

# Исследование элементного состава кремния, легированного атомами галлия и сурьмы

Х. М. Илиев<sup>a</sup>, С. В. Ковешников<sup>a</sup>, Б. О. Исаков<sup>a,\*</sup>,  
Э. Ж. Косбергенов<sup>b</sup>, Г. А. Кушиев<sup>a</sup>, З. Б. Худойназаров<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова,  
г. Ташкент, 100095, Узбекистан

<sup>b</sup>Национальный университет Узбекистана имени Мирзо Улугбека,  
г. Ташкент, 100174, Узбекистан

\*e-mail: [bobir6422isakov@gmail.com](mailto:bobir6422isakov@gmail.com)

Поступила в редакцию 16.11.2023

После доработки 22.04.2024

Принята к публикации 29.04.2024

Разработана диффузионная технология получения комплексов типа GaSb в кристаллической решетке кремния, а также исследованы электрические свойства полученных слоев. На основании изучения результатов рентгеноспектрального анализа микрокристаллов, образовавшихся на поверхности образца кремния, одновременно легированного атомами галлия и сурьмы, показано, что в поверхностном слое образца формируются микрокристаллы, состоящие из атомов кремния, галлия и сурьмы, и сделан вывод о возможности ориентированного роста кристаллов состава  $(\text{GaSb})_{0,8}(\text{Si})_{0,2}$  на поверхности кремния. Показано существенное влияние на профиль распределения носителей заряда процессов комплексообразования, происходящих при высоких концентрациях ионов диффундирующих примесей. В качестве технологии создания материалов, содержащих комплексы типа GaSb в объеме решетки кремния, можно предложить ионное легирование, одновременную диффузию или процессы эпитаксии.

**Ключевые слова:** кремний, галлий, сурьма, диффузия, комплексообразование, энергия связи

УДК 621.315.592

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.3.20>

## ВВЕДЕНИЕ

Для увеличения эффективности солнечных батарей требуются получение новых материалов и изучение их электрофизических параметров. Способы получения таких материалов и их использования при создании полупроводниковых приборов в настоящее время изучены недостаточно. Однако даже незначительная концентрация комплексов галлия и сурьмы в кремнии должна заметно изменить ширину запрещенной зоны материала, что позволит расширить спектр фотоактивного поглощения. Поэтому большой научный и практический интерес представляет получение в кремнии бинарных примесных комплексов и других ассоциаций примесных атомов, таких как антимонид галлия, методом диффузии. Для обеспечения максимального участия атомов галлия и сурьмы в образовании бинарных комплексов в кремнии необходимо определить условия легирования, позволяющие получить практически одинаковое распределение концентрации этих примесей в диффузионной области (приповерхностном слое) образца кремния [1–4].

В данной работе мы изучали возможности формирования бинарных соединений атомов двух элементов (галлия и сурьмы) в кристаллической решетке монокристаллического кремния [5, 6], в то время как авторы работ [7–14] исследовали кластеры атомов только одного элемента в кристаллической решетке монокристаллического кремния.

Формирование различных комплексов примесных атомов в кристаллической решетке полупроводникового материала представляет большой интерес в связи с тем, что такие материалы обладают особыми электрофизическими свойствами [15]. Образование комплексов примесных атомов в кристаллической решетке кремния в заметных концентрациях может служить основой для создания технологии получения нового материала для электронной промышленности – наноструктурированного кремния [16–18].

Цель данной работы – разработка диффузионной технологии получения комплексов типа GaSb в кристаллической решетке кремния в условиях одновременного легирования галлием и сурьмой, а также исследование элементного состава и электрических свойств полученных слоев.

## ДЕТАЛИ ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве исходного материала был выбран монокристаллический кремний КЭФ-1 с концентрацией фосфора порядка  $N_p \sim 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ .

Для проведения эксперимента образцы кремния были разделены на четыре группы.

Образцы первой группы (контроль) представляют собой исходный кремний *n*-типа. Вторая группа образцов кремния одновременно легировались примесными атомами галлия и сурьмы. В третьей группе проводилось последовательное легирование сначала галлием, а затем сурьмой. В четвертой группе – последовательное легирование сначала сурьмой, а затем галлием.

Перед диффузией все образцы кремния подвергались окислительной химической очистке, обработке травлением ( $\text{HF}:\text{HNO}_3 - 1:3$ ) и освежались в плавиковой кислоте ( $\text{HF}$ ). Такая химическая обработка позволила удалить загрязняющие вещества и оксидный слой с поверхности монокристалла кремния. Процесс диффузии для всех образцов проводили в вакуумной печи МГ17-60/300 при температуре  $T = 1200^\circ\text{C}$  в кварцевой ампуле, из которой откачивался воздух. Процесс одновременной диффузии продолжался в течение  $t = 5$  ч. Процесс последовательной диффузии третьей группы осуществляли сначала галлием в течение  $t = 1$  ч, а затем сурьмой в течение  $t = 15$  ч. Процесс последовательной диффузии четвертой группы проводили сначала сурьмой в течение  $t = 15$  ч, а затем галлием в течение  $t = 1$  ч. После диффузии поверхность всех образцов снова очищали  $\text{HF}$ .

Морфологию и состав объектов, образующихся после диффузии на поверхности кремния, изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JSM-IT200.

Профили распределения концентраций носителей заряда по глубине получали путем измерений электрофизических параметров методом Ван дер Пау с послойным удалением (по  $1\ \mu\text{m}$ ) лицевых слоев механической полировкой. Усредненные по толщине подвижность носителей заряда и удельное сопротивление материала образцов измеряли на установке Есориа HMS-3000. Из полученного массива данных профиль распределения носителей заряда получали расчетом с использованием методики [19, 20].

## ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 показана морфология поверхности, а на рис. 2 – состав микрообъектов на поверхности образца, образующихся после одновременной диффузии галлия и сурьмы.

Как видно из рис. 1, на поверхности образца имеются выросшие микрокристаллы. Для определения элементного состава этих образований исследовался рентгеновский спектр в пяти точках (спектры 002, 010, 012, 013, 014).

Сросток микрокристаллов (находящийся в точке спектра 002) имеет морфологию, соответ-

ствующую свободному росту из точечного зародыша. Спектр 002 показывает, что атомное процентное содержание галлия и сурьмы ( $\text{Ga} - 23,04\%$ ;  $\text{Sb} - 24,86\%$ ) практически равно, что позволяет предположить образование из бинарного химического соединения  $\text{GaSb}$  (диффузанта) поликристаллического сростка материала галлий–сурьма, легированного кремнием ( $\text{Si} - 6,43\%$ ).

Спектр 010 показывает, что количество кислорода значительно превышает количество атомов кремния и галлия. В этом случае можно предположить, что образуется  $\text{Ga}_2\text{O}_3$ , легированный кремнием, возможно в стеклообразном состоянии.

Микрокристалл (находящийся в точке спектра 012) имеет морфологию, соответствующую возможности ориентированного роста на поверхности кремния. В спектре 012 присутствуют атомы кремния ( $\sim 21\%$ ), галлия ( $\sim 35\%$ ) и сурьмы ( $\sim 44\%$ ). Поскольку в спектре 012 не идентифицированы другие атомы, можно предположить, что здесь образовался поликристалл состава  $(\text{GaSb})_{0,8}(\text{Si})_{0,2}$ .

В точке спектра 013 находится крупно-блочный сросток кристаллов. В спектре 013 (рис. 2г) присутствуют только атомы кремния ( $\sim 45\%$ ), галлия ( $\sim 30\%$ ) и сурьмы ( $\sim 25\%$ ), возможно, образуются микрокристаллы (рис. 3) типа  $(\text{GaSb})(\text{Si}_2)$ . Поликристаллический рост, скорее всего, говорит о существенном отличии постоянной решетки таких микрокристаллов от постоянной решетки кремния.

Полученные данные позволяют предположить возможность образования напряженных диффузионных слоев, содержащих значительное количество комплексов  $\text{GaSb}$  в решетке кремния. Для оптимизации диффузионной технологии образования комплексов  $\text{GaSb}$  в решетке кремния были проведены расчеты диффузионных процессов легирования кремния.

На рис. 4 представлен профиль концентрации носителей, полученный расчетом (кривая 1), исходя из условий диффузионной обработки при одновременной диффузии галлия и сурьмы. На этом же рисунке показан профиль концентрации носителей заряда по глубине, полученный экспериментально (кривая 2).

Как известно, при одновременной диффузии примесей, имеющих ионы разных знаков, их коэффициенты диффузии и профили концентрации сближаются [21]. Кроме того, часто происходит значительное (в несколько раз) увеличение предельной растворимости малорастворимой примеси [22] (в данном случае галлия). Это должно привести к более точной компенсации сурьмы галлием. Близкие концентрации

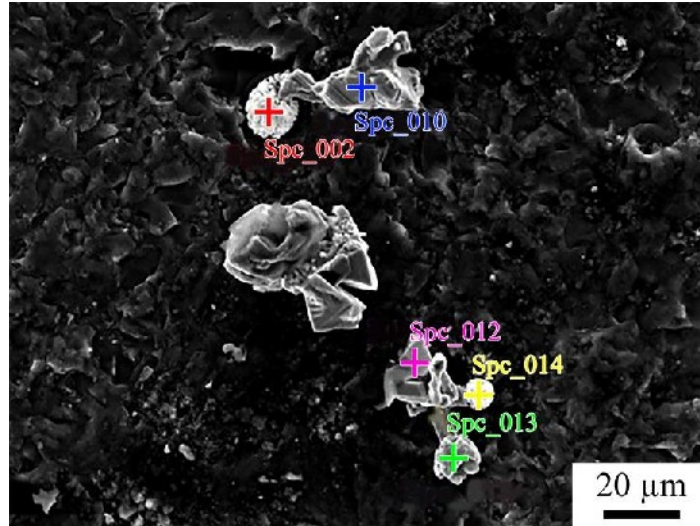
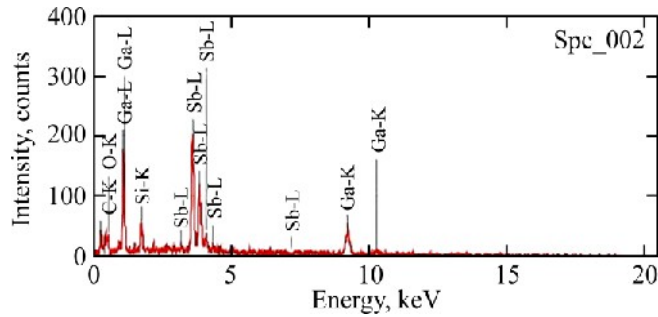
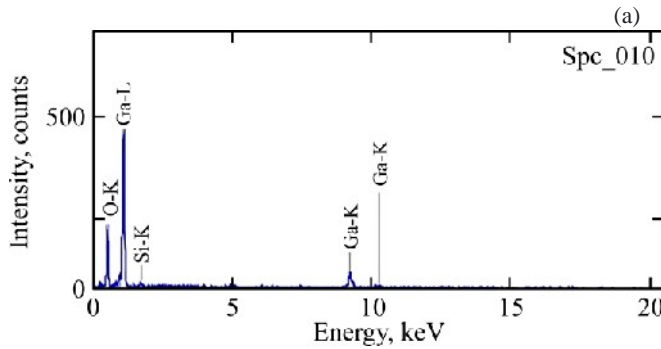


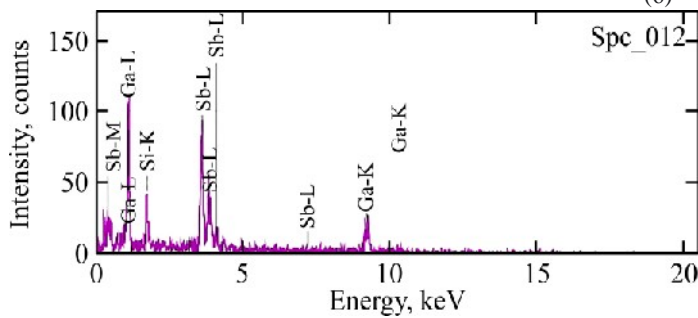
Рис. 1. Морфология поверхности образца кремния, одновременно легированного атомами галлия и сурьмы.



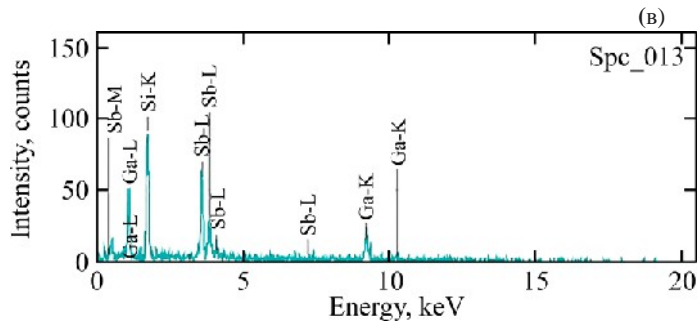
Элемент	Линия	Вес %	Атом %
C	K	8,64±0,34	38,78±1,54
O	K	2,05±0,20	6,90±0,68
Si	K	3,35±0,28	6,43±0,54
Ga	K	29,80±1,64	23,04±1,27
Sb	L	56,16±1,34	24,86±0,59
Total		100,00	100,00
Spc_002 Соотношение фитинга 0,1982			



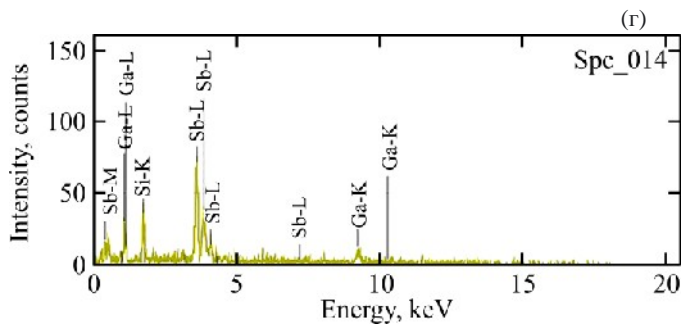
Элемент	Линия	Вес %	Атом %
O	K	34,56±1,17	68,92±2,33
Si	K	1,68±0,35	1,90±0,39
Ga	K	63,77±3,43	29,18±1,57
Total		100,00	100,00
Spc_010 Соотношение фитинга 0,1647			



Элемент	Линия	Вес %	Атом %
Si	K	6,99±0,63	20,93±1,89
Ga	K	28,87±2,54	34,80±3,07
Sb	L	64,14±2,27	44,27±1,56
Total		100,00	100,00
Spc_012 Соотношение фитинга 0,3320			



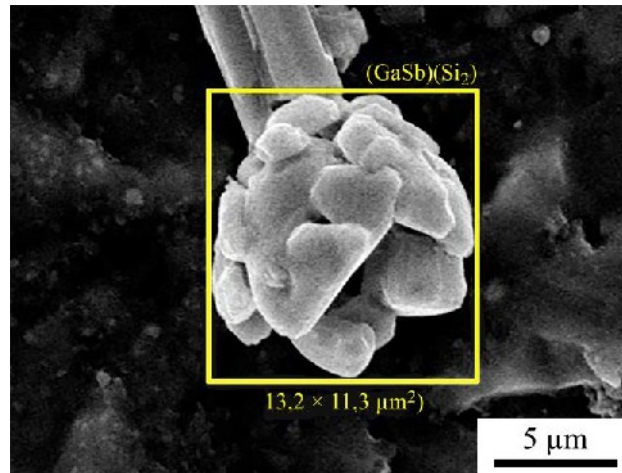
Элемент	Линия	Вес %	Атом %
Si	K	19,68±1,07	44,82±2,43
Ga	K	33,16±2,87	30,41±2,64
Sb	L	47,16±2,13	24,77±1,12
Total		100,00	100,00
Spc_013 Соотношение фитинга 0,3360			



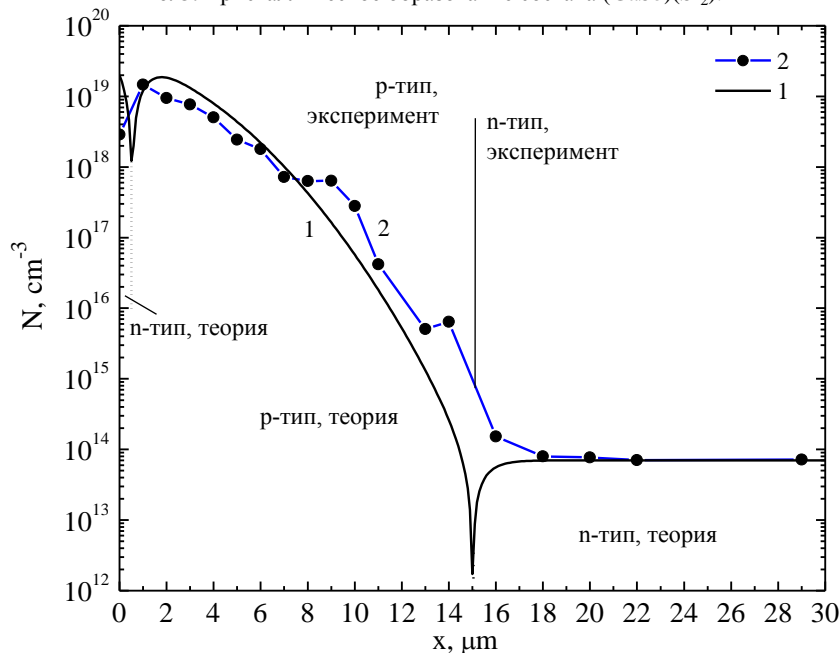
Элемент	Линия	Вес %	Атом %
Si	K	8,46±0,79	25,84±2,41
Ga	K	18,280±2,46	22,50±3,03
Sb	L	73,27±2,86	51,65±2,02
Total		100,00	100,00
Spc_014	Соотношение фитинга 0,4075		

(д)

**Рис. 2.** Результаты рентгенодисперсионного микроанализа образца кремния, легированного одновременно атомами галлия и сурьмы, полученные на сканирующем электронном микроскопе марки JSM-IT200 (рис. 1): (а) – спектр 002; (б) – спектр 010; (в) – спектр 012; (г) – спектр 013; (д) – спектр 014.



**Рис. 3.** Кристаллическое образование состава  $(\text{GaSb})(\text{Si}_2)$ .



**Рис. 4.** Профиль концентрации носителей заряда, полученный при одновременной диффузии галлия и сурьмы (1 – теория; 2 – эксперимент).

сурьмы и галлия способствуют образованию бинарных комплексов в решетке кремния.

Из рис. 4 видно, что поверхность образца остается *p*-типа, хотя предельная растворимость сурьмы больше, чем галлия, и вблизи поверхности должен образоваться *p-n*-переход (кривая 2). Измерения термозондом подтвердили отсутствие *p-n* перехода на поверхности. Кроме

того, экспериментально определенная электроактивная концентрация галлия в приповерхностной области остается достаточно высокой – более  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что увеличивает вероятность комплексообразования. Это говорит о возможности перехода значительной доли сурьмы в электрически неактивное состояние за счет образования комплексов между сурьмой и галлием.

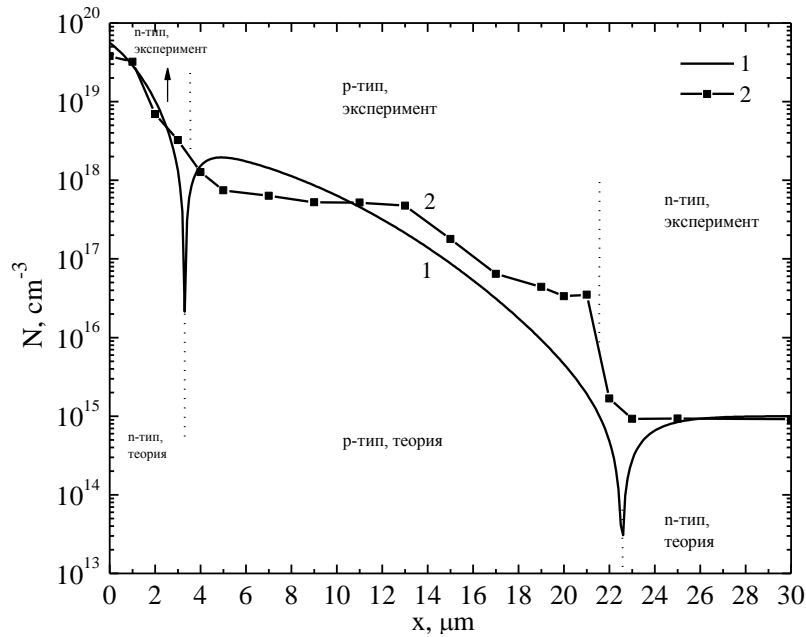


Рис. 5. Профиль концентрации носителей заряда, полученный при последовательной диффузии сначала галлия, а затем сурьмы (1 – теория; 2 – эксперимент).

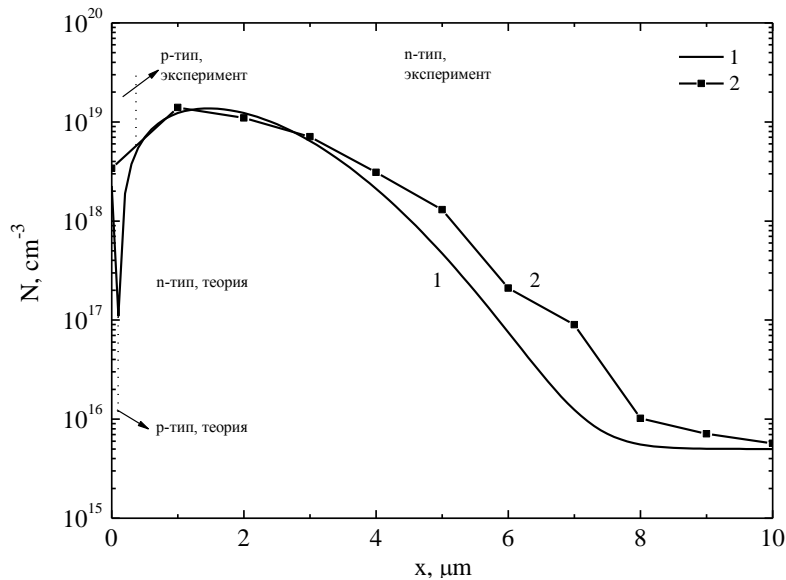


Рис. 6. Профиль концентрации носителей заряда, полученный при последовательной диффузии сначала сурьмы, а затем галлия (1 – теория; 2 – эксперимент).

Уменьшение концентрации галлия, по сравнению с теорией, в области глубин диффузии до 8 мкм также может быть объяснено влиянием комплексообразования.

На рис. 5 представлены профили концентрации носителей, полученные расчетом (1) и экспериментально (2), когда сначала проводилась диффузия галлия, а затем сурьмы. Здесь, на втором этапе диффузии, происходит разгонка введенного на первом этапе галлия и диффузия сурьмы. Так как коэффициент диффузии сурьмы меньше, чем галлия, а растворимость больше, то концентрации примесей в диффузионном слое не выравниваются. Это приводит к перекомпенсации галлия сурьмой с образованием слоя *n*-типа. В структуре формируются два *p-n*-перехода, один – с глубиной

залегания 3 мкм, второй – с глубиной залегания 23 мкм.

В случае последовательного легирования сначала сурьмой (15 ч), а затем галлием (1 ч) экспериментально полученный профиль концентрации носителей совпадает с расчетом, за исключением большей глубины проникновения сурьмы.

В поведении примесей (рис. 4, 5 и 6) наблюдаются общие закономерности.

За счет увеличения коэффициента диффузии при воздействии электрического поля ионов галлия [23, 24] сурьма входит глубже, чем в теории, и компенсирует галлий в приповерхностной области на значительную глубину (на рис. 4 – 7 мкм, а на рис. 5 – 11 мкм), что выражается в понижении электроактивной

концентрации галлия относительно теоретической. Процесс комплексообразования, возможный при высокой концентрации примесей на поверхности образца, замедляет процесс диффузии обеих примесей и уменьшает концентрацию примесей относительно теоретически рассчитанной.

Изменение процесса диффузии происходит и на больших глубинах – наблюдается заметный рост концентрации галлия вблизи глубокозалегающего *p-n* перехода (на рис. 4 – 14 мкм, а на рис. 5 – 21 мкм). Это может объясняться электростатическим влиянием ионов исходной примеси фосфора в кремнии на коэффициент диффузии галлия. Тот же эффект наблюдается для сурьмы на рис. 6. В этой области комплексообразование незначительно и не влияет на профиль концентрации примесей.

В промежуточной области глубин диффузии (на рис. 4 – от 8 до 11 мкм, а на рис. 5 – от 11 до 19 мкм) также наблюдается аномалия – заметное превышение концентрации галлия по сравнению с теоретическим распределением концентрации.

Необходимо учесть, что в этой области концентрация сурьмы пренебрежимо мала и не может оказывать непосредственного влияния на процесс диффузии галлия. Это «дальнейшее» влияние сурьмы можно объяснить тем, что коэффициент диффузии галлия и его растворимость увеличиваются из-за генерации вакансий диффундирующей сурьмой.

Аналогичные процессы наблюдались при производстве биполярных транзисторов [25] и выражались в локальном увеличении толщины базы под эмиттером. Общепринятое объяснение этого эффекта – усиленная генерация вакансий, происходящая при эмиттерной диффузии. Возможно, что генерация вакансий в области диффузии эмиттерной примеси происходит за счет «расталкивания» решетки эмиттерной примесью.

Однако возможен и другой механизм генерации потока вакансий. Если учесть возможность образования вблизи поверхности комплексов примесей и их более сложных ассоциаций, то скорость термической генерации вакансий в этих областях должна измениться.

Расчеты показывают, что энергия связи атомов Ga и Sb в комплексе GaSb, находящемся в решетке кремния, составляет 1,2 эВ. Для связи Ga-Si энергия разрыва связи – 1,54 эВ, для Sb-Si – 1,62 эВ. В то же время для разрыва связи Si-Si необходимо 2,3 эВ. Области с пониженной энергией связи атомов в решетке будут более эффективными термогенераторами вакансий в окружающее пространство [26]. Кроме того, сурьма может вытеснять галлий из его связей в

решетке кремния, генерируя поток междоузельных атомов галлия, что также увеличит коэффициент его диффузии.

Таким образом, полученные экспериментально профили концентрации носителей могут объясняться процессами комплексообразования между ионами примесей разных знаков.

Известные [26] особенности профилей распределения примесей при их высокой концентрации или одновременной диффузии ионов разных знаков объясняются электростатическим взаимодействием диффундирующих ионов примесей и образованием электронейтральных комплексов различных типов: В-В, Р-Р, В-Р, S-S и др.

Влияние явления комплексообразования на диффузионные процессы зависит от энергии связи в комплексах и в случае ионного типа связей оценивается величиной не менее 0,6 эВ. Экспериментально получены значения энергии связи В-В – 3,04 эВ [27], Р-Р – 2,085 эВ [27], S-S – 2,3444 эВ [27], В-Р – 0,59 эВ [22], Sb-Sb – 1,31 эВ [28].

Такие высокие энергии связи говорят о существенном влиянии комплексообразования на процессы диффузии.

Однако для получения достаточно высокой концентрации комплексов ионов разных знаков в кремнии необходима весьма высокая (и одинаковая) концентрация атомов обеих примесей. Для образования комплекса атомы примесей должны преодолеть расстояние, примерно равное среднему расстоянию между атомами примесей. Этот «геометрический» фактор и требует высокой и желательной одинаковой концентрации примесей, он же ограничивает влияние комплексообразования на свойства материалов при обычно используемых в технологии полупроводниковых приборов режимах проведения диффузии.

В обычных условиях последовательной диффузии примесей, имеющих на порядок отличающиеся концентрации, создание высоких и одинаковых концентраций примесей маловероятно. Поэтому в качестве технологии создания материалов, содержащих комплексы примесей типа GaSb в объеме решетки кремния, можно предложить ионное легирование, одновременную диффузию или процессы эпитаксии. Некоторые результаты можно получить, используя метод сплавления.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании изучения результатов рентгено-спектрального анализа микрокристаллов, образовавшихся на поверхности образца кремния, одновременно легированного атомами галлия и

сурьмы, делан вывод о возможности ориентированного роста кристаллов состава  $(\text{GaSb})_{0,8}\text{Si}_{0,2}$  на поверхности кремния.

Показано существенное влияние на профиль распределения носителей заряда процессов комплексообразования и электростатического взаимодействия примесей при высоких концентрациях ионов примесей разных знаков.

В качестве технологии создания материалов, содержащих комплексы типа GaSb в объеме решетки кремния, можно предложить ионное легирование, одновременную диффузию или процессы эпитаксии.

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Liu, F.M., Zhang, L.D., X-ray photoelectron spectroscopy of GaSb nanoparticles embedded in  $\text{SiO}_2$  matrices by radio-frequency magnetron co-sputtering, *Semicond. Sci. Technol.*, 1999, vol. 14, p. 710. <http://iopscience.iop.org/0268-1242/14/8/308>
- Kim, Y.M., Lo, G.Q., Kinoshita, H., Kwong, D.L., et al., Roles of extended defect evolution on the anomalous diffusion of boron in during rapid thermal annealing, *J. Electrochem. Soc.*, 1991, vol. 138, no. 4, p. 1122.
- Qingfeng, Dong, Yanjun, Fang, Yuchuan, Shao, Padhraic, Mulligan, et al., Electron-hole diffusion lengths  $>175 \mu\text{m}$  in solution-grown  $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$  single crystals, *Science*, 2015, vol. 347, no. 6225, p. 967. <https://sci-hub.st/10.1126/science.aaa5760>
- Zikrillae, N.F., Kushiev, G.A., Koveshnikov, S.V., Abdurakhmanov, B.A., et al., Current status of silicon studies with  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  binary compounds and possibilities of their applications in electronics, *East Eur. J. Phys.*, 2023, vol. 3, p. 334. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-3-34>
- Iliyev, X.M., Odzhaev, V.B., Isamov, S.B., Isakov, B.O., X-ray diffraction and Raman spectroscopy analyses of GaSb-enriched Si surface formed by applying diffusion doping technique, *East Eur. J. Phys.*, 2023, vol. 3, p. 363. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-3-38>
- Iliyev, X.M., Isamov, S.B., Isakov, B.O., Qurbonova, U.X., et al., A surface study of Si doped simultaneously with Ga and Sb, *East Eur. J. Phys.*, 2023, vol. 3, p. 303. <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2023-3-29>
- Gobinda Das, Precipitation of copper in silicon, *J. Appl. Phys.*, 1973, vol. 44, no. 10, p. 4459. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1661982>
- Bakhadyrkhanov, M.K., Iliyev, K.M., Mavlonov, G.K., Ayupov, K.S., Silicon with magnetic nanoclusters of manganese atoms as a new ferromagnetic material, *Techn. Phys.*, 2019, vol. 64, no. 3, p. 385. <https://doi.org/10.1134/S1063784219030046>
- Bakhadyrkhanov, M.K., Isamov, S.B., Kenzhaev, Z.T., Melebaev, D., et al., Silicon photovoltaic cells with deep p-n-junction, *Appl. Solar Energ.*, 2020, vol. 56, no. 1, p. 13. <https://doi.org/10.3103/S0003701X2001003X>
- Bakhadirhanov, M.K., Mavlonov, G.H., Iliyev, X.M., Ayupov, K.S., et al., Specific features of magnetoresistance in overcompensated manganese-doped silicon, *Semiconductors*, 2014, vol. 48, no. 8, p. 986. <https://doi.org/10.1134/S106378261408003X>
- Bakhadyrkhanov, M.K., Mavlonov, G.K., Isamov, S.B., Sattarov, O.E., et al., Photoconductivity of silicon with multicharged clusters of manganese atoms  $[\text{Mn}]_4$ , *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2010, vol. 46, no. 3, p. 276. <https://doi.org/10.3103/S1068375510030154>
- Yunusov, Z.A., Yuldashev, S.U., Igamberdiev, K.T., Kwon, Y.H., et al., Ferromagnetic states of p-type silicon doped with Mn, *J. Korean Phys. Soc.*, 2014, vol. 64, no. 10, p. 1461. <https://doi.org/10.3938/jkps.64.1461>
- Bakhadyrkhanov, M.K., Isamov, S.B., Zikrillae, N.F., Current-voltage behavior of silicon containing nanoclusters of manganese atoms, *Inorg. Mater.*, 2014, vol. 50, no. 4, p. 325. <https://doi.org/10.1134/S0020168514040025>
- Bisognin, G., De Salvador, D., Napolitani, E., Carnera, A., et al., Lattice strain induced by boron clusters in crystalline silicon, *Semicond. Sci. Technol.*, 2006, vol. 21, p. L41. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/21/6/L01>
- Zikrillae, N.F., Koveshnikov, S.V., Isamov, S.B., Abdurahmonov, B.A., et al., Spectral dependence of the photoconductivity of  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$  type graded-gap structures obtained by diffusion technology, *Semiconductors*, 2022, vol. 56, no. 1, p. 29. <https://doi.org/10.1134/S1063782622020191>
- Monzur-UI-Akhir, A.A.Md., Mori Masayuki, Koichi Maezawa, An investigation of the crystalline nature for GaSb films on Si(111) at varied growth temperature and growth rate, *Jap. J. Appl. Phys.*, 2019, vol. 58, art. ID S11A17. <https://doi.org/10.7567/1347-4065/ab23f8>
- Dropiewski, K., Tokranov, V., Yakimov, M., Oktyabrsky, S., et al., MBE growth and digital etch of GaSb/InAs nanowires on Si for logic applications, *J. Vac. Sci. Technol. B*, 2017, vol. 35, no. 2, art. ID 02B115. <https://doi.org/10.1116/1.4978782>
- Zikrillae, N.F., Tursunov, O.B., Kushiev, G.A., Development and creation of a new class of graded-gap structures based on silicon with the participation of Zn and Se atoms, *Surf. Eng. Appl. Electrochem* 2023, vol. 59, no. 5, p. 67. <https://doi.org/10.3103/S1068375523050198>
- Irvin, J.C., Resistivity of bulk silicon and of diffused layers in silicon, *Bell Syst. Techn. J.*, 1962, vol. 41, no. 2, p. 387. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1962.tb02415.x>

20. Galvagno, G., La Ferla, A., La Via, F., Raineri, V., et al., Hole mobility in aluminium implanted silicon, *Semicond. Sci. Technol.*, 1997, vol. 12, p. 1433. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/12/11/018>
21. Ugaste, Ü., Primets, J., Calculating of diffusion profiles in ternary systems using effective interdiffusion coefficients of components, *Defect Diffus. Forum*, 2013, vol. 333, p. 73.
22. Bakhadyrkhanov, M.K., Kenzhaev, Z.T., Koveshnikov, S.V., Usmonov, A.A., et al., Formation of complexes of phosphorus and boron impurity atoms in silicon, *Inorg. Mater.*, 2022, vol. 58, no. 1, p. 1. <https://doi.org/S0020168522010034>
23. Matsumoto, S., Osada, K., Zaitso, Y., Shimizu, T., et al., Stress in silicon nitride films and its effect on boron diffusion in silicon, *Defect Diffus. Forum*, 1998, vols. 153–155, p. 25. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.153-155.25>
24. Hong Ye, Liangliang Tang, Kuijun Li, The intrinsic relationship between the kink-and-tail and box-shaped zinc diffusion profiles in n-GaSb, *Semicond. Sci. Technol.*, 2013, vol. 28, no. 1, art. ID 015001. <https://doi.org/10.1088/0268-1242/28/1/015001>
25. Wang, S.Y., Chang, C.A., Chang, C.M., Chen, S.H., et al., Investigation of emitter size effect in InP/InGaAsSb/InGaAs double heterojunction bipolar transistors, *Appl. Phys. Lett.*, 2012, vol. 101, art. ID 073507. <https://doi.org/10.1063/1.4745208>
26. Teramoto, I., Calculation of distribution equilibrium of amphoteric silicon in gallium arsenide, *Phys. Chem. Solids*, 1972, vol. 33, p. 2089.
27. Cottrell, T.L., *The Strengths of Chemical Bonds*. London: Butterworths publications, 1958. 317 p.
28. Jun Ho Lee, Woo Hyung Lee, Jong Kwan Park, Jeong Han Yi, et al., Thermal properties of ternary Ge-Sb-Se chalcogenide glass for use in molded lens applications, *J. Non-Cryst. Solids*, 2016, vol. 431, p. 41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2015.04.003>

### Summary

This work is devoted to the development of a diffusion technology for creating gallium antimonide (GaSb)-type complexes in the silicon crystal lattice as well as to the study of the electrical characteristics of the resulting layers. Based on the X-ray spectral analysis of the microcrystals formed on a silicon sample surface that was simultaneously doped with gallium and antimony atoms, it was demonstrated that the sample surface layer contains microcrystals having silicon, gallium, and antimony atoms. This allowed to admit a possibility of the oriented growth of crystals of the composition  $(\text{GaSb})_{0.8}\text{Si}_{0.2}$  on the silicon surface. A substantial impact of the processes of the complex formation that occurred at high concentrations of ions of diffusing impurities on the distribution profile of charge carriers is demonstrated. Materials containing GaSb-type complexes in the bulk of the silicon lattice can be produced using ion doping, simultaneous diffusion, or epitaxy processes.

*Keywords:* silicon, gallium, antimony, diffusion, complex formation, binding energy