

04;05;10;12

Влияние знака заряда иона на стимуляцию плазмохимического травления кремния

© С.Н. Павлов

Научный центр "Институт ядерных исследований", НАН Украины,
03028 Киев, Украина
E-mail: interdep@kinr.kiev.ua

(Поступило в Редакцию 1 февраля 2000 г.)

Исследуется относительное влияние ионов разных знаков заряда на стимуляцию травления кремния в плазменных условиях. Радикалы фтора производятся тлеющим разрядом с градиентом давления. Пучок положительных или отрицательных ионов создается с помощью источника ионов пеннинговского типа. Поток радикалов фтора и пучок ионов совмещаются на поверхности кремния, расположенного в высоковакуумном объеме. Положительные ионы могут быть конвертированы в быстрые нейтральные атомы методом резонансной перезарядки и собственном газе. Показано, что наибольшей каталитической способностью обладают быстрые нейтральные атомы. Каталитическое влияние положительных ионов примерно в два раза ниже. Отрицательные ионы занимают промежуточное положение. Впервые обнаружено, что некоторые виды ионов (например, молекулярный кислород) не ускоряют, а замедляют процесс травления, т.е. ведут себя как ингибиторы.

Введение

Ионно-стимулированное травление кремния было открыто более 20 лет назад [1,2] и широко используется в настоящее время в микроэлектронике [3,4]. Суть этого явления заключается в следующем. Если поверхность кремния бомбардируется ионами, например аргоном с энергией 500–1000 eV, то происходит физическое распыление поверхности твердого тела. Для указанных параметров коэффициент распыления находится на уровне ~ 1 . В микроэлектронике этот процесс трактуется как ионно-лучевое травление и характеризуется скоростью $V_{ph} = dh/dt$, где h — толщина пластины. Другим крайним случаем является травление радикалами галогенов (F^* , Cl^* , Br^* , I^* ; наиболее часто используется фтор). Это гетерогенная реакция типа газ–твердое тело. Удаление кремния происходит в результате химической реакции, проходящей по обобщенной формуле $Si + 4F \rightarrow SiF_4$. Тетрафторид кремния является газом и спонтанно покидает поверхность обрабатываемого материала. В этом случае плазма является лишь средством получения радикалов фтора из молекул более стабильных исходных газов (CF_4 , SF_6 и т.д.). Процесс травления идет с некоторой скоростью V_{ch} . Эта скорость зависит от концентрации галогенов и температуры твердого тела. Теперь если поверхность кремния подвергнуть одновременному воздействию радикалов фтора и потока ионов, то травление пойдет со скоростью V_i , которая может в несколько раз превышать сумму ($V_{ph} + V_{ch}$). Процесс носит явно синергетический характер [5,6] и потому представляет общенаучный интерес. Он наблюдается не только в системе кремний–галогены, но и в целом ряде реакций газификации: углерод–кислород, вольфрам–фтор и т.д. Помня об общности результатов, мы тем не менее сосредоточимся на системе Si–F, так как она наиболее широко используется на практике и потому наиболее изучена.

При рассмотрении механизма плазмохимического травления можно выделить следующие основные стадии процесса: 1) доставка молекул рабочего газа в зону плазменного разряда, 2) превращение молекул рабочего газа в химически активные частицы (диссоциация и ионизация), 3) доставка химически активных частиц к поверхности материала подвергаемого травлению, 4) физическая и химическая адсорбции химически активных частиц на поверхности материала, 5) собственно химическая реакция, 6) десорбция продуктов реакции с поверхности материала, 7) отвод продуктов реакции из плазменной зоны и вакуумной камеры. Эта наиболее полная классификация дана согласно [4]. Пункты 1, 3, 7, хотя и имеют важное значение при проектировании плазмохимических реакторов, но непосредственно на механизме ионной стимуляции не отражаются. Пункт 2 может оказать только опосредованное влияние через химический состав реагирующей системы. Отметим по этому поводу лишь следующее. Масс-спектрометрические и оптические методы исследования показывают [7,9], что в плазме ВЧ разряда регистрируются все нейтральные фрагменты молекул исходного газа (как правило, CF_4 , SF_6), а также их положительные и отрицательные ионы. Однако более 75% диссоциирующих молекул CF_4 распадается на радикалы CF_3^* и F^* [10].

Большинство авторов при рассмотрении механизма ионного стимулирования ограничивается пунктами 4–6. Рассмотрим, к каким последствиям может привести ионная бомбардировка поверхности кремния. В пункте 4 ионы могут вызвать: а) усиление недиссоциативной хемосорбции за счет разрушения связей Si–Si в кристаллической решетке и, следовательно, образования свободных валентных связей кремния; б) диссоциацию сорбированных на поверхности сложных радикалов типа CF_3^* или SF_5^* с последующей хемосорбцией их фрагментов. В пункте 5 скорость реакции может увеличиться за

счет разрыхления поверхности, ведущей одновременно к расширению связей Si-Si и образованию в теле обрабатываемого материала каналов, по которым химические реагенты поступают в более глубокие слои. В пункте б) ионная бомбардировка может вызвать принудительную десорбцию а) промежуточных продуктов реакции (обычно называют летучее SiF₂, б) конечного продукта SiF₄, в) нелетучих продуктов.

Существуют аргументы в пользу каждого из перечисленных видов воздействия. Проблема заключается в том, что результаты каждой конкретной серии экспериментов, подтверждающая один из механизмов, как правило, отвергают другие. Например, авторы работы [5,11] приходят к выводу о главенствующей роли диссоциативной хемосорбции, считая, что разрыхление поверхности не имеет существенного значения. Этой точке зрения противоречат результаты работ [12–14]. В 1978 г. Майер показал, что ионная бомбардировка может вызывать искусственную десорбцию промежуточного компонента реакции SiF₂ [15]. Эта концепция получила значительное развитие в последние годы. Ситуацию окончательно запутывают результаты по ионно-стимулированному газовому травлению [16,17], которые показывают, что бомбардировка поверхности тяжелыми частицами может привести к полному перестроению химических связей в системе SF₆-Si.

Таким образом, до сих пор нет единого мнения о механизме ионной стимуляции плазмохимического травления кремния и проблема требует дальнейшего рассмотрения. Учитывая длительность и всесторонность уже проведенных исследований, надеяться на существенный прогресс можно лишь при использовании новых подходов к вопросу. Попытка одного из таких подходов, а также первые экспериментальные результаты приведены ниже.

Постановка задачи

Нами было обращено внимание на следующий факт. Травление кремния в галогеносодержащей плазме может ускоряться не только потоками ионов, но и электронов. Разница состоит в том, что ионное стимулирование происходит в практически любой среде, а электронное лишь в некоторых. Так, пучки электронов с плотностью 2–4 мА/см² ускоряют процесс травления в 4–6 раз при использовании CF₄ или CF₃Cl, но в плазме XeF₂ или SF₆ этот эффект не наблюдается [11,18]. Это навело на мысль о целесообразности исследования влияния знака заряда иона на стимуляцию травления кремния. Вопрос тем более интересен, что в ряде работ предлагается использовать отрицательные ионы для усовершенствования обработки полупроводников (см., например, [19]).

Наконец, если сравнивать положительные и отрицательные ионы, то логично включить в круг исследований и быстрые нейтральные атомы, которые можно интерпретировать как ионы с зарядом нуль.

В качестве прототипа была взята установка [5], искусственно моделирующая плазменные условия. В такой

системе открываются широкие экспериментальные возможности, поскольку в реальной плазме нельзя изменить один из параметров, оставив неизменными другие. Конструктивные отличия установок обсуждаются в следующем разделе.

Основными рабочими веществами служили элегаз и кислород, так как они образуют хорошо совместимую пару. Для реализации поставленной задачи необходимо иметь положительные ионы, отрицательные ионы и быстрые нейтралы одного и того же вещества с примерно одинаковой интенсивностью. Фтор для этих целей мало пригоден. Наши исследования показали, что в разряде Пеннинга, который часто используется в качестве источника ионов, интенсивность пучка отрицательных ионов фтора почти на порядок превосходит интенсивность F⁺, а учитывая неизбежные потери при перезарядке, получить быстрые нейтральные атомы в необходимом количестве не удастся. Кислород, как будет видно ниже, свободен от этих недостатков. С другой стороны, скорость травления кремния в смеси элегаза с кислородом остается неизменной в широких пределах относительной концентрации O₂, что значительно облегчает трактовку результатов. Наконец, выход атомов Si на один упавший ион значительно больше при травлении в SF₆ по сравнению с CF₄, что облегчает проведение экспериментов.

Кроме того, в качестве репера использовались пучки ионов и быстрых нейтральных атомов аргона, так как этот газ использовался в большом количестве экспериментов и его влияние хорошо изучено.

Экспериментальная установка

Как отмечалось, в качестве прототипа была взята установка [5]. Ее идея состояла в том, чтобы взять два независимых источника, один из которых производит пучок ионов, а другой — поток радикалов. Оба потока совмещаются на поверхности кремния, помещенного в высокий вакуум. В таком случае параметры системы являются независимыми и их можно изменять в широких пределах. Эксперименты проводились на установке колпачного типа, обеспечивающей давление остаточного газа $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ Па. Схема устройства приведена на рис. 1.

Нами использовался источник ионов на базе пеннинговского разряда с холодным катодом. За основу была взята конструкция, описанная в [20]. Корпус источника был загерметизирован и сообщался с высоковакуумным объемом только через отверстие диаметром 1.5 мм. Это позволяло иметь рабочее давление в источнике 2–10 Па при давлении в высоковакуумном объеме не выше 10⁻² Па. Ячейка помещалась в зазор магнитопровода собранного на постоянных магнитах. Индукция поля в центре источника составляла ~ 0.07 Т. Типичный разрядный ток составлял 100–120 мА при напряжении на разряде 600–750 В (диаметр катода 2 см, а длина анода 2.2 см). Рабочий газ — аргон, кислород. Ионы извлекались поперек магнитного поля. Напряжение на экстракторе 2.5 кВ. Пучок фокусировался одиночной линзой и затем тормозился до энергии 1 кВ.

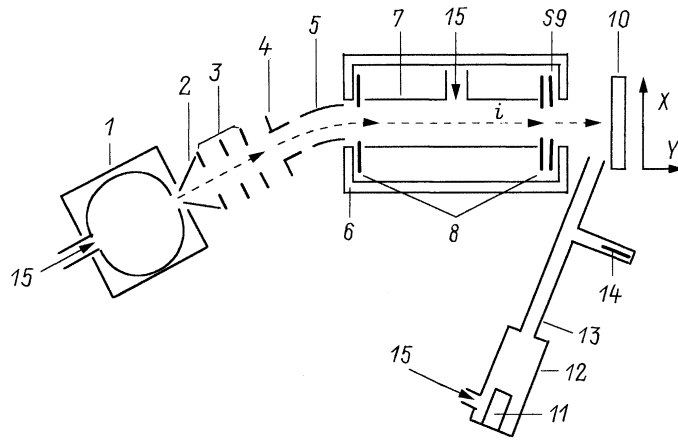


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — ионный источник, 2 — экстрактор, 3 — одиночная линза, 4 — тормозящий электрод, 5 — электростатический поворотный конденсатор, 6 и 7 — ярмо магнитопровода и электростатический конденсатор фильтра Вина, 8 — входная и выходная щели фильтра, S9 — вспомогательный электрод, 10 — приемный узел, 11 — катод, 12 — кварцевая колба, 13 — стеклянная труба, 14 — вспомогательный анод, 15 — подача газа, i — траектория движения ионного пучка.

Как известно [21], при выводе пучка ионов из источника в вакуум вблизи отверстия для извлечения происходит интенсивная перезарядка ионов в собственном газе. В наших условиях коэффициент конверсии за счет этого эффекта мог достигать 30%. Чтобы избежать попадания этих быстрых нейтралов на поверхность кремния, пучок поворачивался цилиндрическим электростатическим конденсатором на угол $\sim 12^\circ$ и далее проходил через фильтр Вина. Последний был собран на постоянных магнитах в бронированном корпусе. Пролетная база составляла ~ 6.5 см. Магнитное поле было практически однородным в средней части длиной ~ 4 см, где индукция достигала 0.16 Т и быстро спадала по краям. Расстояние между обкладками электростатического конденсатора в фильтре 8 мм. Высота пластин 14 мм. Входная и выходная щели фильтра имели прямоугольную форму размерами 5×12 и 3×12 мм. Щелевой пучок, пролетев ~ 2 см после фильтра, попадал на заземленный приемник (рис. 2). Верхняя половина пучка использовалась для обработки поверхности кремния. Экспресс-контроль за параметрами пучка осуществлялся через отверстие 3 (рис. 2) диаметром 2.5 мм в основной пластине приемника. Система была снабжена вспомогательным электродом ES, который в зависимости от приложенного к нему напряжения либо подавлялся, либо вытягивал вторичные электроны из коллектора 2. При работе с положительными ионами электрод ES включался в режим подавления вторичной эмиссии.

В фильтре Вина происходила сепарация пучка ионов либо по массам (O_2^+ и O^+ ; O_2^- и O^-), либо по зарядам (Ar^+ и Ar^{2+}). Рис. 3 показывает, что источник производил в сравнимых количествах отрицательные и положительные ионы кислорода как в атомарном, так и в молекулярном виде. Степень сепарации составляла 70–90%. Пучок ионов аргона почти полностью состоял из Ar^+ .

Быстрые нейтральные атомы (энергия 1 keV) Ar^0 , O_2^0 , O^0 получались из положительных ионов методом резонансной перезарядки в собственном газе (Ar^+ в Ar ; O_2^+ в O_2 ; O^+ в O_2). Для этих целей боковые стороны электростатического конденсатора в фильтре Вина были герметизированы так, что получалась труба прямоугольного сечения (8×14 мм) длиной 64 мм. В средней части трубы имелись отверстия для измерения давления и напуска газа. Такая конструкция в совокупности с высоковакуумным подколпачным пространством установки образовывала перезарядную камеру с дифференциальной откачкой. Входная и выходная щели фильтра Вина усиливали градиент давления. При давлении газа в центре

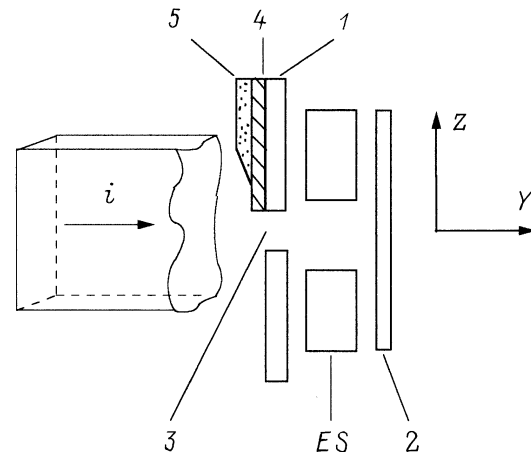


Рис. 2. Схема приемного узла: 1 — заземленный корпус, 2 — коллектор, 3 — отверстие для контроля параметров пучка, 4 — обрабатываемая пластина кремния, 5 — экранный кожух, i — ионный пучок, ES — электрод для экстракции или подавления вторичных электронов с коллектора. Оси X, Y на рис. 1 и Z, Y на рис. 2 являются компонентами одной и той же левосторонней тройки декартовой системы координат.

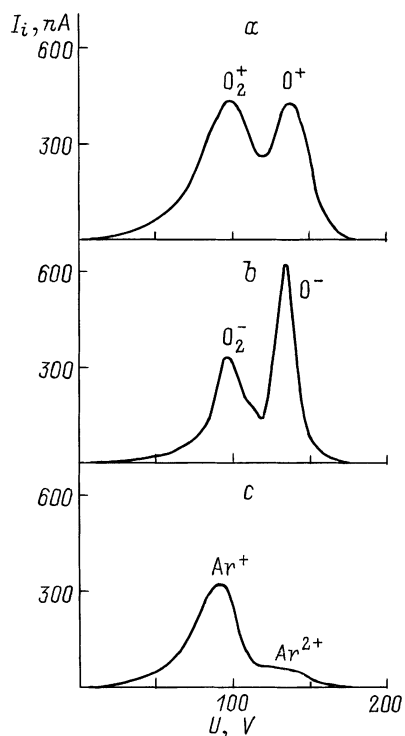


Рис. 3. Масс-спектры ионного пучка. I_i — ток пучка, регистрируемый коллектором приемного узла; U — напряжение на электростатическом конденсаторе фильтра Вина; давление в источнике ~ 6 (a, b); ~ 4 Па (c); разрядный ток 120 (a, b), 80 мА (c).

перезарядной камеры ~ 0.4 Па вакуум в подколпачном пространстве был не хуже 10^{-2} Па.

Степень перезарядки пучка измерялась согласно [22]. В основе этой методики находится предположение, что ионы и быстрые нейтральные атомы одного и того же элемента одинаково эффективно выбивают из поверхности металлов электроны, т.е. их коэффициенты вторичной эмиссии равны $\kappa_{i-e} = \kappa_{n-e}$. Строго говоря, это утверждение справедливо только в области энергий, где кинетическое вырывание превалирует над потенциальным.

Процедура измерения состояла в следующем. Вначале напуск газа в перезарядную камеру перекрыт, вспомогательный электрод $S9$ (рис. 1) заземлен, потери пучка практически отсутствуют. Фильтр Вина настраивается на определенный вид ионов, например, Ar^+ . Изменяя полярность напряжения на электроде ES , можно либо подавить вторичную эмиссию, либо экстрагировать с коллектора все вторичные электроны. В первом случае мы получаем ток ионов I_i , а во втором — ток коллектора $I_k = I_i + I_e$ (I_e — ток вторичных электронов). Тогда $\kappa_{i-e} = I_e/I_i = (I_k - I_i)/I_i$. Как оказалось, этот параметр может меняться в довольно широких пределах, поэтому в ходе каждого эксперимента он измерялся по несколько раз через определенные промежутки времени.

Затем в перезарядную камеру подавался газ. При этом часть ионов перезарядится, а часть пройдет через

камеру в неизменном виде. Если на электрод $S9$ подать достаточно большое положительное напряжение, то все перезарядившиеся ионы отразятся от него и не смогут покинуть фильтр Вина. Это несложно проверить по току коллектора в режиме подавления вторичной эмиссии. Измерения показали, что полное отражение наблюдается при U_{S9} более 1100 В. Теперь поменяем полярность электрода ES на положительную и измерим ток вторичных электронов. Поскольку ионы на коллектор не проходят, то I_e может быть вызван только потоком быстрых нейтральных атомов. Согласно [22], принимает $I_n = I_e/\kappa_{i-e}$. Здесь и далее под величиной I_n понимается электрический эквивалент потока нейтралов, т.е. тот ток, который приходил бы на коллектор, если бы каждый быстрый атом имел заряд, равный заряду электрона.

Если напуск газа в перезарядную камеру осуществляется, электрод $S9$ заземлен, а вторичная эмиссия с коллектора подавлена, то можно измерить еще один параметр I_{ir} — ток неперезарядившихся ионов. Эта величина контролировалась лишь во вспомогательных экспериментах.

На рис. 4 показана зависимость I_{ir} , I_n и их суммы I_s от давления газа в центральной части перезарядной камеры. Рабочий газ — аргон. Как видно, I_n достигает максимума при $P \sim 0.5$ Па и далее медленно спадает. Последнее связано с рассеянием быстрых нейтралов на атомах газа. Для молекулярного и атомарного кислорода наблюдаются аналогичные зависимости, но при давлениях в 2–3 раза более высоких.

Обратим внимание на два важных обстоятельства. Первое — в области $P \leq 0.2$ Па I_s с достаточно высокой степенью точности равен величине первоначального тока ионного пучка (какая была до подачи газа в перезарядную камеру), что убеждает в правильности методики измерения. Второе — если все же предположить, что погрешность измерения велика, то реальный

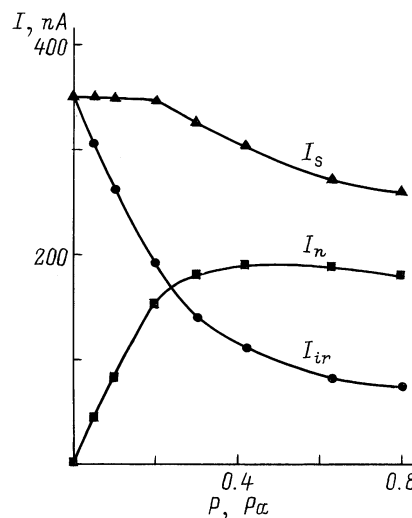


Рис. 4. Зависимости тока неперезарядившихся ионов I_{ir} , электрического эквивалента потока быстрых нейтральных атомов I_n и их суммы $I_s = I_{ir} + I_n$ от давления в перезарядной камере. Рабочий газ — аргон.

поток нейтралов не может быть больше величины, нами определенной, так как суммарный поток нейтралов и перезарядившихся ионов не может превышать величину исходного пучка положительных ионов.

Источником радикалов фтора (рис. 1) служил тлеющий разряд в протоке газа с сильным градиентом давления. Дюралевый катод 11 площадью 2 см^2 помещался в кварцевую колбу 12 объемом $\sim 10\text{ см}^3$, в которую осуществлялся напуск газа SF_6 . Колба соединялась с вакуумным объемом через стеклянную трубу 13 внутренним диаметром 8 мм, длиной 22 см. В 6 см от ее конца имелось боковое ответвление, где располагался вспомогательный анод 14. При стандартном протоке элегаза $900\text{ см}^3/\text{Па}$ с давлением газа вблизи катода составляло 25–30 Па, а в подколпачном пространстве $\sim 7 \cdot 10^{-3}$ Па. Вспомогательный анод служил для облегчения зажигания разряда с сильным градиентом давления. В стандартном режиме работы напряжение на разряде составляло 2.5–3 кВ, а ток — 4 мА. Последний примерно поровну распределялся между вспомогательным анодом и заземленными частями подколпачного пространства.

Атомы фтора получались в результате диссоциации молекул элегаза в положительном столбе разряда. Как показали измерения, вне пределов стеклянной трубы скорость травления Si, детерминированная концентрацией P^* хорошо укладывалась на зависимость $V_{et} \sim 1/R^2$, где R — расстояние от конца трубы. Ось источника радикалов составляла с плоскостью пластины приемника, равно как и с поверхностью кремния, угол $\sim 20^\circ$. Расстояние между концом трубы и серединой ионного пучка (рис. 1) было 2 см. На приемную пластину сзади накладывался постоянный магнит, который создавал магнитное поле индукцией $\sim 7 \cdot 10^{-3}$ Т, направленное вдоль оси Y (рис. 1). Это поле препятствовало попаданию электронов из тлеющего разряда в зону взаимодействия ионов пучка и радикалов фтора с обрабатываемой поверхностью.

Методика и результаты измерений

Скорость травления определялась методом прямых измерений глубины протравы. Для этих целей на приемной пластине 1 (рис. 2) располагался исследуемый образец кремния 4. Его верхняя часть закрывалась от воздействия фтора и ионного пучка кожухом 5. Высота ступеньки между обработанной и необработанной частями, которая обычно составляла несколько микрон, измерялась с помощью интерференционного микроскопа. Как отмечалось в предыдущем разделе, скорость радикального травления подчинялась закону $V_{et} \sim 1/R^2$. В связи с этим профиль травления вдоль оси X (рис. 1) для случая, когда ионный пучок выключен, имел вид, показанный на рис. 5, *a*. Начало оси X помещено на конце стеклянной трубы. Если на кремний поступают одновременно и радикалы и ионный пучок, то в зоне их совместного действия происходит ускорение процесса травления и на профиле появляется ступенька (рис. 5, *b*). Участки *d* и *e* несложно проэктировать и получить

величину Δh . Расстояние R было выбрано равным 2 см, для того чтобы $\Delta h \cong h$, где h — глубина протравы кремния радикалами фтора без ионного стимулирования.

Выход атомов кремния на один упавший ион Y (основная измеряемая величина) определялась следующим образом. Пусть за время Δt под действием ионной бомбардировки приращение глубины травления составило Δh . Число удаленных с единицы поверхности атомов определяется выражением $N_{si} = \Delta h \rho N_a / \mu$, где ρ , μ — плотность и молярный вес кремния; N_a — число Авогадро. Количество упавших на единицу площади ионов есть $N_i = j \Delta t / e = I \Delta t / e S$, где j — плотность тока ионов; I , S — ток на коллектор и его площадь; e — заряд электрона. Поскольку плотности тока пучка находились на уровне нескольких микроампер на сантиметр квадратный, то величина Δt обычно составляла несколько часов. Удержать параметры источника на неизменном уровне в течение указанного времени не представлялось возможным, поэтому вместо величины $I \Delta t$ использовалось ее интегральное значение $\Phi = \int I dt$. Для ее определения в цепи коллектора была установлена интегрирующая схема. При определении выхода атомов кремния на один упавший быстрый нейтрал экспериментально измерялось значение Φ , в котором роль I играл описанный выше электрический эквивалент I_n . Таким образом,

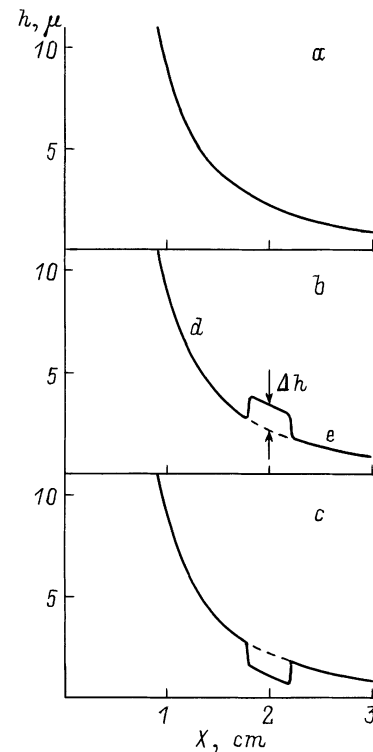


Рис. 5. Качественная зависимость глубины травления кремния от координаты X (на рис. 1 точка $X = 0$ находится на срезе трубы источника радикалов). *a* — ионный источник выключен, работает только источник радикалов; *b* — травление стимулируется потоком ионов; *c* — профиль травления в случае, когда процесс искусственно тормозится какими-либо внешними факторами.

мы получаем $Y = \Delta h \rho N_a e S / \mu \Phi$. Для каждого вида стимулирующих частиц проводилась серия измерений числом не менее пяти. Усредненные данные приведены ниже.

Известно [13], что выход атомов кремния сильно зависит не только от массы и энергии иона, но и от условий проведения эксперимента. Обычно эта величина для Ar^+ с энергией 1 keV составляет от 4 [5] до 20 [23]. В наших экспериментах было получено $Y(\text{Ar}^+) = 5.7 \pm 1.3 \text{ atom/ion}$. Это значение ближе к результатам работы [5] и в дальнейшем использовалось нами как реперное.

Для быстрых нейтральных атомов аргона было получено $Y(\text{Ar}^0) = 10.6 \pm 1.5 \text{ atom/neutr.}$, т. е. $Y(\text{Ar}^+) \cong 1.85$. Результат является неожиданным по двум причинам. Во-первых, как было отмечено во введении, стимулирующее воздействие ионной бомбардировки в настоящее время связывается в основном с разрушением связей Si-Si, разрыхлением поверхности кремния и искусственной десорбцией промежуточных продуктов реакции SiF_x ($x = 1, 2, 3$). Существование этих эффектов и их значительный вклад в процесс травления не вызывают сомнения. Но это воздействие чисто механическое, которое не может зависеть от состояния верхних электронных оболочек (напомним, что ион имеет энергию 1 keV, а переходы электрона на верхних оболочках имеют энергию один-два десятка электрон-вольт). Это заставляет предположить существование дополнительного канала травления, который ранее не учитывался. Во-вторых, как известно [24,25], при полете иона к поверхности он обычно нейтрализуется еще до столкновения за счет оже- или туннельного процессов, т. е. на кремний практически всегда падает быстрый нейтрал. Различными являются место, время и механизм нейтрализации. Это заставляло усомниться прежде всего в правильности методики измерения I_n . Однако, как было показано в предыдущем разделе, даже если предположить наличие существенной ошибки, то реальные потоки быстрых нейтральных атомов не могут превышать заявленных значений, так как это противоречило бы балансу токов. Но ведь $Y \sim 1/j$ и, следовательно, полученная величина $Y(\text{Ar}^0)$ на самом деле являются ее нижним пределом. Таким образом, можно считать показанным, что стимулирующее действие ионной бомбардировки на плазмохимическое травление кремния зависит не только от массы и энергии иона, но и от заполнения ее верхних электронных оболочек.

Эксперименты показали, что атомарный кислород также ускоряет процесс травления, причем $Y(\text{O}^+) = 1.9 \pm 0.2 \text{ atom/ion}$, $Y(\text{O}^0) = 3.4 \pm 0.5 \text{ atom/neutr.}$, $Y(\text{O}^-) = 2.1 \pm 0.5 \text{ atom/ion}$. Опять же наибольшим стимулирующим действием обладают быстрые нейтральные атомы, причем $Y(\text{O}^0)/Y(\text{O}^-) \cong 1.8$. Отрицательные ионы занимают промежуточное положение.

В отличие от перечисленных выше частиц ионы молекулярного кислорода не ускоряют, а замедляют процесс травления. В результате на профиле травле-

ния в зоне действия пучка образуется не ступенька, а провал (рис. 5, c). Для удобства этот процесс можно рассматривать как отрицательный катализ, а его интенсивность характеризовать отрицательными значениями Y , так как Δh имеет знак "минус". Было обнаружено, что свойством ингибиторов обладают все разновидности молекулярного кислорода (O_2^+ , O_2^- , O_2^0), причем $Y(\text{O}_2^+) = -2.9 \pm 0.3 \text{ atom/ion}$, $Y(\text{O}_2^0) = -2.3 \pm 0.2 \text{ atom/neutr.}$, $Y(\text{O}_2^-) = -2.6 \pm 0.3 \text{ atom/ion}$. Снова отрицательные ионы занимают промежуточное положение между положительными ионами и быстрыми нейтралами. Наблюдаемое замедляющее действие не может быть прямо связано с образованием SiO_2 , которое, как известно, травится фтором существенно медленнее, чем чистый кремний. Такого рода эффекты наблюдаются в смеси элегаза и кислорода лишь, когда относительная концентрация O_2 превышает 50%. В нашем же случае поток молекул SF_6 на мишень более чем на два порядка превышает поток молекулярных ионов.

Обращает на себя внимание качественное различие действий, производимых атомарным и молекулярным кислородом. Один из них ускоряет, а другой замедляет процесс травления, хотя химический элемент один и тот же. Не исключено, что причиной является различие масс ионов и следовательно, импульсов при одной и той же энергии. Однако это маловероятно, так как в работе [23] было показано, что выход атомов кремния на один упавший ион является очень слабой функцией энергии ионов, по крайней мере в диапазоне от 500 до 3000 eV. Устранение указанных противоречий требует дополнительных исследований.

Выводы

Первые результаты исследования влияния знака заряда иона на стимуляцию плазмохимического травления кремния показывают следующее.

1. Среди частиц, ускоряющих процесс травления, наибольшей каталитической способностью обладают быстрые нейтральные атомы. Каталитическое влияние положительных ионов примерно в два раза ниже. Отрицательные ионы занимают промежуточное положение.

2. Обнаружено, что некоторые виды ионов не ускоряют, а замедляют процесс травления, т. е. ведут себя как ингибиторы. К числу таких частиц (при энергии 1 keV) относятся все разновидности молекулярного кислорода (O_2^+ , O_2^- , O_2^0).

3. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что эффекты разрыхления поверхности кремния и искусственной десорбции промежуточных продуктов реакции далеко не полностью описывают влияние ионной бомбардировки. Существует дополнительный канал травления кремния, эффективность которого зависит не только от энергии и массы иона, но и от заполнения его верхних электронных оболочек.

Список литературы

- [1] *Hosokawa N., Matsuzaki R., Asamaki T.* // Jap. J. Appl. Phys. Suppl. 1974. Vol. 2. Pt 1. P. 435.
- [2] *Holland L., Ojha S.M.* // Vacuum. 1976. Vol. 26. N 1. P. 53.
- [3] Плазменная технология в производстве СБИС / Под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна. М.: Мир, 1987. 462 с.
- [4] *Данилин Б.С., Киреев В.С.* Применение низкотемпературной плазмы для травления и очистки материалов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 263 с.
- [5] *Coburn J.W., Winter H.W.* // J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50. N 5. P. 3189.
- [6] *Flamm D.L., Donnelly V.M.* // J. Vac. Sci. Technol. B1. 1983. N 1. P. 23.
- [7] *Pabst M.J., Tan H.S., Franklin J.L.* et al. // Intern. J. Mass. Spectr. Ion Phys. 1976. Vol. 20. N 1. P. 191.
- [8] *Williams R.F.* // Plasma Processing of Semiconductors / Ed. R.F. Williams. NATO ASI Series E. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. Vol. 336. P. 321.
- [9] *Perrin J.* // Ibid. P. 397.
- [10] *Словецкий Д.И.* // Химия плазмы. М.: Энергоиздат, 1983. Вып. 10. С. 108.
- [11] *Winters H.F., Coburn J.W.* // J. Vac. Sci. Technol. B3. 1985. N 5. P. 1376.
- [12] *Donnelly V.M., Layadi N., Lee J.T.C.* et al. // Plasma processing of Semiconductors / Ed. R.F. Williams. NATO ASI Series E. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. Vol. 336. P. 243.
- [13] *Winters H.F., Coburn J.W.* // Surf. Sci. Rep. 1992. Vol. 14. N 4–6. P. 161.
- [14] *Flamm D.L.* // Plasma Processing of Semiconductors / Ed. R.F. Williams. NATO ASI Series E. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996. Vol. 336. P. 23.
- [15] *Mauer J.L., J.S. Logan J.L., Zielinski L.B., Schwartz G.C.* // J. Vac. Sci. Technol. 1978. Vol. 15. P. 1734.
- [16] *Киреев В.Ю., Назаров Д.А., Кузнецов В.И.* // Электрон. обраб. материалов. 1986. № 6. С. 37.
- [17] *Oostra D.J., Haring A., de Vries A.E.* et al. // Nucl. Instr. and Meth. 1986. Vol. B13. P. 556.
- [18] *Киреев В.Ю., Кремеров М.А.* // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1985. № 1 (113). С. 3.
- [19] *Keller J.H.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 1997. Vol. 39. P. A437–A443.
- [20] *Данилина Т.И., Иванова Е.В., Крейндель Ю.Е., Левчук Л.А.* // ПТЭ. 1968. № 3. С. 158.
- [21] *Хастед Дж.* // Физика атомных столкновений. М.: Мир, 1965. 710 с.
- [22] *Иоффе М.С., Соболев Р.И., Тельковский В.Г., Юшманов Е.Е.* // ЖЭТФ. 1960. Т. 39. С. 1602.
- [23] *Gerlach-Meyer U., Coburn J.W.* // Surf. Sci. 1981. Vol. 103. P. 177.
- [24] *Hagstrum H.D.* // Phys. Rev. 1956. Vol. 104. P. 672.
- [25] *Hagstrum H.D., Tekeishi Y.* // Phys. Rev. 1965. Vol. 139. P. 526.