

УДК 537.533

Ионно-зондовые системы для ионно-лучевых технологических установок

Б. Н. Васичев

Московский государственный институт электроники и математики (Технический университет),
Москва, Россия

Г. И. Фатьянова

ФГУДП «НИИ Электронной и ионной оптики» ФГУП «НПО «Орион»», Москва, Россия

Рассмотрены основные свойства ионно-оптических элементов ионно-зондовой установки для ионно-лучевого осаждения и ионно-лучевой литографии в производстве полупроводниковых ИК-структур.

Ионно-лучевые установки с тонко сфокусированным пучком (зондом) могут использоваться в ряде технологических операций, в том числе

для ионно-лучевой очистки подложек, сверления отверстий, осаждения материала из газовой (паровой) фазы, ионной имплантации, ионно-

лучевой размерной обработки и ионно-лучевой литографии, вторичной ионной масс-спектрометрии (аналитический метод ВИМС).

Создание ионно-лучевых установок с тонко сфокусированным пучком ионов при высокой интенсивности потока — одна из сложных задач как с точки зрения ее моделирования, так и конструирования. Известно, что электронный пучок более предпочтителен, когда речь идет о размерной обработке или микролитографии. Ионный пучок — вне конкуренции, когда необходимо осуществить локальное легирование или осаждение из газовой фазы. Вторичная ионная масс-спектрометрия позволяет осуществлять послойный анализ полупроводниковых структур.

Отсутствие эффективных источников ионов с малыми размерами и высокой надежностью затрудняет широкое внедрение этого оборудования в производство полупроводниковых приборов. Однако работы по усовершенствованию так называемых точечных ионных источников постоянно ведутся.

Численное моделирование показало, что для получения малого диаметра ионного зонда при максимально возможной плотности тока необходимо, как и в электронно-оптической системе, не только учитывать рабочее расстояние от объектива до мишени, конфигурацию и размеры элементов объектива, величину энергии ионов на выходе из ионно-оптической системы, но и конфигурацию, и размеры электродов линзы, располагаемой вблизи источника ионов.

Ионные траектории рассчитывали на всем протяжении — от источника до мишени. Эта задача решалась традиционно с привлечением теории аббераций. Решение ее вначале было получено с помощью пакета прикладных программ ELSTAT и SELOT. Последние позволяют рассчитывать систему, состоящую из одной или нескольких линз, формирующих зонд в плоскости мишени при изменении параметров рабочих расстояний линз, напряжений на их электродах и апертурного угла пучка, а также основных токовых характеристик источника ионов. К ним относятся: яркость источника, разброс ионов по энергиям, радиус виртуального источника ионов, а также электростатические поля линз, рассчитанные с помощью программ Лаплас или RAMZES. Позже была разработана более совершенная программа Elim-E, с помощью которой были уточнены все расчеты. При расчете траекторий применяли метод "декомпозиции".

В результате исследования были определены основные ионно-оптические характеристики двух вариантов ионно-оптических систем (ИОС). Эти результаты легли в основу конструкторской разработки ионно-оптической системы ионно-зондовой установки с диаметром ионного пучка около 0,3 мкм при плотности тока в пучке 0,005 А/мм².

На рис. 1 представлена принципиальная ионно-оптическая схема двухлинзовой ионно-зондовой установки, а на рис. 2 — конструкция двухлинзовой ионно-оптической системы для формирования ионного зонда малого сечения.

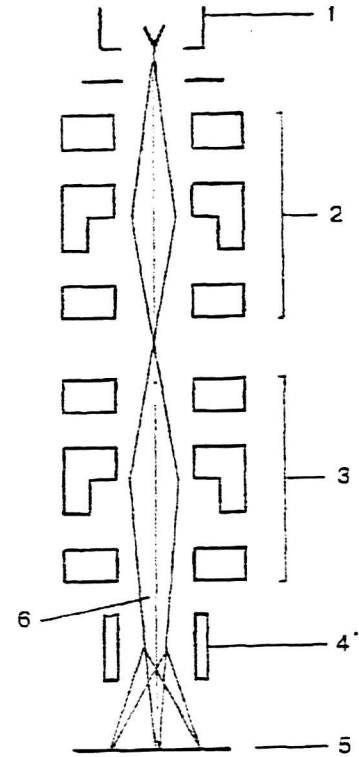


Рис. 1. Принципиальная ионно-оптическая схема двухлинзовой ионно-зондовой установки:

- 1 — эмиттер; 2 — управляющий электрод; 3 — электронная линза; 4 — отклоняющая система; 5 — мишень; 6 — ионный пучок

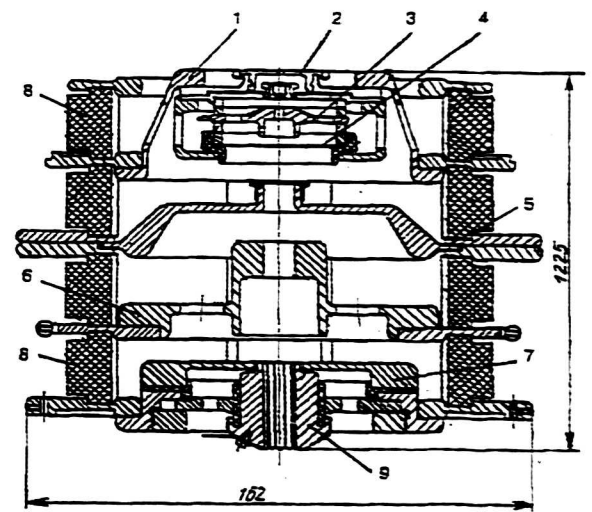


Рис. 2. Разрез двухлинзовой ионно-оптической системы ионно-зондовой установки:

- 1 — первый электрод одиночной линзы; 2 — диафрагма; 3 — второй (средний) электрод; 4 — третий электрод; 5 — первый электрод второй одиночной линзы; 6 — средний электрод второй линзы; 7 — третий электрод второй линзы; 8 — изолятор; 9 — восьмиполюсная отклоняющая система, смонтированная в корпусе линзы

Основные геометрические параметры исследованных линз приведены в таблице. На рис. 3 приведены используемые при моделировании обозначения геометрических размеров линз. Исследовались семь вариантов электростатических (трех- и двухэлектродных) линз с различной конфигурацией электродов. Изучалось влияние величины рабочего отрезка $l_{\text{раб}}$ и режима работы линз (с ускорением или торможением частиц после среднего электрода) на ионно-оптические и эксплуатационные характеристики зондовой системы. Исследования показали, что с ростом $l_{\text{вых}}$ диаметр зонда увеличивается, а плотность тока в нем уменьшается как для одиночных, так и для иммерсионных линз. Параметры исследованных линз приведены в таблице.

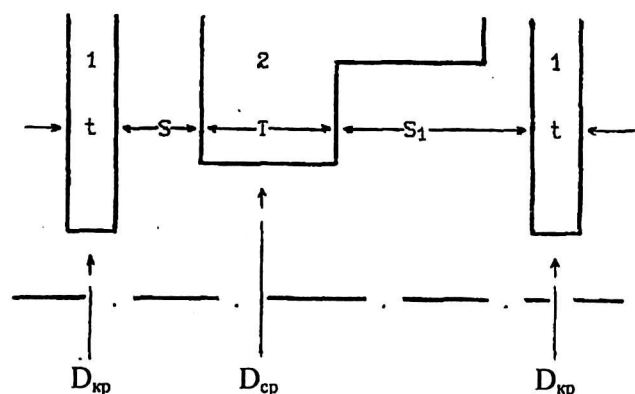


Рис. 3. Схема одиночной линзы и используемые при моделировании обозначения геометрических размеров линз

№ линзы	S/D_{cp}	T/D_{cp}	$S_{\text{cp1}}/D_{\text{cp}}$	$D_{\text{кр}}/D_{\text{cp}}$	t/D_{cp}
1	1,0	1,0	5,67	1,0	1,0
2	1,0	1,25	3,0	1,0	0,2

При расчетах ИОС использовались данные, характеризующие источник ионов: яркость источника $b = 1 \cdot 10^6$ А/см²·ср, радиус источника $r_{\text{и}} = 0,25$ мкм, разброс ионов по энергиям $\Delta U = 14$ эВ, угловая интенсивность $\Omega = 20$ мкА/ср при потенциале на вытягивающем электроде $U_{\text{в}} = 6$ кВ, угловая апертура $\alpha = 4 \cdot 10^{-3}$ рад, ток эмиссии $I = 10$ мкА.

Из опубликованных данных известно, что в двухлинзовых установках применяют разные по конструкции ионные линзы и режимы их работы. Так, в двухлинзовой установке в качестве формирующих пучок линз используются две одиночные линзы, причем первая работает в режиме замедления, а вторая — в режиме ускорения частиц после среднего электрода. Установка позволяет формировать ионный зонд диаметром $d = 0,13-0,2$ мкм при токе $I = 7,5$ пА, при энергии ионов 50 кэВ. Двухлинзовая система, описанная в работе с первой иммерсионной линзой и второй — одиночной, позволила получить

зонд со следующими параметрами: $d = 0,03-0,4$ мкм, плотность тока $j = 0,1-3,0$ А/см². В установке, работающей с общим ускоряющим напряжением $U = 100$ кВ, зонд формируется диаметром $d = 0,07$ мкм с током $I = 50$ пА. Обе линзы работают в режиме одиночных линз. Система работает с образованием действительного изображения между линзами. В двухлинзовой системе первая линза — четырехэлектродная иммерсионная, вторая — одиночная. В ионно-оптической системе использован телескопический ход лучей. При рабочем отрезке второй линзы до 50 мм удалось получить зонд диаметром $d = 0,01$ мм, током $I = 0,5$ пА и плотностью тока $j = 6$ А/см².

Нами проведены исследования двух двухлинзовых ионно-оптических систем, состоящих из одиночных линз, работающих при ускоряющем напряжении до $U = 60$ кВ. В первой системе обе линзы (объективная и проекционная) — это линзы № 1 в таблице, во второй — обе линзы № 2. Диаметр средних электродов первой линзы $D_{\text{cp}} = 3$ мм, диаметр средних электродов второй линзы $D_{\text{cp}} = 10$ мм, $l_{\text{вых}} = 70$ мм. Потенциал вытягивающего электрода $U = 6$ кВ, потенциал на выходе из первой линзы $U_1 = 20$ кВ.

На рис. 4 представлены зависимости плотности тока в пучке j от потенциала среднего электрода первой (объективной) линзы U_{cp1} (для первой ионно-оптической системы), а на рис. 5 — значения радиуса зонда R от потенциала среднего электрода первой (объективной) линзы U_{cp1} для той же ионно-оптической системы. На графиках обозначены режимы работы с расстоянием между линзами $l_{\text{м}} = 20, 30, 40$ мм, соответственно.

Аналогичные зависимости для второй двухлинзовой системы, состоящей из линз № 2 (см. таблицу), имеют тот же характер. Исходные данные те же, что и в первом случае. В интервале рассмотренных потенциалов на среднем электроде первой линзы U_{cp1} обе системы формируют мнимое изображение источника.

Результаты исследования показали, что расстояние между линзами $l_{\text{м}}$ мало влияет на токовые характеристики двухлинзовых систем, что заметно сказывается на эксплуатационных параметрах U_{cp2} . Меньшие размеры ионного зонда R и более высокие плотности тока j в нем получаются для режима работы второй линзы с ускорением после ее среднего электрода.

Очень сильна зависимость R и l от $I_{\text{вх}}$. И наконец, лучшими токовыми характеристиками обладает система из двух линз № 2. Эти исследования показали, что с помощью двухлинзовой системы с линзами № 2 можно получить диаметр ионного зонда $d = 0,17$ мкм с плотностью тока в нем $j = 2,4$ А/см². Анализ результатов моделирования показал сложную и неоднозначную зависимость токовых характеристик ионно-

зондовых систем от большого количества конструктивных и эксплуатационных параметров ее основных ионно-оптических элементов. При использовании иммерсионных линз яркость источника неинвариантна в силу закона Гемгольца — Лагранжа, и в системах с ускорением ионов на выходе линзы яркость больше, чем на входе. Поэтому в качестве первой ступени фокусировки ионного пучка в ионно-зондовой системе, целесообразно использовать иммерсионную линзу. Сильно влияет на ток положение кроссовера относительно входа в первую линзу. По этой причине выгодно как можно ближе размещать кроссовер к линзе. С точки зрения получения

максимального тока пучка на выходе ионно-оптической изображающей системы в качестве объектива ионно-зондовой установки можно использовать как иммерсионную линзу, так и одиночную. Однако размеры иммерсионной линзы меньше, чем у одиночной. Существенное влияние оказывает распределение величины потенциала на выходном электроде первой и второй линз ионно-оптической системы (ИОС). Для улучшения токовых характеристик системы более выгодна работа первой линзы в режиме ускорения. Вторая линза может работать как в режиме иммерсионной, так и одиночной линзы.

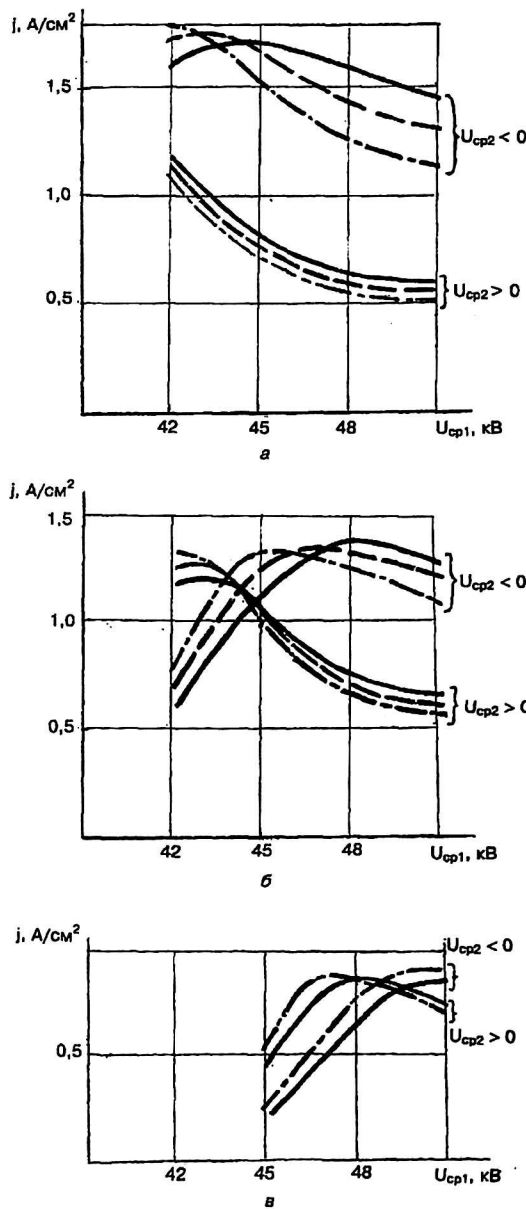


Рис. 4. Зависимости плотности тока в пучке ионов j от потенциала среднего электрода первой (объективной) линзы U_{cp1} для двухлинзовой системы, состоящей из линз № 1, параметры которых представлены в таблице: а — $l_{Bx} = 10$ мм; б — $l_{Bx} = 15$ мм; в — $l_{Bx} = 20$ мм

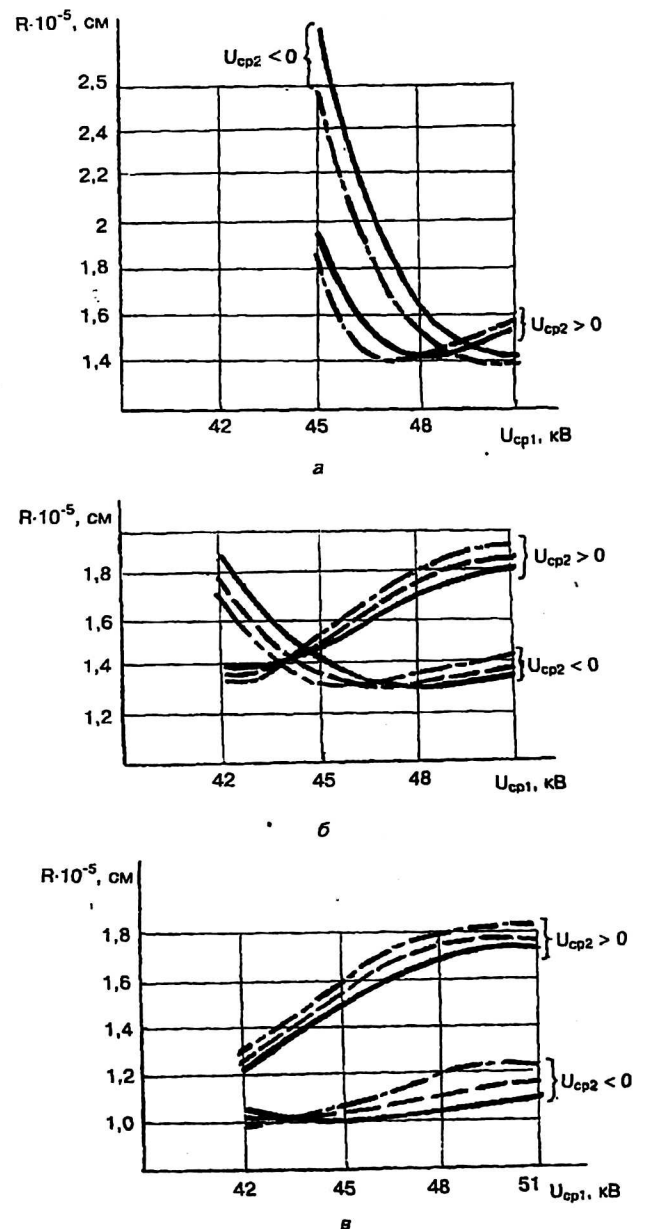


Рис. 5. Зависимости радиуса зонда R от потенциала среднего электрода первой (объективной) линзы U_{cp1} для двухлинзовой системы, состоящей из линз № 1, параметры которых представлены в таблице: а — $l_{Bx} = 10$ мм; б — $l_{Bx} = 15$ мм; в — $l_{Bx} = 20$ мм

Исследование показало, что существенного выигрыша в токовых характеристиках не имеет ни одна из них. Иммерсионный режим имеет другое преимущество — он позволяет существенно повышать энергию фокусируемых ионов. Расстояние между линзами ИОС при работе первой линзы в режиме мнимого изображения значительного влияния на общие характеристики ИОС не оказывает. При работе, когда первая

линза создает действительное изображение между линзами, это расстояние начинает влиять существенно. Более выгоден режим с фокусировкой промежуточного кроссовера возможно ближе к выходному электроду первой линзы, расстояние от кроссовера до второй одиночной линзы зависит от рабочего расстояния, размеров и допустимых потенциалов на ее среднем электроде, и тем меньше, чем меньше рабочее расстояние.

Ion-optic systems for ion-beam technological equipments

B. N. Vasichev

Moscow State Institute of Electronics and Mathematicians (Technical university), Moscow, Russia

G. I. Fatiyanova

The Research Institute for Electron and Ion Optics, Moscow, Russia

New technology be in need of new special ion-beam equipment. This ion-beam equipment must have characters corresponding new technology. Characters ion-beam equipment depend on characters ion-optic systems cus systems and the rest function elements. In this report give an count of analysis traectorys ion from ion sourses small diametr and in electrostatic focus system.

* * *