

УДК 621.315.592

ЗАВИСИМОСТЬ ТОПОЛОГИИ ПОВЕРХНОСТИ И СПЕКТРОВ РАМАНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ПЛЕНОК $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ ОТ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ПО ТОЛЩИНЕ СЛОЯ

© 2013 г. Л. С. Лунин, И. А. Сысоев, М. Д. Бавижев*, В. А. Лапин*, Д. С. Кулешов**,
Ф. Ф. Малявин**

Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону

**Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь*

E-mail: viacheslavlapin@yandex.ru

*** Южно-Российский государственный технический университет, Новочеркасск*

Поступила в редакцию 16.07.2012 г.

Исследована топология поверхности и спектры рамановского рассеяния пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ (100) в зависимости от профиля изменения состава пленки по толщине. Показано, что характер изменения содержания Ge в сплаве $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ при равной интегральной доле Ge ($x_{\text{инт}} = 0.5$) в пленке в целом влияет на морфологию поверхности выращенного слоя $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$. Гетероструктуры были получены методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

DOI: 10.7868/S0023476113030120

ВВЕДЕНИЕ

Гетероструктуры SiGe/Si вызывают повышенный интерес благодаря своим электрическим и оптоэлектрическим свойствам и их совместимостью с существующей кремниевой технологией [1]. Особое внимание уделяют получению бездислокационных эпитаксиальных пленок германия на кремнии, которые также называют искусственными подложками германия. Существующие SiGe-подложки, выращенные на основе буферного слоя, имеют ряд таких недостатков, как большие толщины буферных слоев и высокие значения среднеквадратичной шероховатости слоев. Так, при толщине слоя 3–10 мкм типичная амплитуда рельефа может принимать значения 10–15 нм. За последние два десятилетия были предприняты многочисленные попытки уменьшить толщину буферного слоя $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, сохранив на приемлемом уровне или даже уменьшив плотность пронизывающих дислокаций [2].

Технология получения и свойства гетероструктур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ широко исследованы [3–5]. В настоящее время существует необходимость в контроле приборных структур на основе таких материалов неразрушающим бесконтактным методом. Этим условиям удовлетворяет метод рамановской спектроскопии.

Критическими параметрами эпитаксиальных пленок сплавов $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ при их применении в гетеропереходных устройствах являются напряженность, плотность дефектов, подвижность носителей, ширина запрещенной зоны. Существует зависимость этих параметров от состава сплава

$\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, толщины слоя и степени релаксации [6]. Эти величины можно измерить количественно с помощью рамановской спектроскопии, быстрым и неразрушающим бесконтактным методом, не требующим предварительной подготовки образца и обеспечивающим высокое пространственное разрешение.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Образцы структур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$ (100) получены на установке молекулярно-лучевой эпитаксии “ЦНА”.

Предельное значение остаточных газов при росте составляло 3×10^{-6} Па. Подготовка пластин кремния перед эпитаксией состояла из двух этапов: удаление оксидного слоя SiO_2 плавиковой кислотой HF с последующей промывкой в деионизированной воде; отжиг в условиях сверхвысокого вакуума при температуре 850°C.

Напыление слоя $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ происходило при суммарном потоке Ge и Si, соответствующем эффективной скорости роста $v = 6$ нм/мин. При этом v каждого компонента сплава рассчитывались таким образом: $v_{\text{Ge}} = vx$ для германия и $v_{\text{Si}} = v(1 - x)$ для кремния. Таким образом, эффективная толщина гетерослоя составила 600 нм для каждого образца. Температура подложки в процессе роста $T = 570^\circ\text{C}$. Кривые зависимостей изменения доли германия x в сплаве $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ от времени, прошедшего с начала процесса напыления пленки, приведены на рис. 1. При этом во всех полученных образцах интегральная доля гер-

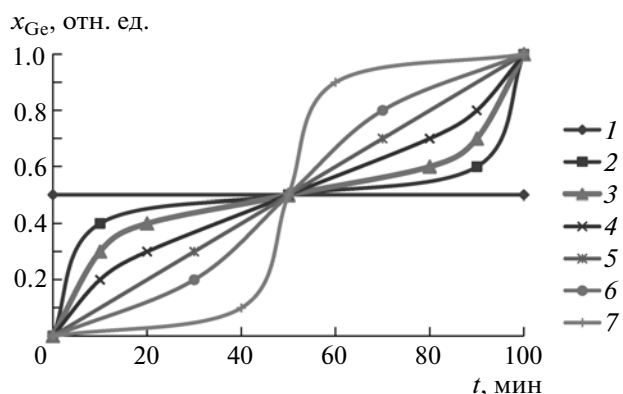


Рис. 1. График зависимости изменения доли германия x в сплаве $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ от времени t процесса.

мания x по всей толщине пленки остается постоянной ($x_{\text{инт}} = 0.5$). Образец 1 отличается тем, что по всей толщине пленки доля германия в сплаве $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ остается постоянной, $x = 0.5$. Во всех остальных образцах x постоянно изменяется в течение роста пленки (соответственно и по толщине слоя) от $x = 0$ в начале до $x = 1$ в конце процесса.

Полученные образцы исследовались с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NT-MDT Ntegra, а также метода рамановской спектроскопии. Обработка полученных с помощью АСМ изображений проведена в программной среде Nova 1000.

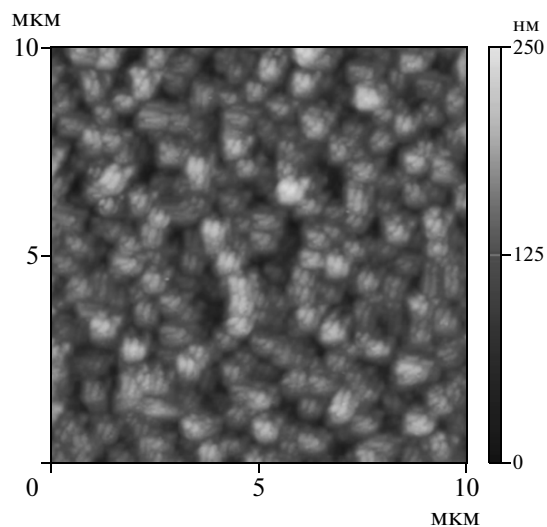


Рис. 2. АСМ-изображение поверхности образца 1.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2, 3 приведены АСМ-изображения поверхности полученных пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$. На всех изображениях присутствуют 3D-островки, что является характерным для гетероосаждения данных материалов. Образец 1 отличается от остальных образцов значительно меньшими размерами 3D-островков и большей плотностью их распределения. Результаты анализа данных

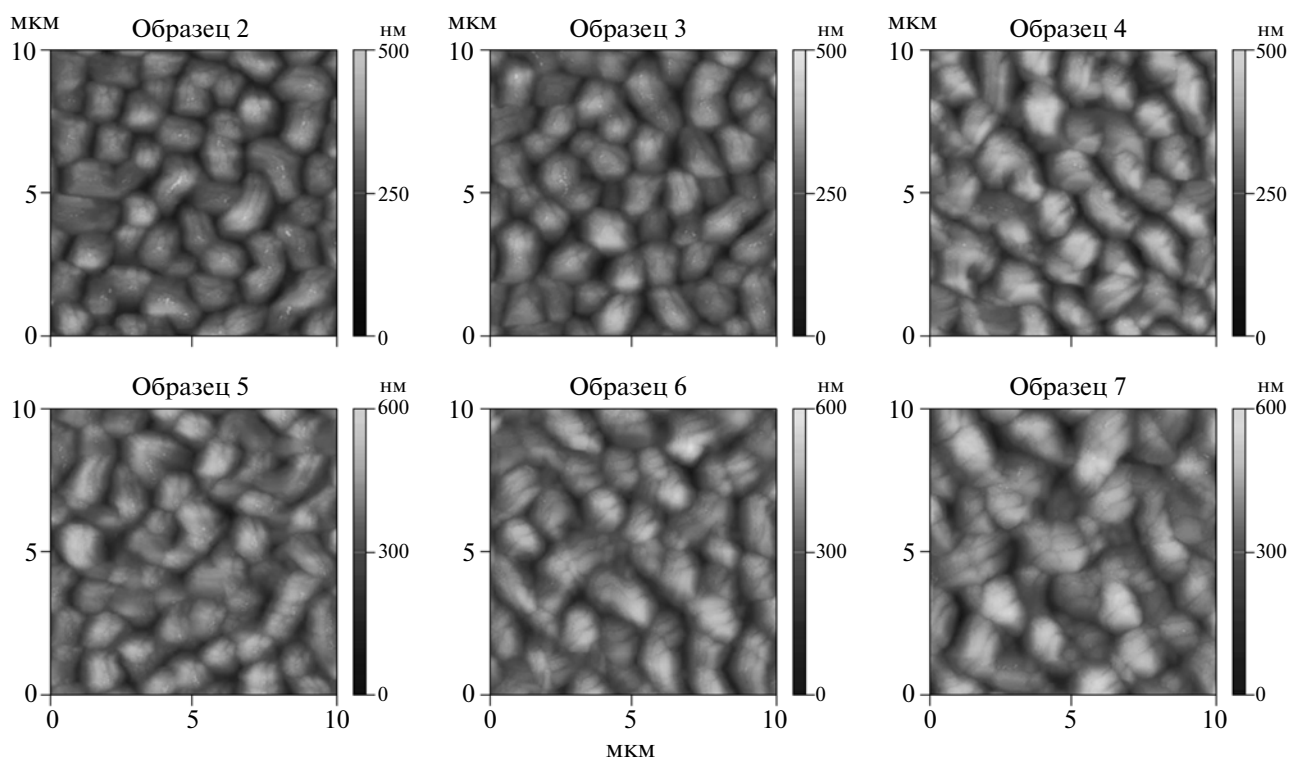


Рис. 3. АСМ-изображения поверхности образцов 2–7.

Статистика 3D-островков для полученных образцов

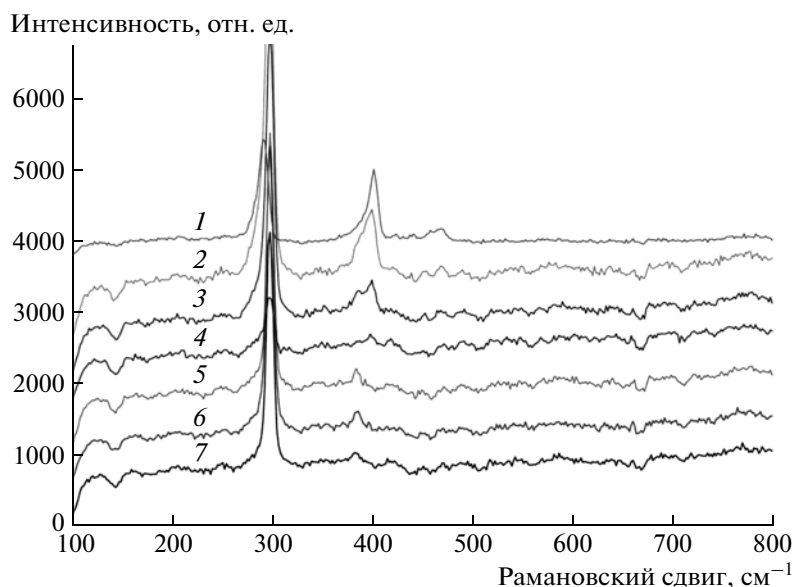
Образец	h , нм	l , нм	d , нм	σ , нм
1	120.5	520	470	26.9
2	249.6	1520	1200	55.1
3	280.5	1700	1300	59.8
4	315.2	1920	1342	65.3
5	303.5	1600	1500	56.7
6	342.8	2360	1400	65.9
7	354.8	2385	1670	71.6

АСМ-изображений приведены в таблице. В ней отображены средняя высота h , длина l , ширина d , а также шероховатость σ . Из таблицы видно, что наименьший рельеф поверхности ($h = 120.5$ нм, $\sigma = 26.9$ нм) имеет образец 1. Это связано с отсутствием поверхностного слоя пленки с долей германия x , стремящейся к единице. За счет накопленных в пленках образцов 2–7 значительных напряжений, связанных с различием параметров решеток подложки (Si) и поверхностного слоя (Ge), происходит рост 3D-островков и образуется развитый рельеф поверхности. Образец 2 с графиком зависимости $x(t)$, наиболее близким к графику образца 1 (т.е. на протяжении большей части времени проведения процесса $x \approx 0.5$), имеет наименьшие значения высоты $h = 249.6$ нм и шероховатости $\sigma = 55.1$ нм. Образец 7 имеет наибольшие среди всех остальных параметры ($h = 354.8$ нм, $\sigma = 71.6$ нм). Это связано с тем, что распределение x по времени t близко к 0 в первой половине процесса и стремится к единице во второй. Предельный случай – это эпитаксиальный слой гер-

мания с эффективной толщиной 300 нм на эпителие Si/Si (100) толщиной 300 нм. Остальные образцы имеют промежуточные, возрастающие с порядковым номером образца, значения приведенных параметров. Исключение составляет образец 5, где x изменяется по закону $x = 0.01t$. Отметим, что при таком характере изменения состава сплава тормозится выделение кристаллитов Ge в виде отдельной фазы.

На рис. 4 приведены спектры комбинационного рассеяния света для полученных образцов. Пик на частотах $295\text{--}300\text{ см}^{-1}$ соответствует связи Ge–Ge. Он присутствует на спектрах всех образцов, указывая на наличие кристаллитов германия в объеме пленки. Пик, соответствующий связи Si–Si, отчетливо не выражен, проявляется для образцов 1, 2 и лежит в диапазоне $455\text{--}480\text{ см}^{-1}$. Также на всех спектрах присутствует пик в диапазоне частот $385\text{--}410\text{ см}^{-1}$. Это свидетельствует о наличии связи Si–Ge, при этом на спектрах образцов 4–7 пик имеет малую интенсивность, так как толщина поверхностного слоя, имеющего высокое значение x , увеличивается. Как следствие, захороненные связи Si–Ge дают меньший отклик.

При увеличении x в сплавах $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ пик Ge–Ge на спектре проявляется при большей частоте, т.е. стремится к значению, соответствующему монокристаллическому германию (301 см^{-1}) [2]. Спектры образцов 2–7 имеют пик Ge–Ge на частоте $298\text{--}300\text{ см}^{-1}$, что указывает на увеличение степени релаксации напряжений в германиевых кристаллитах. В образце 1 он проявляется при 295 см^{-1} , что говорит о малой степени релаксации, а следовательно, и малом размере кристаллитов.

Рис. 4. Спектры Рамановского рассеяния света (514.5 нм) для образцов 1–7 пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные показывают, что шероховатость пленки и размеры растущих островков зависят от характера изменения состава сплава $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ по толщине при постоянной интегральной доле Ge $x_{\text{инт}} = 0.5$. Лучшие результаты достигнуты на образце 2 вследствие постепенного изменения концентрации Ge в растущей пленке в диапазоне времени процесса 10–90 мин. Шероховатость на данном образце минимальна, и островки имеют небольшие размеры, что свидетельствует о снижении количества дислокаций несоответствия в объеме выращенного слоя. Образец 2 по ряду параметров превосходит образец 5, изменение доли Ge в сплаве $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ с течением времени представляет собой монохроматическую возрастающую функцию в виде прямой. Этот факт подтверждает целесообразность использования и проведения экспериментов с применением неравномерных схем изменения концентрации Ge в буферных слоях вплоть до выхода на значение доли Ge $x = 1$.

Установлена взаимосвязь спектров комбинационного рассеяния света образцов с характером изменения состава пленок. Показано, что для бесконтактного неразрушающего контроля эпитаксиальных структур на основе $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ пер-

спективно использование метода спектроскопии комбинированного рассеяния, позволяющего наблюдать гомо- и гетеросвязи, изучать релаксацию, физические характеристики и химический состав гетероструктур. Особенности этого метода позволяют контролировать состав сплава и напряженность поверхностного слоя пленки, что очень важно при выращивании гетероструктур типа GeSi/Si.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ismail K., Nelson S.F., Chu J.O., Meyerson B.S.* // Appl. Phys. Lett. 1993. V. 63. P. 660.
2. *Chen H., Guo L.W., Cui Q. et al.* // J. Appl. Phys. 1996. V. 79. P. 1167.
3. *Alonso M.I., Winer K.* // Phys. Rev. B. 1989. V. 39. P. 10056.
4. *Lockwood D.J., Baribeau J.M.* // Phys. Rev. B. 1992. V. 45. P. 8565.
5. *Franz M., Dombrowski K.F., Rucker H. et al.* // Phys. Rev. B. 1999. V. 59. P. 10614.
6. *Rath S., Hsieh M.L., Etchegoin P., Stradling R.A.* // Semicond. Sci. Technol. 2003. V. 18. P. 566.
7. *Болховитянов Ю.Б., Пчеляков О.П., Соколов Л.В., Чикичев С.И.* // Физика и техника полупроводников. 2003. Т. 37. С. 513.