

Si МДП ФОТОДЕТЕКТОР КАК ДЕТЕКТОР ВОДОРОДА

Г.Г.Ковалевская, М.М.Мередов, Е.В.Руссу, Х.М.Салихов,
С.В.Слободчиков

Разработка, исследование и использование полупроводниковых диодных структур для детектирования и измерения концентрации водорода и водородосодержащих газов имеют большое значение для решения ряда экологических проблем, техники безопасности, совершенствования технологии в промышленности и т.д. В опубликованных ранее работах изложены результаты экспериментов по влиянию водорода и водородосодержащих газов на электрические свойства диодных структур — вольт-амперную и вольт-емкостную характеристики, пороговое напряжение транзистора [1-5]. Новый способ детектирования и измерения этих газов по изменению фотоэдс был предложен и опубликован в [6,7]. В настоящей работе представлены данные по исследованию влияния водорода на электрические и фотоэлектрические характеристики фоточувствительных МДП структур Pd-SiO₂-*p*(*n*)-Si.

Для создания МДП структур были использованы кристаллы *n*-Si с $\rho = 7.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и ориентацией (111) и *p*-Si с $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ориентации (100). Перед нанесением слоев SiO₂ и Pd пластины химически очищались, травились в HF, промывались и высушивались.

Слои SiO₂ создавались выдержкой на воздухе пластин в течение нескольких недель при комнатной температуре; толщина слоев составляла 22-26 Å. Палладий наносился напылением в вакууме 10⁻⁵ Тор и толщина его слоев была 400-500 Å.

На рис. 1 даны типичные вольт-амперные зависимости (ВАХ) двух МДП фотодетекторов, созданных соответственно на *n*- и *p*-кремнии. Механизм токопрохождения Si МДП структур рассматривался ранее [8,9]. Применительно к нашим структурам наблюдается определенное сходство вида ВАХ с кривыми, рассчитанными для неравновесного случая с высоким значением работы выхода металла [9]. Отметим некоторые особенности ВАХ. Экспоненциальная зависимость

$$J \sim \exp \frac{gV}{mkT}$$

с высокими значениями *m* наблюдается в интервале напряжений 0.4-1.0 В. Измерения ВАХ при 120 К (рис. 1, кривая 5) показали, что в этом же интервале напряжений наблюдается наименьшая зависимость прямого тока (плюс на Si) от температуры. Эти данные свидетельствуют о преобладающем туннельном токопрохождении. При более низких напряжениях прямой ток более чем на два порядка величины ниже при 120 К. Это позволяет утверждать, что в этом интервале смещений существенный вклад вносят другие механизмы токопрохождения и прежде всего генерационно-рекомбинационный ток области истощения. Полный ток

$$I = I_{g-r} + I_{tun} \quad (1)$$

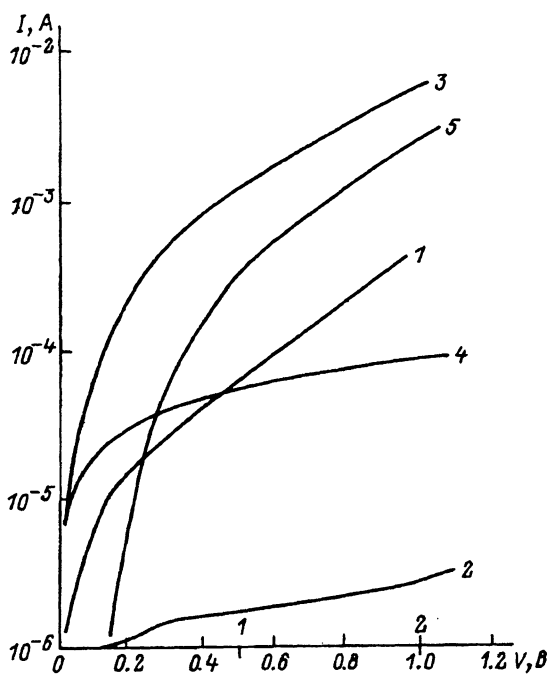


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики Si МДП фотодетекторов.

1, 2 — прямая и обратная ветви Pd-SiO₂-n-Si структуры (T = 295 K);
3, 4 — прямая и обратная ветви Pd-SiO₂-p-Si структуры (T = 295 K);
5 — прямая ветвь при T = 120 K (нижняя шкала по оси абсцисс).

и общее дифференциальное сопротивление

$$(RA)^{-1} = (RA)_{g-r}^{-1} + (RA)_{tun}^{-1}, \quad (2)$$

где A — площадь структуры.

Характеристику электрических параметров диодных МДП структур дополняют вольт-емкостные зависимости $C^{-2} = f(V)$ (рис. 2). Из них определены высоты барьеров 0.6 (для Pd-SiO₂-n-Si) и 0.9 эВ (для Pd-SiO₂-p-Si).

Исследование влияния водорода на спектральную фотоэдс, вольт-амперные и вольт-емкостные характеристики проведено при импульсном воздействии газа. На рис. 3 представлены соответствующие кривые фотоэдс для обоих видов структур без H₂ и с H₂. Фотоэдс для них изменяется в противоположных направлениях: для n-Si МДП фотодетекторов резкое, почти на три порядка, падение; для p-Si МДП структур, наоборот, увеличение более чем на два порядка. Такое изменение характерно для всех длин волн из области собственного поглощения, лишь на краю поглощения амплитуда изменений уменьшается. На рис. 3 (вставка вверху) показана кривая нарастания и спада импульса фотоэдс для p-Si МДП-фотодетектора под действием H₂. Нарастание практически безинерционно — 1–2 с. Спад двухступенчатый: первая ступень составляет по времени 20–30 с, вторая может растягиваться на 1.5–2 мин. Аналогичные изменения, но с обратными амплитудами наблюдаются в n-Si МДП структурах. На рис. 4 приведены прямые и обратные ветви ВАХ для обоих видов МДП структур при импульсном воздействии водорода и без H₂. В структурах p-Si МДП наблюдается уменьшение прямого тока под действием H₂ меньше, чем на порядок (кривые 1, 2), а обратного больше,

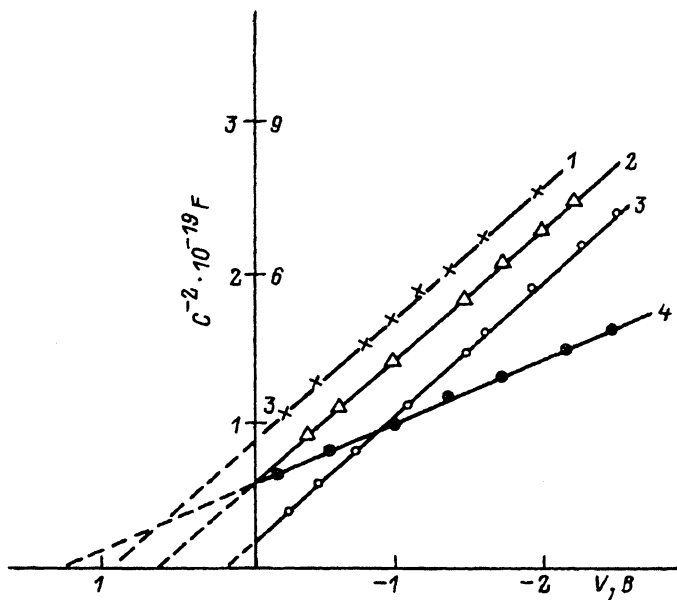


Рис. 2. Вольт-емкостные характеристики Si МДП фотодетекторов. 1, 4 — Pd-SiO₂-p-Si (правая шкала по оси ординат); 2, 3 — Pd-SiO₂-n-Si; 1, 2 — без Н₂; 3, 4 — с Н₂.

чем на порядок (кривые 3, 4). В n-Si МДП структурах наблюдается рост этих токовых компонент: на 10–30% прямого и на 100–200% обратного (кривые 5–8). Емкость всех диодных структур изменяется под действием Н₂ не очень значительно — на 10–100% (рис. 2).

Рассмотрим возможные причины изменения фотоэдс в атмосфере водорода в обоих типах fotocувствительных структур.

Фотоэдс в режиме разомкнутой цепи МДП структуры на основе p-полупроводника можно написать [10]

$$V_{xx} = \left(1 + \frac{\delta \varepsilon_s}{W \varepsilon_i}\right) \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{J_{sc}}{J_{p0}} \exp(b_p \chi_p^{1/2} \delta) + 1 \right] + \frac{\delta}{\varepsilon_1} q D_s (f_s - f_{s0}), \quad (3)$$

где δ — толщина слоя SiO₂, ε_s и ε_i — диэлектрические постоянные Si и SiO₂ соответственно, J_{sc} и J_{p0} — ток короткого замыкания и темновой ток насыщения соответственно, b_p — постоянная туннелирования, χ_p — высота барьера Si-SiO₂, D_s — плотность поверхностных состояний, f_s и f_{s0} — вероятности их заполнения при токопрохождении и в равновесии.

Из этого выражения следует, что основными факторами, влияющими на величину V_{xx} , являются высота барьера Шоттки φ_B (через экспоненциальную зависимость J_{p0} от φ_B), коэффициент прозрачности $b_p \chi_p^{1/2} \delta$, ток короткого замыкания J_{sc} и плотность поверхностных зарядов. Экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что определяющий вклад в изменение V_{xx} в атмосфере Н₂ вносит изменение φ_B . Из рис. 2 следует, что увеличение φ_B в p-Si МДП структурах составляет ≈ 0.35 эВ, так как напряжение отсечки (прямая 4) равно ≈ 1.25 эВ. Снижение же φ_B в n-Si МДП фотодетекторах в аналогичных условиях составляет ≈ 0.45 эВ, так

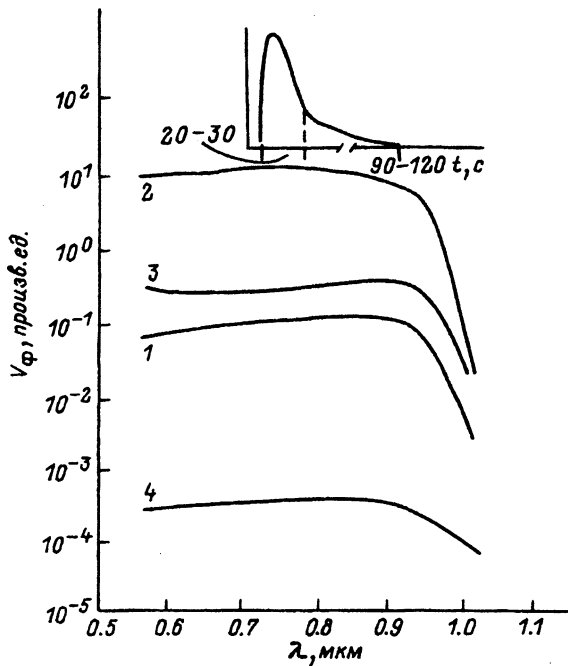


Рис. 3. Спектральная фотоэдс Si МДП фотодетекторов.

1, 2 — Pd-SiO₂-p-Si;
 3, 4 — Pd-SiO₂-n-Si;
 1, 3 — без H₂; 2, 4 — с H₂.
 Вставка сверху — кинетика нарастания и спада фотоэдс под действием импульса H₂.

как высота барьера в атмосфере водорода падает до ≈ 0.15 эВ (прямая 3). Очевидно, что изменение

$$J_{p0} = C_1 \exp\left(-\frac{\varphi_B}{kT}\right)$$

(или J_{n0} для n-Si МДП структур) при $T = 295$ К может достигать многих порядков.

Коэффициент прозрачности $b_p \chi_p^{1/2} \delta$ не дает увеличения фотоэдс и, возможно, даже снижает ее из-за предположительного снижения χ_{RH_2} — высоты барьера SiO₂-Si в атмосфере H₂. Плотность поверхностных состояний D_s даже при величине $\approx 10^{13}$ см⁻² несущественно изменяет V_{xx} .

Полученные результаты по изменению φ_B могут быть объяснены введенными в [11] представлениями об образовании дипольного слоя на границе Pd-SiO₂ заряженными атомами водорода. Предполагается, что положительный заряд диполя обращен в сторону SiO₂. Благодаря такому изменению зарядового состояния системы Pb-SiO₂-Si происходит рост высоты барьера φ_B в p-Si МДП структурах и, наоборот, падение его в n-Si МДП.

Особенности релаксации импульсной фотоэдс (рис. 3), на наш взгляд, связаны с образованием глубоких ловушек неравновесных фотоносителей в Si. В [12] отмечалось образование ловушек глубиной в 0.16 и ~ 0.5 эВ ниже дна зоны проводимости в атмосфере H₂. Эти ловушки распределены неравномерно и большая часть их расположена ближе к поверхности Si. Как видно из рис. 2, наклон прямой 4 почти в два раза меньше, чем прямой 1 (без H₂), и поскольку наклоном определяется концентрация ионизованных центров $2/(q\epsilon_s(N_a + N_t))$, то можно предположить, что плотность

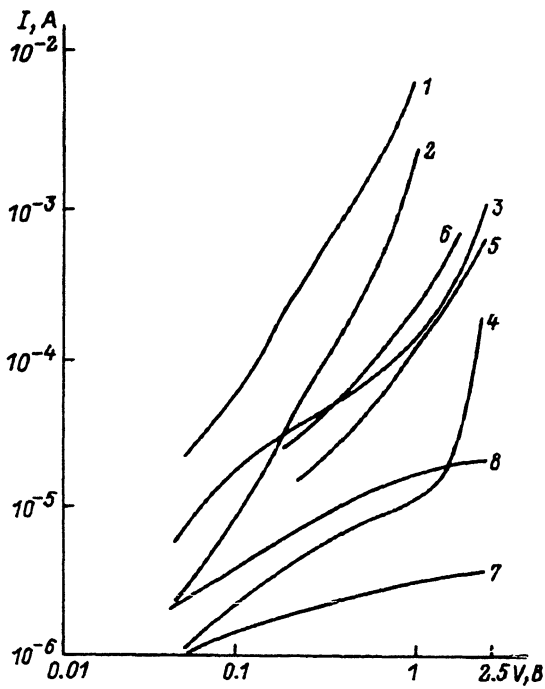


Рис. 4. Изменение прямого и обратного тока ВАХ Si МДП фотодетекторов под влиянием водорода.

1-4 — Pd-SiO₂-p-Si;
 5-8 — Pd-SiO₂-n-Si;
 1, 3, 5, 7 — без H₂; 2, 4, 6, 8 — с H₂.

ловушек N_t , создаваемых H₂, имеет порядок величины 10^{15} см^{-3} . Наличие этих центров захвата изменяет рекомбинационные процессы в слое истощения, т.е. изменяет время жизни электронов τ_n и диффузионную длину L_n . Если L_n возрастает, то ток короткого замыкания $J_{sc} \sim J_{sc0}$, т.е. ток при $\delta = 0$, будет расти из-за снижения темпа рекомбинации. Существенным при токопрохождении неравновесных неосновных носителей тока электронов в p-Si МДП фотодетекторах является то, что благодаря дипольному слою усиливается тянущее электрическое поле; это эквивалентно для них снижению барьера Si-SiO₂. Противоположный эффект можно отметить для фотодырок в n-Si МДП диодах.

Из рис. 3 и 4 видно, что при одинаковых импульсных воздействиях водорода изменение фотоэдс превосходит почти на два порядка изменение темнового тока. Эта более высокая чувствительность практически связана с тем, что, помимо роста J_{sc} , измеряемая фотоэдс $V_\phi \approx J_{sc} R_0$ через дифференциальное сопротивление в нуле смещения R_0 непосредственно зависит от изменения высоты барьера Шоттки φ_B . Темновые токи ВАХ определяются вкладом двух компонент, согласно (2) и при преобладании туннельной компоненты изменение тока менее чувствительно к изменению φ_B .

Таким образом, оба типа МДП структур могут быть использованы для измерения концентрации водорода и водородосодержащих газов более чувствительным фотоэлектрическим методом. Оценки показывают, что могут измеряться очень малые концентрации, а именно $< 0.01 \text{ ppm H}_2$.

- [1] *Yamamoto N., Tonomura S., Matsuoka T., Tsubamura H.* // J. Appl. Phys. 1981. Vol. 52. N 10. P. 6227–6230.
- [2] *Yousuf M., Kuliev B., Lalevic B., Poteat T.L.* // Sol. St. Electr. 1982. Vol. 25. N 8. P. 753–758.
- [3] *Fogelberg J., Lundström I., Petersson L.* // Phys. Scripta. 1987. Vol. 35. P. 702–705.
- [4] *Lundström I., Shivaraman M.S., Svensson C.M.* // J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. N 9. P. 3876–3881.
- [5] *Spetz A., Armgarth M., Sundström I.* // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 64. N 3. P. 1274–1283.
- [6] *Ковалевская Г.Г., Крамена Л., Мередов М.М.* // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 12. С. 55–58.
- [7] *Слободчиков С.В., Ковалевская Г.Г., Мередов М.М. и др.* // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 15. С. 1–4.
- [8] *Card H.C., Rhoderick E.H.* // J. Phys. D. 1971. Vol. 4. N 10. P. 1589–1601.
- [9] *Green M.A., King F.D., Shewchun J.* // Sol. St. Electr. 1974. Vol. 17. N 6. P. 551–561.
- [10] *Srivastava G.P., Bhatnagar P.K., Dhariwal S.R.* // Sol. St. Electr. 1979. Vol. 22. P. 581–587.
- [11] *Lundström I., Shivaraman M.S., Svensson C.M.* // J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. N 9. P. 3876–3881.
- [12] *Petty M.C.* // Electr. Lett. 1982. Vol. 18. N 8. P. 314–316.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Поступило в Редакцию
27 февраля 1992 г.

04;12
© 1993 г.

Журнал технической физики, т. 63, в. 2, 1993

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАЖИГАНИЯ ДУГИ В ЗАМКНУТОМ СИЛЬНОТОЧНОМ КОНТАКТЕ

В.А.Фалеев, А.И.Федорченко

Введение

Известно [1], что контактное соединение обладает электрическим сопротивлением, значительно превышающим сопротивления каждого из материалов, образующих контактную пару. Это связано как с наличием особого рода поверхностных пленок (например, адгезионных или окисных), так и с микроскопической шероховатостью контактных поверхностей. Так как повышение сопротивления локализовано в узкой контактной зоне, то это приводит к значительному джоулевому тепловыделению в ней и, как следствие, возможному самопроизвольному отбросу контактов за счет теплового взрыва области стягивания [2]. Кроме того, наличие явления стягивания и, следовательно, искривление линий тока вызывают появление электродинамических усилий, также способствующих самопроизвольному размыканию контактов. Отброс контактов сопровождается возникновением контактной дуги между ними, что приводит либо к свариванию, либо к разрушению контактной пары. Появление дуги между первоначально замкнутыми электродами особенно характерно, когда через контакт пропускается большой импульсный ток.

В связи с этим целью настоящей работы являлось экспериментальное и теоретическое изучение данного процесса, определение локальных и интегральных критериев перехода металлического контакта в дуговой