

Модификация высоты барьера в диодах Шоттки на кремнии при использовании сильно легированных 3D- и 2D-слоев

© А.В. Мурель[¶], А.В. Новиков, В.И. Шашкин, Д.В. Юрасов

Институт физики микроструктур Российской академии наук,
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 25 апреля 2012 г. Принята к печати 25 апреля 2012 г.)

Экспериментально исследована возможность управления эффективной высотой барьера в диодах Шоттки на кремниевых структурах, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии. Показано, что управление возможно как при использовании сильно легированных поверхностных однородных (3D) слоев ($\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$), так и приповерхностных (2D) δ -слоев ($\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$), обеспечивающих туннельное прохождение тока через барьер на границе металл–полупроводник. Изучены зависимости эффективной высоты барьера от параметров сильно легированных слоев. Проведенное моделирование электронного транспорта в структурах позволило качественно объяснить наблюдаемые экспериментальные результаты.

1. Введение

Для систем радиовидения в миллиметровом диапазоне длин волн необходимы чувствительные матричные приемники. В качестве чувствительных элементов в них используются полупроводниковые диоды с пониженной высотой барьера, которые обеспечивают детектирование без напряжения смещения. Как показано теоретически и подтверждено экспериментами, оптимальная эффективная высота барьера таких диодов должна лежать в диапазоне 0.25–0.3 эВ [1].

Существуют два пути управления высотой барьера в диодах Шоттки. Первый — уменьшение плотности поверхностных состояний на границе металл–полупроводник, что должно приводить к откреплению уровня Ферми, и тогда высота барьера определяется разностью величин электронного сродства металла и полупроводника. Как показала практика, это не удается реализовать в полной степени. Второй путь — создание тонкого сильно легированного слоя на границе металл–полупроводник. В этом случае перенос носителей облегчается их туннелированием через узкий потенциальный барьер в сильно легированном слое. С этой целью находят применение как тонкие (до $\sim 6 \text{ нм}$) однородно легированные n^{++} -слои [2], так и δ -легированные слои, расположенные на расстоянии нескольких нанометров от границы металл–полупроводник [3]. Точным подбором уровня легирования и расстояния до границы можно осуществить управление эффективной высотой барьера модифицированных таким способом диодов Шоттки. Это показано теоретически и подтверждено экспериментально для диодов, изготовленных из арсенида галлия [4]. В данной работе представлены экспериментальные результаты по управлению эффективной высотой барьера диодов Шоттки на основе селективно-легированных сурьмой кремниевых структур, выращенных методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ).

2. Эксперимент

Образцы были выращены на высоковакуумной установке МПЭ Riber Siva-21. Базовое давление в камере роста составляло $< 5 \cdot 10^{-11}$ мбар. Осаждение Si осуществлялось с помощью электронно-лучевого испарителя со скоростью 0.1 нм/с. Скорость роста и толщины слоев кремния контролировались с помощью квадрупольного масс-спектрометра и кварцевого датчика измерения толщины. Сурьма испарялась из эффузионной ячейки. Контроль состояния поверхности проводился *in situ* с помощью метода дифракции быстрых электронов (ДБЭ). Температура роста измерялась инфракрасным пирометром (для температур $> 500^\circ\text{C}$) и термопарой. Для получения Si:Sb-структур с сильно легированными и δ -легированными слоями использовалась методика селективного легирования, подробно изложенная в [5].

В эксперименте по модификации высоты барьера были изучены два типа структур, показанные на рис. 1. На сильно легированных подложках выращивались последовательно сильно легированный буферный и нелегированный базовый слои, которые завершались слоями, обеспечивающими модификацию эффективной высоты барьера металл–полупроводник (с однородным n^{++} -слоем — 3D-легированная структура, с δ -слоем —

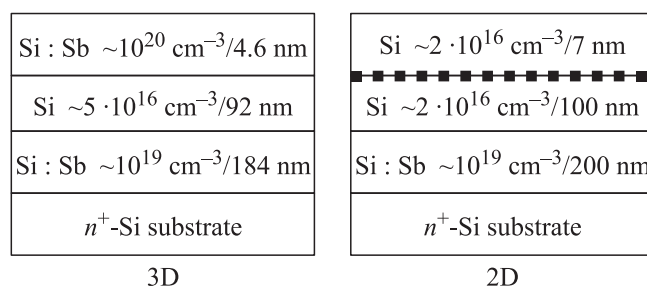


Рис. 1. Схема роста 3D-структуры с тонким однородным сильно легированным поверхностным слоем (n^{++} - n) и 2D-структуры с приповерхностным δ -легированным Si:Sb слоем. Квадратами показано положение δ -слоя Sb.

[¶] E-mail: murel@ipm.sci-nnov.ru

2D-легированная структура). Толщина и глубина залегания этих слоев выбирались заведомо больше оптимальных для получения низкобарьерных диодов. Уменьшение толщины поверхностных слоев достигалось их прецизионным травлением за счет циклического окисления Si в растворе $H_2SO_4:H_2O_2$ и удаления окисла в растворе $NF:H_2O$. Толщина стравленного слоя определялась измерением величины ступеньки на оптическом интерференционном микроскопе „Talysurf“. Таким методом удавалось стравливать слои толщиной ~ 1 нм. Контакты диаметром 20–500 мкм формировались с использованием термического напыления алюминия и фотолитографии. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись на автоматизированной установке, позволяющей регистрировать токи от 10^{-13} А в диапазоне температур от 80 до 360 К.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. 3D-структура

Данный метод управления эффективной высотой барьера в диодах Шоттки был развит в экспериментальных работах по созданию n^{++} -слоев методом имплантации и эпитаксиального роста и теоретически обоснован в [3]. На рис. 2 показана трансформация вида ВАХ, происходящая по мере уменьшения толщины верхнего n^{++} -слоя, связанная с изменением механизмов токопереноса в структуре. Кривая 1 является исходной и представляет ВАХ неплавного омического контакта, обусловленного эффективным туннелированием носителей через тонкий барьер. Измерение удельного контактного сопротивле-

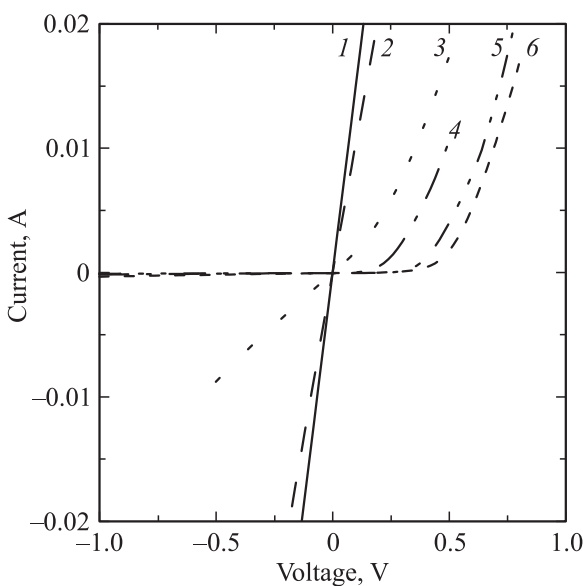


Рис. 2. Последовательное (1–6) изменение ВАХ при уменьшении толщины верхнего однородного n^{++} -слоя (структура 3D). Диаметр контакта 50 мкм.

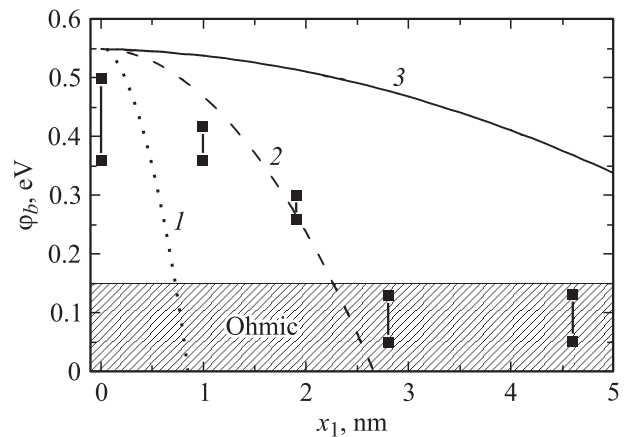


Рис. 3. Рассчитанное изменение высоты барьера при изменении толщины n^{++} -слоя для концентрации доноров, cm^{-3} : 1 — 10^{21} , 2 — 10^{20} , 3 — 10^{19} . Символами показаны экспериментальные результаты. Нижний предел определения высоты барьера из ВАХ установлен на уровне ~ 0.15 эВ.

ния по методу Кокса–Стрека (для контактов разной площади) дает значение $(2–3) \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^{-2}$. По мере уменьшения толщины n^{++} -слоя путем его травления происходит смена механизма проводимости на термополевой, что проявляется в появлении несимметричных токовых характеристик. Применив формулу (1) для расчета изменения высоты барьера [3], можно построить его зависимость от толщины слоя при различных уровнях легирования (рис. 3, кривые 1–3):

$$\phi_b \approx \phi_{b0} - \frac{qN_{d1}}{2\epsilon\epsilon_0} x_1^2, \quad (1)$$

где ϕ_{b0} — высота барьера для диода Al/Si, которая из эксперимента для однородно легированного слоя равнялась ~ 0.55 эВ; q — заряд электрона; ϵ_0, ϵ — диэлектрическая проницаемость вакуума и полупроводника соответственно; N_{d1}, x_1 — концентрация и толщина сильно легированного слоя.

Видно, что экспериментальные данные (рис. 3, символы) совпадают с расчетом при концентрации доноров 10^{20} см^{-3} в n^{++} -слое, что согласуется с экспериментальными данными по масс-спектропии вторичных ионов.

3.2. 2D-структура

Встраивание δ -слоя вблизи границы раздела металл–полупроводник также приводит к формированию узкого потенциального барьера треугольной формы и соответственно к появлению туннельной составляющей тока, как и в предыдущем случае. На рис. 4, а показана трансформация экспериментальных ВАХ при уменьшении глубины залегания δ -слоя, происходящем при последовательных шагах стравливания. Теория таких низкобарьерных диодов детально рассмотрена в работе [4]. Применение ее к кремниевым диодам Шоттки позволило

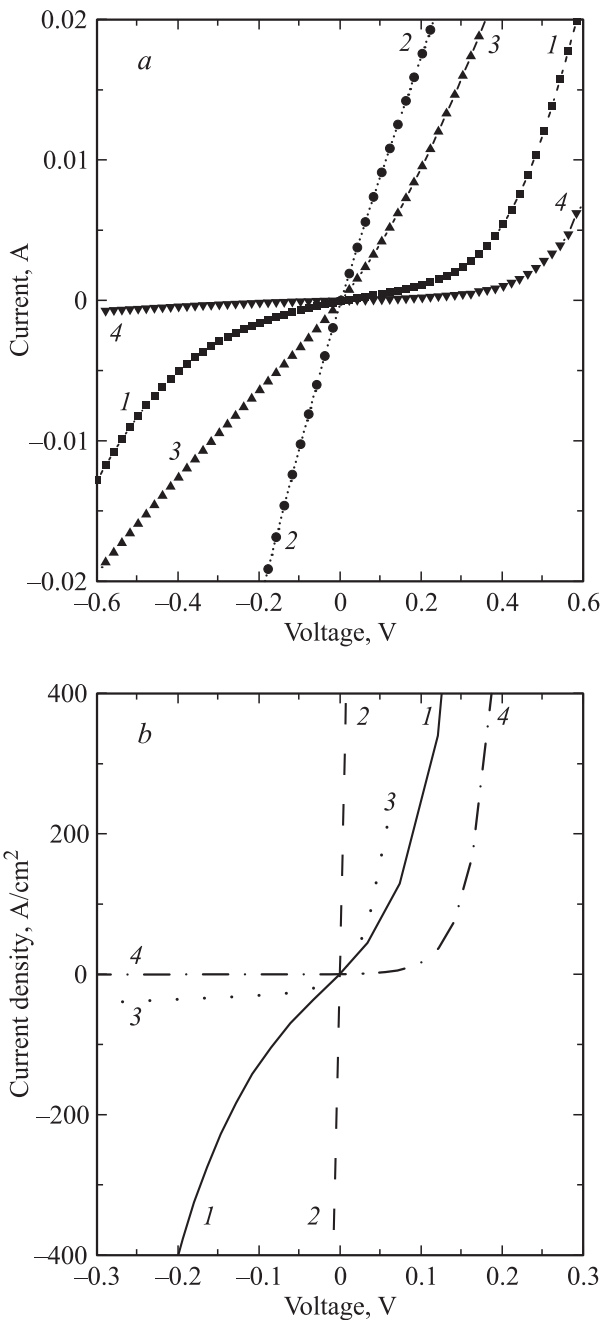


Рис. 4. *a* — последовательное (1–4) изменение ВАХ при уменьшении глубины залегания δ -слоя (структура 2D). Диаметр контакта 50 мкм. *b* — рассчитанные ВАХ при различной глубине залегания δ -слоя, нм: 1 — 7, 2 — 4, 3 — 2, 4 — 1. Поверхностная концентрация доноров в δ -слое 10^{13} см^{-2} .

рассчитать теоретические ВАХ, которые представлены на рис. 4, *b*. В расчете высота исходного барьера полагалась равной 0.6 эВ, поверхностная концентрация доноров в δ -слое — 10^{13} см^{-2} . Наглядное представление о происходящей смене механизмов переноса носителей через границу Al/n-Si можно получить из рассмотрения рис. 5, где представлен рассчитанный с помощью программы [6] ход края зоны проводимости в зависимости

от глубины залегания δ -слоя применительно к данному случаю.

В исходной структуре δ -слой располагается достаточно глубоко от поверхности ($\sim 7 \text{ нм}$) и образует потенциальную яму, заполненную электронами (рис. 5, кривая 1). При этом образуется широкий потенциальный барьер. Характер токопереноса — термоэмиссионный или термополевой с максимумом прошедших электронов близи вершины барьера, что и приводит к почти симметричной ВАХ (рис. 4, кривые 1). При стравливании, по мере приближения δ -слоя к границе Al/Si положение максимума прошедших электронов снижается. При некоторой толщине верхнего нелегированного Si слоя реализуется туннельное прохождение электронов вблизи уровня Ферми E_{FS} (рис. 5, кривая 2). ВАХ при этом становится линейной и отвечает омическому контакту (рис. 4, кривые 2). Дальнейшее приближение δ -слоя к

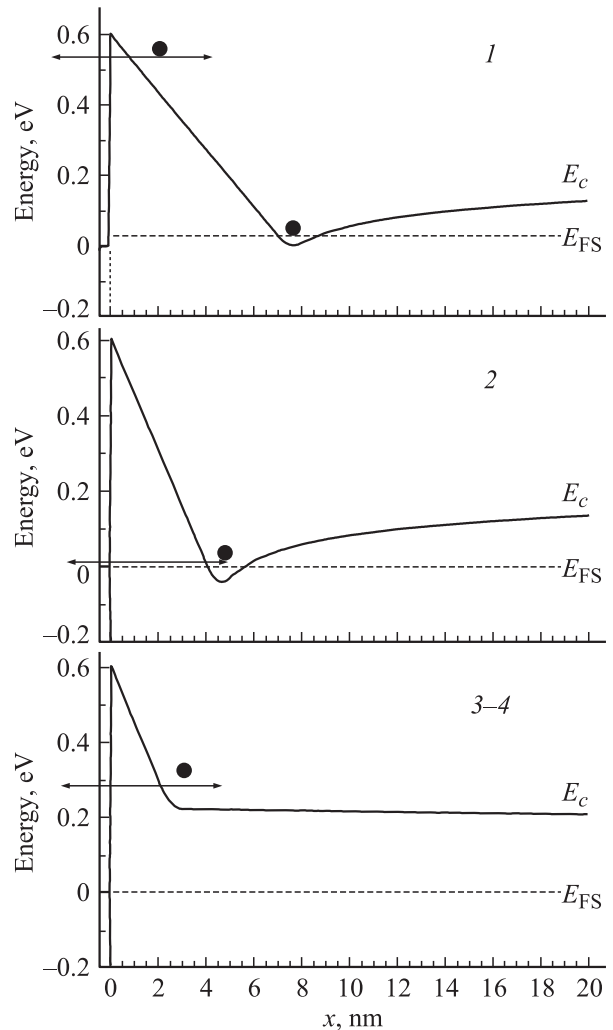


Рис. 5. Рассчитанное изменение потенциального рельефа на границе с металлом при последовательном приближении δ -слоя (2D) к поверхности кремния (1–4). Значение поверхностной концентрации доноров N_{2D} в δ -слое выбрано равным 10^{13} см^{-2} .

металлу приводит к его обеднению носителями (рис. 5, рельеф 3–4), преобладанию термополевого механизма и выпрямляющему виду ВАХ (рис. 4, кривые 3 и 4). При этом в зависимости от глубины залегания обедненного δ -слоя можно получить промежуточные значения эффективной высоты барьера, что приближенно описывается формулой

$$\varphi_b \approx \varphi_{b0} - \frac{qN_{2D}}{\varepsilon\varepsilon_0} x_0, \quad (2)$$

где N_{2D} , x_0 — поверхностная концентрация и глубина залегания δ -слоя соответственно.

Как видно из сравнения рис. 4, *a* и *b*, теория качественно предсказывает изменение ВАХ. Некоторые отличия связаны с тем, что в расчетах не учтены последовательное сопротивление и ряд дополнительных факторов неидеальности реальных диодов.

Основной результат работы состоит в том, что показано, как при сильном поверхностном (3D-легирование) или приповерхностном δ -легировании (2D-легирование) в структурах металл–полупроводник на основе кремния можно контролируемо снижать величину эффективной высоты барьера Шоттки и в предельном случае формировать омический контакт.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования России (ГК 16.552.11.7007), программы президиума РАН „Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов“ и проекта РФФИ № 11-02-00700_a.

Список литературы

- [1] V.I. Shashkin, Y.A. Drjagin, V.R. Zakamov, S.V. Krivov, L.M. Kukin, A.V. Murel, Y.I. Chechenin. *Int. J. Infr. Milliwaves*, **28**, 945 (2007).
- [2] T. Hariu, Y. Shibata. *Proc. IEEE*, **63**, 1523 (1975).
- [3] H.J. Gossmann, E.F. Schubert. *Critical Rev. Solid State and Mater. Sci.*, **18**, 1 (1993).
- [4] В.И. Шашкин, А.В. Мурель. *Микроэлектроника*, **39**, 348 (2010).
- [5] D.V. Yurasov, M.N. Drozdov, A.V. Murel, M.V. Shaleev, N.D. Zakharov, A.V. Novikov. *J. Appl. Phys.*, **109**, 113 533 (2011).
- [6] I.H. Tan, G.L. Snider, E.L. Hu. *J. Appl. Phys.*, **68**, 4071 (1990).

Редактор Л.В. Беляков

Barrier height modification in the Schottky silicon diodes using high-doped 3D- and 2D-layers

A.V. Murel, A.V. Novikov, V.I. Shashkin, D.V. Yurasov

Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The possibility to control the effective barrier height in Schottky diodes on silicon structures grown by molecular beam epitaxy is experimentally investigated. It is shown that the control is possible by using a homogeneous heavily doped surface (3D) layers ($\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) and a surface (2D) delta-layers ($\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}$), providing the tunnel current flow through the barrier at the metal–semiconductor interface. Dependences of the effective barrier height on the parameters of heavily doped layers are studied. The simulation of electron transport in the structures has given a qualitative explanation of the observed experimental results.