

06.1;06.2

©1994

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ ТОКОПРОХОЖДЕНИЯ В СТРУКТУРАХ С ПОРИСТЫМ КРЕМНИЕМ

С.П.Зимин, В.С.Кузнецов, Н.В.Перч, А.В.Проказников

Перспективы создания эффективных электролюминесцентных ячеек в видимой области спектра, активных элементов газовых сенсоров и других приборов на основе пористого кремния (ПК) обусловили изучение электрофизических параметров этого материала [1-4] и исследование процессов переноса носителей заряда в структурах на его основе. В данной работе изучены температурные зависимости (120-300 К) вольт-амперных характеристик (ВАХ) структур алюминий-пористый кремний-монокремний-алюминий (Al-ПК-МК-Al), сформированных на кремнии *p*-типа проводимости.

ПК был получен методом анодной электрохимической обработки в 45% водном растворе HF на кремниевых пластинах КДБ-0.03 ориентации (111) при плотности тока 10 мА/см². Время анодирования *t* изменялось от 10 до 60 мин, что позволило получить слои ПК толщиной 15-60 мкм с пористостью более 50%. Для удаления поверхностной аморфизированной пленки (ПАП) [5] на серии образцов проводились плазмохимическая обработка поверхности ПК. На поверхности ПК и МК наносились пленочные алюминиевые контакты, которые вжигались в инертной среде при 350°C в течение 30 мин. Тестовые сэндвич-структуры имели размеры контактных площадок 5 × 5 мм.

На рис. 1,а,б показано типичное температурное изменение ВАХ исследуемых структур. Прямому смещению соответствовала подача положительного потенциала на кремниевую подложку. Коэффициент выпрямления *K* при комнатной температуре был, как правило, больше 1 и при смещении 1 В составлял 1.3-1200, что отмечалось для подобных структур и другими исследователями [1,6]. Однако в тех случаях, когда электрохимическая обработка проводилась длительное время (40-60 мин) и ПАП не удалялась, *K* был меньше 1. Кроме того, для структур с ПАП при временах формирования ПК 25-40 мин коэффициент *K* становился меньше 1 при температурах ниже 210 К. Это свидетельствует о том, что ПАП играет существенную роль

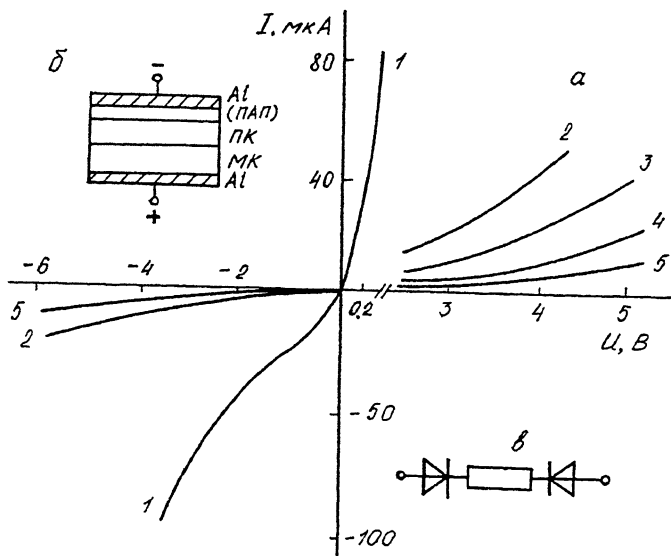


Рис. 1.

a — температурные изменения ВАХ структуры с ПАП, сформированной при $t = 20$ мин, 1 — 293, 2 — 205, 3 — 160, 4 — 137, 5 — 120 К; *б* — общий вид структуры, включенной в прямом направлении; *в* — эквивалентная электрическая схема.

в процессах переноса носителей заряда через структуру и изменяет свойства барьера Шоттки на границе Al-ПК.

Обработка полученных ВАХ проводилась в рамках модели двух барьеров. В дополнение к подходу авторов [1], которые учитывали выпрямление на контакте Al-ПК, принималось во внимание и существование выпрямляющего перехода ПК-МК. Эффективная работа этого гетероперехода основана на различиях материалов в ширине запрещенной зоны (см., например, [7]) и в величине концентрации носителей заряда. Эквивалентная схема структуры показана на рис. 1, *в*, где диоды описывают выпрямляющие свойства барьера Шоттки и гетероперехода, а активное сопротивление соответствует сопротивлению слоя ПК. Контакт Al-МК являлся омическим. При подаче положительного потенциала на подложку диод, описывающий свойства гетероперехода, оказывается включенным в прямом направлении и имеет место инжекция дырок из сильно легированной подложки в ПК, для которого характерна малая концентрация носителей заряда в монокристаллической матрице. При учете биполярной проводимости в исследуемой структуре на основании известных выражений для обратной ветви ВАХ

барьера Шоттки для случая диффузионной теории [8] и прямой ветви ВАХ гетероперехода [9] была составлена программа компьютерной обработки данных, которая позволяет из прямых ветвей ВАХ определять сопротивление слоя пористого кремния и коэффициент токопрохождения n в гетеропереходе. Поскольку в исследуемых структурах [10] существуют значительные токи утечки по периметру, зависящие от геометрических размеров, то удобно ввести термин "эффективное удельное сопротивление" ρ_{eff} ПК, которое в данной работе будет соответствовать удельному сопротивлению слоя ПК при размерах контактных площадок 25 мм^2 . Очевидно, что ρ_{eff} меньше истинного удельного сопротивления слоя ПК и для корректировки значения ρ_{eff} необходимо учесть токи утечки в структуре.

Расчеты по описанной программе свидетельствовали о хорошем соответствии экспериментальных и теоретических ВАХ, максимальные отличия которых не превышали 4%. Анализ структур без ПАП показал, что при комнатной температуре в интервале смещений до 2 В эффективное удельное сопротивление ПК, формировавшегося в течение 15–60 мин, незначительно зависит от продолжительности электрохимической обработки и составляет $(1.4–8.4)10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. При меньших временах обработки ρ_{eff} уменьшалось и для $t = 10$ мин составляло $5 \cdot 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. При наличии ПАП сопротивление слоя ПК было на 1–3 порядка выше, что связано с присутствием в структуре дополнительной тонкой диэлектрической пленки. Сопротивление ПАП находилось в интервале от 10 кОм до 40 МОм и зависело от времени анодной обработки. Заметим, что поверхностный слой может представлять собой более тонкую пористую структуру, подобную той, что наблюдалась в работе [11]. Анализ ВАХ в области больших смещений (до 7 В) показал, что ρ_{eff} исследуемых образцов уменьшается примерно на порядок по сравнению с данными для малых смещений. Коэффициент токопрохождения при малых смещениях составлял для структур с удаленной ПАП 1.9–8.3, при наличии аморфизированного слоя — 1.0–2.9, а при увеличении прямого смещения возрастал.

На рис. 2 показаны типичные температурные изменения ρ_{eff} и коэффициента n . Как следует из рис. 2, при охлаждении структур до 120 К наблюдается увеличение эффективного удельного сопротивления слоя ПК и рост n до аномально больших значений. Причиной высоких значений коэффициента токопрохождения является, на наш взгляд, во-первых, наличие токов утечки по периметру структур, что экспериментально было показано в [10]. Во-вторых, причиной больших значений n является высокий уровень ин-

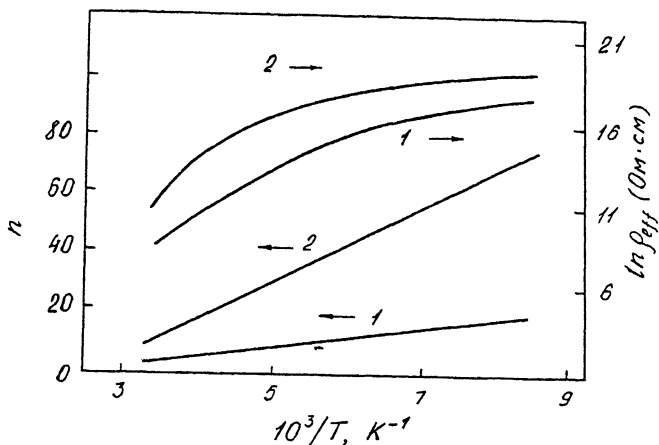


Рис. 2. Температурные зависимости ρ_{eff} и коэффициента n для исследуемых структур с удаленной ПАП. 1 — $t = 10$, 2 — $t = 30$ мин.

жекции дырок из кремниевой подложки в ПК, что приводит к модуляции сопротивления слоя ПК. Это объясняет факты уменьшения ρ_{eff} и увеличения n при росте прямого смещения и возрастание n при охлаждении, когда за счет экспоненциального уменьшения концентрации носителей в матрице ПК уровень инжекции увеличивается. Кроме того, становится понятным различие в коэффициентах n при наличии и отсутствии ПАП. Дополнительное падение напряжения на ПАП уменьшает падение напряжения на гетеропереходе, что уменьшает инжекцию дырок в ПК.

Из анализа явлений токопереноса в структурах с разной площадью контактов было получено, что при напряжениях менее 200 мВ токи утечки при комнатной температуре не проявляются, но при больших смещениях токи утечки по периметру становятся существенными. Оценки, проведенные на основании ВАХ для структур с различными геометрическими размерами, показали, что учет токов утечки приводит к корректировке значения удельного сопротивления слоя ПК при 300 К в сторону увеличения примерно на порядок по сравнению с ρ_{eff} .

Таким образом, результаты данной работы свидетельствуют о том, что при анализе процессов токопрохождения в структурах с ПК необходимо учитывать наличие или отсутствие ПАП, существование токов утечки и явление модуляции сопротивления слоя ПК. Показано, что экспериментальные ВАХ хорошо совпадают с теоретическими зависимостями, полученными на основе модели двух переходов,

и такой подход может использоваться для описания физических процессов в структурах с ПК на базе монокремния *p*-типа проводимости. Это нашло подтверждение при изучении вольт-емкостных характеристик структур, о чем будет сообщено позднее.

Авторы признательны А.Л.Винке, В.Н.Палашову за образцы ПК.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 94-02-05460-а).

Список литературы

- [1] *Anderson R.C., Muller R.S., Tobias C.W.* // J. Electrochem. Soc. 1991. V. 138. P. 3406-3411.
- [2] *Биленко Д.И., Абаньшин Н.П., Галашикова Ю.Н. и др.* // ФТП. 1983. Т. 17. С. 2090-2992.
- [3] *Зимин С.П.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. С.55-59.
- [4] *Зимин С.П., Кузнецов В.С., Винке А.Л.* // Тез. междунауч.-техн. конф. "Микроэлектроника и информатика". Зеленоград, 1993. С. 92-93.
- [5] *Arita Y.* // J. Crystal Growth. 1978. V. 45. P. 383-392.
- [6] *Жерздев А.В., Кудоярова В.Х., Медведев А.В., Мороз Г.К.* // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19. С. 87-90.
- [7] *Беляков Л.В., Горячев Д.Н., Сресели О.М., Ярошецкий И.Д.* // ФТП. 1993. Т. 27. С. 1815-1819.
- [8] *Стрижа В.И.* Теоретические основы работы контакта металл-полупроводник. Киев, 1974. 264 с.
- [9] *Zi S.* Физика полупроводниковых приборов. Т. 1. М., 1984. 456 с.
- [10] *Zimin S.P., Kuznetsov V.S., Prokaznikov A.V.* // Technical Digest 3th Int. Conf. ICVC'93. Taejeon. P.179-182.
- [11] *Бучин Э.Ю., Постников А.В., Проказников А.В., Световой В.Б., Чурилов А.Б.* // Письма в ЖТФ (статья поступила 05.07.94).

Ярославский государственный
университет

Поступило в Редакцию
12 июля 1994 г.