

Процессы силицидообразования в системе Fe/Si(111)7 × 7

© М.В. Гомоюнова, Д.Е. Малыгин, И.И. Пронин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: Marina.Gomoyunova@mail.ioffe.ru

(Поступила в Редакцию 27 декабря 2007 г.)

Методом фотоэлектронной спектроскопии высокого разрешения (~ 100 meV) с использованием синхротронного излучения изучены начальные стадии формирования силицидов железа в системе Fe/Si(111)7 × 7 в режиме твердофазной эпитаксии. Измерены и проанализированы спектры остовных Si 2*p*-электронов и электронов валентной зоны, полученные после нанесения на поверхность образца возрастающих доз железа величиной до 28 монослоев и последующих изохронных отжига до температуры 650°C. Показано, что при напылении Fe сначала формируется сверхтонкая пленка метастабильного силицида FeSi со структурой типа CsCl, а затем на ней растет слой твердого раствора Fe–Si с сегрегированным кремнием. При покрытиях, больших 10 монослоев, на поверхности образца формируется пленка железа. Отжиги кристалла кремния, покрытого слоем Fe, приводят к последовательному образованию в приповерхностной области двух стабильных силицидных фаз — ϵ -FeSi и β -FeSi₂. При этом процесс твердофазного синтеза ϵ -FeSi проходит через стадию трансформации пленки железа в твердый раствор Fe–Si.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 07-02-01009) и Российско-Германской лаборатории на BESSY.

PACS: 79.60.Dp, 68.43.-h

1. Введение

Хотя изучением роста пленок железа и силицидов железа на поверхности кремния интенсивно занимаются с начала 90-х годов, эта проблема до сих пор привлекает внимание исследователей [1–36]. Интерес к системе Fe/Si вызван тем, что при взаимодействии атомов Fe с поверхностью кремния может возникать ряд стабильных и метастабильных фаз силицидов железа. Среди стабильных соединений наибольший интерес представляют полупроводниковый дисилицид β -FeSi₂, являющийся перспективным материалом для оптоэлектроники [24,37], и богатый железом силицид Fe₃Si, обладающий ферромагнитными свойствами, благодаря которым он может найти применение в спинтронике [19,38]. Что касается метастабильных силицидов железа, то они могут обладать необычными свойствами и также оказаться перспективными для практических приложений.

В последние годы в исследованиях процессов формирования силицидов железа в режиме твердофазной эпитаксии наиболее широко используется поверхность Si(111)7 × 7 [25–27,29–31,33,36]. Однако результаты этих работ во многом остаются противоречивыми, и до сих пор сохраняется ряд спорных вопросов, касающихся как стадии нанесения железа на поверхность кремния, так и процессов, протекающих при последующем отжиге образцов. В работе [31], например, утверждается, что при нанесении Fe на поверхность Si(111)7 × 7 при комнатной температуре в диапазоне толщин до 50 монослоев (ML) происходит рост эпитаксиальной однодоменной пленки Fe(111) с ориентацией *B*-типа относительно подложки. Химическое же взаимодействие атомов железа и кремния происходит лишь на самой ранней стадии процесса

(до 0.5 ML Fe), когда атомы металла частично проникают в подложку. С другой стороны, согласно данным работы [33], при формировании межфазовой границы Fe/Si(111) в том же диапазоне толщин пленок железа (0.2–56 ML) на первой стадии процесса (до 7 ML) атомы Fe химически взаимодействуют с кремнием, и на поверхности образца образуется упорядоченная пленка метастабильного моносилицида FeSi со структурой типа CsCl. Лишь при дальнейшем нанесении металла формируется слой чистого железа. Однако авторы работы [25] сообщают, что при нанесении 7 ML Fe происходит рост неупорядоченной пленки ϵ -FeSi, а ее упорядочение наблюдается только после отжига образцов при температуре 410 K. Наконец, в работе [36] показано, что характер формирующейся при комнатной температуре структуры зависит от условий эксперимента. При малых потоках атомов Fe (0.01 ML/min) и малой энергии, с которой они поступают на поверхность Si(111), растет эпитаксиальная пленка Fe(111), а при больших потоках (1 ML/min) и большей энергии частиц формируется моносилицид FeSi. Однако объяснить с этих позиций отмеченные расхождения в литературных данных не удается.

Большой разброс наблюдаемых результатов характерен и для исследований второго этапа процесса твердофазного синтеза силицидов железа — отжига образцов с напыленными пленками металла. В сходных экспериментальных условиях разные авторы наблюдали формирование различных фаз силицидов железа: ϵ -FeSi [4], β -FeSi₂ [9], γ -FeSi₂ [13,21,33], α -FeSi₂ [14,28] и др. Неясным также является вопрос о формировании стабильного силицида Fe₃Si, богатого железом. Если для грани Si(100) этот силицид регулярно наблюдался при отжиге образцов с достаточно толстыми пленками

нанесенного железа (при дозах, превышавших 30 ML [5] и даже 15 ML [35]), то в случае Si(111) он не обнаружен ни в работе [39], где отжигались пленки Fe толщиной 32 Å, ни в [22], где толщины пленок составляли 400 и 800 Å.

Из изложенного ясно, что система Fe/Si(111) нуждается в дальнейшем исследовании. Эффективным методом обнаружения различных силицидных фаз на поверхности кремния является фотоэлектронная спектроскопия (ФЭС) высокого разрешения с использованием синхротронного излучения [40,41], что в значительной степени обусловлено высокой чувствительностью энергии связи остовных электронов атомов кремния к их локальному окружению. Данный метод был недавно использован нами для исследования процессов силицидообразования в системах Fe/Si(100)2 × 1 [34,35] и Co/Si(100)2 × 1 [42,43]. Примеров же его приложения к исследованию системы Fe/Si(111)7 × 7 очень мало. Имеются две работы, в которых авторы изучали процессы, протекающие при отжиге сверхтонких пленок железа (4 ML [14] и 7 ML [25]). Кроме того, он применялся для анализа относительно толстых (~ 100 Å) слоев силицидов железа и сплавов FeSi, сформированных на поверхности кремния с помощью молекулярно-лучевой эпитаксии [15,16]. В настоящей работе мы использовали данный метод для изучения процессов силицидообразования в системе Fe/Si(111)7 × 7 в режиме твердофазной эпитаксии. При этом основные вопросы, на которые мы хотели получить ответы, состояли в том, как протекают ранние стадии взаимодействия атомов Fe с кремниевой подложкой и образуется ли силицид Fe₃Si на поверхности Si(111)7 × 7.

2. Техника эксперимента

Эксперименты проводились в Российско-Германской лаборатории на синхротроне BESSY (Берлин) в условиях сверхвысокого вакуума (~ 10⁻¹⁰ mbar) с помощью фотоэлектронного спектрометра с 200 mm полусферическим анализатором. Полное энергетическое разрешение прибора составляло ~ 100 meV. Регистрировались фотоэлектроны, вылетающие в конусе с углом раствора 10°, ориентированном вдоль нормали к поверхности образца. Анализируются спектры остовных электронов, а также валентной зоны, измеренные при энергии фотонов $h\nu = 135$ eV. Эта энергия соответствует наибольшей чувствительности Si 2p-спектров к состоянию поверхности.

Исследуемые образцы изготавливались из монокристаллических пластин кремния, легированного фосфором (КЭФ-5). Разориентация их поверхности относительно грани (111) не превышала 0.1°. Предварительно кристаллы подвергались химической обработке по методу Ширази [44]. В камере спектрометра они кратковременно прогревались в сверхвысоком вакууме до температуры 1200°C и медленно охлаждались, что обеспечивало получение реконструированной поверхности Si(111)7 × 7, свободной от кислородных и углеродных

загрязнений. Элементный состав поверхности контролировался методом ФЭС.

Пленки железа наносились на поверхность кремния при комнатной температуре из специального источника, в котором стержень из особо чистого и тщательно обезгаженного металла разогревался электронной бомбардировкой. Скорость нанесения пленки обычно составляла 1 ML/min. При этом за один монослой атомов железа принималось покрытие, содержащее $7.8 \cdot 10^{14}$ at/cm² и равное концентрации атомов кремния на поверхности подложки. Максимальная доза напыления составляла 28 ML. Твердофазный синтез силицидов железа осуществлялся с помощью серии изохронных отжигов, проводившихся при фиксированных возрастающих температурах образца. Длительность отжигов составляла 5 min, а их максимальная температура достигала 650°C. Измерения спектров проводились после остывания образцов до температуры 30–50°C.

3. Результаты измерений и их обсуждение

Результаты измерений, проведенных в ходе нанесения пленок железа на поверхность Si(111)7 × 7, иллюстрируются данными рис. 1 и 2. На них представлены типичные спектры остовных Si 2p-электронов, а также электронов валентной зоны. Здесь же приведены данные, полученные после ступенчатых отжигов образцов до различных температур. Интенсивность спектров нормирована на

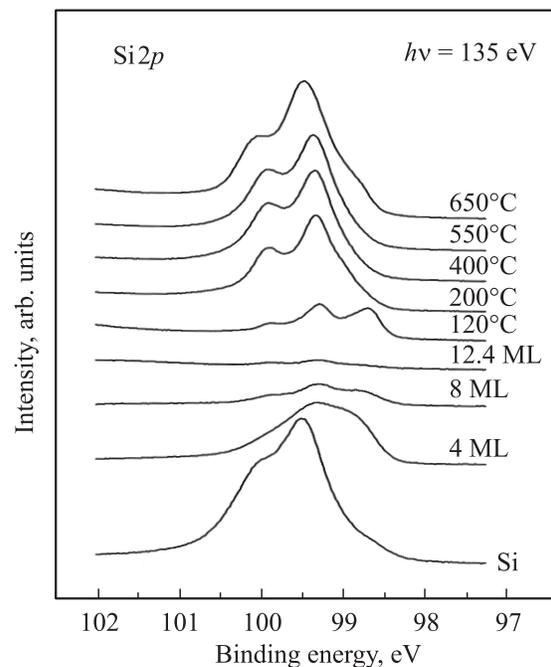


Рис. 1. Фотоэмиссионные спектры 2p остовных электронов кремния, измеренные после нанесения на поверхность кристалла различных доз железа (в ML) и последующих изохронных отжигов до возрастающих температур.

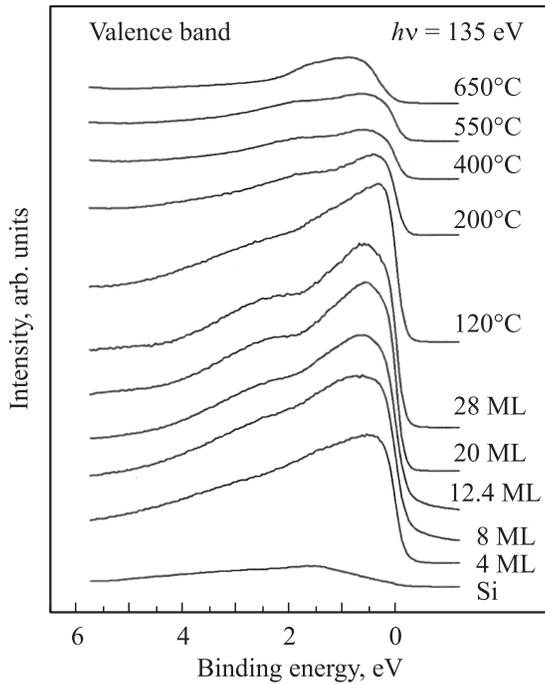


Рис. 2. Фотоэмиссионные спектры валентных электронов, измеренные после нанесения на поверхность кристалла различных доз железа (в ML) и последующих изохронных отжигов до возрастающих температур.

поток фотонов. Видно, что для обеих стадий процесса твердофазной эпитаксии силицидов железа характерна сложная динамика изменения формы линии спектров.

3.1. Формирование межфазной границы Fe/Si(111)7×7 при комнатной температуре. Рассмотрим сначала спектры остовных электронов. Как видно из рис. 1, нанесение железа приводит к резкому уменьшению интенсивности линии Si 2*p*, а также к изменению ее формы и энергетического положения основного пика, который смещается в область меньших энергий связи. Для пленок железа толщиной 20 и 28 ML линия Si 2*p* уже не обнаруживалась.

Эволюция спектра валентных электронов (рис. 2) происходила синхронно с изменениями Si 2*p*-спектра. На начальном этапе нанесения Fe затухали особенности, обусловленные подложкой, и начинал формироваться максимум вблизи уровня Ферми. С ростом покрытия он усиливался и расширялся в сторону больших энергий связи. Изменения в спектре прекращались, когда доза напыления железа достигала 20 ML, при этом вид спектра соответствовал валентной зоне чистого железа.

Для того чтобы понять, какие физико-химические процессы протекают на поверхности образца в области доз Fe, меньших 20 ML, когда в анализируемой приповерхностной области еще присутствуют атомы кремния, измеренные Si 2*p*-спектры с помощью компьютерного моделирования были разложены на составляющие. При

этом применялась стандартная процедура, основанная на использовании Voigt-функций [42,43].

Полученные результаты иллюстрируются данными, представленными на рис. 3. Спектр исходной реконструированной поверхности Si(111)7×7 в соответствии с литературными данными состоит из объемной моды *B* и мод адатомов (*S*₁), „rest“-атомов (*S*₂), атомов пьедестала (*S*₃) и димеров (*S*₄) [41]. После нанесения 4 ML Fe интенсивность объемной моды *B* заметно уменьшается, а все поверхностные компоненты спектра исчезают. Вместо них в спектре появляются новые моды: *L* (с энергией связи 99.6 eV), *A* (99.0 eV) и *S*_A (98.7 eV). Энергетическое положение моды *L* наиболее близко соответствует энергиям связи Si 2*p*-электронов в метастабильном силициде FeSi со структурой типа CsCl [15,16] и дисилициде β-FeSi₂ [14,35,45]. Поскольку для фазы β-FeSi₂

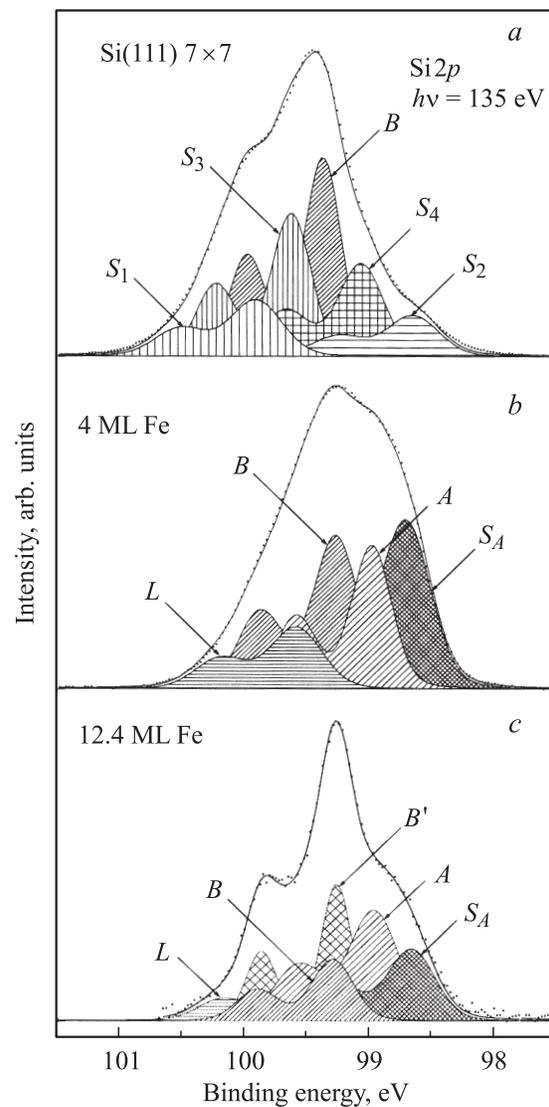


Рис. 3. Результаты разложения спектров фотовозбужденных Si 2*p*-электронов на составляющие. *a* — спектр чистой поверхности Si(111)7×7, *b* и *c* — спектры, измеренные после напыления на нее 4 и 12.4 ML железа соответственно.

в спектре валентных электронов возникает сильный максимум при энергии ~ 1 eV, который не наблюдается в эксперименте, полученные нами результаты позволяют сделать вывод о формировании на поверхности образца тонкого слоя метастабильного моносилцида FeSi с CsCl-структурой. Следует подчеркнуть, что образование этого силицида в аналогичных условиях наблюдалось и в работе [11].

Что касается второй новой моды спектра (*A*), то ее энергия связи близка к значениям, полученным ранее для объемных мод твердого раствора Fe–Si [14,35] и силицида Fe₃Si [5,35]. Так как для данного покрытия спектр валентной зоны соответствует твердому раствору Fe–Si [35], но сильно отличается от спектра Fe₃Si [4,19,46], появление моды *A* следует связать с образованием именно раствора. Этот вывод также согласуется с результатами отмеченной выше работы [11], в которой было обнаружено, что после образования сверхтонкого слоя силицида FeSi с CsCl-структурой на нем растет островковая пленка твердого раствора Fe–Si.

Наконец, третья мода *S_A* спектра является поверхностной компонентой моды *A* [35]. Значительная интенсивность моды *S_A* свидетельствует о том, что пленка твердого раствора Fe–Si покрыта сегрегированным кремнием. Сегрегация кремния на поверхности как силицидов железа, так и металлической пленки Fe(100) ранее наблюдалась в работах [14,20].

При дальнейшем увеличении дозы напыления (в области более 4 ML) интенсивность мод *L* и *S_A* монотонно уменьшается, а мода *A* сначала несколько усиливается, а затем также ослабевает. Такое поведение составляющих Si 2*p*-спектра (а также динамика изменения спектра валентной зоны) соответствует росту слоя твердого раствора в диапазоне доз до 8 ML, а при последующем увеличении покрытия — формированию пленки железа. Следует подчеркнуть, что при достижении покрытия, соответствующего началу этого процесса, в Si 2*p*-спектре появляется новая составляющая *B'*, характеризующая той же энергией связи, что и объемная мода *B* чистого кремния. Отличительной особенностью моды *B'* является необычная узость линии. Полная ширина на половине высоты ее гауссовой компоненты равна 250 meV, в то время как для других мод, включая объемную, соответствующая величина в наших экспериментах составляет 300–400 meV. Насколько нам известно, такая компонента в спектрах силицидов в литературе не описана. Однако ранее моду *B'* с еще меньшей полушириной гауссовой компоненты, равной 200 meV, мы уже наблюдали в системе Fe/Si(100), причем ее появление также коррелировало с ростом пленки железа на поверхности образца. Поэтому мы полагаем, что данная мода может быть обусловлена кластерными включениями кремния в неоднородной металлической пленке железа. Однако для подтверждения этого вывода требуется проведение более детальных исследований.

3.2. Термостимулированные реакции твердофазного синтеза силицидов железа. Обра-

тимся теперь к результатам, полученным в ходе отжига образца, на поверхность которого было нанесено 28 ML Fe. Как видно из рис. 1 и 2, с ростом температуры отжига все приведенные спектры претерпевают значительные изменения, свидетельствующие о протекании твердофазных реакций в анализируемой приповерхностной области. Наиболее ярко эти изменения выражены на начальных этапах процесса. Отжиг образца при температуре 120°C привел к восстановлению в спектре линии кремния, исчезнувшей после напыления железа. Однако теперь она приобрела необычную форму, и в ней отчетливо проявились три максимума. Кроме того, изменился спектр валентной зоны.

Дальнейшее повышение температуры до 200°C привело к исчезновению в Si 2*p*-спектре пика с наименьшей энергией связи и изменению спектра валентных элек-

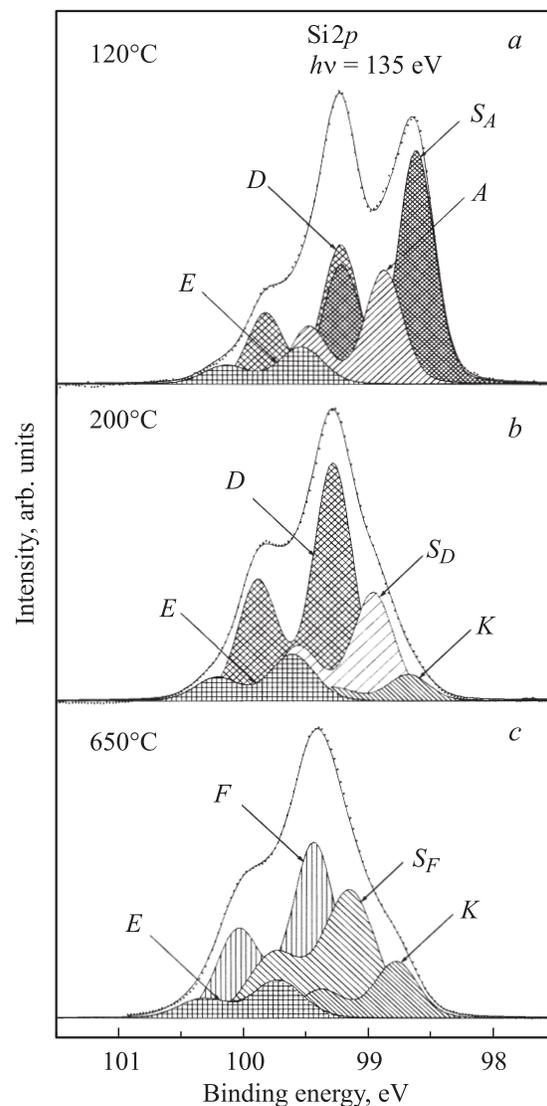


Рис. 4. Результаты разложения спектров фотовозбужденных Si 2*p*-электронов на составляющие. Спектры измерены после отжига образца с напыленной пленкой Fe до температур 120 (а), 200 (б) и 650°C (с).

тронов. Последующие отжиги образца уже не оказывали столь сильного влияния на спектры. В диапазоне температур 200–550°C они почти не менялись, и лишь последний прогрев образца при температуре 650°C привел к синхронному их смещению в область больших энергий связи электронов.

Результаты анализа Si 2*p*-спектров, полученных на различных стадиях реакции силицидообразования, показаны на рис. 4. Из приведенных данных хорошо видно, что специфический вид формы линии спектра, соответствующего температуре 120°C, в основном обусловлен образованием в приповерхностной области образца пленки твердого раствора Fe–Si, покрытой слоем сегрегированного кремния. Причем интенсивность моды S_A , соответствующей этому слою, примерно в 2 раза выше интенсивности компоненты самого раствора, что свидетельствует о сравнительно небольшой толщине его пленки. Непосредственно под пленкой раствора находится слой стабильного моносилцида ϵ -FeSi. Основным аргументом в пользу формирования этого соединения является присутствие в спектре новой моды D (99.3 eV), энергетическое положение которой хорошо согласуется с энергией связи Si 2*p*-электронов в этом силициде [35].

Повышение температуры отжига до 200°C приводит к почти полному исчезновению из спектра мод твердого раствора и сегрегированного кремния. Основной компонентой анализируемой приповерхностной области становится фаза ϵ -FeSi. При этом объемной модой D данной фазы сопутствует поверхностная составляющая S_D . Такой характер спектров сохраняется в довольно широком интервале температур до 550°C.

Последняя стадия термостимулированной реакции силицидообразования, как уже отмечалось, была зарегистрирована после достижения температуры 650°C. Анализ измеренного Si 2*p*-спектра (рис. 4) показал, что вместо мод D и S_D в нем появились моды F и S_F с энергиями связи 99.45 и 99.15 eV, практически совпадающими с таковыми для объемной и поверхностной мод фазы β -FeSi₂ [35]. Спектр электронов валентной зоны (рис. 2) также соответствует литературным данным по β -FeSi₂ [4,6].

4. Заключение

Показано, что на начальной стадии нанесения железа (до ~ 2 ML) на поверхность Si(111)7 × 7 при комнатной температуре в соответствии с результатами работы [11] происходит формирование сверхтонкой пленки метастабильного силицида FeSi со структурой типа CsCl. Далее на ней растет пленка твердого раствора Fe–Si с сегрегированным кремнием. Когда доза напыленного Fe достигает примерно 8 ML, на поверхности образца начинает формироваться пленка железа. Таким образом, в отличие от поверхности Si(100)2 × 1 на данной грани кремния не происходит формирования богатого железом силицида Fe₃Si. Не образуется это соединение и

в результате твердофазной реакции, протекающей при отжиге образца, покрытого слоем железа. Результатом этой реакции, проходящей через стадию образования твердого раствора Fe–Si, является формирование стабильного моносилцида железа (ϵ -FeSi). Термостимулированная твердофазная реакция трансформации моносилцида ϵ -FeSi в дисилицид β -FeSi₂ наблюдалась при температуре 650°C.

Список литературы

- [1] N. Cherief, J.Y. Veuillen, N.A. Ngugen Nan, R. Cinti. *Vacuum* **41**, 1350 (1990).
- [2] J. Alvarez, J.J. Hinarejos, E.G. Michel, J.M. Gallego, R.M. Miranda. *Surf. Sci.* **251/252**, 59 (1991).
- [3] J. Chevrier, V. Le Tranh, S. Nitshe, J. Derrein. *Appl. Surf. Sci.* **56–58**, 438 (1992).
- [4] J. Alvarez, J.J. Hinarejos, E.G. Michel, G.R. Castro, R. Miranda. *Phys. Rev. B* **45**, 14 042 (1992).
- [5] J.M. Gallego, J.M. Garcia, J. Alvarez, R.M. Miranda. *Phys. Rev. B* **46**, 13 339 (1992).
- [6] Le Thanh Vinh, J. Cherier, J. Derrien. *Phys. Rev. B* **46**, 15 946 (1992).
- [7] H. von Kanel, N. Onda, K. Siringhaus, E. Muller-Gubler, S. Gonsalves-Conto, C. Schawarz. *Appl. Surf. Sci.* **70/71**, 559 (1993).
- [8] H. Siringhaus, N. Onda, E. Muller-Gubler, S. Gonsalves-Conto, H. von Kanel. *Phys. Rev. B* **47**, 10 567 (1993).
- [9] K. Konuma, J. Vrijmoeth, P.M. Zagwijn, J.W.M. Frenken, E. Vlieg, J.F. Van der Veen. *J. Appl. Phys.* **73**, 1104 (1993).
- [10] W. Raunau, H. Niehus, G. Comsa. *Surf. Sci.* **284**, L 375 (1993).
- [11] J. Alvarez, A.L. Vazquez de Parga, J.J. Hinarejos, E.G. Michel, C. Ocal, R.M. Miranda. *Phys. Rev. B* **47**, 16 048 (1993).
- [12] N. Jedrecy, A. Waldhauer, M. Sauvage-Simkin. *Phys. Rev. B* **49**, 4725 (1994).
- [13] X. Wallart, J.P. Nys, C. Tetelin. *Phys. Rev. B* **49**, 5714 (1994).
- [14] F. Sirotti, M. De Santis, V. Jin, G. Rossi. *Phys. Rev. B* **49**, 11 134 (1994).
- [15] S. Hong, P. Wetzel, G. Gewinner, D. Bolmont, C. Pirri. *J. Appl. Phys.* **78**, 15 404 (1995).
- [16] S. Hong, U. Kafader, P. Wetsel, G. Gewinner, S. Pirri. *Phys. Rev. B* **51**, 17 667 (1995).
- [17] M. Hasegawa, N. Kobayashi, N. Nayashi. *Surf. Sci.* **357–358**, 831 (1996).
- [18] J. Chrost, J.J. Hinarejos, P. Segovia, E.G. Michel, R. Miranda. *Surf. Sci.* **371**, 297 (1997).
- [19] R. Kläsches, C. Carbone, W. Eberhardt, C. Pampuch, O. Rader, T. Kachel, M. Gudat. *Phys. Rev. B* **56**, 10 801 (1997).
- [20] J. Avila, A. Mascaraque, C. Teederescu, E.G. Michel, M.C. Acerisio. *Surf. Sci.* **377–379**, 856 (1997).
- [21] W. Weiß, M. Kutschera, U. Starke, M. Mozaffari, K. Reshoff, U. Kohler, K. Heinz. *Surf. Sci.* **377–379**, 861 (1997).
- [22] D. Manginck, L. Wang, C. Lin, P. Gas, J. Grako, M. Ostling. *J. Appl. Phys.* **83**, 4193 (1998).
- [23] P. Bertoincini, P. Wetzel, D. Berling, G. Gewinner, C. Ubhaq-Bouillet, V. Pierron Bohnes. *Phys. Rev. B* **60**, 11 123 (1999).
- [24] M. Sasase, T. Nakanoyama, H. Yamamoto. *Thin Solid Films* **401**, 73 (2001).

- [25] M. Probst, R. Denecke, C. Whelan, M. Kinne, D. Borgmann, H.P. Stein. Surf. Interface Analysis **34**, 744 (2002).
- [26] S. Walter, M. Klause, F. Blobner, S. Muller, U. Starke, K. Heinz. J. Phys. Cond. Matter **15**, 5207 (2003).
- [27] G. Garreau, S. Hajjar, S. Pelletier, M. Imhoff, C. Pirri. Appl. Surf. Sci. **212–213**, 711 (2003).
- [28] S. Hajjar, G. Garreau, S. Pelletier, P. Bertoncini, P. Wetzel, G. Gewinner, M. Imhoff, C. Pirri. Surf. Sci. **532–535**, 940 (2003).
- [29] A. Wawro, S. Suto, R. Czajka, A. Kasuya. Phys. Rev. B **62**, 11 123 (2003).
- [30] N.G. Galkin, V.O. Polyarnyi, A.S. Gouralnik. Thin Solid Films **404–405**, 199 (2004).
- [31] R. Tsushima, Y. Michishita, S. Fujii, H. Okado, K. Umezawa, Y. Maeda, Y. Terai, K. Oura, M. Katayama. Surf. Sci. **579**, 73 (2005).
- [32] I. Dezsi, Cs. Detzer, I. Szucs, J. Dekoster, A. Vantonime, M. Caymax. Surf. Sci. **599**, 122 (2005).
- [33] K. Kataoka, K. Hattori, Y. Miyatake, H. Daimon. Phys. Rev. B **74**, 155 406 (2006).
- [34] М.В. Гомоюнова, Д.Е. Малыгин, И.И. Пронин. ФТТ **48**, 1898 (2006).
- [35] M.V. Gomoynova, I.I. Pronin, D.E. Malygin, A.S. Voronchin, D.V. Vyalikh, S.L. Molodtsov. Surf. Sci. **601**, 5069 (2007).
- [36] Н.И. Плюсин, В.М. Ильященко, С.В. Крылов, С.А. Китань. Письма в ЖТФ **33**, 79 (2007).
- [37] M.C. Bost, J.E. Mahan. J. Appl. Phys. **58**, 2696 (1985).
- [38] J. Hafner, D. Spisak. Phys. Rev. B **75**, 195 411 (2007).
- [39] Q.G. Zhu, H. Iwesaki, D. Elen, D. Williams, R.L. Park. J. Appl. Phys. **60**, 2629 (1986).
- [40] J.W.F. Egelhoff. Surf. Sci. Rep. **6**, 253 (1987).
- [41] М.В. Гомоюнова, И.И. Пронин. ЖТФ **74**, 10, 1 (2004).
- [42] М.В. Гомоюнова, И.И. Пронин, Н.Р. Галль, С.Л. Молодцов, Д.В. Вялых. ФТТ **45**, 1519 (2003).
- [43] M.V. Gomoynova, I.I. Pronin, N.R. Gall, D.V. Vyalikh, S.L. Molodtsov. Surf. Sci. **578**, 174 (2005).
- [44] A. Ishizaka, Y. Shiraki. J. Electrochim. **133**, 666 (1986).
- [45] F. Sirotti, M. De Santis, G. Rossi. Phys. Rev. B **48**, 8299 (1993).
- [46] B. Egert, G. Panzner. Phys. Rev. B **29**, 2091 (1984).