

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 538.935

О ВЛИЯНИИ ИОННОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ТРАНЗИСТОРНЫХ Si-СТРУКТУР НА ПРОВОДИМОСТЬ КАНАЛОВ ИНВЕРСИИ *p*-ТИПА

© 2019 г. Е. И. Гольдман¹, В. Г. Нарышкина¹, Г. В. Чучева¹. *

¹Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Российская Федерация, 141190 Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

*E-mail: gvc@ms.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 20.11.2018 г.

После доработки 20.11.2018 г.

Принята к публикации 15.02.2019 г.

В диапазоне значений индукции поперечного магнитного поля 0...4.5 Тл при температурах 100...200 К проведены измерения проводимости канала инверсии *p*-типа транзисторных Si-структур после ионной поляризации и деполяризации образцов. Найдено, что в процессе поляризации при температуре 420 К под действием сильного электрического поля в окисле перетекало порядка 6.5×10^{11} см⁻² ионов. Обнаружено, что до порога открытия канала проводимость в цепи исток-сток реализуется за счет термоактивации носителей заряда на уровень протекания в неупорядоченном потенциале, созданном хаотическим распределением ионов вдоль поверхности полупроводника. Показано, что после открытия канала (пересечения уровня Ферми дырок на поверхности полупроводника с уровнем протекания в хаотическом потенциале) ионы проявляются в проводимости как дополнительные рассеивающие центры и, поэтому, в поляризованном состоянии эффективная подвижность канала меньше, чем в деполяризованном.

DOI: 10.1134/S0033849419100048

Модификация электронных свойств границ раздела (ГР) в структурах металл–диэлектрик–полупроводник после ионной поляризации изолирующего слоя – это известная особенность кремниевых планарных транзисторов. В результате поляризации возникают сдвиги пороговых напряжений открытия каналов инверсии за счет накопления встроенного заряда [1], изменения зонной структуры проводящих путей из-за образования высокой концентрации примесных локализованных состояний у ГР полупроводник–диэлектрик [2, 3]. При планарно-неоднородной поляризации открываются возможности создания регулярного распределения локализованного заряда с двумерным потенциальным рельефом, формирующим у поверхности полупроводника различные квантово-размерные наномасштабные области [4, 5]. Было обнаружено [6, 7], что ионная поляризация транзисторных структур металл–окисел–полупроводник (МОП) приводит к увеличению в разы эффективной подвижности электронов в канале инверсии у ГР Si–SiO₂. Это явление для каналов *n*-типа было объяснено образованием нового пути электропереноса по поверхностной примесной зоне, связанной с делокализованными *D*⁻ состояниями, которые генерируются нейтрализованными ионами, расположенными в изолирующем слое у ГР с полупроводником [8].

Поскольку положительно заряженные ионы не могут образовывать с дырками связанных состояний, то поляризация окисла, контактирующего с каналом инверсии *p*-типа, должна давать другую, по сравнению с [8], картину изменения проводящих свойств. Цель данной работы – экспериментально исследовать этот вопрос.

Опыты проводили аналогично исследованиям работы [8] с помощью компьютеризованной установки [9] на Si-МОП-транзисторах с дырочным каналом инверсии, с толщиной термического подзатворного окисла $h = 1000$ Å, шириной электродов исток-сток $W = 1$ мкм и расстоянием между ними $L = 10$ мкм. Объекты формировали по стандартной кремниевой технологии. Измерения вольт-амперных характеристик проводили на пилообразных импульсах от генератора фирмы Agilent 3322A со скоростью полевой развертки $\beta = 0.32$ В/с при амплитуде напряжения на затворе $|V_g| = 10$ В и постоянном смещении на стоке $V_d = -0.01$ В. Так же, как и в работе [8], поляризацию и деполяризацию окисла осуществляли при напряжениях на полевом электроде $V_g = 10$ и -10 В соответственно и на стоке $V_d = -0.01$ В в течение одного часа при температуре 420 К.

После полевых и температурных воздействий образец помещали в криомагнитную безжидкост-

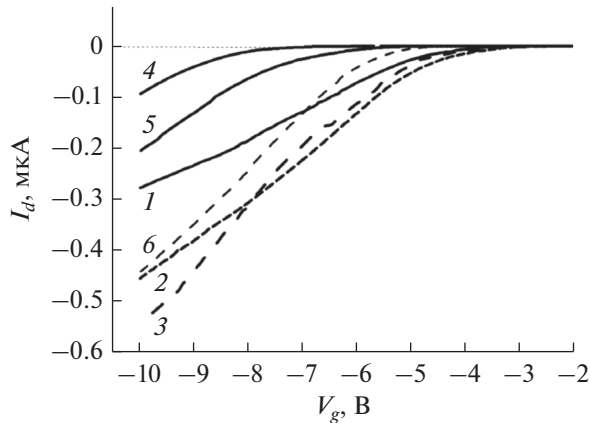


Рис. 1. Зависимость тока I_d в канале инверсии Si-MОП транзистора от потенциала затвора V_g после деполяризации (кривые 1–3) и поляризации (кривые 4–6) при различных температурах: 200 К (1, 4), 150 К (2, 5), 100 К (3, 6); напряжение на стоке $V_d = -0.01$ В.

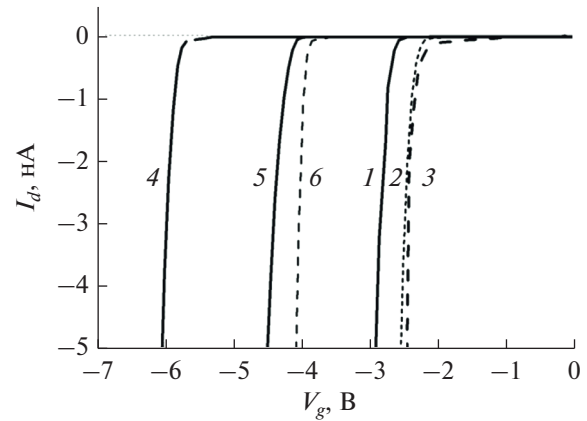


Рис. 2. Фрагмент кривых 1–6, показанных на рис. 1, отвечающий области открытия канала.

ную систему, позволяющую измерять токи и напряжения в диапазоне температур от 6 до 300 К и в магнитных полях до 8 Тл [10]. Чтобы избежать дрейфа ионов в сильных электрических полях, проводимость канала инверсии измеряли при температурах не выше 200 К; при этом их значения контролировались терморегулятором Lakeshore 335 с точностью 0.01 град.

На рис. 1 представлены зависимости токов в канале инверсии I_d от напряжения затвора V_g после поляризации и деполяризации при различных температурах. Как и в ранее выполненных работах [6–8], для наблюдения за влиянием всех воздействий на проводимость инверсионного канала была использована эффективная подвижность свободных носителей заряда

$$\mu = (1/C_i) d\sigma/dV_g, \quad (1)$$

определяемая на квазилинейном участке соответствующей характеристики $I_d(V_g)$ (см. рис. 1), где $\sigma = (I_d L/W |V_d|)$ – омическая проводимость канала, I_d – ток в цепи исток–сток, C_i – емкость подзатворного изолирующего слоя окисла кремния.

В отличие от транзисторов с каналами n -типа в наших условиях после поляризации ток I_d по модулю при одинаковых значениях полевого напряжения V_g резко (в разы) меньше, чем после деполяризации, а величина μ не увеличивается, а наоборот, существенно уменьшается (см. ниже). Переход из деполяризованного в поляризованное состояние существенно сдвигает порог открытия канала. Данная область токов I_d показана на рис. 2. Смещение порогового напряжения уменьшается с понижением температуры от 3 В при 200 К до 1.5 В при 100 К. Эти цифры соответствуют увеличению

концентрации положительного встроенного заряда у ГР Si–SiO₂ после поляризации из деполяризованного состояния на 6.5×10^{11} см⁻² (200 К) и 3.2×10^{11} см⁻² (100 К). По-видимому, такая заметная разница значений концентраций локализованных у ГР Si–SiO₂ зарядов обусловлена не стационарностью процесса открытия канала при низких температурах: изначально при $V_g \approx 0$ ионы в достаточной мере нейтрализованы [11–13], а рекомбинация захваченных на них электронов, по крайней мере, в областях сгустков примесных частиц, запаздывает по отношению к развертке полевого напряжения $dV_g/dt = -0.32$ В/с. Данному предположению отвечает и заметно более широкий участок нелинейной зависимости $I_d(V_g)$ в поляризованном состоянии после открытия канала при 100 К (см. рис. 1, кривая б). Как и в работе [8], исследованные образцы имели высокие токи утечки в цепи затвор-подложка, что не позволило непосредственно определить концентрации перетекших ионов как интеграл тока в этой цепи по времени. Поэтому, несмотря на известные ограничения точности такого подхода (см. [3]), будем опираться на данные по сдвигу напряжения открытия канала при 200 К и считать результатом поляризации накопление у ГР Si–SiO₂ 6.5×10^{11} ионов на 1 см² данного контакта.

На рис. 3 представлены температурные зависимости эффективной подвижности дырок μ в поляризованном и деполяризованном состояниях. После поляризации величина μ заметно меньше, чем после деполяризации, для температуры 200 К соотношение 395 см²/(В·с) по сравнению с 800 см²/(В·с). При охлаждении подвижность растет в поляризованном состоянии по закону $\mu \propto T^{-1.6}$ и при 100 К достигает 1270 см²/(В·с); в деполяризованном состоянии – $\mu \propto T^{-0.9}$ и 1560 см²/(В·с) со-

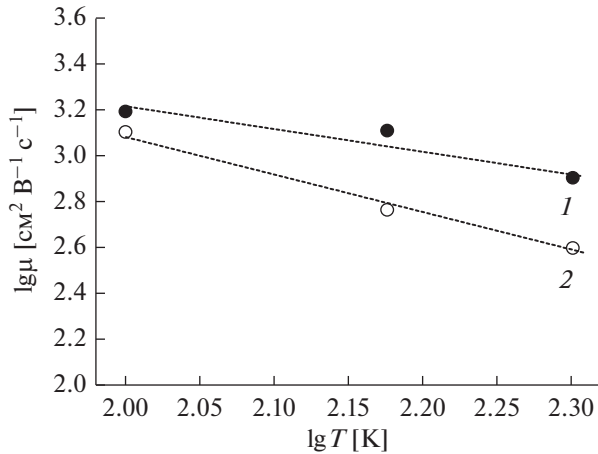


Рис. 3. Температурные зависимости эффективной подвижности дырок $\mu(T)$ в канале инверсии МОП-транзистора в двойном логарифмическом масштабе после деполяризации (1) и поляризации (2).

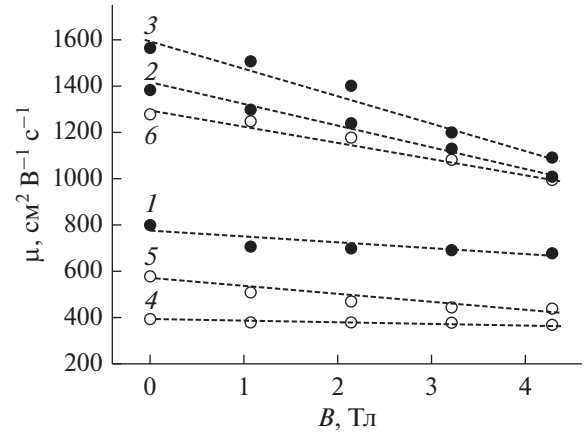


Рис. 4. Зависимость эффективной подвижности дырок μ в канале инверсии МОП-транзистора от магнитного поля B при температурах 200 (1, 4), 150 (2, 5) и 100 К (3, 6) после деполяризации (1–3) и после поляризации (4–6).

ответственно. Такое поведение эффективной подвижности в канале инверсии свойственно смеси двух механизмов рассеяния свободных носителей заряда — на акустических фононах и на заряженных примесях и ловушках [14]. Вывод о реализации электропереноса свободными дырками согласуется и с условием определения величины μ — в области полевых напряжений вдали от порога открытия канала.

На рис. 4 показаны зависимости эффективной подвижности в канале инверсии транзистора от магнитного поля в диапазоне 0...4.5 Тл. И в деполяризованном, и в поляризованном состояниях эти зависимости относительно слабые: при 200 и 150 К с ростом магнитного поля эффективная подвижность уменьшается на 6...20%, а при 100 К — на 20...30%. Магнитное поле практически не изменяет порог открытия канала инверсии. Такое поведение поверхностной проводимости характерно для гальваномангнитных явлений в невырожденных газах свободных носителей заряда в случае относительно слабых, не квантующих магнитных полей [15]. Этот вывод подтверждается и конкретными экспериментальными данными: в магнитном поле $B = 4.5$ Тл диаметр основной циклотронной орбиты равен 12 нм, что больше длины свободного пробега дырок в Si, а значение параметра $\mu \times B$ составляет 0.36 (200 К), 0.62 (150 К), 0.7 (100 К).

Таким образом, после ионной поляризации изолирующих слоев p -канальных Si-МОП транзисторов у ГР Si—SiO₂ накапливается дополнительный положительный встроенный заряд с концентрацией 6.5×10^{11} см⁻². При небольших полевых напряжениях до открытия канала инверсии проводимость в цепи исток-сток реализуется за счет термоактивации носителей заряда на уро-

вень протекания в неупорядоченном потенциале, связанным с хаотическим распределением ионов вдоль ГР [16]. Канал открывается при пересечении уровня Ферми дырок на поверхности полупроводника с уровнем протекания в хаотическом потенциале. При достаточно больших напряжениях V_g поверхностные неоднородности встроенного заряда в значительной мере экранированы свободными дырками, а присутствие ионов проявляется в виде дополнительных рассеивающих центров. Поэтому и реальная подвижность свободных носителей заряда, и эффективная подвижность в канале инверсии транзистора после поляризации существенно меньше, чем после деполяризации. Отметим, что поляризованное состояние окисла достаточно устойчиво и длительно (более месяца) сохраняется при температурах ниже 250 К даже после подачи на полевой электрод деполяризующих напряжений. Это обстоятельство может быть использовано при разработке и создании элементной базы устройств записи и стирания информации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-07-00666) и Президиума РАН (программа фундаментальных исследований № 32 “Наноструктуры: физика, химия, биология, основы технологий”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nicollian E.H., Brews I.R. MOS (Metal Oxide Semiconductor) Physics and Technology. N. Y.: John Willey & Sons, 1982.

2. *Hartstein A., Fowler A.B.* // Phys. Rev. (Lett.). 1975. V. 34. P. 1435.
3. *Андо Т., Фаулер А., Стерн Ф.* Электронные свойства двумерных систем. М.: Мир, 1985. Параграф 3. Глава 5. С. 186.
4. *Гольдман Е.И., Ждан А.Г.* // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 29. № 1. С. 38.
5. *Гольдман Е.И., Гуляев Ю.В., Ждан А.Г., Чучева Г.В.* // Микроэлектроника. 2001. Т. 30. № 5. С. 364.
6. *Гуляев Ю.В., Ждан А.Г., Чучева Г.В.* // ФТП. 2007. Т. 41. № 3. С. 368.
7. *Ждан А.Г., Нарышкина В.Г., Чучева Г.В.* // ФТП. 2009. Т. 43. № 5. С. 705.
8. *Гольдман Е.И., Набиев А., Нарышкина В.Г., Чучева Г.В.* // ФТП. 2019. Т. 53. № 1. С. 89.
9. *Гольдман Е.И., Ждан А.Г., Чучева Г.В.* // ПТЭ. 1997. № 6. С. 110.
10. Криомагнитная безжидкостная система с индукцией 8 Тл. М.: РТИ, технологии, приборы, материалы, 2012.
11. *Hino T., Yamashita K.* // J. Appl. Phys. 1979. V. 50. № 7. P. 4879.
12. *Di Maria D.J.* // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. № 12. P. 7251.
13. *Goldman E.I., Zhdan A.G., Chucheva G.V.* // J. Appl. Phys. 2001. V. 89. № 1. P. 130.
14. *Добровольский В.Н., Литовченко В.Г.* Перенос электронов и дырок у поверхности полупроводников. Киев: Наукова думка, 1985.
15. *Ансельм А.И.* Введение в теорию полупроводников. М.: Наука, 1978. С. 513.
16. *Гергель В.А., Сурис Р.А.* // Письма в ЖЭТФ. 1978. Т. 75. № 1. С. 191.