

07

Особенности явления неравновесного обеднения, сопровождаемого процессами захвата неосновных носителей поверхностными состояниями, в структурах металл—диэлектрик—полупроводник

© С.В. Тихов¹, О.Н. Горшков^{1,2}, М.Н. Коряжкина¹,
И.Н. Антонов^{1,2}, А.П. Касаткин¹

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород

² Научно-исследовательский физико-технический институт ННГУ, Нижний Новгород

E-mail: mahavenok@mail.ru

Поступило в Редакцию 31 марта 2015 г.

В структурах металл—диэлектрик—полупроводник на основе арсенида галлия и кремния с тонкой пленкой (толщиной 40 nm) диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, обнаружены особенности явления неравновесного обеднения, которые проявляются в скачкообразных изменениях тока при изменении напряжения и могут привести к расширению областей применения этого явления в микроэлектронной технике.

Явление неравновесного обеднения поверхности полупроводника в структурах металл—диэлектрик—полупроводник (МДП) используется в устройствах функциональной электроники [1], приборах с переносом заряда [2] и приборах с зарядовой связью [3]. С целью увеличения удельной емкости диэлектрика в таких устройствах и приборах исследуется возможность замены широко используемого в них диоксида кремния на диэлектрики с высокими значениями относительной диэлектрической проницаемости ϵ (10–50), так называемые high-k диэлектрики [4], в том числе на диоксид циркония. При этом для снижения плотности поверхностных состояний (ПС) на границе раздела (ГР) диэлектрик—полупроводник (ДП) используются различные

способы пассивации ГР ДП в структурах на основе GaAs [5,6] и применение двухслойного диэлектрика high-k диэлектрик/SiO₂ в структурах на основе Si [7]. В настоящее время вопросы снижения плотности ПС в структурах МДП привлекают внимание в связи с изучением происходящих в них эффектов резистивного переключения и памяти [8], о важности проведения исследований которых свидетельствует включение их в Международный план по развитию полупроводниковой технологии (англ.: International Technology Roadmap for Semiconductors) [9]. В данной работе обсуждаются особенности явления неравновесного обеднения, проявляющиеся в скачкообразных изменениях тока при изменении напряжения, которые были обнаружены в структурах МДП на основе GaAs и Si, в качестве диэлектрика в которых использован диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия (YSZ).

Структуры создавались на основе монокристаллических подложек n^+ -GaAs и n -Si (КЭФ-4.5) с кристаллографической ориентацией (100). Слой n -GaAs с концентрацией равновесных электронов $n_0 \approx 8 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ толщиной $d_s = 1 \mu\text{m}$, покрытый пассивирующим слоем из InP толщиной 1.5 nm [5], был получен на поверхности подложки n^+ -GaAs методом МОС-гидридной эпитаксии. Поверхность Si покрывалась туннельно-тонким слоем SiO₂ химическим методом. Слой YSZ (12 мол.% Y₂O₃) толщиной 40 nm осаждался на полупроводниковые подложки методом ВЧ-магнетронного распыления на установке MagSputt-3G-2. Эти пленки использовались ранее в структурах МДП [8,10] и в структурах металл–диэлектрик–металл [11,12], в том числе в структурах, проявляющих эффекты резистивного переключения и памяти [8,11]. Полупрозрачные для освещения верхние электроды площадью $1.0 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$ из Ni или из Au с подслоем из Zr толщиной 3 nm (для улучшения адгезии) осаждались на поверхность слоя диэлектрика методом термического распыления в вакууме и методом магнетронного распыления соответственно. Измерялся поперечный ток, проходящий через отдельную структуру МДП (вольт-амперные (IU) характеристики), а также зависимости от напряжения U дифференциальной емкости C (CU) и проводимости G (GU) структур в параллельной эквивалентной схеме замещения конденсатора [13] в интервале частот $f = 10^3 - 10^6 \text{ Hz}$ в автоматическом режиме на анализаторе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A. Измерения проводились в интервале температур 77–400 К в темноте и при освещении. Напряжение U на структуре соответствовало потенциалу верхнего электрода относительно потенциала базового электрода.

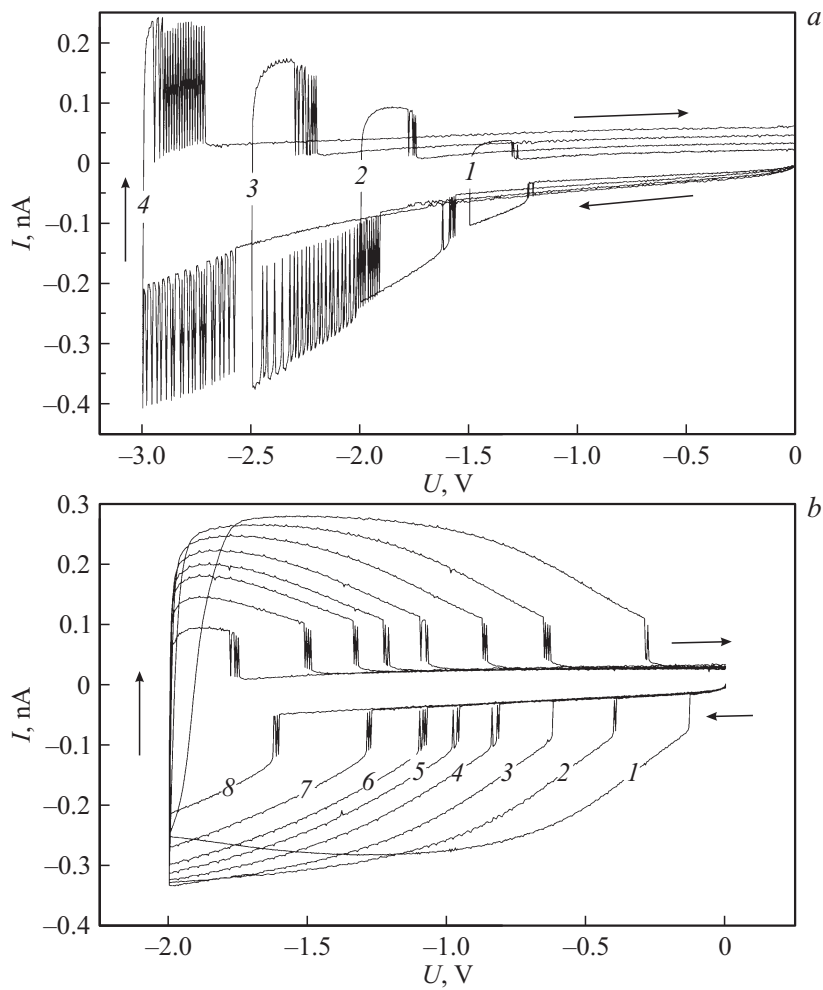


Рис. 1. IU -характеристики структуры Ni/YSZ/ n -GaAs, измеренные (а) при температуре 297 К и амплитудах напряжения U_m , V: -1.5 (1), -2.0 (2), -2.5 (3), -3.0 (4), и скоростях развертки по напряжению u , mV/s: 60 (1), 80 (2), 100 (3), 120 (4) (b) при амплитуде напряжения $U_m = -2.0$ V, скорости развертки по напряжению $u = 80$ mV/s и температурах T , К: 250 (1), 265 (2), 270 (3), 280 (4), 285 (5), 287 (6), 293 (7), 297 (8).

На рис. 1, *a* показаны IU -характеристики структуры МДП на основе GaAs, измеренные при разных амплитудах напряжения U_m и скоростях развертки по напряжению u . Приведенные данные показывают чередование плавного и скачкообразного (с частотой в интервале $\sim 10\text{--}100\text{ Hz}$) изменения тока при возрастании и уменьшении величины напряжения (при развертке по напряжению в прямом и обратном направлении соответственно). Осцилляции тока возникают при развертке по напряжению в прямом направлении после резкого увеличения тока, а при развертке по напряжению в обратном направлении — после резкого уменьшения тока. О влиянии ПС на вид IU -характеристик свидетельствует зависимость этих характеристик от температуры (рис. 1, *b*). Из приведенных на этом рисунке данных следует, что время релаксации явления неравновесного обеднения уменьшается с понижением температуры, что противоречит механизму релаксации за счет термогенерации дырок [14] и соответствует увеличению отрицательного заряда на ПС при понижении температуры. Температурные измерения CU - и GU -характеристик структур подтверждают этот вывод. Этот эффект наблюдается в структурах МДП с относительно высокой плотностью ПС и положен в основу широко известного температурного метода Грея–Брауна, применяемого для определения энергетического распределения плотности этих ПС [15]. С уменьшением температуры исследуемых структур их CU - и GU -характеристики проявляли сдвиг в направлении положительных напряжений, который соответствует увеличению отрицательного заряда на ПС. Это приводит к более быстрому увеличению концентрации дырок в приповерхностной области полупроводника и уменьшению времени релаксации неравновесного обеднения при формировании инверсионного слоя. Аналогичные IU -характеристики были получены для структур на основе Si (рис. 2, *a, b*). Чтобы отдельно выяснить влияние на протекание наблюдаемого эффекта как амплитуды развертки по напряжению, так и скорости развертки, были измерены IU -характеристики одной из структур МДП (на основе Si) как при различных значениях U_m и постоянной величине u , так и при различных значениях u и постоянной величине U_m . Если в первом случае для $u = 0.05\text{ V/s}$ и U_m в интервале $-4 \div -2\text{ V}$ не наблюдалось изменений в скачкообразном поведении IU -характеристик, то во втором случае (рис. 3, *a*) интервал напряжений, в котором проявлялось такое скачкообразное поведение, существенно увеличивался с увеличением скорости развертки.

Необходимым критерием возникновения наблюдаемых особенностей в IU -характеристиках структур на основе как GaAs, так и Si было

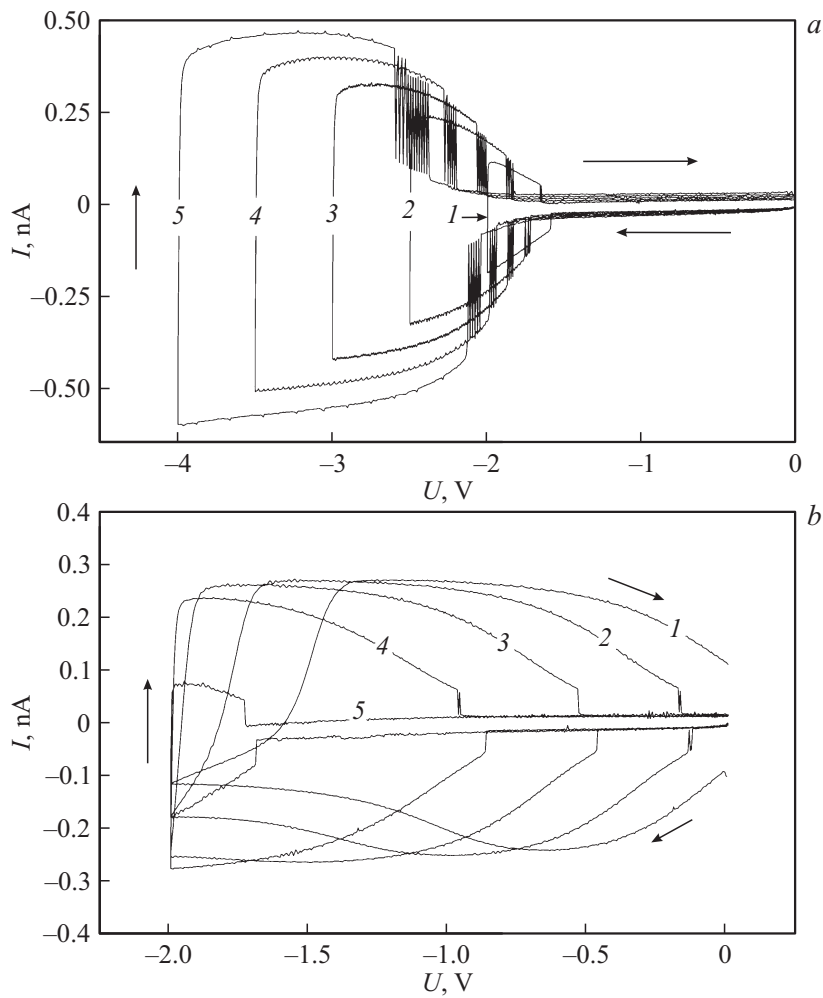


Рис. 2. IU -характеристики структуры Au/Zr/YSZ/n-Si, измеренные (a) при температуре 300 К и амплитудах напряжения U_m , V: -2.0 (1), -2.5 (2), -3.0 (3), -3.5 (4), -4.0 (5), и скоростях развертки по напряжению u , mV/s: 80 (1), 100 (2), 120 (3), 140 (4), 160 (5) (b) при амплитуде напряжения $U_m = -2.0$ V, скорости развертки по напряжению $u = 80$ mV/s и температурах T , К: 220 (1), 235 (2), 250 (3), 267 (4), 300 (5).

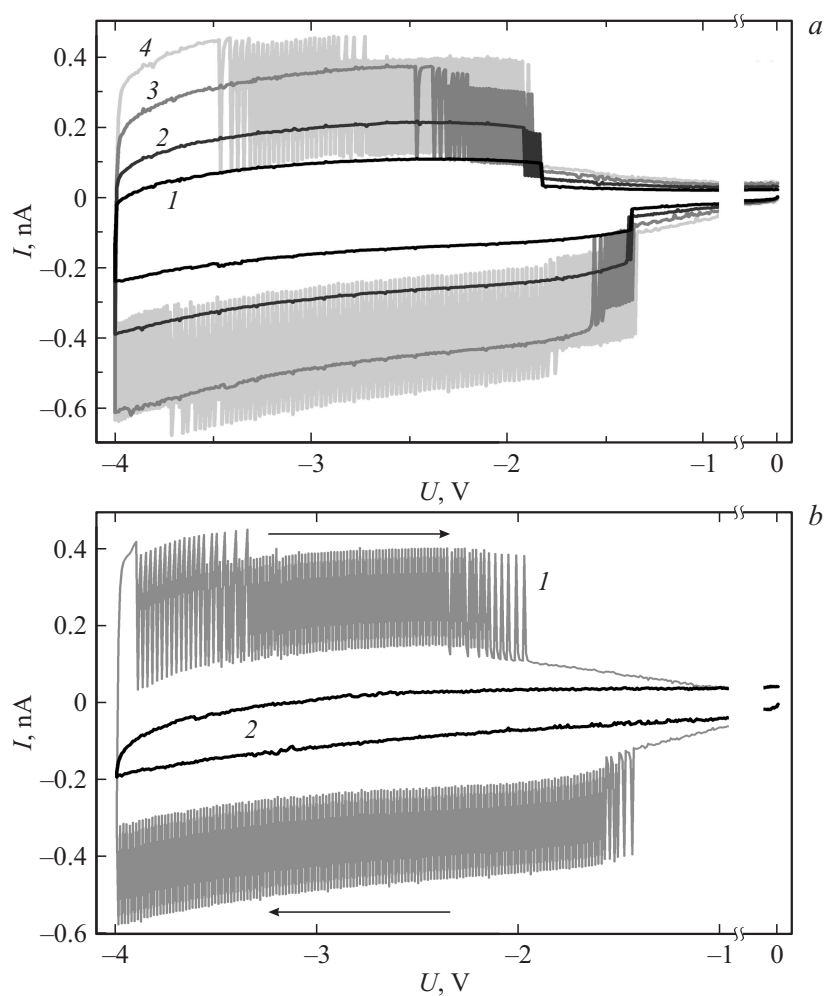


Рис. 3. IU -характеристики структуры Au/Zr/YSZ/ n -Si, измеренные при температуре 300 К, амплитуде напряжения $U_m = 4.0$ В и a — скоростях развертки по напряжению u , мВ/с: 39 (1), 65 (2), 95 (3), 99 (4), b — скорости развертки по напряжению $u = 78$ мВ/с в темноте (1) и при освещении красным светодиодом (2).

выполнение неравенства $I_c \ll I_s = CdV/dt$, в котором I_c — величина тока утечки, I_s — величина тока смещения. Так, например, токи утечки увеличивались при уменьшении площади управляющего электрода из-за возрастания роли краевого эффекта, а также при повышении температуры структуры выше комнатной температуры, и обнаруженный эффект исчезал в используемых интервалах значений скорости развертки по напряжению и амплитуды напряжения. Существенным также является тот факт, что при освещении структур красным светодиодом токи утечки также возрастали и эффект скачкообразного поведения IU -характеристик исчезал (см. данные рис. 3, *b* для структуры на основе Si). Относительное увеличение тока утечки и исчезновение рассматриваемого эффекта происходило также в структурах на основе Si с верхним электродом из золота (при отсутствии циркониевой прослойки). Понижение температуры примерно до 250 К приводило к следующей особенности IU -характеристик при росте величины напряжения: после скачкообразного и последующего плавного увеличения тока происходило его плавное уменьшение, связанное с захватом дырок поверхностными состояниями (рис. 1, *b*, кривая 1 и рис. 2, *b*, кривые 1–3).

Следует отметить, что на CU - и GU -характеристиках, измеренных в интервале частот 10^3 – 10^6 Hz при тех же скоростях развертки по напряжению, при которых измерялись IU -характеристики, не наблюдалось никаких скачков и осцилляций емкости и проводимости. Они имели стандартный для высокочастотных характеристик структур МДП вид плавных кривых для емкости и проводимости [15]. Это свидетельствует о том, что процессы, которые ответственны за наблюдаемые особенности в ВАХ, являются более медленными по сравнению с процессами изменения заряда ПС (которые, по-видимому, локализованы в диэлектрике), определяющими CU - и GU -характеристики. Максимальная плотность ПС, определенная из CU - и GU -характеристик и по частотной зависимости G/ω (ω — круговая частота тестирующего сигнала) [15], составляла $\sim 6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ для структур на основе GaAs и $\sim 7 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ для структур на основе Si.

Наблюдаемые при развертке по напряжению в прямом направлении скачкообразные особенности в IU -характеристиках, связанные с захватом неосновных носителей поверхностными состояниями, происходят после окончания (в основном) процесса релаксации неравновесного обеднения и образования инверсионного слоя на ГР ДП. Возникновение первого пика тока в конце процесса релаксации неравновесного

обеднения можно объяснить следующим образом. При увеличении концентрации дырок в инверсионном слое возрастает вероятность образования положительного заряда на ловушках в результате захвата ими свободных дырок. Такой захват не меняет общую концентрацию свободных и захваченных дырок на ГР ДП. Однако уменьшение концентрации свободных дырок в инверсионном слое приводит к нарушению квазистационарного равновесия в этом слое, которое соответствует равенству величин противоположно направленных электрического и диффузионного токов дырок. При восстановлении этого равновесия возникает диффузионный приток дырок в инверсионный слой, что можно связать с возрастанием тока в наблюдаемом пике. При достижении такого равновесия диффузионный приток дырок в инверсионный слой прекращается, что соответствует спаду тока в наблюдаемом пике. Увеличение общей концентрации дырок на ГР ДП при образовании положительного заряда на ловушках способствует перераспределению напряжения на структуре между напряжениями на диэлектрике и полупроводнике таким образом, что напряжение на диэлектрике увеличивается, а напряжение на полупроводнике уменьшается. Кроме того, чтобы произошел дополнительный захват дырок ПС, находящимися в диэлектрике с более высокой энергией или отстоящими дальше от ГР ДП, требуется дополнительное время, за которое напряжение на структуре увеличивается. Этим объясняется тот факт, что следующий пик тока на IU -характеристике находится на некотором расстоянии от предыдущего пика. При развертке по напряжению в обратном направлении вместо захвата дырок ПС происходит эмиссия дырок из ПС. Наличие значительных токов утечки через диэлектрик приводит к существенной рекомбинации инжектированных электронов в диэлектрик с захваченными ПС дырками, что не позволяет наблюдать скачкообразные особенности в IU -характеристиках.

Таким образом, измерение токовых характеристик структур МДП с неравновесным обеднением, сопровождаемым процессами захвата неосновных носителей ПС, обнаруживает особенности явления неравновесного обеднения, которые проявляются в скачкообразных изменениях тока при изменении напряжения. Полученные результаты могут быть использованы как для диагностики качества структур МДП с неравновесным обеднением, применяемых в приборах с переносом заряда и приборах с зарядовой связью, так и при создании новых микроэлектронных устройств, использующих обнаруженное явление. Возможность микроскопического объяснения обнаруженного явления,

основанная на выяснении роли процессов накопления дырок на ГР ДП, захвата их ловушками, перераспределения напряжений на полупроводнике и диэлектрике, подлежит отдельному изучению.

Авторы выражают благодарность Б.Н. Звонкову за проведение МОС-гидридной эпитаксии слоев InP/*n*-GaAs. Работа поддержана Министерством образования и науки РФ в рамках государственного задания № 2014/134 (код проекта 2591).

Список литературы

- [1] *Кравченко А.Ф.* Физические основы функциональной электроники: Учеб. пособие / Новосибирск: Изд-во Новосибирского ун-та, 2000. 444 с.
- [2] *Секен К.* Приборы с переносом заряда / К. Секен, М. Томпсет. М.: Мир, 1978. 327 с.
- [3] Приборы с зарядовой связью / Под ред. М. Хоуза, Д. Моргана. М.: Энергоатомиздат, 1991. 376 с.
- [4] *Wilk D., Wallace R.M., Anthony J.M.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 5243–5275.
- [5] *Kundu Souvik, Halder N. Nripendra, Biswas D.* et al. // J. Appl. Phys. 2012. V. 112. P. 034 514 (1–7).
- [6] *Аксенов М.С., Валишева Н.А., Левцова Т.А.* и др. // ФТП. 2014. Т. 48. В. 3. С. 322–326.
- [7] *McNeill D., Bhattacharya S., Wadsworth H.* et al. // J. Mater. Sci. 2008. V. 19. P. 119–123.
- [8] *Тихов С.В., Горшков О.Н.* и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 19. С. 18–26.
- [9] *Mickel P.R., Lohn A.J., Marinella M.J.* // Mod. Phys. Lett. B. 2014. V. 28. N 10. P. 1 430 003 (1–25).
- [10] *Тихов С.В., Горшков О.Н.* и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 23. С. 72–79.
- [11] *Горшков О.Н., Антонов И.Н.* и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 3. С. 12–19.
- [12] *Тихов С.В., Горшков О.Н.* и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 9. С. 9–16.
- [13] *Эпштейн С.Л.* Измерение характеристик конденсаторов. 2-е изд. Л.: Энергия, 1971. 218 с.
- [14] *Захаров А.К., Неизвестный И.Г., Овсяк В.Н.* // Свойства структур металл–диэлектрик–полупроводник / Под ред. А.В. Ржанова. М.: Наука, 1976. 47 с.
- [15] *Овсяк В.Н.* Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984. 252 с.