

УДК 537.533

## Особенности выбора ионных источников с холодным катодом для точной ионно-лучевой обработки полупроводниковых структур

А. Н. Козлов, А. И. Зайцев, А. Е. Даниловский, А. М. Филачев

ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион" — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

*Для ионно-лучевой обработки полупроводниковых структур наиболее перспективны ионные источники с диаметром пучка 100 и 200 мм. Рассмотрены конструктивные особенности ионных источников с холодным катодом. Даны рекомендации по использованию промышленных ионных источников с холодным катодом типа "Радикал", Ион-2, Ион-3, Ион-4, Ион-Ф и др.*

Для точной ионно-лучевой обработки полупроводниковых структур наиболее перспективны ионные источники, формирующие пучки диаметром 100 и 200 мм [1—7]. Основная задача таких источников — обеспечение высокой равномерности плотности тока по сечению пучка, а также получение заданной энергии ионов. Кроме того, эти источники должны обеспечивать достаточную плотность ионного тока и не вносить примеси в поверхность обрабатываемой подложки. Желательно, а в большинстве случаев просто необходимо, получение ионов активных газов, например кислорода, что позволяет сделать однозначный выбор в пользу ионных источников с холодным катодом. Есть несколько основных типов ионных источников с холодным катодом.

К первому типу относятся ионные источники "Радикал", Ион-2, Ион-3, Ион-Ф (рис. 1).

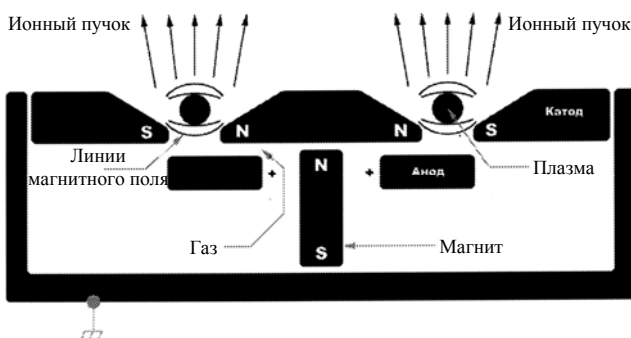


Рис. 1. Схема ионного источника "Радикал"

Эти источники построены по одному принципу. Существуют кольцевой зазор магнитопровода катода для создания магнитного поля в зазоре и анод, расположенный под магнитным зазором, для создания напряженности электрического поля. В такой configura-

ции имеем скрещенные электрические и магнитные поля, в которых горит плазма. Магнитное поле служит для удержания электронов в разрядном промежутке, что увеличивает ионизацию потока газа, прокачиваемого через разрядный промежуток. Считается, что ионы, вылетевшие из разрядного промежутка, имеют энергию, равную уровню напряжения электрической эквипотенциали, с которой они вышли. Эта область электрических эквипотенциалей, на которых зарождаются ионы, определяется прохождением сквозь них силовых линий магнитного поля. С повышением величины магнитного поля уменьшается радиус орбиты электрона, удерживаемого в этом поле. Тем самым уменьшается область ионизации газа в разрядном промежутке, но плотность ионизации повышается за счет увеличения времени нахождения электрона в этой области. Чем меньше область ионизации, тем меньше разброс по энергиям имеют ионы. Таким образом, траектории ионов и конфигурация ионного пучка в основном определяются силовыми линиями электрического поля, а энергия ионов — областью ионизации, которая определяется магнитным полем. В таких ионных источниках ионный пучок отражает разрядный промежуток кольцевой формы. Ионный источник "Радикал" имеет один кольцевой разрядный промежуток и, соответственно, трубчатый пучок. Ионный источник Ион-2 имеет два соосных разрядных промежутка на диаметре 100 мм и, соответственно, два трубчатых пучка на этой площади.

Для повышения равномерности плотности ионного тока на поверхности подложки делают трубчатые пучки расходящимися и наклонными за счет соответствующего изменения конфигурации (электродов) магнитного и электрического полей (рис. 2).

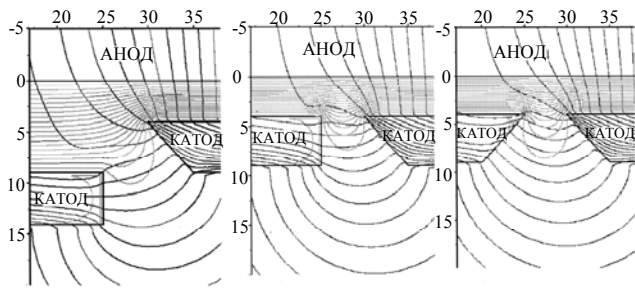


Рис. 2. Три конфигурации электродов

Ионный источник Ион-3 имеет полый катод в центре и два разрядных кольцевых промежутка соосно с ним (рис. 3, а).

Для проведения процессов ионного травления металлических пленок, оптических материалов с высокой

скоростью распыления разработан ионный источник, формирующий пучок ионов инертных и химически активных газов с энергией 500—3000 эВ и плотностью тока до  $4 \text{ mA/cm}^2$ . В основе конструкции ионного источника заложена идея аксиального мультиплицирования разрядных промежутков с выравниванием магнитной индукции в магнитных зазорах с помощью магнитных шунтов. Достижение высокой плотности ионного тока на подложке достигается за счет увеличения количества кольцевых разрядных промежутков до 4. Газ подается через анод в каждый разрядный промежуток. Диаметр отверстий и их количество рассчитаны исходя из наилучшей равномерности ионного тока.

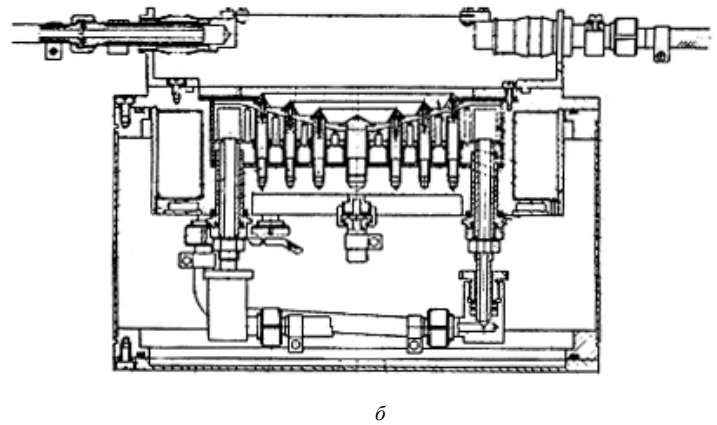
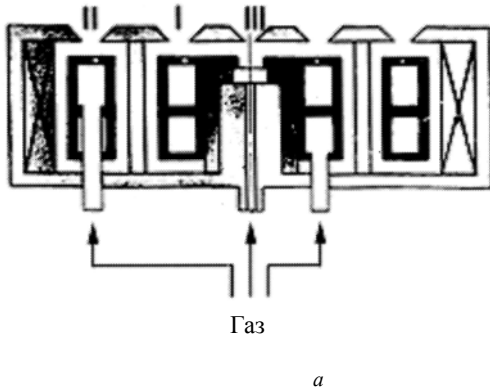


Рис. 3. Схема ионного источника:  
а — Ион-3. I, II — кольцевые разрядные промежутки, III — центральная ячейка Пеннинга;  
б — Ион-Ф (конструкция);

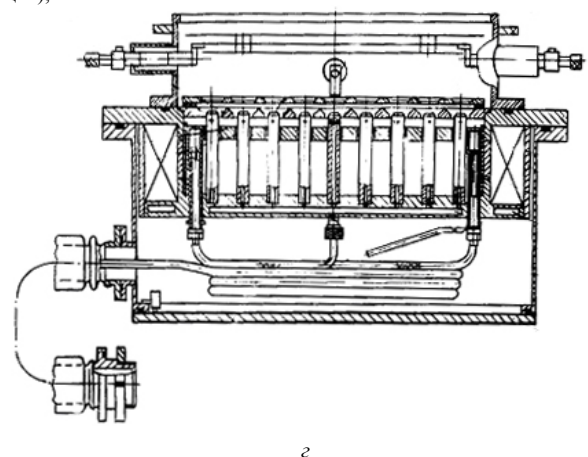
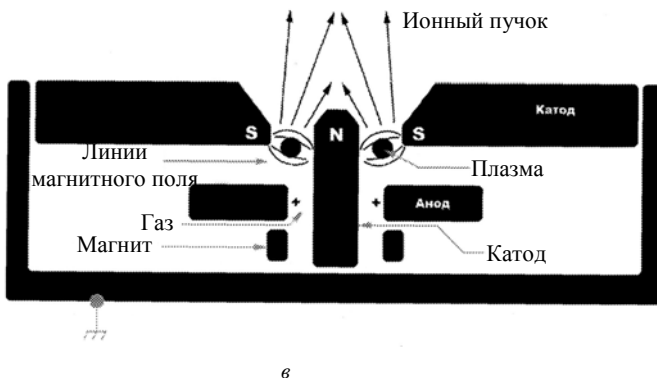


Рис. 3. Окончание:  
в — Ион-4; г — Ион-4 (конструкция)

Изготавливаются две модификации Ион-Ф: одна — с плоским анодом, другая — с конусообразным для большей фокусировки ионного пучка (см. рис. 3, б).

К основным недостаткам этого класса ионных источников следует отнести распыление кромок катода и, как следствие, наличие примеси металла в ионном пучке. Этот эффект можно снизить до минимума, увеличив

напряженность магнитного поля (за счет сильных постоянных магнитов) и уменьшив магнитный зазор катода. Это делает практически невозможным выход ионов металла в ионный пучок с нижней кромки катода.

К другому классу ионных источников относятся ионные источники типа Ион-поток, Ион-4 (см. рис. 3, в).

В этих конструкциях ионных источников с холодным катодом 37 и 64, соответственно, разрядные ячейки расположены гексагонально по поверхности (см. рис. 3, з). Магнитная система образована из корпуса, многоштырьевой матрицы и совмещенного с ней многоячейкового фланца, выполненного из магнитомягкого материала.

Магнитный поток возбуждается соленоидом и равномерно распределяется между разрядными ячейками, образуя в них магнитные поля с одинаковым значением магнитной индукции.

Анодная матрица расположена между дном источника и многоячейковым катодным фланцем и имеет отверстия, через которые проходят штыри магнитной системы. Поддача рабочего газа в области разряда осуществляется через отверстия в штырях магнитной системы, и газ распределяется равномерно по каждой разрядной ячейке.

В таких ионных источниках мы имеем область горения разряда, также определенную скрещенными магнитным и электрическим полями. Из этого условия следуют, соответственно, траектории ионов, определяемые силовыми линиями электрического поля. Из картины силовых линий электрического поля следует, что ионные пучки имеют конусную форму и на определенном расстоянии перекрещиваются, а ионы испытывают соударения. К недостаткам этого класса ионных источников следует отнести большой угол падения ионов на подложку, что делает невозможным получение вертикальных структур, а также распыление катодных электродов и попадание примеси металла в ионный пучок.

Жестким требованиям, предъявляемым к параметрам ионного пучка, для осуществления травления полупроводниковых пластин в производстве изделий микрофотозлектроники в большей степени удовлетворяют источники ионов с холодным катодом в виде полого цилиндра (рис. 4).

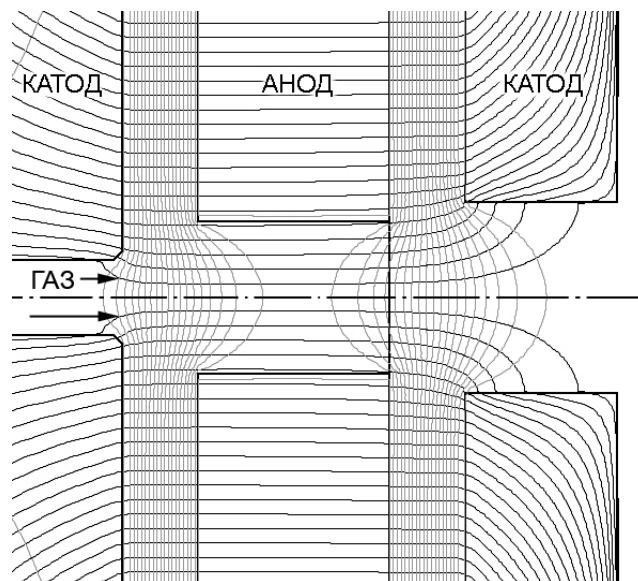


Рис. 4. Ячейка ионного источника с полым катодом

В таких источниках возможно получение ионного пучка большой площади с высокой равномерностью и достаточно малой расходимостью. Высокая равномерность достигается за счет большого числа одинаковых разрядных промежутков. Для формирования ионного пучка диаметром 100 мм необходимо создать 37 разрядных промежутков, а для формирования равномерного ионного пучка диаметром 200 мм их требуется уже 139.

В ионных источниках этого типа силовые линии магнитного поля направлены вдоль вектора напряженности электрического поля и участвуют в удержании электронов в разрядном промежутке, значительно повышая степень ионизации проходящего сквозь разрядный промежуток газа. Степень влияния магнитного поля на формирование ионного пучка минимальна. Траектории движения ионов (рис. 5), вылетевших из разрядного промежутка, имеют малый угол разброса на обрабатываемую подложку. Для оценки диаметров отверстий в катодных матрицах и определения толщины анода была решена траекторная задача движения электронов в разрядном промежутке ионного источника.

#### Литература

1. Козлов А. Н., Смольянинов В. Д., Еремин А. П., Филачев А. М. Устройство контроля профиля пучка заряженных частиц// Прикладная физика. 2002. № 3. С. 100—104.
2. Козлов А. Н., Смольянинов В. Д., Еремин А. П., Филачев А. М. Система контроля энергетического спектра ионных пучков// Там же. С. 105—109.
3. Еремин А. П., Смольянинов В. Д., Филачев А. М. Ионные источники для технологического ионно-плазменного оборудования// Там же, 1997. № 2. С. 18—24.
4. Габович М. Д. Физика и техника плазменных источников ионов. — М.: Атомиздат, 1972.

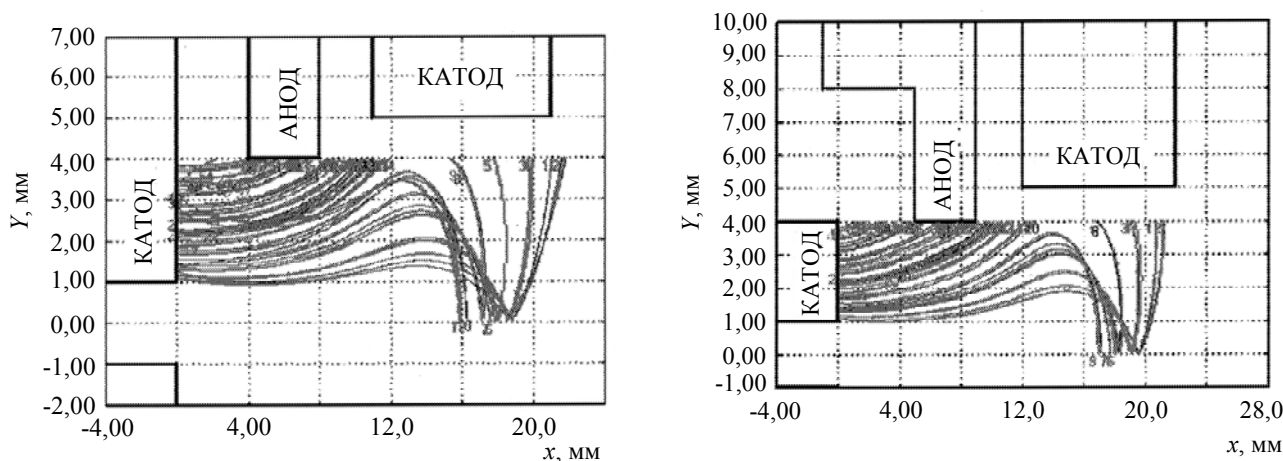


Рис. 5. Результаты расчета траекторий электронов в разрядном промежутке ионного источника с полым катодом

Канал подачи газа в нижней катодной матрице сделан узким и глубоким, что практически исключает попадание ионов металла в ионный пучок. Внешняя катодная матрица имеет отверстия большего диаметра, чем ионный пучок, что также исключает попадание примесей металла

5. Лабунов В. А., Данилович Н. Н., Громов В. В. Многопучковые ионные источники для систем ионного распыления—травления// Зарубежная эл. техника, 1984. Вып. 4.

6. Габович М. Д., Плишивцев Н. В., Семашко Н. Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. — М.: Энергоиздат, 1986.

7. Ворончев Т. А., Соболев В. Д. Физические основы электровакуумной техники. — М.: Высш. шк., 1967.

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2005 г.

## Design of cold-cathode ion sources for precise electron-beam processing of the semiconductor structures

A. N. Kozlov, A. I. Zaitsev, A. E. Danilovskiy, A. M. Filachev  
ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*The ion sources generating the 100 and 200 mm-wide ion beams are most promising for processing semiconductor structures. The major target of the ion sources design is to achieve better cross-sectional homogeneity of the ion beam with given energy. An ion sources should also provide sufficient intensity of the beam and avoid contamination of the substrate under processing. The possibility to produce the ions of chemically active gases is desirable or even necessary in the most cases. All these requirements unambiguously force us to choose the cold-cathode ion sources. Let us discuss several types of them.*