

УДК 621.382.8

ФИЗИКА

Чл.-корр. АН Армянской ССР Г. М. Авакьянц, Р. С. Барсегян, С. В. Минасян

Исследование диффузионных $p^+ - n - n^+$ структур на основе кремния с примесью никеля

(Представлено 9/VII 1974)

Электрофизические свойства $p^+ - n - n^+$ структур из кремния с примесью никеля, изготовленных сплавлением алюминия с одной стороны и сплава $Au + 0,1\% Sb$ с другой, изучены в (¹⁻³).

В работе (⁴) были исследованы такие приборы, изготовленные в виде диодных матриц методом микросплавной технологии.

В этих работах было отмечено, что диоды с напряжениями срыва ($V_{ср}$) $\sim 4-8$ в более стабильны к изменению температуры. Однако обратные токи у приборов, изготовленных методом сплавной технологии, были весьма значительные.—при напряжении $15-20$ в порядке величины тока срыва. Большие величины обратных токов, обусловлены образованием различных типов утечек, при изготовлении приборов. С практической точки зрения, в частности, для устранения утечек представляет интерес получение компенсированного кремния с примесью никеля и $p - n$ перехода на основе диффузии бора в едином технологическом цикле.

В данной работе излагается технология получения и результаты исследований свойств диодных структур с S -образной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). Диоды были изготовлены диффузионной технологией. Использовался кремний n -типа с удельным сопротивлением $60-100$ ом см и толщиной $350-400$ мкм. Компенсировать кремний с удельным сопротивлением ниже 25 ом см не удалось, видимо потому, что концентрация электрически активных атомов никеля составляет $0,01\%$ от максимальной растворимости никеля в кремнии.

После соответствующей механической и химической обработок на одной стороне пластины электролитическим способом наносился никель, а на другой стороне — борный ангидрид (B_2O_3), растворенный в спирте. Диффузия производилась в откаченной до $10^{-3}-10^{-4}$ мм ртутного столба и впоследствии запаянной кварцевой ампуле в интервале температур $1100-1150^\circ C$.

Время диффузии варьировалось в пределах от 5 до 7 часов. После

окончания процесса диффузии пластины шлифовались со стороны где был нанесен никель (150—200 мкм) до тех пор, пока не открывалась область равномерного распределения никеля по толщине образца. Для удаления фазы Si—B с поверхности, пластины либо травились в HF: HNO₃: CH₃COOH=1:2:6, либо 10 мин кипятились в концентрированном HNO₃ и затем в течение 30 сек травились в разбавленной HF(1:10). Глубина залегания p—слоя, измерялась методом косого шлифа и составляла 10—15 мкм, поверхностная концентрация бора была достаточна для обеспечения омичности контакта, при осаждении металла (никель). Для создания омического контакта к n—области, на пластине химически осаждался никель, легированный фосфором. При последующем отжиге (600°C 30—60 сек) фосфор, присутствующий в слое никеля, диффундировал в кремний, образуя n⁺ слой. Затем на образцах осаждался дополнительный слой никеля с обеих сторон для пайки выводов, после чего пластины разрезались на образцы с размерами ~0,5×0,5 мм.

Полученные таким образом p⁺—n—n⁺ структуры с толщиной базы 150±180 мкм и площадью контактов ~25×10⁻⁴ см² обладали S—образной вольт-амперной характеристикой в пропускном направлении.

Удельное сопротивление кремния, компенсированного никелем методом одновременной диффузии (никель и бор) составляло ~6÷10 ком см. Когда диффузия проводилась без наличия в ампуле бора, то при одном и том же режиме сопротивление компенсированного кремния было ρ~30±50 ком см. В обоих случаях n—типа проводимости сохранялся.

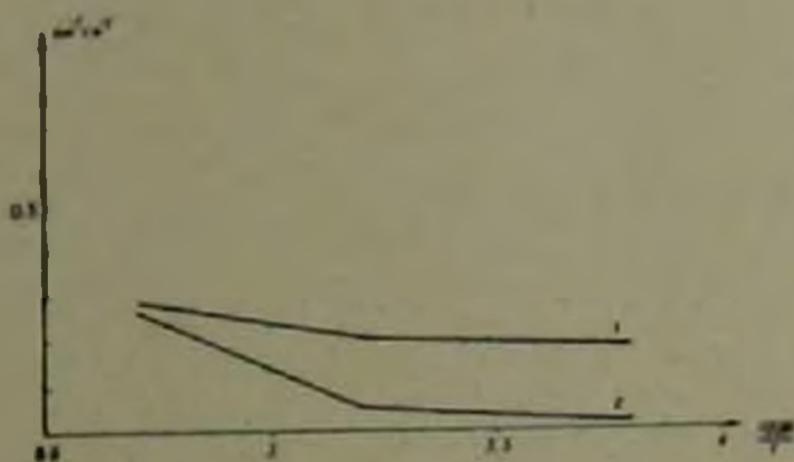


Рис. 1. Температурная зависимость удельной проводимости

Исследование температурной зависимости удельной проводимости кремния, компенсированного никелем, показало, что при малой степени компенсации ($\rho \sim 6 \div 10$ ком см) удельная проводимость с повышением температуры растет медленнее, чем при высокой степени компенсации ($\rho \sim 30 \div 50$ ком см.) (рис. 1).

В результате измерений ВАХ полученных диодных структур в области температур -30°C до $+130^\circ\text{C}$ найдено, что в отличие от (1-4) у этих приборов все параметры ($V_{\text{пр}}$, $V_{\text{обр}}$, $I_{\text{ср}}$, $I_{\text{обр}}$) практически не изменяются в интервале температур от -30° до $+80^\circ\text{C}$. (рис. 2).

Выше 80°C величина $V_{\text{ср}}$ начинает уменьшаться и при температурах $+120+130^\circ\text{C}$ участок ОС исчезает.

Закономерность ВАХ до участка срыва для всей области температур можно описать зависимостью $I \sim V^n$. Значение n меняется от 0,7, на начальном участке характеристики, до 2 вблизи точки срыва.

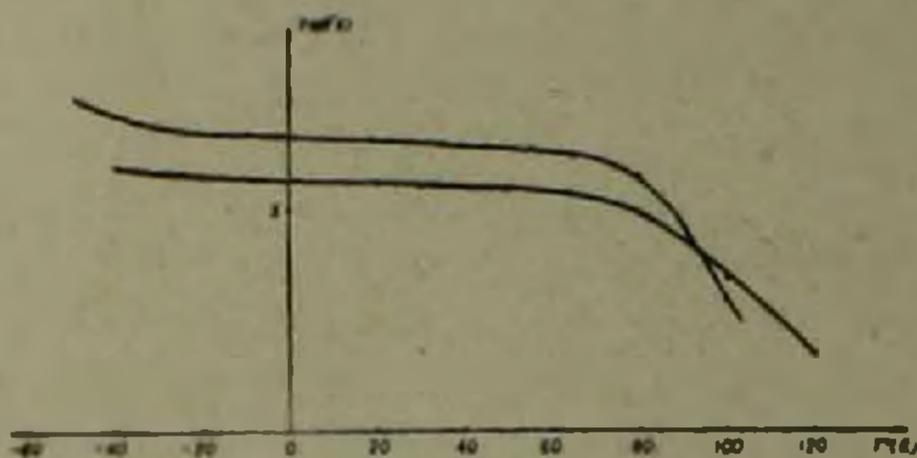


Рис. 2 Температурная зависимость напряжения срыва

После участка ОС имеется вертикаль. Ток на вертикальном участке может изменяться от 100 мкА до 100 мА и более, при изменении напряжения не более $0,5 \text{ В}$. Следует отметить также малые величины остаточного напряжения ($< 1 \text{ В}$), большие отношения напряжения срыва к остаточному ($V_{\text{ср}}/V_{\text{ост}} 8 \div 30$) малые значения тока срыва ($I_{\text{ср}} = 80 \div 120 \text{ мкА}$) и остаточного тока ($I_{\text{ост}} \approx 100 \div 300 \text{ мкА}$).

В отличие от S -элементов, изготовленных на основе компенсированного никелем кремния сплавной технологией, данные приборы характеризуются малыми значениями обратных токов (при обратном напряжении $30 \div 50 \text{ В}$, обратный ток $\sim 1 \div 5 \text{ мкА}$).

Исследование избирательных, генерационных и импульсных характеристик показало, что имеются две области токов на ВАХ, где проявляются избирательные свойства. Первая область находится в самом начале участка ОС до появления генерации, вторая область начинается там, где кончается генерация и простирается до участка вертикали. Добротность и резонансная частота контура, состоящего из S -диода и параллельно подключенной емкости, составляют соответственно $6 \div 7$ единиц, и $150 \div 200 \text{ кГц}$, которые управляемы током смещения и уменьшаются с повышением температуры. Частота и амплитуда генерации, возникающей на участке ВАХ и ОС составляют $\sim 100 \div 300 \text{ кГц}$ и $1,5 \div 2,5 \text{ В}$ соответственно и также управляются током смещения.

Времена включения $\sim 0,1 \div 0,15 \text{ мкс}$, выключения $\sim 3 \div 4 \text{ мксек}$, т. е. эти данные примерно совпадают с соответствующими данными приборов, изготовленных по сплавной технологии (³).

В табл. 1 приведены параметры S -диодов, изготовленных на основе кремния, компенсированного различными примесями (³⁻⁹).

Предположим, что концентрация никеля в кремнии, N_a , удовлетворяет следующему неравенству

$$N_a < N_g \quad (1)$$

$$2N_a > N_g \quad (2)$$

В этом случае нижний уровень атомов N_i практически всегда будет заполнен ввиду близкого расположения (0,22 эв) к потолку валентной зоны. После заполнения этого уровня (рис. 3) число оставшихся электронов от их первоначального количества очевидно будет равно

$$N_g - N_a = N_{\text{эл}} \quad (3)$$

Эти электроны либо будут находиться в зоне проводимости, либо на первом акцепторном уровне, отстоящем от дна зоны проводимости на расстоянии 0,3 эв.

Таблица 1

Основные параметры диодов

Тип проводимости	Примесь	$V_{\text{ср}}(b)$	$I_{\text{ср}}(mA)$	$V_{\text{ост}}(b)$	$I_{\text{ост}}(mA)$	$K = V_{\text{ср}}/V_{\text{ост}}$	Температурная зависимость
л	Никель(диффузионные)	5-10	0.08-0.12	<1	0.1-0.15	6-20	-30°C - 85°C все параметры постоянны
л	Никель(сплавные)	8-20	0.02-0.01	<1	0.05-0.15	8-30	Меняется $V_{\text{ср}}$
л	Сера	>7	0.1-0.5	>2	>0.5	2-4	Все параметры меняются
л	Цинк	>10	0.1-0.5	1.2-5	>0.5	10	$I_{\text{ср}}, V_{\text{ост}}$ постоянны $V_{\text{ср}}$ — меняется
л	Золото	10	0.1	>2	0.5	1.2-2.5	Все параметры меняются
л	Хром	5-20	0.1	>1	0.4	1.6-7.5	—
л	Платина	15-35	0.3	>6	0.5	2-3	—

Подсчитаем, какое количество электронов будет находиться в зоне проводимости и как эта концентрация будет зависеть от температуры.

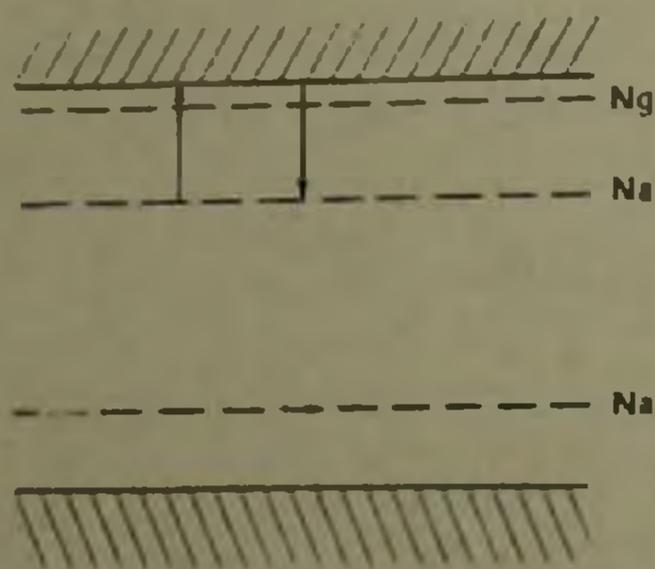


Рис. 3. Зонная структура кремния, содержащего примесь никеля

В силу того, что первый уровень находится далеко от потолка валентной зоны, мы не будем учитывать его взаимодействие с этой зоной. Это значит, что мы будем рассматривать только переходы электронов с этого уровня в зону проводимости и обратно.

Пусть β — коэффициент рекомбинации электронов в зоне проводимости на первый уровень, тогда число электронов, переходящих в единицу времени, в единице объема, из зоны проводимости на первый уровень будет равно:

$$\beta [N_a - (N_{g1} - n)] n \quad (4)$$

при записи (4) мы учли, что число электронов на уровне равно

$$N_{g1} - n. \quad (5)$$

Для числа электронов, которые в единицу времени в единице объема, переходят с уровня в зону проводимости имеем:

$$\alpha \cdot (N_g - n), \quad (6)$$

где α — коэффициент термической ионизации примесного уровня. В стационарном состоянии (4) должно равняться (6). Тогда получаем

$$\beta [N_a - (N_{g1} - n)] n - \alpha (N_g - n) = 0. \quad (7)$$

Замечая, что $\alpha/\beta = n_1$, где $n_1 = V_n e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$ концентрация электронов в зоне проводимости, когда уровень формы совпадает с нашим примесным уровнем, (7) можем переписать еще так:

$$[N_a - (N_g - n)] n - n_1 (N_g - n) = 0. \quad (8)$$

Полученное уравнение является квадратичным относительно n . Точное решение этого уравнения имеет вид:

$$n = -\frac{N_a - N_{g1} + n_1}{2} + \left[\frac{(N_a - N_{g1} + n_1)^2}{4} + n_1 N_{g1} \right]^{1/2}. \quad (9)$$

В дальнейшем будем считать, что

$$\frac{(N_a - N_{g1} - n_1)^2}{4} \gg n_1 N_{g1}. \quad (10)$$

Тогда корень квадратный в (9) можно разложить в ряд по отношению

$$\frac{4n_1 N_{g1}}{(N_g - N_{g1} + n_1)^2} \quad (11)$$

и получить, для равновесной концентрации электронов следующую приближенную формулу

$$n = \frac{n_1 N_{g1}}{N_a - N_{g1} + n_1}. \quad (12)$$

Если, теперь $n_1 > N_a - N_{g1} = 2N_a - N_g$, то из (12) получаем

$$n = N_{g1} = N_g - N_a. \quad (13)$$

В другом случае, когда $n_1 < 2N_a - N_g$ имеем

$$n = n_1 \frac{N_{g1}}{N_a - N_{g1}} = n_1 \frac{N_a - N_g}{2N_a - N_g} \quad (14)$$

Как видно из (13) в случае, когда n велико, равновесная концентрация электронов не зависит от температуры. Этот результат обусловлен близким расположением рассматриваемого уровня ко дну зоны проводимости и относительно высокой температуры, что способствует выбросу электронов с уровня в зону проводимости. В случае (14) не трудно заметить, что равновесная концентрация электронов меньше, чем в случае (13) (что соответствует более сильной компенсации материала) и зависит от температуры. Этот случай может реализоваться при относительно далеком расположении локального уровня от дна зоны проводимости, или при относительно большом превышении $2N_a$ над N_g .

Если мы учтем взаимодействие уровня с валентной зоной, то вместо (8) получим:

$$n = p + \frac{p + \Theta n_1 - \delta_0 (p_1 + \Theta n)}{p + p_1 + \Theta (n + n_1)} N_{K1} \quad (15)$$

Здесь $\Theta = \frac{\sigma_n}{\sigma_p}$ где σ_n и σ_p соответственно сечение захвата электрона и дырок на рассматриваемый локальный уровень, а

$$\delta_0 = \frac{2N_a - N_g}{N_g - N_a} \quad (16)$$

Если теперь в (15) пренебречь концентрацией дырок p , а также величиной p_1 , то мы приходим к полученному ранее результату, то есть (8).

Используя результат (13) мы действуя так же как в (4) получим для напряжения срыва

$$V_{ср} = \frac{N_g}{N_{g1}} \cdot \frac{d^2}{2U_p \sigma_n} \quad (17)$$

и для тока срыва

$$I_{ср} = \frac{b \cdot N_g}{\sigma_n^0} d, \quad \text{где } b = \frac{U_n}{U_p} \quad (18)$$

В нашем случае:

$N_g = 6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $N_{K1} = 4,8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $d = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ см}$, $\sigma_n^0 \approx 2 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$, $U_p = 600 \text{ см}^2/\text{в сек}$, $V_{ср} = 12 \text{ (в)}$, $I_{ср} = 250 \div 300 \text{ мка}$.

Для материала $\rho \sim 6 \text{ ком см}$, $N_{K1} = 7 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ и $V_{ср} = 8 \text{ (в)}$, $I_{ср} = 250 \div 300 \text{ мка}$.

Полученные значения для $I_{ср}$ несколько превышают экспериментальные, что можно объяснить наличием технологического канала тока, площадь сечения которого несколько (в 1,5—2 раза) меньше площади $p-n$ перехода.

Для случая, когда концентрация задается формулой (14) расчет проводится в работе (4).

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность В. П. Прошян за помощь при изготовлении диодов.

Институт радиологии и электроники
Академии наук Армянской ССР

Հայկական ՍՍՀ ԳԱ բրահայտ-անդամ Գ. Մ. ԱՎԱԿՅԱՆԵՑ, Ի. Ս. ՌԱԲՍԵՂՅԱՆ, Ս. Վ. ՄԻՆԱՍՅԱՆ

Նիկելի խառնուրդով սիլիցիումի հիման վրա ստեղծված $p-n-n^+$ տիպի դիֆուզիոն սարքերի ճետազոտությունը

Աշխատանքում նկարագրված է նիկելի խառնուրդով սիլիցիումի ստացման տեխնոլոգիական ուժիմները, ինչպես նաև ստացված նյութի հիման վրա երկէլեկտրոդային կառուցվածքի պատրաստման եղանակները, այդ նույն տեխնոլոգիական ցիկլով, Դու իրականացվել է բորի և կոմպլեքսացնող նիկելի միաժամանակյա դիֆուզիայի միջոցով n -տիպի սիլիցիումի մեջ, -196°C մինչև $+130^{\circ}\text{C}$ տիրույթում կատարված ջերմային ճետազոտությունները ցույց տվեցին, որ նման երկէլեկտրոդների բնորոշ պարամետրերը ($V_{\text{բ}}, I_{\text{բ}}, V_{\text{ն}}, I_{\text{ն}}$) ջերմակայուն են -30°C մինչև $+80^{\circ}\text{C}$ տիրույթում, որը և հնարավորություն է տալիս այդ սարքերի համար նախատեսել բազմաթիվ կիրառություններ բազմապիսի էլեկտրոնային սարքավորումներում:

Աշխատանքում բերված է ստացված արդյունքների տեսական վերլուծությունը:

ЛИТЕРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

- ¹ Գ. Մ. Ավակյան, Ս. Վ. Մինասյան, Օ. Ա. Օգանեսյան, ДАН Арм. ССР, т. 51, № 1 (1970). ² Գ. Մ. Ավակյան, Ս. Վ. Մինասյան, ДАН Арм. ССР, т. 54, № 4 (1972). ³ Գ. Մ. Ավակյան, Ս. Վ. Մինասյան, Օ. Ա. Օգանեսյան, Ա. Ա. Степанов, ДАН Арм. ССР, т. 51, № 5 (1970). ⁴ Գ. Մ. Ավակյան, Ս. Վ. Մինասյան, Վ. Ա. Погосյան, «Микроэлектроника», АИ СССР, т. 1, вып. 3 (1972). ⁵ Н. А. Султанов, Автореферат кандидатской диссертации Ташкент, 1971. Գ. Մ. Ավակյան, Յ. Ն. Адамян, Վ. Մ. Арутюнян, Р. Ս. Барсегյան, А. В. Емельянов, Ս. Վ. Օգանեսյան, «Микроэлектроника», т. 3, № 1 (1974).