

©1995 г.

ВЫСОТА БАРЬЕРА В ДИОДАХ ШОТТКИ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ n -SiC-6H

*А.Н.Андреев, А.А.Лебедев, М.Г.Растегаева, Ф.М.Снегов, А.Л.Сыркин,
В.Е.Челноков, Л.Н.Шестопалова*

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 30 января 1995 г. Принята к печати 8 февраля 1995 г.)

Исследовались поверхностно-барьерные структуры металл- n -SiC-6H (металл; Au, Mo, Cr или Al) в диапазоне концентраций некомпенсированной донорной примеси $N_d - N_a = 4 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. При $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ экспериментально определенная средняя величина барьера составила $\sim 1.40, 1.30, 1.22$ и 1.26 эВ в диодах Шоттки на основе золота, молибдена, хрома и алюминия соответственно. В этих структурах обнаружена тенденция к образованию более низкого барьера при увеличении $N_d - N_a$. Используемая методика формирования барьеров Шоттки, включающая кратковременную обработку в KOH поверхности, полученной после роста эпитаксиальных слоев или предварительно сублимационного травления подложек, приводит к значительной плотности поверхностных состояний, вследствие чего зависимость высоты барьера от работы выхода является слабой. Проведен сравнительный анализ полученных результатов и экспериментальных данных различных авторов по высоте барьера. В рамках классической модели проведен расчет высоты барьера в структурах металл- n -SiC-6H.

1. Введение

Поверхностно-барьерные структуры на основе n -SiC-6H широко применяются при изготовлении карбид-кремниевых приборных структур различного назначения [1-5], позволяют изучать поверхностные свойства, процессы, связанные с лавинным умножением [6], диффузионные длины неосновных носителей заряда [7,8] и другие характеристики полупроводника. Многообразие возможностей использования структур металл- n -SiC-6H обуславливает интерес к их исследованию.

Важным параметром диодов Шоттки, изучению которого посвящен целый ряд работ [9-17], является высота барьера (Φ_b). Значения Φ_b , экспериментально полученные различными авторами, имеют значительный разброс. Так с одной стороны, при изучении барьеров Шоттки на поверхности SiC-6H, полученной сколом в условиях высокого

вакуума [12], зависимость высоты барьера от работы выхода электро-на из металла (Φ_m) не наблюдалось ($\Phi_b \sim 1.45$ эВ для золота, алюминия и серебра). С другой стороны, в [9,10] обнаружена достаточно сильная зависимость $\Phi_b = \Phi_b(\Phi_m)$: высота барьера увеличивалась от 0.35 эВ для магния ($\Phi_m = 3.6$ эВ) до 1.4 эВ для золота ($\Phi_m = 5.1$ эВ). Подготовка поверхности в этих работах включала предварительное окисление с последующим удалением окисла химическим травлением, отмывку и отжиг в высоком вакууме. Таким образом, для алюминия, например, высота барьера изменяется от 0.3 эВ [9,10] до 1.4 эВ [12]. Различия, получаемые авторами в определении высоты барьера, обусловлены, вероятно, сильной зависимостью поверхностных свойств карбида кремния от способа обработки поверхности и технологии изготовления металлического контакта.

В настоящей работе исследовались барьеры Шоттки к n -SiC-6H на основе золота, молибдена, хрома, алюминия. В отличие от наиболее часто используемых методик, включающих предварительное окисление, при создании поверхностно-барьерных структур использовалась кратковременная обработка в расплаве щелочи поверхности, полученной непосредственно после роста эпитаксиальных слоев или сублимационного травления подложек. Исследование поверхностно-барьерных структур проводилось, в том числе, и на образцах с достаточно высокими значениями концентрации некомпенсированной донорной примеси ($N_d - N_a$), при которых можно ожидать, что высота барьера будет зависеть от концентрации (см., например, [18]). Чтобы оценить зависимость $\Phi_b = \Phi_b(N_d - N_a)$, был проведен ее теоретический расчет. Кроме того, рассчитана зависимость высоты барьера от плотности поверхностных состояний и параметров диэлектрического слоя на границе металл-полупроводник.

2. Расчет высоты барьера

Для расчета высоты барьера в структурах металл- n -SiC-6H была использована модель [18,19], обобщающая теории Бардина и Шоттки-Мотта и позволяющая удовлетворительно описывать свойства поверхностно-барьерных структур на основе ковалентных полупроводников. Согласно [18], выражение для высоты барьера может быть записано следующим образом:

$$\Phi_b = C_2(\Phi_m - \chi) + (1 - C_2) \left(\frac{E_g}{q} - \Phi_0 \right) - \Delta\Phi + \left\{ \frac{1}{2} C_2^2 C_1 - C_2^{3/2} \left[C_1(\Phi_m - \chi) + (1 - C_2) \left(\frac{E_g}{q} - \Phi_0 \right) \frac{C_1}{C_2} - \frac{C_1}{C_2} \left(\xi + \frac{kT}{q} \right) + \frac{1}{4} C_2 C_1^2 \right]^{1/2} \right\}, \quad (1)$$

где q — заряд электрона; χ — электронное сродство полупроводника; E_g — ширина запрещенной зоны полупроводника (в соответствии с [20-22] $E_g = 3.02 - 4.8 \cdot 10^{-4} T^2 / (T + 375)$, эВ; $T = 300$ К); Φ_0 — энергетический уровень на поверхности; ξ — расстояние от дна зоны проводимости до уровня Ферми, $\xi = kT \ln(n/N_c)$, n — концентрация носителей

в зоне проводимости, N_c — плотность состояний в зоне проводимости: $N_c = 2(2\pi m_e kT / (h^2))^{3/2} M_c$, m_e — эффективная масса электрона $m_e = 0.6m_0$ [18], m_0 — масса электрона, M_c — число эквивалентных минимумов в зоне проводимости ($M_c = 3$ [23]); $\Delta\Phi$ — понижение высоты барьера за счет силы изображения:

$$\Delta\Phi = \left[\frac{q^3(N_d - N_a)(\Phi_{b0} - kT/q)}{8\pi^2 \epsilon_d^2 \epsilon_s \epsilon_0^3} \right]^{1/4},$$

$\epsilon_s = 9.8$ [24] и $\epsilon_d = 6.7$ [25] — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника на низких и на оптических частотах соответственно; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума. Величины C_1 и C_2 определяются следующим образом:

$$C_1 = \frac{2q\epsilon_s(N_d - N_a)\delta^2}{\epsilon_0\epsilon_i^2}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_0\epsilon_i}{\epsilon_0\epsilon_i + q^2\delta D_s},$$

δ — толщина промежуточного слоя между металлом и полупроводником, ϵ_i — его относительная диэлектрическая проницаемость, D_s — плотность поверхностных состояний.

Важным параметром для расчета является величина электронного сродства полупроводника. Надежные данные по величине χ отсутствуют. Согласно данным, полученным в работе [26], величина работы выхода n -SiC-6H в зависимости от состояния поверхности находится в диапазоне 4.28–4.55 эВ. Значение работы выхода 4.5 эВ приведено также в [27]. Исходя из того что электронное сродство отличается от работы выхода на величину ξ , в расчете принято $\xi \sim 4.4$ эВ.

На рис. 1 приведена зависимость Φ_b от плотности поверхностных состояний при $\Phi_0 = 0.3E_g$ и $\Phi_0 = 0.5E_g$, рассчитанная с использованием выражения (1) для некоторых металлов. Экспериментальные значения Φ_b в подавляющем большинстве случаев превышают значения

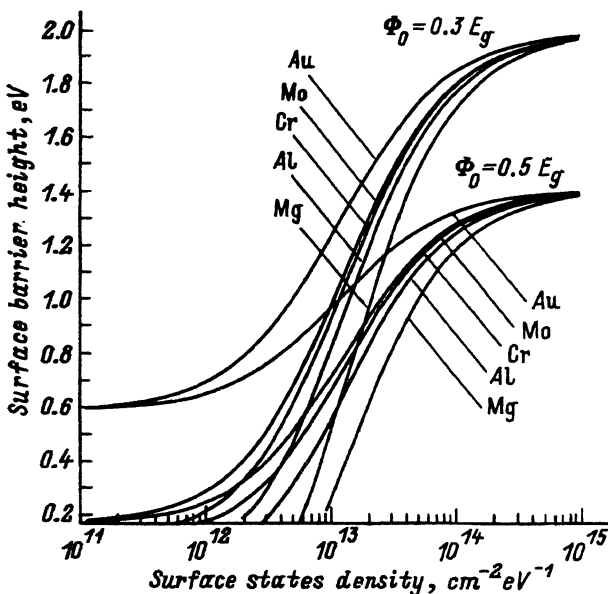


Рис. 1. Зависимость высоты барьера от плотности поверхностных состояний в структурах $Me-n$ -SiC-6H (Me : Au, Mo, Cr, Al, Mg) (расчет). $N_d - N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$, $\epsilon_i = 1$, $\delta = 5 \text{ \AA}$.

высот барьеров, рассчитанных при низкой плотности поверхностных состояний ($D_s < 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$), что свидетельствует о недостаточности приближения Шоттки–Мотта для описания свойств структур металл– $n\text{-SiC-6H}$. В реальных структурах, следовательно, величина плотности поверхностных состояний оказывает существенное влияние на высоту барьера. На рис. 2 показана зависимость высоты барьера Шоттки от концентрации нескомпенсированной донорной примеси при $D_s = 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ и $\Phi_0 = 0.3E_g$. На рис. 2 видно, что при

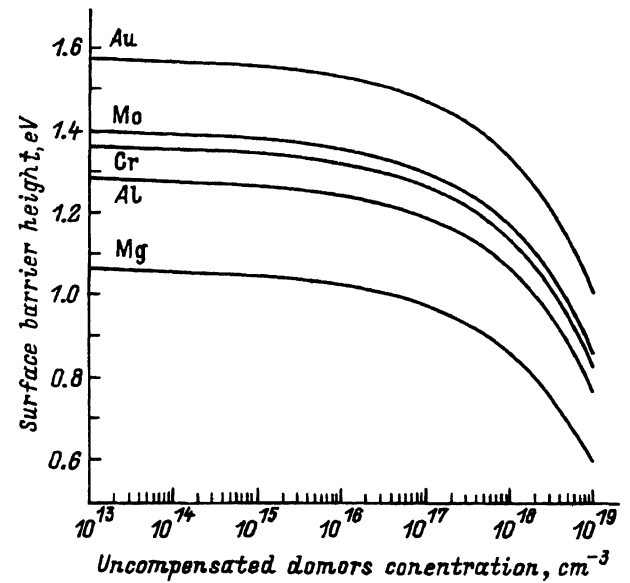


Рис. 2. Зависимость высоты барьера от концентрации нескомпенсированной примеси в структурах $Me-n\text{-SiC-6H}$ (Me : Au, Mo, Cr, Al, Mg) (расчет). $D_s = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, $\Phi_0 = 0.3E_g$, $\epsilon_i = 1$, $\delta = 5 \text{ \AA}$.

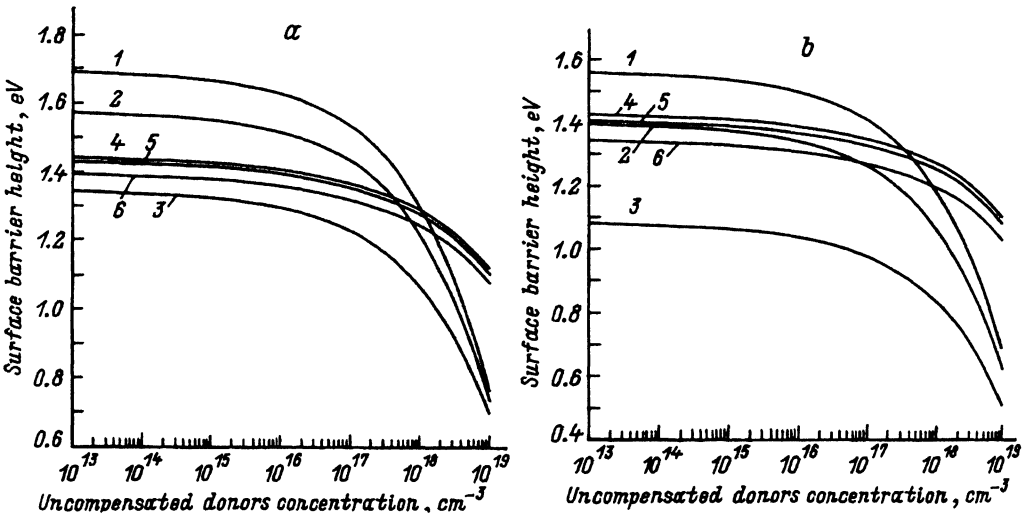


Рис. 3. Зависимость высоты барьера от концентрации нескомпенсированной примеси для поверхностно-барьерных структур на основе Au (а) и Mo (б) (расчет). На обоих рисунках линии 1–3 соответствуют $D_s = 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, $\Phi_0 = 0.3E_g$, $\epsilon_i = 1$, $\delta = 15, 10$ и 5 \AA соответственно; линии 4–6 — $D_s = 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, $\Phi_0 = 0.5E_g$, $\epsilon_i = 1$, $\delta = 15, 10$ и 5 \AA соответственно.

$N_d - N_a > 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при анализе экспериментальных данных необходимо учитывать возможное наличие зависимости высоты барьера от концентрации нескомпенсированной примеси. На рис. 3, на котором представлены рассчитанные концентрационные зависимости Φ_b для Au (рис. 3, а) и Mo (рис. 3, б) при различных значениях δ , показано влияние ширины диэлектрического слоя на величину высоты барьера. Увеличение δ ведет к увеличению высоты барьера и усиливает зависимость $\Phi_b = \Phi_b(N_d - N_a)$.

3. Изготовление поверхностно-барьерных структур

Барьеры Шоттки формировались на поверхности (0001) Si сублимационно травленных подложек и эпитаксиальных слоев n -типа проводимости, выращенных на основе таких подложек методом вакуумной субликации в открытой ростовой системе [28]. Диапазон значений концентрации нескомпенсированной донорной примеси (азота) в образцах — от $4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ до $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Перед нанесением металла образец обрабатывался короткое время в расплаве КОН (5–10 с), затем отмывался в деионизованной воде и органических растворителях. Нанесение металла осуществлялось с использованием резистивного (золото, хром, алюминий) или электронно-лучевого (молибден) нагрева в вакууме. Перед нанесением барьера образец прогревался в вакууме $\sim 10^{-4}$ Па до 500°C в течение 1–1.5 мин. Напыление производилось при температуре подложки 100°C . Контактные площадки формировались методом фотолитографии.

4. Экспериментальные данные

Высота барьера и концентрация нескомпенсированной примеси определялась с использованием методики $C - U$ -измерений. Для исследования отбирались поверхностно-барьерные структуры, $C - U$ -характеристика которых была линейной в координатах $1/C^2 - U$ и не зависела от частоты в диапазоне 1–100 кГц. Емкостная отсечка U_c соответствовала экстраполяции линейной зависимости $1/C^2 - U$ к оси напряжений ($1/C^2 = 0$). Высота барьера вычислялась следующим образом:

$$\Phi_b = U_c + \xi - \Delta\Phi + kT/q.$$

Полученные результаты представлены на рис. 4 в координатах $\Phi_b - \lg(N_d - N_a)$. Прямые линии на этом рисунке соответствуют линейной аппроксимации экспериментальных данных $\Phi_b = A \cdot \lg(N_d - N_a) + B$ по методу наименьших квадратов.

5. Обсуждение результатов

5.1. *Погрешность определения высоты барьера.* Различия в величинах высоты барьера, определенной с помощью нескольких независимых методов (из вольт-фарадных, вольт-амперных характеристик, фотоэлектрических измерений или с использованием рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии) на одной структуре, обычно не превышают 0.10–0.15 эВ [9,10,13,14]. При достаточно большом количестве

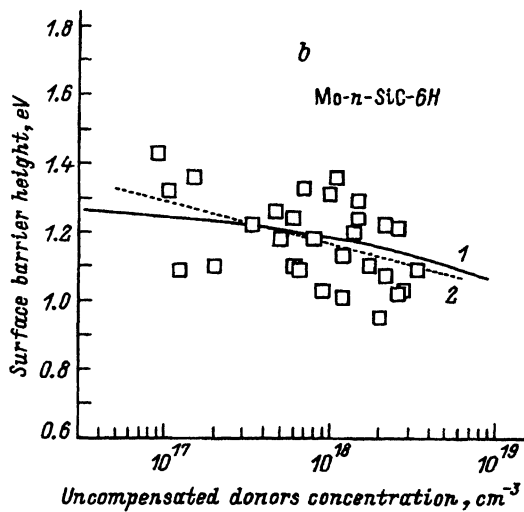
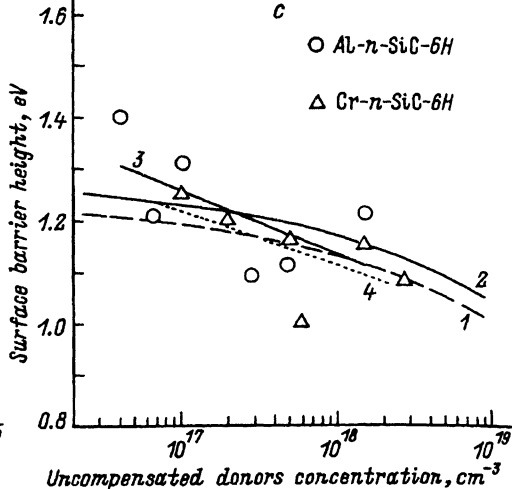
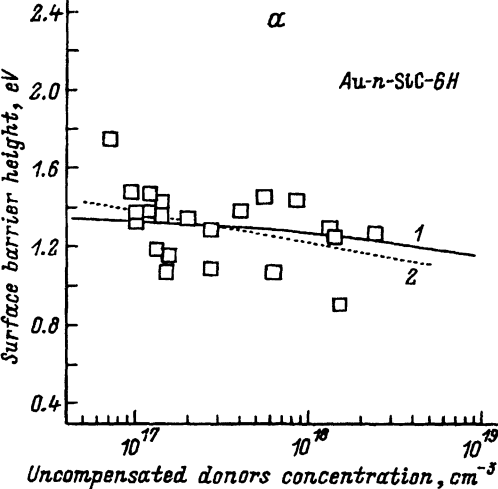


Рис. 4. Экспериментально определенные значения высот барьеров для структур Au-n-SiC-6H (а), Mo-n-SiC-6H (б), Al-n-SiC-6H и Cr-n-SiC-6H (с). а, б: 1 — расчетная зависимость $\Phi_b = \Phi_b(N_d - N_a)$ при $\delta = 5 \text{ \AA}$, $\epsilon_i = 4$, $D_s = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, $\Phi_0 = 0.47 E_g$; 2 — аппроксимация экспериментальных данных по методу наименьших квадратов ($y = -0.161 \cdot \lg(x) + 4.14$ и $y = 0.125 \cdot \lg(x) + 3.42$ на рис. 4, а и б соответственно). 1, 2 — расчетные зависимости $\Phi_b = \Phi_b(N_d - N_a)$ при $\delta = 5 \text{ \AA}$, $\epsilon_i = 4$, $D_s = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, $\Phi_0 = 0.47 E_g$ для структур Al-n-SiC-6H и Cr-n-SiC-6H соответственно; 3, 4 — аппроксимация экспериментальных данных по методу наименьших квадратов для структур Cr-n-SiC-6H ($y = 0.106 \cdot \lg(x) + 3.02$) и Al-n-SiC-6H ($y = 0.124 \cdot \lg(x) + 3.37$) соответственно.

измерений, проведенных на различных структурах одним из методов, разброс значений высоты барьера ($\Delta\Phi_b$) во многих случаях выше [12,14]. Таким образом, основной вклад в $\Delta\Phi_b$ обусловлен различием свойств поверхностно-барьерных структур, что связано с высокой чувствительностью высоты барьера к параметрам поверхности и диэлектрического слоя (D_s , δ , ϵ_i) и приводит к различиям в высоте барьера даже на структурах, полученных при соблюдении одинаковой технологии подготовки поверхности (табл. 1). Как видно из табл. 1, разброс экспериментальных данных, представленных на рис. 4, практически не отличается от результатов, полученных при проведении аналогичных измерений. С другой стороны, величины высоты барьеров, полученных различными авторами, во многих случаях значительно отличаются, причем эти отличия превышают максимальные значения $\Delta\Phi_b$, что также указывает на существенное влияние технологии формирования поверхностно-барьерных структур на их свойства.

Таблица 1.

Источник данных и ориентация	Металл	Максимальный разброс	Кол-во методов измерения	Кол-во измеренных структур	Технология подготовки поверхности
[12] (1100)	Au	0.33	2	7	Скол в условиях высокого вакуума
	Ag	0.18	2	2	
	Al	0.14	2	3	
[9,10] (0001)	Pd	0.16	3	2	Окисление, удаление окисла, отмывка, отжиг в высоком вакууме
	Au	0.15	3	2	
	Ag	0.14	3	1	
	Mn	0.17	3	1	
[17] (0001)	Cr	0.2	1	—	Химическое травление, отмывка и отжиг в вакууме
[14] (0001)	Au	0.23	1	—	Травление в КОН, отмывка и отжиг в вакууме
Данные, соответствующие рис. 4 (0001)	Mo	0.24–0.33*	1	29	Травление в КОН, отмывка в органических растворителях и отжиг в вакууме
	Au	0.25–0.35*	1	12	
	Al	0.2*	1	6	
	Cr	0.05–0.22*	1	6	

Примечание. *Указанный разброс значений высоты барьера соответствует различным участкам концентрационной зависимости (рис. 4).

5.2. Зависимость высоты барьера от концентрации нескомпенсированной примеси. Как видно из рис. 4, во всех исследованных структурах имеет место тенденция к уменьшению высоты барьера с увеличением концентрации. С учетом аппроксимации экспериментальных данных по методу наименьших квадратов уменьшение высоты барьера при изменении концентрации от 10^{17} см^{-3} до 10^{18} см^{-3} составляет 0.10–0.17 эВ. Величина наклона аппроксимирующей прямой (A) зависит от работы выхода электрона из металла, что также качественно соответствует расчету.

Отметим, что работа выхода для алюминия меньше, чем для хрома, но высота барьера несколько выше, чем для барьеров Cr-*n*-SiC-6H. Этот факт может быть обусловлен особенностями формирования поверхностно-барьерных структур на основе алюминия, что наблюдалось и на других полупроводниках, например на кремнии [29]. Плохая воспроизводимость результатов измерений высоты барьера в структурах Al-*n*-Si связывалась с легким окислением алюминия и тенденцией к восстановлению естественного окисла SiO₂, что ведет к различию параметров диэлектрического слоя (δ и ϵ_i).

Для оценки количественного соответствия экспериментальных и расчетных данных по зависимости $\Phi_b = \Phi_b(N_d - N_a)$ воспользуемся результатами, полученными из зависимости $\Phi_b = \Phi_b(\Phi_m)$ (см. разд. 5.4):

$\Phi_0 \sim 0.48$ эВ и $D_s \sim 2 \cdot 10^{14}$ см $^{-2}$ эВ $^{-1}$, если предположить, что $\delta \sim 5$ Å и $\epsilon_i \sim 4$. Рассчитанные при этих параметрах концентрационные зависимости $\Phi_b = \Phi_b(N_d - N_a)$ приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что соответствие между экспериментом и расчетом можно считать удовлетворительным.

5.3. Зависимость высоты барьера от работы выхода электрона из металла. Так как при экспериментальном исследовании были использованы поверхностно-барьерные структуры на основе металлов с сильно различающимися работами выхода (от 4.28 эВ у алюминия до 5.1 эВ у золота), на основании этих данных можно оценить зависимость высоты барьера от работы выхода электрона из металла. На рис. 5 приведены полученные данные. В качестве Φ_b для всех металлов взяты значения при $N_d - N_a = 1 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, которые дает аппроксимация зависимостей $\Phi_b = \Phi_b(N_d - N_a)$. Величины работы выхода электрона из металла соответствуют данным работ [30]. Как видно из рис. 5, зависимость высоты барьера от работы выхода электрона из металла слабая, что свидетельствует о высокой плотности поверхностных состояний.

На этом же рисунке приведены экспериментальные данные, полученные в [1-3,9,10,12-16,31]. Данным различных авторов соответствуют различные символы, так как можно ожидать, что технология изготовления поверхностно-барьерных структур оказывает существенное влияние на величину высоты барьера. По полученным данным и данным [9,10] и [12] с использованием метода наименьших квадратов построены аппроксимирующие прямые вида $\Phi_b = C_2 \Phi_m + C_3$. Значение C_2 и C_3 приведены в табл. 2. Горизонтальная линия $\Phi_b \sim 1.45$ эВ (линия 1) на рис. 5, построенная по данным, полученным в [12], соответствует предсказаниям модели Бардина: высота барьера полностью определяется высокой плотностью состояний на границе металл-полупроводник. Линии 2 и 3 с $C_2 = 1$, построены для значений $\chi = 4$ эВ и $\chi = 4.4$ эВ ([26,27], см. разд. 2), соответствуют теории Шоттки-Мотта. Макси-

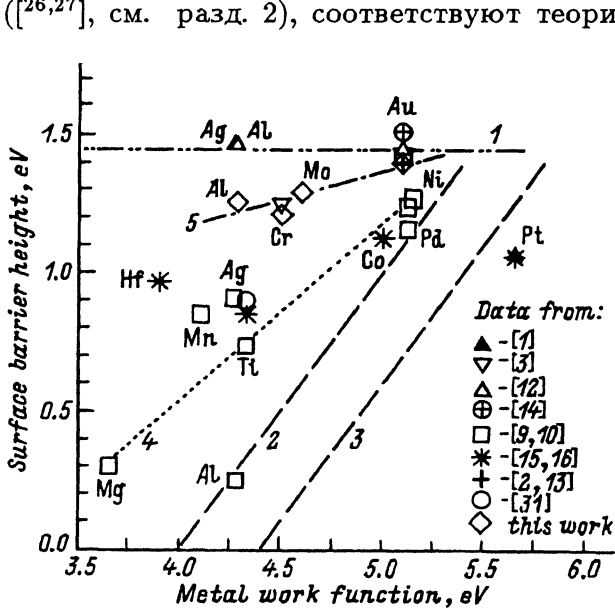


Рис. 5. Зависимость высоты барьера от работы выхода электрона из металла. Разные символы соответствуют данным различных работ. Данные [12] получены для ориентации поверхности (1100), остальные — для ориентации (0001).

Аппроксимация (рис. 5)	C_2	C_3	$D_S \delta / \epsilon_0 \epsilon_i$, $\text{эВ}^{-1} \Phi^{-1}$	$D_s(\epsilon_i = 1)$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$	$D_s(\epsilon_i = 4)$, $\text{см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$	Φ_0 , эВ	Φ_0 / E_g
4	0.63	-2.18	$4 \cdot 10^{18}$	$7 \cdot 10^{12}$	$3 \cdot 10^{13}$	1.4	0.47
5	0.20	0.35	$2 \cdot 10^{19}$	$4 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^{14}$	1.46	0.48
1	0	1.45	—	$\sim 10^{15}$	$\sim 10^{15}$	1.57	0.51

мальное значение C_2 получено при использовании данных работ [9,10] (линия 4). Как видно из рисунка, линии 1 и 4 ограничивают область, в которую попадают практически все экспериментальные данные, в том числе и данные, полученные авторами. Исключение составляют поверхностно-барьерные структуры на основе алюминия [9,10] и платины [1,15,16], что, вероятно, связано с химическими взаимодействиями при их формировании.

5.4. *Уровень Ферми и плотность поверхностных состояний.* При $N_d - N_a < 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ величина в фигурных скобках в выражении (1) мала по сравнению с первым слагаемым. В этом случае по экспериментально определенным значениям C_2 и C_3 в рамках рассматриваемой модели можно оценить положение уровня Ферми и величину $D_s \delta / \epsilon_0 \epsilon_i$:

$$\frac{D_s \delta}{\epsilon_0 \epsilon_i} = \frac{(1 - C_2)}{q^2 C_2}, \quad \Phi_0 = \frac{E_g}{q} - \frac{C_2 \chi + C_3}{1 - C_2}.$$

Полагая, что диэлектрический слой является окислом SiO_2 и $\delta = 5 \text{ \AA}$, что согласуется с экспериментальными данными [9,10], можно приблизительно оценить и величину D_s . Полученные результаты приведены в табл. 2. Отметим, что наибольшая плотность поверхностных состояний наблюдается в случае скола кристалла в условиях высокого вакуума [12]. Эти данные в отличие от остальных приведенных на рис. 5 получены на поверхности с ориентацией $(1\bar{1}00)$. Высокая плотность поверхностных состояний приводит к тому, что высота барьера определяется положением уровня Ферми, которое практически совпадает с величиной Φ_0 для диодов Шоттки, сформированных на Si-границе. Исследования поверхностно-барьерных структур, сформированных на C-границе кристаллов SiC-6H [7,9,10,17], показывают что величины Φ_b также попадают в область, ограниченную линиями 1 и 4 на рис. 5. Отметим, что в [9,10] для некоторых металлов обнаружено различие в высоте барьеров, приготовленных на Si- и C-границах по одной технологии.

Данные, полученные авторами, свидетельствуют о достаточно высокой плотности поверхностных состояний $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$. Наиболее сильная зависимость $\Phi_b = \Phi_b(\Phi_m)$ получена в [9,10], что соответствует $D_s \sim 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$. Уровень Ферми во всех случаях закрепляется вблизи середины запрещенной зоны. Остальные экспериментальные данные, попадающие в область, ограниченную линиями 1 и 4 на рис. 5, по-видимому, соответствует промежуточному случаю $\sim 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1} < D_s < 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$, хотя для уверенного утверждения необходимы данные по измерению Φ_b на поверхностно-барьерных структурах, изготовленных по одной технологии на основе нескольких металлов.

На основе изложенного материала можно сформулировать следующие основные выводы.

1. При $N_d - N_a = 10^{17} \text{ см}^{-3}$ средняя величина высоты барьера составила $\sim 1.40, 1.30, 1.22$ и 1.26 эВ в исследованных поверхностно-барьерных структурах $Me\text{-SiC-6H}$ (Me : Au, Mo, Cr и Al соответственно).

2. В этих структурах экспериментально обнаружена тенденция к образованию более низкого барьера при повышении концентрации легирующей примеси.

3. Используемая технология формирования барьеров Шоттки приводит к высокой плотности поверхностных состояний ($\sim 10^{14} \text{ см}^{-2} \times \text{эВ}^{-1}$) и, соответственно, в таких структурах наблюдается слабая зависимость высоты барьера от работы электрона из металла.

4. Анализ экспериментальных данных позволяет предположить, что положение уровня Ферми приблизительно соответствует $(0.5)E_g$ практически независимо от величины $D_s \delta / \epsilon_0 \epsilon_i$.

Авторы благодарят А.М. Стрельчука за полезные обсуждения. Работа выполнена при частичной поддержке Министерства обороны США.

Список литературы

- [1] M. Bhatnagar, P.K. McLarty, B.J. Baliga, IEEE Electron Dev. Lett. **13**, 501 (1992).
- [2] T. Urushidani, S. Kobayashi, T. Kimoto, H. Matsunami. *Silicon Carbide and Related Materials*, Ser. 137 (*Proceedings of Fifth Conference on Silicon Carbide and Related Materials*, Washington, DC, USA), ed. by M.G. Spencer et al. (Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1993) p. 471.
- [3] Р.Г. Веренчикова, В.И. Санкин. Письма в ЖТФ, **14**, 1742 (1988).
- [4] М.М. Аникин, А.Н. Андреев, С.Н. Пятко, Н.С. Савкина, А.М. Стрельчук, А.Л. Сыркин. *Sensors and Actuators A*, **33**, 91 (1992).
- [5] М.М. Аникин, А.А. Лебедев, М.Г. Растегаева, Н.С. Савкина, А.М. Стрельчук, В.Е. Челноков, С. Тус. *E-MRS 1994 Spring Meeting* (Strasbourg, France) Final Book of Abstracts, E-VII.1.
- [6] G.H. Glover. *J. Appl. Phys.* **46**, 4842 (1975).
- [7] В.И. Санкин, Р.Г. Веренчикова, Ю.А. Водаков, М.Г. Рамм, А.Д. Роевков. ФТП, **16**, 1325 (1982).
- [8] М.М. Аникин, А.А. Лебедев, С.Н. Пятко, В.А. Соловьев, А.М. Стрельчук. *Springer Proc. in Physics*, **56**, 269 (1992).
- [9] J.R. Waldrop, R.W. Grant, Y.C. Wang, R.F. Davis. *J. Appl. Phys.*, **72**, 4757 (1992).
- [10] J.R. Waldrop, R.W. Grant. *J. Appl. Phys. Lett.*, **62**, 2685 (1993).
- [11] J.R. Waldrop. *J. Appl. Phys.*, **75**, 4548 (1994).
- [12] S.H. Hagen. *J. Appl. Phys.*, **39**, 1458 (1968).
- [13] S.Y. Wu, R.B. Campbell. *Sol. St. Electron*, **17**, 683 (1974).
- [14] М.М. АНИКИН, А.Н. Андреев, А.А. Лебедев, С.Н. Пятко, М.Г. Растегаева, Н.С. Савкина, А.М. Стрельчук, А.Л. Сыркин, В.Е. Челноков. ФТП, **25**, 328 (1991).
- [15] L.M. Porter, R.F. Davis, J.S. Bow, M.J. Kim, R.W. Carpenter. *Transactions of Second International High Temperature Electronics Conference* (Charlotte, North Carolina, 1994, USA) XIII-3.
- [16] L.M. Porter, R.F. Davis, J.S. Bow, M.J. Kim, R.W. Carpenter. *Silicon Carbide and Related Materials*, Ser. 137 (*Proceedings of Fifth Conference on Silicon Carbide and Related Materials*, Washington, DC, USA), ed. by M.G. Spencer et al. (Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1993) p. 581.

- [17] Р.Г. Веренчикова, В.И. Санкин, Е.И. Радованова. ФТП, **17**, 1757 (1983).
- [18] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984).
- [19] A.M. Cowley, S.M. Sze. J. Appl. Phys., **36**, 3212 (1965).
- [20] W.J. Choyke, L. Patric. Phys. Rev., **127**, 1868 (1962).
- [21] P.A. Glasov. In: *Springer Proceedings in Physics*, ed. by C.Y. Yang, G.L. Harris (Springer Verlag, Berlin, 1989) v. 43, p. 16.
- [22] В.И. Санкин. ФТП, **17**, 1820 (1975).
- [23] B.W. Wessels, H.C. Gatos. J. Phys. Chem. Sol. **38**, 345 (1977).
- [24] W.J. Choyke, L. Patric. Phys. Rev. B, **2**, 2255 (1970).
- [25] W.G. Spitzer, D. Kleinman, D. Walsh. Phys. Rev., **113**, 127 (1959).
- [26] J.A. Dillon, R.E. Schlier, H.E. Farnsworth. J. Appl. Phys., **30**, 675 (1959).
- [27] Ю.М. Таиров, В.Ф. Цветков. *Справочник по электротехническим материалам* (М., 1988) разд. 19.
- [28] М.М. Аникин, Н.Б. Гусева, В.А. Дмитриев, А.Л. Сыркин. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **10**, 1768 (1984).
- [29] Э.Х. Родерик. *Контакты металл-полупроводник* (М., Радио и связь, 1982).
- [30] H.B. Michaelson. J. Appl. Phys. **48**, 4729 (1977).
- [31] L.M. Spellman, R.G. Glass, R.F. Devis, T.P. Humphreys, R.J. Namanich, K. Das, S. Chevacharaenkul. In.: *Springer Proceedings in Physics*, ed. by C.Y. Yang, M.M. Rahman, G.L. Harris (Springer Verlag, Berlin, 1992) v. 71, p. 417.

Редактор В.В. Чалдышев

Surface Barrier Height in Schottky Diodes Based on *n*-SiC-6H

A.N. Andreev, A.A. Lebedev, M.G. Rastegaeva, F.M. Snegov, A.L. Syrkin, V.E. Chelnokov, L.N. Shestopalova

A.F. Ioffe Physicotechnical Institute, Russian Academy of Sciences, 194021, St. Petersburg, Russia

Metal-*n*-SiC-6H structures (metal: Au, Mo, Cr or Al) with uncompensated donors concentration $N_d - N_a = 4 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ have been investigated in this work. Average surface barrier height was 1.40, 1.30, 1.22 and 1.26 eV for Schottky diodes with gold, molybdenum, chromium and aluminium respectively. It has been observed that there is a tendency to forming of the more lower barriers at the $N_d - N_a$ increasing. The technology of the Schottky diodes preparing included the low-time treatment of surface in the KOH melt after growth of epitaxial layers or after preliminary substrates sublimation etching. Such technology leads to high surface states density and dependence of surface barrier height on metal work function is a weak. This work compares also the obtained data with experimental data of the other authors and calculations based on classical model of the Schottky barrier formation.