

О ВОЗМОЖНОСТИ ДЕРЕЛАКСАЦИИ p — $\text{InP}(110)$

В.Ю.Аристов, И.Л.Болотин

Институт физики твердого тела АН СССР
142432, Черноголовка Московской обл.

Поступила в редакцию 15 июля 1991 г.

В процессе измерения изгиба зон при формировании границы раздела p — $\text{InP}(110)/\text{Ag}$ при 10 К выявлена дополнительная по сравнению с 300 К стадия, которую можно объяснить как следствие явления дерелаксации поверхности.

Как известно, поверхности полупроводников $A^3B^5(110)$, полученные сколом в высоком вакууме, подвержены спонтанной релаксации, со смещением атомов группы A в направлении объема кристалла, а атомов группы B — наружу. При релаксации заполненные поверхностные электронные состояния (ПС) "выдавливаются" из запрещенной зоны в валентную, а пустые — в зону проводимости. Именно это является причиной того, что в экспериментах на высококачественных сколах полупроводников $A^3B^5(110)$ не обнаруживается изгиба зон у поверхности (за исключением GaP), в полном согласии с теоретическими расчетами (например ¹⁻⁴). В ряде работ ⁵⁻⁸ показано, что под влиянием адсорбции субмонослойных покрытий металлов возможна дерелаксация с наблюдением ПС, характерных для "идеальной" поверхности. На образцах n -типа это выявляется, в частности, в "закреплении" уровня Ферми (E_F^S) на пустых ПС (акцепторного типа) "возвращающихся" в результате дерелаксации поверхности в запрещенную зону. Можно предположить, что какие-то особенности наблюдались бы для кристаллов p -типа полупроводников A^3B^5 , если бы заполненные ПС дерелаксированной ("идеальной") поверхности лежали выше E_v . Анализ теоретических расчетов показал на такую возможность у $\text{InP}(110)$ ⁴. Измеряя изменение изгиба зон в результате нанесения какого либо адсорбата на сколотую поверхность p — $\text{InP}(110)$ можно было бы проверить высказанное предположение. В качестве адсорбата мы использовали серебро.

Исследования проводились методом ультрафиолетовой фотоэлектронной спектроскопии (УФЭС) в электронном спектрометре ESCALAB-5 с полусферическим энергоанализатором и капиллярным газоразрядным гелиевым источником ультрафиолетового излучения. Атомарно-чистые поверхности $\text{InP}(110)$ получали сколом непосредственно в высоковакуумной камере (базовое давление $\sim 5 \cdot 10^{-11}$ торр). Все значения θ (величины покрытия Ag) приводятся в монослоях (где $\theta = 1$, когда N — количество атомов Ag на единицу площади равно количеству атомов подложки в плоскости (110); $N = 8,24 \cdot 10^{14}$ ат./см²). Использовались образцы p — InP со степенью легирования $3 \cdot 10^{16}$ см⁻³. Изучалось влияние адсорбции атомов Ag на спектры УФЭС вблизи уровня Ферми E_F^S . В частности, по смещению этой части спектра как целого можно следить за процессом формирования барьеров Шоттки (БШ) и определять изменения величины изгиба зон от θ . Другие детали эксперимента описаны в ^{6,9}.

На рис.1 и 2 представлены экспериментальные зависимости изменения изгиба зон от θ в процессе напыления Ag на подложку $\text{InP}(110)$ p -типа при 300 и 10 К. Видно, что как при 300 К, так и при 10 К изменения величины БШ происходят в несколько стадий, которые можно связать с изме-

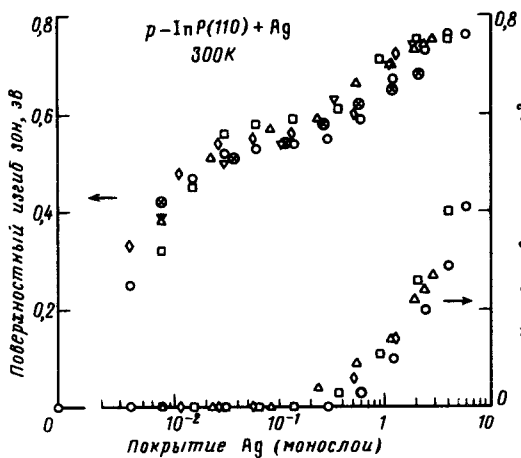


Рис.1

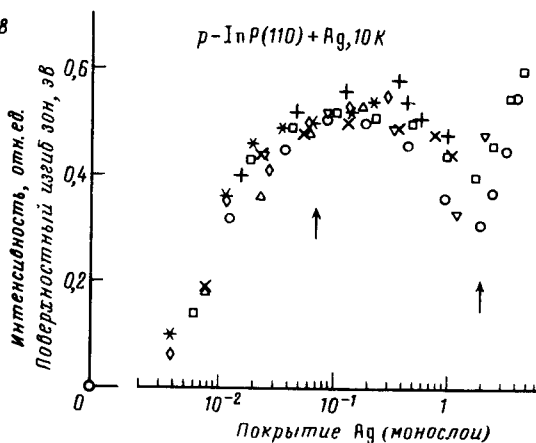


Рис.2

Рис. 1. Изменение положения E_F^* в процессе напыления Ag на $p\text{-InP}(110)$ при 300 К. Правая зависимость отражает изменение интенсивности металлических состояний ("ступенька" на E_F^*)

Рис.2. Изменение положения E_F^* в процессе напыления Ag на $p\text{-InP}(110)$ при 10 К. Стрелками указаны начало появления в спектрах заполненных ПС дерелаксированной поверхности (стрелка вниз) и состояний металлического типа (стрелка вверх)

нениями в спектрах УФЭС и морфологией образующихся покрытий. Сначала рассмотрим зависимости, полученные при 300 К (рис.1).

Как видно из рис.1, в первом интервале покрытий $0 < \theta < 0,2 \div 0,3$ зависимость изменения изгиба зон от θ при 300 К имеет вид кривой с насыщением (после $\theta < 0,04$) при этом величина БШ достигает значения $\approx 0,55$ эВ, а каких-либо заметных изменений в спектрах не наблюдалось. Такое поведение можно объяснить предположив, что в начальный момент адсорбции атомов серебра происходит появление ПС, вносимых адсорбцией отдельных атомов Ag (AIGS - adsorbed induced gap states). Вероятно, заполненным ПС типа AIGS отвечает энергетическое положение $E \approx E_v + 0,55$ эВ, соответствующее "пиннингу" E_F^* до $\theta < 0,04$ (рис.1). Одновременно, как известно¹⁰, идет образование островков, что должно сопровождаться появлением новых ПС, которые образуются при "взаимодействии" с подложкой металлических кластеров серебра. В дальнейшем эти состояния мы будем обозначать "MIGS" (metal induced gap states). По-видимому при малых степенях покрытий ($0 < \theta < 0,2 \div 0,3$) доминирующую роль играют AIGS, а при больших уже преобладают MIGS. И действительно, из рис.1 видно, что после $\theta > 0,3$ можно выделить вторую стадию, когда происходит дальнейшее увеличение изгиба зон. При этом наблюдается хорошая корреляция с формированием в спектрах УФЭС "металлической ступеньки" в районе уровня Ферми (рис.1, правая зависимость), определяемая эмиссией электронов из достаточно большого количества серебряных островков. Ясно, что ПС типа MIGS расположены по энергии (относительно E_v) выше чем ПС типа AIGS. Наша методика не позволяет проводить корректные измерения изгиба зон при больших θ , но в работах¹¹⁻¹⁴, выполненных с помощью синхротронного излучения, такие измерения проводились. Следует отметить, что существует разброс в экспериментальных результатах. Так в¹¹⁻¹³ утверждается, что независимо от температуры подложки, обусловленные образованием металлической пленки состояния лежат вблизи $E \approx E_v + 0,95$ эВ, и являются ПС дефектного типа. А в работе¹⁴

авторы считают, что конечное значение "пиннинга" зависит от температуры и определяется значениями $E \approx E_v + 0,67$ эВ при 300 К и $E \approx E_v + 0,55$ эВ при 60 К. Расчеты^{15,16} по модели Терсоффа дают для ПС типа MIGS значения $E \approx E_v + (0,74 \div 0,87)$ эВ. Показанные на рис.1 результаты не позволяют сделать окончательного вывода о том какие состояния закрепляют E_F^* при наибольших покрытиях в наших экспериментах. Однако сразу стоит отметить, что даже если предпочесть ПС дефектного типа, то можно сделать вывод о наблюдении корреляции между образованием этих ПС и появлением металлического края в спектрах УФЭС (появлением металлических островков). Такой же вывод следовал и из работы Цунгера¹⁷, где говорилось о том, что необходимая для образования дефектов поверхности энергия может освобождаться в процессе образования кластеров металла.

Теперь обсудим результаты, полученные при 10 К. Как видно из рис.2, в процессе формирования границы раздела при низкой температуре можно в отличие от рассмотренного выше случая (300 К) выделить три стадии. Первая соответствует области покрытий $0 < \theta < 0,2 \div 0,3$. По-видимому, здесь как и при 300 К, определяющую роль играют ПС типа AIGS. Данные ПС должны проявляться при 10 К более четко вследствие отсутствия диффузии адсорбата вдоль поверхности. Стадия при $\theta > 2$ аналогична второй, обсужденной для 300 К. Действительно, сильное увеличение изгиба зон при $\theta > 2$ сопровождается появлением в спектрах УФЭС металлической ступеньки. При 300 К эта стадия наступала гораздо раньше, так как благодаря диффузии адсорбированных атомов вдоль поверхности металлические островки начинают образовываться уже при малых степенях покрытия ($\theta > 0,3$). Таким образом, на этой стадии благодаря проявлению металлического характера покрытия появляются и начинают доминировать ПС типа MIGS.

Отличительной особенностью низкотемпературного образования границы раздела является наличие промежуточной стадии в районе покрытий $0,2 \div 0,3 < \theta < 2$. Эту стадию можно объяснить следующим образом. При низкой температуре адсорбция равномерно распределенных по поверхности и взаимодействующих между собой атомов серебра приводит, видимо, к дерелаксации поверхности подложки - ее атомы возвращаются к положениям, соответствующим идеальной (нерелаксированной) поверхности. Как следствие, в соответствии с расчетами электронной структуры идеальной поверхности, из валентной зоны должны "вернуться" в запрещенную зону заполненные ПС. При этом они должны расположиться вблизи потолка валентной зоны, частично "заполняя" и в запрещенную зону. Видимо эти состояния и являются причиной уменьшения изгиба зон на этой промежуточной стадии. Аргументом в пользу этого предположения может быть и следующее наблюдение. После первой стадии начиная с $\theta \sim 0,1$ при 10 К в спектрах УФЭС отмечалось появление вблизи E_F^* состояний, интенсивность которых увеличивается с ростом θ и которые исчезают при нагреве системы до 300 К. В работе⁶ подобного типа состояния наблюдались в системе GaAs(110) + Ag и объяснялись как эмиссия с заполненных ПС участков дерелаксированной (или "идеальной") поверхности.

При сравнении полученных нами зависимостей с результатами работ¹¹⁻¹⁴, сразу можно отметить, что наблюдается хорошее согласие в случае адсорбции на подложку при 300 К. При низкой же температуре в¹¹⁻¹⁴ в зависимостях величины БШ от θ не наблюдалось проявление обсужденной выше промежуточной стадии. Возможно в¹¹⁻¹⁴ была не слишком низкая температура подложки (60 К).

И наконец отметим следующее. В отличие от GaAs(110), где есть

многочисленные теоретические расчеты по электронной структуре идеальной и реальной, т.е. релаксированной поверхности, системе InP(110) уделено существенно меньше внимания. Поэтому сделанная выше интерпретация наблюдаемого эффекта носит только предположительный характер.

-
1. Chadi D.J. Phys.Rev., 1978, B18, 1800.
 2. Kahn A. Surf. Sci., 1986, 168, 1.
 3. Молотков С.Н., Татарский В.В. Поверхность: Физика, химия, механика, 1990, 10, 59.
 4. Strivastava G.P., Singh I., Montgomery V., Williams R.H. J. Phys. C: Solid State Phys., 1983, 16, 3627.
 5. Bonapace C.R., Tu D., Li K., Kahn A. J. Phys. (Paris) Colloq., 1984, 45, 409.
 6. Аристов В.Ю., Болотин И.Л., Гражулис В.А. ЖЭТФ, 1988, 94, 270.
 7. Aldao C.M., Waddill G.D., Vitomirov I.M., Weaver J.H. J. Vac. Sci. Technol., 1989, A7(3), 817.
 8. Aristov V.Yu., Bolotin I.L., Grazhulis V.A. Phys. Scripta, 1990, 41, 88.
 9. Аристов В.Ю., Болотин И.Л., Гражулис В.А., Жилин В.М. ЖЭТФ, 1986, 91, 1411.
 10. Аристов В.Ю., Болотин И.Л., Гражулис В.А., Нашельский А.Я. Поверхность: Физика, химия, механика, 1990, 9, 87.
 11. Cao R., Miyano K., Linday I., Spicer W.E. J. Vac. Sci. Technol., 1989, A7(3), 861.
 12. Spicer W.E., Cao R., Miyano K. et al. Appl. Surface Sci., 1989, 41/42, 1.
 13. Cao R., Miyano K., Kendelewicz T., Lindau I., Spicer W.E. Phys. Rev., 1989, B39, 11146.
 14. Vitomirov I.M., Aldao C.M., Waddill G.D. et al. Phys. Rev., 1990, B41, 8465.
 15. Tersoff J. Phys. Rev., 1985, B32, 6968.
 16. Menendez J. Phys. Rev., 1988, B38, 6305.
 17. Zunger A. Phys. Rev., 1981, B24, 4372.