

УДК 621.793.1

ИОННЫЙ ИСТОЧНИК ДЛЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНОЙ ИМПЛАНТАЦИИ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ВЫХОДНЫМ СЕЧЕНИЕМ

О.И. Терещук, В.М. Комаровская, В.Ю. Гладкий
Физико-технический институт НАН Беларуси
г. Минск, Беларусь

В данной работе рассмотрены некоторые важные технологические аспекты применения ионной имплантации для модификации поверхностей. Предложена и описана конструкция ионного источника, расширяющая возможности использования имплантации в промышленности.

The important technological aspects of the ion implantation application for surface modification are considered in this article. The ion source design expanding the possibilities of the implantation application in the industry is suggested and described.

Введение

Ионная имплантация – это процесс, при котором практически любой химический элемент может быть внедрен в приповерхностную область любого твердого тела – мишени, помещенного в вакуумную камеру, посредством пучка высокоэнергетических ионов с энергией до нескольких мегаэлектронвольт.

Существует два вида ионной имплантации: среднеэнергетичная и высокоэнергетичная. Среднеэнергетичной (известная также как низкоэнергетичная) имплантации ионов соответствует область энергий от 10 до 103 кэВ. Высокоэнергетичная происходит при энергиях свыше 103 кэВ (имеются ионные ускорители, которые обеспечивают ускорение ионов при энергиях до 106 кэВ) [1].

Ионная имплантация широко применяется для легирования полупроводников с целью создания р-n-переходов, гетеропереходов, низкоомных контактов. Ионная имплантация позволяет вводить примеси при низкой температуре, в том числе примеси с малым коэффициентом диффузии, создавать пересыщенные твердые растворы. Ионная имплантация обеспечивает точную дозировку вводимой примеси, высокую чистоту (сепарация пучка ионов по массам), локальность, а также возможность управления процессом с помощью электрических и магнитных полей.

Ионная бомбардировка и имплантация металлов и сплавов приводит к изменению структурно-фазового состояния поверхностных слоев, происходит аморфизация, улучшающая механические свойства материалов: твердость, прочность, коррозионостойкость [2].

Важной особенностью имплантации является повышение твердости и прочности приповерхностного слоя в результате его аморфизации. К примеру, прочность проволоки из материала (на железной основе), подвергнутого ионной имплантации на 1,0 ГН/м² выше прочности так называемой рояльной проволоки (стальная углеродистая проволока, отличающаяся высокой однородностью и чистотой поверхности и обладающая высокими механическими свойствами). В целом же, в сплавах на основе элементов подгруппы железа, твердость по Виккерсу (HV) может достигать значений выше 1000, а прочность – свыше 4,0 ГН/м².

При аморфизации появляется высокопрочная поверхность с низкой вязкостью и одновременно с чрезвычайно высокой вязкостью разрушения. К примеру, энергия разрыва аморфного металла составляет 110 кДж/м², тогда как для стали Х-200 это значение составляет 17 кДж/м².

Помимо этого значительно повышается коррозионная стойкость материалов, обладающих такой аморфной поверхностью: образование пассивирующей пленки из ионов в сравнении с, на-

пример, ферритными нержавеющейими сталями, ускоряется и также повышается в 1,3 раза максимальная концентрация положительных ионов [3].

Результаты

К основным элементам установок для ионной имплантации относятся ионные источники. Для электронной промышленности и металлургии используются различные конструкции установок для имплантации. Выбор типа и конструкции ионного источника определяется химическим составом генерируемых пучков, параметрами формируемого ионного пучка и областью применения.

В работе [4] была разработана конструкция ионного источника, позволяющая производить ионную имплантацию материалов и деталей микроэлектроники.

Однако данная конструкция позволяет создавать ионные пучки только узкой направленности, что приемлемо для электронной промышленности (р-п-переходов, гетеропереходы), однако для металлургии требуется возможность имплантации на более обширные по площади поверхности.

В настоящей работе предлагается конструкция ионного источника, который обладает возможностью создания как узконаправленного плотного пучка ионов, так и конусообразного потока, значительно большего по площади.

На рис. 1 представлена модель ионного источника с устройством электромагнитной воронки, позволяющей менять ее выходной диаметр: электромагнитное сопло Лавала (ЭМС Лавала).

Рассмотрим более подробно принцип действия и конструкцию модернизированного ионного источника.

Таким образом, неподвижная и изменяющаяся части воронки (2 и 3 соответственно) в сово-

купности представляют собой сопло Лавала, в котором роль «стенок», в отличие от обычного, выполняют электромагнитные поля. При максимальном раскрытии подвижной части площадь поверхности, подвергаемой имплантации, составляет до 0,004 м².

Буферный газ-носитель, проходя через сопло 1 (рис. 1), подхватывает облако ионов и последовательно пронесит их через неизменную часть воронки 2 и через изменяющуюся 3. С помощью четырех магнитоцилиндров 4 выходное сечение воронки можно изменять в широких пределах.

На рис. 2 изображена изменяющаяся часть электромагнитного сопла Лавала в разрезе, на которой она показана в состоянии максимального и минимального диаметра выходного сечения соответственно.

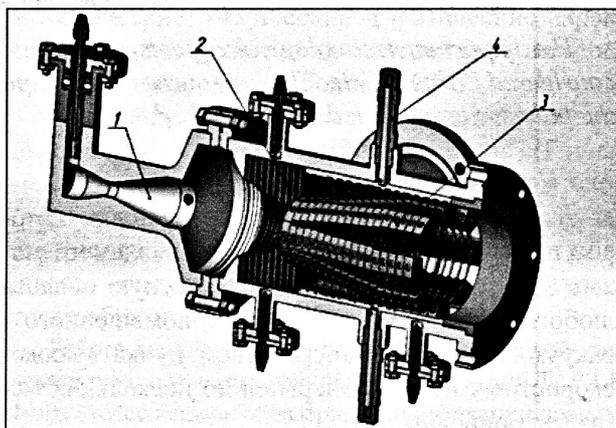


Рис. 1. Ионный источник:
1 – сопло Лавала; 2 – стационарные кольцевые электроды; 3 – изменяющаяся часть электромагнитной воронки; 4 – магнитоцилиндр

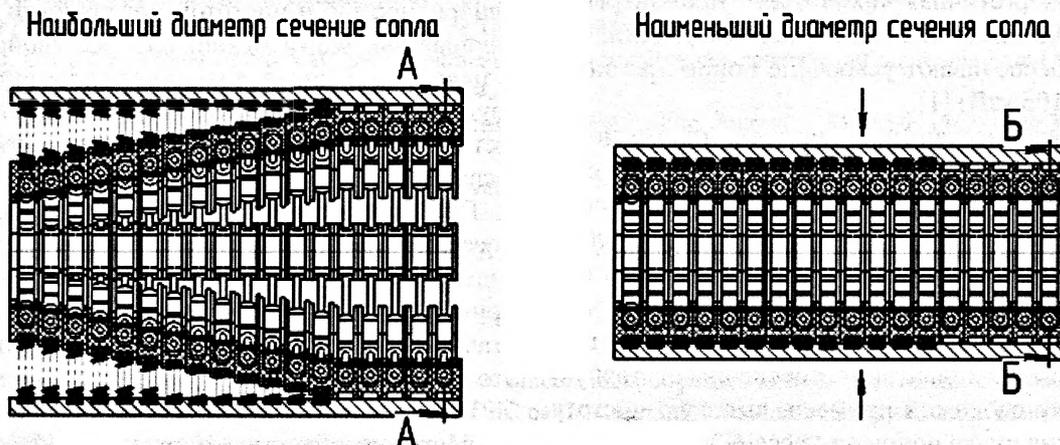


Рис. 2. Изменяющаяся часть ЭМС Лавала

Данная изменяющаяся часть набрана из восемнадцати сходящихся/расходящихся медных колец (рис. 3). Каждое кольцо состоит из восьми одинаковых секторов, которые в зависимости от площади имплантируемой поверхности, сдвигаются или наоборот, раздвигаются до ограничителя.

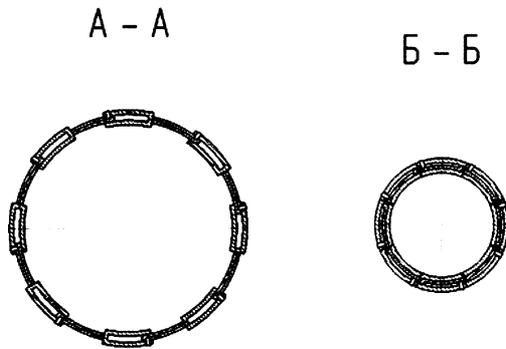


Рис. 3. Раздвижные кольца ЭМС Лавалья

В расчете электромагнитной воронки ионного источника наиболее важными параметрами являются сила Лоренца и энергия заряда. В зависимости от имплантируемого элемента рассчитать значения данных параметров возможно по следующим формулам.

Напряженность магнитного поля рассчитывается по формуле:

$$H = \frac{I}{2R}, \quad (1)$$

где I – сила тока в проводнике, А; R – радиус витка с током I , м.

Значение магнитной индукции B , Тл, вычисляется по формуле:

$$B = m_0 \times m \times H, \quad (2)$$

где m_0 – коэффициент для согласования единиц измерения, $12,5 \cdot 10^{-7}$; m – относительная магнитная проницаемость, зависящая от вещества; H – напряженность магнитного поля, А/м.

Для расчета силы Лоренца необходимо знать элементарный заряд, Кл, на который она будет воздействовать. Данный заряд зависит от заряда электрона и валентности имплантируемого вещества:

$$q = n \times e, \quad (3)$$

где n – валентность вещества; e – элементарный заряд электрона.

Сила Лоренца F , Н, рассчитывается по следующей формуле:

$$F = q \times v \times B \times \sin a, \quad (4)$$

где a – угол между векторами скорости и магнитной индукции, град;

v – скорость заряда, м/с;

q – заряд, движущийся в магнитном поле, Кл;

B – магнитная индукция, Тл.

Энергия заряда E , эВ, рассчитывается по формуле:

$$E = q \times U, \quad (5)$$

где q – заряд, движущийся в магнитном поле, Кл;

U – разность потенциалов, В.

Сила Лоренца позволяет сжимать поток ионов до пучка необходимой толщины. Как видно из расчета, при работе источника режиме сужающейся воронки данная сила зависит от силы тока, следовательно, изменяя величину подаваемого тока на кольцевые электроды можно регулировать воздействие силы Лоренца на поток, тем самым изменяя толщину пучка.

При работе источника ионов в режиме ЭМС Лавалья электромагнитное поле принимает форму сопла благодаря изменению диаметра кольцевых электродов. Данное явление происходит по причине зависимости напряженности электромагнитного поля от радиуса витка с током (в данном случае электрода) (1).

Некоторые потери в скорости ионов, а, следовательно, и энергии, происходят из-за расширения выходного сечения. Однако данные потери компенсируются увеличением скорости выходного потока ионов. Увеличение скорости выходного потока обусловлено процессами, проходящими в сопле Лавалья при истечении газов (именно для обеспечения эквивалентности действия законов истечения из сопла газового потока и потока ионов, применяется конструкция ЭМС Лавалья). В этом случае роль металлических стенок для ионов принимает на себя электромагнитное поле [5].

Выводы

Данный источник позволяет эффективно использовать возможности ионной имплантации в сфере промышленности, где требуется точная дозировка небольших количеств имплантируемого химического элемента, при этом источник переводится в режим сужающейся воронки. В этом случае ионный поток на выходе образует плотный и узконаправленный пучок.

При модифицировании поверхностей изделий, в частности металлических, источник используется в режиме сопла Лавалья. Поток ионов на выходе имеет вид расходящегося конуса с площадью $0,0035-0,004$ м². Таким образом, можно получать аморфный слой со всеми его преимуществами на больших по площади, по сравнению с микроэлектронными изделиями, поверхностях.

Список использованных источников

1. Мрочек, Ж.А. Ионная имплантация и структурно-фазовое состояние материалов / Ж.А. Мрочек, В.А. Логвин – Минск: БНТУ, 2012. – 206 с.
2. Нанотехника в технологиях машиностроения / С.Н. Григорьев [и др.]; под ред. С.Н. Григорьева – М.: Инструменты. Технология. Оборудование, 2010. – 163 с.
3. Судзуки К., Аморфные металлы / К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото, под ред. Ц. Масумото. – Москва: Металлургия, 1987. – 328 с.
4. Терещук, О.И. Источник низкоэнергетичных ионных пучков для электронной промышленности / О.И. Терещук // Инженерно-педагогическое образование в XXI веке. Материалы X Республиканской научно-практической конференции молодых ученых и студентов БНТУ; БНТУ. – Минск, 2014. – С. 156–158.
5. Мельников, С.Н. Моделирование и численные исследования параметров магнетронных распылительных систем / С.Н. Мельников, С.П. Кундас, И.В. Свадовский // Доклады БГУИР. – 2007. – №3 (19). – С.80–87.

ТЕРМОХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ НЕФТЯНЫХ ОТХОДОВ

Журавский Г.И.

Государственное научное учреждение

«Институт тепло-и массообмена им. А.В. Лыкова» НАН Беларуси

г. Минск, Беларусь

Введение

Техногенное влияние на природу к началу XXI века привело к опасности негативных изменений экологического состояния атмосферы, гидросферы, литосферы и создало одну из глобальных проблем человечества – проблему предотвращения грядущего необратимого ухудшения состояния окружающей среды.

Анализ динамики образования отходов приводит к выводу, что дальнейшее развитие производства не может осуществляться без учета экологических аспектов, связанных с накоплением отходов. На сегодняшний день возможно повторно использовать до 2/3 образующихся отходов, а в будущем, производство должно базироваться на возобновляемых и вторичных ресурсах.

Современные тенденции развития технологий переработки отходов заключаются, в первую очередь, не только в их утилизации, но и в получении продукции, из которой они образовались и снижении выбросов парниковых газов при переработке отходов.

Одним из видов крупнотоннажных отходов, которые постоянно накапливаются и представляют высокую опасность для окружающей среды, являются нефтяные отходы в виде нефтезагрязненных грунтов и нефтяных шламов.

Количество постоянно образующихся нефтяных отходов в среднем составляет около 2,5 % от количества ежегодно добываемой нефти. А количество накопившихся отходов в десятки раз превышает их ежегодное образование.

Можно выделить 6 наиболее используемых методов переработки нефтяных отходов: термические методы, химические, механические, биологические, сорбционные, методы закачки в пласт.

Каждый из этих методов имеет ряд преимуществ и недостатков друг перед другом. В тоже время необходимо отметить, что не существует одного универсального метода переработки нефтяных отходов.

Наиболее перспективным направлением для создания эффективного метода, позволяющего перерабатывать широкий спектр нефтяных отходов с высоким содержанием воды и механи-