

06

Оптимизация пластической релаксации механических напряжений несоответствия в гетероструктурах $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ ($x \leq 0.61$)

© Ю.Б. Болховитянов, А.С. Дерябин, А.К. Гутаковский,
М.А. Ревенко, Л.В. Соколов

Институт физики полупроводников СО РАН, Новосибирск
Томский государственный университет, Томск
E-mail: sokolov@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 19 июня 2003 г.

Методом низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии выращены пластически релаксированные гетероструктуры $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ ($x = 0.38 \div 0.61$) толщиной 600–750 nm. Для уменьшения общей толщины пленки использованы низкотемпературная эпитаксия и двухступенчатое изменение состава. Высокое качество структуры достигнуто за счет того, что для релаксации механических напряжений несоответствия между первой и второй ступенями использовались дислокации, прорастающие из первой ступени пленки.

Пластически релаксированные гетероструктуры $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ перспективны как для искусственных подложек при гетероэпитаксии пленок A^3B^5 , так и в качестве основы при создании быстродействующих элементов интегральных схем на основе твердых растворов GeSi. Для получения ненапряженных гетероструктур (ГС) при $x \geq 0.3$ с плотностью пронизывающих дислокций не более чем $10^5 - 10^6 \text{ cm}^{-2}$, выращиваемых в стандартных условиях ($T = 500 - 550^\circ\text{C}$), обычно используют либо многоступенчатое изменение состава с малым изменением содержания Ge (0.05–0.1 на ступень) [1,2], либо толстый буферный слой с плавным нарастанием доли германия [3,4]. В обоих случаях результатом является большая толщина буферного слоя, что увеличивает стоимость структуры, а также приводит к росту шероховатости ее поверхности. Снижению толщины переходного слоя при малом изменении содержания Ge на ступень или малом градиенте

препятствует то обстоятельство, что его достаточно полная релаксация возможна только при большой, $> 1 \mu\text{m}$ толщине [5].

Альтернативой является введение между подложкой и пленкой низкотемпературного буферного слоя кремния, что позволило [6,7] получить пластически релаксированные пленки $\text{Ge}_{0,3}\text{Si}_{0,7}$ с плотностью пронизывающих дислокаций в интервале $10^5 - 10^6 \text{ cm}^{-2}$ на толщине эпитаксиальной структуры, не превышающей $0,5 \mu\text{m}$. Однако в [8] отмечается, что эта методика действительна только до $x = 0,3$. Таким образом, выращивание гетероструктур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ ограниченной толщины ($\sim 1 \mu\text{m}$) с $x > 0,3$ и с низкой плотностью дислокаций остается нерешенной задачей.

Большая толщина эпитаксиальных пленок, выращиваемых в стандартных условиях, необходима для релаксации механических напряжений в силу барьерного характера зарождения дислокаций и практически полного отсутствия прорастающих дислокаций в подложке Si, которые могли бы явиться источниками дислокаций несоответствия. Иная ситуация складывается, если выращивать двухслойную гетероструктуру таким образом, чтобы вторая ступень пленки с высоким содержанием Ge росла на искусственной подложке, состоящей из подложки Si и пластически релаксированной первой ступени $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$. В этом случае дислокации несоответствия будут формироваться за счет изгиба уже существующих пронизывающих дислокаций вдоль границы раздела первой и второй ступеней. В связи с отсутствием порога на зарождение этот процесс начнется при толщине второй ступени, близкой к критической с незначительным ее превышением. Таким образом, при достаточно большой длине пробега дислокаций релаксация механических напряжений во второй ступени может происходить только за счет дислокаций, прорастающих из первой ступени. Следовательно, можно ожидать, что плотность пронизывающих дислокаций после эпитаксии второй ступени пленки возрастет не будет.

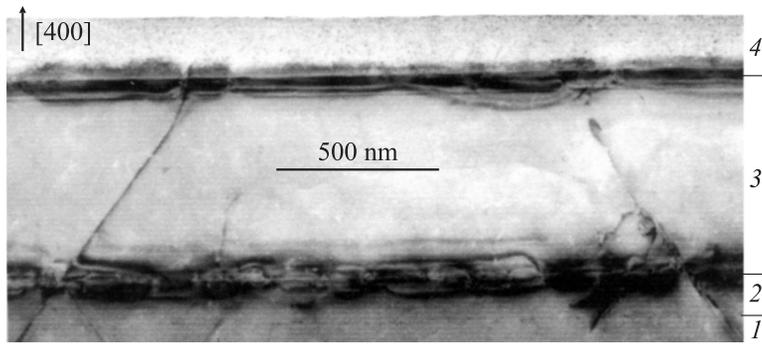
Эпитаксиальные слои твердого раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ выращивались в установке молекулярной эпитаксии „Катунь“, оснащенной электронно-лучевым испарителем для создания молекулярного потока Si и тигельным источником для испарения Ge. Скорости роста составляли $0,01 - 0,3 \text{ nm/s}$ для Si и $0,006 - 0,04 \text{ nm/s}$ для Ge в зависимости от состава выращиваемой пленки. Тип структурных дефектов и их пространственное распределение изучались просвечивающей электронной микроскопией на микроскопе JEM-4000EX. Состав слоев и степень релаксации механических напряжений определялись из рентгеновских кривых

Основные условия роста и отжига двухступенчатых пленок $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$, а также основные их свойства

Образцы (1- и 2-й слои)	Доля Ge, %	Толщина, nm	Температура роста, °C	Отжиг, °C(1 h)	Полная толщина ГС, nm
D26	1	17	500	350	800
	2	38	200	350	—
D29	1	20	500	350	800
	2	48	100	350	—
D37	1	19	500	350	800
	2	54	200	350	500
D45	1	16	500	350	700
	2	54	100	300	500
D46	1	19	500	350	700
	2	61	100	300	500

качания, записанных для отражения (004), (115), (224) и (113) [9]. Поверхностная морфология гетероструктур исследовалась на атомно-силовом микроскопе „Solver P-47H“ в контактной моде. Плотность пронизывающих дислокаций определялась по ямкам травления после травления гетероструктур в анизотропном травителе.

Рост эпитаксиальных структур начинался с выращивания 50 nm буферного слоя кремния при температуре подложки $T = 700^\circ\text{C}$. Этот слой необходим для заравнивания возможных загрязнений и неоднородностей на поверхности подложки, оставшихся после очистки. После этого при $T = 350^\circ\text{C}$ производился рост 50-nm низкотемпературного буферного слоя кремния. Пленки $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ выращивались двумя ступенями по составу. Для первой ступени было выбрано содержание Ge 0.17–0.20. После выращивания этой ступени пленки закрывались 5-nm слоем кремния и отжигались в течение 1 h для более полной релаксации механических напряжений несоответствия. Контрольными экспериментами было установлено, что после релаксации плотность пронизывающих дислокаций в таких пленках была не более 10^5 cm^{-2} . После охлаждения образцов до температуры роста вначале выращивалось 50 nm $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ с составом, соответствующим 1 ступени, а затем производился рост 2 ступени пленки, с более богатым содержанием германия. Основные параметры выращенных гетероструктур представлены в таблице.



Электронно-микроскопическое изображение поперечного среза образца D26: 1 — подложка кремния, 2 — высокотемпературный и низкотемпературный слои кремния, 3 — первая ступень пленки германий-кремний, 4 — вторая ступень пленки.

На электронно-микроскопическом изображении образца D26 (см. рисунок) видны две ступени пленки твердого раствора, разделенные друг от друга и от подложки кремния дислокационными сетками. Малая плотность пронизывающих дислокаций во второй ступени, определенная по ямкам травления ($\sim 10^5 \text{ cm}^{-2}$), подтверждается их отсутствием на электронно-микроскопическом изображении. По данным рентгеновской дифрактометрии первая ступень пленки релаксировала на 80%. Вторая ступень, несмотря на относительно малую толщину и низкую температуру роста, также пластически релаксировала, что и определило появление сетки дислокаций несоответствия между ступенями пленки. Степень пластической релаксации второго слоя в образце D26, оцененная по плотности дислокаций несоответствия на электронно-микроскопических изображениях, сделанных в плане, составила не менее 40%, в то время как пленки с таким несоответствием, выращиваемые на подложке кремния при 350°C , до толщины 200 nm остаются заведомо псевдоморфными.

Во второй ступени образца D29 существенная релаксация прошла даже при толщине в 100 nm. По данным рентгеновской дифрактометрии она составила около 80%. Были выращены также гетероструктуры, доля Ge во второй ступени которых возросла на 0.35, 0.38 и 0.42 (образцы D37, D45 и D46 соответственно). После дополнительного отжига при

500°С степень релаксации второго слоя по отношению к первому (как искусственной подложке) достигла 97, 99 и 95% соответственно.

Наблюдения в атомно-силовом микроскопе показали, что для образцов D37, D45 и D46 величины средней квадратичной шероховатости составили 5.2, 3.1 и 3 nm соответственно, что находится на уровне лучших достижений для релаксированных пленок (см., например, [2]).

Таким образом, показано, что при выращивании гетероструктур $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}(001)$ с двухступенчатым изменением состава релаксацию механических напряжений несоответствия второй ступени пленки можно провести за счет дислокаций, прорастающих из первой ступени пленки. С учетом этого эффекта выращены предельно тонкие релаксированные гетероструктуры с содержанием германия на поверхности 0.38–0.61 и общей толщиной 600–750 nm.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант № 03-02-16085), а также грантом Президента РФ № 00-15-96806.

Список литературы

- [1] *Mooney P.M., Jordan-Sweet J.L., Chu J.O.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1995. V. 66. P. 3642.
- [2] *Capewell A.D., Grasby T.J., Whall T.E.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 2002. V. 81. P. 4775.
- [3] *Satavedam S.B., Fitzgerald E.A.* // *J. Appl. Phys.* 1997. V. 81. P. 3108.
- [4] *Herzog H.-J., Hackbarth T., Hock G.* et al. // *Thin Solid Films.* 2000. V. 380. P. 36.
- [5] *Болховитянов Ю.Б., Пчеляков О.П., Соколов Л.В.* и др. // *ФТП.* 2003. Т. 37. В. 5. С. 513–538.
- [6] *Chen H., Guo L.W., Cui Q.* et al. // *J. Appl. Phys.* 1996. V. 79. P. 1167.
- [7] *Linder K.K., Zhang F.C., Rieh J.-S.* et al. // *Appl. Phys. Lett.* 1997. V. 70. P. 3224.
- [8] *Gaiduk P.I., Larsen A.N., Hansen J.L.* // *Thin Solid films.* 2000. V. 367. P. 120.
- [9] *Боуен Д.К., Таннер Б.К.* // *Высокорастворимая рентгеновская дифрактометрия и топография.* С.-Петербург: Наука, 2002. 274 с.