

07

Стимулированное светом резистивное переключение в структурах металл–диэлектрик–полупроводник на основе кремния

© 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 3 сентября 2015 г.

Стимулированное светом резистивное переключение изучено в МДП-структурах на основе Si, покрытого туннельно-тонким слоем SiO₂, на который осажден нанометровый слой Sb. В качестве диэлектрика в этих структурах использован диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия.

В настоящее время вопросы снижения плотности поверхностных состояний (ПС) в структурах металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) на границе раздела (ГР) диэлектрик–полупроводник (ДП) привлекают внимание в связи с изучением происходящих в них эффектов резистивного переключения и памяти [1], о важности изучения которых свидетельствует включение таких исследований в Международный план по развитию полупроводниковой технологии (англ.: International Technology Roadmap for Semiconductors) [2]. Изучение влияния света на эффект резистивного переключения является одним из перспективных направлений [3] в связи с возможностью создания элементов резистивной памяти, переключение которых будет контролироваться воздействием света. В данной работе обсуждается обнаруженное в МДП-структурах на основе Si резистивное переключение, стимулированное светом. В качестве диэлектрика в этих структурах использован один из high-k-диэлектриков [4] — диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия (YSZ).

В качестве подложек использовались монокристаллические пластины n -Si (КЭФ-4.5) с кристаллографической ориентацией (100), покрытые химическим методом (последовательной обработкой поверхности Si вначале в плавиковой кислоте, а затем — в смеси серной кислоты с перекисью водорода) туннельно-тонким слоем SiO_2 , на который осаждался слой Sb толщиной ~ 2 nm МОС-гидридным методом, используя эпитаксию триметилсурьмы в атмосфере водорода при температуре 450°C . На эту подложку осаждался слой YSZ (12 mol.% Y_2O_3) толщиной 40 nm методом ВЧ-магнетронного распыления при температуре 300°C на установке 2g1-1g2-eb4-th1 Torr International. Полученные таким образом структуры кратковременно (2 min) отжигались в атмосфере аргона при температуре 450°C . Описанное поверхностное легирование сурьмой ставило своей целью управление плотностью ПС [5]. Известно также, что такое легирование может привести к созданию концентраторов электрического поля [6] с целью возможного образования проводящих шнуров (англ.: filaments). Были изготовлены контрольные структуры, нелегированные сурьмой. После отжига на поверхность слоя диэлектрика осаждались полупрозрачные для освещения верхние электроды из Au площадью $S = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ и толщиной 20 nm (с подслоем из Zr толщиной 3 nm для улучшения адгезии) методом магнетронного распыления на постоянном токе. Подобные пленки YSZ использовались ранее в МДП-структурах [1,7] и в структурах металл–диэлектрик–металл (МДМ) [8,9], в том числе в структурах, проявляющих эффекты резистивного переключения и памяти [1,8]. Свойства проявляющих резистивное переключение МДМ-структур на основе SiO_x , созданных подобным же образом, изучены в работе [10]. Специфика изучаемых в данной работе структур состоит в том, что приготовленные описанным выше способом подложки позволяли получать МДП-структуры с низкой концентрацией ПС на ГР ДП.

Измерялись вольт-амперные (IU) характеристики, а также зависимости от напряжения U дифференциальной емкости $C_{p(s)}$ ($C_{p(s)}U$ характеристики) и проводимости $G_{p(s)}$ ($G_{p(s)}U$ -характеристики) структур в параллельной (индекс p) и последовательной (индекс s) эквивалентных схемах замещения конденсатора [11] в интервале частот $f = 10^3 - 10^6$ Hz при скорости развертки по напряжению $u = 0.18$ V/s в автоматическом режиме на анализаторе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A. Напряжение на структуре соответствовало потенциалу верхнего электрода относительно потенциала базового

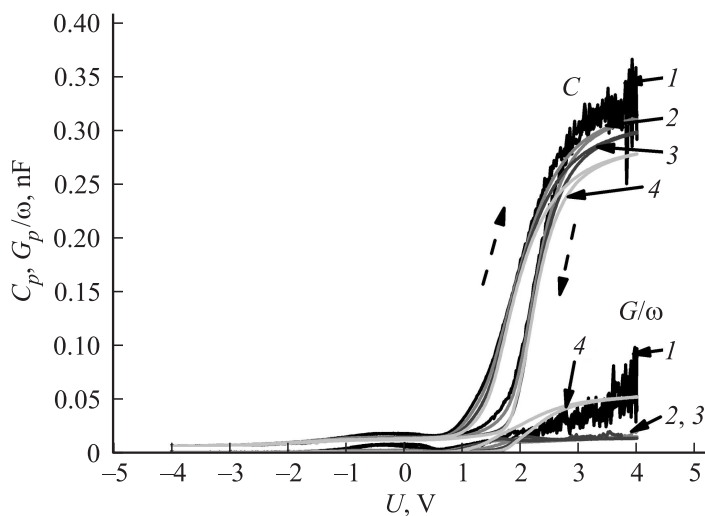


Рис. 1. Зависимости C_p и G_p/ω от U структуры Au/Zr/YSZ/Sb/SiO₂/n-Si. Частота f , кГц: 1 (1), 10 (2), 100 (3), 1000 (4). Пунктирными стрелками показано направление развертки по напряжению.

электрода. Измерения проводились при комнатной температуре в воздушной атмосфере.

На рис. 1 приведены зависимости C_p и приведенной к круговой частоте ω проводимости G_p/ω от U , измеренные при разных частотах. Из этих зависимостей следует, что, во-первых, практически отсутствует частотная дисперсия емкости в области ее максимальной модуляции и, во-вторых, отсутствуют максимумы в зависимостях G_p/ω от U . Оба этих факта свидетельствуют о низкой плотности ПС на ГР ДП, проявляющих себя в диапазоне частот 1–1000 кГц („быстрые“ ПС). Плотность этих состояний, оцененная по феноменологической теории приведенной к круговой частоте проводимости G_p/ω [12], оказалась ниже $10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$. В нелегированных сурьмой МДП-структурах значения этих ПС составляли $\sim 5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$. Небольшой спад максимальной емкости с увеличением частоты определяется частотной дисперсией емкости диэлектрика и значением времени релаксации $\tau = R_s C_s$ цепочки, состоящей из последовательного сопротивления

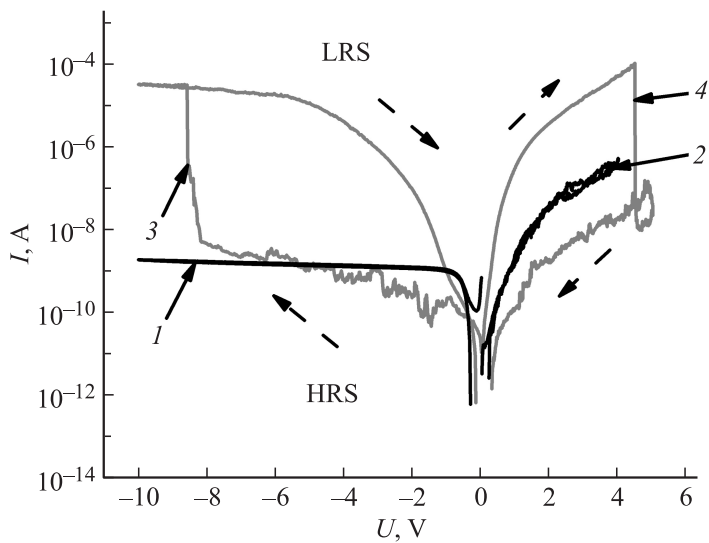


Рис. 2. IU -характеристики структуры Au/Zr/YSZ/Sb/SiO₂/n-Si, полученные в темноте (кривые 1, 2) и на свету (кривые 3, 4). Пунктирными стрелками показано направление развертки по напряжению.

$R_s = 1/G_s$ и емкости C_s (равной в рассматриваемом случае C_p). Гистерезис $C_p U$ -характеристик может быть объяснен захватом носителей заряда на состояния в диэлектрике с высоким значением времени релаксации. Сдвиг этих кривых относительно нулевого напряжения соответствует напряжению плоских зон $U_{FB} \approx +2V$ и может быть объяснен наличием отрицательного встроенного заряда в диэлектрике. Плотность этого заряда соответствует поверхностной концентрации $3.1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$.

IU -характеристики одной из структур, свидетельствующие об управляемом светом резистивном переключении в исследованных структурах, приведены на рис. 2. IU -характеристики исходных структур не имели тенденции к возникновению резистивного переключения (рис. 2, кривые 1, 2). Это объясняется тем, что частичное падение напряжения на области пространственного заряда (ОПЗ) полупроводника не позволяло достичь величины напряжения на диэлектрике, достаточной для

возникновения резистивного переключения. Однако структуры проявляли резистивное переключение (рис. 2, кривые 3, 4) при освещении, которое осуществлялось несфокусированным светом от галогенной лампы мощностью 50 W. Это обусловлено тем, что такое освещение уменьшало сопротивление ОПЗ полупроводника и увеличивало падение напряжения на диэлектрике, что приводило к образованию проводящих шнуров в диэлектрике. Величины отношения сопротивлений структуры в состоянии с высоким сопротивлением (СВС) и состоянии с низким сопротивлением (СНС) могут составлять несколько порядков. Резистивное переключение исчезало при выключении лампы.

Чтобы исследовать процессы, происходящие при резистивном переключении вблизи ГР ДП, измерялись в зависимости от напряжения C_p и G_p/ω для структуры в СНС и СВС на частотах 1 kHz (рис. 3, *a*) и 1 MHz (рис. 3, *b*). Гистерезис зависимостей на рис. 3 обусловлен изменениями встроенного заряда в диэлектрике, происходящими при перезарядке в нем ловушек. Переключение из СНС в СВС и обратно вызывает изменение плотности встроенного заряда в диэлектрике, соответствующей поверхностной концентрации состояний $3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. На ГР ДП возникают „быстрые“ ПС: появляются частотная дисперсия емкости и пики в зависимости G/ω от U . Значения плотности „быстрых“ ПС, оцененные по пикам проводимости для непрерывного распределения ПС, составляют $1.5 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ для электронных и $3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{eV}^{-1}$ для дырочных ловушек. Воздействие на структуру отрицательного переключающего напряжения приводит к возникновению инверсии на ГР ДП и появлению соответствующих особенностей на низкочастотной (1 kHz) $C_p U$ -характеристике (рис. 3, *a*, кривая 1), которые характеризуют происходящее при этом увеличение времени жизни дырок. Следует отметить, что представленные данные свидетельствуют о синхронном резистивном переключении диэлектрика и полупроводниковом переключении емкости в МДП-структуре при сохранении в ней малых диэлектрических потерь, что расширяет функциональные возможности создания различных устройств, использующих названные типы памяти.

Таким образом, изучены МДП-структуры на основе кремния, покрытого туннельно-тонким слоем SiO_2 , на который осаждался нанометровый слой Sb, причем в качестве диэлектрика использован диоксид циркония, стабилизированный оксидом иттрия. Показано, что эти структуры проявляют стимулированное светом резистивное переключение.

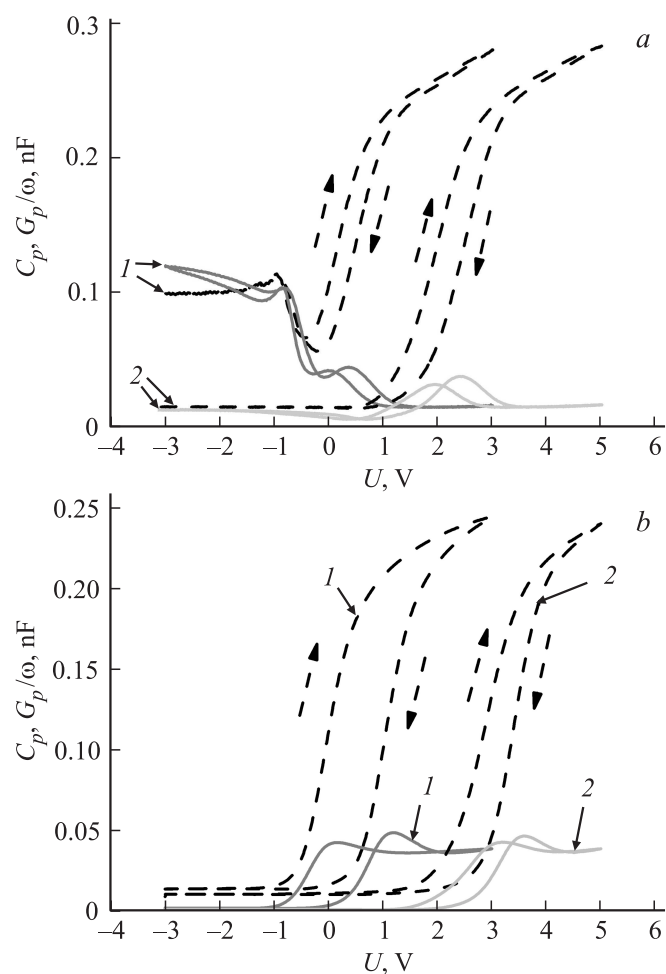


Рис. 3. Зависимости C_p (штриховая линия) и G_p/ω (сплошная линия) от U структуры Au/Zr/YSZ/Sb/SiO₂/n-Si в ЧНС (1) и СВС (2). Частота f равна 1 kHz (a) и 1 MHz (b). Пунктирными стрелками показано направление развертки по напряжению.

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

Список литературы

- [1] Тихов С.В., Горшков О.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 19. С. 18–26.
- [2] Mickel P.R., Lohn A.J., Marinella M. J. // Mod. Phys. Lett. B. 2014. V. 28. N 10. P. 1 430 003(1–25).
- [3] Chang K.-M., Tzeng W.-H., Liu K.-C. et al. / Microelectronics Reliability. 2010. V. 50. P. 1931–1934.
- [4] Wilk G.D., Wallace R.M., Anthony J.M. // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. P. 5243–5275.
- [5] Примаченко В.Е. Физика легирования металлами поверхности полупроводников / В.Е. Примаченко, О.В. Снитко. Киев: Наук. думка, 1988. 231 с.
- [6] Гриценко В.А. Резистивный флэш элемент памяти: Патент RU 251677 С1. Оpubл. 20.05.14. Бюл. № 14.
- [7] Тихов С.В., Горшков О.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 23. С. 72–79.
- [8] Горшков О.Н., Антонов И.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 3. С. 12–19.
- [9] Тихов С.В., Горшков О.Н. и др. // Письма в ЖТФ. 2014. Т. 40. В. 9. С. 9–16.
- [10] Mikhaylov A.N., Belov A.I. et al. // Mater. Sci. Engin. B. 2015. V. 195. С. 48–54.
- [11] Эпштейн С.Л. Измерение характеристик конденсаторов. 2-е изд. Л.: Энергия, 1971. 218 с.
- [12] Овсюк В.Н. Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984. 252 с.