кристаллографической ориентацией (100). Нелегированные слои AlGaAs с проводимостью  $n$ -типа толщиной  $d_s = 1.5$  и  $4.5 \mu\text{m}$  получены методом эпитаксии с использованием металлоорганических соединений (МОС-гидридной эпитаксии) при пониженном давлении на установке AIX 200RF, а слои YSZ (12%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) толщиной  $d_l = 40 \text{ nm}$  — методом ВЧ-магнетронного распыления на установке MagSputt-3G-2. Площадь полученных структур  $S = 2.1 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$ . Электрод из Au был полупрозрачен. Анодный оксид полупроводника  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  толщиной  $d_{ao} = 100$  и  $120 \text{ nm}$  получен методом жидкостного анодного окисления в электролите состава раствор винной кислоты в этиленгликоле (1:2) с пентаборатом аммония. Изменялись зависимости от напряжения  $U$  малосигнальной дифференциальной емкости  $C(CU)$  и проводимости  $G(GU)$  в интервале частот  $f = 10^3 - 10^6 \text{ Hz}$  и вольт-амперные характеристики (ВАХ) в автоматическом режиме на анализаторе полупроводниковых приборов Agilent B1500A. Скорость пилообразной развертки по напряжению составляла 0.15 или 0.26 V/s. Напряжение на структурах соответствовало потенциалу верхнего электрода (Au) относительно потенциала подложки.

В интервале напряжений  $-5 - +5 \text{ V}$  на частотах  $10^4 - 10^6 \text{ Hz}$  емкость структуры Au/YSZ/ $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}(1.5 \mu\text{m})/n^+$ -GaAs/Sn не зависела от напряжения и равнялась емкости аналогичного диода Шоттки (ДШ) с электродом из Au при напряжениях, меньших 0.5 V. Этот результат свидетельствует о полном истощении электронами слоя  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ , проводимость и емкость которого не модулируются внешним напряжением из-за высокой плотности поверхностных состояний (ПС) и пиннинга уровня Ферми на поверхности  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ . Толщина обедненного слоя практически была равна толщине пленки  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ . Однако на частоте  $10^3 \text{ Hz}$  на зависимостях  $C(U)$  и  $[G/\omega](U)$  возникали пики  $C$  и  $G/\omega$  около напряжения  $+1 \text{ V}$  (рис. 1), которые не проявлялись при обратном ходе развертки по напряжению (обратный ход на рисунке не показан). Эти пики можно объяснить зарядкой ПС электронами, поступающими из  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ . Плотность заряженных ПС  $N_{ss}$  на этой частоте, определенная по формуле [5]

$$N_{ss} = [G/\omega]_{\text{max}}/(q^2S), \quad (1)$$

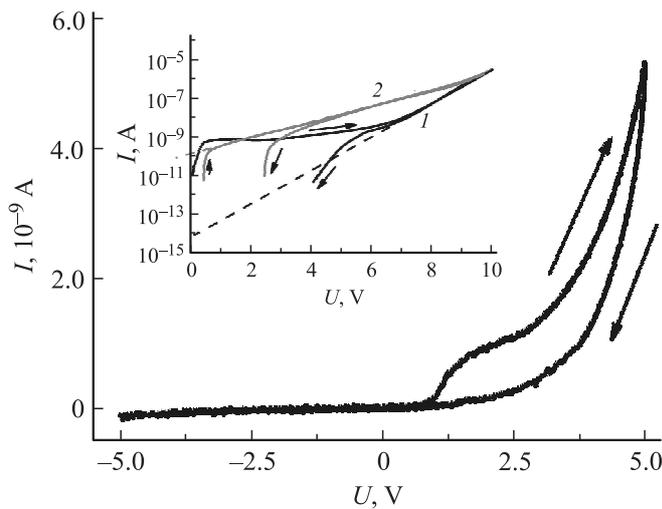


**Рис. 1.** Зависимости  $C(U)$  и  $[G/\omega](U)$  для МДП-структуры Au/YSZ/ $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  ( $1.5 \mu\text{m}$ )/ $n^+$ -GaAs, измеренные на частоте 1 kHz со скоростью развертки по напряжению 0.15 V/s.

оказалась небольшой  $-2.7 \cdot 10^9 \text{cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ . В данном случае низкое значение  $N_{ss}$  обусловлено медленной зарядкой ПС, что следует связать с большим кулоновским барьером, уменьшающим сечение захвата электронов. Суммарная же плотность имеющихся ПС, как показывает оценка, основанная на анализе  $CU$ -кривой (напряжение плоских зон больше 5 eV), по крайней мере, на 3 порядка выше значения, полученного по формуле (1).

Примерно в этой же области напряжений наблюдается максимальный гистерезис ВАХ при  $U > 0$ , связанный, вероятно, с медленным электронным захватом на ПС (рис. 2). Уточним, что термин ПС, употребляемый в работе, относится также к центрам захвата в диэлектрике, локализованным вблизи границы раздела диэлектрик/полупроводник, по крайней мере, на длине тунnelирования. Отметим также, что перемещение ионов кислорода в YSZ под действием электрического поля может оказывать влияние на рассматриваемые эффекты.

На вставке рис. 2 приведена ВАХ МОП-структуры Au/YSZ/ $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}/n^+$ -GaAs/Sn (образец с  $d_s = 1.5 \mu\text{m}$ ), измеренная в темноте



**Рис. 2.** ВАХ-структуры Au/YSZ/Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As (1.5 μm)/n<sup>+</sup>-GaAs, измеренные со скоростью развертки по напряжению 0.15 V/s. На вставке — ВАХ той же структуры, измеренная со скоростью развертки 0.26 V/s в отсутствие освещения (1) и при освещении белым светодиодом (2).

и при освещении белым светодиодом при напряжениях в интервале 0–10 V со скоростью развертки 0.26 V/s. При такой же скорости развертки в этом интервале напряжений емкость на частотах 10<sup>4</sup>–10<sup>6</sup> Hz была практически постоянной и определялась емкостью слоя Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As (~ 10<sup>-10</sup> F). Рассчитанная емкость слоя YSZ больше этой величины почти на порядок. Следовательно, ток вне области гистерезиса как в темноте, так и при освещении определялась током проводимости и механизмом надбарьерной эмиссии Шоттки в слое Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As.

Методом экстраполяции прямого тока по формуле [6]

$$I = A^* T^2 S \exp(-q\phi_B/kT) [\exp(qU/mkT) - 1], \quad (2)$$

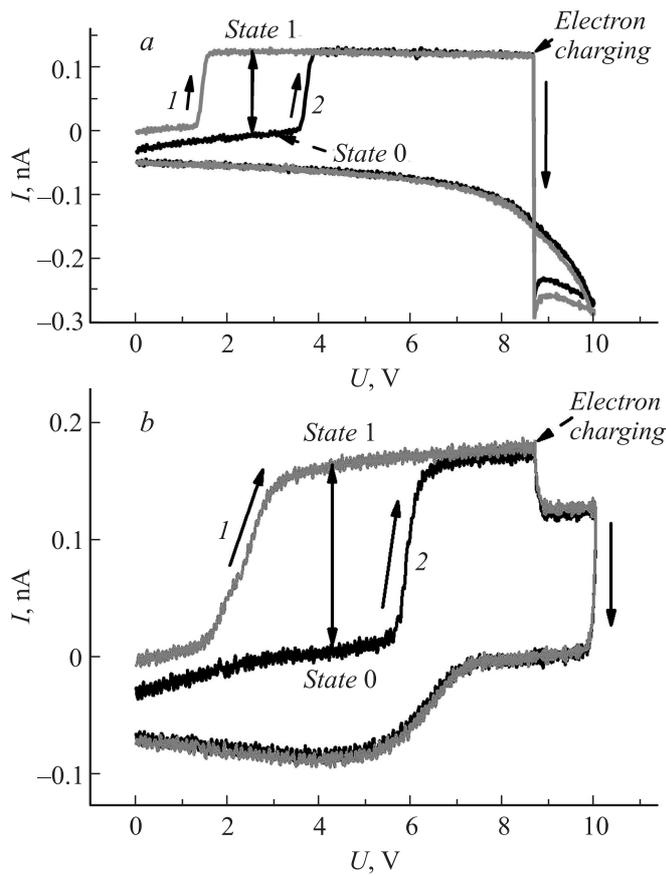
где  $A^*$  — постоянная Ричардсона ( $1.1 \cdot 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{C}^{-2}$  для барьера Au/n — Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As),  $T$  — температура,  $m$  — коэффициент идеальности, была выполнена оценка высоты барьера  $\phi_B$  на контакте Au/n — Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As. Такая оценка привела к значению 1.08 V при отсутствии

освещения, что хорошо согласуется с данными для аналогичного ДШ с электродом из Au и подтверждает явление закрепления уровня Ферми на реальной поверхности  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ . При освещении структуры высота барьера уменьшалась до 0.83 V, что объясняется появлением дырок в  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  и некоторым спрямлением барьера. Однако это спрямление является слабым и не влияет на полную емкость структуры, которая определяется слоем  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ . Насыщение характеристики при малых токах (кривая  $I$  на вставке рис. 2), вероятно, определяется токами смещения [5]

$$I_b = CdU/dt, \quad (3)$$

а гистерезис — зарядкой медленных ловушек в слое YSZ электронами, поступающими из полупроводника, на что указывает тип гистерезиса. Уменьшение гистерезиса при освещении связано с появлением дырок в полупроводнике. Оценка плотности захваченного ПС заряда по петле гистерезиса ВАХ, определяемая интегралом по площади петли, дает величины, характерные для поверхности GaAs с закреплением уровня Ферми, а именно  $5 \cdot 10^{12} \text{cm}^2 \cdot \text{eV}^{-1}$  при отсутствии освещения и в два раза меньшее значение при освещении.

В структуре с YSZ не удавалось наблюдать явлений долговременной памяти, связанной с обнаруженным гистерезисом, так как эмиссия заряда, захваченного на ловушки, происходила за несколько минут. Однако такие явления имели место в МДП-структурах с АО. Диэлектрические свойства АО оказались достаточно высоки: относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon \approx 7$ , тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg } \delta \approx 0.05$  (оба показателя при  $10^2$ – $10^4$  Hz), поле пробоя  $E_b \sim 3 \cdot 10^6$  V/cm, удельное сопротивление  $\rho \approx 10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ . Явление долговременной памяти проявлялось на ВАХ МОП-структур со слоями  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  как с квазинейтральным объемом (случай относительно толстого с  $d_s = 4.5 \mu\text{m}$ ; см. рис. 3, *a*), так и без квазинейтрального объема ( $d_s = 1.5 \mu\text{m}$ , рис. 3, *b*). Область токов, соответствующая эффекту памяти, отмечена вертикальной стрелкой с двумя остриями. ВАХ исходных структур (кривые  $I$  на рис. 3, *a* и *b*) описывают состояние с большими токами и низкими сопротивлениями структур (состояние 1) в области напряжений (1.5–3.8 V в случае *a* или 2.5–6 V для *b*), в которой проявляется эффект памяти. При достижении порогового напряжения зарядки (8.7 V) происходил переход в состояние с малыми токами и высокими сопротивлениями структур (состояние 0). Переход в состояние 1 происходил при отрицательном стирающем напряжении



**Рис. 3.** ВАХ МДП-структур Au/AO/Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As/n<sup>+</sup>-GaAs с толщиной слоя AlGaAs: *a* — 4.5 μm; *b* — 1.5 μm. Скорость развертки — 0.15 V/s, 1 — до зарядки ловушек электронами, 2 — после зарядки ловушек.

около  $-9$  V. Характеристики структур обратимо изменялись после ряда циклов переключений. Вид и направление гистерезиса ВАХ показывают, что повторное приложение положительного напряжения к структуре смещает кривые в область больших положительных напряжений, т. е. эффекты записи и стирания обусловлены зарядкой медленных ПС электронами из Al<sub>0,3</sub>Ga<sub>0,7</sub>As.

В теории МОП-структур наблюдаемый тип гистерезиса получил название „нормального“ гистерезиса [8]. Вероятно, центры захвата локализованы в оксиде на некотором (возможно, туннельном) расстоянии от границы АО/ $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ , так как вид ВАХ после зарядки (кривая 2) не возвращался к исходному (кривая 1) в течение долгого времени, если стирающее напряжение не подавалось. Хранение структуры при освещении рассеянным светом в течение суток приводило к релаксации сдвига между кривыми 1 и 2 примерно на одну треть. Записанный заряд и гистерезис ВАХ полностью исчезают после освещения структуры белым или красным светом от светодиодов, т.е. после появления дырок в  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ . Можно предположить, что при освещении происходит увеличение напряженности электрического поля между областью локализации ловушек и приповерхностным слоем полупроводника, способствующее разрядке ловушек. Разница в обнаруженном эффекте долговременной памяти МОП-структур с АО с квазинейтральным и без квазинейтрального объема слоя  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$  состоит только в величине изменения токов при зарядке ловушек при одинаковом пороговом напряжении зарядки. В первом случае это изменение имеет большее значение ( $4 \cdot 10^{-10}$  А), чем во втором ( $1.7 \cdot 10^{-10}$  А). Участки насыщения тока в ВАХ свидетельствуют о превосходстве токов смещения  $I_b = C dU/dt$  ( $dU/dt = \text{const}$ ) над токами проводимости, а измеренные ВАХ фактически являются зависимостями квазистатической емкости от напряжения [5]. Об этом же свидетельствует изменение знака тока при перемене направления изменения напряжения. На  $CU$ - и  $GU$ -характеристиках в интервале частот  $10^3 - 10^6$  Hz явление долговременной памяти практически не наблюдалось, что свидетельствует о медленной зарядке ловушек, не проявляющейся при высоких частотах и используемой скорости развертки напряжения. На  $CU$ - и  $GU$ -характеристиках не удалось также получить участок, связанный с ростом концентрации основных носителей заряда, вплоть до напряжения пробоя, что обусловлено жестким пиннингом уровня Ферми в структурах с АО.

Таким образом, в МПД-структурах на основе пленок  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ , полученных методом МОС-гидридной эпитаксии, наблюдался пиннинг уровня Ферми на границе раздела  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ /оксид на расстоянии 1.1 eV от потолка зоны проводимости  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ . В этих структурах обнаружено явление долговременной памяти, которое было обусловлено электронами, поступающими из  $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.3}\text{As}$  и захватываемыми глубокими ловушками в анодном оксиде. Наблюдалось обратимое

изменение состояний, связанных с этим эффектом, под действием электрического поля или света.

Авторы выражают благодарность А.А. Бирюкову за проведение МОС-гидридной эпитаксии слоев AlGaAs.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“.

## Список литературы

- [1] *Кейси Х., Панниш М.* Лазеры на гетероструктурах. М.: Мир, 1981. Т. 1. 297 с.; Т. 2. 358 с.
- [2] *Hsu Chia-Ming, Hwu Jenn-Gwo* // *Appl. Phys. Lett.* 2012. V. 101. С. 253 517 (1–4)
- [3] *Карпович И.А., Бедный Б.И., Байдусь Н.В.* и др. // *ФТП.* 1993. Т. 27. В. 10. С. 1736–1743.
- [4] *Kundu Souvik, Halder N., Nripendra, Biswas D.* et al. // *J. Appl. Phys.* 2012. V. 112. С. 034 514 (1–7).
- [5] *Овсяк В.Н.* Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984. 252 с.
- [6] *Родерик Э.К.* Контакты металл-полупроводник. М.: Радио и связь, 1982. 207 с.
- [7] *Revva P., Langer J.M., Missous M.* et al. // *J. Appl. Phys.* 1993. V. 74. P. 416–425.
- [8] *Тухов С.В.* Неравновесные процессы в МДП-структурах. Горький: Изд-во ГТУ, 1985. 68 с.