

УДК 621.315.592

БУФЕРНЫЕ СЛОИ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ

© 2016 г. В. А. Харченко

Вычислительный центр им. А. А. Дородницына
Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН,
ул. Вавилова, д. 40, Москва, 119333, Россия

Рассмотрена проблема выбора архитектуры буферных слоев при разработке типовых моделей различных гетероструктур с контролируемым уровнем механических напряжений и низкой плотностью дефектов в объеме и на границах слоев. Установлено, что эти характеристики зависят от качества поверхности исходных подложечных пластин, процедуры подготовки подложек к процессу эпитаксии, композиции буферных слоев. Отмечено, что качество поверхности подложек наиболее объективно оценивается по величине прихвата непосредственно сращенных пластин. Показано, что значение прихвата ниже 10^7 Па — это чаще всего наблюдаемая в эксперименте величина. В этом случае поверхность подложки характеризуется достаточно заметной шероховатостью, на ней присутствуют различные загрязняющие элементы и химические соединения, кластеры и пылевидные частицы, а также дефекты структуры различной размерности. Кроме того, поверхность подложки определенным образом реструктурирована так, чтобы «оборванные» связи были замкнуты друг с другом. Показано влияние реальной структуры поверхности подложки и совместимости материалов на качество эпитаксиальной пленки. В случае малых различий в параметрах решетки обоснована целесообразность предварительного нанесения на подложку низкотемпературного подстилающего слоя. А при достаточно сильно различающихся параметрах решетки — дополнительных переходных слоев с изменяющимся соотношением компонентов в композиции или в виде сверхрешеток.

Ключевые слова: гетероструктуры, буферные слои, поверхность подложки, структурные дефекты, загрязнения, реструктуризация, подстилающие слои, промежуточные слои

Введение

В работе [1] обоснована необходимость разработки типовых моделей гетероструктур для создания исходной архитектуры в случае использования приборно-технологического проектирования. Кроме того, подчеркнута важность моделирования процессов возникновения механических напряжений и оптимизации их распределения. Построение рациональной архитектуры гетероструктуры, в частности ее пассивной части «подложка — буферный слой — канальный слой», позволяет существенно снизить или устранить отрицательное влияние механических напряжений на прогиб структур, вид структурных дефектов и, как следствие, добиться требуемых характеристик конечных изделий.

Наиболее полно параметры пластин, в частности кремния, используемых в качестве подложек в полупроводниковом приборостроении, описаны в стандартах SEMI [2]. Однако в некоторых конкретных случаях необходима более полная характеристика подложек, особенно их поверхностных свойств, при создании приборов с наноразмерными активными и пассивными элементами.

Ниже на примере пластин полупроводниковых материалов, используемых в качестве подложек для эпитаксиальных структур, рассмотрены свойства реальных

поверхностей. Кроме того, дан анализ зависимости этих свойств от технологии их получения, характеристик сопрягаемых материалов и технологических режимов эпитаксии. В работе [3] было отмечено, что этими параметрами определяется также и надежность конечных приборов, устойчивых к внешним воздействиям.

Реальная поверхность подложки

По мнению авторов, о качестве реальной поверхности подложки наиболее достоверно можно судить по данным экспериментов по прямому сращиванию двух полупроводниковых пластин. На рис. 1 приведена зависимость прочности прихвата состыкованных кремниевых пластин от остаточного зазора между ними [4, 5]. Максимальная прочность прихвата, соответствующая теоретическому пределу $2 \cdot 10^8$ Па, наблюдается при зазоре, близком к межатомному расстоянию. В этом случае имеет место кулоновское взаимодействие между атомами кремния сопрягаемых пластин. Наибольшая прочность прихвата, достигнутая на практике, как правило, ниже $\sim 2 \cdot 10^7$ Па. Такая существенная разница объясняется возникновением достаточно больших зазоров, вызванных следующими причинами.

1. Зазор между стыкуемыми поверхностями, как правило, превышает межатомное расстояние

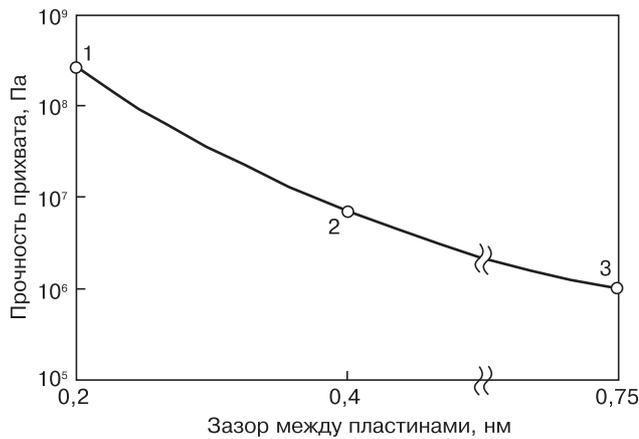


Рис. 1. Зависимость прочности прихвата состыкованных кремниевых пластин от остаточного зазора между ними [4]:
1 — предельная прочность кремния на растяжение;
2 — частично покрытые поверхности пластин (< 10 %);
3 — полностью покрытые поверхности

Fig. 1. Dependence of the bonding force of silicon wafers on the residual gap between them [4]:
(1) limit tensile strength of silicon; (2) partially covered surfaces of plates (<10 %); (3) completely covered surfaces

в монокристаллической решетке кремния (0,14 нм) вследствие шероховатости этих поверхностей. Поверхности пластин массового производства обычно имеют шероховатость на уровне постоянной решетки (~0,4 нм) и более, в особых случаях ее можно сделать несколько меньше (до 0,2 нм).

2. Зазор также зависит от толщины «покрывала» на поверхности подложки из сорбированных молекул газов, воды, атомов металлов, углерода, бора и других элементов. При неблагоприятных условиях из-за заметной толщины «покрывала» зазор может достигать значений до ~0,7 нм и более. Это будет обуславливать взаимодействие между атомами поверхностных слоев сопрягаемых пластин кремния по типу Ван-дер-Ваальса, для которого характерна прочность прихвата $\sim 10^6$ Па (см. рис. 1). Кроме того, зазор между пластинами может заметно возрастать за счет несанкционированного попадания на поверхность наноразмерных пылевидных частиц, кластеров типа SiC, Si—O—Si и других. Все они оказывают заметное влияние на образование различных поверхностных дефектов в создаваемых структурах.

Следует учитывать, что реальная поверхностная структура кристалла существенно отличается от объемной вследствие появления на поверхности «оборванных» химических связей и нарушения равновесия сил взаимодействия между атомами в приповерхностных слоях. Поэтому расположение атомов в поверхностных слоях и в объеме кристалла различно, так как они образуют поверхностную кристаллографическую двумерную периодическую структуру, в общем случае отличающуюся от структуры плоскости разрыва [6, 7]. Существенные изменения положений атомов происходят не только в первом поверхностном слое, но и в последующих.

Эти изменения убывают от слоя к слою в глубь кристалла, и на некотором расстоянии от поверхности расположение атомов становится точно таким же, как и в объеме. Поверхностные изменения положения атомов наиболее ярко проявляются за счет реконструкции, т. е. перестройки структуры с понижением симметрии поверхностного слоя атомов. В случае полупроводниковых кристаллов свободная поверхность нестабильна из-за наличия большого количества ненасыщенных (оборванных) связей. Для уменьшения свободной энергии поверхности атомы смещаются из своих первоначальных положений, чтобы появилась возможность образовывать связи друг с другом. Дальнейшее уменьшение энергии поверхности происходит за счет переноса заряда между оставшимися ненасыщенными связями (в результате некоторые из них становятся незаполненными, а другие заполненными). С другой стороны, смещение атомов приводит к возникновению механических напряжений в решетке, что увеличивает свободную энергию поверхности. Результат противодействия этих двух тенденций и определяет конкретную структуру реконструированной поверхности. Обычно реконструкция верхнего слоя сопровождается релаксацией более глубоких слоев.

Пример реконструкции поверхностного слоя кристалла кремния с образованием структуры (2×1) , так называемых димеров, показан на рис. 2 [8]. Отметим, что на реконструкцию влияют следующие факторы:

- степень покрытия поверхности;
- плотность поверхностных состояний;
- вид и характер взаимодействия адсорбированных атомов и атомов сорбента;
- дефекты структуры поверхности;
- температура и т. д.

В свою очередь, от вида реконструкции зависят важнейшие характеристики процесса адсорбции. Например, поверхностная диффузия на порядки выше на реконструируемой поверхности, чем на нереконструируемой [9].

Типичные поверхностные дефекты обычно классифицируют в соответствии с их размерностями (рис. 3) [10–12]. К линейным дефектам относят

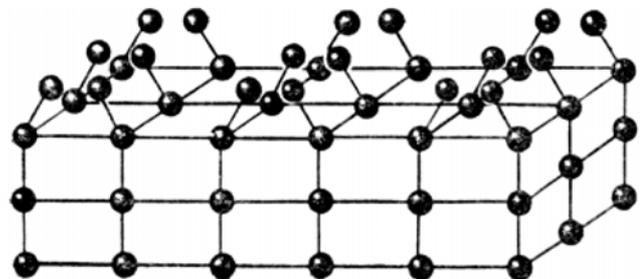


Рис. 2. Пример реконструкции поверхностного слоя атомов в Si с образованием димеров (перестройка 2×1) [8]

Fig. 2. Example of reconstruction of a surface atomic layer in Si with formation of dimers (2×1 restructuring) [8]

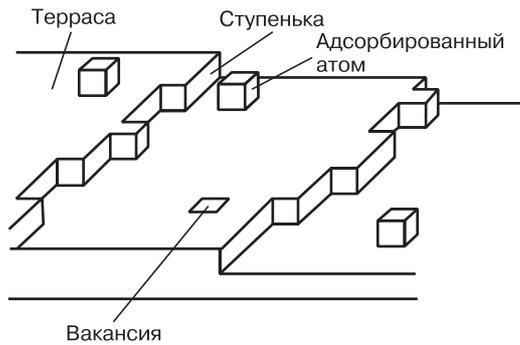


Рис. 3. Структурные дефекты поверхности подложки [10]
Fig. 3. Structural defects on substrate surface [10]

ступеньки, чаще моноатомной высоты, которые разделяют террасы, а также дислокации и границы доменов. К точечным дефектам относят адсорбированные атомы и вакансии на террасах, изломы, адсорбированные атомы и вакансии на ступенях, а также дефекты атомного замещения на поверхности полупроводниковых соединений. К трехмерным дефектам — включения, микродефекты, выделения второй фазы, микротрещины.

Чаще всего дефекты имеют электрический заряд и даже в малых концентрациях могут играть решающую роль во многих процессах на поверхности, таких как адсорбция, поверхностная диффузия, химические реакции и рост тонких пленок.

Таким образом, реальные поверхности подложек практически всегда имеют конечное значение шероховатости и покрытие из адсорбированных химических соединений, атомов и пылевидных частиц, реконструированную структуру поверхности и, следовательно, определенную плотность поверхностных состояний, различного вида объемные, линейные и точечные дефекты. Все это необходимо учитывать при создании архитектуры гетероструктур и организации технологического процесса их получения.

Формирование низкотемпературного буферного слоя

Рассмотрим осаждение кремния на кремний с использованием технологии молекулярно-лучевой эпитаксии. Процесс начинается с подготовки подложки — удаления «покрывала» из сорбированных химических элементов и упорядочения структурных дефектов. Для этого помещаемые в установку пластины подвергают термообработке, облучению ионами, отжигу и другим воздействиям. Эффективность указанных приемов очистки поверхности подложки контролируют различными инструментальными методами непосредственно в процессе очистки. Однако даже после такой интенсивной очистки поверхность подложки остается шероховатой из-за различного рода дефектов и частиц, покрытой примесями из-за вторичных загрязнений и реконструированной. Если не предпринимать специальных мер пред-

осторожности, такие дефекты при эпитаксии будут обуславливать образование структурных дефектов в растущей пленке, типичные виды которых показаны на рис. 4 [13].

Большая часть «оборванных» связей нейтрализована за счет реконструкции поверхности и закрепления на ней различного рода загрязнений на предварительной стадии (подготовки исходных пластин). Поэтому первичный процесс осаждения, например атомов кремния, идет по механизму физической адсорбции. Адсорбированные атомы диффундируют по поверхности к местам локализации структурных дефектов, имеющих свободные связи и (или) большие механические напряжения в местах их расположения. Это позволяет адсорбированным атомам образовывать ковалентные связи с атомами подложки и локализоваться преимущественно в области дефектов. Этот процесс на начальном этапе эпитаксии наиболее эффективно протекает при достаточно низких температурах (350—450 °С). Используя данный прием, можно предварительно заметно сгладить потенциальный рельеф и тем самым обеспечить более высокое качество поверхности для последующего роста эпитаксиальной пленки. Последний, как правило, протекает при более высоких температурах.

Рассмотрим проблему получения переходных слоев GeSi/Si с низким содержанием структурных дефектов, которые имеют важные практические приложения [14]. При создании гетероструктуры из двух разнородных материалов, отличающихся в первую очередь параметрами решетки и температурным коэффициентом расширения, неизбежно возникают дислокации несоответствия (ДН) и понижающие дислокации (ПД). Первые определяют степень релаксации механических напряжений,

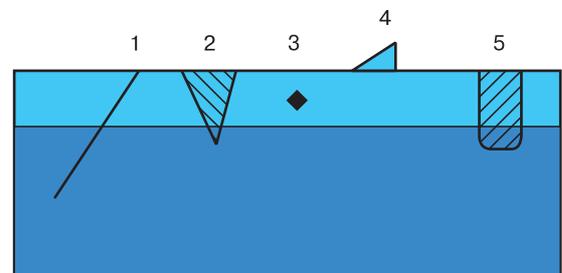


Рис. 4. Дефекты структуры в эпитаксиальном слое [13]:
1 — линейная дислокация, проросшая в эпитаксиальный слой; 2 — дефекты, зарождающиеся на примесных преципитатах, расположенных на поверхности подложки; 3 — примесные преципитаты, возникшие во время роста эпитаксиального слоя; 4 — бугорки на поверхности, возникающие из-за неудовлетворительных условий процесса или плохого исходного состояния поверхности; 5 — дефекты упаковки, проросшие в эпитаксиальный слой

Fig. 4. Structural defects in epitaxial layer [13]:
(1) linear dislocation propagating into the epitaxial layer; (2) defects forming on impurity precipitates located on the substrate surface; (3) precipitates forming during epitaxial layer growth; (4) surface hillocks forming due to wrong choice of process conditions or poor initial surface state; (5) stacking faults propagating into the epitaxial layer

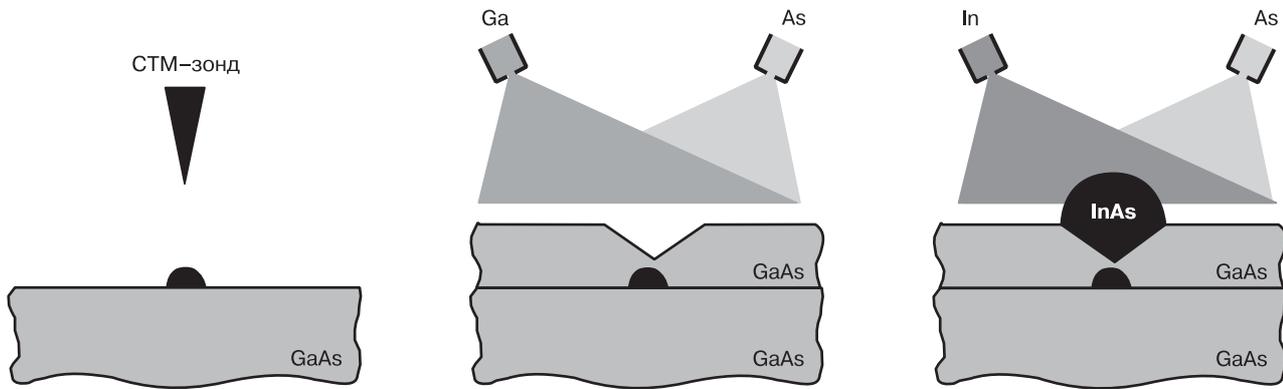


Рис. 5. Схема образования «зеркального» дефекта на поверхности эпитаксиальной пленки в области кластера примеси, нанесенной с зонда микроскопа [18]

Fig. 5. Schematic of «mirror» defect formation on epitaxial film surface in the vicinity of an impurity cluster applied from the microscope probe [18]

вторые по нормали к границе раздела выходят через толщю пленки на ее поверхность. Возникает задача: каким образом дать возможность релаксировать механическим напряжениям в растущей пленке и предотвратить образование ПД. Пути решения этой задачи всесторонне рассмотрены в работах [15, 16]. Отмечено, что в пленках $\text{Ge}_{0,3}\text{Si}_{0,7}$, выращенных при температуре 550°C в стандартных условиях, плотность ПД составляет $\sim 10^8\text{--}10^9\text{ см}^{-2}$, что абсолютно неприемлемо при изготовлении приборов. В последние годы предложены различные варианты технологических приемов снижения плотности дислокаций в структурах GeSi/Si . Наиболее привлекательным из них является метод двухстадийного наращивания на подложку $\text{Si}(001)$ сначала подстилающего слоя Si при низкой температуре (LT Si), а затем переходного слоя GeSi при более высоких температурах. В этом варианте были получены гетероструктуры с плотностью ПД не выше 10^5 см^{-2} ($d = 0,5\text{ мкм}$).

При отработке технологии выращивания бездислокационных монокристаллов кремния обнаружено, что источники зарождения дислокаций, как правило, формируются на поверхности затравки и в ее объеме еще до начала выращивания монокристалла, а затем они размножаются в процессе роста [17]. Аналогичная ситуация возникает и в случае эпитаксиального роста пленок (см. рис. 4). Такими источниками могут быть дислокации в исходной подложке, различного рода дефекты на поверхности, агломерации примеси и другие дефекты, вызывающие большие колебания в потенциальном рельефе. Эти источники начинают работать как при повышении температуры, так и при увеличении толщины пленки в процессе роста за счет возрастающих механических напряжений. При определенных условиях образующиеся ДН могут формировать сетку дислокаций на границе раздела, что увеличивает вероятность аннигиляции ПД. Снижению плотности центров зарождения дислокаций способствуют тщательная очистка поверхности подложек перед эпитаксией, предотвращение вторичного загрязнения поверхности во время

эпитаксии, наращивание при низких температурах подстилающего слоя.

Формирование буферного слоя переменного состава

Следует отметить, что применение низкотемпературного кремния в качестве подстилающего слоя не всегда позволяет решить проблему снижения плотности дислокаций и других дефектов в растущей пленке. Например, не блокируется образование дефектов на внешней поверхности эпитаксиальной пленки из-за дальнедействующего потенциала, которым обладают некоторые дефекты, присутствующие на поверхности подложки. На рис. 5 показана схема «искусственного» образования «зеркального» дефекта на растущей пленке и локальное образование на нем квантовой точки [18]. На первом этапе на поверхность подложки предварительно наносят дефекты в виде кластера загрязняющей примеси с острия зонда микроскопа. Затем поверхность зарастивается пленкой из того же материала, из которого изготовлена подложка, в рассматриваемом случае это GaAs . «Зеркальный» дефект на внешней поверхности представляет собой углубление пирамидальной формы. Если эту процедуру используют для создания квантовых точек, то далее на структуру подают элементы соединения InAs , и за счет самоорганизации в углублениях проходит наращивание этих точек. По сути, дефекты выступают в качестве геттера для атомов примесей и центрами образования химического соединения. При создании структур с квантовыми точками образование «зеркальных» дефектов является положительным фактором. Однако в случае изготовления гетероструктур, используемых для электронных устройств, «зеркальные» дефекты будут играть отрицательную роль. Они оказывают влияние на шероховатость поверхности на гетерограницах, а также на размеры области коррелированного движения носителей заряда, заметно снижая их подвижность. Следует также иметь в виду

возможность превращения подобных дефектов в источник размножения дислокаций при возрастании механических напряжений с увеличением толщины эпитаксиальной пленки. Таким образом, для нейтрализации дефектов с большим дальнедействующим потенциалом требуются иные технологические приемы, но для этого необходимо знать их природу.

Другим ограничивающим фактором снижения плотности дислокаций в гетероструктуре за счет предварительного нанесения подстилающего слоя является конкуренция образования концентраторов напряжений. При умеренных различиях в параметрах решетки преимущественную роль в образовании дефектов структуры при эпитаксии играют «биографические» дефекты, находящиеся на подложке. В этом случае подстилающий слой сглаживает потенциальный рельеф поверхности подложки и, таким образом, существенно снижает плотность центров зарождения дислокаций. При более значимых различиях параметров решетки образование концентраторов напряжений начинает проходить и на поверхности растущей пленки, и в ее объеме. Такая ситуация, например, имеет место при выращивании раствора $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ при $x > 0,3$ [16]. Наносимый предварительно на подложку подстилающий слой в этом случае не может нейтрализовать рассматриваемые концентраторы напряжений. Поэтому целесообразно ввести еще один технологический прием нанесения пленки $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}$ (при $x > 0,3$) с поэтапно или непрерывно меняющимся составом — соотношением компонент, что в совокупности позволит получать структуры с допустимой плотностью ПД. Аналогично комбинация предварительного выращивания подстилающего слоя GaAs на подложке GaAs и последующего нанесения многослойной композиции, например, в виде сверхрешетки GaAs/AlAs, дает возможность создавать буферные слои с достаточно низкой плотностью дислокаций [19].

Заключение

Показана целесообразность введения в типовую модель гетероструктуры буферного слоя в виде подстилающего слоя (при малых различиях параметров решетки) или в виде композиции «подстилающий слой — переходной слой» с изменяющимся соотношением компонент или в виде сверхрешетки (при заметных различиях параметров). Это позволит оптимизировать механические напряжения и, следовательно, снизить плотность дислокаций.

Для решения проблемы оценки качества поверхности пластин непосредственно перед опера-

цией эпитаксии можно предложить определение значения прихвата пластин при их контрольном сращивании.

Библиографический список

1. **Абгарян, К. К.** Типовая модель гетероструктуры для СВЧ-устройств / К. К. Абгарян, В. А. Харченко // Изв. вузов. Материалы электрон. техники. – 2016. – Т. 19, № 1. – С. 47–53.
2. SEMI M1-0699. Specification for Polished Monocrystalline Silicon Wafers. URL: <http://ams.semi.org/ebusiness/standards/SEMISTandardDetail.aspx?ProductID=211&DownloadID=1472> (дата обращения: 08.09.2016)
3. **Kharchenko, V. A.** Problems of reliability of electronic components / V. A. Kharchenko // Modern Electronic Materials. – 2015. – V. 1, iss. 3. – P. 88–92. DOI: 10.1016/j.moem.2016.03.002
4. **Суворов, А. Л.** Технологии структур КНИ / А. Л. Суворов, Б. Ю. Богданович, А. Г. Залужный, В. И. Графугин, В. В. Калугин, А. В. Нестерович, Е. П. Прокопьев, С. П. Тимошенко, Ю. А. Чаплыгин. – М.: МИЭТ, 2004. – 408 с.
5. **Tong, Q.-Y.** Semiconductor wafer bonding. Science and technology / Q.-Y. Tong, U. Gösele. – N. Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1998. – 320 p.
6. **Зенгуил, Э.** Физика поверхности / Э. Зенгуил. – М.: Мир, 1990. – 536 с.
7. Физика и химия поверхности. В 2 т. Кн. I. Физика поверхности / Под ред. Н. Т. Картеля, В. В. Лобанова. – Киев: Институт химии поверхности им. А. А. Чуйко НАН Украины; ООО «НПП «Интерсервис», 2015. – 588 с.
8. **Панкратов, С.** Поверхности твердых тел / С. Панкратов, В. Панов // Наука и жизнь. – 1986. – № 5, 6. URL: <http://n-tru/nj/nz/1986/0501.htm>
9. **Браун, О.** Взаимодействие между частицами, адсорбированными на поверхности металлов / О. М. Браун, В. К. Медведев // Успехи физических наук. – 1989. – Т. 157, вып. 4. – С. 631–666. DOI: 10.3367/UFNr.0157.198904c.0631
10. **Чернов, А. А.** Современная кристаллография. В 4 т. Т. 3. Образование кристаллов / А. А. Чернов, Е. И. Гиваргизов, Х. С. Багдасаров, Л. Н. Демьянец, В. А. Кузнецов, А. Н. Лабочев. – М.: Наука, 1980. – 401 с.
11. **Sugiura, H.** Growth of dislocation-free silicon films by molecular beam epitaxy (MBE) / H. Sugiura, M. Yamaguchi // J. Vac. Sci. Technol. – 1981. – V. 19, iss.12. – P. 157–160. DOI: 10.1116/1.571096
12. **Бахрушин, В. Е.** Получение и физические свойства слаболегированных слоев многослойных композиций. Монография / В. Е. Бахрушин. – Запорожье: ЗИГИУ, 2001. – 248 с.
13. Эпитаксия из газовой фазы. URL: <http://silicon3.narod.ru/epitgaz.htm>
14. **Bolkhovityanov, Yu. B.** III-V compounds-on-Si: heterostructure fabrication, application and prospects / Yu. B. Bolkhovityanov, O. P. Pchelyakov // The Open Nanoscience Journal. – 2009. – V. 2. – P. 20–33. DOI: 10.2174/1874140100903010020
15. **Болховитянов, Ю. Б.** Искусственные подложки GeSi для гетероэпитаксии – достижения и проблемы. Обзор / Ю. Б. Болховитянов, О. П. Пчеляков, Л. В. Соколов, С. И. Чикичев // Физика и техника полупроводников. – 2003. – Т. 37, № 5. – С. 513–538.
16. **Болховитянов, Ю. Б.** Возможности и основные принципы управления пластической релаксацией пленок GeSi/Si и Ge/Si ступенчато изменяемого состава. Обзор / Ю. Б. Болховитянов, А. К. Гутаковский, А. С. Дерябин, О. П. Пчеляков, Л. В. Соколов // ФТП. – 2008. – Т. 42, № 1. – С. 3–22.
17. **Дэш, У.** Рост бездислокационных монокристаллов кремния / У. Дэш // Успехи физических наук. – 1960. – Т. LXXII, вып. 3. – С. 495–520. DOI: 10.3367/UFNr.0072.196011d.0495
18. **Анищик, В. М.** Наноматериалы и нанотехнологии / В. М. Анищик, В. Е. Борисенко, С. А. Жданок, Н. К. Толочко, В. М. Федосюк. – Минск: Изд. центр БГУ, 2008. – 375 с.
19. Пат. 1771335 (РФ). Способ получения эпитаксиальных структур на основе арсенида галлия / А. А. Захаров, Г. Ф. Лымарь, М. Г. Нестерова, А. Е. Шубин, 2000.

Heterostructure buffer layers

V. A. Kharchenko¹

Dorodnicyn Computing Centre, Federal Research Center «Computer Science and Control» of Russian Academy of Sciences, 40 Vavilov Str., Moscow 119333, Russia

Abstract. The problem of choosing the architecture of buffer layers is considered. This is typical problem faced when standard models of different heterostructures with a controlled level of mechanical stresses and low defect density in the bulk and at the layer boundaries are developed. It has been shown that the abovementioned characteristics depend on the quality of the initial substrate surface. They are also dependent on the substrate preparation procedure for epitaxy and the composition of the buffer layers. We note that the quality of the substrate surface is most objectively estimated from the bonding strength of the spliced plates. It has been also shown that if the bonding strength is below 10^7 Pa (this is the most frequent experimental value), the substrate surface is characterized by noticeable roughness. There are different contaminating elements and chemical compounds, clusters and dust particles, structural defects of different dimensionality on the substrate surface. In addition the substrate surface is restructured so that the «broken» bonds are brought closer to each other. The effect of the real substrate surface structure and the compatibility of the materials on the quality of the epitaxial film has been demonstrated. The analysis provided in this work shows the feasibility of growing a preliminary low-temperature (LT) underlying layer on the substrate for small lattice mismatch. Additional transition layers with changing component ratios in the composition or in the form of superlattices are required for largely differing lattice parameters.

Keywords: heterostructures, buffer layer, substrate surface, structural defects, pollutions, restructuring, underlayers, intermediate layer

References

1. Abgaryan K. K., Kharchenko V. A. The standard model heterostructures for microwave devices. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronic Technics*. 2016, vol. 19, no. 1, pp. 47–53. (In Russ.)
2. SEMI M1–0699. Specification for Polished Monocrystalline Silicon Wafers. URL: <http://ams.semi.org/ebusiness/standards/SEMISTandardDetail.aspx?ProductID=211&DownloadID=1472> (accessed: 08.09.2016)
3. Kharchenko V. A. Problems of reliability of electronic components. *Modern Electronic Materials*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 88–92. DOI: 10.1016/j.moem.2016.03.002
4. Suvorov A. L., Bogdanovich B. Yu., Zaluzhnyi A. G., Grafutin V. I., Kalugin V. V., Nesterovich A. V., Prokop'ev E. P., Timoshenkov S. P., Chaplygin Yu. A. *Tekhnologii struktur kremnii-na-izolyatore (KNI)* [Technologies of SOI structures]. Moscow: MIET, 2004. 408 p. (In Russ.)
5. Tong Q.–Y., Gösele U. *Semiconductor wafer bonding. Science and technology*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998. p. 320
6. Zangwill A. *Physics at surfaces*. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. 464 p. DOI: 10.1017/CBO9780511622564
7. *Fizika i khimiya poverkhnosti*. Kniga I. Fizika poverkhnosti [Physics and chemistry of the surface. Book I. Physics of surface]. Kiev: Institut khimii poverkhnosti im. A. A. Chuiko NAN Ukrainy; LLC «SPE «Interservis», 2015. 588 p. (In Russ.)
8. Pankratov C., Panov V. Surfaces of solids. *Nauka i zhizn'*, 1986, nos. 5, 6. URL: <http://n-t.ru/nj/nz/1986/0501.htm> (In Russ.)
9. Braun O. M., Medvedev V. K. Interaction between particles adsorbed on metal surfaces. *Sov. Phys. Usp.*, 1989, vol. 32, pp. 328–348. DOI: 10.1070/PU1989v032n04ABEH002700
10. Chernov A. A., Givargizov E. I., Bagdasarov Kh. S., Dem'yanets L. N., Kuznetsov V. A., Labochev A. N. *Sovremennaya kristallografiya*. V 4 t. T. 3: Obrazovanie kristallov [Modern crystallography. In 4 volumes. Vol. 3. Formation of crystals]. Moscow: Nauka, 1980. 401 p. (In Russ.)
11. Sugiura H., Yamaguchi M. Growth of dislocation-free silicon films by molecular beam epitaxy (MBE). *J. Vac. Sci. Technol.*, 1981, vol. 19, no. 12, pp. 157–160. DOI: 10.1116/1.571096
12. Bakhrushin V. E. *Poluchenie i fizicheskie svoystva slabolegировannykh sloev mnogoslonykh kompozitsii* [Obtaining and physical properties of weakly doped layers of multilayer compositions]. Zaporozhye (UA): ZIGIU, 2001. 248 p. (In Russ.)
13. *Epitaksiya iz gazovoi fazy* [Epitaxy from the gas phase]. URL: <http://silicon3.narod.ru/epitgaz.htm> (In Russ.)
14. Bolkhovityanov Yu. B., Pchelyakov O. P. III–V compounds–on–Si: heterostructure fabrication, application and prospects. *The Open Nanoscience Journal*, 2009, vol. 2, pp. 20–33. DOI: 10.2174/1874140100903010020
15. Bolkhovityanov Yu. B., Pchelyakov O. P., Sokolov L. V., Chikichev S. I. Artificial GeSi substrates for heteroepitaxy: Achievements and problems. *Semiconductors*, 2003, vol. 37, no. 5, pp. 493–518. DOI: 10.1134/1.1575352
16. Bolkhovityanov Yu. B., Gutakovskii A. K., Deryabin A. S., Pchelyakov O. P., Sokolov L. V. Potentialities and basic principles of controlling the plastic relaxation of GeSi/Si and Ge/Si films with stepwise variation in the composition. *Semiconductors*, 2008, vol. 42, no. 1, pp. 1–20. DOI: 10.1007/s11453-008-1001-5
17. Dash W. C. Growth of silicon crystals free from dislocations. *J. Appl. Phys.*, 1959, vol. 30, iss. 4, pp. 459–465. DOI: 10.1063/1.1702390
18. Anishchik V. M., Borisenko V. E., Zhdanok S. A., Tolochko N. K., Fedosyuk V. M. *Nanomaterialy i nanotekhnologii* [Nanomaterials and nanotechnologies]. Minsk: Izd. tsentr BGU, 2008. 375 p. (In Russ.)
19. Patent 1771335 (RF). Sposob polucheniya epitaksial'nykh struktur na osnove arsenida galliya [Method for obtaining epitaxial structures based on gallium arsenide]. A. A. Zakharov, G. F. Lyymar', M. G. Nesterova, A. E. Shubin, 2000. (In Russ.)

Vyacheslav A. Kharchenko¹ — Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher (vakh41@mail.ru)