

А. М. ЖУКЕШОВ

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО МОДИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ МАТЕРИАЛОВ ИМПУЛЬСНЫМИ ПЛАЗМЕННЫМИ ПОТОКАМИ

Рассмотрены вопросы получения и применения импульсных плазменных потоков в технологических целях. Обсуждаются состояние исследований и перспективы развития.

Первые успешные эксперименты по модификации поверхностных свойств материалов с применением импульсных ионных пучков высокой интенсивности были выполнены в начале 80-х годов. Отжиг кремния после имплантации, а также формирование силицидов в результате обработки импульсными пучками протонов с высокой интенсивностью, сгенерированных в магнитно изолированных диодах высокого напряжения, описаны в [1]. Применимость импульсных плазменных потоков BF_3 с высокой интенсивностью для формирования р-п переходов в монокристаллическом кремнии для производства фотогальванических элементов впервые продемонстрирована в 1981 г. в [2].

Главный параметр импульсной обработки поверхности твердого тела – мощность, падающая на обрабатываемую поверхность. Импульсные ионные или плазменные пучки с мощным потоком энергии порядка МВт/см^2 могут плавить приповерхностную область, при это одновременно возможно легирование жидкого слоя. Чтобы избежать повреждений, вызванных сильным кипением и абляцией массы подложки, плотность мощности потока на поверхности должна быть ограничена приблизительно 10^7 Вт/см^2 . Также известно, что для существенной модификации полупроводников необходимы дозы порядка $10^{14}–10^{15} \text{ см}^{-2}$. В случае металлов и керамики требуемые дозы достигают $10^{16}–10^{17} \text{ см}^{-2}$. В высоковольтных ионных диодах (типичная длительность импульса 10^{-7} с , энергия ионов 200–400 кэВ) дозы могут достигать максимум 10^{14} см^{-2} . Следует отметить, что при модификации металлов ионными пучками с высокими энергиями могут использоваться только тепловые эффекты (вызванные быстрым охлаждением, $10^7–10^{11} \text{ К/с}$) или эффекты, связанные с быстрым нагреванием и абляцией (ударными волнами). Интенсивные

импульсные плазменные потоки с длительностью порядка микросекунды, с энергией ионов 1–10 кэВ, плотностью энергии 1–100 Дж/см² обеспечивают дозу, которая может достигать значений за импульс более чем в 10^3 раз по сравнению с ионными пучками.

Как показали Шулов и другие исследователи [3], пучки, генерированные диодами высокого напряжения, можно успешно использовать в промышленных целях. Кроме IPD-метода осаждения, высокая интенсивность импульсных плазменных потоков не находила широкого промышленного применения, но в последнее время можно наблюдать возрастающий интерес к такому методу модификации различных материалов [4, 5].

Для получения плазменных потоков высокой интенсивности использовался классический импульсный плазменный ускоритель с коаксиальной системой электродов (КПУ). Это тип ускорителя, первоначально созданный для термоядерного синтеза, впоследствии усовершенствовался для применения в обработке материалов. Ускоритель КПУ уже был подробно описан в [6], поэтому ниже представлены лишь наиболее важные характеристики этого устройства. В КПУ, схематично представленном на рис. 1, плазма

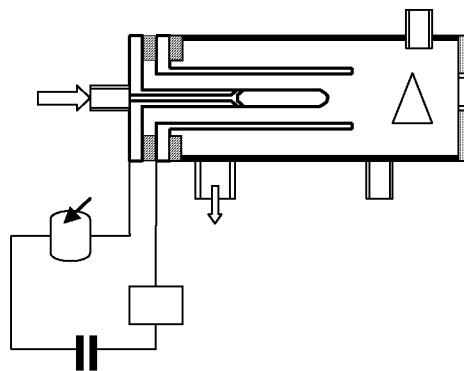


Рис. 1. Блок-схема коаксиального плазменного ускорителя

формируется при разряде низкого давления между двумя цилиндрическими электродами, когда рабочий газ в межэлектродной области достигает требуемой плотности.

Энергия для разряда поставляется от емкостного накопителя 69 мкФ, рабочий газ вводится через электродинамический газовый клапан, зафиксированный на оси электродов. Для данного устройства возможны два режима работы в зависимости созданных для разряда газа условий. Первый – режим с импульсным напуском газа, при котором регулируется время задержки между моментами запуска газа и подачи высокого напряжения на электроды. В данном режиме вариацией задержки возможно получение очень горячих, но неоднородных сгустков плазмы. Регулирование плотности энергии плазменного сгустка в определенных пределах возможно управлением напряжением зарядки батарей. Второй режим – с предварительным наполнением рабочей камеры газом до давления, при котором возможен его пробой. В этом режиме регулированием давления возможно получение сгустков практически с любой энергией и скоростью. В обоих режимах плотность энергии плазменного потока 5–90 Дж/см². В режиме с импульсным напуском при малых временах задержки имеет место эрозия дуги электродов, когда ионы и

нейтралы материала электрода присутствуют в плазме. В экспериментах, проводимых на КПУ, диаметры внешнего и внутреннего электродов были 90 и 24 мм соответственно. Высоковольтный импульс, прикладываемый на электроды, получали от емкостного накопителя энергией от 3 до 30 кДж. На расстоянии более 15 см от конца электродов получена однородность плазменных потоков 20–30 %. С точки зрения технологического режима на таких ускорителях возможны два варианта: 1 – режим с плазменной обработкой и 2 – режим с плазменным напылением.

Значительная часть наших исследований посвящена изучению обработки сталей импульсами азотной плазмы [7–9]. Показано, что высокие дозы азота (порядка 10¹⁷ см⁻²) могут быть внедрены в сталь, используя импульсы азотной плазмы с плотностью потока энергии 20–25 Дж/см². Как показал анализ спектров РФА, такие высокие дозы могут быть внедрены при использовании 3–5 импульсов обработки. На рис. 2 представлен сравнительный график исходного (образец №4) и обработанных плазмой образцов хромоникелевой стали X18H10. Обработка велась азотной плазмой с различным количеством импульсов воздействия (от 5 до 30). Можно сделать вывод, что с ростом количества обработок наблюдается явное уширение линий аустенита, а содержание

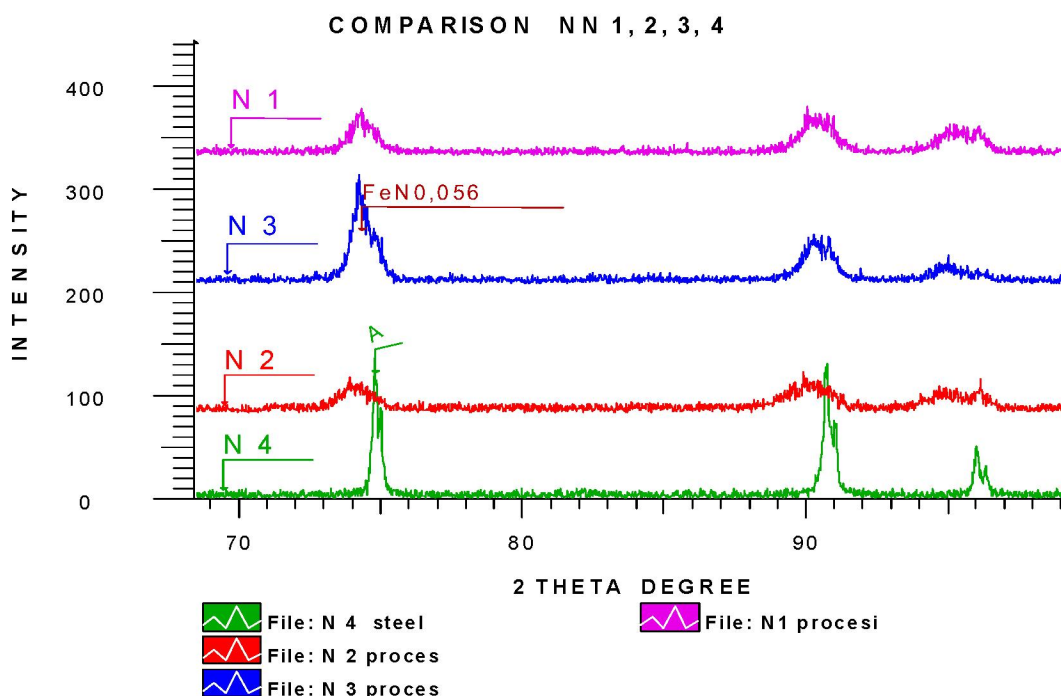


Рис. 2. Дифракционные рентгеновские спектры образцов хромоникелевой стали

нитридной фазы растет. Причина изменения структуры обработанной стали может заключаться в быстром остывании поверхностного слоя и формировании дислокационной структуры.

Введенные концентрации азота близки или даже превышают предел, достижимый после длительной ионной имплантации. В любом случае обычно это приводит к увеличению микротвердости (фактически в 2–5 раз для различных марок конструкционной стали) [8]. Значительное увеличение микротвердости и поверхностной стойкости для сталей различных марок, так же, как и в [4], связывается с формированием нитридной фазы при обработке импульсной плазмой. Увеличение микротвердости и формирование мелкодисперсной структуры должны приводить к увеличению сопротивления износа. В нашем случае для конструкционных сталей, обработанных 3–5 импульсами азота, коэффициент износостойкости увеличивался до 4 раз соответственно [9].

Шероховатость обработанной поверхности – очень важный фактор для многих практических применений. Известно, что обработка гладких твердотельных поверхностей пучками с высокой интенсивностью ведет к увеличению шероховатости поверхности. С другой стороны, на необработанных поверхностях может появляться эффект застекления или сглаживания. В нашем случае опытным путем установлено, что топология поверхности твердых материалов сложным образом зависит от величины плотности энергии и количества импульсов обработки [9]. При этом важно контролировать степень расплавления поверхности и не допускать кипения, иначе неизбежно появление блистеров, что может сильно ухудшить микроструктуру поверхности. С другой стороны, волны оплавления, формируемые при некоторых режимах, могут быть полезны для получения однородной слегка шероховатой поверхности, а также для чистки поверхности от загрязнений. Поверхностная модификация посредством металлической или газовой-металлической плазмы, возможно, очень перспективный и гибкий метод улучшения поверхностных свойств металлов и керамики. Мы показали, что для импульсного режима может быть успешно реализован вариант осаждения Cu, Al и других металлов на поверхность путем эрозии электрода ускорителя [10]. Однако это не единственный

способ напыления. Более интересными, на наш взгляд, являются возможность смешивания газовой и металлической плазмы и их совместная транспортировка до подложки. Здесь открываются большие возможности, поскольку импульсным методам присущи большие энергии ионов (до нескольких кэВ), так же, как и плотности.

Недавно нами предложен способ обработки полупроводниковых материалов в целях модификации структуры приповерхностной области [11, 12]. Несмотря на явное разрушение гладкости поверхности, в некоторых случаях удалось получить поликристаллическую структуру с малыми размерами блоков (2–10 нм). В этих же экспериментах сообщалось о получении тонких пленок (400 Å) и формировании Si_3N_4 на поверхности кремния при воздействии азотной плазмой с энергиями 10–45 Дж/см².

Для развития дальнейших исследований по плазменной обработке в НИИЭТФ представляет интерес разработка мобильного варианта импульсного плазменного ускорителя, в котором сочетались бы достоинства высокой плотности энергии и возможность получения металлической плазмы для напыления. Исследования показывают [13], что для формирования плотного, хорошо прилегающего к поверхности изделия покрытия достаточно иметь скорость металлических частиц до 600–1000 м/с. При этом конструкция ускорителя может не сильно отличаться от классической коаксиальной системы, если установить компактный источник металлических ионов непосредственно в рабочей камере. Кроме операционного режима, к прототипу такого ускорителя предъявляются определенные требования к экономичности и массогабаритным показателям. Здесь принципиальным ограничением является квадратичная зависимость плотности мощности от напряжения заряда накопителя, так как высоковольтные конденсаторы с масляным диэлектриком громоздки. По-видимому, выходом из ситуации может быть использование малогабаритных твердотельных конденсаторов большой емкости. Что касается источника металлической плазмы, здесь имеется ряд вакуумных устройств, удовлетворяющих в той или иной степени наши интересы: испарители, катодные распылители, магнетроны и, наконец, дуговые источники. В последнем случае возможно интегрирование процесса дугового испарения и импульсного

ускорения плазмы в одном цикле, однако нестабильность вакуумной дуги накладывает определенные ограничения на качество получаемых покрытий.

В представленном в этой статье обзоре перечислены различные версии поверхностной модификации импульсной плазмой. Наиболее важные применения этого метода следующие: формирование больших р-п переходов области омических контактов в кремнии, формирование диэлектрических пленок, легирование сталей азотом, объединенным с одновременной поверхностной рекристаллизацией, напыление поверхностных слоев на металлах и керамике, формирование поверхностных сплавов, предварительная обработка металлов и керамики для покрытий (чистка и промежуточные слои). Ввиду гибкости метода, что обусловлено большим выбором материалов, пригодных для обработки, и возможности обработки большой области опыт, накопленный до настоящего времени, вероятно, найдет практическое применение в ближайшем будущем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hodgson R.T., Baglin J.E., Pal R., Neri J.M., Hammer D. Ion beam annealing of semiconductors // Appl Phys Lett. 1980. N 37. P. 187-189.
2. Piekoszewski J., Gryzicki M., Langner J., Werner Z. Pulse ion implantation – new single doping technique // Phys Status Solidi. 1981. A. N 67. P. 163-167/
3. Shulov V.A., Nochovnaya N.A., Remnev G.E., Raybchikov A.I. (1997) Modification of the properties of aircraft engine compressor blades by uninterrupted and pulsed-ion beams // Surf Coat Tech 96:39–44 17.
4. Tereshin V.I. e. a. Pulsed plasma accelerators of different gas ions for surface modification // Rev. Sci. Instrum. 2002. V. 73, N 2. P. 1-3.
5. Chebotarev V.V., Garkusha I.E., Langner J. e. a. Surface structure changes induced by pulsed plasma streams processing // Problems of atomic science and technology. Series: Plasma physics. 1999. N3(3). P. 273-275.
6. Баумбетов Ф.Б., Ибраев Б.М., Жукешов А.М., Амренова А.У. Расчет и экспериментальное определение скорости плазменного сгустка в коаксиальном ускорителе // Известия НАН РК. Серия физико-математическая. 2004. №2. С. 93-97.
7. Baimbetov F.B., Ibraev B.M., Zhukeshov A.M. e.a. The study of stainless and high-carbon steels structure and surface properties irradiated by pulsed plasma beams // Contributed Papers of 4 Int. Conf. "Plasma physics and plasma technology". Minsk, 2003. P. 479-482.
8. Ибраев Б.М. Импульсная плазменная обработка нержавеющей стали // Известия НАН РК. Сер. физ.-мат. 2003. №6. С. 12-16.
9. Жукешов А.М. Изменения в структуре углеродистой и нержавеющей сталей после обработки импульсной плазмой // Вестник КазНУ. Сер. физ. 2005. №1(19). С. 35-38.
10. Ибраев Б.М., Жукешов А.М. Металлизация поверхности фторопласта методом плазменного облучения // Вестник КазГУ. 1999. №7. С. 278-279
11. Баумбетов Ф.Б., Ибраев Б.М., Жукешов А.М. Растровая электронная микроскопия поверхности обработанных импульсной плазмой полупроводников // Вестник КазГУ. 2001. №2(11). С. 33-36.
12. Баумбетов Ф.Б., Ибраев Б.М., Жукешов А.М. Обработка поверхности кремния импульсной азотной плазмой // Физика и техника полупроводников. 2002. №2, в. 36. С. 137-138.
13. Погребняк А.Д., Ильяшенко М.В., Кульментьева О.П. и др. Структура и свойства твердого сплава, нанесенного на медную подложку с помощью импульсно-плазменной технологии // ЖТФ. 2001. Т. 71, вып. 7. С. 111-118.

Резюме

Импульстік плазма ағындарының алынуы және технологияда қолдану жолдары қарастырылған. Атқарылған ғылыми жұмыстардың жағдайы мен болашағы талқыланған.

Summary

The questions of reception and application of pulse plasma flows in the technological purposes are considered. Are discussed a condition of researches and prospect of development.

НИИЭТФ,
КазНУ им. аль-Фараби,
г. Алматы

Поступила 4.09.06г.