

03,13

## Диффузия фосфора и галлия из напыленного слоя фосфида галлия в кремний

© Н.Ф. Зикриллаев<sup>1</sup>, С.В. Ковешников<sup>1</sup>, Х.С. Турекеев<sup>1,¶</sup>, Н. Норкулов<sup>2</sup>, С.А. Тачилин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ташкентский государственный технический университет,  
Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Национальный университет Узбекистана,  
Ташкент, Узбекистан

¶ E-mail: axmet-8686@mail.ru

Поступила в Редакцию 27 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 4 июля 2022 г.

Принята к публикации 4 июля 2022 г.

Исследовалась диффузия из слоя фосфида галлия GaP, напыленного на поверхность кремния. После диффузии образцы кремния исследовались методом Ван-дер-Пау и с помощью сканирующего электронного микроскопа, с целью определения концентрационного распределения примесных атомов фосфора и галлия.

**Ключевые слова:** диффузия, фосфид галлия, кремний, растворимость, концентрация, бинарные комплексы.

DOI: 10.21883/FTT.2022.11.53316.367

### 1. Введение

В области физики полупроводников большой интерес представляет создание бинарных комплексов в кристаллической решетке полупроводниковых материалов [1–4], в первую очередь, кремния. Как известно, элементы III и V групп имеют высокую растворимость в кремнии, однако их коэффициент диффузии имеет сравнительно малые значения, что препятствует образованию квази-молекулярных соединений (комплексов) в узлах решетки кремния [5–8].

Целью настоящей работы является изучение взаимодействия атомов галлия и фосфора в решетке кремния, происходящего в процессе диффузии из напыленного слоя фосфида галлия GaP.

### 2. Экспериментальная часть

В качестве исходного материала был выбран монокристаллический кремний Si марки КДБ-10, в котором концентрация легирующих атомов бора составляла  $N_B \approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ . Для исследования процесса диффузии на образцы кремния напылялся слой GaP.

Для напыления использовался GaP в виде порошка зернистостью 200–300  $\mu\text{m}$ , полученного дроблением монокристаллического фосфида галлия марки ФГЭЧ-1-17. Слой GaP толщиной  $\sim 1 \mu\text{m}$  напылялся на кремний методом вакуумно-термического испарения порошка на установке DILB832 с использованием кварцевой лодочки и нагревателя из вольфрама. Нагреватель укладывался на дно лодочки и засыпался порошком GaP. В процессе нагрева порошок GaP испаряется, напыляется на Si-подложку, а также оседает на внутренней поверхности кварцевой лодочки. При дальнейшем

нагреве температура поверхности кварцевой лодочки растет, и GaP начинает испаряться с поверхности лодочки. В процессе перенапыления материала в поверхности лодочки происходит частичное разложение GaP, что выражается в заметном потемнении пленки, покрывающей лодочку. Процесс напыления GaP на подложку останавливался заслонкой в момент начала заметного перенапыления. В этом случае напыленная пленка GaP имеет желтый цвет, характерный для чистого материала GaP, и высокую прозрачность для видимого света. Диффузия из напыленного слоя GaP проводилась при температуре  $T = 1000^\circ\text{C}$  в течение  $t = 10 \text{ h}$  в вакуумированных кварцевых ампулах. В этой же печи, в отдельных ампулах проводилась диффузия металлического галлия в кремний, а также фосфора из фосфата аммония на воздухе. Образцы, легированные только галлием и только фосфором, использовались в качестве контроля и позволяли изучить концентрационное распределение этих примесей в кремнии по глубине. После диффузии поверхность образцов очищалась от возможных остаточных загрязнений диффузантами и от фосфоросиликатного стекла с помощью растворов — сначала 30% HCl, а затем 10% HF. Таким образом были получены 3 группы образцов.

I группа — образцы, легированные из пленки GaP. II группа — контрольные образцы, легированные только фосфором. III группа — контрольные образцы, легированные только галлием.

Распределение удельного сопротивления по глубине образца кремния исследовалось механическим послойным удалением (полировкой по  $1 \mu\text{m}$ ) и измерением поверхностного сопротивления и подвижности с помощью метода Ван-дер-Пау на установке Van der Pauw Escoria HMS-3000.

### 3. Результаты исследований

Образцы кремния, с напыленным слоем GaP, исследовались с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) марки JSM-IT200 (энергия пучка электронов — 20 keV) для определения морфологии и состава пленки (рентгеноспектральный микроанализ) [9] на поверхности кремния (рис. 1 и табл. 1).

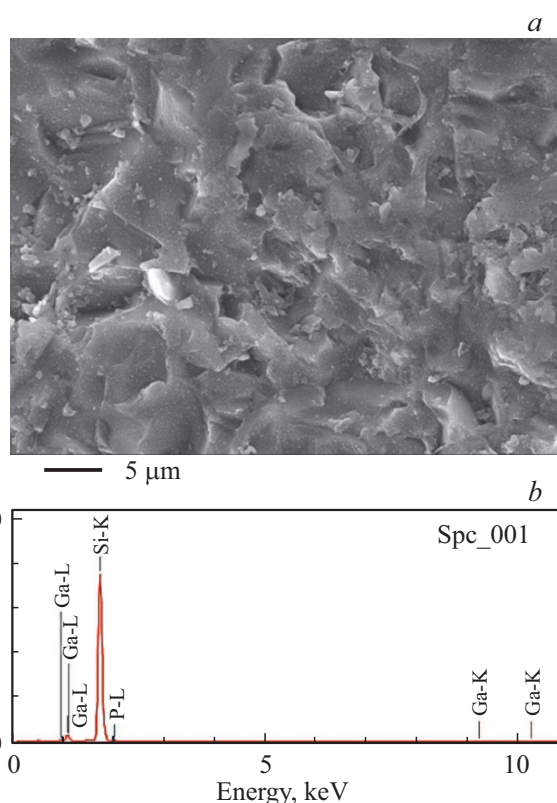
Для этого образца толщина пленки GaP не превышала 1 μm, что существенно меньше, чем глубина выхода рентгеновских квантов K-линий как в кремнии (порядка 2000 nm), так и в GaP (порядка 1400 nm). Поэтому можно считать, что отношение концентраций фосфора и галлия измерено достаточно точно, хотя их абсолютные концентрации имеют заниженные значения. Учитывая имеющиеся средние отклонения атомных концентраций галлия (8%) и фосфора (7%) можно оценить наиболее вероятное отношение фосфора к галлию — 1.49:1, то есть после напыления GaP на поверхность кремния образуется слой с избытком фосфора по сравнению со стехиометрическим составом GaP.

Избыток фосфора объясняется тем, что GaP при напылении частично разлагается, при этом получившийся металлический галлий практически не испаряется из-за низкого давления паров и остается в лодочке. Наличие кремния в результатах анализа пленки GaP объясняется тем, что ее толщина меньше средней длины пробега электронов СЭМ (для энергии 20 keV в фосфиде галлия ~ 1.4 μm), поэтому в спектре появляются линии атомов кремния, принадлежащие Si-подложке. В связи с этим можно считать, что пленка состоит из смеси GaP и фосфора. В условиях диффузии (T = 1000°C) избыток фосфора быстро испаряется в объем ампулы, а оставшаяся пленка некоторое время остается в твердом состоянии (температура плавления фосфида галлия T = 1467°C).

Этот слой является источником для диффузии атомов галлия и фосфора в кремний, обеспечивая высокую поверхностную концентрацию фосфора и галлия (порядка 2.5 · 10<sup>22</sup> см<sup>-3</sup> в начале процесса). В процессе диффузии пленка испаряется (равновесное давление пара GaP при температуре T = 1000°C составляет P ≈ 50 mm Hg) и частично разлагается за счет испарения фосфора в объем ампулы. Согласно [10], при температурах ниже T = 800°C испарение GaP в вакууме преимущественно конгруэнтно, при более

**Таблица 1.** Состав пленки GaP на кремнии (для определения состава использовались K-линии элементов)

Элемент	Mass, %	Atom, %
Si	90.62 ± 0.23	94.12 ± 0.24
P	3.74 ± 0.08	3.52 ± 0.07
Ga	5.65 ± 0.18	2.36 ± 0.08



**Рис. 1.** Морфология пленки фосфида галлия на кремнии.

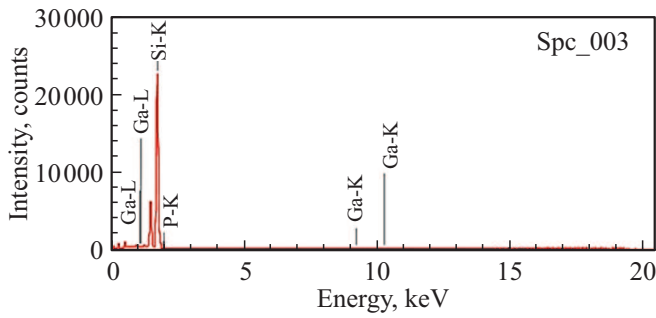
высокой температуре GaP начинает разлагаться, образуя раствор фосфора в металлическом галлии. Учитывая температуру диффузии T = 1000°C, а также низкое давление паров галлия при этой температуре (P ≈ 1 mm Hg) [11], можно считать, что фосфор полностью испаряется, образуя пар из молекул фосфора [12]. Концентрация фосфора в кварцевой ампуле, оцененная по массе пленки и объему ампулы, составляет не менее ~ 10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>. Растворимость примесей фосфора и галлия при температуре диффузии равна N<sub>P</sub> = 1 · 10<sup>21</sup> см<sup>-3</sup> и N<sub>Ga</sub> = 3 · 10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup> соответственно. Это позволяет считать, что диффузия атомов фосфора при диффузии из пленки идет как из источника с концентрацией не менее чем ~ 10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>, а диффузия галлия — как из постоянного источника (пленка металлического галлия на поверхности кремния) с концентрацией ~ 3 · 10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup>.

В случае диффузии фосфора на воздухе можно использовать для определения коэффициента диффузии и концентрации примеси следующие соотношения:

$$D_P = 10.5 \cdot \exp\left(-\frac{3.66}{kT}\right);$$

$$N_P(x) = 1 \cdot 10^{21} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4D_{Pt}}\right),$$

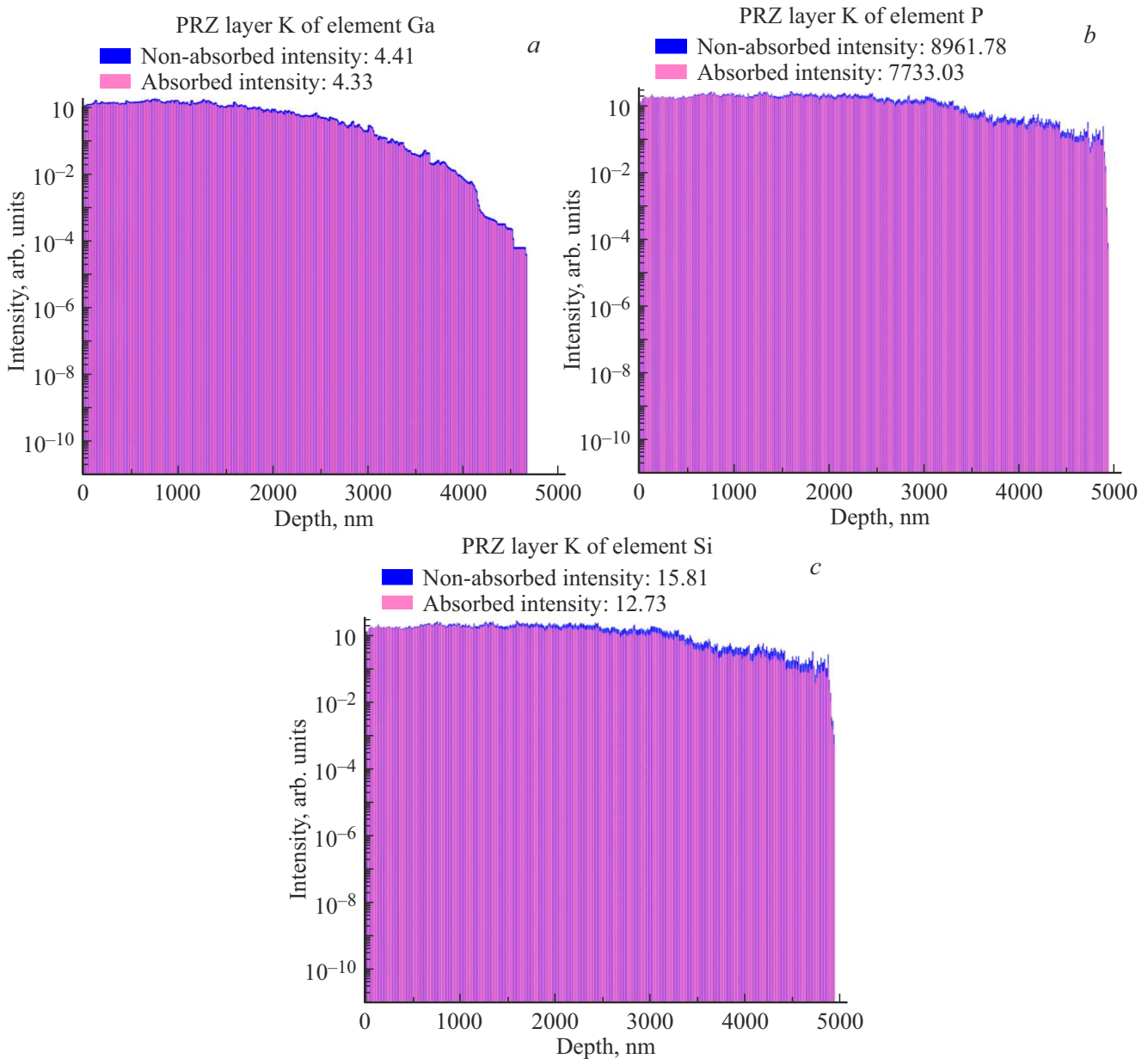
при T = 1000°C, D<sub>P</sub> = 3.5 · 10<sup>-14</sup> см<sup>2</sup>/s.



**Таблица 2.** Состав поверхностного слоя кремния после диффузии GaP из напыленного слоя

Элемент	Mass, %	Atom, %
Si	$97.52 \pm 0.32$	$98.29 \pm 0.33$
P	$1.39 \pm 0.08$	$1.27 \pm 0.07$
Ga	$1.10 \pm 0.14$	$0.45 \pm 0.06$

**Рис. 2.** Состав поверхностного слоя кремния после диффузии фосфида галлия из напыленного слоя.



**Рис. 3.** Зависимость интенсивности К-линий элементов галлий (a), фосфор (b), кремний (c) от глубины выхода, полученная с использованием программы CASINO Monte Carlo Simulation.

**Таблица 3.** Данные по составу, полученные на сколе образца — вблизи лицевой поверхности (спектр 011) и на глубине 290 nm (спектр 012)

Элемент	Вблизи лицевой поверхности (спектр 011)		На глубине ~ 290 nm (спектр 012)	
	Mass, %	Atom, %	Mass, %	Atom, %
Si	96.71 ± 0.34	97.68 ± 0.35	98.65 ± 0.31	99.03 ± 0.31
P	1.93 ± 0.09	1.77 ± 0.09	0.83 ± 0.06	0.75 ± 0.06
Ga	1.36 ± 0.14	0.55 ± 0.06	0.52 ± 0.10	0.21 ± 0.04

Для случая диффузии галлия в откочанной кварцевой ампуле можно использовать соотношения

$$D_{Ga} = 3.6 \cdot \exp\left(-\frac{3.49}{kT}\right);$$

$$N_{Ga}(x) = 4 \cdot 10^{19} \cdot \exp\left(-\frac{x^2}{4D_{Ga}t}\right),$$

при  $T = 1000^\circ\text{C}$ ,  $D_{Ga} = 5.6 \cdot 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$ .

Концентрация атомов галлия в процессе диффузии из пленки изменяется. При длительном проведении диффузии пленка галлия окисляется за счет остаточного кислорода в ампуле и кислорода из двуокиси кремния, покрывающего кремний, образуя субоксид галлия. При температуре диффузии равновесное давление паров  $\text{Ga}_2\text{O}$   $P \approx 8 \text{ mm Hg}$  [13], что соответствует  $N_{\text{Ga}_2\text{O}} \approx 1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ .

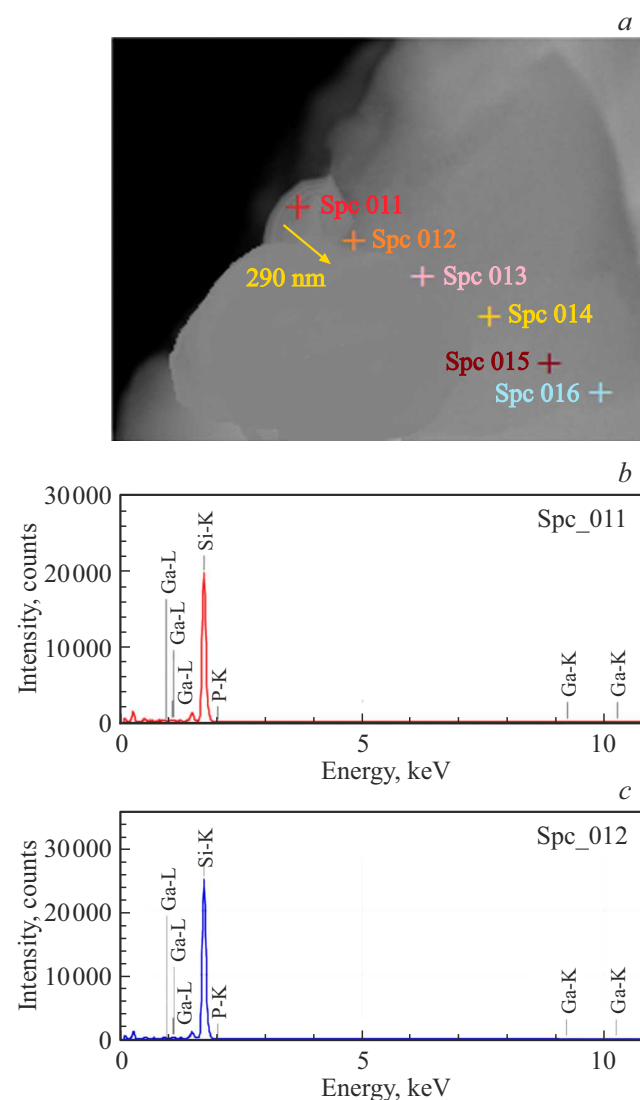
Состав поверхностного слоя после диффузии GaP (рис. 2 и табл. 2) также исследовался с помощью сканирующего электронного микроскопа марки JSM-IT200.

С помощью программы CASINO Monte Carlo Simulation были рассчитаны глубина выхода и радиальное распределение рентгеновских квантов в материале, состоящем из 96% кремния, 2% галлия и 2% фосфора (рис. 3).

По этим данным, глубина выхода 75% рентгеновских квантов для К-линии галлия составляет  $2 \mu\text{m}$  (максимум при 900 nm), для К-линии фосфора —  $2.8 \mu\text{m}$  (максимум при 1200 nm), для К-линии кремния —  $2.7 \mu\text{m}$  (максимум при 1200 nm). Радиус выхода 75% рентгеновских квантов (с учетом поглощения) для К-линий галлия, фосфора и кремния составляет 150 nm. Одинаковая величина радиуса эффективного выхода рентгеновских квантов получается из-за низких концентрацией примесей галлия и фосфора, при этом процессы поперечного рассеивания электронов определяются свойствами матрицы — кремния. Учитывая, что глубины максимумов выхода для всех элементов образца близки, можно считать, что полученные СЭМ JSM-IT200 данные по составу представляют собой усреднение по объему в форме цилиндра высотой 2800 nm и диаметром 300 nm.

Для увеличения точности построения профиля концентраций примесей фосфора и галлия проводились измерения на поверхности скола образца. В этом случае

разрешающая способность метода по глубине оценивается в 300 nm, и существенно упрощается интерпретация результатов. На рис. 4 и в табл. 3 приведены некоторые данные по составу, полученные на сколе образца.



**Рис. 4.** Данные по составу, полученные на сколе образца: *a* — общий вид торца скола, *b* — вблизи лицевой поверхности (спектр 011), *c* — на глубине ~ 290 nm (спектр 012).

На рис. 5 приведено концентрационное распределение примесей галлия и фосфора, построенное по результатам измерений на СЭМ JSM-IT200 на сколе образца.

Результаты измерения концентраций, полученные на сколе образца, требуют коррекции. При измерениях вблизи поверхности выход рентгеновских квантов выше (до 2 раз), поэтому концентрации примесей, полученные по спектру 011, завышены. С другой стороны, усреднение результатов по области размером  $\sim 300$  nm приведет к сглаживанию профиля легирования. Однако эти явления не препятствуют измерению отношения концентраций фосфора к галлию. Это отношение для спектра 011 равно 3.21:1, для спектра 012 — 3.57:1. Эти величины показывают значительное изменение растворимостей этих примесей в условиях совместной диффузии. При использовании табличных значений растворимостей фосфора и галлия в кремнии их отношение  $N_P/N_{Ga} = 1 \cdot 10^{21}/3 \cdot 10^{19} \approx 33$ .

В то же время профиль концентрации атомов фосфора (кривая 3) качественно совпадает с экспериментальными профилями, полученными в работе [14]. Это говорит о преимущественном увеличении растворимости галлия.

На рис. 6 приведены экспериментальные (полученные методом Ван-дер-Пау) усредненные распределения концентрации носителей заряда по глубине в образцах кремния: II контрольная группа — диффузия только фосфора, III контрольная группа — диффузия только галлия и I группа — после диффузии из напыленного слоя фосфида галлия.

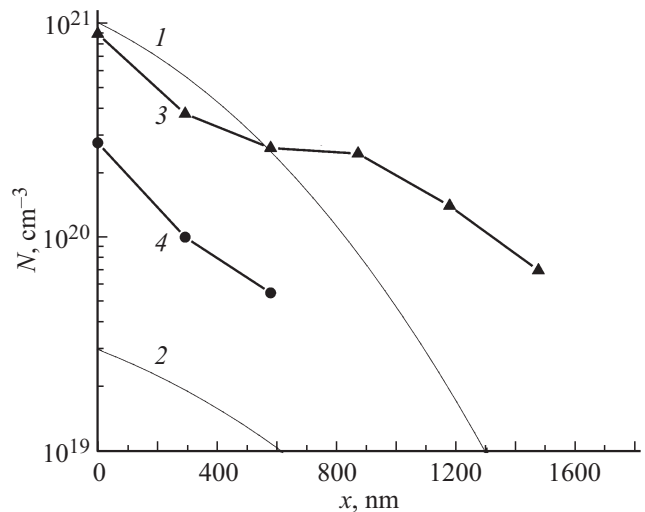
Профиль концентрации носителей заряда был получен расчетом из профилей проводимости. Если считать примесь полностью ионизованной, то этот профиль совпадает с профилем концентрации примеси.

Экспериментальные и расчетные профили распределения атомов галлия в III контрольной группе в пределах 5% ошибки совпадают.

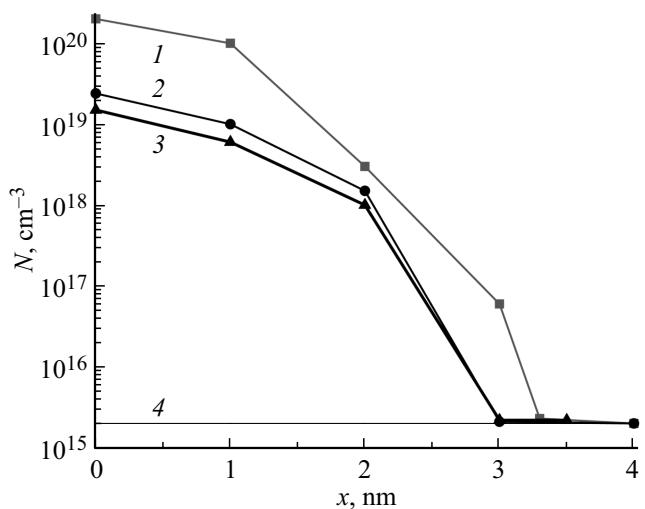
После диффузии только атомов фосфора (II контрольная группа) в кремнии образовался слой  $n$ -типа проводимости, при этом глубина залегания  $p$ - $n$ -перехода составляла  $\sim 3 \mu\text{m}$  (кривая 1).

Поверхностная концентрация носителей заряда, полученная расчетом из профилей проводимости [14], составляет  $N_P = 2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Эти результаты имеют хорошее согласие (в пределах 5% ошибки) с расчетом диффузионного профиля распределения атомов фосфора в кремнии по приведенным выше соотношениям с учетом экспериментально полученной глубины залегания  $p$ - $n$ -перехода.

Для образцов I группы в приповерхностной области, с учетом компенсации фосфора галлием, можно оценить концентрацию фосфора как удвоенную концентрацию галлия (кривые 1 и 2). Эта концентрация фосфора получается практически в 8 раз ниже, чем в случае диффузии только фосфора в кремний (кривая 6). Это видимо свидетельствует о том, что заметная часть атомов фосфора переходит в электрически не активное



**Рис. 5.** Распределение концентрации атомов фосфора и галлия в образце кремния, легированного из пленки фосфида галлия, полученное на СЭМ JSM-IT200 на сколе образца. Кривая 1 — теоретический расчет процесса диффузии для фосфора, кривая 2 — теоретический расчет процесса диффузии для галлия, кривая 3 — фосфор, кривая 4 — галлий.



**Рис. 6.** Экспериментальные усредненные распределения концентрации носителей заряда по глубине в образцах кремния: кривая 1 — II контрольная группа (только фосфор), кривая 2 — III контрольная группа (только галлий), кривая 3 — I группа (после диффузии из напыленного слоя фосфида галлия) и концентрация бора в исходном кремнии (кривая 4).

состояние, за счет образования комплексов фосфор-галлий или фосфор-фосфор-галлий.

#### 4. Обсуждение результатов

Из анализа полученных результатов можно сказать, что после термовакуумного напыления GaP на кремний образуется тонкий слой, состоящий в основном из ато-

мов фосфора и галлия в отношении 1.5:1. Это связано с частичным разложением GaP в процессе термического напыления и низкой летучестью галлия в условиях напыления.

Измерения на сколе образца (полученного диффузией из пленки GaP) показывают, что отношение концентраций фосфора к галлию достигает 3.21:1–3.57:1 в приповерхностной области образца. Это примерно на порядок больше, чем отношение индивидуальных растворимостей этих элементов в кремнии — 33:1. Учитывая, что профиль концентрации атомов фосфора качественно совпадает с экспериментальными профилями, полученными в [14], то можно говорить о преимущественном увеличении растворимости галлия.

По результатам измерений электроактивной части концентраций фосфора и галлия (рис. 6) для тех же образцов можно оценить электроактивную концентрацию фосфора как удвоенную электроактивную концентрацию галлия (кривые 1 и 2). Эта концентрация фосфора получается практически в 8 раз ниже, чем в случае диффузии только фосфора в кремний (кривая 3). Такие результаты не могут быть объяснены только процессом компенсации электроактивных атомов фосфора электроактивными атомами галлия, так как фундаментальная величина растворимости галлия составляет только ~3% от растворимости фосфора.

Все эти данные видимо свидетельствуют о том, что заметная часть атомов фосфора переходит в электрически не активное состояние — возможно, за счет образования комплексов фосфор–галлий или других.

В этих же образцах происходит значительное увеличение растворимости галлия, по сравнению с его фундаментальной растворимостью. Такое увеличение также может быть объяснено образованием комплексов галлий–галлий и галлий–фосфор. Аналогично [14], здесь наблюдается сильно легированная, но электрически не активная поверхностная область, с концентрацией фосфора, достигающей до  $\sim 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , что приводит к локальному увеличению коэффициента диффузии в приповерхностной области за счет увеличения дефектности решетки. Значительное изменение коэффициента диффузии фосфора с ростом концентрации в области более чем  $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  также описано в работе [15].

Это явление приводит к появлению „горизонтального“ участка на профиле распределения фосфора [14] и общему увеличению глубины его диффузии, что хорошо заметно на рис. 5.

Распределение концентрации атомов галлия (рис. 5, кривая 4) также не совпадает с теоретическим распределением (экспериментальная концентрация атомов галлия значительно больше, чем теоретическая), а также наблюдается некоторое уменьшение коэффициента диффузии. Это может быть объяснено процессом комплексообразования между атомами галлия и фосфора, которое достаточно эффективно в области с высокой концентрацией фосфора. Атомы галлия и фосфора могут занимать пустоты в дивакансиях, концентрация которых

в приповерхностной области, сильно легированной фосфором, велика [16]. Оценка кулоновской энергии связи галлий–фосфор в решетке кремния дает величину порядка  $\sim 0.5 \text{ eV}$ . В условиях равновесия по соотношению Аррениуса это может привести к росту концентрации галлия до  $\sim 10$  раз, что соответствует полученным экспериментальным результатам.

Численные расчеты показывают, что энергия связи галлия и фосфора имеет тот же порядок, что и энергия связи вакансий в дивакансиях. Можно считать, что равновесная концентрация дивакансий равна равновесной концентрации комплексов галлий–фосфор. Концентрация дивакансий при температуре диффузии оценивается в  $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  [17], что также позволяет оценить предел концентрации комплексов галлий–фосфор.

Образование дивакансий и их заполнение примесями позволяет также предположить образование комплексов галлий–галлий и фосфор–фосфор в процессе диффузии. Оценка энергии связи таких комплексов в решетке кремния затруднительна. Для комплексов фосфора имеется оценка энергии связи  $\sim 0.85 \text{ eV}$  [3]. Для комплексов галлий–галлий, с учетом возможной металлической связи, была получена величина  $\sim 0.45 \text{ eV}$ . Эта энергия связи практически совпадает с оценкой энергии связи фосфор–галлий. Оба эффекта образования комплексов с галлием могут привести к увеличению растворимости галлия. С учетом этого можно оценить максимальную концентрацию галлия в решетке кремния как величину, порядка концентрации дивакансий  $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ .

Кроме того, увеличение растворимости атомов галлия в кремнии возможно за счет некоторого изменения постоянной решетки кремния при сильном легировании фосфором. Такое увеличение растворимости трудно оценить.

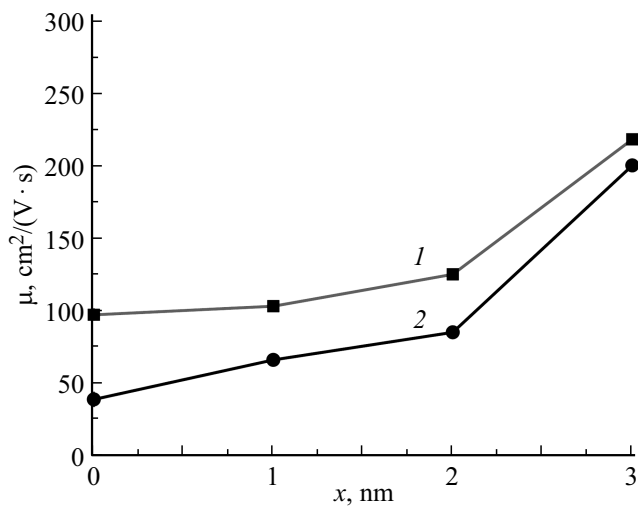
Чтобы оценить возможное влияние комплексообразования на свойства образцов, были построены профили подвижностей носителей заряда.

На рис. 7 приведены профили подвижности носителей заряда по глубине для полученных образцов кремния, определенные методом Ван-дер-Пау.

Из литературных данных [18] известно, что когда концентрация электронов в кремнии равна  $N \approx 10^{19} - 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ , то их подвижность должна составлять  $\mu \approx 80 - 90 \text{ cm}^2 / (\text{V} \cdot \text{s})$ .

Как видно из рис. 7, до глубины  $3 \mu\text{m}$  образцы кремния, легированные только атомами фосфора и легированные из напыленного слоя GaP, имеют *n*-тип проводимости. Однако подвижность электронов в слое, легированном из пленки фосфида галлия, до трех раз меньше, чем подвижность электронов в слое, легированном только атомами фосфора.

Можно предположить, что такое сильное уменьшение подвижности связано с наличием электроактивной части атомов галлия, сравнимой (порядка половины электроактивной концентрации фосфора, согласно рис. 6, кривые 1 и 2) с величиной концентрации ионизированного



**Рис. 7.** Подвижность электронов в кремнии, легированном только примесными атомами фосфора (кривая 1) и легированном из напыленного слоя фосфида галлия (кривая 2).

фосфора, а также увеличением рассеивания за счет влияния электронейтральных комплексов.

В комплексах велика доля ионной связи, поэтому рассеивающие свойства ионов Ga и P, составляющих электронейтральные комплексы, сравнимы с рассеивающими свойствами ионов Ga и P в отдельности.

Кроме того, уменьшение подвижности может быть связано с изменением рассеивания носителей заряда на решеточных неоднородностях (мультикомплексах типа  $(\text{GaP})_n$  в решетке кремния), концентрация которых вблизи поверхности может быть достаточно велика. Как видно из рис. 4, полная концентрация донорных и акцепторных примесей в приповерхностном слое в случае одновременной диффузии может быть выше предела растворимости каждой примеси в отдельности. Увеличение растворимости донорных и акцепторных примесей коррелирует с дополнительным уменьшением подвижности. Таким образом, уменьшение подвижности можно считать зависящим только от растворимости примесей, независимо от того, образуют они электронейтральные бинарные комплексы или просто компенсируют друг друга. Мы считаем, что трехкратное уменьшение подвижности по сравнению с теоретическими значениями говорит о не менее чем трехкратном росте растворимости фосфора и галлия в случае их одновременной диффузии.

## 5. Заключение

Наблюдаются существенные отклонения как электроактивной, так и общей растворимости примесей фосфора и галлия при их одновременной диффузии из слоя фосфида галлия в кремний. Изменения в поведении фосфора и галлия в процессе диффузии из пленки фосфида галлия могут объясняться взаимодействием атомов

галлия и фосфора с образованием электронейтральных комплексов в кремнии. Оценка кулоновской энергии связи галлий–фосфор в решетке кремния дает величину порядка  $\sim 0.5 \text{ eV}$ . Для комплексов фосфора имеется оценка энергии связи  $\sim 0.85 \text{ eV}$  [3]. Для комплексов галлий–галлий с учетом возможной металлической связи была получена величина  $\sim 0.45 \text{ eV}$ . Эффекты образования комплексов с галлием могут привести к увеличению растворимости галлия до величины порядка концентрации дивакансий в кремнии при температуре диффузии ( $T = 1000^\circ\text{C}$ )  $\sim 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ . Выявленное трехкратное уменьшение подвижности в полученных образцах по сравнению с теоретическими значениями говорит о значительном росте растворимости фосфора и галлия в случае их одновременной диффузии.

При образовании достаточно больших концентраций бинарных комплексов галлий–фосфор они могут оказывать существенное влияние на электрофизические, оптические и фотоэлектрические свойства кремния. Оценка такого влияния требует комплексного исследования материалов с достаточно высокой концентрацией молекулярных комплексов типа  $\text{Si}_2\text{Ga}^-\text{P}^+$  в решетке кремния [19,20].

## Финансирование работы

Исследования проводились в рамках научного проекта-54 (фундаментальный проект) 21101836.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] М.К. Бахадырханов, С.Б. Исамов. ЖТФ **91**, 1, 1678 (2021).
- [2] М.К. Бахадирханов, Н.Ф. Зикриллаев, С.Б. Исамов, Х.С. Турекеев, С.А. Валиев. ФТП **56**, 2, 199 (2022).
- [3] М.К. Бахадырханов, З.Т. Кенжаев, С.В. Ковешников, А.А. Усмонов, Г.Х. Мавлонов. Неорганические материалы **58**, 1, 3 (2022).
- [4] К.А. Исмаилов, З.Т. Кенжаев, С.В. Ковешников, Е.Ж. Косбергенов, Б.К. Исмаилов. ФТТ **64**, 5, 519 (2022).
- [5] M.K. Bakhadyrkhanov, Kh.M. Iliev, G.Kh. Mavlonov, K.S. Ayupov, S.B. Isamov, S.A. Tachilin. Tech. Phys. **64**, 3, 385 (2019).
- [6] М.К. Бахадырханов, С.Б. Исамов, Н.Ф. Зикриллаев, Х.М. Илиев, Г.Х. Мавлонов, С.В. Ковешников, Ш.Н. Ибодуллаев. Электронная обработка материалов **56**, 2, 14 (2020).
- [7] S. Adachi. Properties of group-IV, III-V and II-VI semiconductors. John Wiley and Sons Ltd (2005). 400 p.
- [8] A.S. Saidov, D.V. Saparov, Sh.N. Usmonov, A. Kutlimuratov, J.M. Abdiev, M. Kalanov, A.Sh. Razzakov, A.M. Akhmedov. Adv. Condens. Matter Phys. Hindawi 2021. Article ID 3472487 (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/3472487>
- [9] Г.М. Зеер, О.Ю. Фоменко, О.Н. Ледаева. Журн. Сибир. федерального ун-та. Химия **4**, 2, 287 (2009).

- [10] Д.В. Рязанов. Автореф. канд.дисс. Взаимодействия компонентов в фосфиде галлия и его растворах в галлии. Воронеж. гос. техн. ун-т. Воронеж (1998). 18 с.
- [11] С.П. Яценко, Л.А. Пасечник, В.М. Скачков, Г.М. Рубинштейн. Галлий: технология получения и применение жидких сплавов. Изд-во РАН, М. (2020). 344 с. ISBN 978-5-907036-93-2
- [12] R. Fornari, A. Brinciotti, A. Sentiri, T. Gorog, M. Curti, G. Zuccalli. *J. Appl. Phys.* **75**, 5, 2406 (1994).
- [13] Е.К. Казенас, Д.М. Чижигов. Давление и состав пара над окислами химических элементов. Наука, М. (1976). 344 с.
- [14] M.W. Hwang, M.Y. Um, Y.H. Kim, S.K. Lee, H.J. Kim, W.Y. Park. *J. Korean Vacuum Sci. Technol.* **4**, 3, 73 (2000).
- [15] E. Tannenbaum. *Solid State Electronics* **2**, 2–3, 123 (1961). DOI: 10.1016/0038-1101(61)90029-6
- [16] Б.И. Болтакс. Диффузия в полупроводниках. Физматгиз, М. (1961). 462 с.
- [17] И.И. Новиков. Дефекты кристаллического строения металлов. Металлургия, М. (1975). 207 с.
- [18] G. Kaiblinger-Grujin, H. Kosina, S. Selberherr. *J. Appl. Phys.* **83**, 6, 3096 (1998).
- [19] M.K. Bakhadyrkhanov, U.X. Sodikov, Kh.M. Iliev, S.A. Tachilin, T. Wumaier. *Mater. Phys. Chem.* **1**, 1, 8 (2019). DOI: 10.18282/mpc.v1i1.569
- [20] M.K. Bakhadyrkhanov, S.B. Isamov, Z.T. Kenzhaev. *EuroAsian J. Semicond. Sci. Eng.* **2**, 5, 9 (2020).

*Редактор Е.В. Толстякова*