

0.6

## Получение и исследование непрерывного твердого раствора $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$

© А.С. Саидов, Ш.Н. Усмонов, К.Т. Холиков, Д. Сапаров

Физико-технический институт АН РУз, Ташкент, Узбекистан

E-mail: Sh\_usmonov@rambler.ru

Поступило в Редакцию 12 января 2007 г.

Методом жидкофазной эпитаксии из ограниченного объема свинцового раствора-расплава выращивались эпитаксиальные слои непрерывного твердого раствора  $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$  ( $0 \leq x \leq 0.9$  и  $0 \leq y \leq 0.92$ )  $p$ -типа проводимости на  $n$ -Si подложках. Определен профиль распределения атомов по глубине в твердом растворе  $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$ . Исследованы спектральные зависимости фоточувствительности  $n$ -Si- $p$ - $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$  структур.

PACS: 81.05.-t, 78.20.-e, 81.05.Hd

Исследование возможности выращивания твердых растворов на основе соединений  $\text{C}^{\text{IV}}$  и  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$  на более дешевых подложках, таких как монокристаллический кремний, методом жидкофазной эпитаксии является перспективным; при этом весьма важны оптические исследования полученных структур.

В данном сообщении приводятся экспериментальные результаты исследования непрерывных твердых растворов  $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$ . Слои выращивались методом жидкофазной эпитаксии из ограниченного двумя горизонтально расположенными подложками объема раствора-расплава по технологии, описанной в работе [1]. Подложками служили кремниевые шайбы толщиной  $\approx 400 \mu\text{m}$ , вырезанные из монокристаллического стержня кремния  $n$ -типа проводимости, выращенного методом Чохральского, с диаметром 20 mm и удельным сопротивлением  $\rho \approx 0.5 \Omega \cdot \text{cm}$ . Состав раствора-расплава был получен на основе предварительных исследований системы Si-Ge-GaAs-Pb и литературных данных [2-4]. Рост эпитаксиального слоя осуществлялся из свинцового раствора-расплава в атмосфере очищенного палладием водорода. При этом эпитаксиальные слои имели  $p$ -тип проводимости. Во время роста эпитаксиального слоя варьировались параметры технологического

процесса: температура начала кристаллизации  $T$ , скорость принудительного охлаждения  $v$ , зазор между подложками  $d$  и компонентный состав раствора-расплава. При оптимальном режиме, когда  $T \approx 850^\circ\text{C}$ ,  $v \approx 1 \text{ grad/min}$  и  $d \approx 1 \div 1.5 \text{ mm}$ , эпитаксиальные слои были совершенными и имели зеркально-гладкую поверхность. В зависимости от параметров технологического процесса толщина выращенных слоев варьировалась в пределах  $25 \div 50 \mu\text{m}$ .

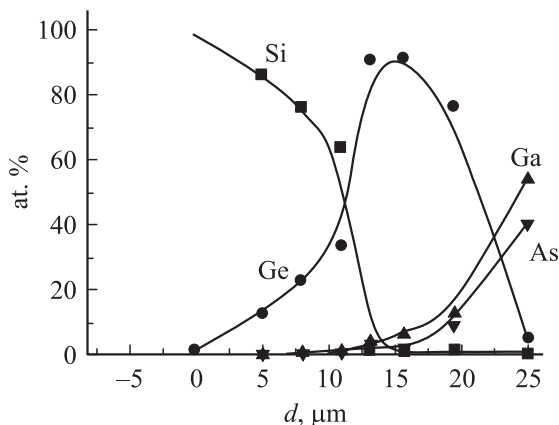
В работе [5] автором было представлено условие образования непрерывного твердого раствора в многокомпонентной системе типа  $A_2, AB, CD$  ( $A, B$  — элементы IV группы,  $CD$  — III–V или II–VI) в следующем виде:

$$\Delta Z_i = (Z_A + Z_B) - (Z_C + Z_D) = 0, \quad (1)$$

$$\Delta r_i = (r_A + r_B) - (r_C + r_D) < 0.1(r_A + r_B), \quad (2)$$

где  $Z_i$  — валентность,  $r_i$  — ковалентный радиус атомов компонента  $i$ . Условие (1) предусматривает изовалентность компонентов, что выполняется для системы  $\text{Si-Ge}$ ,  $(\text{Si}_2)\text{-GaAs}$  и  $(\text{Ge}_2)\text{-GaAs}$ . Условие (2) предусматривает рекомбинационную пассивность примесей; когда оно выполняется, взаимное замещение атомов молекул компонентов в многокомпонентной системе не приводит к сильной деформации кристаллической решетки. В таком случае сечения захвата неравновесных носителей заряда атомами примесей не сильно отличаются от сечений захвата неравновесных носителей заряда атомами базового полупроводника. Суммы ковалентных радиусов атомов молекул  $r_{\text{Si}_2} = 2.34 \text{ \AA}$ ,  $r_{\text{Ge}_2} = 2.44 \text{ \AA}$ ,  $r_{\text{SiGe}} = 2.39 \text{ \AA}$ ,  $r_{\text{GaAs}} = 2.44 \text{ \AA}$  близки, поэтому для системы  $\text{Si-Ge}$ ,  $(\text{Si}_2)\text{-GaAs}$  и  $(\text{Ge}_2)\text{-GaAs}$  условие (2) выполняется удовлетворительно. Компоненты такой системы могут образовать непрерывный твердый раствор замещения в виде  $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$ .

На рентгеновском микроанализаторе „Jeol“ JSM 5910 LV-Japan были проведены исследования химического состава поверхности и скола выращенных эпитаксиальных слоев  $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$ . Результаты рентгеновского микроанализа и растровых картин показывают, что на подложке Si из жидкой фазы раствора-расплава  $\text{Si-Ge-GaAs-Pb}$  начинается рост твердого раствора  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  с постепенным увеличением процентного содержания Ge. Когда атомарное содержание Ge в твердом растворе  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$  достигает значения около 10% ( $\text{Si}_{0.9}\text{Ge}_{0.1}$ ), в кристаллическую решетку внедряются молекулы GaAs. Далее с ростом

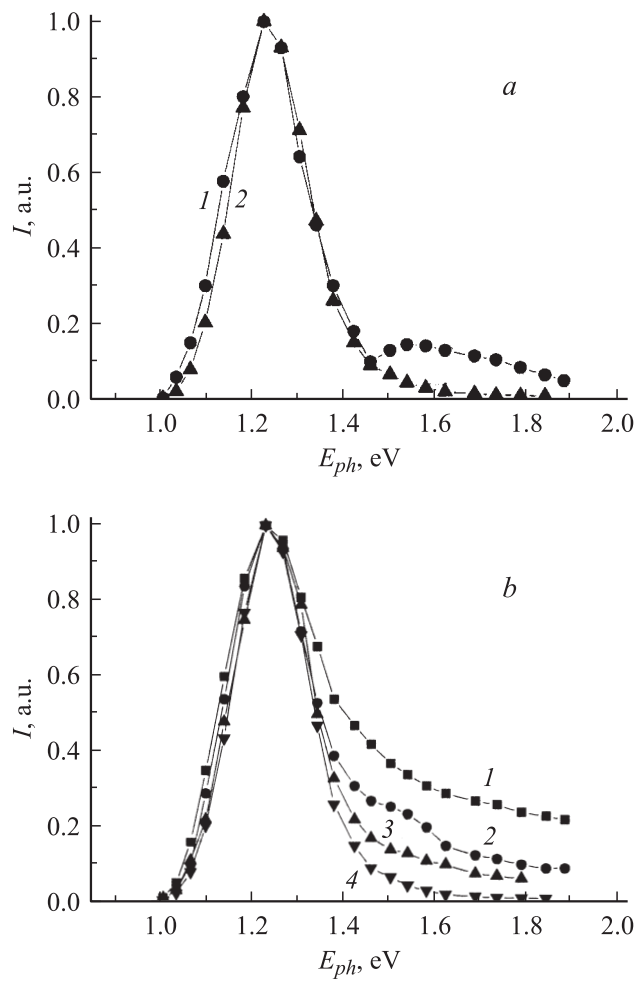


**Рис. 1.** Профиль распределения атомов Si, Ge, Ga, As в эпитаксиальном слое твердого раствора  $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$ .

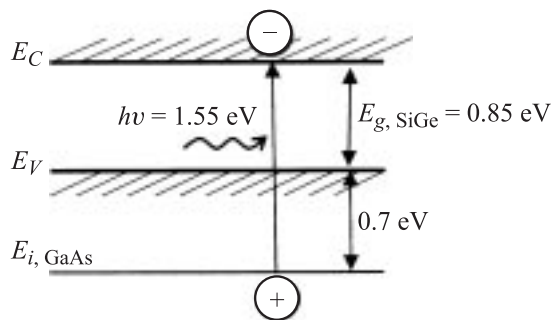
эпитаксиального слоя атомарное содержание как Ge, так и GaAs увеличивается.

Анализ растровых картин поверхности и скола эпитаксиальных слоев показывает, что распределение компонентов по поверхности слоя однородное и в объеме твердого раствора  $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$  изменяется в пределах  $x = 0 \div 0.9$  и  $y = 0 \div 0.92$ . Профиль распределения атомов Si, Ge, Ga, As в эпитаксиальном слое показан на рис. 1.

Были также исследованы спектральные зависимости фоточувствительности структуры  $n\text{Si}-p(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$  от толщины эпитаксиального слоя. Эти зависимости приведены на рис. 2. Поскольку содержание компонентов в эпитаксиальном слое по толщине меняется непрерывно, спектральные зависимости снимались при различных значениях толщины слоев. Уменьшение толщины осуществлялось механической шлифовкой. Спектральные зависимости, приведенные на рис. 2, а, снимались при толщине эпитаксиального слоя  $\approx 12 \mu\text{m}$  для одной серии образцов твердого раствора с распределением компонентов на поверхности пленки  $\text{Si}_{0.69}\text{Ge}_{0.28}(\text{GaAs})_{0.03}$ . Для сравнения на рисунке приведена спектральная зависимость  $n\text{Si}-p\text{Si}$  структуры (кривая 2, рис. 2, а). Видно, что молекулы GaAs обуславливают повышение чувствительности структуры в коротковолновой области спектра с



**Рис. 2.** Спектральная зависимость фоточувствительности: *a* — структуры  $n\text{Si} - p(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$  с  $x = 0 \div 0.28$ ,  $y = 0 \div 0.03$  (1);  $n\text{Si} - p\text{Si}$  (2), толщины эпитаксиальных слоев  $12 \mu\text{m}$ ; *b* — структуры  $n\text{Si} - p(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$  при различных значениях толщины эпитаксиального слоя: 1 —  $d = 50 \mu\text{m}$ ; 2 —  $d = 10 \mu\text{m}$ ; 3 —  $d = 5 \mu\text{m}$ . 4 — для структуры  $n\text{Si} - p\text{Si}$  с толщиной эпитаксиального слоя  $12 \mu\text{m}$ .



**Рис. 3.** Энергетическая зонная диаграмма SiGe с примесным валентно-зонным уровнем  $E_{i, \text{GaAs}}$ .

энергией квантов  $h\nu \geq 1.45 \text{ eV}$ . Наблюдается также расширение спектральной чувствительности в длинноволновую сторону, обусловленное присутствием германия. Для другой серии образцов спектральные зависимости снимались при различных значениях толщины эпитаксиального слоя. Эти зависимости приведены на рис. 2, *b*. Кривая 1 (рис. 2, *b*) соответствует толщине слоя  $50 \mu\text{m}$  с распределением компонентов на поверхности пленки  $\text{Si}_{0.005}\text{Ge}_{0.075}(\text{GaAs})_{0.92}$ . Видно, что при больших значениях содержания широкозонной компоненты GaAs (90 mol.%) наблюдается подъем чувствительности в коротковолновой области спектра, а с уменьшением содержания GaAs наблюдается постепенный спад чувствительности в коротковолновой области. При небольших значениях, около 1 ÷ 3% содержания GaAs, наблюдается пик чувствительности с энергией квантов  $h\nu \approx 1.55 \text{ eV}$  (кривая 2, рис. 2, *b*). При содержании GaAs, меньшем 1%, пик исчезает и наблюдается спад в коротковолновой области спектра (кривая 3, рис. 2, *b*). В этом случае также наблюдается расширение области спектральной чувствительности в длинноволновую сторону, обусловленное германием.

Появление пика чувствительности в коротковолновой области спектра с энергией квантов  $h\nu \approx 1.55 \text{ eV}$ , возможно, обусловлено уровнем GaAs, лежащим на  $0.7 \text{ eV}$  ниже потолка валентной зоны твердого раствора SiGe (рис. 3).

Таким образом, экспериментальные результаты показывают, что выращенный эпитаксиальный слой  $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$  ( $0 \leq x \leq 0.9$

и  $0 \leq y \leq 0.9$ ) является варизонным с высокой фоточувствительностью в широком спектральном диапазоне (по сравнению с Si) как в длинноволновой, так и в коротковолновой области спектра излучения. При значениях концентрации около 1 ÷ 3 mol.% GaAs в твердом растворе  $(\text{Si}_2)_{1-x-y}(\text{Ge}_2)_x(\text{GaAs})_y$  имеется примесный уровень, расположенный в валентной зоне  $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ .

Работа выполнена в рамках задания гранта Ф-2-152, Физика фундаментальных исследований ЦН и Т Руз.

## Список литературы

- [1] Saidov A.S., Razzakov A.Sh., Risaeva V.A., Koschanov E.A. // Materials chemistry and physics. 2001. V. 68. P. 1–6.
- [2] Андреев В.М., Долгинов Л.М., Третьяков Д.Н. Жидкостная эпитаксия в технологии полупроводниковых приборов. М.: Сов. радио, 1975. С. 328.
- [3] Хансен М., Андерко К. Структуры двойных сплавов. Т. II. М.: Metallurgizdat, 1962.
- [4] Саидов А.С., Саидов М.С., Кошчанов Э.А. Жидкостная эпитаксия компенсированных слоев арсенида галлия и твердых растворов на его основе. Ташкент: Фан, 1986. С. 127.
- [5] Саидов М.С. // Гелиотехника. 1997. № 5–6. С. 57–67.