

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ЖИДКОФАЗНОЙ ЭПИТАКСИИ

А. С. Саидов, А. Ю. Лейдерман, Б. Сапаев, С. Ж. Каражанов

Физико-технический институт им. С. В. Стародубцева Академии наук Узбекистана, 700084, Ташкент, Узбекистан
(Получена 9.03.1992. Принята к печати 14.07.1992)

В статье получены и исследованы электрофизические свойства гетероструктур типа $n-p-p^+$ на основе твердых растворов Si-Ge . Изучено распределение примесей в полученных структурах и их ВАХ. Экспериментальные результаты проанализированы и объяснены.

Твердые растворы $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ выращивались методом жидкофазной эпитаксии из ограниченного галлиевого раствора-расплава в атмосфере водорода. Методика выращивания подробно описана в [1]. В качестве подложки использован кремний, легированный фосфором марки КЭФ, с удельным сопротивлением $\sim 40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, ориентированный по направлению [111]. Толщина и диаметр подложки составляла $\sim 350 \div 400 \text{ мкм}$ и 40 мм соответственно. Кристаллизация проводилась при начальной температуре $T_{\text{вс}} = 750^\circ\text{C}$ с последующим охлаждением до комнатной температуры со скоростью $0.5 \div 2 \text{ град/мин}$. При выращивании твердого раствора $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ на $n\text{-Si}$ -подложке образуется $n-p^+$ -переход, связанный с тем, что Ga является как для кремния, так и для германия активной примесью и создает мелкий акцепторный уровень. Толщина выращенного твердого раствора $15 \div 20 \text{ мкм}$, при концентрации дырок в нем $10^{19} \div 10^{20} \text{ см}^{-3}$ холловская подвижность $\sim 200 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. На поверхности твердого раствора образовывался чистый германиевый слой, толщина которого составляла порядка 5 мкм . Омические контакты готовились вплавлением индия в эпитаксиальную пленку и золота с примесью сурьмы в n -подложку. Плотность линейных дислокаций на поверхности слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ составляла $5 \cdot 10^4 \div 10^5 \text{ см}^{-2}$.

С целью выяснения спецификации поведения примесей исследовано распределение удельного сопротивления ρ по толщине $n\text{-Si}-p^+ \text{- Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ -структур при температуре начала кристаллизации $750, 950^\circ\text{C}$. Метод исследования подробно описан в [2, 3].

Исследование распределения ρ по толщине проводилось в установке однозондового манипулятора типа МОЗ. Образец шлифовался под углом 3° и полировался алмазной пастой с диаметром зерна $\sim 0.3 \text{ мкм}$. Для измерения сопротивления растекания по участкам косого шлифа образец устанавливался на манипулятор. Перпендикулярно к плоскости шлифованной поверхности устанавливался зонд с острием диаметром 1 мкм . Задаваемый аккумуляторной батареей большей емкости ток измерялся фотокомпенсационным микровольтамперметром типа Ф-116/1. Падение напряжения на зонде фиксировалось прибором типа Ф-116/2 с высоким выходным сопротивлением.

Истинная толщина эпитаксиального слоя определяется формулой (3)

$$L = L_1 \sin \alpha,$$

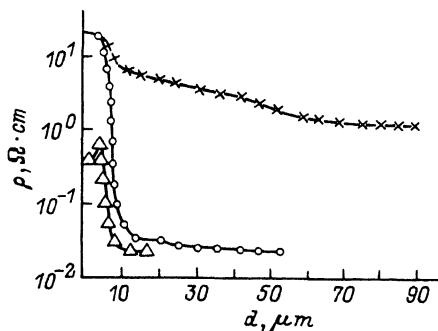


Рис. 1. Распределение удельного сопротивления по толщине эпитаксиальных слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, выращенных при разных температурах из разного раствора-расплава: крестики — из оловянного раствора-расплава ($T_{\text{вс}} = 1050^\circ\text{C}$), кружки и треугольники — из галлиевого раствора-расплава ($T_{\text{вс}} = 960, 750^\circ\text{C}$ соответственно).

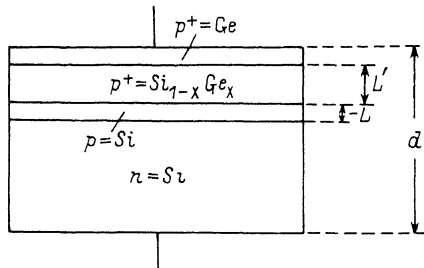


Рис. 2. Схематическое изображение структуры $n\text{-Si-p-Si-p}^+\text{-Si}_{1-x}\text{Ge}_x\text{-p}^+\text{-Ge}$.

где L_1 — толщина слоя на косом шлифе, α — угол, под которым шлифовались образцы. Для построения распределения ρ по d использовались калибровочные кривые $\rho = f(R_s)$ для германия и кремния.

Полученные таким образом распределения ρ по толщине, которые содержат информацию о поведении примесей в эпитаксиальном слое, представлены на рис. 1.

Гетеропереходы $\text{Si-Si}_{1-x}\text{Ge}_x$, температура начала кристаллизации которых $T_{\text{вс}} = 960^\circ\text{C}$, подвергались отжигу в течение $20 \div 30$ мин. Распределение ρ по толщине d представлено на рис. 1, кривая a . Для сравнения приведена зависимость $\rho(d)$ в случае выращивания из оловянного раствора-расплава (рис. 1, кривая b). Видно, что в случае выращивания из галлиевых растворов достигается почти идеальная гетерограница и однородное распределение примесей по толщине пленок.

В спектрах, полученных со структур, кремниевые подложки которых подвергались отжигу непосредственно перед наращиванием при температуре выше роста слоев $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ на 300°C в течение $1.5 \div 2$ ч, возникает высокоомная область [4] размером ~ 1 мкм (рис. 1, кривая $в$).

Таким образом, выращенные на отожженной $n\text{-Si}$ -подложке твердые растворы $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ представляют собой $n\text{-p-p}^+$ -структуру, компенсированная p -база которой имеет длину порядка ~ 1 мкм, причем удельное сопротивление ее составляет $\sim 30 \div 40$ Ом·см (рис. 2).

Темновая вольтамперная характеристика (ВАХ) этих структур при прямом смещении, измеренная в интервале температур $77 \div 213$ К, представлена на рис. 3. Из которого видно, что ВАХ содержит линейный, сублинейный и квадратичный участки, сменяющие друг друга по мере роста напряжения. По-видимому, эти сублинейные участки могут быть объяснены эффектом инжекционного обеднения [5], возникающим в результате встречных потоков амбиполярных диффузий и дрейфа неравновесных носителей в p -базе.

Уравнение, описывающее распределение концентрации неосновных носителей в p -базе в стационарных условиях, имеет вид

$$D_a \frac{d^2 n}{dx^2} - v_a \frac{dn}{dx} - \frac{n - n_p}{\tau_n} = 0, \quad (1)$$

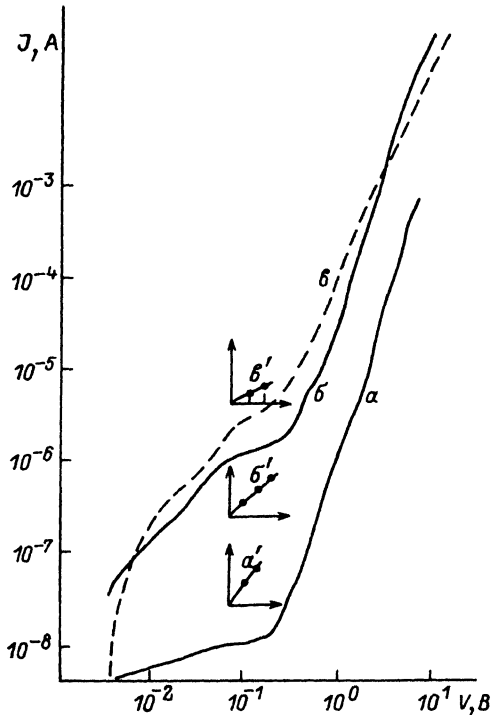


Рис. 3. Темновые ВАХ гетероструктур на основе твердых растворов $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$. T, K : $a, a' - 77$; $b, b' - 213$, $\alpha, \alpha' - 183$ в двойном и полулогарифмическом масштабах соответственно.

где

$$D_a = \frac{D_n D_p (n + p)}{D_n n + D_p p}$$

— амбиполярный коэффициент диффузии,

$$v_a = \frac{\mu_n \mu_p}{\mu_n n + \mu_p p} \frac{M - \left(n \frac{\partial M}{\partial n} - p \frac{\partial M}{\partial p} \right)}{1 + \frac{\partial M}{\partial p}} E$$

— амбиполярная скорость дрейфа, обусловленная модуляцией заполнения глубокого примесного уровня. D_n, D_p — коэффициенты диффузии; μ_n, μ_p — подвижность электронов и дырок соответственно; $M = M(n, p)$ — концентрация электронов, захваченных глубокими примесями. Тогда приближенное решение уравнения (1) в условиях примесного равенства амбиполярных диффузий и дрейфа имеет вид

$$n(x) \approx \left[2 \text{Sh} \left(\frac{w}{L^*} \right) \right]^{-1} e^{\frac{ix}{2}} (A e^{x/L^*} + B e^{-x/L^*}), \quad (2)$$

где

$$L^* = \frac{L_n}{\sqrt{1 + (IaL_n/2)^2}}, \quad A = n(w) \exp \left(-\frac{Iaw}{2} \right) - n(0) \exp(-w/L^*),$$

$$a = (2qD_p N_i)^{-1}, \quad B = n(0) e^{w/L} - n(w) \exp\left(-\frac{I_0 w}{2}\right), \quad (3)$$

здесь L — длина высокоомной p -базы, L_n — диффузионная длина электронов в базе, $n(0)$ и $n(w)$ — концентрации электронов на границах p -базы с n - p - и p - p^+ -переходами соответственно (рис. 2), I — плотность тока, a — параметр, определяемый свойствами глубокой примеси N_i . Из (2) следует, что на значительной части базы концентрация неосновных носителей убывает с ростом тока. В результате $V(I)$ имеет сублинейный характер и может быть приближенно описана выражением

$$V \approx V_0 \exp(Iaw). \quad (4)$$

В случае, если наблюдаемые сублинейные участки действительно описываются зависимостью (4), то они должны «спрямляться» при перестраивании в полулוגарифмическом масштабе $I \sim \ln V$ (рис. 3).

Это построение дает возможность посчитать параметр a :

$$a = \frac{\ln\left(\frac{V_1}{V_2}\right) S}{(J_1 - J_2) w}, \quad (5)$$

где S — площадь поперечного сечения. Определенное по формуле (5) значение параметра a для кривых 1—3 (рис. 3) составляет

$$a \approx 5.3 \cdot 10^5, \quad a \approx 10^3, \quad a \approx 3.6 \cdot 10^3.$$

Значение параметра a позволяет определить значение концентраций глубокой примеси по формуле (5), ответственной за амбиполярный дрейф неравновесных носителей при разных температурах:

$$N_i \approx 4.4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} \quad (T = 77 \text{ К}), \quad N_i \approx 6.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3} \quad (T = 183 \text{ К}),$$

$$N_i \approx 10^{14} \text{ см}^{-3} \quad (T = 213 \text{ К}).$$

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что возникновение компенсированной p -области, приводящее к появлению сублинейного участка на ВАХ при прямых смещениях, связано с глубокими центрами, возможно, представляющими собой сложные ассоциации кислорода с галлием или со структурными дефектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] А. С. Саидов, М. С. Саидов, Б. Сапаев, В. А. Краснов. ДАН УзССР, № 3, 24 (1989).
- [2] А. С. Саидов, С. Дадамухамедов, В. В. Никитин. ДАН УзССР, № 9, 38 (1981).
- [3] Г. Ф. Лымарь. Электрон. техн., вып. 4 (54), 3 (1970).
- [4] А. С. Саидов, Э. А. Кошчанов, Б. Сапаев. Изв. АН УзССР, № 4, 83 (1986).
- [5] A. Yu. Laiderman, P. M. Karageorgy-Alkalaev. Sol. St. Commun., 27, 339 (1978).

Редактор Ю. Б. Лянда-Геллер