

05;11;12

## Структура и состав термополевых микровыступов из силицидов вольфрама

© М.В. Логинов, В.Н. Шредник

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Поступило в Редакцию 26 февраля 1996 г.)

Термополевые микровыступы, выращенные при нагреве в электрическом поле на поверхности вольфрамового острия с напыленным на него кремнием, исследовались с помощью комплекса полевых эмиссионных методов: полевой электронной, ионной десорбционной микроскопии и атомного зонда. При толщине слоя Si не менее нескольких моноатомных слоев наблюдавшиеся в полевом десорбционном режиме микровыступы вырастали в результате прогрета острия до температур  $T = 1100\text{--}1200$  К в присутствии начального электрического поля напряженностью  $F = 5.7\text{--}8.6 \cdot 10^7$  В/см. Испаряющее поле составляло  $1.2\text{--}1.8 \cdot 10^8$  В/см. Множество движущихся пятен — микровыступов образовывало кольца, которые схлопывались, демонстрируя растворение термополевых наростов на развитых гранях. Наибольший интерес представляли острые микровыступы, выраставшие при определенных условиях на центральной грани  $\{110\}$  вольфрама. Их состав анализировался с помощью атомного зонда. При этом выяснилось, что они состоят из трисицида вольфрама  $WSi_3$  с моноатомной поверхностной коркой, близкой по составу к  $WSi_2$ . Интенсивный рост таких образований на исходно гладкой плотноупакованной грани  $\{110\}$  вольфрама свидетельствовал о ее реконструкции под влиянием сильного поля и взаимодействия с кремнием.

### Введение

Термополевые микровыступы образуются на поверхности проводящих кристаллов при нагреве их в присутствии сильного электрического поля  $F$ , достаточного для перекомпенсации растягивающими кристалл пондеромоторными силами поля сжимающих (и, таким образом, сглаживающих поверхность) сил поверхностного натяжения. Температура поверхности должна быть при этом достаточно высокой, чтобы обеспечить активную поверхностную диффузию атомов, ответственную за кинетику кристаллического роста. Подробные данные о таких микровыступах, растущих на металлических остриях, проанализированы и резюмированы в [1,2]. Обычно микровыступы охотно вырастают в области вершины (реже ребер) кристалла, ограниченного в процессе так называемой перестройки в поле, которая предшествует росту микровыступов. В случае чистых металлов не удавалось вырастить термополевые микровыступы на наиболее плотно упакованных гранях, по-видимому, вследствие трудностей зарождения элементов нового слоя на таких, как правило, идеально гладких гранях.

Однако при наличии определенных примесей на поверхности гладкой грани термополевые микровыступы могут вырасти даже в центре грани. Так, в работах [3,4] описаны случаи, когда на грани  $\{110\}$  вольфрама при осаждении на ней кремния (в количестве не менее моноатомного слоя) типичные термополевые микровыступы вырастали воспроизводимым образом. В опытах [3,4] судить о химическом составе микровыступов можно было лишь на основе косвенных данных (величина десорбирующего поля, сглаживающей температуры и т. п.). Уточнение вопроса о локализации микровыступов именно на плотноупакованной грани  $\{110\}$  важно, поскольку

это связано с представлениями о реконструкции этой грани под влиянием адсорбата и сильного электрического поля [4]. Сами по себе одиночные микровыступы на центральной грани на вершине острия — интересный объект с точки зрения создания полевых эмиссионных источников электронов и ионов, обладающих высокой степенью "точности". В связи с этим проблемы их воспроизводимого выращивания, стабильности эмиссионных свойств, особенностей полевого испарения (определяющего, в частности, ионную эмиссию) приобретают дополнительную значимость.

В задачи этой работы входило изучить состав термополевых микровыступов, вырастающих при определенных условиях на центральной грани  $(110)W$  после осаждения на ней кремния, уточнить условия их выращивания, определить особенности и характеристики их полевого испарения (как низкотемпературного, так и высокотемпературного). Забегая вперед, отметим, что в итоге выяснилось, что такие микровыступы состоят из силицидов вольфрама различного состава. Если низкотемпературное поленое испарение подобных микровыступов изучалось в принципе в [3,4], то высокотемпературное поленое испарение флуктуирующих и самоподдерживающихся микровыступов, описанное до сих пор лишь для некоторых чистых металлов [5–7], для химического соединения исследовалось впервые. Точно также и анализ состава микровыступа в атомном зонде, что составляло особую методическую задачу, предпринят впервые.

### Техника эксперимента

В работе использовался времяпролетный атомный зонд, описанный в [8]. Как указывалось в этой работе, при этом была возможность наблюдать эмиссионные

изображения острия с помощью усилителя яркости изображения, состоящего из двух микроканальных пластин (МКП) и люминесцентного экрана. Источник паров кремния в виде накаливаемого пропускаемым через него током стерженька был вмонтирован в камеру атомного зонда сбоку от острия. Давление остаточных газов во время экспериментов составляло  $3-4 \cdot 10^{-9}$  Тор. Вольфрамовые острия были ориентированы по оси  $\langle 110 \rangle$ .

Опыты, связанные с получением масс-спектров полевого испарения в атомном зонде при необходимости выращивания термополевых микровыступов, затрудняются противоречивыми требованиями. С одной стороны, острие должно сильно и долго прогреваться до начала экспериментов для очистки от примесей. При этом острие затупляется особенно быстро, если имеется заметная концентрация Si в объеме W. С другой стороны, образец должен быть максимально острым, чтобы избежать неприемлемо высоких испаряющих напряжений, как постоянных — базовых, так и импульсных. Ситуация лишь отчасти облегчается тем, что выращенный микровыступ усиливает локальную напряженность поля в 1.5–3.0 раза по сравнению с исходной поверхностью. Полевое испарение, особенно при низкой температуре, требует весьма высоких полей как для чистого вольфрама, так и для силицидов или кремния.

Для того чтобы сохранить острие достаточно тонким, избегают сильных прогревов (мы не поднимались по температуре выше 1800 К) и проводят их в присутствии умеренно сильного электрического поля (при подаче напряжения положительного знака на острие). Напыленный на боковую поверхность острия кремний трудно удалить при этом полностью, и он накапливается в области кончика острия. Это затрудняло априорную калибровку количества Si. Однако затем о его количестве можно было легко судить по масс-спектрам.

Несмотря на хороший вакуум, прогретое в камере острие нередко содержало на поверхности некоторое количество углерода. Это следовало из характерного изображения ребристого кристалла W, типичного для твердого раствора C в W в докарбидных концентрациях [9,10]. Попытки удаления углерода отжигом в кислороде при давлении кислорода порядка  $1 \cdot 10^{-6}$  Тор и температурах 1700–1800 К приводили к временной очистке, однако острие при этом затуплялось, а затем после очередных прогревов снова проявляло признаки углеродного загрязнения. Однако из литературы [11] известно, что даже моноатомный слой C на поверхности W после напыления Si вытесняется кремнием в объем подложки и далее не оказывает заметного влияния на происходящие поверхностные процессы. Поэтому мы использовали поверхность со следами углерода как исходную. Спектры полевого испарения с подобных поверхностей иногда обнаруживали признаки углеродного загрязнения. Предварительные опыты по изучению поверхности ребристого кристалла W в атомном зонде выявили в спектрах полевого испарения главным образом ионы вольфрама.

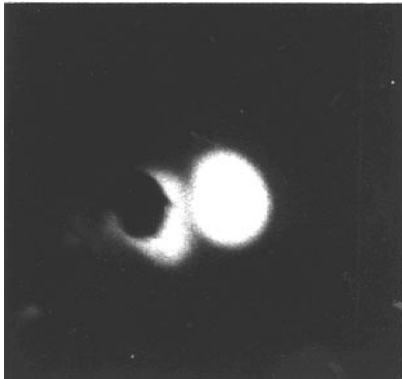
Температура острия  $T$  определялась с помощью оптического пирометра Piro. Нагрев острия, осуществляемый пропусканием тока через дужку, к которой оно было приварено, мог производиться и при подаче на острие высоких напряжений  $V$  любой полярности. В качестве низкой температуры в данной работе имеется ввиду комнатная температура (300 К). Использование комнатной, а не криогенной температуры упрощало проведение экспериментов, в то же время при 300 К миграция атомов W и Si достаточно надежно заморожена.

### Высокотемпературное полевое испарение с W, содержащего на поверхности напыленный кремний

При малых концентрациях напыленного на вольфрамовое острие при комнатной температуре кремния, соответствующих доле моноатомного слоя, выращивание микровыступов требовало условий  $(T, V)$ , близких к таковым для чистого W [5]. Заметные изменения в сторону понижения как  $T$ , так и  $V$  проявлялись лишь при больших (несколько монослоев) количествах напыленного кремния. В таких случаях после экспозиции острия при температуре 1100–1200 К и при напряжениях, в 2.5–4 раза превышающих по абсолютной величине  $V$  наблюдения исходного электронного эмиссионного изображения (т.е. при  $F = 5.7-8.6 \cdot 10^7$  В/см у исходной поверхности) и имеющих противоположный знак, вырастали микровыступы, наблюдавшиеся (in situ) по ионному десорбционному изображению. Эффективное испаряющее (а не выращивающее) поле над ними составляло по оценкам  $1.2-1.8 \cdot 10^8$  В/см, что (по крайней мере в нижних пределах) заметно ниже необходимых величин для W.

Изображение этих блуждающих и флуктуирующих микровыступов даже при огромном (порядка  $10^6$ ) коэффициенте усиления МКП было довольно тусклым. Возникали они по всему видимому полю. Множество пятен — микровыступов собирались в кольца вокруг плоских граней, и эти кольца схлопывались (при  $T = 1100-1200$  К) подобно тому, как это описано для случая Ir [6] и Pt [7]. В этом режиме и при этих концентрациях Si на поверхности особой локализации микровыступов на грани  $\{110\}$  не наблюдалось. Для чистого вольфрама схлопывание колец при горячем полевого испарении зарегистрировано не было. Возможно оно требует для W более высоких температур, так как связано с ростом так называемых "макронаростов" [1,6]. Состав микровыступов на поверхности W, покрытой пленкой Si, существующих на поверхности в условиях высокотемпературного полевого испарения определить не удалось. Контраст скорости испарения при базовом напряжении и на вершине испаряющего импульса оказался слишком малым и зарегистрированный спектр состоял из хаотических импульсов, отражающих шумовой процесс.

Наблюдение in situ десорбционных ионных изображений позволило управлять процессом выращивания ми-



**Рис. 1.** Автоэлектронное изображение двух термополевых микровыступов из силицида вольфрама.  $V_e = 2$  кВ. Один из микровыступов наведен на диафрагму атомного зонда.

кровоыступов в области грани  $\{110\}$  на вершине острия. Однако это стало возможным лишь после напыления большого количества Si (по-видимому, не менее десяти монослоев) на поверхность W, практически очищенную от предыдущих порций Si. При выращивании вышеупомянутых микровыступов на острие подавалось напряжение, в 2.8–3.3 раза большее, чем необходимое для наблюдения электронных эмиссионных изображений (и, естественно, противоположного знака), а температура повышалась до 1000 К и выше до наблюдения ожидаемых десорбционных ионных картин. В диапазоне  $T = 1100$ – $1200$  К на фоне тусклых, мерцающих в разных местах пятен (поточков ионов) неожиданно и резко возникало крайне яркое пятно в центре экрана, на грани  $\{110\}$ . Такое пятно имело тенденцию к усилению яркости и его наблюдаемого размера, при этом оно было нестабильно и могло исчезнуть также резко, как и возникло. Повышение напряжения могло породить новые яркие пятна рядом с прежним, а понижение нередко приводило к резкому исчезновению пятна. Сохранить эти сильно эмиттирующие микровыступы (иногда их было 2 или 3) удавалось лишь резким снижением температуры при сохранении приложенного напряжения, которое убиралось лишь после значительного остывания острия (почти до комнатной температуры). В этих случаях при подаче на острие отрицательного напряжения можно было визуализировать 1 или 2, реже 3 микровыступа в области оси острия (т.е. на грани  $\{110\}$ ). Они наблюдались как круглые яркие пятна автоэлектронной эмиссии при напряжениях от 1.4 до 2.0 кВ (чаще всего при 1.8 кВ). Нередко без дополнительной юстировки они попадали на зондирующее отверстие, которое в таких опытах было совмещено с осью острия.

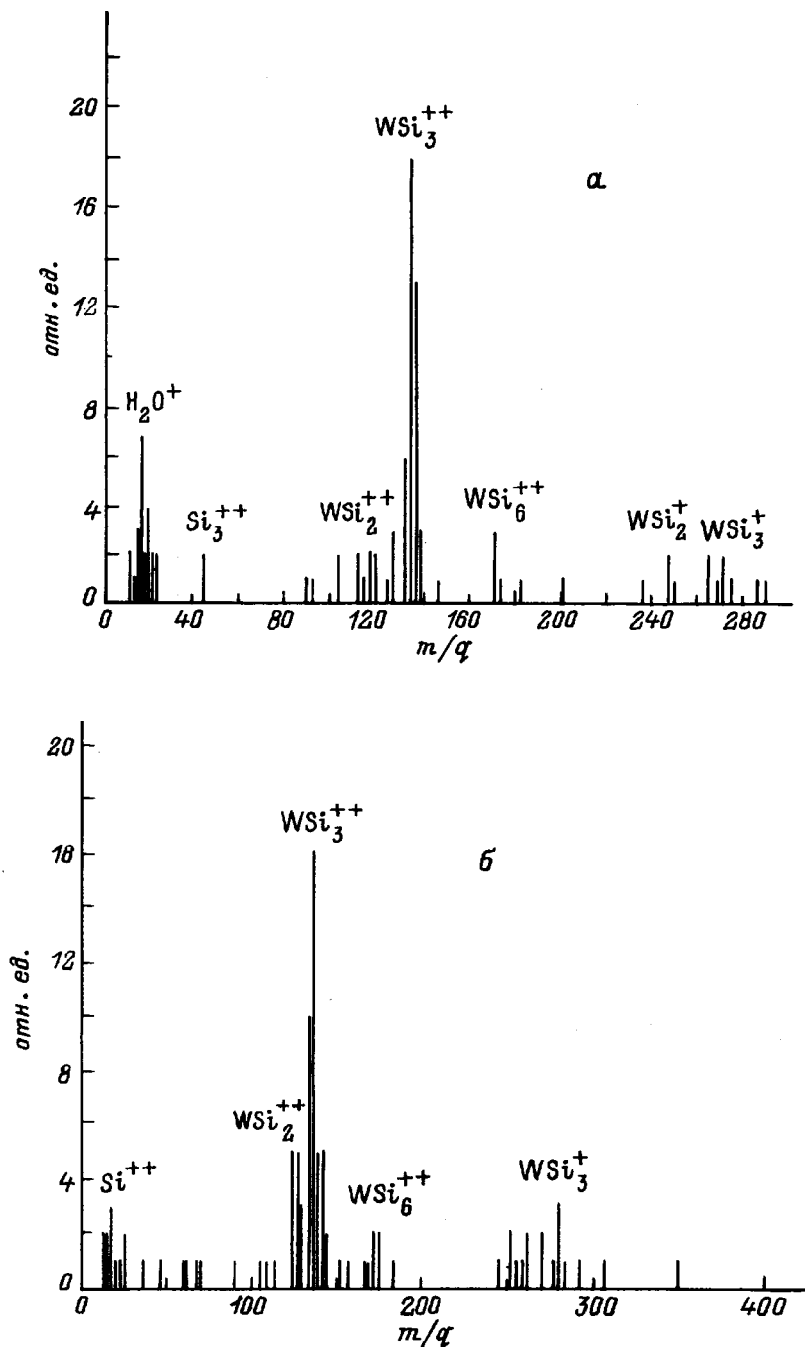
Именно при испарении таких микровыступов, выращивавшихся многократно и воспроизводимо, были получены масс-спектры, которые будут обсуждаться в следующем разделе. На рис. 1 показан пример автоэлектронного изображения таких микровыступов. Отметим, что спонтанное возникновение острых микровыступов имело место лишь на вершинной грани  $\{110\}$ , их не

было на боковых гранях этого типа, где поле было значительно ниже. И по характеру появления, и по внешнему виду в электронном режиме, равно как и по относительным эмиссионным параметрам эти выступы аналогичны описанным в [3,4]. Для их роста на грани  $\{110\}$  необходимо зарождение нового слоя в плоской части грани, следовательно, грань не могла оставаться гладкой, она должна была при этом реконструироваться. Резкий пороговый характер роста микровыступов при нарастании поля указывает на его влияние на эту реконструкцию.

## Масс-спектры полевого испарения и состав микровыступов

На рис. 2, *a* и *б* приведены масс-спектры полевого испарения микровыступов, полученные при низкой (комнатной) температуре и одинаковом базовом (18 кВ) и импульсном (4.8 кВ) напряжении (для наблюдения автоэлектронного изображения требовалось напряжение 1.8–2.0 кВ). Спектр рис. 2, *a* был получен сразу же после выращивания микровыступа, а рис. 2, *б* — на следующий день через 15 ч после выращивания (все это время острие находилось в атмосфере остаточных газов при давлении порядка  $10^{-5}$  Тор при комнатной температуре, спектры регистрировались в вакууме  $5 \cdot 10^{-9}$  Тор). Как видно, состав спектров практически не различается. Удивительно, что и автоэмиссионные характеристики микровыступа не претерпевали никаких изменений после 15-часовой экспозиции в плохом вакууме. Микровыступ проявил удивительную (и нетипичную, например, для вольфрама) коррозионную устойчивость и адсорбционную пассивность.

Доминирующий пик в спектрах рис. 2 отвечает массовому числу 134, что соответствует силициду состава  $WSi_3$  (в виде иона  $WSi_3^{++}$ ). Этот пик был преобладающим и в других спектрах для других микровыступов, выращенных на грани  $\{110\}$  W и зарегистрированных при других параметрах испаряющих напряжений. Далее, в спектрах рис. 2 (и в других аналогичных) всегда присутствовал меньший по величине, но заметный пик, отвечающий массовому числу 120, что соответствует иону  $WSi_2^{++}$ . Как правило, выделялась группа малых по амплитуде (на уровне шумов) пиков в области массового числа 268, соответствующего иону  $WSi_3^+$ . Пики в области легких масс (30–45), ярче выраженные в случае рис. 2, *a*, кроме ионов  $Si^+$ ,  $Si_3^{++}$ ,  $H_2O^+$  могли содержать следы углеродных примесей  $C^+$ ,  $C_2^+$ ,  $C_3^+$ ,  $SiC^{++}$ . На уровне шумов в спектрах встречались импульсы, соответствующие и более тяжелым ионам, таким как, например,  $(WSi_3)_2^+$  и другим кластерным ионам, вплоть до  $(WSi_2)_5^+$  и  $(WSi_3)_5^+$ , а также  $(W_nSi_m)^+$ , где  $n$  варьируется от 1 до 5, а  $m > n$  в 2–3 раза. Таким образом, состав спектров полевого испарения термополевых микровыступов соответствовал в основном ионам  $WSi_3$  — 56 ионов из 117 зарегистрированных в спектре рис. 2, *a*, затем  $WSi_2$  — 12 ионов (в спектре рис. 2, *a* ионы

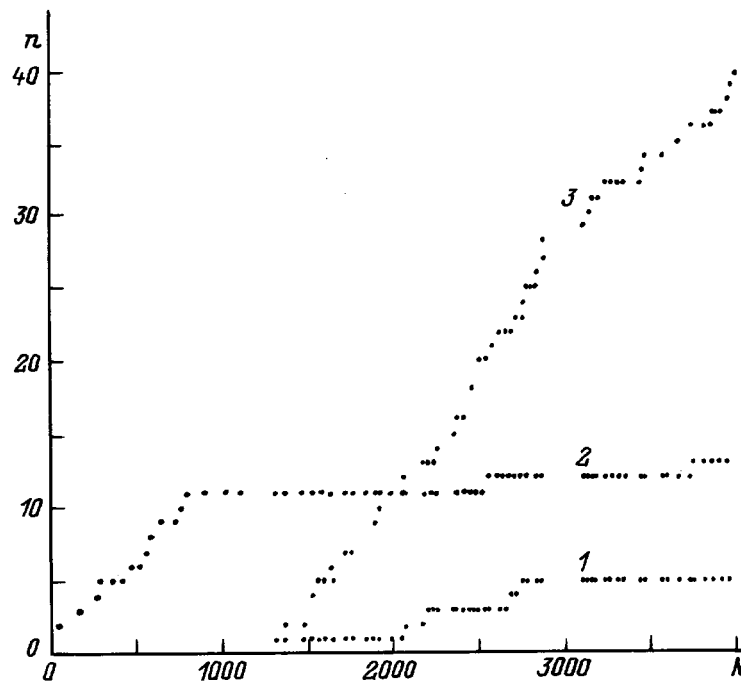


**Рис. 2.** Спектры полевого испарения с термополевых микровыступов, выросших на  $\{110\}W$ . *а* — спектр получен сразу же после выращивания микровыступа, *б* — спектр получен после 15 ч экспозиции поверхности микровыступа в остаточных газах при давлении  $10^{-5}$  Тор.

преимущественно двухзарядные и в меньшей степени одно- и трехзарядные).

Ионы дисилицида и трисилицида вольфрама, как показывает анализ накопления зарегистрированных ионов в спектре рис. 2, *а* (рис. 3), испаряются во времени неоднородно. Сначала регистрируется испарение ионов  $WSi_2$ , а затем  $WSi_3$ . Такая динамика процесса, видимо, отражает пространственную локализацию соответствующих соединений в микровыступах. Наверху микровы-

ступа расположен слой ди-, а под ним трисилицида вольфрама. Графики накопления всех зарегистрированных ионов (рис. 4) демонстрируют волнистую структуру с заметными паузами между группами приходящих ионов, часто с увеличением скорости накопления перед паузой. Такая структура кривой накопления может объясняться послойным характером испарения микровыступа. Моноатомные слои, испаряясь в периферии, сходятся кольцами к оси микровыступа, при "схлопывании" тако-



**Рис. 3.** Кривые накопления числа зарегистрированных ионов  $n$  в зависимости от числа прошедших импульсов напряжения  $N$  для трех пиков спектра рис. 2, а. 1 —  $WSi_3^+$ , 2 —  $WSi_2^{++}$ , 3 —  $WSi_3^{++}$ .

го кольца скорость испарения может возрастать, после чего возникает некоторое торможение процесса. Сопоставление графиков  $n(N)$  (рис. 3 и 4, а) показывает, что ионы  $WSi_2^{++}$  сосредоточены главным образом в первой волне, т. е. в первом анализируемом моноатомном слое. Регистрация же ионов  $WSi_3^{++}$  и  $WSi_3^+$  соответствует испарению следующих слоев.

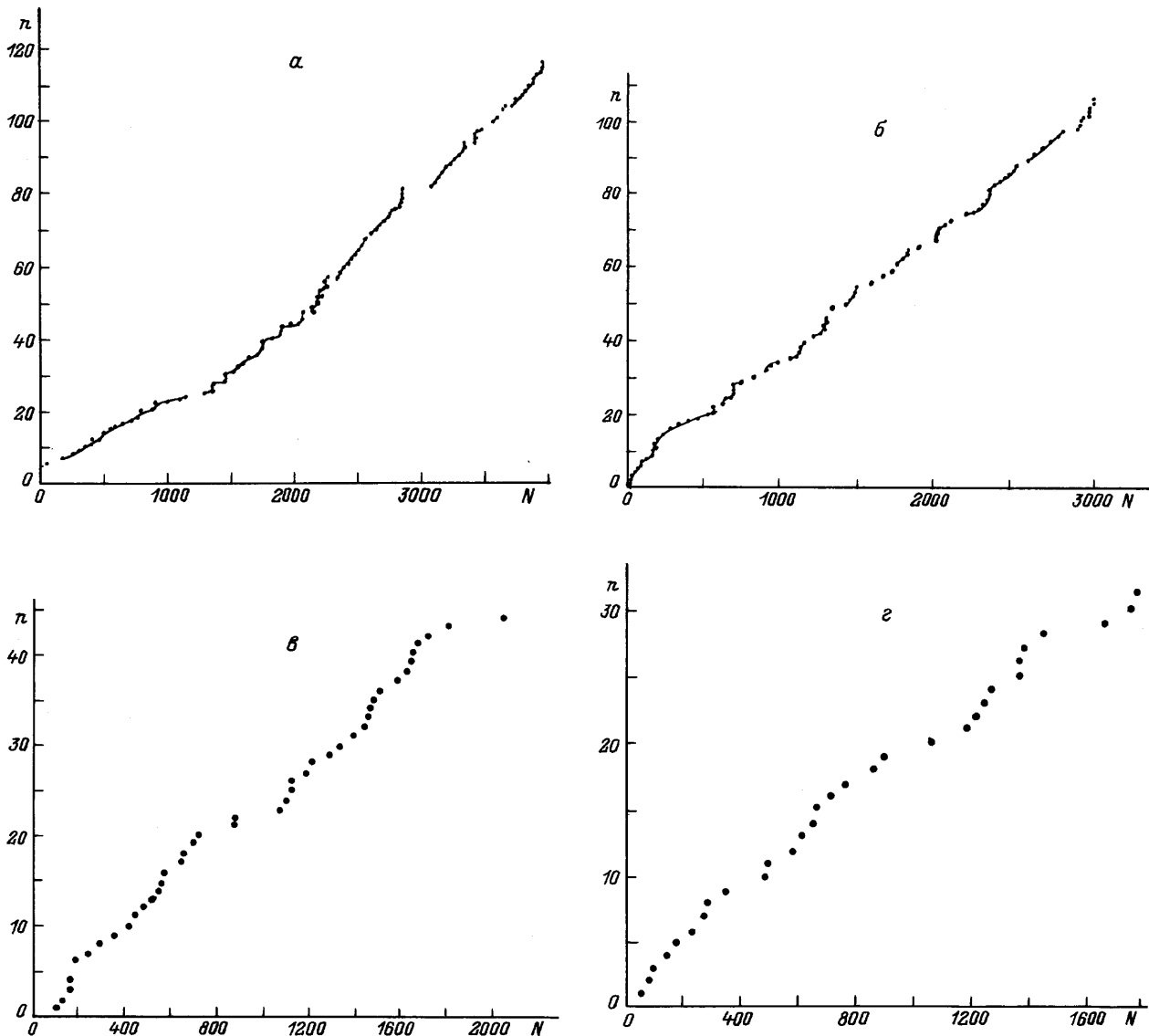
Испарение микровыступа при достаточно высоком базовом напряжении может происходить и в отсутствие импульсного напряжения. Испаряющие же импульсы в этом случае выбирают ионы из тех же крайних ступеней моноатомных слоев, движущихся в зоне зондирующего отверстия. Из этого следует, что спектр полевого испарения, полученный при высоком базовом напряжении, может не отражать испарение самых первых порций ионов с поверхности микровыступа, а соответствует испарению более глубоко лежащих моноатомных слоев.

Чтобы определить необходимые условия для регистрации ионов, испаряющихся с самой вершины острия, были проведены контрольные опыты по определению ее устойчивости к испаряющему полю. Для этого свежеращенный микровыступ подвергался воздействию постоянного испаряющего поля некоторого фиксированное время и затем контролировалось напряжение наблюдения автоэлектронного изображения  $V_e$ . В табл. 1 представлены результаты такого наблюдения. Из таблицы следует, что при приложении к острию высокого базового напряжения (более  $3-3.5 V_e$ ) можно почти сразу же испарить самую вершину микровыступа, составляющую, возможно, лишь несколько атомов.

Для оценки действовавшей величины напряженности  $F$  электрического поля допустим, что яркие пятна, наблюдаемые в автоэлектронном режиме в случае острых микровыступов (с радиусом закругления  $r = 30-50 \text{ \AA}$ ), соответствуют плотности автоэлектронного тока на уровне  $1 \text{ \AA}/\text{см}$ . Выбирая по таблицам Долана [12] напряженность поля  $F$ , соответствующую такой плотности тока и работе выхода  $\varphi = 4.65 \text{ эВ}$ , близкую к ожидаемой работе выхода силицидов [13], получим  $F = 2.7 \cdot 10^7 \text{ В/см}$  и при  $V = 2.2 \text{ кВ}$  вычислим полевой множитель  $\alpha = F/V$  для микровыступа ( $\alpha = 1.23 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ ). Первые признаки затупления микровыступа наблюдались при  $F$  в пределах  $7.4 \cdot 10^7 > F > 6 \cdot 10^7 \text{ В/см}$  (между 5 и 6 кВ). И далее поле  $F = 0.8-1.0 \cdot 10^8 \text{ В/см}$  систематически продолжало затуплять микровыступ.

**Таблица 1.** Затупление микровыступа из силицида вольфрама за счет полевого испарения его вершины при подаче на него положительного напряжения  $V_+$ . Затупление выражается в повышении напряжения  $V_e$

$V_+$ , кВ	$V_e$ , кВ
4	2.2
5	2.2
6	2.3
7	2.6
8	2.9
10	3.4
11	3.6



**Рис. 4.** Кривые накопления числа всех зарегистрированных ионов  $n$  в зависимости от числа прошедших импульсов напряжения  $N$  для четырех спектров полевого испарения силицидов вольфрама при комнатной температуре.  $a$  — случай спектра 2,  $a$ ;  $б$  — случай спектра 2,  $б$ .  $V_6 + V_{II}$ , кВ:  $a$ – $в$  — 18 + 4.8,  $г$  — 14 + 4.8;  $n_0/N_0$ :  $a$  — 106/4000,  $б$  — 105/3060,  $в$  — 44/2108,  $г$  — 33/1788 (индекс 0 — полное число ионов и импульсов).

Мы предприняли достаточно "осторожный" метод анализа микровыступа, чтобы собрать ионы с самой его вершины. На острие со свежеразращенным микровыступом с исходным  $V_e = 2-2.2$  кВ подавалось (при нулевом постоянном напряжении) импульсное напряжение амплитудой 4 кВ, что было явно недостаточно для испарения даже одного атома с вершины. Затем базовое напряжение медленно повышалось до появления первых зарегистрированных ионов. Они появились при  $V_6 = 4$  кВ (т.е. при 8 кВ суммарного напряжения или в поле  $F = 1.04 \cdot 10^8$  В/см). После этого первые 90 импульсов породили 10 зарегистрированных ионов, а затем достаточно долгое ожидание не добавило ни одного. Зарегистрированные ионы поступали в порядке, указанном в табл. 2. Есть основания полагать, что в этом

опыте были зарегистрированы все ионы, испарившиеся с вершины микровыступа. При суммарном составе, отвечающем дисилициду  $WSi_2$  (12 атомов W и 24 атома Si), мы получили большое разнообразие ионов. Из этого следует атомная неупорядоченность вершины микровыступа, что может быть следствием продолжавшегося полевого испарения при высокой температуре в процессе "заковки". В дальнейшем подъем  $V_6$  не обнаружил (даже при повышении до 4.8 кВ  $V_{II}$ ) заметной скорости регистрации ионов вплоть до величины  $V_6 = 14$  кВ (точнее, при плавном повышении  $V_6$  через 1 кВ и некотором ожидании было зарегистрировано еще 4 иона: 2  $WSi^{++}$ , 1  $WSi^+$  при 7 + 4.8 кВ и ион  $WSi_3^{++}$  при 10 + 4.8 кВ).

При  $V_6 + V_{II} = 14 + 4.8$  кВ был получен спектр из 33 ионов (при соотношении числа всех испаряющихся

**Таблица 2.** Ионы, испаренные полем с вершины силицидного микровыступа при  $V_0 + V_n = 4 + 4$  кВ

Номер импульса	Массовые числа $m/q$ зарегистрированных ионов	Предполагаемые ионы	Расчетные $m/q$
12	145	$WSi_4^{++}$	148
21	307	$WSi_4^+$	296
23	217	$WSi^+$	212
40	424 и 478	$(WSi)_2^+$ , $(WSi_2)_2^+$	424, 480
50	170 и 199	$(WSi_6)^{++}$ , $(W_2Si)^{++}$	176, 198
66	65 и 76	$W^{+++}$ , $(WSi_2)^{+++}$	61.3, 80
84	6	$C^{++}$	6

импульсов к числу результативных = 54). Он выявил 25 ионов, отвечающих составу  $WSi_3$  и только 5 ионов  $WSi_2$ . Однако на этот раз спектр был не полным, а выборочным, так как три волны на зависимости  $n(N)$  (рис. 4, з) демонстрировали испарение моноатомного слоя при приложенном базовом напряжении за время регистрации 10 ионов. Верхняя граница для  $F$  при  $V_0$  и  $V_0 + V_n$  соответствовала  $1.82 \cdot 10^8$  и  $2.44 \cdot 10^8$  В/см (если принять  $\alpha$  неизменным после испарения 14 ионов с вершины). Реальные поля, конечно, были меньше, тем не менее они обеспечили скорость испарения при базовом напряжении (оценка) 0.2 иона/с и в импульсе  $2 \cdot 10^6$  ионов/с. Полученные результаты подтвердили, что лишь верхний слой микровыступа отвечает составу  $WSi_2$ , а последующие слои состоят из трисилицида вольфрама.

## Обсуждение результатов

Таким образом, в итоге анализа показано, что на грани  $\{110\}W$  при высоких концентрациях напыленного кремния и при прогреве в электрическом поле до температур  $T$ , низких для диффузии и термополевых перестроек чистого W (1000–1200 К), вырастают острые силицидные микровыступы с составом, близким к  $WSi_2$  в верхнем слое и к  $WSi_3$  в теле микровыступа. При относительно низких температурах грань  $\{110\}W$  способствует зарождению и росту микровыступов, в построении которых участвует от 1/3 до 1/4 атомов W. При таких обстоятельствах исходная грань W не может оставаться невозмущенной. Кроме реконструкции, способствующей кристаллическому росту, она поставляет и необходимый для образования силицидов W. Этот процесс кристаллического роста и химического взаимодействия жестко контролируется напряженностью электрического поля.

Пропитанная кремнием силицидная корка W при высокотемпературном полевом испарении проявляет механизм схлопывания колец, несвойственный при этих (относительно низких) температурах чистому вольфраму. На этой основе можно создать точечный и управляемый источник силицидных ионов, с помощью которого удалось бы программированно осаждать силицид вольфрама на подложку в масштабе десятков и сотен Å.

В работе впервые исследован состав термополевых микровыступов из проводящего химически неоднород-

ного вещества. Характерно, что при низких температурах автоматически устанавливается соотношение скоростей испарения при стационарном базовом напряжении и суммарном с импульсным с контрастом выше  $10^6$ , что позволяет получать корректные, легко расширяемые спектры, отражающие состав микровыступа. Если имеет место активное полевое испарение при установленном  $V_0$ , то микровыступ затупляется до такого состояния, пока испарение не становится приемлемо медленным. Выяснение состава микровыступа, начиная с самой вершины, требует применения особых методов, некоторые из которых описаны в предыдущем разделе.

Сам процесс термополевого выращивания силицидных микровыступов заслуживает специального анализа и дискуссии. Предварительные наблюдения показывают, что соображения о равновесных и стационарных микровыступах, развитые в [2,14] для металлов, вполне применимы к неоднородным проводящим материалам.

Работа выполнена при поддержке двух программ: РФФИ (проект № 94-02-06053) в связи с проблемой изучения реконструкции и химических превращений в сильных электрических полях, и "Физика твердотельных наноструктур" (проект № 2-002) в связи с проблемой создания точечных электронных и ионных источников для задач нанотехнологии.

## Список литературы

- [1] Шредник В.Н. // Рост кристаллов. М.: Наука, 1980. Т. 13. С. 68–79.
- [2] Власов Ю.А., Голубев О.Л., Шредник В.Н. // Рост кристаллов. М.: Наука, 1991. Т. 19. С. 5–21.
- [3] Butenko V.G., Vlasov Yu.A., Golubev O.L., Shrednik V.N. // Surf. Sci. 1992. Vol. 266. P. 165–169.
- [4] Голубев О.Л., Конторович Е.Л., Шредник В.Н. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 3. С. 88–96.
- [5] Власов Ю.А., Павлов В.Г., Шредник В.Н. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 9. С. 548–552.
- [6] Бутенко В.Г., Голубев О.Л., Конторович Е.Л., Шредник В.Н. // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18. Вып. 8. С. 86–91.
- [7] Голубев О.Л., Конторович Е.Л., Шредник В.Н. // ЖТФ. 1996. Т. 66. Вып. 3. С. 97–106.
- [8] Логинов М.В., Савельев О.Г., Шредник В.Н. // ЖТФ. 1994. Т. 64. Вып. 8. С. 123–131.

- [9] Комар А.П., Таланин Ю.Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1958. Т. 22. № 5. С. 580–593.
- [10] Голубев О.Л., Шайхин Б.М., Шредник В.Н. // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1. Вып. 15. С. 714–718.
- [11] Агеев В.Н., Афанасьева Е.Ю., Галль Н.Р. и др. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. Вып. 9. С. 565–570.
- [12] Dolan W.W. // Phys. Rev. 1953. Vol. 91. N 3. P. 510–511.
- [13] Фоменко В.О., Подчернява И.А. Эмиссионные и адсорбционные свойства материалов. Справочник. М.: Атомиздат, 1975. 320 с.
- [14] Власов Ю.А., Голубев О.Л., Шредник В.Н. // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1988. Т. 52. № 8. С. 1538–1543.