

УДК 621 382 002

ФОРМИРОВАНИЕ ИОННОГО ПОТОКА В МНОГОАПЕРТУРНОМ ИОННОМ ИСТОЧНИКЕ

Н. И. Данилович

Рассмотрены основные закономерности формирования потока ионов Ag^+ диаметром 100 мм с помощью многоапертурного ионного источника с осциллирующей электронов. Установлено, что источник ионов со сферическими сетками формирует сходящийся ионный поток с повышенной плотностью тока вдоль оси источника. Показано, что максимальная плотность ионного тока в потоке и энергия ионов зависят от величины потенциалов на сетках ионно-оптической системы, соотношение которых определяет характер распределения плотности ионного тока по площади обрабатываемой подложки.

В настоящее время в технологии изготовления больших интегральных схем (БИС) широко используется метод плазмохимического травления микрорельефа поверхности. Вместе с тем все более широкое распространение получает метод ионно-пучкового травления — распыления, основанный на физическом взаимодействии ионов инертного газа, например Ar^+ , с обрабатываемой поверхностью БИС или мишени [1, 2]. Метод используется на операциях очистки поверхности БИС (с энергией ионов $E_i \leq 100 \text{ эВ}$), для травления микрорельефа ($E_i \sim 0,5 \div 1,0 \text{ кэВ}$) и ионного осаждения металлических и диэлектрических пленок [3] и имеет ряд достоинств. Во-первых, он дает возможность травления металлов, диэлектриков и полупроводников с высокой скоростью без смены рабочего газа, во-вторых, ему присуща высокая чистота процесса, которая обеспечивается отсутствием контакта обрабатываемой подложки с зоной плазмы и проведением процесса при относительно низком давлении в вакуумной камере $\sim 4 \cdot 10^{-2} \div 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$, а также он позволяет реализовать возможность точного управления процессом за счет использования вполне определенных и легко изменяемых величин плотности ионного тока, энергии ионов и угла их падения на обрабатываемую поверхность.

Для осуществления травления микроструктур на поверхности полупроводниковых подложек большого диаметра и осаждения на них тонких пленок различных материалов разработаны специальные многоапертурные ионные источники (МИИ) с осциллирующей электронов, использовавшиеся ранее в качестве ионных двигателей. Они могут формировать многопучковый ионный поток большого диаметра и обеспечивать, по сравнению с одноапертурными источниками, получение большей плотности ионного тока при одинаковых напряжениях на электродах [4]. Ионные источники такого типа содержат один или несколько термокатодов, разрядную камеру, систему подачи рабочего газа, магнитную систему, формирующую внутри разрядной камеры аксиальное магнитное поле, ионно-оптическую систему (ИОС) с одной, двумя или тремя сетками, нейтрализатор и систему источников питания.

Существует большое число разнообразных конструкций МИИ, в основном отличающихся построением магнитной и ионно-оптической

систем. В работе исследовался источник с аксиальным магнитным полем и двухсеточной ИОС, конструкция которого показана на рис. 1. Как видно из рисунка, источник содержит нейтрализатор, ионно-оптическую систему, катод, цилиндрический анод и магнитную систему.

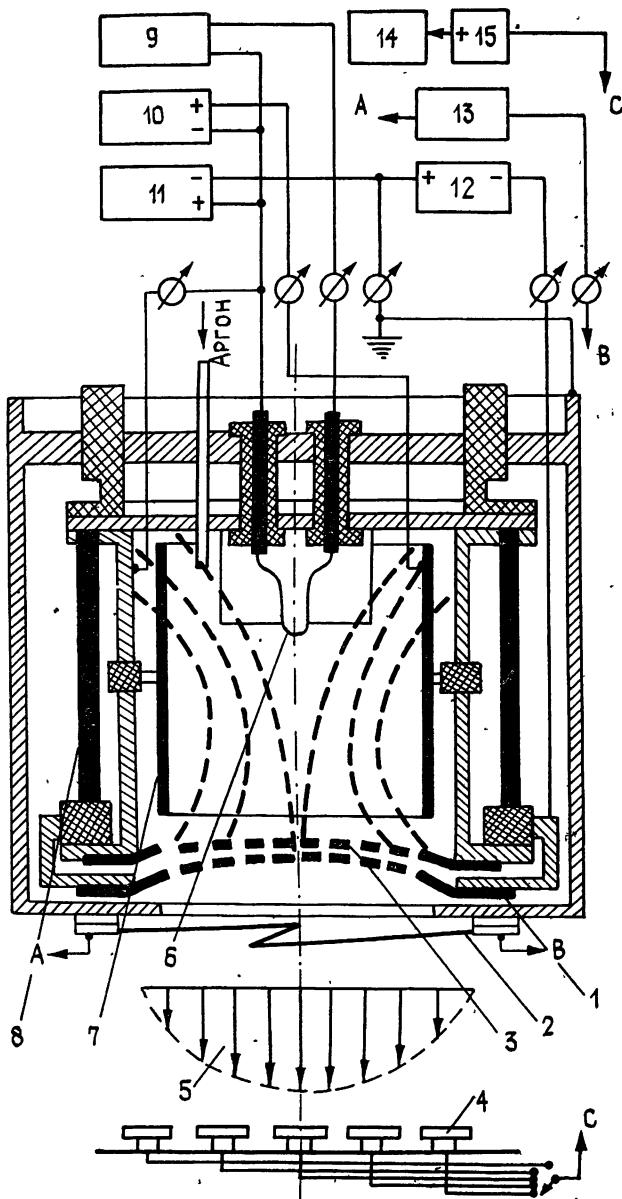


Рис. 1 Конструкция многоапертурного ионного источника с двухсеточной ИОС: 1—линии магнитного поля, 2—нейтрализатор, 3—ионно-оптическая система, 4—датчики плотности ионного тока; 5—ионный поток, 6—термокатод, 7—анод (разрядная камера), 8—магнитная система, 9—источник питания (ИП) катода, 10—ИП анода (разряда), 11—ИП экранной сетки, 12—ИП ускоряющей сетки, 13—ИП нейтрализатора, 14—ламповый вольтметр, 15—ИП смещения.

Термокатод, выполненный из вольфрамовой проволоки диаметром 0,7 мм, нагревается до температуры $\sim 1273 \div 1473$ К и является источником ионизирующих электронов, которые ускоряются в сторону цилиндрического анода, одновременно являющегося разрядной камерой.

рой, за счет наличия на аноде небольшого ($\sim 30 \div 70$ В) положительного относительно катода потенциала. Магнитная система выполнена из стержневых постоянных магнитов диаметром 5 мм, расположенных вокруг разрядной камеры и формирующих внутри последней аксиальное магнитное поле. Наличие внутри разрядной камеры скрещенных $\vec{E} \times \vec{B}$ полей приводит к осцилляции электронов, увеличению длины их пробега и повышению эффективности ионизации рабочего газа [4]. Одним из наиболее существенных узлов любого МИИ является ионно-оптическая система, расположенная у выходного торца разрядной камеры и предназначенная для формирования границы плазмы, экстракции с нее ионов, ускорения их до необходимой энергии и фокусировки ионов сначала в отдельные пучки, а затем в ионный поток необходимой формы. Как видно из рис. 1, в данной конструкции ионного источника использовалась двухсеточная фокусирующая ИОС со сферическими экранирующей и ускоряющей сетками, вогнутыми внутрь разрядной камеры. Сетки диаметром 100 мм выполнены из молибдена, имеющего низкий коэффициент распыления, и имеют 1147 отверстий диаметром 2 мм с расстоянием между соседними отверстиями 0,5 мм. Коэффициент прозрачности сеток ~ 70 %. Система оптически юстирована для получения соосности отверстий обеих сеток. Нейтрализатор объемного заряда потока положительных ионов «погруженного» типа выполнен в виде вольфрамовой «V»-образной проволоки, протянутой поперек ионного потока, и представляет собой термокатод (эмиттер нейтрализующих электронов), нагреваемый до температуры $\sim 1073 \div 1173$ К.

Экспериментальная установка включает также систему независимых регулируемых источников питания, обеспечивающих накал катода и нейтрализатора, анодный потенциал, а также потенциалы на экранирующей и ускоряющей сетках. Ионный источник помещен внутрь вакуумной камеры, которая предварительно откачивается до $P \sim 3 \cdot 10^{-5}$ Па, после чего внутрь разрядной камеры подается аргон, давление которого поддерживается на заданном уровне в диапазоне $4 \cdot 10^{-2} \div 5 \cdot 10^{-3}$ Па. Измерение профиля распределения плотности ионного тока производилось с помощью системы из девяти зондов (цилиндров Фарадея), размещенных в форме креста на круглой подвижной относительно ионного потока заслонке. Каждый из зондов площадью 1 см^2 может соединяться через переключатель с ламповым вольтметром. Для устранения возможности попадания на зонды электронов плазмы и нейтрализатора во время измерений на них подавался отрицательный потенциал величиной 30 В [5].

Ионный источник такого типа имеет достаточно сложное распределение потенциала вдоль оси ИОС, форма которого во многом определяет рабочие характеристики, в частности плотность ионного тока и ее распределение по площади ионного потока, энергию ионов на выходе ИОС и у поверхности мишени, а также электрическую мощность, потребляемую МИИ от источников питания.

Как видно из рис. 2, где показано типичное распределение потенциала вдоль оси трехсеточной ИОС (распределение потенциала аналогично двухсеточной ИОС), ионы Ag^+ , энергия которых отличается только на несколько электронвольт от потенциала анода ($V_a = 50$ В), экстрагируются с границы плазмы и ускоряются в направлении мишени за счет разности потенциалов на границе плазмы, анода и обеих сетках. Как видно из рис. 2, ионный источник со сферической ИОС, в отличие от источника с плоскими сетками, формирует сходящийся ионный поток с пересекающимися ионными пучками и повышенной плотностью тока вдоль оси источника. При этом на экранную сетку подается регулируемый, положительный относительно земли потенциал

величиной от 100 до 1200 В, а на ускоряющую — отрицательный потенциал величиной от 100 до 2000 В. Таким образом, на параметры ионного потока существенное влияние оказывают величина потенциала в зоне экранной сетки

$$V_{\pi} = V_{\text{э}} + V_{\text{а}} + V_{\text{г.п}}, \quad (1)$$

где $V_{\text{э}}$ — потенциал экранной сетки, $V_{\text{а}}$ — потенциал анода и $V_{\text{г.п}}$ — потенциал границы плазмы (в нашем случае соответственно 50 г ~ 5 В), и разность потенциалов между сетками

$$V_t = V_{\pi} + |V_y|, \quad (2)$$

где V_{π} — потенциал в зоне экранной сетки, определяемый из выражения (1), и V_y — потенциал на ускоряющей сетке. Отношение этих потенциалов $R = V_{\pi}/V_t$ является параметром, определяющим коллимационные характеристики ИОС в двухсеточной системе, величина R обычно лежит в пределах 0,5—0,8 [6].

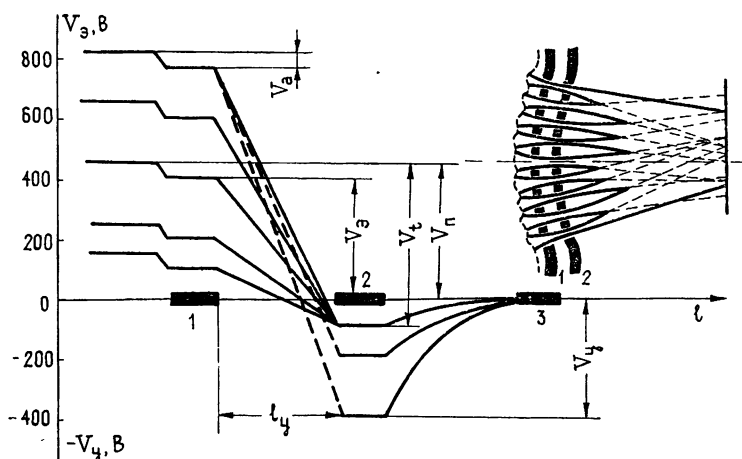


Рис. 2. Распределение потенциала вдоль трехсеточной ИОС: 1—экранный сетка; 2—ускоряющая сетка, 3—замедляющая сетка.

Известно, что увеличение R приводит к формированию более коллимированного ионного потока с малой расходимостью и относительно низкой плотностью ионного тока, а уменьшение — к увеличению плотности тока, особенно в центре ионного потока [7]. Как видно из рис. 3а, где показана рассчитанная зависимость величины R от потенциалов на сетках $V_{\text{э}}$ и V_y , при постоянном потенциале на экранной сетке $V_{\text{э}}$ увеличение отрицательного потенциала V_y на ускоряющей сетке обуславливает уменьшение R и, наоборот, величина R растет при увеличении положительного потенциала $V_{\text{э}}$ (при $V_y = \text{const}$). При этом одинаковые значения R , например $R = 0,68$, могут быть получены при различных потенциалах на сетках (см. рис. 3а — точки А—Е). Известно, что максимальная плотность тока в потоке широкопучкового МИИ (после ускоряющей сетки) определяется из выражения

$$J_{\text{max}} = K(e/m)^{1,2} V_t^{3,2} / l_y^2, \quad (3)$$

где e , m — заряд и масса иона, l_y — расстояние между сетками, коэффициент K учитывает конфигурацию ИОС ($K = 4\epsilon_0/9$). Записав выражение (3) через (1), (2) и R , получим

$$J_{\max} = A \left(\frac{V_a + B}{R} \right)^{3/2} = A [R(B + V_a) + |V_y|(R + 1)]^{3/2}, \quad (4)$$

где $A = K(e/m)^{1/2}/l_y$ и $B = V_a + V_{гп}$ — постоянные, зависящие от типа иона, геометрии ИОС, потенциалов разряда и границы плазмы. Таким образом, повышение плотности тока широкопучкового МИИ при постоянном V_a можно получить, уменьшая величину R , или при постоянном V_y , увеличивая R , а также увеличивая потенциалы на экранной или ускоряющей сетках. Как видно из рис. 3б, где представлены зависимости J_{\max} (на расстоянии 20 см от источника ионов) от величины R , увеличение R при постоянном V_a приводит к значительному снижению ионного тока, причем меньшим значениям V_a соответствуют меньшие величины тока. С другой стороны, увеличение R при постоянном V_y обуславливает рост J_{\max} , причем степень роста тока увеличивается с увеличением отрицательного потенциала на ускоряющей сетке.

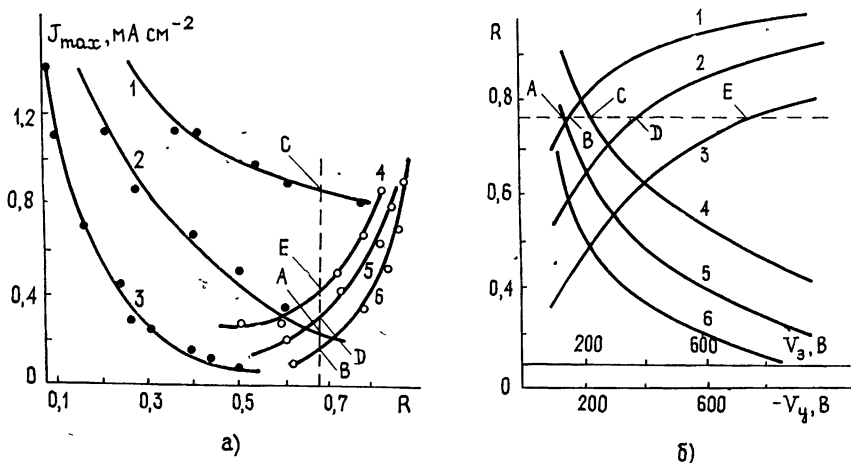


Рис. 3. Зависимость (а) величины R от потенциала V_a на экранной сетке при постоянном V_y : 1 — $V_y = -100$ В, 2 — $(-200$ В), 3 — $(-300$ В); от потенциала V_y на ускоряющей сетке при постоянном V_a : 4 — $V_a = 400$ В, 5 — 200 В, 6 — 100 В. Зависимость (б) величины ионного тока в потоке J_{\max} от величины R (при постоянном V_a , 1 — $V_a = 400$ В, 2 — 200 В, 3 — 100 В и при постоянном V_y , 4 — $V_y = -400$ В, 5 — $(-200$ В), 6 — $(-100$ В).

При определенной геометрии ИОС с заданной величиной межсеточного промежутка l_y и известной массе и заряде иона для повышения плотности ионного тока, например при ионном распылении мишени, необходимо использовать режим работы источника с малыми R , и, наоборот, для формирования хорошо коллимированного потока при ионном травлении микроструктур используют режим с высокими R . Однако, как видно из рис. 3а, заданная величина R может быть получена при различных соотношениях потенциалов на сетках. Так, величину $R = 0,68$ можно получить различными комбинациями потенциалов, например, $V_a = 400$ В, $V_y = -220$ В (точка С, рис. 3а) и $V_a = 140$ В, $V_y = -100$ В (точка В). В обоих случаях источник будет формировать относительно коллимированный ионный поток, но, как видно из рис. 3б, максимальная плотность ионного тока в потоке будет различной. Например, в точках В и С с одинаковым R плотность тока отличается в четыре раза и составляет соответственно 0,2 и 0,86 $mA \cdot cm^{-2}$. Кроме этого, даже при одинаковых R , отличие потенциалов на экранной сетке и разности потенциалов между сетками V_t приводит к изменению и второго существенного технологического параметра ионного потока —

энергии ионов на выходе ускоряющей сетки E_{iy} и в зоне обработки образца (мишени) E_{im} . При этом энергия ионов на выходе ИОС определяется разностью потенциалов между сетками $E_{iy} \sim V_t$ и в режиме с $V_0 = 400 \text{ В}$, $V_y = -220 \text{ В}$ (рис. 3б, точка С) будет равна $\sim 680 \text{ эВ}$, а в точке В, соответствующей $V_t \sim 300 \text{ В}$, будет составлять $\sim 300 \text{ эВ}$. В связи с замедлением ионов в зоне заземленной замедляющей сетки (с трехсеточной ИОС) их энергия у обрабатываемой поверхности определяется только потенциалом V_0 на экранной сетке и в точках В и С соответственно составляет ~ 140 и 400 эВ .

На рис. 4, 5 представлены профили распределения плотности тока ионов Ag^+ по мишени диаметром 100 мм , полученные при напряжении разряда 50 В , тока разряда $0,5 \text{ А}$ и различных V_t . Как видно из рисунков, в обоих случаях использование ИОС со сферическими сетками приводит к формированию сфокусированного ионного потока с неоднородным распределением плотности ионного тока по его площади — с максимальным значением в центральной части потока и уменьшающимся к его периферии. При неизменном потенциале на экранной сетке $V_0 = 100 \text{ В}$ (см. рис. 4а), увеличение потенциала уско-

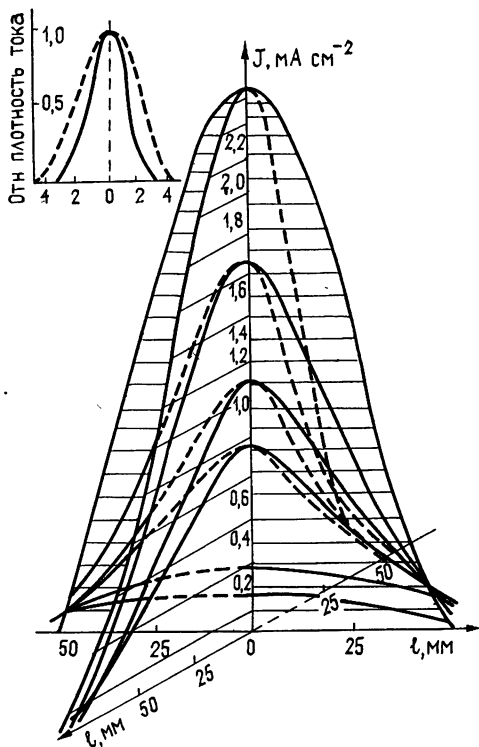


Рис. 4. Зависимость профиля распределения ионного тока при постоянном потенциале на экранной сетке ($V_0 = 100 \text{ В}$) от величины потенциала на ускоряющей сетке: 1 — $V_y = -2000 \text{ В}$, $R = 0,07$; 2 — (-1800 В) ; 3 — (-1600 В) ; 4 — (-1000 В) ; 5 — (-600 В) ; 6 — (-400 В) ; 7 — (-200 В) , $R = 0,43$, профиль распределения ионного тока МИИ типа „millatron“ по данным работы [7]; 8 — с плоскими сетками; 9 — со сферическими сетками.

ряющей сетки V_y от 200 до 2000 В , что соответствует уменьшению R от $0,43$ до $0,08$, приводит к росту плотности ионного тока от $0,15$ до $2,4 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$. Максимальная плотность тока достигается при $R = 0,08$, что соответствует максимальной неоднородности тока в ионном потоке. Такой фокусирующий режим работы источника может быть использован при ионном распылении мишеней, когда для достижения высоких скоростей распыления материала мишени и осаждения пленки на подложке требуются повышенные плотности ионного тока. Как видно из рис. 4б, где представлены профили распределения ионного тока в потоке МИИ типа «millatron» с плоской и сферической ИОС, полученные в нашем случае профили плотности ионного тока качественно не отличаются от приведенных в работе [7].

Как видно из рис. 5, при неизменном потенциале на ускоряющей сетке $V_y = -100 \text{ В}$, увеличение потенциала V_0 на экранной сетке от 200 до 1200 В , что соответствует увеличению R от $0,7$ до $0,9$, также

приводит к росту ионного тока. Однако изменения величины потенциала V_0 на экранной сетке в меньшей степени приводят к изменению неоднородности ионного тока в потоке.

Таким образом, при выборе технологических режимов работы широкопучкового МИИ со сферическими сетками необходимо принимать во внимание величину R , определяющую степень коллимации ионного потока (угол расходимости потока, неоднородность ионного тока по его площади), а также разность потенциалов V_t , определяющую энергию ионов на выходе ускоряющей сетки, и $V_t^{3/2}$, определяющую максимальную плотность ионного тока. При выборе V_t следует учитывать и относительные величины потенциалов V_0 и V_y на сетках ИОС. Например, увеличение положительного потенциала V_0 на экранной сетке приводит к увеличению энергии ионов в зоне обработки,

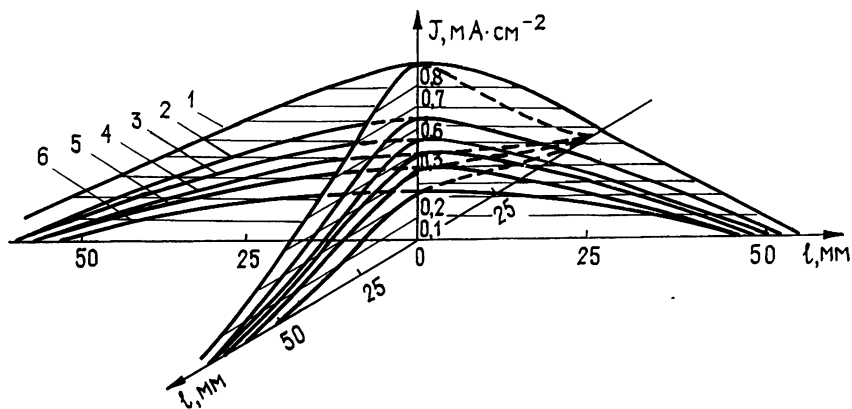


Рис. 5. Зависимость профиля распределения ионного тока при постоянном потенциале на ускоряющей сетке ($V_y = -100$ В) от величины потенциала на экранной сетке: 1 — $V_0 = 1200$ В, $R = 0,9$; 2 — 1000 В, 3 — 800 В, 4 — 600 В, 5 — 400 В, 6 — 200 В, $R = 0,7$.

снижению ее распыления за счет бомбардировки положительными ионами Ag^+ , экстрагирующимися из плазмы, но при определенной для каждой конструкции МИИ величине V_0 (≥ 1000 В для данного источника) происходит резкое возрастание тока в цепи экранной сетки за счет попадания на нее электронов, что приводит к перегрузке источника питания сетки. Большой отрицательный потенциал V_y на ускоряющей сетке (для данного источника $\sim 400 \div 500$ В) приводит к ее интенсивному распылению за счет бомбардировки ионами Ag^+ , а следовательно, к загрязнению ионного потока, разогреву сетки и изменению геометрии ИОС. Как видно из рис. 6а, где представлены зависимости ионного тока в потоке J , тока в цепи ускоряющей сетки J_y и величины R от потенциала V_y ускоряющей сетки (при $V_0 = 400$ В), увеличение V_y приводит к росту ионного тока, уменьшению R (ухудшается однородность распределения тока по площади ионного потока), а также к увеличению тока J_y в цепи управляющей сетки, который при $V_y > 600$ В достигает величины > 50 мА. При этом может происходить разогрев сетки до температуры $\sim 473 \div 573$ К, приводящий к изменению геометрических размеров ИОС и расфокусировке ионного потока, что обуславливает изменение распределения плотности ионного тока и скорости распыления мишени или травления поверхности обрабатываемой подложки. Как видно из рис. 6б, где показано распределение плотности тока по площади полупроводниковой подложки диаметром 100 мм в одном из исследованных режимов

($V_0 = 400 \text{ В}$, $V_y = -800 \text{ В}$), изменение геометрии ИОС, вызванное некачественной ее юстировкой (несоблюдение полной соосности отверстий в сетках, неоднородная величина промежутка l_y между сетками) или изменением геометрии вследствие нагрева сеток, приводит к несимметричному профилю распределения ионного тока, что резко снижает однородность скорости травления или распыления по поверхности обрабатываемой подложки или мишени.

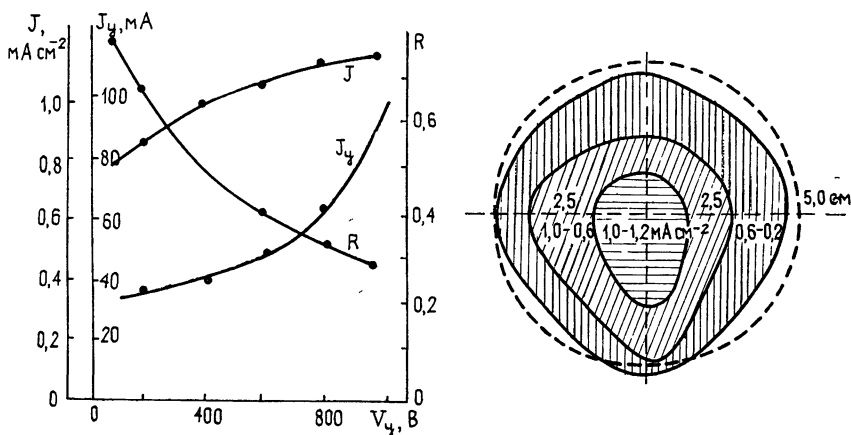


Рис. 6. Зависимость максимальной плотности ионного тока J_{\max} в цепи ускоряющей сетки J_y и величины R от потенциала на ускоряющей сетке при постоянном потенциале на экранной сетке ($V_0 = 400 \text{ В}$) (а); распределение ионного тока по площади подложки диаметром 100 мм (б).

Многочувствительный ионный источник со сферической ИОС диаметром 100 мм, в отличие от источников с плоской ИОС, формирует сходящийся к оси источника ионный поток, характеризующийся высокой плотностью ионного тока (до $2,5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$) в центре потока, уменьшающейся к его периферии. Максимальная величина ионного тока в потоке и распределение плотности тока по площади потока может регулироваться в широких пределах изменением потенциалов на экранной и ускоряющей сетках. Это позволяет реализовать потенциальное (величинами потенциалов V_0 и V_y) управление фокусировкой и основными технологическими параметрами ионного потока с помощью микропроцессорных управляющих устройств. При этом может осуществляться стабилизация ионного тока потока путем поддержания заданной разности потенциалов $V_i^{3/2}$, например для поддержания заданной скорости травления поверхности БИС или распыления мишени, стабилизация энергии ионов в потоке в зоне обработки путем поддержания заданной величины потенциала V_0 на экранной сетке, а также контролируемое изменение профиля распределения ионного тока по площади потока путем регулирования величины R (отношения потенциалов на сетках) для поддержания заданной однородности скорости травления поверхности БИС в системах индивидуальной обработки неподвижной относительно ионного источника полупроводниковой пластины.

Автор выражает признательность профессору университета штата Миннесота (США) Венеру Г. К. за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Bollinger L. D — Sol. State Technol., 1977, 20, № 11, p. 66.
- 2 Harper J. M., E., Cuomo J. J., Leary P. A., Summa G. M — J. Electrochem Soc., 1981, 128, № 5, p. 1077.

3. Капе С. М., Аһп К. У — J. Vac. Sci. Technol., 1979, 16 (2), p. 171.
4. Лабунув В. А., Данилович Н. И., Громов В. В. — Зарубежная электронная техника, 1982, № 5, с. 82.
5. NASA Report № CR-134905, 1975, p. 52.
6. Ion propulsion, Technology and applications — New York: Gordon and Braver, 1970.
7. Smiths J. W. — J. Vac. Sci. Technol, 1981, 19(3), p. 704.

Минский радиотехнический институт

Поступила в редакцию
9 июня 1983 г.

ION FLUX FORMATION IN MULTIAPERTURE ION SOURCE

N. I. Danilovich

The basic regularities of the large diameter (10 cm) ion beam formation by the multiaperture ion source with dished grid optics are discussed. It was found that such type of ion source produces nonuniform ion beam. Maximum intensity of ion current is at the center of the ion beam near the axis of ion source. It was shown that density of ion current and ion energy inside the beam depend on the potential difference applied between a pair of grids with precisely aligned holes. The distribution of the ion current density around the substrate surface depends on the potential ratio.

ДОРОГИЕ ЧИТАТЕЛИ «РАДИОФИЗИКИ»

В статье В. А. Каплуна, В. Г. Кулиша «Дифракция электромагнитных волн на решетке цилиндрических полупроводящих стержней в плоском слое диэлектрика» (Радиофизика, 1984, 27, № 5, с 613—627) по недосмотру редакции журнала и типографии на с. 616, к сожалению, не напечатан рис 3.

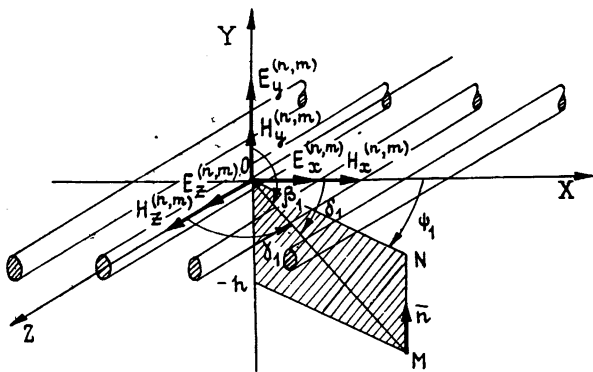


Рис. 3.

Редакция приносит авторам статьи и читателям журнала извинения.

Редакция