

кого и толсто-волноводов соответственно. Как видно из рис. 1, даже при  $R < R_c$  рентгеновские лучи распространяются с достаточно высокими коэффициентами пропускания ( $\leq 40\%$ ), причем волноводы с малыми значениями  $d$  и  $\varphi_0$  являются более предпочтительными. Для используемых нами величин  $d$  и  $\varphi_0 < \varphi_0$  вклад в  $P$  отражений в режиме шепчущих мод является определяющим. С увеличением апертуры до  $\varphi_0 \geq \varphi_c$  коэффициент пропускания резко уменьшается, особенно в области малых  $R$ .

На рис. 2 представлены угловые зависимости  $P(\psi)$  для волноводов с различной высотой шероховатостей отражающих поверхностей  $\sigma_{\perp}$  при значении корреляционного радиуса  $\sigma_{\parallel} = 100$  мкм [11]. Видно, что шероховатости с  $\sigma_{\perp}/\lambda \leq 15$  не очень сильно сказываются на величине коэффициента пропускания. Влияние корреляционного радиуса  $\sigma_{\parallel}$  при малых  $\psi$  еще более слабое (см. (5)).

Результаты настоящей работы показывают возможность транспортировки рентгеновских пучков по изогнутым волноводам с поворотом на углы порядка  $5-10^\circ$  при достаточно высокой (на уровне  $\sim 10\%$ ) эффективности пропускания, что может использоваться для сбора и концентрации изотропного излучения рентгеновских трубок и мессбауэровских источников.

### Список литературы

- [1] Mosher D., Stephanakis S. // Appl. Phys. Lett. 1976. Vol. 29. 2. P. 105—107.
- [2] Vetterling W. T., Pound R. V. // J. Opt. Soc. Amer. 1976. Vol. 66. N 10. P. 1048—1049.
- [3] Виноградов А. В., Кожевников И. В. // ЖТФ. 1984. Т. 54. Вып. 9. С. 1755—1762.
- [4] Аркадьев В. А., Коломийцев А. И., Кумахов М. А. и др. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1987. № 2. С. 44—47.
- [5] Комаров Ф. Ф., Наумович А. И., Самусевич Г. Г. и др. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1986. № 6. С. 31—35.
- [6] Виноградов А. В., Ковалев В. Ф., Кожевников И. В. и др. // ЖТФ. 1985. Т. 55. Вып. 2. С. 244—250.
- [7] Александров Ю. М., Валиев К. А., Великов Л. В. и др. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. Вып. 5. С. 257—260.
- [8] Аркадьев В. А., Коломийцев А. И., Кумахов М. А. и др. // Письма в ЖТФ. 1988. Т. 14. Вып. 2. С. 97—98.
- [9] Бушув В. А., Кузьмин Р. Н. // Препринт МГУ. № 26. М., 1988. 4 с.
- [10] Виноградов А. В., Зорев Н. Н., Кожевников И. В. и др. // ЖЭТФ. 1985. Т. 89. Вып. 6. С. 2124—2132.
- [11] Herring J. // J. Appl. Opt. 1984. Vol. 23.6. P. 1156—1160.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова  
физический факультет

Поступило в Редакцию  
4 января 1989 г.

### ФОТОЭДС СТРУКТУР Pd—n-InP С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ СЛОЕМ В АТМОСФЕРЕ ВОДОРОДА ИЛИ ВОДЯНЫХ ПАРОВ

Г. Г. Ковалевская, А. М. Маринова, С. В. Слободчиков

В последние годы значительное внимание уделяется разработке газоанализаторов на основе различных видов полупроводниковых структур, включая использование диодов Шоттки [1, 2], МДП структур [3], транзисторов [4]. В этих детекторах принцип регистрации основан на измерении изменения электрических характеристик в зависимости от концентрации соответствующих газов, а именно изменении емкости ( $c-v$ -характеристики), обратных (иногда прямых) токов ( $I-v$ -характеристики), пороговых напряжений в транзисторах.

Представляло несомненный интерес проверить зависимость фотоответа в некоторых диодных структурах от содержания и концентрации соответствующих газов с целью оценки возможности использования фотодетектора как датчика газов.

В связи с этим для проверки в качестве детектора водорода были созданы диодные структуры Pd—n-InP с промежуточным слоем.

Для создания диодных структур использовались кристаллы  $n\text{-InP}$  с  $n=1-3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Палладий наносился электрохимическим осаждением. Процесс включал два этапа: 1) очистка и химическое травление (полировка) поверхности и 2) собственно осаждение Pd. Первый этап проводился путем последовательных операций очистки и травления в ацетоне, серной кислоте, далее в полирующем травителе 5 % Вг+95 %  $\text{CH}_3\text{COOH}$  и затем снова операции очистки.

Осаждение Pd производилось из электролита, включавшего  $\text{PdCl}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$  и  $\text{C}_6\text{H}_5\text{COOH}$  при температуре  $50-60^\circ \text{C}$  и плотности тока  $\sim 1 \text{ мА/см}^2$ . Осаждались слои толщиной  $500-800 \text{ \AA}$ .

Омические контакты к  $n\text{-InP}$  создавались электрохимическим осаждением Ni с последующим вжиганием в токе водорода при  $T=650-720 \text{ K}$  в течение 5 мин, далее напылялся In. Размер образцов  $0.3 \times 0.3 \text{ см}$ .

### Измерения и обсуждение результатов

На рис. 1 представлены типичные ВАХ для одного из фотодиодов, снятые до и после запуска водорода в количестве  $0.5 \text{ рт}$  в откачанный ( $p \sim 10^{-2} \text{ мм. рт. ст.}$ ) стеклянный прибор. Как видно из рисунка, изменение обратного тока, например, при  $0.5 \text{ В}$  составляет

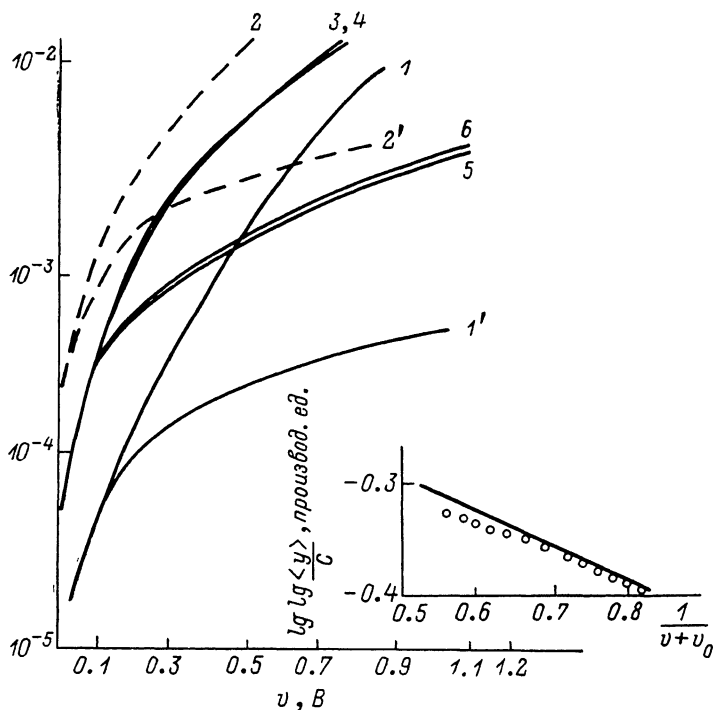


Рис. 1. Вольтамперные характеристики диодных структур Pd— $n\text{-InP}$ .

1—3 — прямые ветви; 1', 2', 5, 6 — обратные; 1, 1' — ВАХ без  $\text{H}_2$ ; 2, 2' — ВАХ с  $0.5 \text{ рт}$   $\text{H}_2$ ; 3, 5 — ВАХ «сухие»; 4, 6 — ВАХ «мокрые».

порядок величины. На рис. 2 приведена спектральная кривая фотоэдс диодной структуры, снятая до запуска водорода. При запуске же  $0.5 \text{ рт}$   $\text{H}_2$  фотоэдс практически становится равной нулю при всех длинах волн, т. е. это изменение фотоответа не носит селективный характер. Кроме того, оно имеет место в широком интервале изменения интенсивности света и во всех случаях существенно больше, чем на порядок величины, достигая  $1.5-2$  порядков. Эти данные свидетельствуют о большей чувствительности фотоэлектрического метода детектирования.

Было обнаружено весьма значительное изменение фотоэдс от влажности. Примечательно, что с ростом влажности фотоэдс возрастает. В приборе, где создавалась 100%-ная относительная влажность, фотоэдс возрастала по отношению к комнатной влажности для

различных образцов на 100—400 %. В откачанном до  $10^{-2}$  мм. рт. ст. приборе фотоэкс падла на 15 % по отношению к комнатной влажности. На рис. 3 представлено изменение фотоэкс со временем после подачи «импульса» водяного пара. Фотоэкс достигает максимума за 1—3 с и после выключения «импульса» спадает за 40—50 с, т. е. процесс сравнительно малоинерционен и, следует отметить, полностью обратим.

Полученные экспериментальные результаты представляют интерес в отношении использования диодной структуры Pd—*n*-InP с промежуточным слоем как детектора двойного назначения — водорода и водяных паров, действующего на фотоэлектрическом принципе регистрации.

Можно высказать определенные соображения о механизмах детектирования в обоих случаях. Совершенно ясно, что особенности структуры фотодиода играют решающую роль, причем крайне важна роль промежуточного слоя.

Рядом исследователей установлено, что на поверхности фосфида индия всегда существует тонкий слой естественных окислов и прежде всего *n*-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Кроме того, найдены P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, некоторые фосфаты типа InPO<sub>4</sub>, свободный P [5-7]. Процентный состав тех или иных компонент определяется спецификой технологических операций, связанных с обработкой

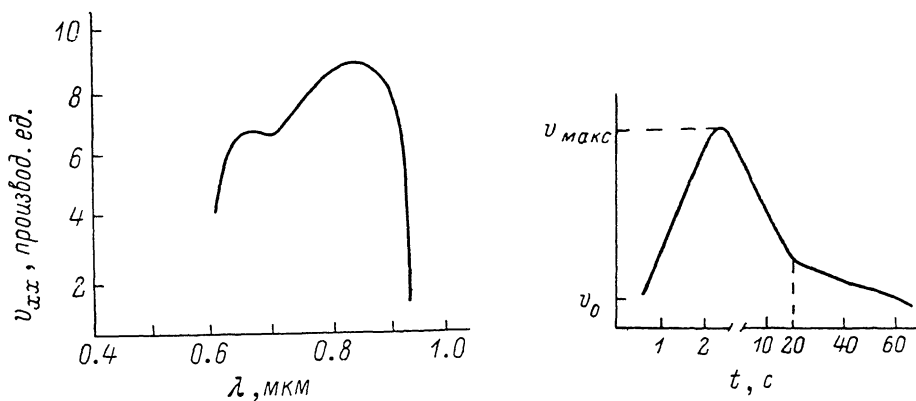


Рис. 2. Спектральная кривая фотоэкс диодных структур Pd—*n*-InP с промежуточным слоем.

Рис. 3. Импульс фотоэкс, регистрирующий «импульс» водяного пара.

поверхности и созданием диодной структуры. Благодаря особенностям технологического процесса в промежуточном слое наших диодных структур содержание P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> составляло более 50 %.

Остановимся вначале на анализе возможного механизма токопрохождения в диодных структурах и определяемом им виде вольт-амперных характеристик.

Из рис. 1 видно, что во всем интервале смещений, прямых и обратных, не наблюдается прямолинейных участков. В механизме токопрохождения туннелирование через промежуточный слой должно играть существенную роль. Тот факт, однако, что ВАХ не имеет постоянного наклона, вероятно, определяется тем, что толщина диэлектрической высокоомной компоненты слоя (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) неодинакова. Участки слоя с меньшей толщиной могут быть обусловлены вкраплениями низкоомной компоненты окисла *n*-In<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В [8] было показано, что если предположить, что туннельный ток есть экспоненциальная функция толщины барьера (при фиксированном напряжении смещения), то при неоднородной толщине выражение для средней плотности тока имеет вид

$$\langle J \rangle = \{ C / [\exp(\lambda) - 1] \} \{ \exp \{ \lambda \exp[-qf(v)] \} \}, \quad (1)$$

где *C* — постоянная, а  $\lambda$  — средняя величина *n*, определяемая распределением Пуассона

$$P = \{ \exp(-\lambda) / [1 - \exp(-\lambda)] \} \lambda^n / n!. \quad (2)$$

В этом случае  $\lg \langle J \rangle = f [f(v)]$  представляет экспоненциальную зависимость. Если взять  $f(v) = 1/v + v_0$ , то в нашем случае в интервале  $v = 0.1 - 0.6$  В (при  $v_0 = 1$  В) следует ожидать прямолинейной зависимости  $\lg \langle J \rangle / C$ , что и видно на вставке рис. 1 в обратной ветви одного из образцов; при более высоких смещениях идет омический участок.

Поглощение водорода палладием приводит, как уже отмечалось ранее [9, 10], с одной стороны, к снижению работы выхода Pd, а с другой — к возможному увеличению плотности промежуточных состояний на границе с полупроводником.

Согласно [11], эдс разомкнутой цепи МДП структуры можно представить

$$v_{xx} = \frac{nkT}{q} \left[ \ln(I_{k.s}/kT) + \frac{\Phi_B}{kT} + C_1 \chi^{1/2\delta} \right]. \quad (3)$$

Из этого выражения видно, что диапазон изменения фотоэдс в присутствии водорода расширяется, поскольку он определяется не только высотой барьера  $\Phi_B$ , но и коэффициентами неидеальности « $n$ » и прозрачности структуры  $C_1 \chi^{1/2\delta}$ . Это означает, что наличие водорода более резко изменяет фотоэлектрические параметры, чем электрические.

При воздействии водяных паров фосфорный ангидрид  $P_2O_5$ , составляющий основную компоненту промежуточного слоя, поглощая эти пары, создает дополнительные центры перезарядки, увеличивая высоту барьера, и, возможно, уменьшает плотность поверхностных состояний на границе  $P_2O_5-n\text{-InP}$ , что приводит к возрастанию фотоответа. Отметим, что измерения «сухих» и «мокрых» ВАХ показало их лишь незначительные отличия. Это означает, что увеличение  $v_{xx}$  по (3) за счет увеличения коэффициента неидеальности  $n$  или за счет уменьшения вероятности туннелирования не происходит.

### Список литературы

- [1] Yamamoto N., Tonomura S., Matsunaka 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 K. I., Petersson L.-G. // Phys. Scripta. 1987. Vol. 35. P. 702—705.
- [4] Lundström K. I., Shivaraman M. S., Svensson C. M. // J. Appl. Phys. 1975. Vol. 46. N 9. P. 3876—3881.
- [5] Laughlin D. H., Wilmsen C. M. // Appl. Phys. Lett. 1980. Vol. 37. N 10. P. 915—916.
- [6] Geib K. M., Wilmsen C. M. // J. of Vac. and Techn. 1980. Vol. 17. N 5. P. 952—957.
- [7] Wager J. F., Ellsworth D. L., Goodnick S. M., Wilmsen C. M. // J. of Vac. and Techn. 1981. Vol. 19. N 3. P. 513—518.
- [8] Chow C. K. // J. Appl. Phys. 1963. Vol. 34. N 9. P. 2599—2602.
- [9] Shivaraman M. S., Lundström K. I., Svensson C., Hammarsten H. // Electr. Lett. 1976. Vol. 12. P. 483.
- [10] Keramati B., Zemel J. N. // J. Appl. Phys. 1982. Vol. 53. P. 1091.
- [11] Srivastava A. K., Guha S., Arora B. M. // Appl. Phys. Lett. 1982. Vol. 40. N 1. P. 43—45.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Ленинград

Поступило в Редакцию  
20 октября 1988 г.

## ТЕРМОСТИМУЛИРОВАННАЯ ДЕПОЛЯРИЗАЦИЯ В ОКСИДНОЦИНКОВОЙ КЕРАМИКЕ ДЛЯ ВАРИСТОРОВ

Л. А. Киселева, Ф. К. Медведев, Е. Л. Сейсян

Оксидноцинковая керамика (ОЦК) является основным материалом для изготовления варисторов — полупроводниковых приборов, имеющих высоконелинейную ВАХ и широко применяемых для подавления перенапряжений в цепях радиоэлектронной аппаратуры. К настоящему времени накоплен большой объем экспериментальных данных по анализу физико-химических свойств ОЦК (см. [1] и цитируемую литературу) и значительно меньший по изучению электрофизических свойств варисторов. Между тем электрофизические исследования необходимы не только для уяснения природы неомических явлений, но и для контроля электрических свойств керамик, изготовленных по разной технологии, и оценки стабильности электропараметров варисторов на их основе при эксплуатации в различных ре-