

02;11;12

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ АТОМОВ КРЕМНИЯ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ИРИДИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И НАГРЕВА

© О.Л.Голубев, Е.Л.Конторович, В.Н.Шредник

Методами полевой электронной микроскопии исследовалась конденсация Si на Ir-острии и последующие изменения формы кристалла при нагреве острия в присутствии сильного электрического поля. Обнаружено заметное упрочнение решетки Ir в результате диффузии в нее Si. При конденсации на Ir 10–12 монослоев Si термополевая обработка приводила к росту микровыступов в областях {113}–{112}, не наблюдавшихся при иных условиях, что связывается с полевой реконструкцией этих граней.

В работах [1,2] было показано, что при прогреве в сильном электрическом поле W-острий, покрытых слоями Si, происходила реконструкция центральной наиболее плотноупакованной грани {110}, на которой вырастал одиночный микровыступ радиусом в десятки ангстрем, состоявший из смеси атомов W и Si. Термополевые микровыступы никогда не наблюдались на грани {110} W при прогреве в сильном поле острий чистого W или прогреве W-острий, покрытых Si, но в отсутствие внешнего электрического поля. Явление это было названо полевой реконструкцией, поскольку для этого требовалось 2 фактора: наличие внешнего электрического поля напряженностью $F = 0.3\text{--}0.6 \text{ В\AA}$ и “стимулирующего” адсорбата Si в количестве от $n = 0.75\text{--}0.8$ монослоя до $n = 3\text{--}4$ монослоя; интервал температур T , в котором наблюдалась полевая реконструкция, составлял $T = 1150\text{--}1400 \text{ К}$.

Целью данной работы было установить, будет ли наблюдаться полевая реконструкция, если при том же адсорбате — Si заменить подложку с W на Ir. Иридий — металл также переходный, но другой структуры — (ГЦК) с иными физическими и химическими свойствами. Работы с системой Si–Ir, выполненные с использованием разнообразных методов [3–7], указывают, что в данной системе наблюдается целое семейство силицидов: от Ir_3Si до IrSi_3 . При этом Si диффундирует в объем Ir при весьма низких $T \geq 600\text{--}700 \text{ К}$, начиная с покрытий $n \approx 0.2$ монослоя, однако очистить Ir от Si можно только в процессе длительного прогрева при $T \approx 2300 \text{ К}$, когда активно испаряется уже и сам Ir.

туры с гранями типа $\{012\}$, $\{013\}$ и $\{011\}$, а также $\{113\}$. Эмиссионные изображения, соответствующие таким структурам, представлены на рис. 1, а-в. Таким образом, конденсация Si на поверхности Ir даже в отсутствие внешнего электрического поля вызывает изменение огранки поверхности Ir подобно формированию "поверхностного силицида" в системе Si-W [8]. По аналогии с системой Si-W структуру типа рис. 1, в можно назвать "поверхностным силицидом Ir". Структура типа рис. 1, в всегда наблюдается как при наращивании, так и при удалении слоев Si. Структура поверхностного силицида отличается, таким образом, от низкотемпературных покрытий Si на Ir при $T \leq 600$ К, которые не вызывают изменения огранки поверхности.

При покрытиях $n \geq 2$ монослоев на различных гранях Ir-острия наблюдаются наросты силицида, которые имеют структуру Ir и симметрию грани Ir, на которой они вырастают. Подобные наросты, выросшие на гранях $\{111\}$ и $\{110\}$, полученные конденсацией $n = 4-5$ монослоев Si при T острия 1400 К и последующем прогреве до $T = 1700$ К, показаны на рис. 1, г-е. Видно, что на наросте, выросшем на грани $\{111\}$ Ir, видны собственные грани типа $\{110\}$ и $\{210\}$ (рис. 1, д, е). Таким образом, при этих условиях происходит эпитаксиальный рост силицида на Ir, хотя силицид имеет структуру, отличающуюся от Ir, и в этом случае реализуется механизм роста Франка Ван дер Мерве. Эпитаксиальный рост силицида был обнаружен и в работе [9] на системе Si-Ni с помощью полевой ионной микроскопии и атомного зонда. На Ni-острие ориентации $\{111\}$ эпитаксиально выростал слой силицида NiSi_2 гексагональной структуры.

Прогрев монослойного покрытия Si на Ir в присутствии внешнего электрического поля $F = 0.3-0.4$ В/Å вызывает обычный процесс формоизменения острия в электрическом поле, который наблюдается и на чистом Ir [10]: вначале — при низких T — перестройка в поле, т. е. расширение плотноупакованных граней $\{111\}$ и $\{100\}$, при более высоких — образование макронаростов на гранях $\{111\}$, $\{100\}$ и $\{110\}$ и микровыступов на углах и ребрах острия и макронаростов. Процесс формирования одиночных микровыступов на плотноупакованных гранях, как следствие полевой реконструкции, такой же как на системе W-Si, не наблюдается. Единственное существенное отличие от перестройки чистого Ir — значительно более высокие T , при которых происходит перестройка в поле. Если чистый Ir заметно перестраивается уже при $T \cong 920$ К и $F = 0.3-0.4$ В/Å, то при монослойном покрытии Si начало процесса перестройки наблюдается лишь при $T \leq 1150$ К при тех же F . Поскольку, как показано в работе [7], диффузия Si в объем Ir начинает-

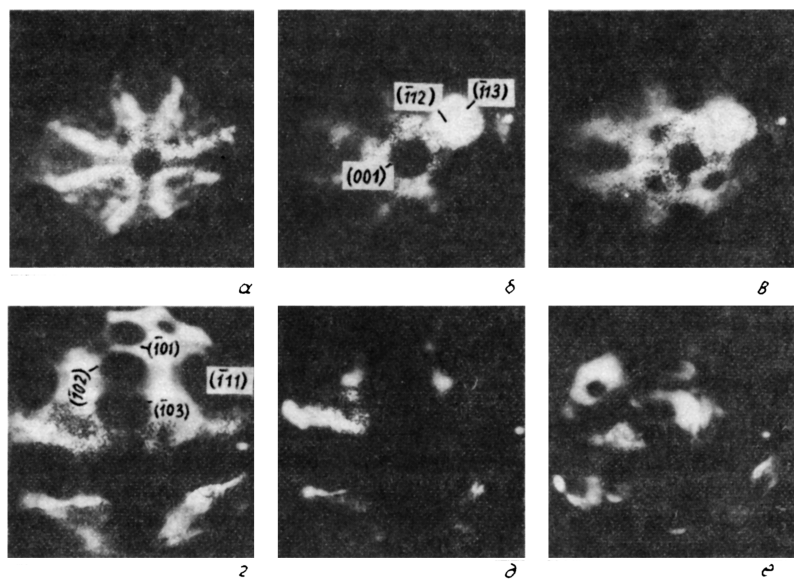


Рис. 2. Полевые электронные изображения поверхности силицида Ir после одновременного воздействия T и F : а-в — силицид получен конденсацией $n = 10-12$ при $T = 1400$ К; а — $T = 1400$ К, $F = 0.36$ В/Å, б — $T = 1600$ К, $F = 0.36$ В/Å и последующий прогрев при $T = 1500$ К, в — после прогрева состояния "б" при $T = 1500$ К; г-е — силицид получен конденсацией $n = 10-12$ при $T = 1620$ К: г — исходная поверхность, д — $T = 1000$ К, $F = 0.3$ В/Å, е — $T = 1320$ К, $F = 0.36$ В/Å и последующий прогрев при $T = 1400$ К.

ся уже при покрытиях $n > 0.2$ монослоя, мы и в этом случае, по-видимому, имеем дело с перестройкой либо бедного кремнием силицида типа Ir_3Si-Ir_5Si , либо сильно разбавленного твердого раствора Ir-Si.

Иной характер термополевых формоизменений происходит в случае конденсации $n = 10-12$ моноатомных слоев при $T = 1400$ К. В этом случае образуется объемный силицид Ir, а на поверхности наблюдается характерная картина поверхностного силицида типа изображенного на рис. 1, в. В поле $F = 0.3-0.5$ В/Å перестройка начинается при еще более высоких T , чем в монослойных покрытиях Si. Начальные стадии перестройки наблюдаются лишь при $T \geq 1400$ К (рис. 2, а). В общем, процесс формоизменения носит тот же характер, что и в случае монослойного покрытия Si, лишь при более высоких T обработки макрорасты вы-

растают на более рыхлых гранях $\{110\}$ и $\{012\}$. Однако имеются и весьма интересные отличия. В случае прогрева при $T = 1500-1700$ К и $F = 0.3$ В/Å образуются микровыступы, сильно понижающие напряжение, необходимое для получения одного и того же значения эмиссионного тока. Легкий прогрев острия при $T = 1300-1800$ К показывает, что выступы вырастают на гранях $\{113\}-\{112\}$ относительно слабо перестроенного острия. Рис. 2, б и в показывает наличие такого выступа после термополевой обработки при $T = 1600$ К и $F = 0.3$ В/Å и сглаживания без поля при $T = 1350$ К и $T = 1500$ К. Одиночные микровыступы никогда не образуются на гранях $\{113\}-\{112\}$ при прогреве ни чистого Ir, ни покрытого монослоем Si. Таким образом, скорее всего и в этом случае происходит реконструкция областей $\{113\}-\{112\}$, которая делает возможным рост одиночного микровыступа из силицида Ir. По-видимому, и в случае системы Si-Ir наблюдается полевая реконструкция, однако она наблюдается при перестройке объемного силицида и на рыхлых гранях.

На рис. 2, г, е показано термополевое воздействие на Ir-острие, на которое были сконденсированы те же $n = 10-12$ монослоев Si, но при $T = 1620$ К. В этом случае вследствие более интенсивной объемной диффузии Si получился более разбавленный раствор с меньшей концентрацией атомов Si. На рис. 1, г показано исходное состояние поверхности, характеризующееся очень развитыми гранями $\{013\}$, $\{012\}$, $\{011\}$, $\{113\}$, $\{111\}$. Характерно, что в этом случае перестройка наблюдается уже при $T \geq 1000$ К (рис. 2, д), а макроросты образуются при $F = 0.3-0.4$ В/Å и $T = 1320-1400$ К (рис. 2, е). Следовательно, понижение концентрации атомов Si с образованием либо более бедных по составу силицидов, либо твердых растворов Si в Ir приводит к ситуации, более характерной для чистого Ir, чем для силицида с большим содержанием Si.

Следует отметить, что Si с трудом удаляется из объема Ir: даже длительный прогрев при $T = 2300$ К не приводит к полной очистке Ir-острия ни вследствие испарения, ни вследствие разбавления раствора за счет объемной диффузии Si (несмотря на то что атомы Si очень легко диффундируют в объем Ir с поверхности при весьма низких T). Объясняется это, по-видимому, следующим обстоятельством. Для случая слабо разбавленных твердых растворов энергия сублимации растворенных атомов λ согласно [11]

$$\lambda = \lambda_0 + H_{\text{раств}},$$

где λ_0 — энергия сублимации чистого растворенного компонента, а $H_{\text{раств}}$ — теплота растворения. Для Si величина

$\lambda_0 = 4.67-4.90$ эВ по разным данным [12,13], теплота растворения $H_{\text{раств}} \text{ Si}$ в Iг неизвестна. Однако ее можно определить на основании данных работы [7], где было показано, что при десорбции Si из Iг величина λ нарастала от $\lambda=5.0$ эВ на начальном этапе десорбции до $\lambda=6.6$ эВ на ее завершающем этапе, когда наверняка реализовывался случай разбавленного раствора. Следовательно, $H_{\text{раств}} = 1.7-1.9$ эВ. Подобная высокая величина не является удивительной, для системы Si-Fe была определена $H_{\text{раств}} = 1.26$ эВ [11]. Учитывая тот факт, что для чистого Iг $\lambda_0 = 6.5-6.9$ эВ [12,13], в случае системы Si-Iг мы имеем пример практически конгруэнтного сплава, когда состав пара соответствует составу твердого тела и атомы Si испаряются вместе с атомами Iг примерно с одинаковой скоростью. Поэтому длительные эксперименты с конденсацией достаточно большого количества Si приводят в конце концов к накоплению Si в объеме Iг , что проявляется, в частности, в том, что наросты силицида начинают образовываться тем легче (при меньших n и T), чем больше проведено экспериментов с конденсацией Si .

Взаимодействие Si с Iг отличается от взаимодействия с W еще и тем, что в случае W наличие в объеме атомов Si приводит к разрыхлению решетки и ослаблению связей между атомами, тогда как в случае системы Si-Iг межатомные связи усиливаются. Если для W растворенные атомы Si вызывают заметное понижение T (от 2000 до 1560 К при том же F), необходимой для роста термополевых макронаростов [8], то для системы Si-Iг наблюдается заметный рост T (от 920 до 1500 К), при которых происходит перестройка поверхности острия.

Работа выполнена в рамках проекта № 94-02-06053 РФФИ.

Список литературы

- [1] Butenko V.G., Vlasov Yu.A., Golubev O.L. et al. // Surf. Sci. 1992. V. 266. P. 165-169.
- [2] Голубев О.Л., Конторович Е.Л., Шредник В.Н. // ЖТФ. 1996. Т. 66 (3). С. 88-96.
- [3] Sousa Prise J., Ali P., Growder B. et al. // Appl. Phys. Lett. 1979. V. 35 (2). P. 202-204.
- [4] Ohdmorai I., Kuan T.S., Tu K.N. // Journ. Appl. Phys. 1979. V. 50. N 11. P. 7020-7029.
- [5] Liu H.F., Liu H.M., Tsong T.T. // Surf. Sci. 1986. V. 171. N 3. P. 501-514.
- [6] Агеев В.Н., Потехина Н.Д., Соловьев С.М. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1988. № 2. С. 47-54.
- [7] Галль Н.Р., Рутыков Е.В., Тонтегоде А.Я. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1988. № 10. С. 47-53.
- [8] Butenko V.G., Golubev O.L., Shrednik V.N. // 38th Int. Field Emission Symp. Program and Abstracts. Vienna, 1991. P. 1-3b.

- [9] *Liu H.F., Liu H.N., Tsong T.T.* // *Appl. Phys. Lett.* 1985. V. 47. P. 524-526.
- [10] *Бутенко В.Г., Голубев О.Л., Конторович Е.Л.* и др. // *Письма в ЖТФ.* 1992. Т. 18. В. 8. С. 86-91.
- [11] *Brandon D.G.* // *Surf. Sci.* 1966. V. 5. P. 137-148.
- [12] *Мюллер Э., Цомь Т.* *Автоионная микроскопия.* М.: *Металлургия.* 1972. С. 360.
- [13] *Миллер М., Смит Т.* // *Зондовый анализ в автоионной микроскопии.* М.: *Мир,* 1993. С. 304.

Поступило в Редакцию
18 марта 1996 г.
