

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ПРОВОДИМОСТИ ПЛЕНОК ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Н. А. Колобов, Е. В. Шелегеда

Проведено исследование поперечной проводимости пленок нелегированного поликристаллического кремния (ПКК) толщиной 0.2–0.6 мкм, осажденных методом магнетронного распыления на сильнолегированные монокристаллические подложки. В качестве верхнего электрода использовались пленки молибдена толщиной 0.4 мкм. Получены зависимости удельного сопротивления пленок от напряженности электрического поля, описываемые моделью проводимости, ограниченной токами пространственного заряда при квазиоднородном распределении ловушек в запрещенной зоне ПКК.

Ключевые слова: поперечная проводимость пленок поликристаллического кремния; проводимость, ограниченная токами пространственного заряда – ТОПЗ; поликристаллический кремний, полученный методом магнетронного распыления.

Введение. Пленки поликристаллического кремния широко используются в качестве материала резисторов, применяемых, в частности, при разработке аналоговых и цифровых ИМС, координатно-чувствительных детекторов излучений и других приборов [1, 2].

В большинстве случаев при формировании резисторов используется продольная проводимость, когда ток протекает вдоль пленки, а сопротивление резистора определяется величиной поверхностного сопротивления пленки R_s [Ом/□] и соотношением длины l и ширины d резистора $R = R_s l/d$.

Величина поверхностного сопротивления легированных пленок поликристаллического кремния обычно не превышает нескольких кОм/□, поэтому для изготовления

достаточно высокоомных резисторов приходится использовать очень высокие значения l/d . При этом площадь, занимаемая резистором, оказывается достаточно велика, что может препятствовать повышению степени интеграции приборов. Актуально рассмотреть возможность использования поперечной проводимости пленок, когда ток протекает перпендикулярно плоскости пленки, а величина сопротивления пропорциональна удельному сопротивлению ρ и толщине пленки d и обратно пропорциональна площади поперечного сечения структуры s , т.е. $R = \rho d/s$.

Интерес представляют пленки, имеющие достаточно высокое результирующее сопротивление от 1 до 10 МОм при толщине 0.5 мкм и площади поперечного сечения резистора порядка 10 мкм². Для этого удельное сопротивление пленки должно составлять от 2 до 20 кОм·см. Столь высокие значения удельного сопротивления могут иметь только слабелегированные или нелегированные пленки поликристаллического кремния (ПКК). Исследованию механизмов проводимости таких пленок в поперечном направлении посвящена настоящая работа.

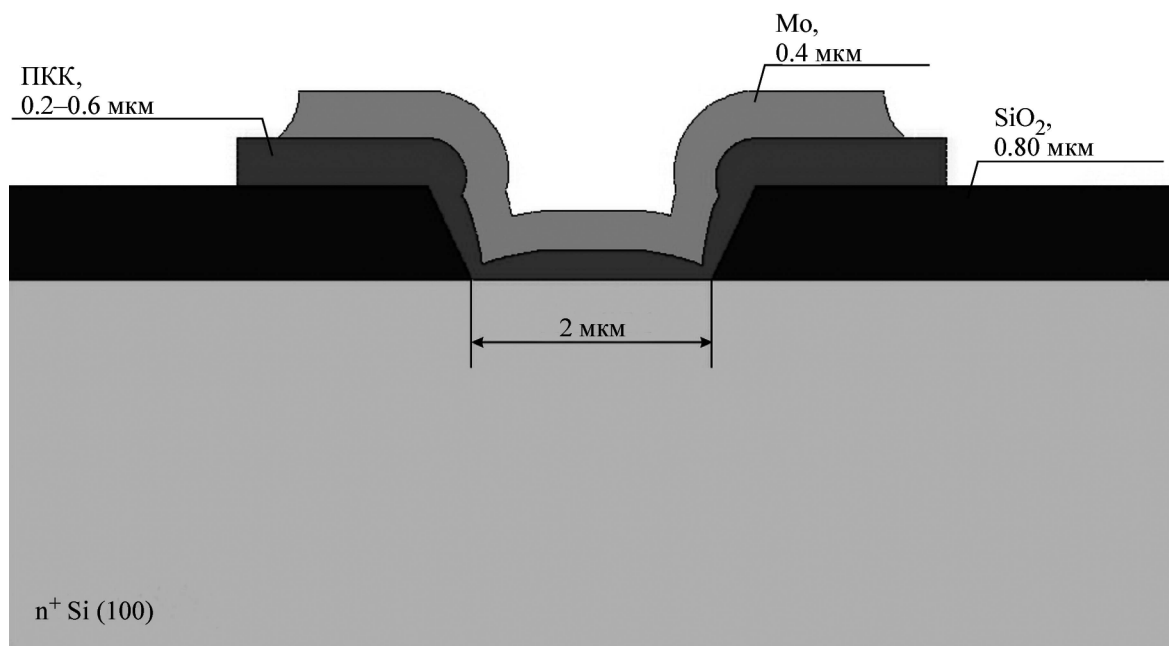


Рис. 1: Поперечное сечение одиночной ячейки экспериментальных структур.

Методика эксперимента. В настоящей работе исследовались пленки толщиной от 0.2 до 0.6 мкм, полученные осаждением поликристаллического кремния методом магнетронного ионно-плазменного распыления кремниевой мишени при постоянном токе

в атмосфере аргона. Осаждение проводилось на установке “Магна” при скорости движения транспортера, обеспечивающей получение пленки толщиной 0.2 мкм за один проход. В качестве металлического электрода использовалась пленка молибдена, толщиной порядка 0.4 мкм, осажденная методом магнетронного распыления на установке “Оратория 5”.

Для исследования механизмов электропроводности пленок были изготовлены многоэлементные экспериментальные структуры на кремнии n^+ типа марки КЭС 0,01, поперечное сечение одиночной ячейки которых представлено на рис. 1.

Методом термического окисления при температуре 1100 °С на подложке был выращен изолирующий слой окисла кремния толщиной 0.80 мкм. Далее с помощью контактной фотолитографии и жидкостного травления окисла в стандартном травителе на основе плавиковой кислоты в окисле были сформированы окна диаметром 2 мкм. Далее на пластины были последовательно осаждены слои поликристаллического кремния и молибдена. Травление пленок молибдена проводилось в стандартном жидкостном травителе для алюминия при комнатной температуре, а поликристаллический кремний травился плазмохимически в смеси хладона-14 с кислородом. При этом пленка молибдена служила маской при травлении поликристаллического кремния, обеспечивая процесс самосовмещения.

Вольт-амперные характеристики снимались при отрицательном напряжении на металлическом электроде с помощью автоматического измерителя *KEITHLEY 236 source measure unit*. Погрешность измерений токов составляла $\pm 1.6\%$ в диапазоне от 0.2 до 200 пА, $\pm 0.25\%$ в диапазоне от 0.2 до 200 нА и $\pm 0.15\%$ в диапазоне от 0.2 до 200 мА. Максимальный ток, протекающий через структуру, ограничивался на уровне 1 мА.

Для уменьшения случайной погрешности измерений проводилось усреднение по 32 значениям тока, измеренным на заданном напряжении. Ток утечки, измеренный на структурах с изолированным электродом, не превышал 0.01 пА.

Перед началом измерения ВАХ проводилось измерение тока каждой из структур при фиксированном напряжении в 1 В, и строилась гисторамма распределения токов на пластине. Далее определялось среднее значение тока и для измерений выбирались структуры с токами, наиболее близкими к средним значениям.

Экспериментальные результаты. На рис. 2 представлены результаты эксперимента по исследованию вольт-амперных характеристик структур в зависимости от толщины пленки поликристаллического кремния. Кривые построены в двойном логарифмическом масштабе в связи с тем, что обычно электропроводность поликристаллических

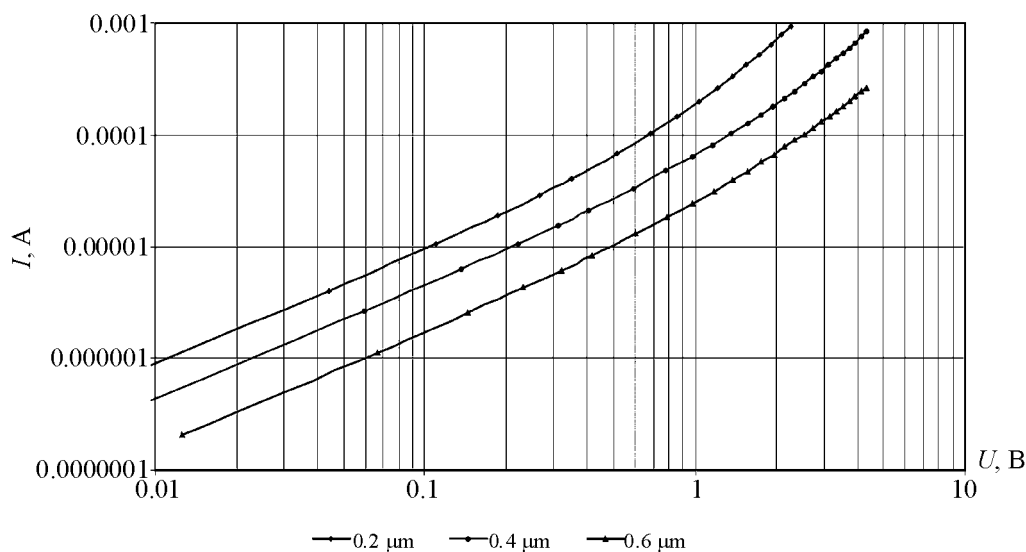


Рис. 2: Вольт-амперные характеристики пленок ПКК при разной толщине пленки.

пленок описывают моделью ТОПЗ с экспоненциальным распределением ловушек по энергиям. При этом вольт-амперная характеристика описывается степенным законом $I = CU^n$, где C – коэффициент пропорциональности, а показатель степени n неразрывно связан с характерной энергией E_0 экспоненциального распределения ловушек по энергиям, причем $E_0 = (n - 1)kT$ [3].

Из рис. 2 следует, что ВАХ экспериментальных структур не могут быть описаны степенным законом в широком интервале напряжений. Кривые спрямляются только в диапазоне напряжений от 0.01 до 0.5 В.

На рис. 3 полученные экспериментальные ВАХ представлены в виде зависимости плотности тока в ячейке J [А/см²] от напряженности электрического поля E [кВ/см] в пленке.

Данные рис. 3 показывают, что электрофизические свойства пленок не зависят от их толщины. Все кривые слились в одну вплоть до напряженности электрического поля порядка 10^5 В/см.

На рис. 4 представлены расчетные зависимости эффективного сопротивления ячейки R_c [МОм] от толщины пленки и величины напряжения на структуре.

Зависимости $R_c(U)$, изображенные на рисунке 4 в полупологарифмических координатах, могут быть аппроксимированы прямыми линиями, которые представляют собой экспоненциальные закономерности вида $R_c = R_c(0) \exp(-bU)$, где $R_c(0)$ – начальное сопротивление пленки при $U = 0$, а b – показатель экспоненты, характеризующий её

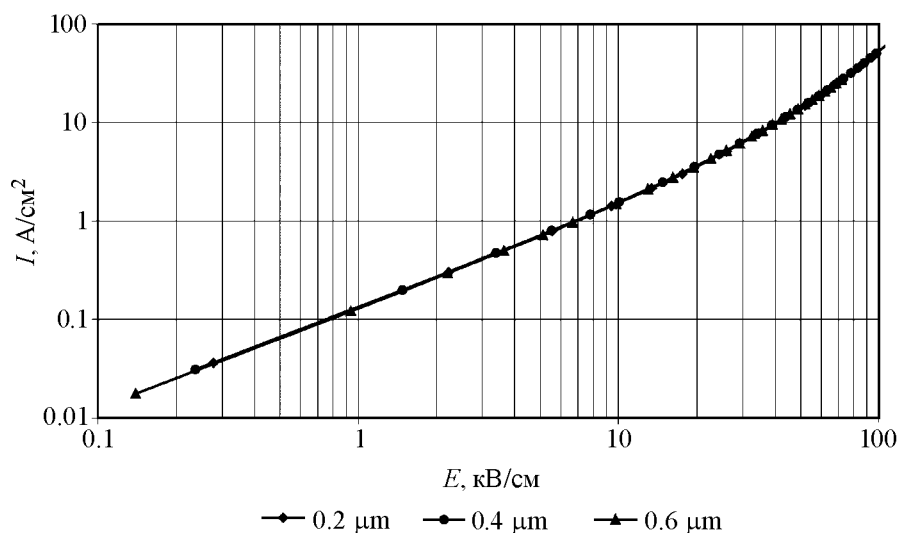


Рис. 3: Зависимость плотности тока от напряженности электрического поля для пленок ПКК различной толщины.

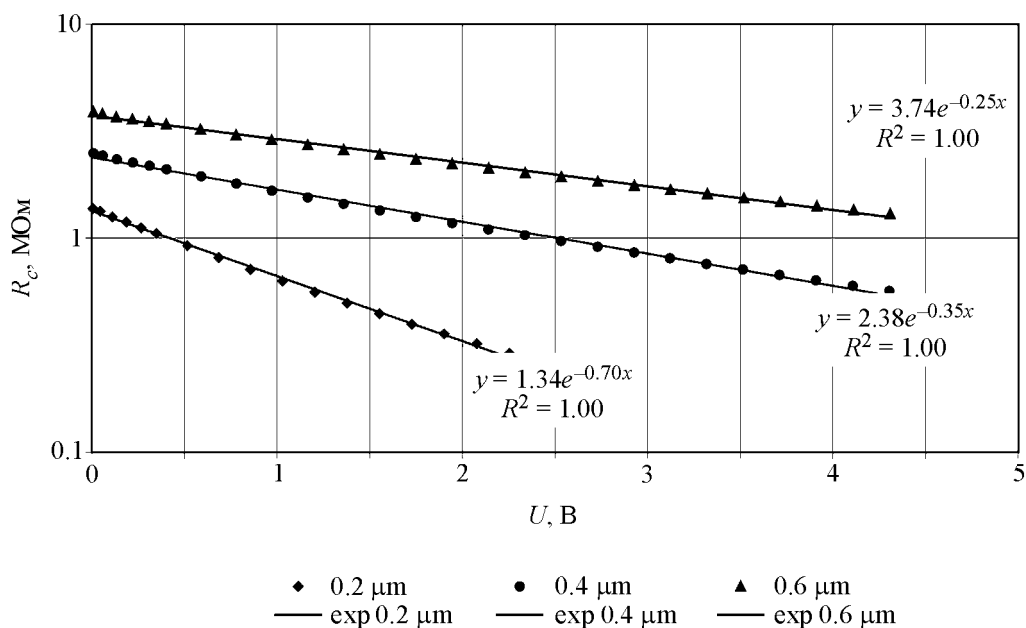


Рис. 4: Зависимость эффективного сопротивления ячейки R_c [МОм] от напряжения.

наклон по отношению к оси напряжений. Полученные значения $R_c(0)$ и b для каждой толщины пленок ПКК представлены на графиках. Следует заметить, что величина коэффициента корреляции R^2 во всех рассмотренных случаях равна единице, что говорит о высокой степени достоверности полученной аппроксимации.

На следующем рисунке данные рис. 4 перестроены в виде зависимости удельного сопротивления пленки ρ от величины напряженности электрического поля E , в предположении, что ток течет по всему объему пленки.

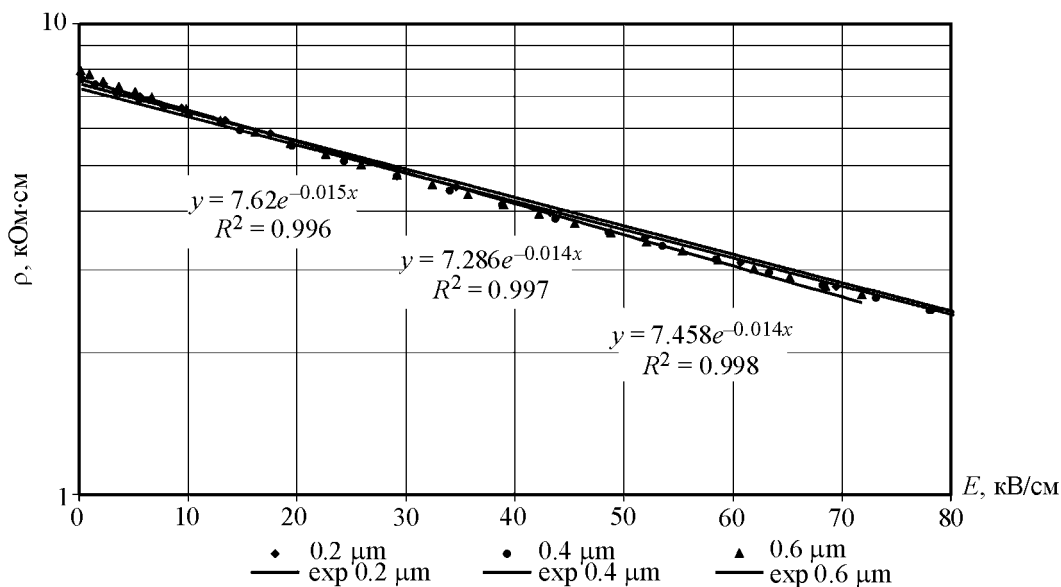


Рис. 5: Зависимость удельного сопротивления пленки от напряженности электрического поля.

Данные рис. 5 показывают, что электрофизические свойства пленок ПКК не зависят от их толщины, а зависимость $\rho(E)$ может быть описана экспоненциальной закономерностью

$$\rho(E) = \rho(0) \exp(-KE). \quad (1)$$

В этом выражении величина $\rho(0)$ характеризует начальное значение удельного сопротивления пленки ПКК в отсутствие поля, а показатель степени экспоненты KE показывает на скорость падения удельного сопротивления в зависимости от напряженности электрического поля в плёнке.

Если все экспериментальные точки, изображенные на рис. 5, аппроксимировать единой прямой, то величина начального значения удельного сопротивления $\rho(0)$ составит $7385\ \text{Ом}\cdot\text{см}$, а константа K в показателе степени экспоненты – $1.42 \cdot 10^{-5}\ \text{см/V}$.

Обсуждение экспериментальных данных. В поликристаллических материалах, которые представляют собой двухфазную систему, состоящую из монокристаллических зерен полупроводника и межкристаллитного пространства – МКП, следует ожидать появления непрерывного распределения ловушечных уровней по энергии в пределах

запрещенной зоны полупроводника. Эти уровни можно связать с нарушением кристаллической структуры и оборванными связями на границах зерен. В таких веществах в фазе МКП дно зоны проводимости размывается, а в глубь запрещенной зоны уходит так называемый хвост зоны проводимости, причем состояния в хвосте являются локализованными и действуют как ловушки для электронов.

В этом случае вместо дна зоны проводимости приходится рассматривать так называемый край подвижности, выше которого электроны могут свободно дрейфовать через полупроводник, как в обычной зоне проводимости кристаллического вещества, хотя и с меньшей подвижностью, в то время как ниже этого края подвижность электронов резко падает практически до нуля. При этом край подвижности фактически теперь играет роль дна зоны проводимости.

При подаче на образец внешнего напряжения инжектированные в приповерхностную область поликристаллического полупроводника электроны захватываются на ловушки и заполняют наиболее глубокие уровни ловушек в хвосте, так что ниже уровня Ферми E_F все ловушки окажутся полностью заполненными, а положение уровня Ферми будет зависеть от степени заполнения ловушек.

В случае поликристаллических полупроводников контакт металл–полупроводник практически никогда не будет блокирующим, он может быть омическим или, в крайнем случае, нейтральным. Связано это с тем, что электроны из металла могут проникать на поверхностные состояния поликристаллического полупроводника туннелированием. При этом у границы раздела электрод – ПМК будет формироваться объемный заряд, поле которого резко уменьшает вероятность дальнейшей инжекции электронов и существенно влияет на протекание тока по поликристаллическому полупроводнику ввиду зависимости положения уровня Ферми от величины заряда. Именно поэтому токи, протекающие по полупроводнику в присутствии заряда у границы раздела с электродом, называют токами, ограниченными пространственным зарядом – ТОПЗ.

Пространственный заряд электронов у границы раздела с инжектирующим электродом создает свое электрическое поле, которое накладывается на внешнее приложенное поле $E = U/d$, где d – толщина пленки. Поле объемного заряда является неоднородным и приводит к увеличению общего поля вблизи анода и к уменьшению поля вблизи катода.

С увеличением пространственного заряда уменьшение поля вблизи катода приводит к уменьшению скорости инжекции электронов из катода в полупроводник. В равновесии ток через контакт будет равен току через объём полупроводника, а это возможно

только в том случае, если напряженность поля вблизи контакта много меньше, чем в объеме пленки. Поэтому по сравнению с полем в объеме пленки можно с достаточной точностью считать, что поле вблизи контакта будет близко к нулю.

При исследовании поперечной проводимости пленок поликристаллического кремния структура металл–полупроводник, состоящая из пленки ПКК и проводящих электродов, представляет собой конденсатор, величина заряда на электродах которого будет пропорциональна величине приложенного напряжения U , причем поверхностная плотность заряда будет равна:

$$\sigma[\text{C}/\text{cm}^2] = C_{\text{sp}}[\text{F}/\text{cm}^2]U = \varepsilon\varepsilon_0 E. \quad (2)$$

Равенство нулю поля вблизи катода означает, что в приповерхностную область полупроводника инжектируется заряд, определяемый формулой (1), т.е. весь заряд геометрической емкости. Такой подход к приближенному расчету ТОПЗ называют конденсаторным методом или конденсаторной моделью ТОПЗ. Несмотря на феноменологический характер метода, он позволяет добиться исключительной простоты выкладок, дающих, тем не менее, достаточно полное представление о физике процессов инжекции и проводимости за счет ТОПЗ. Такой феноменологический анализ игнорирует неоднородность в распределении поля и пространственного заряда по толщине диэлектрика.

После подачи напряжения на структуру инжектированный в приповерхностную область поликристаллического кремния заряд заполняет уровни ловушек у поверхности, способствуя повышению уровня Ферми на некоторую величину ΔE_F .

Если предположить, что энергетическое распределение плотности ловушек, заполняемых инжектированным зарядом, квазипостоянно, то величина изменения уровня Ферми ΔE_F будет пропорциональна плотности инжектированного заряда $\sigma = \varepsilon\varepsilon_0 E$ и обратно пропорциональна поверхностной плотности ловушек N_{ts} [$\text{cm}^{-2}\text{эВ}^{-1}$]

$$\Delta E_F = \frac{\varepsilon\varepsilon_0}{qN_{\text{ts}}} E. \quad (3)$$

Изменение уровня Ферми в приповерхностной области полупроводника приводит к увеличению концентрации свободных носителей заряда и соответствующему уменьшению удельного сопротивления в $e^{q\Delta E_F/kT}$ раз, т.е.

$$n_e(E) = n_e(0)e^{q\Delta E_F/kT} \quad (4)$$

и

$$\rho(E) = \rho(0)e^{-q\Delta E_F/kT}. \quad (5)$$

Если подставить уравнение (3) в уравнение (5) и сравнить полученный результат с экспериментальной зависимостью $\rho(E)$ (1), то можно определить зависимость константы K в показателе степени экспоненты от диэлектрической проницаемости пленки ε и поверхностной плотности ловушек N_{ts}

$$K = \frac{q}{kT} \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{q N_{ts}}. \quad (6)$$

С помощью формулы (6) можно оценить поверхностную плотность ловушек, учитывая, что диэлектрическая проницаемость кремния $\varepsilon_{Si} = 12$, а $q/kT = 0.025$ эВ. Расчеты показывают, что величина $N_{ts} = 1.16 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$. Следует, однако, заметить, что истинная плотность ловушек зависит от соотношения площадей, занимаемых межкристаллитным пространством и кристаллитами. Известно [4, 5], что в подобного рода пленках размер зерен составляет 50–100 нм, и если предположить, что толщина межкристаллитного пространства занимает не более 1–2 монослоёв, то выходящая на поверхность пленки площадь МКП составит менее 1% процента от общей площади поверхности раздела электрод–пленка. Таким образом, поверхностная плотность ловушек в МКП должна быть приблизительно в 50–100 раз больше расчетного значения и составит от $5 \cdot 10^{11}$ до $10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ для данного вида пленок.

Выводы. В результате проведенной серии экспериментов установлено, что удельное сопротивление пленок поликристаллического кремния толщиной от 0.2 до 0.6 мкм, полученных методом магнетронного распыления, является экспоненциальной функцией напряженности электрического поля и может быть описано уравнением

$$\rho(E) = \rho(0) \exp(-KE) = 7.4 \cdot 10^3 \exp(-1.42 \cdot 10^{-5} E) \text{ Ohm} \cdot \text{cm}. \quad (7)$$

В данном уравнении $\rho(0) = 7400 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ – начальное удельное сопротивление пленки при $E = 0$, а K – константа в показателе экспоненты, зависящая от поверхностной плотности ловушек N_{ts} в межкристаллитном пространстве. Оценки показывают, что величина N_{ts} может изменяться в пределах от $5 \cdot 10^{11}$ до $10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$.

Уравнение (7) описывает зависимость $\rho(E)$, которая является следствием проводимости, определяемой токами, ограниченными пространственным зарядом, при квази-постоянной плотности ловушек в запрещенной зоне поликристаллического кремния.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] W. C. Liu, K. B. Thei, H. M. Chuang, et al., IEEE Electron Device Letters **22**, 318 (2001).
- [2] G. Lutz, *Semiconductor radiation detectors* (Springer, Berlin Heidelberg New York, 1999).
- [3] К. Као, В. Хуанг, *Перенос электронов в твердых телах* (Мир, Москва, 1984).
- [4] D. Maier-Schneider, A. Koprululu, S. Ballhausen Holm and E. Obermeier, J. Micromech. Microeng. **6**, 436 (1996).
- [5] Shobha Kanta Lamichhane and Jamil Akhtar, Nepal Journal of Science and Technology **10**, 115 (2009).

Поступила в редакцию 25 октября 2011 г.