

06.1;06.2;12

©1994

## ЭФФЕКТ ХОЛЛА В НИЗКООМНОМ ПОРИСТОМ КРЕМНИИ

С.П.Зимин

При исследовании электрофизических свойств пористого кремния, сформированного на различных кремниевых подложках в разнообразных технологических условиях, установлено [1-3], что по своему поведению он может быть поделен на два класса: низкоомный пористый кремний (НПК) и высокоомный пористый кремний (ВПК). Слои НПК характеризуются невысоким показателем пористости, удельное сопротивление пористого материала  $\rho_{PS}$  лишь в несколько раз превышает удельное сопротивление  $\rho_{MS}$  исходного монокремния (МК). Для ВПК отношение проводимостей может достигать 6-8 порядков и проявляются совершенно иные свойства, чем у НПК. Так, например, для слоев ВПК наблюдается активационный характер температурной зависимости удельного сопротивления с величинами энергий активации до 800 мэВ, что не характерно для слоев НПК.

В настоящей работе проведены исследования эффекта Холла в низкоомном пористом кремнии с целью определения электрофизических параметров и выявления основных закономерностей переноса носителей заряда в пористой структуре. В качестве НПК использовался пористый кремний, сформированный методом анодной электрохимической обработки сильно легированных сурьмой кремниевых пластин (КЭС-0.01) ориентации (111). Плотность тока анодирования  $j$  в 48% водном растворе HF составляла 5-20 мА/см<sup>2</sup>, время обработки  $t$  варьировалось в пределах 10-60 мин. При этих условиях слои пористого кремния имели толщину  $d_{ps} = 20-80$  мкм и весовую пористость 8-27%. Наблюдались практически линейные зависимости толщины слоя пористого кремния от времени обработки и весовой пористости от толщин пористого слоя.

Измерения эффекта Холла проводились на двухслойных структурах пористый кремний — кремниевая подложка с пленочными алюминиевыми контактами, нанесенными на поверхность НПК. Для улучшения омичности контактов (рис. 1, б) и снижения величины удельного переходного сопротивления проводилось плазмо-химическое удаление поверхностной аморфизированной пленки.

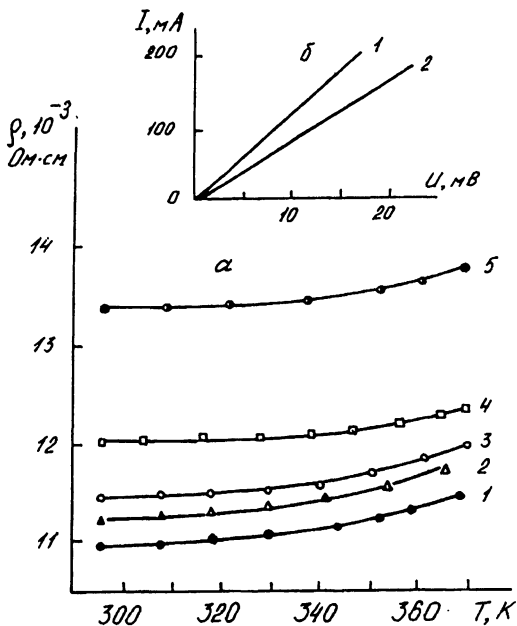


Рис. 1. *a* — температурные зависимости удельного сопротивления для исходного кремния (1) и двухслойных структур (2-5), полученных при  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$  для времени анодной обработки: 2 — 20, 3 — 30, 4 — 40, 5 — 60 мин;

*б* — линейные вольт-амперные характеристики контакта алюминий-пористый кремний: 1 —  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $t = 10$  мин; 2 —  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $t = 50$  мин.

На рис. 1, *a* приведены типичные зависимости удельного сопротивления  $\rho$  двухслойных структур в интервале температур 290–380 К, здесь же показана температурная зависимость для исходного кремния. Как видно из этого рисунка, наблюдается одинаковый ход температурных зависимостей  $\rho(T)$  и происходит увеличение значений удельного сопротивления двухслойной структуры при увеличении времени электрохимической обработки. На рис. 2, *a* показано температурное изменение коэффициента Холла  $R_H$  для исследуемых структур. При этом температурные зависимости  $R_H(T)$  двухслойных образцов имели одинаковый характер изменения по сравнению с МК; для всех исследованных образцов значения коэффициента Холла находились в узкой полосе значений  $(1.2 - 1.8) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{Кл}$ , показанной на рис. 2, *a*. Внутри этой полосы отсутствовала какая-либо закономерность изменения коэффициента Холла в зависимости от

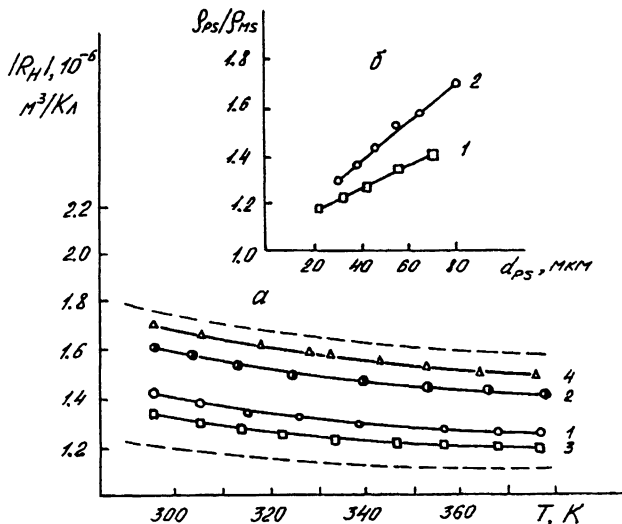


Рис. 2. а — типичные температурные зависимости коэффициента Холла для исходного кремния (1) и двухслойных структур (2-4), полученных при: 2 —  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $t = 40 \text{ мин}$ ; 3 —  $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ ,  $t = 30 \text{ мин}$ ; 4 —  $j = 20 \text{ mA/cm}^2$ ,  $t = 60 \text{ мин}$ ;

б — зависимость отношения  $\rho_{PS}/\rho_{MS}$  от толщины пленок пористого кремния для различной плотности тока анодирования: 1 —  $10 \text{ mA/cm}^2$ , 2 —  $20 \text{ mA/cm}^2$ .

режимов электрохимической обработки. Более того, для двухслойных образцов, полученных в идентичных технологических условиях, экспериментальные значения  $R_H$  так же заполняли указанную полосу значений.

Для обработки полученных результатов были использованы стандартные методы расчета электрофизических параметров для двухслойных структур [4]. Для того, чтобы более надежно исключить влияние кремниевой подложки, был проведен цикл экспериментов по послойному удалению материала подложки в сочетании с холловскими измерениями. Установлено, что в самой подложке КЭС-0.01 при указанных режимах обработки не происходит изменения концентрации и подвижности носителей заряда по сравнению с исходным монокремнием. На основании данных микроскопических исследований учитывалось, что исследуемые слои НПК имеют неоднородное распределение пор по толщине. В расчетные формулы закладывалась также двухфазная модель слоя пористого кремния, состоящего из монокристаллической матрицы-остова (фаза 1) и пустот (фаза 2). Для расчетов использовались известные формулы [4] электро-

проводности и коэффициента Холла для пористых материалов в случае цилиндрических пор произвольного сечения, оси которых перпендикулярны движению носителей и параллельны направлению магнитного поля.

Анализ экспериментальных данных показал, что усредненное по толщине слоя удельное сопротивление НПК в 1.2–1.7 раза превосходит (рис. 2, б) аналогичный параметр для исходного монокремния. При этом все изменения в величине удельного сопротивления двухслойных структур на основе КЭС-0.01 могут быть объяснены образованием непроводящих пустот в кремнии без изменения концентрации носителей в остове пористого кремния. Расчеты коэффициента Холла для двухслойных структур при указанном отношении  $\rho_{PS}/\rho_{MS}$  показали, что в этом случае изменения коэффициента Холла не должны превысить величину экспериментальной погрешности измерения  $R_H$ .

Проведенный анализ позволяет, во-первых, утверждать, что процессы порообразования в рассматриваемом случае происходят без изменения концентрации носителей в монокристаллической матрице пористого кремния. Во-вторых, можно говорить о том, что в НПК процессы переноса носителей заряда осуществляются по монокристаллическому остову в соответствии с теорией эффективной среды. Необходимо отметить, что увеличение плотности тока анодирования пластин КЭС-0.01 до 50–60 мА/см<sup>2</sup> и добавление в электролит изопропилового спирта резко изменяют процессы порообразования и приводят к образованию ВПК. В слоях ВПК наблюдается уменьшение концентрации носителей в матрице пористого кремния, что вместе с эффектами, сопутствующими высокой пористости, приводит к резкому уменьшению электропроводности и к изменению характера ее температурных зависимостей.

Автор признателен А.Л. Винке, В.Н. Палашову за предоставленные образцы и А.В. Проказникову, Н.Е. Мокроусову за обсуждение результатов работы.

## Список литературы

- [1] *Zimin S.P., Ouchinnikova L.A., Vorobyev V.V., Prokaznikov A.V., Vinke A.L., Palashov V.N.* // Book of Summaries Int. Conf. ALT-92. Moscow. Part 3. P. 71-73.
- [2] *Зимин С.П., Кузнецов В.С., Винке А.Л.* // Тез. междунар. науч.-техн. конф. "Микроэлектроника и информатика". Зеленоград, 1993. С. 92-93.
- [3] *Zimin S.P., Kuznetsov V.S., Prokaznikov A.V.* // Technical Digest 3th Int. Conf. ICVC'93. Taejon. P. 179-182.
- [4] *Кучис Е.В.* Гальваномангнитные эффекты и методы их исследования. М.: Радио и связь, 1990. С. 264.

Ярославский государственный  
университет

Поступило в Редакцию  
21 января 1994 г.

---