

УДК 541.123:546.21

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ГАММА-НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА МОРФОЛОГИЮ САМОФОРМИРУЮЩИХСЯ НАНООСТРОВКОВ GeSi/Si(001)

© 2020 г. М. М. Иванова^{а, *}, Д. О. Филатов^б, А. В. Нежданов^б,
В. Г. Шенгуров^б, В. Ю. Чалков^б, С. А. Денисов^б

^а Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова,
Нижний Новгород, 119017 Россия

^б Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, 603950 Россия

*e-mail: shengurov@phys.unn.ru

Поступила в редакцию 18.04.2019 г.

После доработки 28.05.2019 г.

Принята к публикации 29.05.2019 г.

Проведены экспериментальные исследования влияния импульсного гамма-нейтронного облучения на морфологию поверхности гетероструктур GeSi/Si(001) с поверхностными самоформирующимися наноструктурами GeSi, выращенных комбинированным методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии Si и газофазной эпитаксии Ge при низком давлении. Установлено, что гамма-нейтронное облучение приводит к изменению формы самоформирующихся наноструктур GeSi, в частности, к уменьшению аспектного отношения островков. Обнаруженный эффект связан с релаксацией упругих напряжений в наноструктурах GeSi под действием упругих волн, генерируемых в процессе гамма-нейтронного облучения.

Ключевые слова: наноструктуры, германий, кремний, гамма-нейтронное излучение, радиационная стойкость, морфология, атомно-силовая микроскопия.

DOI: 10.31857/S1028096020020090

ВВЕДЕНИЕ

Радиационная стойкость элементной базы полупроводниковой оптоэлектроники (полупроводниковых лазеров, фотоприемников и т.п.) в настоящее время не в полной мере обеспечивает потребности современной радиоэлектронной аппаратуры. Одним из перспективных путей повышения радиационной стойкости полупроводниковых оптоэлектронных приборов в настоящее время считается использование в качестве материала активной области приборов массивов самоформирующихся полупроводниковых наноструктур (квантовых точек, (КТ)) [1, 2]. Гетероструктуры с самоформирующимися наноструктурами GeSi/Si(001) считаются перспективными для создания на их основе оптоэлектронных приборов, работающих в диапазоне длин волн 1.3–1.55 мкм (в так называемом коммуникативном диапазоне длин волн, который соответствует диапазону минимальных оптических потерь в кварцевых оптоволоконных световодах) [3]. Проведенные ранее экспериментальные исследования влияния различного радиационного воздействия на фотолюминесценцию [4] и электролюминес-

ценцию [5] гетероструктур с самоформирующимися наноструктурами GeSi/Si(001) показали их более высокую радиационную стойкость по сравнению с аналогичными структурами на базе Si. Повышение радиационной стойкости связывают с пространственной локализацией избыточных носителей заряда в наноструктурах GeSi, что препятствует их диффузии к радиационным дефектам в матрице Si и последующей безызлучательной рекомбинации на них [4].

Учитывая, что оптические и фотоэлектрические свойства гетероструктур с самоформирующимися наноструктурами GeSi/Si(001) существенно зависят от морфологии (наряду с составом и упругой деформацией материала островков), значительный научный и практический интерес представляют исследования влияния радиационного воздействия на морфологию указанных наноструктур.

Целью настоящей работы являлось экспериментальное исследование влияния импульсного гамма-нейтронного облучения на морфологию самоформирующихся наноструктур GeSi/Si(001)

Таблица 1. Параметры процесса роста, атомная доля Ge_x и степень упругой релаксации [9, 10] материала самоформирующихся наностроек $Ge_xSi_{1-x}/Si(001)$ на поверхности исходных образцов

№ образца	$T_g, ^\circ C$	t_g, c	x	ϵ_{rel}
1	800	30	0.24 ± 0.1	0.7 ± 0.1
2	700	60	0.33 ± 0.1	0.8 ± 0.1
3	600	240	0.55 ± 0.1	0.85 ± 0.1
4	500	60	0.9 ± 0.1	0.9 ± 0.1

с различной концентрацией Ge в материале островков.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования являлись структуры с поверхностными самоформирующимися наностройками $GeSi/Si(001)$, выращенные комбинированным методом сублимационной молекулярно-лучевой эпитаксии (СМЛЭ) Si и газовой эпитаксии (ГФЭ) Ge при низком давлении из моногермана (GeH_4) [6]. В качестве подложек использовались пластины p^+ -Si(001) марки КДБ-0.005. Подложки сначала отжигали в условиях сверхвысокого вакуума (базовое давление остаточных газов в ростовой камере составляло $\sim 10^{-8}$ Торр) при температуре $\sim 1200^\circ C$ в течение 20 мин, затем на их поверхность (при температуре подложки $\sim 1000^\circ C$) осаждали буферные слои p -Si толщиной ~ 200 нм, легированные В с концентрацией $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Далее в ростовую камеру напускался герман (GeH_4), который разлагался пиролизически на поверхности буферного слоя, в результате чего на поверхности буферного слоя осаждались слои Ge. Последние в ходе роста трансформировались в наностройки $GeSi$ по механизму Странски–Крастанова [7, 8]. Парциальное давление GeH_4 в ростовой камере p_g составляло $\sim 9 \times 10^{-4}$ Торр, температура подложки T_g в процессе осаждения Ge варьировалась в пределах $500\text{--}800^\circ C$, время напуска GeH_4 в ростовую камеру t_g – в пределах 1–4 мин. Результаты исследований зависимости параметров морфологии наностроек (поверхностная плотность островков N_s , средняя высота островков h , средние латеральные размеры D , определяемые по уровню $0.1h$ от поверхности смачивающего слоя Ge), а также средние значения атомной доли Ge_x и относительной упругой деформации материала наностроек Ge_xSi_{1-x} , выращенных комбинированным методом СМЛЭ–ГФЭ, от параметров ростового процесса (T_g , p_g и t_g) обобщены в работе [9].

В табл. 1 приведены параметры процесса формирования наностроек $GeSi$ на поверхности исследуемых структур (T_g и t_g), а также средние

значения атомной доли Ge_x и степени упругой релаксации ϵ_{rel} в материале наностроек $Ge_xSi_{1-x}/Si(001)$ в исходных образцах [9, 10]. Степень упругой релаксации материала островков ϵ_{rel} определяется как $\epsilon_{rel} = \epsilon/\epsilon_{100\%}(x)$, где ϵ – относительная упругая деформация материала, $\epsilon_{100\%}(x)$ – значение относительной упругой деформации для псевдоморфного слоя $Ge_xSi_{1-x}/Si(001)$ при данном значении x . Значения x и ϵ_{rel} были определены в работах [9, 10] методом конфокальной рамановской микроскопии (КРМ) для островков, выращенных в тех же условиях, что и островки, исследованные в настоящей работе. В отличие от широко известных методов двухкристалльной рентгеновской дифрактометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния света [11, 12], которые дают усредняющие значения параметров наностроек по площади пучка тестирующего излучения, метод КРМ позволяет получать информацию по каждому отдельному наностройку, (при условии, если размеры островков составляют ~ 100 нм, что соответствует предельной разрешающей способности метода КРМ). Наличие значительной доли Si в материале островков (несмотря на то, что изначально на поверхность буферного слоя осаждался чистый Ge) связано с диффузией Si из подложки в объем островков в процессе их роста, что понижает общую упругую энергию системы “островки–подложка” [13]. Как видно из табл. 1, с повышением T_g наблюдается уменьшение доли Ge_x в материале островков, что объясняется увеличением коэффициента диффузии Si при повышении T_g .

Исследуемые образцы подвергались импульсному гамма-нейтронному облучению в два этапа, на каждом из которых интегральный флуэнс нейтронов составлял $\approx 1.0 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$, экспозиционная доза γ -квантов ≈ 400 кР. Заметим, что при указанных выше уровнях облучения наблюдалась заметная деградация оптических и электрических параметров кремниевых структур с наностройками $GeSi/Si(001)$ и светодиодов на их основе [4, 5]. Средняя эффективная энергия сплошного спектра γ -квантов составляла ≈ 1.5 МэВ, средняя эффективная энергия спектра нейтронов составляла ≈ 0.8 МэВ с верхней границей до 18 МэВ.

Исследование морфологии поверхностных наностроек $GeSi/Si(001)$ до и после облучения образцов проводилось при использовании атомно-силового микроскопа (АСМ) Integra производства компании NT-MDT (Россия) в контактном режиме. Использовались Si-кантилеверы производства компании NT-MDT марки CSG-01 с радиусом кривизны острия $R_p < 10$ нм (согласно паспортным данным). Исследование морфологии поверхности структур, выращенных при $T_g = 500^\circ C$, проводили в полуконтактном режиме с

использованием АСМ-зондов NTMDTNSG-11 DLC с алмазоподобными нановискерами на острие. Радиус кривизны острия нановискеров R_p составлял 1–3 нм, что обеспечивало повышенное латеральное пространственное разрешение. Обработка и анализ результатов АСМ-исследований производились с помощью специализированного программного обеспечения NovaImage Analysis 1.0.26.1443 (разработчик – компании NT-MDT).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены АСМ-изображения поверхности исследуемых образцов до и после облучения. Как видно из рис. 1, с повышением T_g на исходных образцах наблюдается увеличение размеров островков с одновременным уменьшением их плотности N_s . Там же представлены результаты статистического анализа параметров морфологии наноструктур GeSi/Si(001), определенных из анализа соответствующих АСМ-изображений, в виде гистограмм распределения островков по латеральным размерам D и высоте h . Как видно из рис. 1, для всех исследованных образцов характерно бимодальное (для образца, на котором осаждение Ge проводилось при $T_g = 800^\circ\text{C}$ – тримодальное) распределение наноструктур GeSi/Si(001) по D и/или h . Результаты статистического анализа параметров морфологии наноструктур GeSi для каждой из мод представлены в табл. 2.

Бимодальное распределение по размерам характерно для наноструктур GeSi/Si(001) и связано с одновременным присутствием на поверхности наноструктур двух или более типичных форм, при этом имеет место трансформация островков из одной формы в другую в ходе роста. Так, в структурах, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), при достижении значения номинальной толщины осажденного слоя Ge d_{Ge} значения 3–5 монослоев (МС, $1 \text{ MCGe/Si}(001) \approx 0.15 \text{ нм}$) в зависимости от T_g формируются островки в форме пирамид с квадратным основанием, ограниченные плоскостями (105), с отношением аспекта $A_R = h/D \approx 1 : 10$ [14]. В диапазоне $d_{Ge} = 7–10 \text{ МС}$ пирамидальные островки трансформируются в куполообразные (дом-островки, от англ. dome – купол) [15]. Размеры дом-островков находятся в диапазоне $D = 100–150 \text{ нм}$, $h = 20–30 \text{ нм}$, что соответствует $A_R \approx 1 : 5$. При дальнейшем росте d_{Ge} , свыше 11–12 МС, (конкретное значение зависит от T_g и др. условий роста) на границе дом-островков с подложкой начинают формироваться дислокации несоответствия, способствующие релаксации упругих напряжений в материале островков: плотность дислокаций возрастает с ростом размеров островков [16]. Как видно из табл. 1, степень

упругой релаксации материала островков GeSi уменьшается с увеличением T_g , что согласуется с увеличением средних размеров островков, отмеченным выше.

Ранее было установлено [9], что процессы роста наноструктур GeSi/Si(001), полученных методом ГФЭ при низком давлении, имеют особенности, связанные с влиянием газовой атмосферы в ростовой камере. Именно (хотя зарождение наноструктур Ge происходит, как и в методе МЛЭ, по механизму Странски–Крастанова) на дальнейший их рост значительное влияние оказывают процессы обмена атомами осаждаемого вещества между островками путем поверхностной диффузии (механизм Лифшица–Слэзова–Вагнера) [17]. Данный механизм является определяющим для релаксированных островков достаточно больших размеров ($D > 150 \text{ нм}$, $h > 50 \text{ нм}$), когда упругое взаимодействие островков с подложкой уже не является определяющим. В этих условиях релаксированные островки GeSi приобретают огранку (101), $A_R \rightarrow 1 : 2$, их рост может быть описан моделью Чакраверти [18]. Ранее было установлено, что зависимости параметров морфологии наноструктур GeSi/Si(001), выращенных комбинированным методом СМЛЭ–ГФЭ, D , h и N_s от времени роста t_g (которое, при заданных значениях T_g и p_g , определяет значение d_{Ge}), имеют характер степенной функции, в соответствии с моделью Чакраверти.

На поверхности исходного образца, на котором осаждение Ge проводилось при $T_g = 800^\circ\text{C}$ (рис. 1а), наблюдаются также островки с большими латеральными размерами ($D > 300 \text{ нм}$), возникшие в результате слияния релаксированных островков между собой [9]. При этом высота слившихся островков, практически не меняется, в результате чего A_R у островков этого типа уменьшается по сравнению с крупными релаксированными островками. С этим связано тримодальное распределение островков по размерам, наблюдаемое на данном образце.

При облучении на данном образце наблюдается уменьшение D , наиболее выраженное для островков, относящихся ко второй моде (релаксированных островков), с одновременным увеличением h , т.е. увеличением A_R . Наблюдаемые изменения формы островков могут быть обусловлены релаксацией упругих напряжений в материале островков под действием облучения. Как известно [19–21], воздействие ионизирующего излучения на твердое тело связано с адиабатическим выделением энергии в локальном объеме и генерацией локальных термомеханических напряжений, которые распространяются на макроскопические расстояния вследствие генерации объемных упругих волн. Таким образом, наблюдаемые изменения формы островков GeSi/Si(001)

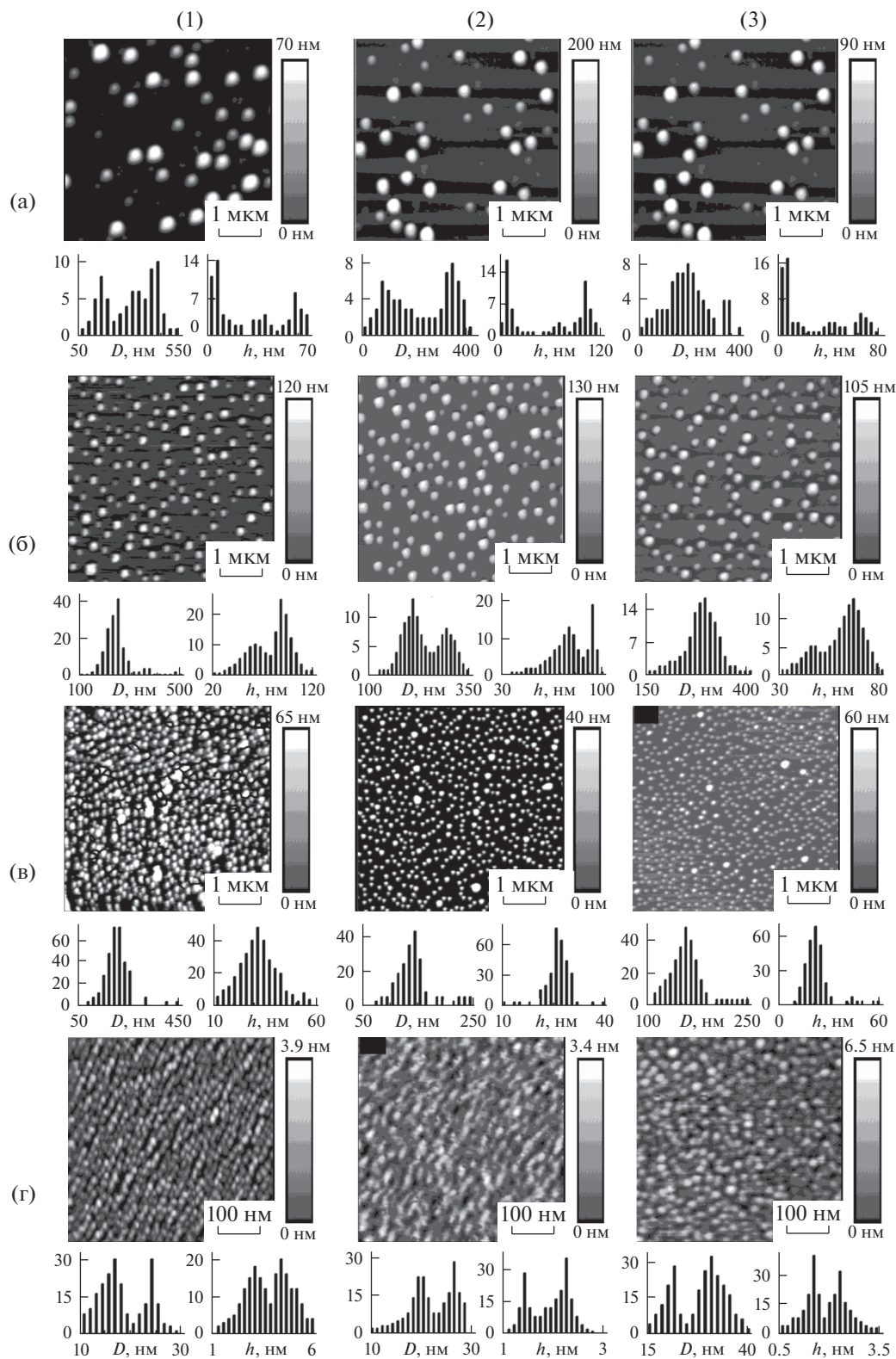


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности гетероструктур с поверхностными наноструктурами $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ и гистограммы распределения островков по среднему диаметру D и высоте h до и после импульсного гамма-нейтронного облучения образцов: а – № 1; б – № 2; в – № 3; г – № 4: 1 – исходные образцы; 2 – после первого облучения; 3 – после второго облучения.

Таблица 2. Параметры морфологии самоформирующихся наностроек Ge_xSi_{1-x}/Si(001) для различных мод распределения островков по размерам до и после облучения

№ образца	Параметр	Мода	Облучение		
			0	1	2
1	$\langle D \rangle$, нм	1	162	161	155
		2	304	279	244
		3	434	369	345
	σ_D , нм	1	78.1	32.9	24.9
		2	32.4	28.2	32.2
		3	34.3	29.2	13.7
	$\langle h \rangle$, нм	1	7.36	11.4	9.63
		2	38.7	68.1	56.7
		3	59.3	101	98.1
	σ_h , нм	1	5.96	7.67	6.98
		2	7.13	8.81	13.1
		3	4.51	6.82	10.5
N_s , см ⁻²	1	9.2×10^7	1.1×10^8	6.1×10^7	
	2	1.0×10^8	7.2×10^7	1.6×10^8	
	3	8.4×10^7	1.1×10^8	3.6×10^7	
2	$\langle D \rangle$, нм	1	232	221	216
		2	369	314	293
	σ_D , нм	1	23.8	40.6	25.7
		2	68.6	15.4	30.8
	$\langle h \rangle$, нм	1	60.6	70.5	43.2
		2	90.2	90.8	67.8
	σ_h , нм	1	12.8	10.6	6.96
		2	9.02	2.57	7.37
N_s , см ⁻²	1	5.4×10^8	3.7×10^8	1.1×10^8	
	2	5.3×10^7	1.4×10^8	3.1×10^8	
3	$\langle D \rangle$, нм	1	189	136	149
		2	393	223	230
	σ_D , нм	1	37.2	22.8	21.1
		2	97.8	32.6	35.9
	$\langle h \rangle$, нм	1	26.1	25.8	22.3
		2	47.5	41.4	49.1
	σ_h , нм	1	3.74	3.79	4.17
		2	8.43	9.3	10.9
N_s , см ⁻²	1	1.3×10^9	1.1×10^9	1.0×10^9	
	2	1.0×10^8	1.1×10^8	1.1×10^8	
4	$\langle D \rangle$, нм	1	15.4	18.4	20.8
		2	25.3	26.4	31.4
	σ_D , нм	1	3.1	3.2	2.7
		2	3.2	1.2	4.1
	$\langle h \rangle$, нм	1	1.5	1.4	3.1
		2	2.2	2.3	4.9
	σ_h , нм	1	0.14	0.36	0.61
		2	0.27	0.38	0.72
N_s , см ⁻²	1	5.4×10^{10}	4.5×10^{10}	2.6×10^{10}	
	2	2.4×10^{10}	3.7×10^{10}	7.0×10^{10}	

под действием облучения могут быть связаны с релаксацией упруго-напряженных островков, инициированной упругими волнами, генерируемыми при взаимодействии излучения с материалом подложки (увеличение A_R способствует релаксации упругих напряжений в материале островков). Заметим, что значение N_s для островков второй моды (соответствующей релаксированным островкам с наибольшим A_R) при облучении возрастает (рис. 1а, табл. 2).

Другой возможный механизм релаксации упругих напряжений в островках GeSi/Si(001) при гамма-нейтронном облучении — диффузия первичных радиационных дефектов (вакансий Si–V_{Si} из подложки), где они генерируются при взаимодействии нейтронов с ядрами атомов Si, в объеме островков GeSi. Однако, известно, что первичные радиационные дефекты в Si, т.е. V_{Si} и междоузельные атомы Si_i (пары Френкеля), обладают высокой подвижностью при комнатной температуре, и (в большинстве своем) быстро рекомбинируют, если не связываются атомами примесей или другими структурными дефектами [22]. Кроме того, как уже упоминалось выше, материал островков GeSi/Si(001) в исследованных образцах находится в упруго-напряженном состоянии сжатия [10], а слой Si, находящийся непосредственно под слоем островков, — в упруго-напряженном состоянии растяжения [23]. Известно, что в упруго-напряженных гетероструктурах растянутый слой материала подложки, непосредственно прилегающий к гетерогранице с псевдоморфным слоем, находящимся в сжатом состоянии, является потенциальным барьером для диффузии вакансий из подложки в объем псевдоморфного слоя [24]. В то же время, слой упруго-растянутого Si является геттером для междоузельных атомов Si_i. Таким образом, в данном слое имеются условия для рекомбинации пар Френкеля V_{Si}–Si_i, что также препятствует проникновению вакансий Si из подложки в объем островков GeSi/Si(001).

Наконец, накопление вакансий в островках GeSi/Si(001) является альтернативным механизмом релаксации упругих напряжений по отношению к увеличению аспектного отношения островков A_R . В случае реализации вакансионного механизма релаксации упругих напряжений в островках GeSi/Si(001) отсутствует движущая сила для изменения формы островков при облучении.

Влияние нейтронного облучения на морфологию островков GeSi/Si(001), связанное с поглощением нейтронов и трансмутацией атомов Ge и Si в составе материала островков, также представляется маловероятным из-за малости сечения взаимодействия быстрых нейтронов с ядрами Ge и Si [25], а также малости объема островков. С другой стороны, наиболее вероятным след-

ствием трансмутации атомов Si → P в материале подложки является образование комплексов V_{Si}–P, порождающими хорошо известные глубокие уровни в запрещенной зоне Si, так называемые E-центры [22]. В результате связывания вакансий Si вероятность их диффузии из подложки к островкам GeSi снижается.

Вышеизложенные соображения дают основания полагать, что наблюдаемые в эксперименте изменения морфологии наноструктур GeSi/Si(001) вызваны релаксацией упругих напряжений в островках под действием упругих волн, генерируемых при взаимодействии нейтронов с атомами Si в подложке.

Заметим также, что повторное облучение приводит к меньшему изменению морфологии островков, чем первое облучение. Это может быть связано с повышением стабильности системы “островки–подложка” в результате первого облучения: система приходит к термодинамически более равновесному состоянию в сравнении с исходным [19].

Облучение образца 2 ($T_g = 700^\circ\text{C}$) приводит к уменьшению N_s дом-островков ($D = 100 - 150$ нм, $h = 30 - 50$ нм) с одновременным увеличением числа релаксированных островков ($D \sim 300$ нм, $h \sim 100$ нм, рис. 1б, табл. 2), что также может быть связано с релаксацией упругих напряжений в островках.

Наиболее стабильное поведение параметров морфологии наноструктур GeSi/Si(001) при облучении было отмечено для островков, выращенных при $T_g = 600^\circ\text{C}$ (образец 3, рис. 1в, табл. 2). На поверхности данного образца наблюдаются преимущественно дом-островки, в которых величина упругой деформации еще не достаточна для образования дислокаций несоответствия. В то же время, на поверхности исходного образца наблюдается некоторое количество островков со значениями $D > 300$ нм, по всей вероятности, возникших при слиянии более мелких релаксированных островков (рис. 1г). Плотность таких островков незначительно возрастает при облучении.

Наноструктуры, выращенные при $T_g = 500^\circ\text{C}$ (рис. 1г), имели характерную пирамидальную форму, $D = 15 - 25$ нм, $h = 1.5 - 2.5$ нм ($A_R \approx 1 : 10$). Первое облучение не оказывает существенного влияния на форму и размеры наноструктур (рис. 1г, табл. 2). Второе облучение приводит к трансформации пирамидальных островков в куполообразные, что связано с увеличением h и соответствующим повышением A_R (рис. 1г, табл. 2) характеризующегося повышенным содержанием Ge в материале островков. Укрупнение наноструктур с сохранением повышенной поверхностной плотности может быть связано с радиационно-стимулированной диффузией Si из подложки

в объем островков в процессе облучения. При этом поверхностная плотность более мелких островков (первая мода) уменьшается с увеличением дозы облучения, а более крупных (вторая мода) – растёт (табл. 2).

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что структуры с наноструктурами GeSi/Si(001), выращенными при температуре $T_g = 600^\circ\text{C}$, являются наиболее перспективными для использования в радиационно-стойких оптоэлектронных приборах. Отметим, что согласно данным [26], структурные параметры и электронные свойства наноструктур GeSi/Si(001), выращенных комбинированным методом СМЛЭ-ГФЭ в вышеуказанных условиях, являются оптимальными для создания фотодетекторов с активной областью на базе массивов наноструктур GeSi/Si(001).

Установленные закономерности трансформации формы наноструктур GeSi/Si(001) в ходе импульсного гамма-нейтронного облучения свидетельствуют о возможности целенаправленного управления параметрами морфологии наноструктур GeSi/Si(001), а, следовательно, их свойствами и параметрами оптоэлектронных приборов на их основе. В настоящее время известны методы управления свойствами полупроводниковых структур и приборов на их основе, базирующимися на воздействии ионизирующего излучения. Такие методы успешно применяются на разных этапах изготовления изделий современной микроэлектроники [27]. Однако, для разработки подобных методов управления параметрами самоформирующихся наноструктур GeSi/Si(001) необходимы дополнительные детальные исследования влияния ионизирующего излучения на морфологию и другие параметры островков, в том числе – исследования комплексного характера. В частности, значительный интерес представляет вопрос о возможном влиянии излучения не только на морфологию, но и на состав и упруго-напряженное состояние материала островков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обнаружено, что в результате импульсного гамма-нейтронного облучения гетероструктур с поверхностными наноструктурами GeSi/Si(001) происходит изменение формы наноструктур, связанное с релаксацией упругих напряжений в материале островков, инициированной упругими волнами, генерируемыми при взаимодействии излучения с материалом подложки. Установлено, что степень трансформации островков в ходе облучения зависит от параметров морфологии, состава и степени релаксации материала островков в исходном состоянии. Полученные закономерности свидетельствуют о возможности целенаправленного управления параметрами морфологии самоформирующихся наноструктур GeSi/Si(001),

а, следовательно, их свойствами и, в свою очередь, параметрами оптоэлектронных приборов на их основе. Однако, для разработки подобных методов необходимы дальнейшие комплексные исследования влияния ионизирующего излучения на морфологию, состав и степень упругой релаксации материала островков.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнялась в рамках государственного задания № 16.7443.2017/БЧ Министерства образования и науки РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leon R., Swift G.M., Magness B. et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. № 15. P. 2074.
2. Huang M.B., Zhu J., Oktyabrsky S. // Nucl. Instrum. Methods. B. 2003. V. 211. № 4. P. 505.
3. Пчеляков О.П., Болховитянов Ю.Б., Двуреченский А.В. и др. // ФТП. 2000. Т. 34. № 11. С. 1281.
4. Новиков А.В., Яблонский А.Н., Платонов В.В. и др. // ФТП. 2010. Т. 44. № 3. С. 346.
5. Красильник З.Ф., Кудрявцев К.Е., Качемцев А.Н. и др. // ФТП. 2011. Т. 45. № 2. С. 230.
6. Шенгуров В.Г., Чалков В.Ю., Денисов С.А. и др. // Вакуумная техника и технология. 2011. Т. 21. № 1. С. 45.
7. Филатов Д.О., Круглова М.В., Исаков М.А. и др. // Известия РАН: Серия физическая. 2008 Т. 72. № 2. С. 267.
8. Филатов Д.О., Круглова М.В., Исаков М.А. и др. // ФТП. 2008. Т. 42. № 9. С. 1116.
9. Filatov D. O., Isakov M. A., Shengurov V. G. et al. // Photoluminescence: Applications, Types and Efficacy. New York: Nova Science, 2012. P. 1.
10. Машин А.И., Нежданов А.В., Филатов Д.О. и др. // ФТП. 2010. Т. 44. № 11. С. 1552.
11. Востоков Н.В., Гусев С.А., Долгов И.В. и др. // ФТП. 2000. Т. 34. № 1. С. 8.
12. Валах М.Я., Голиней Р.Ю., Джаган В.Н. и др. // ФТП. 2005. Т. 47. № 1. С. 54.
13. Liao X.Z., Zou J., Cockayne D.J.H. et al. // Phys. Rev. B. 1999. V. 60. № 23. P. 15605.
14. Voigtländer B // Surf. Sci. Rep. 2001. V. 43. № 5–8. P. 127.
15. Ross F.M., Tromp R.M., Reuter M.C. // Science. 1999. V. 286. № 5446. P. 1931.
16. Kamins T.I., Medeiros-Ribeiro G., Ohlberg D.A.A., Stanley Williams R. // J. Appl. Phys. 1999. V. 85. № 2. P. 1159.
17. Wagner C.Z. // Zeitschr. Electrochem. 1961. V. 65. № 7/8. S. 581.
18. Chakraverty B.K. // J. Phys. Chem. Solids. 1967. V. 28. № 11. P. 2413.
19. Скупов В.Д., Тетельбаум Д.И. // ФТП. 1987. Т. 21. № 12. С. 1495.
20. Киселев А.Н., Перевошиков В.А., Скупов В.Д., Филатов Д.О. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. № 17. С. 35.

21. *Киселев А.Н., Максимов Г.А., Перевоицков В.А. и др.* // Микроэлектроника. 2002. Т. 31. № 4. С. 314.
22. *Cläys C., Simön E.* Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices. Berlin-Heidelberg: Springer, 2002. 404 p.
23. *Двуреченский А.В., Якимов А.И.* // ФТП. 2001. Т. 35. № 9. С. 1143.
24. *Chen Y.C., Singh J., Bhattacharya P.K.* // J. Appl. Phys. 1993. V. 74. № 6. P. 3800.
25. *Скупов А.В.* // ФТП. 2015. Т. 49. № 5. С. 634.
26. *Филатов Д.О., Горшков А.П., Волкова Н.С. и др.* // ФТП. 2015. Т. 49. № 3. С. 399.
27. *Абдурахманов Б.А., Илиев Х.М., Тачилин С.А., Тошев А.Р.* // Микроэлектроника. 2012. Т. 41. № 3. С. 188.

Effect of Pulsed Gamma-Neutron Irradiation on the Morphology of Self-Assembled GeSi/Si(001) Nanoislands

M. M. Ivanova^{1, *}, D. O. Filatov², A. V. Nezhdanov², V. G. Shengurov², V. Yu. Chalkov², S. A. Denisov²

¹*Federal State Unitary Enterprise Federal State Scientific and Production Center "Sedakov, Research Institute of Measuring Systems", Nizhny Novgorod, GSP-486, Russia*

²*Lobachevskii State University of Nizhnii Novgorod, 23 Prospekt Gagarina (Gagarin Avenue) Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

**e-mail: shengurov@phys.unn.ru*

Experimental studies of the effect of pulsed gamma-neutron irradiation on the surface morphology of the GeSi/Si(001) heterostructures with surface self-assembled GeSi nanoislands grown by combined Sublimation Molecular Beam Epitaxy of Si and Low Pressure Vapor Phase Epitaxy of Ge have been carried out. The gamma-neutron irradiation was found to cause a change in the shapes of self-assembled GeSi nanoislands, in particular, a reduction of the aspect ratio of the nanoislands. The effect was related to the relaxation of elastic strain in the GeSi nanoislands under the action of the elastic waves generated in the course of gamma-neutron irradiation.

Keywords: nanoislands, germanium, silicon, gamma-neutron radiation, radiation resistance, morphology, atomic force microscopy.