

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОДЛОЖКИ В ПРОЦЕССЕ РОСТА НА ТОПОЛОГИЮ ПОВЕРХНОСТИ ПЛЕНКИ Ge/Si(100)

Л.С. Лунин, М.Д. Бавижев, И.А. Сысоев,
В.А. Лапин, Д.С. Кулешов, Ф.Ф. Малявин

Южный научный центр РАН
пр. Чехова, 41, Ростов-на-Дону, Россия, 346006

Исследована возможность снижения шероховатости пленки Ge/Si (100) за счет использования низкотемпературного слоя германия (LT-Ge). Было показано, что характер изменения температуры подложки в процессе роста влияет на топологию поверхности выращенной пленки Ge/LT-Ge/Si. Образцы были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

Ключевые слова: молекулярно-лучевая эпитаксия, германий, низкотемпературный слой, атомно-силовая микроскопия.

Гетероструктуры SiGe/Si вызывают повышенный интерес благодаря своим электрическим и оптоэлектрическим свойствам, а также их совместимости с существующей Si технологией [1].

Получение бездислокационных эпитаксиальных пленок германия на кремнии привлекательно как с научной, так и с прикладной точки зрения. К примеру, выращивание структур на основе GaAs на эпитаксиальной пленке германия значительно удешевит подобные структуры и приборы на их основе.

Исследования в области SiGe технологии показывают, что использование аморфных, поликристаллических и низкотемпературных буферных слоев позволяет значительно снизить плотность дислокаций в гетероструктуре [2]. В данной работе приводятся исследования морфологии структуры Ge/LT-Ge/Si. При этом изменения температуры подложки в процессе роста для каждого образца происходят так, как показано на рис. 1.

Рассогласование параметров кристаллических решеток кремния и германия (равное ~4%) приводит к тому, что при гетероэпитаксии псевдоморфный двумерный рост пленки происходит до некоторой критической толщины слоя германия, соответствующей четырем монослоям ($h_c \sim 4 \text{ МС}$). Затем накопленные напряжения снимаются путем роста бездислокационных кластеров германия на кремнии по механизму Странского—Крастанова. Послойный рост сменяется образованием так называемых hut-кластеров, имеющих форму четырехгранных пирамид, затем dome-кластеров. Появление трехмерного поверхностного рельефа может способствовать зарождению дислокаций [3]. Пониженные температуры подложки в процессе роста препятствуют развитию 3D рельефа, но даже при температуре 350 °С возможно зарождение дислокаций несоответствия на поверхностных неоднородностях.

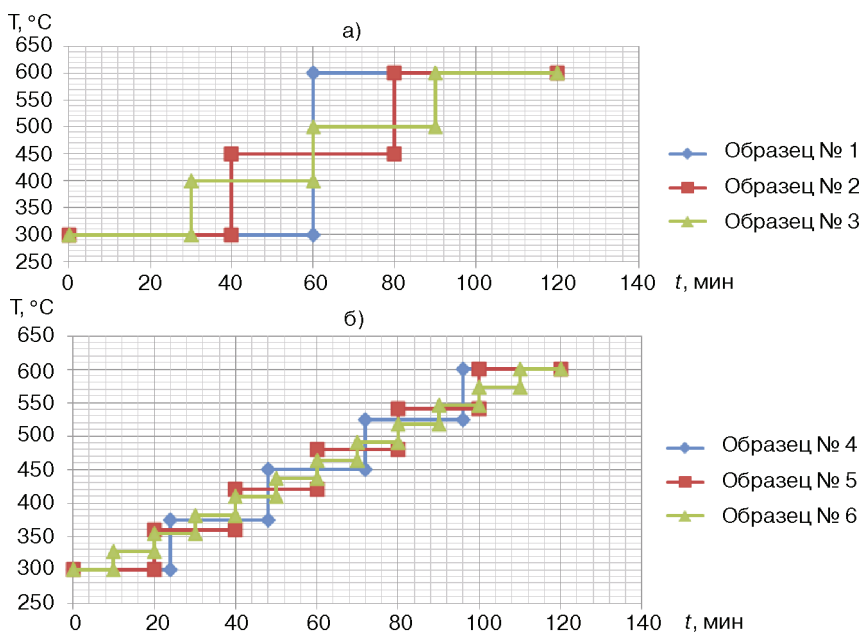


Рис. 1. Изменение температуры подложки в процессе роста пленки Ge/Si (100): а) образец № 1—3; б) образец № 4—6

Использование температур роста $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволяет получать пленку в псевдоморфном состоянии вплоть до толщин 200 нм [4]. Подобная методика уменьшения плотности пронизывающих дислокаций (ПД) в гетеросистеме Ge/Si называется On Line методом (борьба с ПД происходит в процессе эпитаксии). Однако низкотемпературные слои Ge при повышении температуры роста снова проявляют тенденцию к островкованию и повышенному введению дефектов [5; 6]. Так, в работе Halbwaх et al. [7] было показано, что низкотемпературно выращенные пленки нестабильны при толщинах не более 27 нм .

Методика

Образцы структур Ge/Si (100) были получены на установке молекулярно-лучевой эпитаксии «ЦНА» (рис. 2).

Предельное значение остаточных газов при росте составляло $3 \cdot 10^{-6}$ Па. Подготовка пластин кремния перед эпитаксией осуществлялась в 2 этапа:

1) удаление оксидного слоя SiO_2 плавиковой кислотой HF с последующей промывкой в деионизованной воде;

2) отжиг в условиях сверхвысокого вакуума при температуре $850\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для каждого из полученных образцов пленок Ge/Si (100) эпитаксия начиналась при температуре подложки $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, таким образом, был сформирован низкотемпературный слой (LT-Ge/Si). Эпитаксия происходила в течение двух часов, при этом температура подложки для каждого образца изменялась так, как показано на рис. 1 (см.).

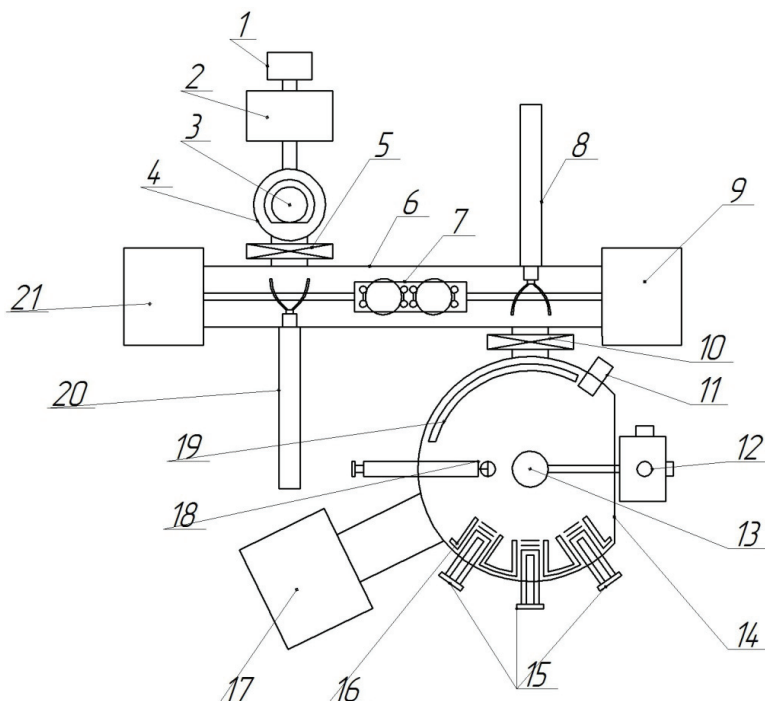


Рис. 2. Схематическое изображение установки МЛЭ «ЦНА»:

1 — форнасос; 2 — турбомолекулярный насос; 3 — накопитель подложек; 4 — камера предварительной загрузки; 5, 10 — шибер; 6 — транспортная камера; 7 — каретка перемещения подложек; 8, 20 — линейный манипулятор; 9, 17, 21 — магниторазрядный насос; 11 — вакуумметр; 12 — трехкоординатный ростовой манипулятор; 13 — узел нагрева образца; 14 — ростовая камера; 15 — эффузионные ячейки; 16 — рубашка водяного охлаждения; 18 — датчик молекулярного потока; 19 — криопанель

Полученные образцы были исследованы с помощью атомно-силового микроскопа NT-MDT Ntegra. Обработка полученных изображений произведена в программной среде Nova 1000.

Результаты и их обсуждение

На рис. 3 приведены АСМ-изображения поверхности полученных пленок Ge/Si (100). На всех изображениях присутствуют 3D островки германия, что является характерным для гетероосаждения данных материалов, вследствие рассогласования постоянных кристаллической решетки ~4%. Однако наблюдается тенденция к уменьшению латеральных размеров островков и их высот при возрастании порядкового номера образца.

Результаты анализа данных АСМ-изображений приведены в табл. 1. В ней отображены следующие величины: число шагов изменения температуры N , средняя высота h , средняя длина l , средняя ширина d , шероховатость σ .

При осаждении пленки германия на подложку Si (100) методом молекулярно-лучевой эпитаксии при неизменном потоке германия (скорость роста 250 нм/ч) и времени проведения процесса (два часа), в зависимости от характера изменения температуры подложки в процессе роста наблюдалось изменение топологии поверхности выращенной пленки (размеров 3D островков).

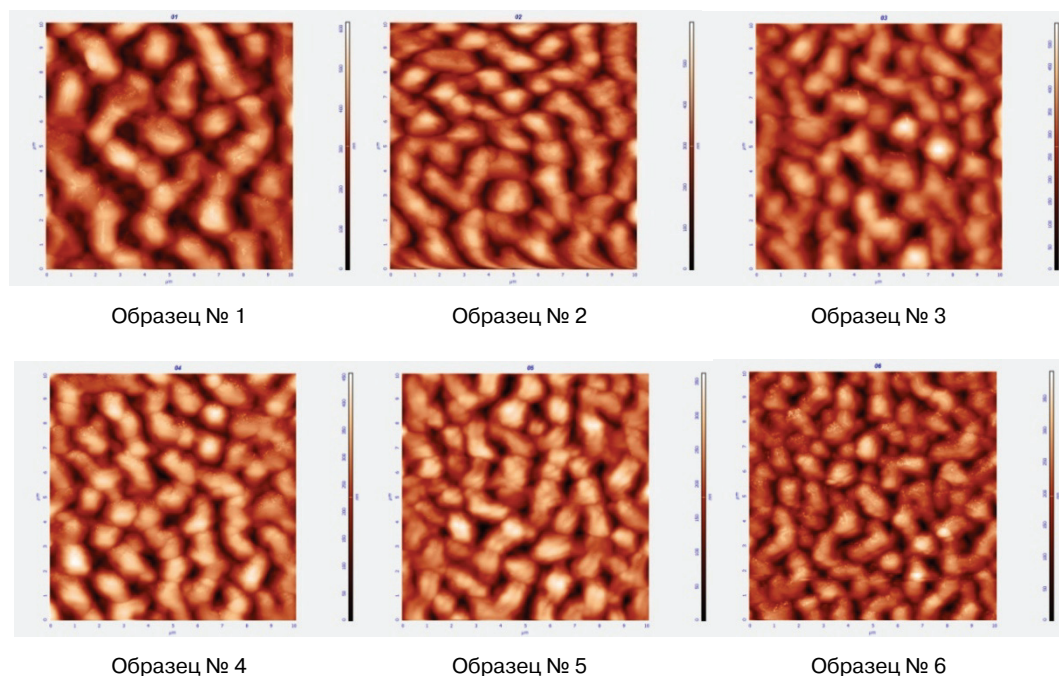


Рис. 3. АСМ изображения поверхности образцов № 1—6 (20 × 20 мкм)

Таблица 1

Статистика 3D островков для полученных образцов

Образец №	Число шагов изменения температуры, N	Средняя высота h , нм	Средняя длина l , нм	Средняя ширина d , нм	Шероховатость σ , нм
1	1	310,4	1 418,5	1 370,5	91,3
2	2	315,9	1 435,7	1 090,3	78,3
3	3	286,5	1 414,2	1 378,5	65,1
4	4	257,7	1 309,8	1 015,2	62,4
5	5	203,4	1 220,8	962,3	47,6
6	10	194,5	959,1	846,7	47,5

При анализе полученных данных была выявлена зависимость размеров островков и шероховатости пленки от числа шагов изменения температуры N от 300 до 600 °С.

На основе полученных данных были построены графики зависимостей средних значений длины, ширины и высоты островков германия, шероховатости пленки германия от числа шагов изменения температуры N , представленные на рис. 4, 5.

Из полученных данных можно заключить, что число шагов изменения температуры N подложки Si (100) в процессе роста влияет на шероховатость пленки германия, выращенной на этой подложке (рис. 5). При увеличении числа шагов изменения температуры шероховатость пленки снижается. Кроме того, уменьшается средний размер островков Ge во всех трех измерениях (рис. 4, 5).

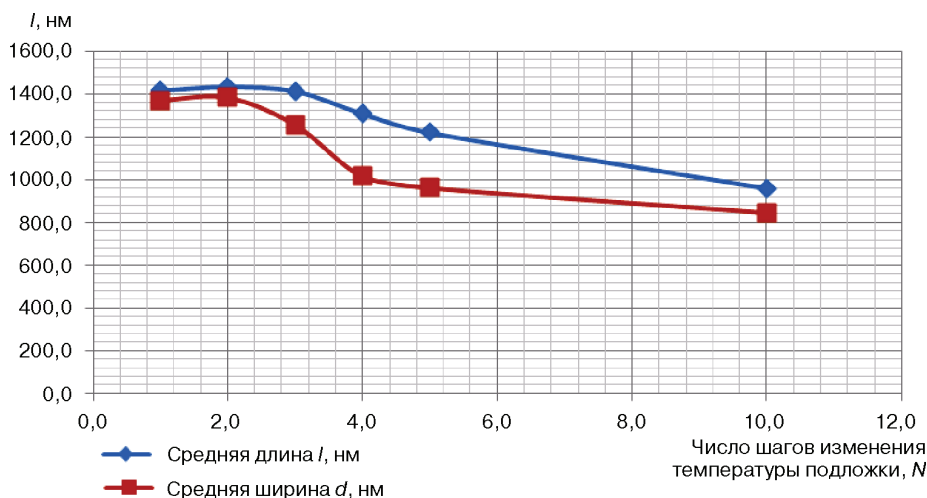


Рис. 4. Зависимость средних значений длины (l) и ширины (d) островков германия от числа шагов изменения температуры подложки N

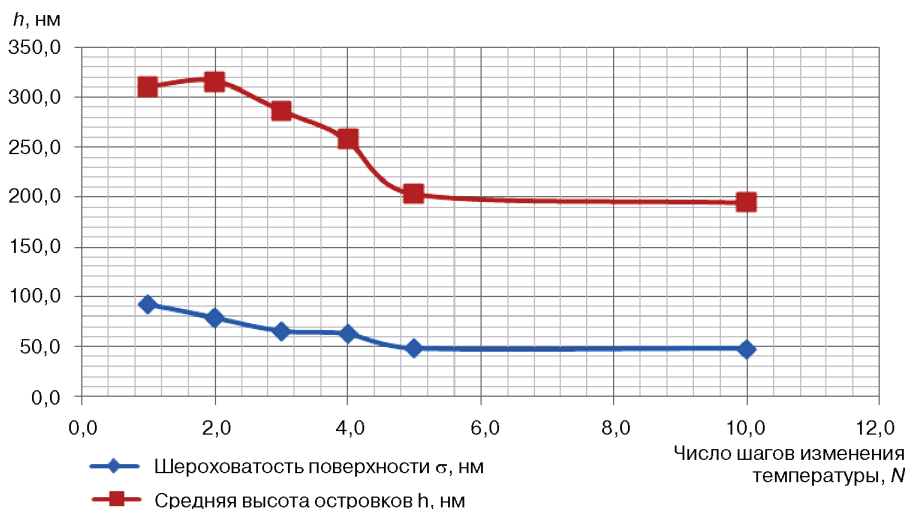


Рис. 5. Зависимость средней высоты островков Ge (h) и шероховатости пленки германия (σ) от числа шагов изменения температуры подложки N

Заключение

В условиях современной экономики основной проблемой полупроводниковой промышленности является проблема снижения стоимости технологического процесса производства. В частности, остается нерешенной задача изготовления искусственных подложек германия приборного качества. Данная проблема является комплексной и включает в себя задачу снижения шероховатости слоя германия на кремниевой подложке.

Методом атомно-силовой микроскопии были изучены образцы пленок германия на Si (100), полученные на установке МЛЭ. Было замечено, что шероховатость пленки и размеры растущих островков снижаются с увеличением числа шагов изменения температуры N от 300 до 600 °С. В образцах с меньшим N температурный переход между LT-Ge и классически выращенным слоем Ge получается резким,

что вызывает более раннее островкование и повышенное введение дефектов. Снижение шероховатости слоя и размеров островков указывает на снижение действия поверхностных источников дислокаций несоответствия, а также на уменьшение латеральной подвижности адатомов в низкотемпературных слоях. Отработанный способ является одним из эффективных способов снижения шероховатости гетероструктуры Ge/Si (100).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Ismail K., Nelson S.F., Chu J.O., and Meyerson B.S.* // Appl. Phys. Lett. 63, 660 (1993).
- [2] *Chen H., Guo L.W., Cui Q., Hu Q., Huang Q., and Zhou J.M.* // J. Appl. Phys. 79, 1167 (1996).
- [3] *Godet J., Pizzagalli L., Brochard S., Beauchamp P.* // Phys. Rev. B, 70, 054 109 (2004).
- [4] *Bolkhovityanov Yu.B., Deryabin A.S., Gutakovskii A.K., Revenko M.A., Sokolov L.V.* // Appl. Phys. Lett., 85, 6140 (2004).
- [5] *Luan H.-C., Lim D.R., Lee K.K., Chen K.M., Sandland J.G., Wada K., Kimerling L.C.* // Appl. Phys. Lett., 75, 2909 (1999).
- [6] *Liu J., Kim H.J., Hulko O., Xie Y.H., Sahni S., Bandaru P., Yablonovitch E.* // J. Appl. Phys., 96, 916 (2004).
- [7] *Halbwax M., Bouchier D., Yam V., D'ebarre D., Nguyen L.H., Zheng Y., Rosner P., Benamara M., Strunk H.P., Clers C.* // Appl. Phys. Lett, 97, 064907-1 (2005).
- [8] *Болховитянов Ю.Б., Гутаковский А.К., Дерябин А.С., Пчеляков О.П., Соколов Л.В.* «Возможности и основные принципы управления пластической релаксацией пленок GeSi/Si и Ge/Si ступенчато изменяемого состава» // Физика и техника полупроводников. — 2008. — Т. 42, в. 1. — С. 3—22.
- [9] *Болховитянов Ю.Б., Пчеляков О.П., Соколов Л.В., Чикичев С.И.* // ФТП, 37, 513 (2003).
- [10] *Бурбаев Т.М., Заварицкая Т.Н., Курбатов В.А., Мельник Н.Н., Цветков В.А., Журавлев К.С., Марков В.А., Никифоров А.И.* «Оптические свойства монослоев германия на кремнии» // Физика и техника полупроводников. — 2001. — Т. 35. — Вып. 8. — С. 979—984.
- [11] *Зенгул Э.* Физика поверхности. — М.: Мир, 1990.

THE INFLUENCE OF THE SUBSTRATE TEMPERATURE CHANGE CHARACTER DURING THE GROWTH ON THE TOPOLOGY OF THE GE/SI(100) FILM SURFACE

**L.S. Lunin, M.D. Bavizhev, I.A. Sysoev,
V.A. Lapin, D.S. Kuleshov, F.F. Malyavin**

Southern Scientific Center
Russian Academy of Sciences
Ave. Chekhov, 41, Rostov-on-Don, Russia, 346006

The possibility of roughness reducing of the Ge/Si (100) film using low-temperature layer of Ge (LT-Ge) has been investigated. It was shown that the substrate temperature change character during the growth process influences on the surface morphology of the grown Ge/LT-Ge/Si films. Samples were obtained by the method of molecular-beam epitaxy.

Key words: molecular beam epitaxy, germanium, low-temperature layer, atomic force microscopy.