

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ

УДК 621.383.5

ВОЛЬТ-ФАРАДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫСОТЫ БАРЬЕРА ШОТКИ КОНТАКТА IrSi–Si

© 2020 г. Э. А. Керимов^{a, b, *}, С. Н. Мусаева^{a, b}^aАзербайджанский государственный университет нефти и промышленности,
просп. Азадлыг, 16/21, Баку, AZ-1010 Азербайджанская Республика^bАзербайджанский технический университет,
просп. Г. Джавида, 25, Баку, AZ-1073 Азербайджанская Республика

*E-mail: E_Kerimov.fizik@mail.ru

Поступила в редакцию 10.10.2018 г.

После доработки 10.10.2018 г.

Принята к публикации 15.11.2018 г.

Проведены эксперименты по измерению вольт-фарадных характеристик. Показано, что обратные характеристики диода получаются деградированными, в результате чего снижается его качество.

DOI: 10.31857/S0033849420020151

ВВЕДЕНИЕ

Измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ) относятся к числу наиболее распространенных методик исследования полупроводниковых приборов. С помощью этих характеристик определяется ряд важных физических параметров, присущих как самим структурам IrSi–p-Si, так и материалам, из которых они изготовлены. Особый интерес представляет изучение ВФХ, зарегистрированных в динамическом режиме. Основным преимуществом данного метода является возможность прямого измерения характеристик $C(U)$, $\partial C(U)/\partial U$ и $\partial^2 C(U)/\partial^2 U$, что позволяет существенно повысить точность.

1. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Прибор собран по блок-схеме (рис. 1), предложенной в работе [1]. Исследуемая структура включается в мостовую схему, на которую подается синусоидальный тестовой сигнал $U_T = U_0 \sin \omega t$ с амплитудой $U_T \leq kT/q$ и напряжением пилообразной развертки $U = \alpha t + \text{const}$. Величину сопротивления нагрузки выбирали из условия $R_n \gg (\omega C_k)^{-1}$ для тестового и обратного сигналов для пилообразного напряжения. Сигнал, получаемый с нагрузки R_{n1} , равный $U_n = \text{const} (\gamma + j\omega C)$, после предварительного усиления (У1), для выделения составляющих импеданса, подается на детектор Д1. Сигнал из второго плеча измерительной схемы, состоящий из эталонной емкости $C_{\text{эт}}$ и сопротивления нагрузки R_{n2} , поступает на вход усилителя У2, усиливается и выпрямляется детектором Д2.

Детектированные сигналы подаются на входы компаратора УЗ и сравниваются. Выход компаратора через дифференцирующие RC-цепочки подключен к входу Z осциллографа. При этом выходное напряжение компаратора остается постоянным, пока $C_{\text{эт}} \neq C_x$, и сигнал на входе Z равен нулю. При некотором смещении напряжения эталонная емкость меняется: $C_{\text{эт}} = C_x(U)$, и тогда на выходе компаратора появляется сигнал, который отпирает сетки электронно-лучевой трубки осциллографа. Яркость C–U-характеристики в этой точке резко возрастает, но позволяет производить градуировку показаний осциллографа по оси y в единицах емкости $C_{\text{эт}}$.

Ниже представлены характеристики установки:

Частотный диапазон, Гц	10...10 ⁷
Диапазон измерения емкости, пФ	1...10000
Чувствительность, В/пФ	0.02
Относительная погрешность ($\Delta C/C$, %)	
при сопротивлении нагрузки 10 ² ...10 ⁶ Ом	≤5
Амплитуда тестового сигнала, мВ	≤30

На рис. 2 приведена осциллограмма ВФХ структур IrSi–p-Si при частоте 1 МГц.

Проведенные исследования зависимости емкости от напряжения показали, что в диапазоне 300...10⁶ Гц емкость практически не зависит от частоты и изменяется по закону

$$C = \left(\frac{q e_n N_A}{2} \right)^2 \left(V_{\text{до}} + V_{\text{обр}} - \frac{kT}{q} \right)^2.$$

Положение уровня Ферми ξ , а также высоту барьера можно рассчитать по значению N_A , по-

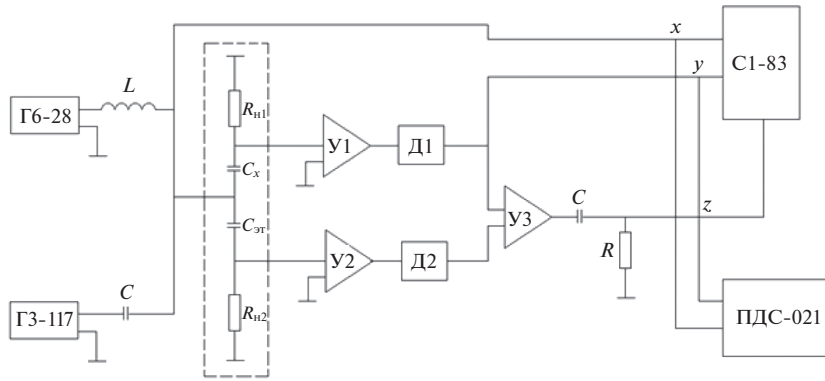


Рис. 1. Блок-схема для измерения вольт-фарадных характеристик: У1, У2 – усилители, Д1, Д2 – детекторы, С, С_{ст}, С_х – емкости, У3 – компаратор, Z – осциллограф, R_{н1}, R_{н2}, R – нагрузки.

лученному по наклону зависимости S/c^2 от U , поскольку

$$\xi = \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right).$$

В отсутствие напряжения смещения действия сил зеркального изображения снижают высоту барьера Шоттки (БШ):

$$\Delta\Phi_{\text{БШ}} = \left[\frac{q^3 \epsilon_n}{2\pi^2 (\epsilon'_n)^2} \left(\Phi_{\text{БШ}} - \epsilon_f - \frac{kT}{q} \right) \right]^{\frac{1}{4}},$$

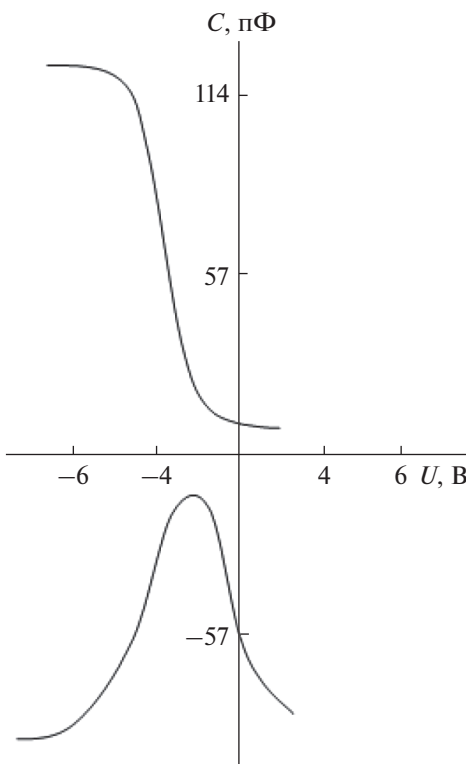


Рис. 2. Вольт-фарадные характеристики структур IrSi-p-Si.

а суперпозиции сил зеркального изображения, действующих на носители и электрическое поле обедненного слоя, приводят к смещению максимума барьера, вычисляемого по формуле

$$X_{\text{max}} = \frac{1}{4} \left[\frac{q\epsilon_n \left(\Phi_{\text{БШ}} - \epsilon_f - \frac{kT}{q} \right)}{2\pi^2 (\epsilon'_n)^2 N_A} \right]^{\frac{1}{4}}.$$

Зависимость отношения $1/C^2$ от приложенного напряжения для тех же диодов приведена на рис. 3.

Как видно из рисунка, экспериментальная зависимость $1/C^2$ от U является линейной, что указывает на равномерное распределение ионизованных примесей в приповерхностной области полупроводника. Определенная из наклона ВФХ величина концентрации акцепторов ($N_a = 10^{15} \text{ см}^{-3}$) совпадает со значением, рассчитанным из удельного сопротивления кремния ($\rho = 10 \text{ Ом см}$ соответствует $N_a = 1.5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$), что свидетельствует об отсут-

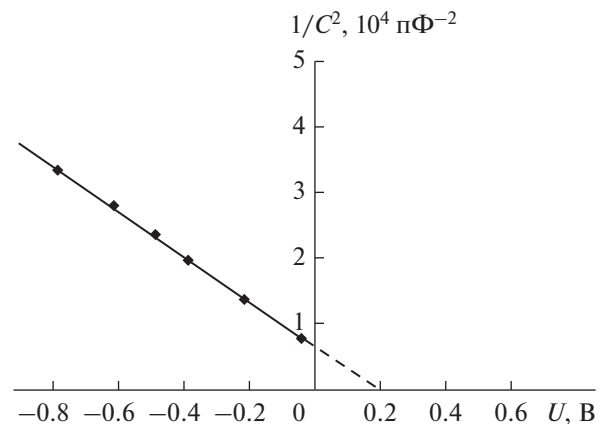


Рис. 3. Зависимость $1/C^2$ от напряжения смещения U для структур IrSi-p-Si.

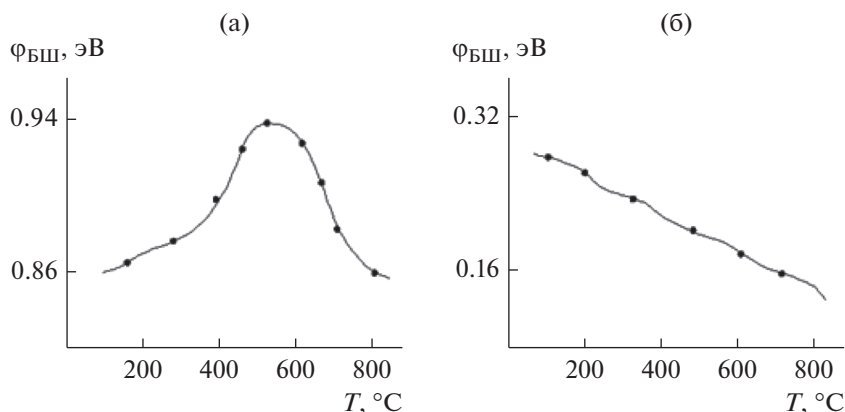


Рис. 4. Зависимости высоты БШ изготовленных структур от температуры отжига соответственно для IrSi-p-Si (а) и IrSi-n-Si (б).

ствии подлегирования и образования электрически активных дефектов в приповерхностной области кремния в процессе формирования силицида.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Одним из важнейших параметров, характеризующий эмиссию, является величина потенциального барьера (Ф_б) на границе металл-полупроводник. Для определения величины Ф_б можно воспользоваться методом полного тока [2-4]. Рассчитанная величина потенциального барьера на границе IrSi-p-Si и IrSi-n-Si равна соответственно 0.16 и 0.94 эВ.

Для получения контакта силицид иридия-кремний с заданной величиной барьера Шоттки необходимо определить характер зависимости высоты барьера от температуры отжига.

На рис. 4а, 4б представлены зависимости высоты БШ изготовленных структур от температуры отжига соответственно для IrSi-p-Si и IrSi-n-Si. Как видно из рисунка, высота для p-типа кремния (p-Si) слабо зависит от температуры отжига: значения уменьшаются от 0.24 до 0.16 эВ.

Высота же барьера для n-типа кремния имеет максимум при 500°C и равна 0.94 эВ. Предполагается, что увеличение Ф_{БШ} вызвано замещением в контакте фазы с низким БШ (Ir₂Si) фазой с высоким БШ (IrSi). Такой характер зависимости Ф_{БШ} от температуры отжига показывает, что до 350...400°C образуются силициды, обогащенные металлом (иридий), а выше 450°C – обогащенные кремнием.

Уменьшение высоты барьера хорошо описывается мультиконтактной теорией [5-7], в которой изменение высоты БШ при изохронном отжиге объясняется тем, что не вся площадь контакта является силицидом IrSi и часть ее перекрывается участками межфазного окисла

или кремния. Отсюда истинную высоту БШ следует вычислять по следующей формуле:

$$J = (S - S')AT^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{\text{БШ}}}{kT}\right) \left(\frac{\exp qU}{nkT}\right)^{-1},$$

где S – полная площадь контакта, S' – нерабочая площадь контакта. Следовательно, истинная высота барьера равна

$$q\Phi_{\text{БШ}} = \left(\frac{kT}{q}\right) \ln \left[\frac{A^*T^2(S - S')}{J_S} \right].$$

На рис. 5 представлена зависимость высоты БШ от времени отжига. При длительности последнего выше 30 мин во всем исследуемом температурном диапазоне скорость изменения Ф_{БШ} очень мала, что свидетельствует о стабилизации физико-химических реакций, происходящих на границе раздела силицид иридия-кремний.

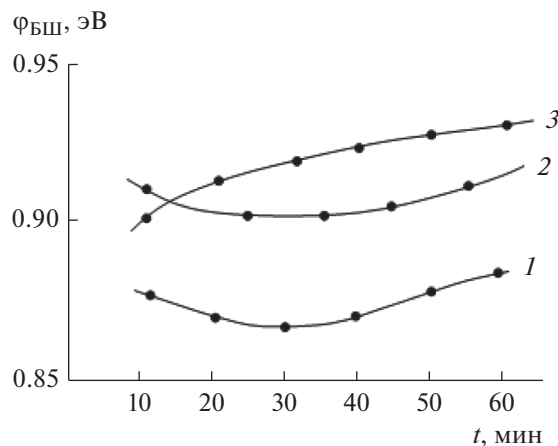


Рис. 5. Зависимость высоты барьера от времени отжига при T = 350 (1), 400 (2) и 500°C (3).

Таблица 1. Значения высоты барьера и коэффициента неидеальности при различных температурах отжига и типах подложки

Тип подложки	$T_{\text{отж}}, ^\circ\text{C}$	Высота барьера		Коэффициент неидеальности
		$J-U$	$C-U$	
$\langle 100 \rangle$	250	0.94	0.91	1.05
	350	0.93	0.90	1.04
	400	0.91	0.93	1.08
	500	0.88	0.91	1.07
	600	0.86	0.91	1.18
$\langle 111 \rangle$	250	0.93	0.92	1.06
	350	0.92	0.93	1.09
	400	0.91	0.87	1.10
	500	0.90	0.91	1.03
	600	0.88	0.86	1.14

3. ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследованы электрофизические характеристики изготавливаемых структур в зависимости от ориентации кремниевой подложки, результаты которых показаны в табл. 1. Как видно из табл. 1, наблюдается характерная закономерность, а именно: все измеряемые величины для ориентации $\langle 111 \rangle$ ниже соответствующих значений для ориентации $\langle 100 \rangle$. Наименьшие же значения коэффициента неидеальности и высоты БШ оказались равными соответственно 1.03 и 0.94 эВ для n -Si.

Как показывают исследования, коэффициент неидеальности n , определенный из ВФХ, при отжиге в диапазоне 200...300 $^\circ\text{C}$ равен 1.04 и не зави-

сит от ориентации подложки. При температуре отжига выше 350 $^\circ\text{C}$ n увеличивается, а для ориентации $\langle 111 \rangle$ при $T_{\text{отж}} = 500^\circ\text{C}$ значение n снижается до 1.04.

Высота потенциального барьера определена из измерений ВФХ. С увеличением температуры отжига для Si $\langle 100 \rangle$ $\Phi_{\text{БШ}}$ слабо изменяется и составляет 0.93 эВ, а для структур, полученных на кремнии, с ориентацией $\langle 111 \rangle$ $\Phi_{\text{БШ}}$ при увеличении $T_{\text{отж}}$ уменьшается до значения 0.84 эВ.

Для снижения высоты потенциального БШ также использован метод ионного легирования.

Ионная имплантация, понижающая БШ, выполняется раньше, чем осаждается пленка иридия для образования силицида иридия. Процесс ионной имплантации проводился на установке "Везувий-3М" при дозе 51.42 мКл/см². После ионного внедрения пластины отжигали при температуре 1150 $^\circ\text{C}$, чтобы устранить дефекты в кристаллической структуре.

Результаты электрических измерений показали, что обратные характеристики (рис. 6) получают деградированными, в результате чего снижается качество диода.

Отметим, что понижение высоты потенциального барьера из-за сил зеркального изображения соответствует закону:

$$\Delta\phi = \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0 (na/\pi)^{\frac{1}{2}}}$$

При $na = 10 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$ $\Delta\phi > 0.13$ эВ, и именно по этой причине возникает проблема образования омического контакта.

Нами был изготовлен фототранзистор с БШ на основе контакта IrSi-Si n -типа (рис. 7). Канал был сформирован внедрением ионов бора с энергией 50 кэВ и дозой $2 \times 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Истоки и стоки полевых транзисторов сформированы диффузи-

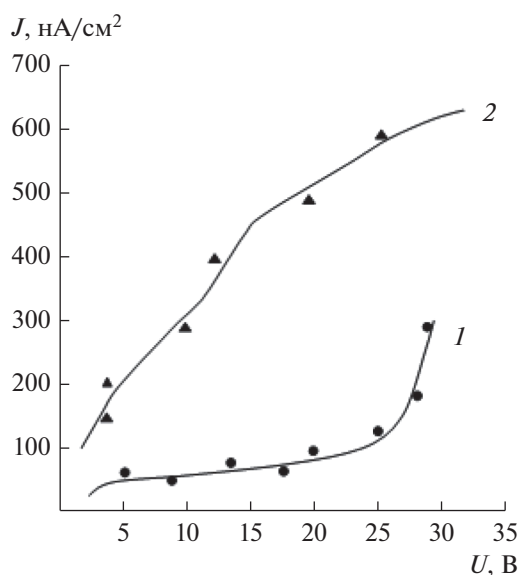


Рис. 6. Обратная ВАХ структур IrSi- p -Si до (1) и после (2) ионной имплантации дозой 51.42 мКл/см².

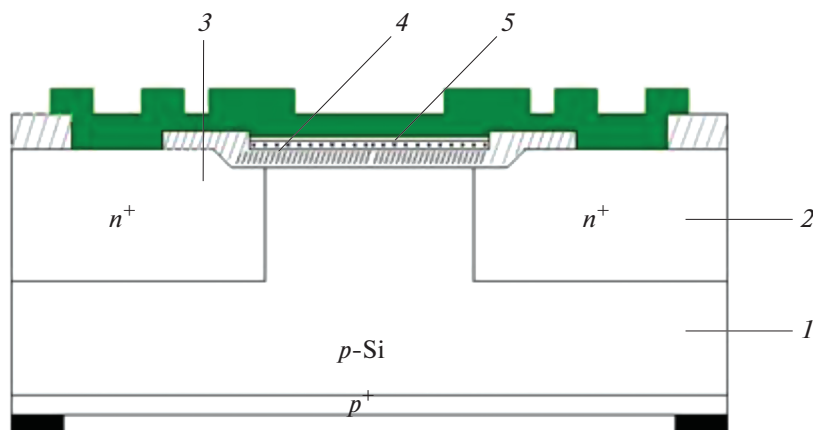


Рис. 7. Структура полевого транзистора с барьером Шоттки на основе контакта IrSi–Si.

ей фарфора с поверхностным сопротивлением $8 \text{ Ом}/\square$ и диффузией бора $6 \text{ Ом}/\square$ на глубину 1.5 мкм .

При работе ПТШ подложку 1 и исток 2 заземляют, а сток 3 соединяют через нагрузочное сопротивление с положительным полюсом источника, между пленками IrSi и кремнием 5, канал становится обратномещенным. Поэтому пленка IrSi удерживает положительный заряд так, что полевой транзистор находится в открытом состоянии. При этом течет канальный ток, величина которого определяется нагрузочным сопротивлением и сопротивлением канала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. М.: Мир, 1984. С. 38.
2. Керимов Э.А. // Вестник КемГУ. 2013. № 3. Т. 1. С. 165.
3. Керимов Э.А. // Изв. НАНА. 2011. Т. 31. № 2. С. 166.
4. Керимов Э.А. // Матер. VII Междун. научно-практич. конф., Москва, 29 июня 2013. С. 7.
5. Zhu Sliyong, Qu Xin-Ping, Van Meirhaeghe R.L. // Solid State Electron. 2000. V. 44. № 12. P. 2217.
6. Qu Xin-ping, Guo-ping, Xu Bei-lei, Li Bing-zong // Chin. J. Semiconductor. 2000. V. 21. № 5. P. 473.
7. Hudait M.K., Venkateswerlu P., Krupanidhi S.B. // Solid State Electron. 2001. V. 45. № 1. P. 133.