

УДК 621.383.5

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНТАКТОВ С БАРЬЕРОМ ШОТТКИ НА ОСНОВЕ $\text{IrSi} - \text{Si}$

Э. А. Керимов

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF CONTACTS WITH $\text{IrSi} - \text{Si}$ SCHOTTKY BARRIER

E. A. Kerimov

Основная цель работы исследование особенностей роста силицида иридия и методика изготовления фото-чувствительных элементов на основе силицида иридия – кремния. Изучены поверхности $\text{IrSi} - \text{p} - \text{Si}$ и $\text{IrSi} - \text{p} - \text{Si}$ полученные магнетронным распылением.

Обнаружено, что на поверхности IrSi , полученных магнетронным распылением, в атмосфере N_2 наблюдается отверстия, такие же дефекты наблюдается в IrSi , полученных методом термического испарения в вакууме. Уменьшение размеров дефектов при отжиге в смеси газов $\text{N}_2 + \text{H}_2 + \text{O}_2$ объясняется тем, что иридий разлагает нейтральные атомы водорода, которые в свою очередь взаимодействуют с адсорбированным кислородом и при повышении температуры либо десорбируют, либо вытесняются на поверхность кремния.

Holes in N_2 atmosphere were detected on the IrSi surface, obtained by magnetron spraying, the same defects are observed in IrSi , obtained by method of thermal evaporation in vacuum. The decrease in defects size by annealing in a $\text{N}_2 + \text{H}_2 + \text{O}_2$ gas mixture is due to iridium decomposing the neutral hydrogen atoms, which in turn interact with the adsorbed oxygen, and are further desorbed or replaced to the silicon surface by temperature increasing.

Ключевые слова: Барьер Шоттки, силицид иридия, геометрический шум, фоточувствительность, Шоттки – матрицы, отжиг, диодные структуры.

Keywords: Schottky barrier, iridium silicide, geometric noise, photosensitivity, Schottky – matrixes, annealing, diode structures.

Введение

Для того чтобы исключить геометрический шум в многоэлементных ИК – фотоприемниках с большим числом элементов на цифровую систему обработки сигнала накладываются очень жесткие требования по быстройдействию и разрядности.

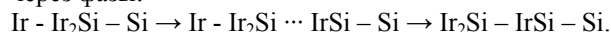
Существует иной путь исключения геометрического шума, который обеспечивает высокую однородность по отдельным элементам. На границе раздела силицид металла – кремний возникает барьер Шоттки. Преимуществом такого барьера является отсутствие влияния на его свойства поверхностных дефектов, окислов и загрязнений на поверхности кремния. Поэтому квантовый выход и фоточувствительность этих диодов определяется в основном электронными и оптическими процессами в силициде металла, а не полупроводнике. Исходя из этого, фоточувствительность диодов Шоттки в первом приближении не зависит от таких параметров полупроводника как степень легирования и уровень компенсации примесей, а также от времени жизни неосновных носителей тока. Тем самым исключаются основные причины вызывающие неравномерность чувствительности в многоэлементных матрицах, главной из которых в Шоттки – матрицах, является разброс геометрических размеров чувствительных элементов (по относительной величине он составляет доли процента).

Методика эксперимента

Диоды с барьером Шоттки на основе контакта $\text{IrSi} - \text{Si}$ могут использоваться в качестве детекторов для регистрации излучения в ИК – области спектра. Однако квантовая эффективность у таких приемников очень мала по сравнению с фотоприемниками на основе узкозонных полупроводников и на $\text{p} - \text{n}$ перехо-

дах. Для увеличения квантовой эффективности Шоттки – приемники изготавливаются, как будет показано в виде так называемой «оптической полости», причем толщина IrSi не должна превышать 100 \AA^0 . С этой целью нами разработан технологический режим многослойной металлизации для получения тонких контактов $\text{IrSi} - \text{Si}$.

В настоящее время благодаря своей простоте и универсальности с базовой технологией изготовления интегральных схем (ИС), широкое распространение получил метод диффузионного синтеза слоев силицида [1]. Диффузионное перемешивание имеет место при термообработке двухкомпонентной смеси металла или пленки металла, осажденной на кремниевую подложку. На поверхность кремния наносится тонкий слой металла толщиной $100 - 500 \text{ \AA}^0$, после чего структуру металл – кремний подвергают термическому нагреву в вакууме при температурах $473 - 973 \text{ K}$ в течении $10 - 60$ минут. Это приводит к формированию, в результате реакции металла с кремнием, однородного слоя Ir_2Si , в промежуточной области между Ir_2Si и кремниевой подложкой начинается образование слоя IrSi . Контакт Ir/Si последовательно проходит через фазы:



Эта реакция протекает до тех пор, пока весь слой $\text{IrSi} \cdots \text{Ir}_2\text{Si} \cdots \text{Ir}_3\text{Si} \cdots \text{IrSi}_3 \cdots \text{Ir}_2\text{Si}$ не прореагирует с Si и не превратится в результате такой реакции в IrSi , который остается стабильным в контакте с кремниевой подложкой.

При формировании силицида путем реакции между пленкой металла (Ir) и кремнием следует учитывать количество кремния, потребляемого металлической пленкой. Такого рода расчеты представлены в

таблице в ходе, которых использовались теоретические значения плотностей Ir, Si и IrSi.

Таблица 1

Толщина I слоя Ir, Å	80
Толщина II слоя Si, Å	15
Толщина III слоя Ir, Å	10
Толщина IV слоя Si, Å	15
Толщина V слоя Ir, Å	10
Толщина VI слоя Si, Å	15
Толщина VII слоя Ir, Å	10

Однако практическая реализация подобного режима в настоящее время затруднительна в силу несовершенства напылительных установок. Поэтому дальнейшие результаты будут относиться к режиму однослойной металлизации. Для изучения закономерностей формирования силицида иридия, определена зависимость толщины пленки IrSi от времени отжига (рис. 1).

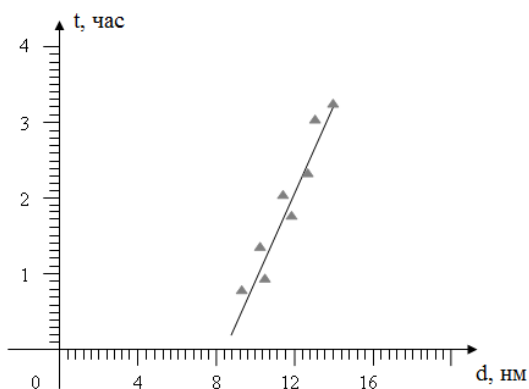


Рис. 1. Зависимость толщины (d) пленки от времени (t) отжига

Толщина IrSi измерялась оптическим методом на микроинтерферометре Линника – 4. Контролируемым параметром полученных пленок являлся поверхностное сопротивление, которое измерялось четырехзондовым методом на установке ИУС – 3М. Обнаружено, что скорость образования пленки силицида иридия подчиняется параболическому закону [1]. Структуры этих образцов были исследованы на электронографе ЭГ – 100А методом «на отражение». Электронограмма поверхности IrSi – n – Si показана на рис. 2.



Рис. 2. Электронограмма поверхности IrSi – n – Si

Межплоскостные расстояния d_{hkl} , полученные из измерений дебаевских колец, имеют достаточно хорошее соответствие структуре моноклинной двуокиси кремния типа C2/2 (таблица 2), параметры решетки которых равны: $a = 7,2 \text{ Å}$, $b = 12,64 \text{ Å}$, $c = 7,2 \text{ Å}$, $\beta = 120^\circ$.

Таблица 2

Радиус кольцо Дебая, мм	$d_{hkl}, \text{ Å}$ IrSi – Si (p)	Радиус кольцо Дебая, мм	$d_{hkl}, \text{ Å}$ IrSi – Si (n)
10,52	3,59	11,2	3,43
12,61	3,21	12,9	2,91
12,29	2,91	15,49	2,43
15,61	2,47	18,7	2,04
16,49	2,26	20,5	1,87
18,99	1,97	22,6	1,66
19,91	1,98		
21,87	1,91		

Наблюдается четкая картина Кикучи, полученная электронограмма поверхности IrSi – p – Si (рис. 3) свидетельствует о высокой степени совершенства монокристалла. Анализ электронографических исследований показывает, что окисная пленка на поверхности IrSi – p – Si получается на 15 Å тоньше, чем окисная пленка на IrSi – n – Si.

Поверхность IrSi – Si изучена также в микроскопе «Биолам». Обнаружено, что на поверхности IrSi полученных магнетронным распылением в атмосфере N₂ наблюдаются отверстия, которые хорошо видны под микроскопом. Такие же дефекты наблюдаются в IrSi полученных методом термического испарения в вакууме. Диаметр отверстий полученных в вакууме

значительно меньше, но больше полученных в атмосфере смеси газов $N_2 + H_2 + O_2$. Образование отверстий на поверхности IrSi, связано по-видимому, плохой химической чистотой азота, в среде которого проводился отжиг.

Образование дефектов в IrSi полученных в вакууме объясняется собственными примесями. Так как кремний имеет Таммовские уровни, то из окружающей среды легко адсорбирует кислород и другие соединения. Собственными примесями являются примеси образующихся хемосорбцией. Примеси образующиеся в результате действия сил Ван – дер – Ваальса, а также электростатической поляризации очень быстро десорбируют.

Уменьшение размеров дефектов при отжиге в смеси газов $N_2 + H_2 + O_2$ объясняется тем, что иридий разлагает нейтральные атомы водорода, которые в свою очередь взаимодействуют с адсорбированным кислородом и при повышении температуры либо десорбируют, либо вытесняются на поверхность кремния.



Рис. 3. Электронограмма поверхности IrSi – p – Si

На рис. 4 показана микрофотография, полученная в электронном микроскопе. Как видно из рисунка, после термообработки из-за обрыва или низкого качества SiO_2 получается прокол перехода. Иногда такие дефекты образуются при длительном протекании тока через контакты. На практике для устранения этих дефектов применяют метод формирования металлизации с большими размерами зерен.

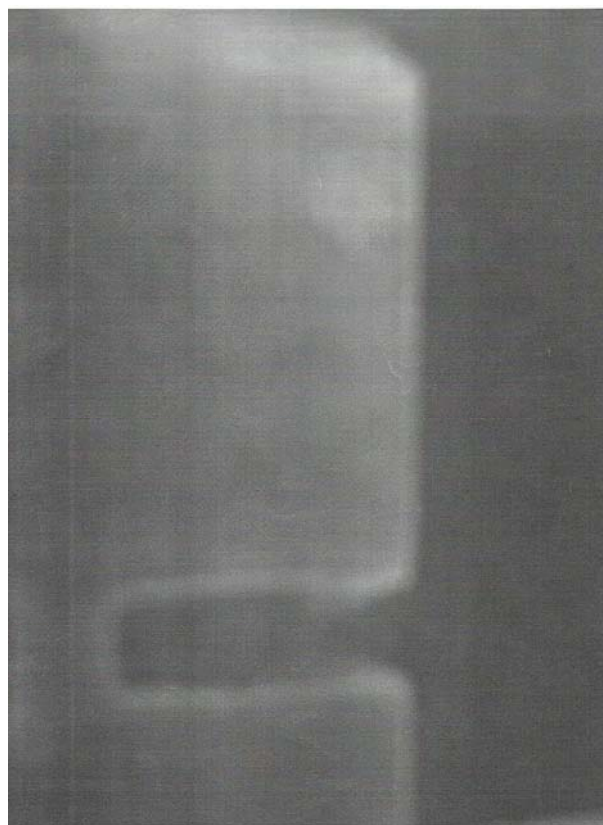


Рис. 4. Микрофотография структур IrSi – Si полученных в электронном микроскопе ЭВМ – 100Л

Сам же процесс изготовления фоточувствительных структур можно описать следующей схемой:

- окисление кремния р типа (n-типа);
- открытие окон для формирования охранных p(p) областей;
- диффузия фосфора (бора) для формирования р областей (p-областей);
- вскрытие окон для формирования барьерных слоев;
- нанесение тонкого слоя металла (Ir);
- отжиг в вакууме и смеси газов ($N_2 + H_2$) для образования слоя IrSi;
- снятие непрореагировавших Ir и SiO_2 ;
- нанесение диффузионно-барьерного слоя TiW и алюминиевого контакта;
- удаление сплава TiW и Al в контактном окне до пленки IrSi;
- нанесение просветляющего покрытия.

Схематический разрез структуры показан на рис. 5.

Полученные результаты и их обсуждение

В работе исследовались электрофизические свойства структур Al – TiW – IrSi – Si – Al, а также Al – IrSi – Si – Al получались как термическим испарением, так и методом магнетронного испарения.

Измерения вольтамперных характеристик структур проводились в статическом режиме при помощи установки, блок-схема которой приведена в работе [2]. Ток, протекающий, через диод Шоттки измерялся по падению напряжения на входном сопротивлении электрометрического усилителя, соединенного последовательно с исследуемым диодом и источником пи-

тания. Входные сопротивления усилителей предварительно градуировались посредством сравнения их номинала с эталонным сопротивлением.

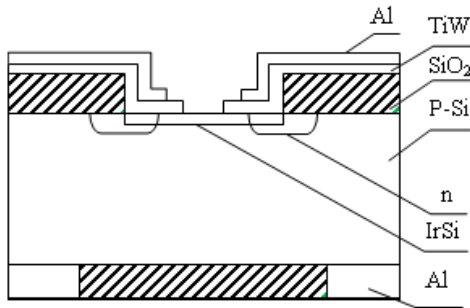


Рис. 5. Поперечное сечение фотодиодов с барьером Шоттки на основе IrSi – Si

Основное затруднение при измерениях высокоомных образцов заключается в отсутствии возможности непосредственного измерения напряжения на образце, так как подключение к образцу вольтметра с малым входным сопротивлением приводит к значительной утечке тока через вольтметр. Использование же электрометрического вольтметра с очень большим входным сопротивлением в силу ряда обстоятельств, приводит к появлению сильного фона, который в свою очередь появляется в результате влияния электрометрического измерителя тока на электрометрический вольтметр. На рис. 6 приведена вольтамперная характеристика (ВАХ) контакта IrSi – p – Si при разных температурах. ВАХ диодных структур имеют униполярный вид с коэффициентом выпрявления $10^4 - 10^5$. Прямые ветви ВАХ линейны в координатах $\lg I$ от U в диапазоне токов $10^{-8} - 10^{-4}$ А.

Наблюдаемая зависимость плотности тока от приложенного напряжения хорошо согласуется с теорией термоэлектронной эмиссии:

$$J = J_s \left(\exp\left(\frac{qU}{nkT}\right) - 1 \right), \quad (1)$$

где J_s – плотность тока насыщения, n – коэффициент неидеальности, k – постоянная Больцмана, T – температура в градусах Кельвина.

Коэффициент неидеальности диодов лежит в пределах 1,06 – 1,10, величина плотности тока составляет $0,1 \text{ mA}\cdot\text{cm}^2$ при напряжении 8 В.

Высота барьера Шоттки, образующегося на границе раздела силицид иридия – кремний вычислялась из формулы для плотности тока насыщения:

$$J_s = AT^2 \exp\left(\frac{q}{kT}\right)(\phi - \Delta\phi), \quad (2)$$

где, ϕ – высота барьера Шоттки, $\Delta\phi$ – понижения барьера благодаря поляризационной силе, связано с максимальным электрическим полем в контакте по формуле:

$$\Delta\phi = \left(\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$E_m = \left[\frac{2qN_D}{\epsilon\epsilon_0 \left(V + V_i - \frac{kT}{q} \right)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

Высота барьера находится по формуле:

$$\phi = \left(\frac{kT}{q} \right) \frac{\ln AT^2}{J_s} = \left(-\frac{kT}{0,43} \right) \frac{\ln J_s}{AT^2}, \quad (5)$$

в которой, экстраполируя линейную часть вольтамперной характеристики в шоттковских координатах к нулевому напряжению до пересечения с осью токов, можно по величине тока отсечки рассчитать высоту потенциального барьера. Рассчитанная таким образом величина потенциального барьера на границе IrSi – p – Si оказалась 0,93 эВ.

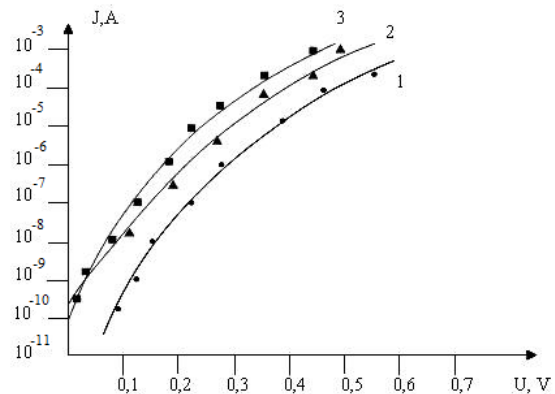


Рис. 6. Вольтамперные характеристики при разных температурах: 1 – 300°С, 2 – 400°С, 3 – 500°С

Характеристики структур на основе IrSi – p – Si при комнатной температуре соответствует омическим. Прямые и обратные ветви ВАХ практически линейны и симметричны. При охлаждении структуры до 80 К ВАХ приобретает сильно униполярный вид. Рассчитанная величина потенциального барьера на границе IrSi – p – Si равна 0,16 эВ. В [3] изучены зависимости между параметрами контакта, представляющего собой параллельное соединение трех диодов Шоттки, поскольку считаем, что этот случай более приближен к реальному контакту, ибо известно, что некоторые металлы образуют с кремнием силициды различных фаз: M_2Si , MSi , $MeSi_2$.

Усредняем плотности тока по площади составляющих диодов, в рамках трехдиодной модели для среднего значения высоты барьера, получена формула:

$$\overline{\Phi_B} = \Phi_B^{(1)} - kT \ln \left[\omega_1 + \omega_2 e^{-\frac{\Delta\Phi_B^{(2)}}{kT}} + \omega_3 e^{-\frac{\Delta\Phi_B^{(3)}}{kT}} \right], \quad (6)$$

где $\Phi_B^{(1)}$ – высота барьера первого диода, $\Delta\Phi_B^{(2)}$ – контрастность высот барьеров первого и второго диодов, $\Phi_B^{(3)}$ – контрастность высот барьеров первого и

третьего диодов, $\omega_1 = S_1/S_0$, $\omega_2 = S_2/S_0$, $\omega_3 = 1 - (\omega_1 + \omega_2) = S_3/S_0$ соответственно, относительные площади первого, второго, третьего диодов. Здесь за параметры неоднородности приняты следующие величины: ω_i и $\Delta\Phi_B^{(i)}/kT$ ($i = 1, 2, 3$).

Преобразовывая формулу, получим:

$$\Delta\Phi_B = -kT \ln \left[\omega_1 + \omega_2 e^{\frac{\Delta\Phi_B^{(2)}}{kT}} + \omega_3 e^{\frac{\Delta\Phi_B^{(3)}}{kT}} \right]. \quad (7)$$

Таким образом, предложенные параметры ω_i и $\Delta\Phi_B^{(i)}/kT$ оказываются наглядным доказательством тому, как неоднородность границы раздела металл – полупроводник изменяет характеристики диодов Шоттки, в данном случае – высоту барьера.

Литература

1. Мюрарка, Ш. Силициды для СБИС / Ш. Мюрарка. – М.: Мир, 1986. – С. 136 – 137.
2. Тришенков, М. А. Фотоприемные устройства и ПЗС / М. А. Тришенков. – М.: Радио и связь, 1992. – 400 с.
3. Elliott, C. T. Future infrared detector technologies / C. T. Elliott // Fourth Int. Conf. on Advanced Infrared Detectors and Systems. – 1990. – P. 61 – 66.
4. Byrne, C. F. Infrared photodiodes formed in mercury cadmium telluride grown by MOCVD / C. F. Byrne, P. Knowles // Semicond. Sci. Technol. – 1988. – № 3. – P. 377 – 381.

Информация об авторе:

Керимов Эльчин Ахмед оглы – кандидат физико-математических наук, доцент, начальник отдела Национального Аэрокосмического Агентства Азербайджана, 0503303503, E_Kerimov.fizik@mail.ru.

Elchin A. Kerimov – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of the Department of National Aerospace Agency of Azerbaijan.