

03;11

Адсорбционные и электронные свойства тонких пленок никеля на поверхности грани (110) кристалла вольфрама

© Т.Т. Магкоев,¹ М. Сонг,² Т. Магомэ,² Й. Мурата²¹ Северо-Осетинский государственный университет им. К.Л. Хетагурова, 362020 Владикавказ, Россия² The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo, 7-22-1, Roppongi, Minato-ku, Tokyo 106, Japan

e-mail: magkoev@osetia.ru

(Поступило в Редакцию 23 марта 2004 г.)

В условиях сверхвысокого вакуума методами отражательной инфракрасной адсорбционной спектроскопии (ИКС) и ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС) исследованы изменения свойств упорядоченных пленок Ni на поверхности кристалла W (110) при увеличении их толщины от одного до трех монослоев. Структура пленок соответствует структуре грани (111) кристалла Ni. Метод ИКС применен для исследования колебательных свойств тестовых молекул NO, адсорбированных на поверхности формируемых пленок Ni. В процессе роста толщины пленки происходит весьма заметное видоизменение колебательных и фотоэмиссионных спектров, что указывает на изменение адсорбционных и электронных свойств пленки при увеличении ее толщины от одного до трех монослоев. Стабилизация ИК и фотоэлектронных спектров при толщине пленки, соответствующей трем монослоям, позволяет предположить, что завершение формирования основных адсорбционных и электронных свойств пленки происходит при этой толщине пленки. Наряду с этим молекулы NO, адсорбированные на монослойной пленке, проявляют колебательные особенности, характерные при адсорбции на поверхности массивного кристалла W [110].

Изучение адсорбции и процессов формирования пленок металлов на поверхности твердых тел в течение многих лет представляет повышенный интерес как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения [1]. Несмотря на многочисленные исследования, многие вопросы остаются открытыми [1]. К ним можно отнести вопрос о том, при какой толщине металлической пленки ее свойства близки к свойствам массивного металла. С одной стороны, считается, что уже монослойная пленка металла на поверхности металлической подложки обладает основными адсорбционными и электронными свойствами, присущими массивному металлу, с другой стороны, преобладает точка зрения, что для этого необходимо достижение по крайней мере десятков монослоев [1–3].

В настоящей работе приведены результаты исследования закономерностей формирования электронных свойств пленок никеля в процессах их роста на поверхности кристалла W (110) методами инфракрасной и ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии. Выбор данной системы обусловлен возможностью формирования резкой межфазной границы раздела Ni/W (110) в сплошных хорошо упорядоченных пленках никеля, начиная с субмонослойной области покрытий [4–6].

Методы исследований

Исследование проводилось в условиях сверхвысокого вакуума ($P = 10^{-10}$ Торр) методами отражательной инфракрасной адсорбционной спектроскопии (ИКС)

и ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС) с использованием синхротронного излучения. Выбор метода ИКС для исследования электронных и адсорбционных свойств пленок металлов на поверхности металлических подложек обусловлен тем, что свойства ряда молекул (например, NO и CO), адсорбированных на поверхности исследуемых подложек, определяются электронными свойствами этих подложек [7,8]. Одним из параметров адсорбированной молекулы, наиболее чувствительным к состоянию подложки, является частота внутримолекулярных колебаний, которая определяется перераспределением электронной плотности между молекулярными орбиталями адсорбата и состояниями подложки при хемосорбции [8]. В настоящей работе в качестве тестовых молекул, изучая свойства которых, можно было бы получать информацию о состоянии формируемых пленок Ni на поверхности W (110), использованы молекулы оксида азота (NO). Ряд ранее выполненных исследований показал, что эти молекулы чрезвычайно чувствительны к состоянию металлических подложек, на которых они адсорбированы [9]. В работе использован ИК спектрометр фирмы Nicolet (Nexus 870), монохроматорная и детекторная части которого размещены относительно образца таким образом, чтобы обеспечить скользящее падение ИК луча на исследуемый образец (угол падения $\sim 85^\circ$). Именно при такой геометрии хода лучей наблюдается максимальная эффективность метода ИКС при исследовании систем рассматриваемого типа, т.е. молекулы на поверхности отражающих металлических подложек [10]. Измерения методом УФЭС проведены в синхротронной лаборатории Института физики твердого

тела университета Токио. В качестве энергоанализатора электронов использован анализатор типа цилиндрического зеркала с двойной фокусировкой. Угол между падающим лучом и нормалью к поверхности образца и оси анализатора составлял 50 и 90° соответственно. В качестве дополнительных методов исследования использованы методы дифракции медленных электронов и оже-спектроскопии.

Для очистки поверхности W (110) использованы стандартные процедуры отжига в атмосфере кислорода и последующих высокотемпературных вспышек. Формирование пленок Ni на W (110) осуществлялось термическим напылением. Для сопоставления свойств формируемых пленок Ni и массивного кристалла в камеру был установлен массивный кристалл Ni (111). Адсорбция молекул NO на поверхности пленок никеля осуществлялась при температуре подложки 110 К. Более подробно методы исследований, процедура формирования пленок Ni и условия проведения экспериментов описаны ранее [11–13].

Результаты и их обсуждение

К настоящему времени структура пленок никеля на поверхности W (110) изучена достаточно подробно [4–6]. Сплошная пленка имеет гексагональную симметрию, характерную для грани Ni (111). При монослойном покрытии ($\theta_{\text{Ni}} = 1 \text{ ML}$) наблюдается искажение структуры вследствие некоторого несоответствия кристаллографических параметров. С ростом толщины до 5 монослоев пленка приобретает недеформированную структуру, соответствующую поверхности кристалла Ni (111). В связи с этим представлялось целесообразным сравнить поведение адсорбированных молекул NO на поверхности пленки и массивного кристалла Ni.

На рис. 1 приведены ИК спектры поглощения для системы No/Ni/W (110) для пленок никеля ориентацией (111) толщиной в 1, 2 и 3 монослоя. Спектры 1–4 соответствуют адсорбции на моноатомной пленке при разных экспозициях NO. При экспозиции в 0.6 L ($1 \text{ L} = 10^{-6} \text{ Torr} \cdot \text{s}$) наблюдаются две линии поглощения при волновых числах (ν) 1433 и 1534 cm^{-1} . С увеличением концентрации NO обе линии смещаются в сторону больших значений волновых чисел с одновременным их сближением друг к другу. При насыщающем покрытии (экспозиция 3L) спектр состоит из двух разных по интенсивности линий поглощения при 1507 и 1574 cm^{-1} . С ростом экспозиции NO спектр не претерпевает заметных изменений. Отсутствие в спектре линий поглощения в области 1880 cm^{-1} , обычно приписываемых диссоциации молекул NO [14], позволяет сделать вывод, что монослойная пленка Ni подавляет способность поверхности W (110) разлагать молекулы NO. Спектры NO на моноатомной пленке отличаются от спектров, наблюдаемых при адсорбции NO на поверхности массивного кристалла Ni (111). В последнем случае наблюдается только одна линия поглощения, которая

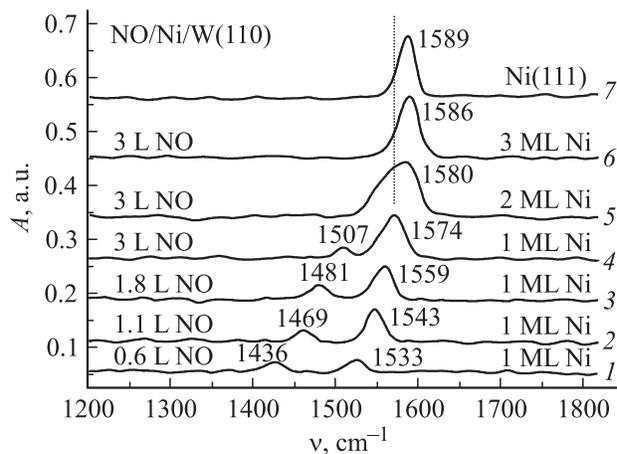


Рис. 1. ИК спектры поглощения $A(\nu)$ молекул NO, адсорбированных на поверхности пленок Ni на W (110) толщиной 1 (1–4), 2 (5) и 3 (6) монослоя и массивного кристалла Ni (111) (7). Температура подложки при адсорбции NO составляет 110 К. Экспозиция NO, при которой происходит насыщение, составляет 3 L.

с ростом покрытия NO смещается в сторону больших волновых чисел до значения 1587 cm^{-1} при насыщении. Считается, что эта линия обусловлена внутримолекулярным колебанием NO, адсорбированной по мостиковой схеме, а рост волнового числа с покрытием — изменением геометрии адсорбции молекулы от наклонного положения при малых покрытиях до перпендикулярного положения при насыщении [15]. На рис. 1 также приведен спектр NO на кристалле Ni (111) при насыщающем покрытии (7) ($\nu = 1589 \text{ cm}^{-1}$). Сопоставляя этот спектр со спектром NO на моноатомной пленке, можно заключить, что на моноатомной пленке в отличие от кристалла Ni (111) существует не один, а два типа адсорбированных молекул NO, имеющих разные частоты внутримолекулярных колебаний: 1507 и 1574 cm^{-1} . Близость последнего значения к значению ν NO на кристалле (1589 cm^{-1}) позволяет предположить, что на поверхности моноатомной пленки формируются адсорбционные центры, близкие по геометрическому и электронному строению тем, которые имеют место на поверхности массивного Ni (111). В то же время некоторое различие в частотах NO ($\Delta\nu = 15 \text{ cm}^{-1}$), главным образом наличие дополнительной линии в спектре 4 ($\nu = 1507 \text{ cm}^{-1}$), указывает на то, что свойства моноатомной пленки Ni со структурой (111) на поверхности W (110) не совсем идентичны свойствам кристалла Ni (111). При адсорбции NO на пленке Ni в два монослоя низкочастотная линия уже не наблюдается, а более интенсивная линия поглощения смещается от 1574 до 1580 cm^{-1} с одновременным ее уширением (рис. 1, кривая 5). По-видимому, следует предположить, что расстояние между линиями, первоначально расположенными при 1507 и 1574 cm^{-1} (рис. 1, кривая 4), уменьшается при адсорбции NO на пленке Ni толщиной в два монослоя и суперпозиция этих линий приводит к указанному

уширению (рис. 1, кривая 5). При увеличении толщины пленки Ni до трех монослоев линия поглощения сужается и смещается до 1586 cm^{-1} (рис. 1, кривая 6). Хорошее соответствие формы и положения этой линии с наблюдаемой при адсорбции NO на поверхности кристалла (кривые 6 и 7) позволяют предположить, что адсорбционные свойства пленки Ni с ориентацией (111) толщиной в три монослоя практически эквивалентны свойствам массивного Ni (111). Видоизменение спектров поглощения (кривые 4–6) с ростом толщины пленки Ni может быть обусловлено изменением влияния подложки W (110) на величину внутримолекулярной связи NO и изменением структуры пленки Ni с увеличением ее толщины. Несмотря на то что при 1, 2 и 3 монослоях наблюдается дифракционная картина, соответствующая грани Ni (111), из-за некоторого несоответствия кристаллографических направлений и постоянных решеток W (110) и Ni (111), при монослойном покрытии имеет место, хотя и незначительное ($\sim 7\%$), искажение структуры (111) по сравнению с поверхностью Ni (111) [4–6]. Подобное искажение сверхструктуры пленки при монослойном покрытии происходит вследствие того, что возможно формирование доменов с ориентацией Ni (111), образованных при адсорбции атомов в трехкратных дырочных центрах адсорбции. При этом структура пленки может быть представлена в виде суперпозиции (111)-структур двух типов, образованных вследствие заполнения тетраэдрических и октаэдрических пустот. В области соприкосновения указанных двух типов сверхструктур происходит искажение ориентации, характерной для Ni (111). При заполнении последующих монослоев эти искажения уменьшаются. В связи с этим можно предположить, что низкоэнергетический пик, соответствующий NO на поверхности монослойной пленки Ni (1507 cm^{-1}), обусловлен молекулами NO, адсорбированными на границах раздела доменов. С ростом толщины пленки интенсивность этой линии поглощения уменьшается в соответствии с тем, что структура пленки приобретает вид, характерный для недеформированной грани (111). Такое объяснение находится в соответствии с обнаруженным относительно недавно фактом уменьшения механических напряжений в пленке Ni на поверхности W (110) при толщине, превышающей монослойное покрытие [16]. Кроме того, практически полная релаксация напряжений при толщине пленки, соответствующей трем монослойным слоям [16], находится в хорошем соответствии с наблюдаемым фактом стабилизации колебательных свойств адсорбированных молекул NO при этом покрытии. Другое, хотя и менее явное различие в спектрах NO на поверхности пленок Ni из 1 и 3 монослоев заключается в том, что волновое число доминирующей линии поглощения в первом случае меньше на величину 12 cm^{-1} . Это указывает на несколько разное электронное состояние адсорбированных молекул в этих двух случаях. Очевидно, что такое различие связано с разным электронным состоянием пленок Ni разной толщины.

Для того чтобы проследить, как изменяется это состояние с ростом толщины пленки, были проведены

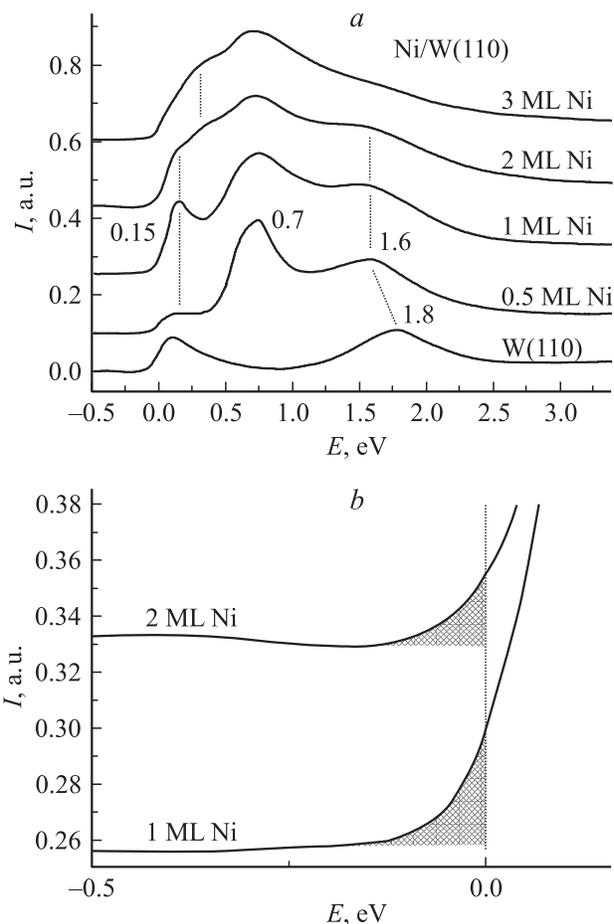


Рис. 2. *a* — спектры УФЭС системы Ni/W (110) при разных покрытиях Ni, фотоэлектроны зарегистрированы в нормальном направлении; *b* — сопоставление спектров вблизи уровня Ферми при толщине пленок никеля, соответствующей одному и двум монослойным слоям.

измерения спектров УФЭС для системы Ni/W (110). Соответствующие спектры приведены на рис. 2, *a*. Видно, что уже при субмонослойном покрытии Ni (0.5 ML) кардинально меняется энергетическое распределение фотоэлектронов W (110). Основной особенностью является появление довольно интенсивной линии при 0.7 eV. Подобная линия обусловлена локализованным *d*-состоянием Ni [17]. Кроме этого, наблюдается сдвиг в энергии фотоэмиссионной линии W при энергии 1.8 eV на 0.2 eV в сторону меньших энергий связи. Такое поведение является свидетельством существенного перераспределения электронной плотности при образовании хемосорбционной связи Ni–W (110). Об этом свидетельствует и появление новой особенности вблизи уровня Ферми при энергии 0.15 eV, которая достигает наибольшей интенсивности при монослойном покрытии, существенно ослабевает при 2 ML и практически полностью исчезает при 3 ML. Максимальная интенсивность этой линии, достигаемая при 1 ML, указывает на то, что она обусловлена свойствами именно самой межфазной границы Ni/W (110). С такой интерпретацией корре-

лирует и поведение интенсивности линии при 1.6 eV, обусловленной формированием адсорбционной связи, интенсивность которой также уменьшается с ростом покрытия выше 1 ML. Резкий спад интенсивности линии вблизи уровня Ферми при увеличении толщины пленки от 1 до 2 моноатомных слоев свидетельствует о том, что свойства межфазной границы при таком переходе претерпевают заметные изменения. Очевидно, это сказывается и на том, что электронные свойства атомов Ni в первом и втором атомном слое также различаются, что и находит свое отражение в различии фотоэмиссионных спектров при 1 и 2 ML.

Более внимательное рассмотрение этих спектров вблизи уровня Ферми (рис. 2, *b*) показывает, что плотность состояний при $E = E_f$ во втором случае несколько снижена по сравнению с наблюдающейся при моноатомном покрытии. Такое поведение указывает на то, что центр валентной зоны Ni смещается в сторону больших энергий связи при переходе от монослойной к двухслойной пленке. Данное обстоятельство схематически представлено на рис. 3. Результаты расчета свойства систем, образующихся при адсорбции молекул NO на поверхности ряда переходных металлов, показали, что эффективность взаимодействия молекулярных орбиталей и, следовательно, электронного обмена с подложкой определяется близостью энергии соответствующей орбитали к положению центра валентной зоны металла [8]. В частности, для энергии взаимодействия антисвязывающей молекулярной 2π -орбитали с подложкой ($E_{d-\pi}$) предложено следующее соотношение [8]:

$$E_{d-\pi} \approx -4f \frac{V_{\pi}^2}{\epsilon_{2\pi} - \epsilon_d},$$

где f — заполнение d -зоны, V — матричный элемент взаимодействия, $\epsilon_{2\pi}$ и ϵ_d — энергетическое положение 2π -орбитали и центра d -зоны соответственно.

Отсюда видно, что эффективность взаимодействия между молекулярной орбиталью адсорбата и валентной зоной металла больше, чем ближе величины соответствующих энергий друг к другу. На рис. 3 наряду со схемой эффекта заполнения валентной зоны с сопровождающим смещением ее центра ($\epsilon_{d2}, \epsilon_{d1}$) показаны молекулярные орбитали свободной и адсорбированной молекулы NO. Последние построены на основе данных измерения системы No/Ni(111) методами прямой (для заполненных зон) [18] и обратной (для свободных зон) [19] ультрафиолетовой фотоэмиссионной спектроскопии. Видно, что величина разности ($\epsilon_{2\pi} - \epsilon_d$) меньше для случая моноатомной пленки, чем для пленки толщиной в два моноатомных слоя. С учетом приведенного соотношения это означает, что в первом случае эффективность взаимодействия разрыхляющей орбитали 2π NO с поверхностью системы (1 ML)Ni/W(110) выше. Следствием этого является ослабление внутримолекулярной связи NO на поверхности моноатомной пленки по сравнению с имеющей место при покрытии в два и более монослоев. Такое ослабление связи в свою

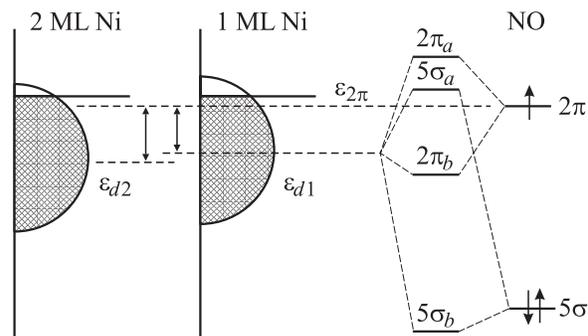


Рис. 3. Схема влияния заполненности валентной зоны Ni на эффективность взаимодействия в системе NO/подложка.

очередь приводит к уменьшению частоты внутримолекулярных колебаний, что и наблюдается из сопоставления соответствующих ИК спектров поглощения (рис. 1).

Таким образом, различие в свойствах моноатомной пленки и пленки большей толщины (2 и 3 ML), проявляемое в различии колебательных спектров адсорбированных молекул NO, можно условно разделить на два типа: структурное и электронное. Различие геометрической структуры пленок приводит к появлению дополнительной особенности в ИК спектре NO при 1 ML Ni при 1507 cm^{-1} . Различие же электронных свойств проявляется в различии частот внутримолекулярных колебаний основных линий поглощения на 12 cm^{-1} . Разумеется, такое подразделение является условным, поскольку геометрическая структура пленки является следствием соответствующего электронного состояния адсорбционной системы, равно как и наоборот. С ростом толщины свойства пленки стабилизируются и при $\theta = 3 \text{ ML}$, как видно из рис. 1, соответствуют наблюдающимся для массивного кристалла. В пользу данного утверждения свидетельствуют и результаты измерения механического напряжения в пленке Ni на поверхности W(110), величина которой также достигает стационарного значения при покрытии, близком к трем моноатомным слоям [16]. Стабилизация свойств системы при 3 ML несколько противоречит обнаруженному в работе [4] факту стабилизации работы выхода при существенно меньшем покрытии: $\sim 1 \text{ ML}$. Авторы указанной работы измеряли величину ϕ методом задержки электронного пучка (методом Андерсона). При этом измеряемые величины ϕ имеют усредненный характер и нечувствительны к структурным деталям на поверхности (например, дефектам, островкам, границам доменов), эффективные размеры которых меньше длины когерентности электронов используемых энергий ($\sim 300\text{--}400 \text{ \AA}$). Кроме того, работа выхода также малочувствительна к деталям электронного строения поверхности, а определяется преимущественно взаимным расположением уровня Ферми и уровня вакуума. Тем не менее факт стабилизации величины ϕ при моноатомном покрытии является хорошим качественным тестом того, что свойства пленки в целом сформированы и при дальнейшем росте покрытия

происходит лишь формирование деталей электронной структуры [1]. С таким положением согласуется и выше-указанное поведение ИК спектров при адсорбции NO на поверхности пленок Ni разной толщины. Несмотря на то что соответствующие спектры при покрытии Ni в 1 ML и в 2 и 3 ML отличаются друг от друга, между ними тем не менее имеется существенное сходство. Оно заключается в том, что во всех указанных случаях доминирующей является линия при $1580\text{--}1590\text{ cm}^{-1}$. При $\theta_{\text{Ni}} = 1\text{ ML}$ наблюдается полоса поглощения при 1574 cm^{-1} , которая при дальнейшем увеличении толщины пленки лишь незначительно изменяет свое положение (на 12 cm^{-1}). Данное изменение величины ν действительно можно считать незначительным, если принять во внимание тот факт, что с ростом поверхностной концентрации NO на поверхности одной и той же подложки, в частности Ni(111), она изменяется на гораздо большую величину: $\sim 140\text{ cm}^{-1}$ [14,15]. Аналогичным образом различие в значениях ν молекул NO, адсорбированных на поверхности одного и того же материала (Ni), но с разной структурой поверхности, также достигает значительных величин (до 60 cm^{-1}) [9]. С учетом этого можно считать, что близость волновых чисел NO при $\theta_{\text{Ni}} = 1\text{ ML}$ (1574 cm^{-1}) и $\theta_{\text{Ni}} = 2$ и 3 ML (1586 cm^{-1}) является свидетельством близости электронных свойств моноатомной металлической пленки к свойствам пленки большей толщины. Поскольку величина частоты внутримолекулярных колебаний чрезвычайно чувствительна к электронному состоянию молекулы, которая в свою очередь определяется электронным состоянием подложки [7,8], можно считать, что свойства пленки в основном формируются при заполнении моноатомного покрытия. Однако для формирования деталей электронной структуры, как следует из рис. 1 и 2, необходимо наличие по крайней мере 3 моноатомных слоев со структурой соответствующей грани массивного кристалла.

Следует заметить, что при адсорбции большинства металлов на поверхности металлических подложек наблюдается стабилизация концентрационной зависимости работы выхода при заполнении сплошного моноатомного слоя [1,20]. Наряду с этим в ряде случаев в спектрах характеристических потерь энергии электронов начинают проявляться линии плазмонных потерь, которые характерны для соответствующих массивных адсорбатов [21,22]. Такое поведение позволяет предположить, что завершение формирования основных особенностей электронных свойств пленок при заполнении одного моноатомного слоя является общим для адсорбатов с металлическими свойствами. Для формирования свойств, присущих массивным металлам, необходимо, чтобы произошло уширение дискретных валентных атомных уровней адатомов в зоны. На поверхности подложки такой процесс возможен в силу по крайней мере двух причин: а) „размытие“ дискретного уровня одиночного адатома в зону, в соответствии с моделью Герни [20]; б) дальнейшее уширение уровня и образование зон с ростом покрытия вследствие латерального взаимодействия адатомов. При этом, по-видимому,

обобществление электронов достигает такой степени, что формируется зона, ширина которой сопоставима с шириной валентной зоны массивного материала. Об этом, в частности, свидетельствует формирование коллективных свойств обобществленных электронов пленки (плазмонов) уже при моноатомном покрытии [21,22]. В пользу данного предположения свидетельствует и тот факт, что максимум плотности d -состояний Ni при энергии 0.7 eV ниже уровня Ферми формируется уже при моноатомной толщине пленки (рис. 2, а). При дальнейшем росте толщины пленки эта особенность не претерпевает существенных изменений. На это указывает и появление доминирующей колебательной особенности для моноатомной пленки при значении волнового числа, близком к значению, характерному для массивного кристалла: 1574 и 1589 cm^{-1} соответственно (рис. 1, кривые 4, 7).

В результате можно сделать вывод, что адсорбционные и электронные свойства сплошных упорядоченных пленок Ni со структурой, соответствующей грани (111), на поверхности W(110) изменяются при увеличении толщины пленки от одного атомного слоя до трех. Об этом свидетельствует, с одной стороны, изменение колебательных спектров тестовых молекул NO, адсорбированных на поверхности пленок, с другой — изменение фотоэлектронных спектров валентной зоны системы Ni/W(110) при увеличении толщины пленки. Стабилизация ИК и фотоэлектронных спектров при толщине пленки, соответствующей трем моноатомным слоям, позволяет предположить, что завершение формирования основных адсорбционных и электронных свойств пленки происходит при этой толщине пленки. В то же время уже моноатомная пленка проявляет особенности, характерные для массивного металла.

Список литературы

- [1] Handbook of Surface Science. Electronic Structure / Ed. K. Horn, M. Scheffler. Elsevier: North Holland, 2000. 1167 p.
- [2] *Growth and Properties of Ultrathin Epitaxial Layers* / D.A. King, D.P. Woodruff; Elsevier; Amsterdam. 1997. 893 p.
- [3] *Diehl R.D., McGrath R.* // J. Phys. Condens. Matter. 1997. Vol. 9. N 6. P. 951–972.
- [4] *Kolaczkiwicz J., Bauer E.* // Surf. Sci. 1984. Vol. 144. N 2. P. 495–512.
- [5] *Schmidthals C., Sander D., Enders A.* et al. // Surf. Sci. 1998. Vol. 417. N 2/3. P. 361–371.
- [6] *Van der Merwe J.H., Bauer E., Toensing D.L.* et al. // Phys. Rev. B. 1994. Vol. 49. N 15. P. 2127–2136.
- [7] *Blyholder G.* // J. Phys. Chem. 1964. Vol. 68. N 7. P. 2772–2778.
- [8] *Morikawa Y., Mortensen J.J., Hammer B.* et al. // Surf. Sci. 1997. Vol. 386. N 1. P. 67–72.
- [9] *Brown W.A., King D.A.* // J. Phys. Chem. B. 2000. Vol. 104. N 7. P. 2578–2595.
- [10] *Greenler R.G.* // J. Vac. Sci. Technol. 1975. Vol. 12. N 3. P. 1410–1417.
- [11] *Магкоев Т.Т., Сонг М.* // Поверхность. 1999. № 11. С. 45–50.

- [12] *Magkoev T.T., Fukutani K., Song M.-B.* et al. // *Surf. Sci.* 1996. Vol. 363. N 1–3. P. 281–292.
- [13] *Fukutani K., Magkoev T.T., Murata Y.* et al. // *J. Electr. Spectr. Relat. Phenom.* 1998. Vol. 88–91. P. 597–603.
- [14] *Chen J.G., Erley W., Ibach H.* // *Surf. Sci.* 1990. Vol. 227. N 1–2. P. 79–89.
- [15] *Gland J.L., Sexton B.* // *Surf. Sci.* 1980. Vol. 94. N 2–3. P. 355–368.
- [16] *Sander D., Schmidhals C., Enders A.* et al. // *Phys. Rev. B.* 1998. Vol. 57. N 3. P. 1406–1409.
- [17] *Tsunematsu H., Aita M., Tanaka A.* et al. // *J. Electr. Spectr. Relat. Phenom.* 1999. Vol. 101/103. P. 281–285.
- [18] *Bonzel H.P., Pirug G.* // *Surf. Sci.* 1977. Vol. 62. N 1. P. 45–61.
- [19] *Rangelov G., Memmel N., Bertel E.* et al. // *Surf. Sci.* 1991. Vol. 251/252. P. 965–973.
- [20] *Большов Л.А., Напартович А.П., Наумовец А.Г.* и др. // *УФН.* 1977. Т. 122. № 7. С. 125–158.
- [21] *Eguiluz A.G., Campbell D.A.* // *Phys. Rev. B.* 1985. Vol. 31. N 12. P. 7572–7579.
- [22] *Liebsch A.* *Electronic Excitations at Metal Surfaces.* New York; London: Plenum Press. 1997. 336 p.