

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халькогениды и оксиды элементов IV группы. Получение, исследование, применение / О. А. Александрова, А. И. Максимов, В. А. Мошников, Д. Б. Чеснокова. СПб.: Технолит, 2008. 240 с.
2. Головнев Ю. Ф. Наноразмерные гетеросистемы на основе ферромагнитных металлов и полупроводников: автореф. дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2008. 32 с.
3. Алферов Ж. И. Двойные гетероструктуры: концепция и применения в физике, электронике и технологии // УФН. 2002. Т. 172, № 9. С. 1068–1086.
4. Тетерин П. Е. Исследование структурных и функциональных свойств тонкопленочных слоев монокалькогенидов редкоземельных металлов, выращенных методом импульсного лазерного осаждения: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2013. 20 с.
5. Полевые транзисторы на основе ферромагнитных гетероструктур / Ю. Ф. Головнев, Л. В. Никольская, А. В. Парамонов, М. О. Тюрина // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. Междунар. науч. конф. Минск, 2007. Т. 2. С. 16–17.
6. Капустин В. А. Аномальные явления переноса в халькогенидах европия / под ред. В. П. Жузе, И. А. Смирнова. Л.: Наука, 1977. С. 82–104.
7. Головнев Ю. Ф., Сомова Н. Ю. Магнитный экситон. Тула: Изд-во ТГПУ им. Л. Н. Толстого, 2014. 207 с.
8. Звездин А. К., Мищенко А. С., Хвальковский А. В. Вольтамперные характеристики спинового полуметаллического транзистора // ЖЭТФ. 2003. Т. 73, вып. 4. С. 53–58.
9. Сомова Н. Ю. Характеристики спинового полевого транзистора // Исследовательский потенциал молодых ученых: взгляд в будущее: сб. материалов XI Региональной науч.-практ. конф. аспирантов, соискателей, молодых ученых и магистрантов. Тула, 2015. С. 293–295.

Yu. F. Golovnev, D. A. Nurguleev
Tula State Lev Tolstoy Pedagogical University

E. V. Maraeva
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

SPIN TRANSISTOR BASED ON HETEROSTRUCTURES EuO–SrO

A model of the spin FET based nanoheterosystems EuO–SrO, in which the ferromagnetic semiconductor nanolayers will be co-directed magnetized by the exchange interaction, the analysis of the main characteristics of the model of the spin transistor shown the values obtained for the slope parameters and performance.

Spin transistor, ferromagnetic semiconductors, superlattices EuO–SrO

УДК 621.38

Е. В. Крылова, В. В. Овчинников
Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)

Влияние конструкции катода имплантера на сортовой и зарядовый состав ионного пучка

Показано, что применяя различные конструкции составных катодов с элементами с большой разницей в атомных массах и управляя временем горения дуги и тем самым регулируя количественное соотношение между имплантируемыми ионами, можно обеспечить равномерное легирование мишени на глубину до 450...600 нм.

Катод, имплантер, ионная имплантация, многокомпонентные пучки, сорт ионов, зарядность ионов

Использование многоэлементных катодов в ионной имплантации в ряде случаев также позволяет осуществить высококонцентрационное легирование приповерхностных слоев материала. Подбором определенной композиции катода, режимов горения дуги и ускоряющего напряжения

ионного источника можно реализовать такие условия для формирования ионного потока, когда ионы одного элемента композиции имплантируются на небольшую глубину и сосредотачиваются непосредственно в поверхностном слое, а ионы других элементов проникают на значительно большую глубину.

При ионной имплантации состав плазмы дуги и, как следствие этого, сортовой состав получаемого пучка, полностью определяется материалом катода имплантера. Для практических целей необходимы полиионные многокомпонентные пучки [1], [2]. Применение полиионных пучков, полученных при использовании в качестве материала катода монотектического сплава Cu–Pb, позволяет существенно повысить глубину проникновения ионов в мишень.

При этом генерируются ионные пучки, в которых зарядовые спектры каждого из компонентов катода заметно отличаются от зарядовых спектров, полученных с соответствующих однокомпонентных катодов. Это дает возможность регулировать в определенных пределах *зарядовое распределение* ионов в пучке. В то же время такие катоды не позволяют регулировать количественное соотношение между генерируемыми ионами различных элементов, что представляется существенным их недостатком.

Формирование ионного потока с регулируемым элементным составом является сложным процессом, требующим самостоятельных исследований как в подборе композиции катода и технологии его изготовления, так и в отработке режимов имплантации.

В данной статье приведены результаты исследований особенностей многоэлементной ионной имплантации в частотно-импульсном режиме с использованием композиционных катодов системы Cu–Pb.

Композиция Cu–Pb удачно сочетает набор элементов, которые используются для ионного легирования поверхностного слоя материалов с целью улучшения физико-механических свойств поверхности и повышения служебных характеристик изделий. В то же время остаются проблематичными высокодозовая имплантация ионами меди и свинца с обеспечением глубоких легированных слоев и создание слоистой структуры имплантированного слоя.

Измерение зарядового распределения ионов осуществлялось с помощью магнитного масс-

сепаратора (GSI) и времяпролетного спектрометра (LBNL). В обоих случаях из плазмы ионы ускорялись напряжением 40 кВ с помощью трехэлектродной многоапертурной системы извлечения. Для исключения влияния длительности импульса дуги все измерения зарядового распределения ионов осуществлялись через каждые 100 мс после зажигания разряда. В процессе измерений давление остаточного газа в рабочей камере установки поддерживалось на уровне 10^{-5} мм рт. ст.

Исследования проводили на установке ионной имплантации с источником ИГМИ-50, работающим в импульсном режиме и способным генерировать полиэнергетические пучки ионов металлов. Облучение проводилось импульсными пучками ионами меди и свинца. Средний ток пучка составлял 0.1 А, длительность импульса 300 мкс, частота следования импульсов 17 Гц.

Изучение элементного состава поверхностного слоя катодов и имплантированных образцов, а также профилей имплантированных ионов осуществлялось методом масс-спектрометрии вторичных ионов на установке «Physical Electronics» PHI-6600 SIMS System, позволяющей проводить послойный анализ с разрешением по глубине 30...40 А и элементной чувствительностью на уровне 10^{-3} ... 10^{-4} ат. % в диапазоне масс 1...250 а. е. м. В процессе послойного анализа при непрерывном распылении исследуемой поверхности зондирующим ионным пучком аргона с энергией 7 кэВ при плотности тока 0.1...0.12 мА/см² регистрировались одновременно токи вторичных ионов меди I_{Cu} и свинца I_{Pb} .

При исследовании профилей распределения имплантированных ионов и перераспределения ионов железа поверхность образца бомбардировалась ионами кислорода O_2^+ с ускоряющим напряжением 7 кВ, ток пучка ионов составлял 300 нА, время воздействия пучка ионов кислорода на поверхность образца составляло 20 мин. При воздействии пучка ионов на поверхность происходило непрерывное распыление поверхности образца, при этом масс-спектрометр регистрировал изменение относительной интенсивности излучения необходимых элементов.

В табл. 1 представлен зарядовый состав ионов пучка при использовании однокомпонентных катодов в зависимости от материала катода имплантера.

Таблица 1

Материал катода имплантера	Зарядовое распределение, %				
	1 ⁺	2 ⁺	3 ⁺	4 ⁺	5 ⁺
Cu	29	52	18	1	—
Pb	38	62	—	—	—
Sn	23	66	11	—	—

Анализ данных, приведенных в табл. 2, показывает, что при использовании одноэлементных катодов имплантера в ионном потоке присутствуют в основном двух- и однозарядные ионы.

Таким образом, при использовании однокомпонентных катодов в ионном пучке присутствует один сорт ионов с различным зарядом, преимущественно одно- и двухзарядные ионы. Глубина проникновения имплантированных ионов в этом случае невелика и зависит от зарядности и атомной массы иона. Поэтому наиболее глубокого проникновения можно достичь при бомбардировке тяжелыми ионами.

Исследовалось изменение зарядового спектра пучка в течение горения дуги при работе с составным катодом. Учитывая, что короткие пучки имеют длительность около 5 мкс, вырезание импульсов тока пучка проводилось с шагом 5 мкс. Последовательность изменения зарядового и сортового спектров пучка в течение горения дуги при использовании комбинированного катода представлена на рис. 1. Как видно из рисунка, первые 15 мкс горения дуги спектр пучка содержит только ионы меди. На диаграмме, соответствующей задержке 20 мкс, в пучке присутствуют уже как ионы меди, так и ионы свинца. Начиная с 25 мкс от начала горения дуги, в спектре присутствуют только ионы свинца.

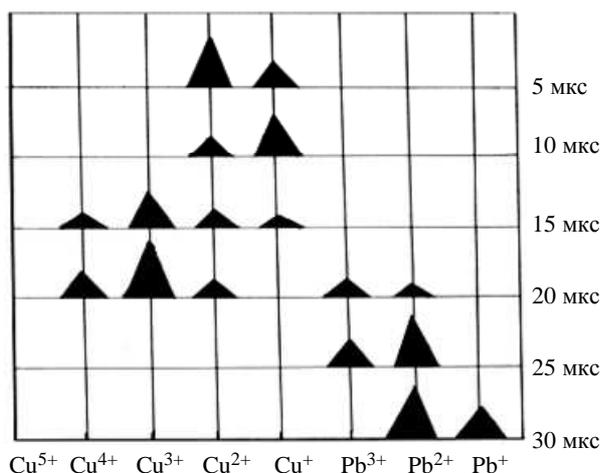


Рис. 1

Полученный результат можно объяснить направленным движением катодного пятна от периферийных участков составного катода к его

центру. Следовательно, можно утверждать, что катодное пятно переходит с более тугоплавкого металла на менее тугоплавкий. При этом обратного перехода не наблюдается.

Объясняется это тем, что дуге энергетически выгоднее гореть на менее тугоплавкой поверхности. Действительно, вне зависимости от того, на какой поверхности в данный момент горит дуга, ток дуги остается постоянным, так как для питания разряда дуги используется модулятор со стабилизацией тока дуги. При этом падение напряжения на дуге для менее тугоплавкого материала будет меньше, чем для более тугоплавкого металла. Наличие данного скачка напряжения на дуге во время перехода катодного пятна с меди на свинец подтверждается наличием в этот момент в зарядовом спектре пучка ионов Pb³⁺, которые затем исчезают из спектра, т. е. в этот момент падение напряжения на дуге больше, чем при дальнейшей работе со свинцовой поверхностью.

Следует отметить, что при работе с чисто свинцовым катодом ионы Pb³⁺ наблюдались только в течение поджигающего импульса, в то время как в полученных результатах они наблюдаются уже после окончания этого импульса.

С использованием полученных результатов была выполнена оценка наименьшей скорости движения катодного пятна. На основе предположения, что катодное пятно базируется на кромке катода в точке, наиболее приближенной к свинцовому вкраплению, и с учетом, что на осциллограмме, соответствующей задержке 25 мкс, нет ионов меди, минимальная скорость движения катодного пятна равна 18 м/с. Необходимо отметить, что данное значение получено исходя из предположения прямолинейного движения катодного пятна от места формирования до свинцовой вставки.

Наблюдение за перемещением катодного пятна дуги показало, что при использовании составного катода имплантера катодное пятно в основном перемещается по радиусной части диска катода с его периферийной части в центральную часть. На рис. 2 показан след от перемещения катодного пятна дуги по поверхности катода установки для ионной имплантации при использовании составного катода с центральной лункой.



Рис. 2

При использовании составного комбинированного катода с кольцевой канавкой в плазме ионного пучка присутствуют ионы как свинца, так и меди. Изменение зарядового и сортового спектров пучка в течение горения дуги при использовании комбинированного катода с кольцевой вставкой показано на рис. 3. Как видно из рисунка, первые 10 мкс горения дуги спектр пучка содержит только ионы меди.

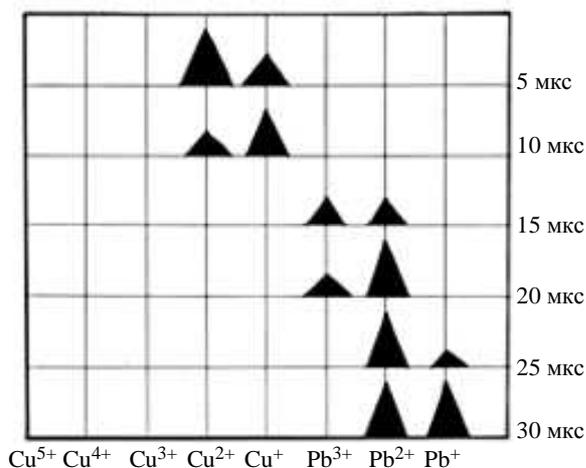


Рис. 3

Начиная с 15 мкс в ионном пучке присутствуют только ионы свинца. Такое положение сохраняется до окончания длительности импульса.

Наблюдение за перемещением катодного пятна дуги показало, что при использовании составного катода имплантера с кольцевой канавкой катодное пятно перемещается по радиусной части диска катода с его периферийной части к кольцевой канавке, а начиная с 15 мкс и до завершения импульса тока катодное пятно дуги перемещается вдоль кольцевой канавки. На рис. 4 показан след перемещения катодного пятна дуги по поверхности катода установки для ионной имплантации при использовании составного катода с кольцевой канавкой.

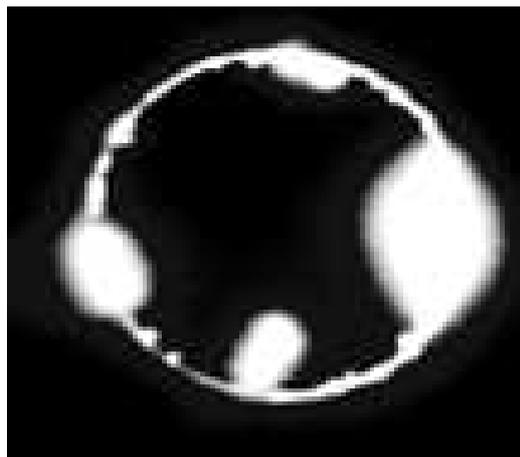


Рис. 4

Использование катодов с канавкой шириной 6 мм по радиусу диска показало, что с самого начала поджигающего импульса тока и до его завершения в спектре ионного пучка отсутствуют ионы меди. Наблюдается присутствие ионов Pb^{2+} и Pb^+ . На рис. 5 показано изменение зарядового и сортового спектров пучка в течение горения дуги при использовании комбинированного катода

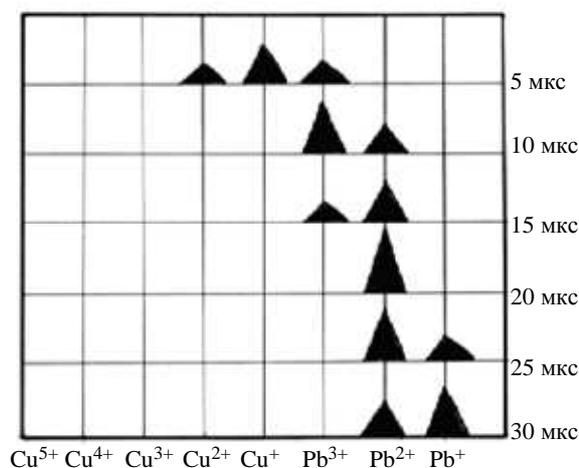


Рис. 5

Наблюдение за перемещением катодного пятна дуги показало, что при использовании составного катода имплантера с канавкой по радиусу диска катода катодное пятно перемещается вдоль канавки с периферийной части катода к его центру. На рис. 6 показано перемещение катодного пятна дуги по поверхности катода установки для ионной имплантации при использовании составного катода с радиусной канавкой. В этом случае наблюдается переход процесса от имплантации двумя сортами ионов к имплантации одним сортом ионов – ионами свинца.

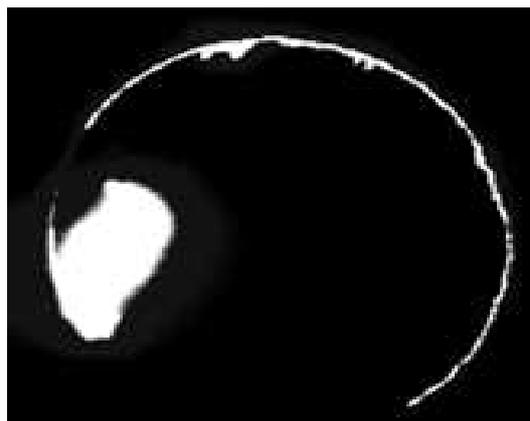


Рис. 6

Интересные результаты были получены при использовании комбинированного катода с треугольной вставкой вдоль радиуса диска катода.

В первые 5 мкс горения дуги от начала поджигающего импульса тока в спектре ионного пучка отмечается довольно широкий набор ионов меди и свинца по зарядности. Изменение зарядового и сортового спектров пучка в течение горения дуги при использовании комбинированного катода приведено в соответствии с рис. 5. Отмечается присутствие ионов Cu^+ , Cu^{2+} и Pb^{3+} . В последующие 5 мкс (10 мкс от начала поджигающего импульса тока) отмечается усложнение спектра ионного пучка в целом. Можно отметить появление в спектре пучка наряду с ионами Cu^+ , Cu^{2+} , Pb^{3+} ионов Cu^{3+} , Cu^{4+} , Pb^{2+} . Через 15 мкс после начала горения дуги наблюдается достижение своего максимума по содержанию ионами Cu^{3+} и Pb^{3+} . В последующие 5 мкс имеет место исчезновение из спектра ионного пучка ионов Cu^{3+} . Через 25 мкс от начала поджигающего импульса тока в спектре пучка присутствуют только ионы Pb^{2+} и Pb^+ .

Отмеченный характер изменения сортового и зарядового спектров ионного пучка можно объяснить тем, что диаметр активного пятна дуги (примерно 3 мм) в первые 15 мкс превышает ширину треугольной вставки и в излучающую область катода, помимо меди и свинцовой вставки, попадает граница между указанными материала-

ми. Начиная с 25 мкс активное пятно дуги полностью размещается в пределах треугольной вставки, что отражается на сортовом составе ионов в пучке. Полученные результаты позволяют предположить важность процессов, протекающих под воздействием катодного пятна дуги на границе перехода с одного материала на другой, для формирования сортового и зарядового спектров ионного пучка.

Для целенаправленного воздействия катодного пятна дуги на границу между двумя материалами в конструкции комбинированного катода был изготовлен катод с шириной канавки по радиусу 2 мм, т. е. диаметр катодного пятна превышал ширину вставки. В этом варианте анализом зарядового распределения ионов в пучке установлено, что общий спектр пучка смещается несколько в сторону более высоко заряженных ионов. Зарядовый спектр пучка при использовании композиционного катода с радиальной вставкой шириной 2 мм приведен в соответствии с табл. 2.

Полученные результаты можно объяснить направленным движением катодного пятна от периферийных участков составного катода к его центру. Следовательно, можно утверждать, что катодное пятно переходит с более тугоплавкого металла на менее тугоплавкий металл. При этом обратного перехода не наблюдается.

Объясняется это тем, что дуге энергетически выгоднее гореть на менее тугоплавкой поверхности. Действительно, вне зависимости от того, на какой поверхности в данный момент горит дуга, ток дуги остается постоянным, так как для питания разряда дуги используется модулятор со стабилизацией тока дуги. При этом падение напряжения на дуге для менее тугоплавкого материала будет меньше, чем для более тугоплавкого. Наличие данного скачка напряжения на дуге во время перехода катодного пятна с меди на свинец подтверждается наличием в этот момент в зарядовом спектре пучка ионов Pb^{3+} , которые затем исчезают из спектра, т. е. в этот момент падение напряжения на дуге больше, чем при дальнейшей работе со свинцовой поверхности [3]–[5].

Таблица 2

Материал катода	Зарядовое распределение, %							
	Cu					Pb		
	1 ⁺	2 ⁺	3 ⁺	4 ⁺	5 ⁺	1 ⁺	2 ⁺	3 ⁺
Cu	29	52	18	1	–	–	–	–
Pb	–	–	–	–	–	38	62	–
Комбинированный катод	2	20	11	5	–	14	48	–

Следует отметить, что при работе с чисто свинцовым катодом ионы Pb^{3+} наблюдались только в течение поджигающего импульса, в то время как в полученных результатах они наблюдаются уже после окончания этого импульса. Можно отметить, что помимо моделирования процессов, происходящих в полиэнергетическом пучке, составные катоды с резкой границей пригодны для практического применения при ионной имплантации конструкционных материалов. Так, применяя различные конструкции составных катодов с элементами с большой разницей в атомных массах, управляя временем горения дуги и тем самым регулируя количественное соотношение между имплантируемыми ионами, можно обеспечить равномерное легирование мишени на глубину 450...600 нм.

Исследование структуры имплантированного слоя осуществлялось на металлографическом микроскопе на следе после ионного травления. Структура имплантированного слоя при дозе имплантации 10^{17} ион/см² приведена на рис. 7.

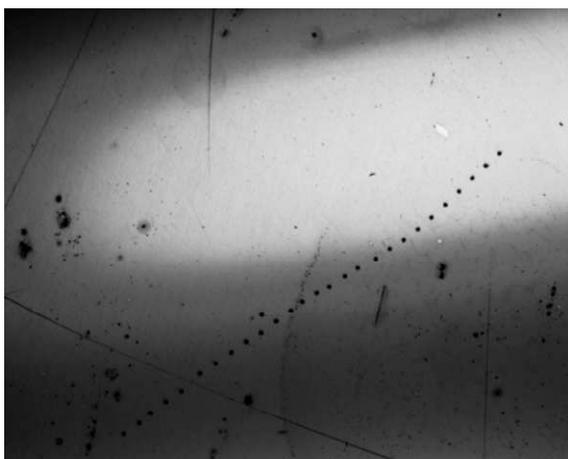


Рис. 7

Имплантированный слой состоит из нескольких структур. Дно кратера представляет собой структуру в исходном состоянии до имплантации. Слой, располагающийся выше исходного, представляет собой область, состоящую из двух фаз соединения меди с железом. Эти фазы имеют кристаллическую решетку, отличную от решетки железа меди.

Данный слой располагается не на поверхности образца, а находится в структуре кристаллической решетки стали. Указанный слой образуется в результате имплантации ионов, имеющих наиболее высокую энергию в пучке (120 и 160 кэВ), которая позволила им проникнуть в образец на большую глубину. Слой, соприкасающийся со вторым слоем, представляет собой область твер-

дого раствора меди, располагающуюся ближе к поверхности образца, находящуюся в кристаллической решетке стали. Этот слой образован от ионов, имеющих наименьшую энергию вследствие замещения атомами меди атомов железа в кристаллической решетке. При дозе имплантации $(1...2.5)10^{17}$ ион/см² имплантированный слой имеет ультрамелкозернистую, частично аморфную структуру.

При дозе имплантации $5 \cdot 10^{17}$ ион/см² ионы меди под действием градиента напряжений диффундируют по межзерненным дефектам и соединяются между собой, образуя мелкодисперсные включения.

Профили распределения имплантируемых ионов, полученные методом вторичной ионной масс-спектрометрии, подтвердили, что при увеличении дозы имплантируемых ионов меди растет их концентрация в поверхностном слое стали 30ХГСН2А, а также возрастает глубина проникновения в мишень.

Обращает на себя внимание рост концентрации углерода в поверхностном слое стали 30ХГСН2А при увеличении дозы имплантации при использовании составного катода с 10^{17} до $5 \cdot 10^{17}$ ион/см².

Исследование формирования имплантированного слоя с помощью ионного микроскопа подтвердило, что имплантированный слой является неоднородным. В части этого слоя, расположенной ближе к поверхности образца, имеются отдельные включения, по-видимому, меди, ниже которого имеется прослойка, представляющая собой фазы соединения железа и меди. Выявлено, что четкой границы между слоями не существует. Это свидетельствует о том, что слои, содержащие повышенную концентрацию меди и свинца, находятся в кристаллической решетке стали (мишени).

Исследование субструктуры имплантированного слоя проводили методом просвечивающей электронной дифракционной микроскопии. Фольги готовили из пластинок стали 30ХГСН2А после имплантации по изучаемым вариантам.

У исходных образцов стали 30ХГСН2А (неимплантированные) основным типом дислокационной субструктуры является сетчатая структура дислокационного хаоса. Дислокационная структура образцов, имплантированных ионами только меди или свинца, в основном представлена дислокационными жгутами. Субструктура образцов, имплантированных с использованием составного катода, характеризуется ярко выраженными дислокационными фрагментами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sasaki J., Brown I. G. Ion spectra of the metal vapor vacuum arc ion source with compound and alloy cathodes // *Rev. Sci. Instrum.* 1990. 61 (1). P. 586–591.

2. Габович М. Д., Плешивцев Н. В., Семашко Н. Н. Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей. М.: Энергоатомиздат, 1986. 255 с.

3. Ярных А. А., Овчинников В. В. Зарядовое и сортовое распределение ионов в пучке при использовании комбинированных катодов Cu–Pb для имплантации // *Технологии упрочнения, нанесения покры-*

тий и ремонта: теория и практика: материалы Международ. науч.-практ. конф. 15–18 апр. 2014 г. СПб: Плазмоцентр, 2014. Ч. 2. С. 241–246.

4. Bystrov Yu. A., Vetrov N. E., Lisenkov A. A. Anti-emission intermetallic coating based on platinum and zirconium // *Technical Physics Letters*. 2009. № 7. P. 145–152.

5. Bystrov Yu. A., Vetrov N. E., Lisenkov A. A. A vacuum arc plasma source with extended design: Investigations on the working regimes // *Technical Physics Letters*. 2010. № 6. P. 56–63.

E. V. Krylova, V. V. Ovchinnikov
Moscow State Engineering University (MAMI)

THE EFFECT OF CONSTRUCTION OF THE CATHODE IMPLANTER FOR LONG AND CHARGE COMPOSITION OF THE ION BEAM

In article it is shown that applying various designs of composite cathodes with elements with a large difference in atomic weights, and by controlling the time of arcing and thereby adjusting the quantitative ratio between the implanted ions, it is possible to ensure uniform doping of the target at a considerable depth.

Cathode, implanter, ion implantation, multicomponent bunches, variety of ions, the charge of ions
