

Влияние изотропного давления на вольт-амперную характеристику поверхностно-барьерных диодов $Sb-p-Si\langle Mn \rangle-Au$

© С. Зайнабидинов, И.Г. Турсунов, О. Химматкулов

Национальный университет Узбекистана,
100174 Ташкент, Узбекистан
E-mail: ikromjon0804@gmail.com

(Получена 14 ноября 2017 г. Принята к печати 29 ноября 2017 г.)

Исследовано влияние гидростатического давления на вольт-амперные характеристики поверхностно-барьерных диодных структур типа $Sb-p-Si(Mn)-Au$. Определена высота потенциального барьера ($e\phi_s = 0.75$ эВ) и барический коэффициент ее изменения ($\delta = -1.54 \cdot 10^{-11}$ эВ/Па).

DOI: 10.21883/FTP.2018.08.46215.8765

1. Введение

В последнее время все чаще применяются полупроводниковые тензодатчики с барьером Шоттки, отличающиеся высокой чувствительностью, широким частотным диапазоном, малыми размерами и простотой изготовления. Установлено, что поверхностно-барьерные диоды чувствительны к неоднородному давлению и в ряде случаев их чувствительность оказывается заметно выше, чем чувствительность $p-n$ -переходов [1].

Исследование влияния давления на характеристики полупроводниковых приборов, в частности поверхностно-барьерных диодных структур, представляет интерес как для изучения тензоэффекта и механизмов его проявления в данных структурах с целью создания чувствительных к внешнему давлению приборов, так и для испытания надежности работы данных структур в условиях внешнего давления.

Цель настоящей работы — изучение вольт-амперной характеристики поверхностно-барьерных диодов $Sb-p-Si(Mn)-Au$ при всестороннем гидростатическом давлении.

2. Методика эксперимента

Нами исследовано влияние всестороннего гидростатического сжатия (ВГС) в статическом режиме воздействия на вольт-амперную характеристику (ВАХ) поверхностно-барьерных диодов типа $Sb-p-Si(Mn)-Au$, в качестве базы которых использована компенсированная Mn кремниевая пластина дырочного типа проводимости с удельным сопротивлением $\rho = 300$ Ом·см. Диодные структуры были изготовлены напылением золота и сурьмы на противоположные грани пластины с большой поверхностью, перпендикулярной к кристаллографической оси [111]. Выпрямляющий контакт создавался на границе раздела $Sb-p-Si(Mn)$. Вольт-амперную характеристику поверхностно-барьерных диодов под давлением исследовали с помощью установки гидростатического давления с пневмоусилителем [2] в диапазоне давления $P = (0 \div 5) \cdot 10^8$ Па при температуре $T = 300$ К.

3. Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены ВАХ полученных диодных структур при значениях ВГС $P = 0$ Па (кривая 1) и $P = 5 \cdot 10^8$ Па (кривая 2) в статическом режиме воздействия. Видно, что ток как при прямом, так и при обратном напряжениях смещения растет пропорционально давлению. Точковая чувствительность к ВГС данных структур при одинаковых приложенных напряжениях в прямом направлении больше, чем в обратном.

Следует отметить, что чувствительность к ВГС по току, как при прямом, так и при обратном смещениях

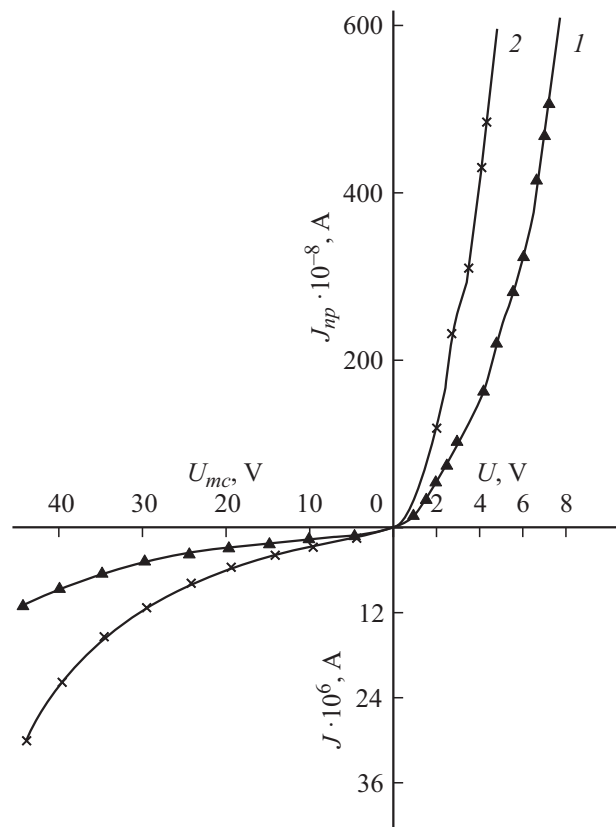


Рис. 1. ВАХ ПБД структур : 1 — $Sb-p-Si(Mn)-Au$; 1 — $P = 0$, 2 — $P = 5 \cdot 10^8$ Па.

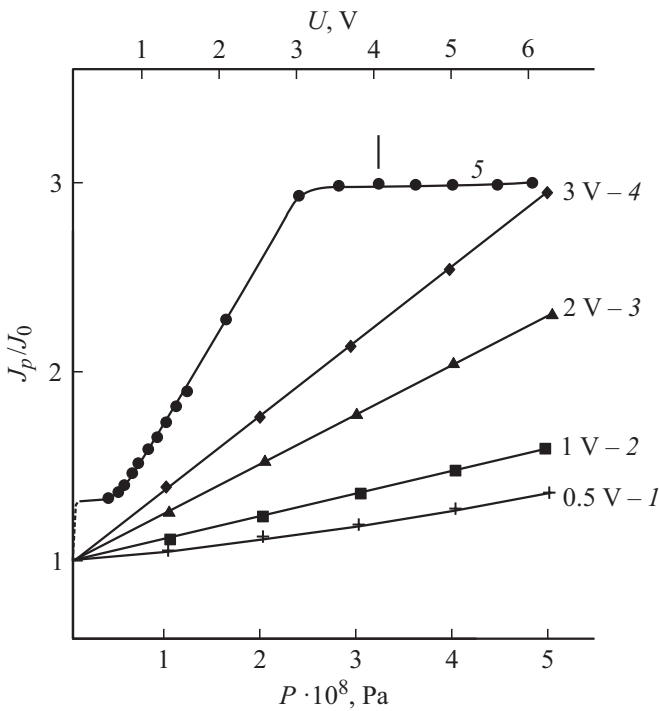


Рис. 2. Зависимость относительного изменения тока прямой ветви ВАХ ПБД Sb–p-Si(Mn)–Au от статического ВГС (1–4) и напряжения (5).

зависит от значения приложенного напряжения. На рис. 2 приведены зависимости прямого тока структуры в относительных единицах от приложенного давления в диапазоне $P = (0 \div 5) \cdot 10^6$ Па при напряжениях смещения $U = 0.5, 1, 2$ и 3 В и зависимость $J_p/J_0 = f(U)$ при $P = 5 \cdot 10^6$ Па. Видно, что тензотоки данных поверхностно-барьерных диодов (ПБД) сильно зависят от приложенного напряжения смещения U , при этом относительное значение токов J_p/J_0 возрастает с ростом U (кривые 1–4). Из кривой 5 видно, что в зависимостях $J_p/J_0 = f(U)$ наблюдаются три характерных участка. В диапазоне напряжений до $U = 0.5$ В токовая чувствительность структуры постоянна и равна $J_p/J_0 = 1.35$.

Далее с увеличением напряжения до $U = 3$ В отношение J_p/J_0 линейно растет. С дальнейшим увеличением напряжения ($U \geq 3$ В) чувствительность по току данных структур не изменяется и $J_p/J_0 = 3$.

Как известно [3], перенос заряда через выпрямляющий контакт металл-полупроводник осуществляется в большинстве случаев основными носителями в отличие от $p-n$ -переходов, где электрический ток обусловлен неосновными носителями. В ряде случаев, особенно для полупроводников p -типа, существенным оказывается и вклад инжекции носителей тока из металла в полупроводник, при этом значение коэффициента инжекции растет при увеличении напряжения [4,5].

Плотность тока в обоих случаях через идеальный поверхностно-барьерный диод можно определить из вы-

ражения [4]

$$j = j_0[\exp(qU/kT - 1)], \tag{1}$$

где j_0 — плотность тока насыщения для термоэлектронной эмиссии:

$$j_0 = A^* T^2 \exp(-q\phi_s/kT). \tag{2}$$

где ϕ_s — высота потенциального барьера.

Имеется ряд процессов, приводящих к отклонению ВАХ от идеальной (1). К ним относятся: рекомбинация и генерация носителей тока в области пространственного заряда (ОПЗ), снижение высоты потенциального барьера из-за электростатических сил изображения, туннелирование носителей тока через поверхностные состояния, наличие тонкой диэлектрической пленки между металлом и полупроводником [6]. Для всех этих процессов зависимость тока от напряжения при прямых смещениях может быть приближенно описана выражением

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right], \tag{3}$$

где n — коэффициент неидеальности.

Механизм токопрохождения в исследованных диодах тоже зависит от приложенного напряжения. На рис. 3 приведены прямые ветви ВАХ поверхностно-барьерных диодов Sb–p-Si(Mn)–Au в логарифмическом масштабе для двух значений давления: $P = 0$ Па (кривая 1) и $P = 5 \cdot 10^8$ Па (кривая 2). Видно, что прямая ВАХ данных ПБД аналогична ВАХ $p-n$ -перехода, учитывающей сопротивление базы и уровень инжекции, состоит в основном из четырех участков. В области малых токов, когда основная часть приложенного напряжения падает на

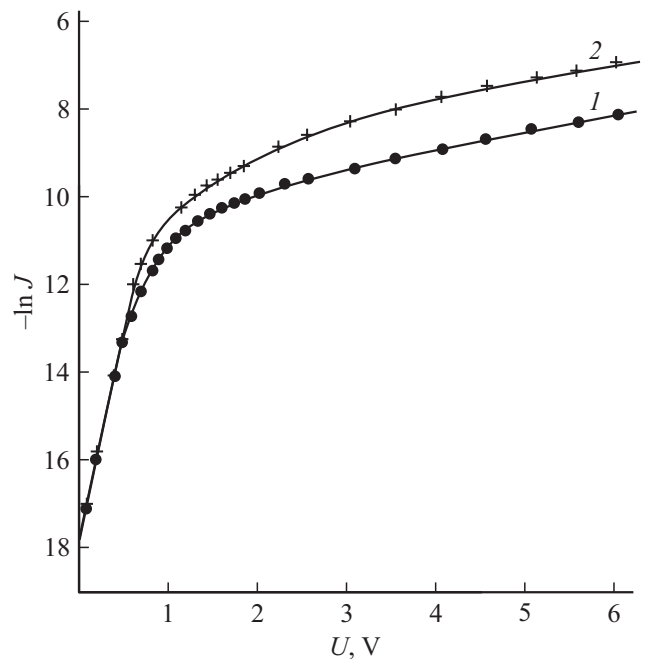


Рис. 3. Прямая ВАХ ПБД Sb–p-Si(Mn)–Au: 1 — $P = 0$, 2 — $P = 5 \cdot 10^8$ Па.

сопротивлении барьера, т.е. в нашем случае $U < 0.5$ В и J_p/J_0 ВАХ можно описывать с помощью выражения (3). В координатах $\ln J$ от U этот участок ВАХ представляет собой отрезок прямой линии с тангенсом угла наклона к оси напряжений, равным q/nkT (рис. 3).

Далее с увеличением тока через диод падение напряжения на базе диода линейно растет, $U_\sigma = JR_\sigma$ и приложенное напряжение перераспределяется между базой и барьером Шоттки (БШ): $U = U_0 + U_{\sigma m}$, где $U_{\sigma m} = kT \ln(J/J_0 + 1)/q$, так как база использованных ПБД является компенсированной. Этот участок ВАХ ($0.5 < U < 1$ В), где значение прямого тока под всесторонним давлением растет, описывается выражением

$$J = J_0 \left[\exp \left(q \frac{U - JR_\sigma}{kT} \right)^{-1} \right]. \quad (4)$$

Затем должен быть участок, соответствующий переходу от низкого уровня инжекции к высокому ($1 \leq U \leq 3$ В).

Последний участок ВАХ поверхностно-барьерного диода ($U \geq 3$ В), где инжекция носителей тока играет существенную роль и токовая чувствительность имеет максимальное и постоянное значение, описывается, согласно [7], выражением

$$J = J_0 \exp \left(\frac{qU}{ckT} \right). \quad (5)$$

В координатах $\ln J$ от U этот участок ВАХ представляет собой отрезок прямой линии с тангенсом угла наклона к оси U , равным q/ckT (рис. 3).

В области малых токов, когда ВАХ ПБД Sb-p-Si(Mn)-Au можно описывать выражением (3) согласно [4,8], и можно вычислить высоту потенциального барьера с помощью выражения

$$\varphi_c = \frac{kT}{q} \ln \frac{A^* T^2}{J_0}, \quad (6)$$

где $A^* = 79.2$ — постоянная Ричардсона для дырок, J_0 — ток насыщения, определяемый из эксперимента. Расчеты показали, что постоянная Ричардсона при всестороннем сжатии до $P = 5 \cdot 10^8$ Па изменяется всего на $\sim 1\%$.

На рис. 4 приведена зависимость высоты потенциального барьера от значения приложенного ВГС в диапазоне давлений $P = (0 \div 5) \cdot 10^8$ Па и при $T = 300$ К, вычисленная по формуле (6). При этом J_0 определялась, согласно [4], линейной экстраполяцией прямой ветви ВАХ ($U < 0.5$ В) к $U = 0$ В. Видно, что значение высоты потенциального барьера при $P = 0$ Па $e\varphi_\delta = 0.75$ В и она линейно уменьшается с ростом ВГС. При этом барьерный коэффициент этого изменения составляет $\delta = -1.54 \cdot 10^{-11}$ эВ/Па и практически точно совпадает с литературными данными для барьерного коэффициента изменения ширины запрещенной зоны кремния, равной $-1.5 \cdot 10^{-11}$ эВ/Па [9]. Поэтому можно предположить, что изменение высоты барьера при ВГС в

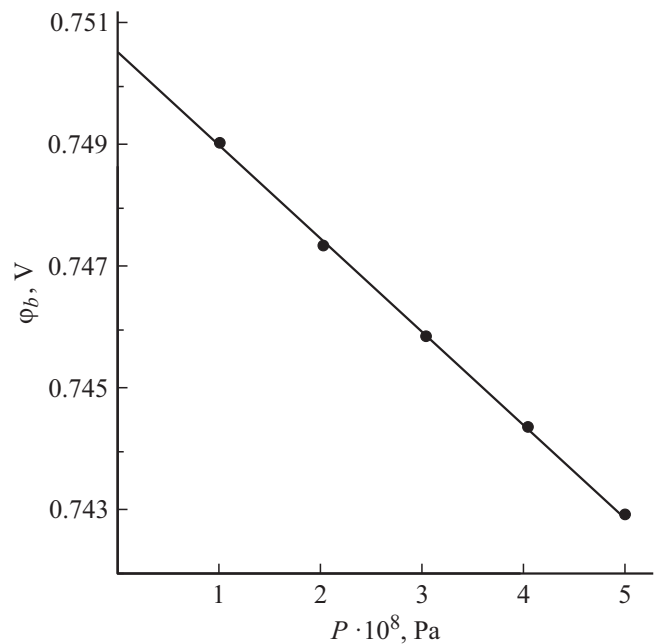


Рис. 4. Зависимость высоты потенциального барьера ПБД Sb-p-Si(Mn)-Au от статического ВГС.

данных структурах в основном обусловлено изменением ширины запрещенной зоны кремния.

Расчеты с использованием экспериментальных данных показали, что во всем диапазоне напряжений изменение прямого тока под ВГС нельзя объяснить только изменением концентрации дырок в базе диода.

Токовые чувствительности, определенные, согласно работе [9], как $\gamma = J_0^{-1} dJ/dP$ и $\gamma = q(kT)^{-1} d\varphi_\delta/dP$, в области малых токов составили соответственно $6.56 \cdot 10^{-10}$ и $7.28 \cdot 10^{-10}$ Па, что позволяет предположить то, что при малых смещениях $J \leq 0.5$ В изменение тока обусловлено в основном изменением потенциального барьера.

Как было сказано выше, с увеличением тока через диод напряжение на базе диода растет и изменение проводимости базы под ВГС приводит к перераспределению приложенного в прямом направлении напряжения между базой и барьером структуры. Поэтому можно предположить, что к дальнейшему увеличению токовой чувствительности существенным является вклад положительной обратной связи в области БШ, т.е. под давлением происходит перераспределение напряжения и увеличение напряжения на барьере приводит к увеличению тока структуры [10,11].

4. Заключение

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Показано, что при $U_d < 0.5$ В основным механизмом переноса тока является термоэлектронная эмиссия

носителей тока через барьер, и изменение прямого тока при ВГС обусловлено в основном изменением потенциального барьера. При напряжениях $0.5 < U < 3$ В изменение тока обусловлено в основном внутренней барической положительной обратной связью, проявляющейся при ВГС.

2. Определены высота потенциального барьера и барический коэффициент ее изменения, которые оказались равными $e\phi_\delta = 0.75$ эВ и $\delta = -1.54 \cdot 10^{-11}$ эВ/Па. Показано, что изменение высоты потенциального барьера при ВГС обусловлено изменением ширины запрещенной зоны Si.

3. Следует отметить, что чувствительность как прямого, так и обратного токов к ВГС зависит от приложенного на диод напряжения, т.е. чувствительность растет с ростом приложенного напряжения. Чувствительность прямого тока к ВГС больше, чем чувствительность обратного тока при одинаковых напряжениях.

Список литературы

- [1] М.И. Елинсон, В.И. Поколякин, А.Л. Полякова, Г.В. Степанов, В.В. Шкловская-Корди. РЭ, **15** (1), 210 (1970).
- [2] А. Абдураимов, С.З. Зайнабидинов, О.О. Маматкаримов, О. Химматкулов, Т.Э. Худайбергенов. ПТЭ, **5**, 229 (1988).
- [3] В.И. Стриха, Е.В. Бузанева, И.А. Радзиевский. *Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки* (М, Сов. радио, 1974).
- [4] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М, Мир, 1984), т. 1.
- [5] Р. Смит. *Полупроводники* (М, Мир, 1982).
- [6] А. Абдураимов, С. Зайнабидинов, О.О. Маматкаримов, А. Саидхонов, И.Г. Турсунов, О. Химматкулов. Узб. физ. журн., **5**, 56 (1993).
- [7] А. Абдураимов, С.З. Зайнабидинов, О.О. Маматкаримов, О. Химматкулов. Узб. физ. журн. **5**, 47 (1993).
- [8] А. Абдураимов, А. Тешабоев, О.О. Маматкаримов, О. Химматкулов. Тез. докл. I нац. конф. „Дефекты в полупроводниках“ (Санкт-Петербург, 1992) с. 155.
- [9] П.С. Киреев. *Физика полупроводников* (М., Высш. шк., 1969).
- [10] И.М. Викулин, В.И. Стафеев. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Радио и связь, 1990).
- [11] А. Абдураимов, С.З. Зайнабидинов, О.О. Маматкаримов, О. Химматкулов. ФТП, **27** (7), 1216 (1993).

Редактор А.Н. Смирнов

Influence of Isotropic Pressure on the volt-ampere characteristics of surface barrier diodes Sb–p-Si⟨Mn⟩–Au

S. Zainabidinov, O. Khimmatkulov, I.G. Tursunov

National University of Uzbekistan,
100174 Tashkent, Uzbekistan

Abstract The effect of hydrostatic pressure volt-ampere characteristics of the surfactant type diode structures Sb–p-Si⟨Mn⟩–Au. The height of the potential barrier and the baric coefficient of its change were determined, which turned out to be equal to $e\phi_\delta = 0.75$ eV and $\delta = -1.54 \cdot 10^{-11}$ eV/Pa.