

06.1;06.2

©1995

КОНЦЕНТРАЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

С.П.Зимин

Пористый кремний (ПК), представляющий собой монокристаллическую кремниевую матрицу, пронизанную сетью микропор, является перспективным материалом для создания функциональных элементов интегральных схем, приемников и излучателей видимого диапазона, датчиков различного назначения. При разработке приборов на основе ПК большое значение имеет информация о концентрации носителей заряда в монокристаллической матрице пористого материала. Исследования последних лет [1-4] позволили выдвинуть гипотезу о том, что в зависимости от величины пористости и морфологии пор в монокристаллической матрице ПК могут иметь место процессы уменьшения концентрации носителей заряда по сравнению с исходным монокремнием. В качестве причин образования обедненных областей следует рассматривать процессы истощения примеси, обусловленные уходом примесных атомов в электролит и на стенки пор [1,4], и явления, связанные с переходом примесных атомов в электрически неактивное состояние. Выводы авторов [1-3] основывались на результатах косвенных экспериментов, и возникла необходимость прямого доказательства эффекта уменьшения концентрации носителей. В качестве такого метода могут быть использованы измерения эффекта Холла. Первые исследования этого эффекта на структурах с ПК были проведены в [4]. В работе на качественном уровне описан эффект уменьшения концентрации носителей заряда, однако отсутствие данных об образцах и методиках расчета не позволяет в полном объеме воспользоваться результатами этих экспериментов. В работе [5] на основании измерения эффекта Холла было показано, что в случае сильно легированной сурьмой кремниевой подложки с удельным сопротивлением $0.01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ($n = 4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) при невысокой пористости не происходит заметного изменения концентрации электронов в матрице ПК.

С практической точки зрения наибольший интерес представляют измерения эффекта Холла на структурах с низкоомным ПК, сформированным на основе слабо легированных подложек. В данной работе приводятся результаты по

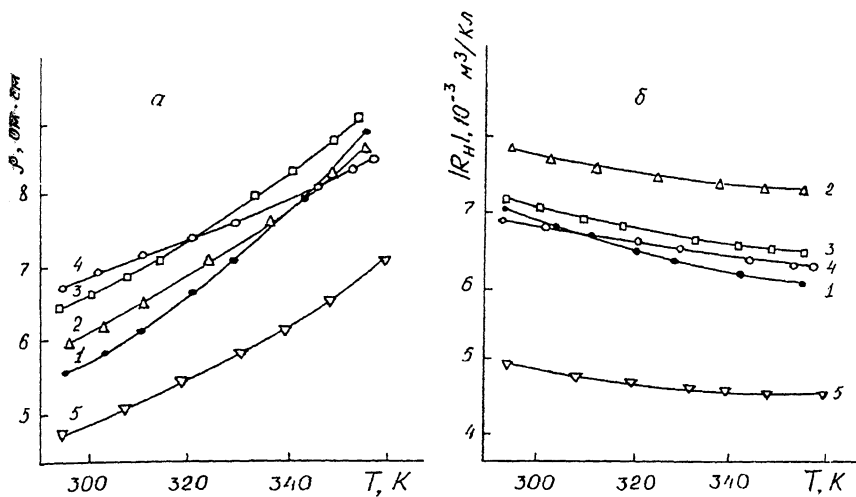


Рис. 1. Температурные зависимости удельного сопротивления (а) и коэффициента Холла (б) для двухслойных структур ПК — кремниевая подложка при различных временах анодной обработки: 1 — 20 мин, 2 — 30 мин, 3 — 40 мин, 4 — 60 мин; кривая 5 — для исходного кремния.

изучению коэффициента Холла на двухслойных структурах ПК—кремниевая подложка, когда в качестве подложки использованы пластины кремния, легированные фосфором, с удельным сопротивлением $4.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ($n = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) ориентации (100). Слои ПК были получены методом анодной электрохимической обработки кремниевых пластин в 48%-м водном растворе плавиковой кислоты при плотности тока анодирования 10 мА/см^2 . Вариация времени анодирования t от 20 до 60 мин приводила к увеличению толщины ПК d от 50 до 90 мкм, весовая пористость при этом изменялась от 5 до 10%. Исследования при помощи растрового электронного микроскопа показали, что структура характеризуется крупными цилиндрическими порами диаметром 1–2 мкм, ориентированными параллельно оси [100] и отстоящими друг от друга на расстоянии 3–10 мкм. Для удаления с поверхности ПК аморфизированной пленки проводилась операция плазмохимического травления во фторуглеродно-кислородной плазме высокочастотного разряда. В качестве контактов на поверхность ПК наносился алюминий с последующей термообработкой при 350°C в течение 10 мин в инертной среде. Исследования омичности контактов по методу Коха–Стрека показали отсутствие выпрямляющего перехода на границе алюминий–ПК, величина переходного удельного сопротивления составила $0.2\text{--}12 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

Номер образца	t , мин	d , мкм	ρ , Ом·см	\bar{R}_H , м ³ /кл
1	20	50	7.2–9.5	–(0.03–0.04)
2	30	56	12.4–24.2	–(0.23–0.28)
3	40	67	27.2–62.6	–(0.69–0.72)
4	60	87	26.6–69.0	–(0.40–0.48)

На рис. 1 показаны температурные зависимости удельного сопротивления ρ и коэффициента Холла R_H для двухслойных структур ПК — кремниевая подложка. Здесь же приведены данные для исходных кремниевых пластин. Как следует из рис. 1, увеличение времени анодной обработки приводит к росту удельного сопротивления двухслойных структур при комнатной температуре. С увеличением температуры удельное сопротивление двухслойных структур по-прежнему превышает удельное сопротивление для исходного монокремния, но характер температурных зависимостей несколько меняется. В отличие от результатов работы [5] коэффициент Холла для двухслойных структур превышал значения для исходного кремния и при комнатной температуре имел величину $(6.9-7.9) \cdot 10^6-3$ м³/Кл.

Для обработки экспериментальных результатов была применена двухслойная модель Петрица [6], которая позволила определить усредненные по объему ПК величины удельного сопротивления $\bar{\rho}$ и коэффициента Холла \bar{R}_H . При вычислениях учитывалось, что разброс удельного сопротивления в партии исходных пластин может достигать 15%. Результаты расчетов по формулам Петрица приведены в таблице и свидетельствуют о том, что усредненное удельное сопротивление слоя ПК превышает удельное сопротивление исходного кремния в 1.5–15 раз. Анализ проводимости ПК в рамках теории эффективной среды показал, что наблюдаемое уменьшение проводимости не может быть объяснено только появлением в кремнии непроводящих пустот. Дополнительные измерения удельного сопротивления ПК в направлениях, параллельном и перпендикулярном оси пор, показали наличие эффекта анизотропии усредненного удельного сопротивления ПК. Описание данного эффекта выходит за рамки данной статьи. Отметим только, что проводимость в направлении, перпендикулярном оси пор, оказалась на два порядка выше проводимости в параллельном направлении.

Для дальнейшей обработки экспериментальных данных была применена модель неоднородного полупроводника с цилиндрическими порами. Поскольку при цилиндрических

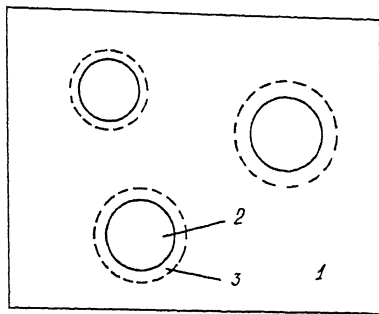


Рис. 2. Области с уменьшенной концентрацией для случая малой пористости. 1 — монокристаллическая матрица, 2 — пора, 3 — обедненная область.

пустотах произвольного сечения, оси которых перпендикулярны электрическому полю и параллельны магнитному полю, измеренный коэффициент Холла равен коэффициенту Холла в полупроводниковой матрице [6], то определенные нами значения \bar{K}_H могут быть отнесены к монокристаллической матрице ПК. При этом следует иметь в виду, что сама монокристаллическая матрица ПК является неоднородной, так как в случае малой пористости процессы обеднения могут происходить только в области, окружающей пору (рис. 2) [1]. Поэтому в данном случае определяемые значения коэффициента Холла будут усреднены по объему монокристаллической матрицы. При этих предположениях результаты, приведенные в таблице, позволяют рассчитать усредненные по объему значения концентрации электронов. Они составили $(1.6-2.1) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ для $t = 20$ мин и $(0.9-2.7) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ для времени обработки от 30 до 60 мин, что позволяет говорить о процессах уменьшения концентрации носителей в изучаемом ПК.

Понятно, что в случае высокой пористости, когда стенки между порами становятся тонкими, концентрация носителей заряда в матрице ПК может приближаться к собственной [1,7]. Наличие обедненных областей вокруг пор позволяет найти объяснение некоторым явлениям. Во-первых, становится понятным тот факт, что получить омические контакты с низким переходным сопротивлением к ПК возможно лишь в случае низкоомного ПК с малой пористостью, когда на поверхности в области контакта существует относительно большая площадь кремния с высокой проводимостью (рис. 2). Во-вторых, появляется объяснение формированию локальных проводящих каналов в высокоомном ПК, которые наряду с краевыми эффектами обуславливают значительные токи утечки в структурах с ПК [8,9]. Такие проводящие каналы в высокоомном ПК могут появляться в ме-

стах неравномерного уменьшения концентрации носителей вследствие неоднородного характера распределения пор по поверхности пластины.

Таким образом, результаты данной работы подтверждают уменьшение концентрации носителей в матрице ПК и показывают, что этот эффект зависит не только от величины пористости, но и от уровня легирования в исходной кремниевой пластине. К сожалению, проведенные измерения эффекта Холла не позволили оценить величину подвижности носителей в ПК, поскольку в неоднородных полупроводниках, содержащих области с различной величиной проводимости, рассчитываемая величина подвижности не является истинной [6,10].

Автор признателен А.Л. Винке за образцы ПК, С.В. Огнетову за помощь при проведении измерений и G. Vomchil (France Telecom CNET) за обсуждение проблемы истощения примеси в ПК.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 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] *Yu L.Z., Wie C.R.* // Electron. Lett. 1992. V. 28. P. 911-913.
- [3] *Zimin S.P., Ovchinnikova L.A., Vorobyev V.V., Prokaznikov A.V., Vinke A.L., Palashov V.N.* // Book of Summaries Int. Conf. ALT-92. Moscow, 1992. Part 3. P.71-73.
- [4] *Биленко Д.И., Абаньшин Н.П., Галашикова Ю.Н. и др.* // ФТП. 1983. Т. 17. С. 2090-2092.
- [5] *Зимин С.П.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 7. С. 55-59.
- [6] *Кучис Е.В.* Гальваномагнитные эффекты и методы их исследования. М.: Радио и связь, 1990. 264 с.
- [7] *Винке А.Л., Зимин С.П., Палашов В.Н.* Способ изготовления i -области. Положительное решение по заявке на патент № 93002634 от 13.01.93.
- [8] *Зимин С.П., Кузнецов В.С., Перч Н.В., Проказников А.В.* // Письма в ЖТФ. 1994. Т. 20. В. 22. С. 22-26.
- [9] *Авербух В.Я., Андрианов А.В., Беляков Л.В. и др.* // ФТП. 1995. Т. 29. С. 627-634.
- [10] *Блад П., Ортон Дж. В.* // Зарубежная радиоэлектроника. 1981. В. 1. С. 3-50.

Ярославский государственный
университет

Поступило в Редакцию
20 июля 1995 г.