

УДК 621.357.7

ФОРМИРОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ ВЫВОДОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ

А.А. ХМЫЛЬ, И.И. КУЗЬМАР, Л.К. КУШНЕР, Н.В. БОГУШ,
М.М. БОРИСИК, С.М. ЗАВАДСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 9 октября 2013

Исследовано влияние состава электролита и программируемых импульсно-реверсных режимов на скорость и равномерность формирования объемных серебряных выводов полупроводниковых приборов. Показано, что использование нестационарных режимов электролиза позволяет снизить их боковое разрастание и разновысотность по пластине, улучшить качественные характеристики изделий, увеличить количество приборов, получаемых на одной полупроводниковой пластине, и, тем самым, повысить производительность технологического процесса и обеспечить экономию драгметаллов.

Ключевые слова: серебряные электрохимические покрытия, нестационарный электролиз, объемные (столбиковые) выводы.

Введение

Метод электрохимического осаждения является одним из наиболее перспективных и интенсивно развивающихся при производстве трехмерных металлических структур, используемых при производстве интегральных устройств. Так, при автоматизированной сборке полупроводниковых приборов и гибридных ИМС широко применяется метод перевернутого кристалла, который позволяет без монтажной проволоки одновременно присоединить все контактные выводы кристалла к выводной металлической рамке, смонтированной на ленточном носителе, или к контактным площадкам коммутационных плат [1]. Для осуществления этого процесса требуется изготовить балочные или столбиковые выводы высотой 30–60 мкм. Эти 3D-структуры формируются на кремниевых пластинах заранее и одновременно до разделения групповой пластины. Они должны обладать высокой электропроводностью, низким контактным электросопротивлением, минимальной разновысотностью по пластине, низкими внутренними напряжениями и высокой адгезией к коммутационному подслою [1]. В качестве материалов выводов используются такие электрорадиоматериалы, как золото, серебро, медь, сплавы на основе серебра и олова.

Методика эксперимента

В качестве материала для столбиковых структур выбрано серебро, что обусловлено высокой электропроводностью, стойкостью к коррозии, хорошей паяемостью и свариваемостью, а также низкой стоимостью материала [2]. Для оптимизации параметров процесса электролиза исследовано влияние состава электролита и программируемых импульсно-реверсных режимов на скорость и равномерность осаждения объемных серебряных выводов. Исследования проводили в безцианистых электролитах серебрения: железистосинеродистом, дицианоаргентатном, пиррофосфатном, иодистом и роданистом, оптимальные составы которых выбраны в соответствии с рекомендациями [2–5].

Электроосаждение проводили с помощью программно-управляемой установки нестационарного электролиза (ПУНЭЛ) в специальной гальванической ванне (рис. 1) [6]. ПУНЭЛ обеспечивает автоматизированное управление процессом электролиза по заранее составленной программе. Принцип действия основан на формировании в нагрузке импульсного тока положительной и отрицательной полярности с помощью тиристорного выпрямителя, управление которым осуществляет микропроцессорный модуль. В ПУНЭЛ предусмотрена возможность автоматического изменения по программе формы тока (постоянный (ПТ), импульсный (ИТ), реверсированный (РТ), асимметричный и др.), его амплитуды, длительности прямого и обратного импульсов, паузы между ними, а также длительности работы установки в различных режимах. Специальная гальваническая ванна соединена с ПУНЭЛ и позволяет осаждать электрохимические покрытия на подвесках прокачиванием электролита между электродами. Она состоит из модуля управления и электрохимического модуля. В ней предусмотрены нагрев, охлаждение и перемешивание электролита, что обеспечивает высокую производительность процесса и равномерность покрытий. Детали в ванну загружаются и извлекаются после набора требуемой толщины покрытия автоматически. Температурный и токовый режимы в ванне стабилизированы.

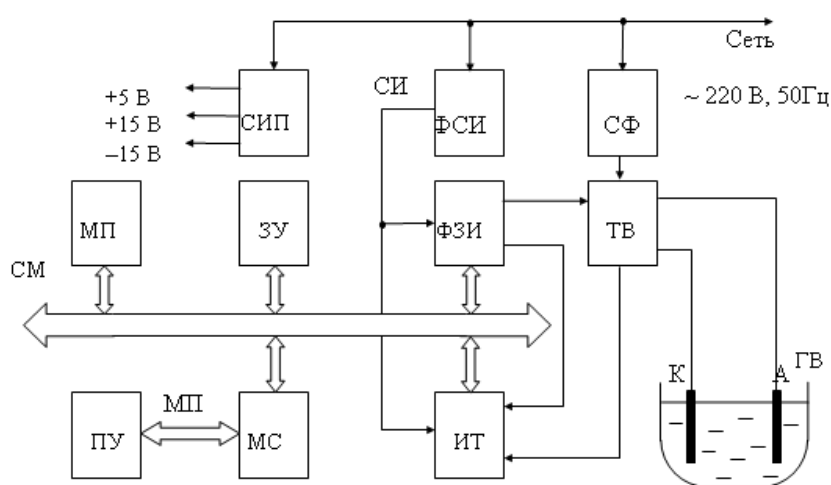


Рис. 1. Структурная схема программируемой установки нестационарного электролиза (ПУНЭЛ): сетевой фильтр (СФ), тиристорный выпрямитель (ТВ), формирователь запускающих импульсов (ФЗИ), синхрои́мпульсы (СИ), формирователь синхрои́мпульсов (ФСИ), микропроцессорный модуль (МП), системная магистраль (СМ), запоминающее устройство (ЗУ), гальваническая ванна (ГВ), измеритель тока (ИТ), пульт управления (ПУ), магистраль пульта управления (МПУ), модуль сопряжения (МС), стабилизированный источник питания (СИП)

Формирование объемных выводов проводили без перемешивания и при постоянном перемешивании электролита с использованием специально разработанной оснастки. Для обеспечения равномерного роста столбиковых структур ток постепенно увеличивался. Температура электролита 18–25 °С. Серебро осаждали на полупроводниковую подложку КЭС-0,01-1 диаметром 40 (количество контактных площадок на пластине $N = 1705$ шт.) или 60 мм ($N = 4402$ шт.), которая предварительно проходила типовые операции химической подготовки, термического окисления кремния (1200 °С), фотолитографии, вскрытия контактных окон диаметром 100 мкм, диффузии примеси, металлизации вакуумным способом непланарной (Au-Sb, ПСр–15, Ag) и планарной (V, Ag) сторон. Форма объемного вывода приведена на рис. 2, а. Проведены исследования процесса формирования объемных серебряных выводов высотой 30–50 мкм при изготовлении полупроводниковых диодов массовых серий 2Д509 и 2Д522.

Геометрические размеры выводов, входящие в уравнение (1), измеряли с помощью микроинтерферометра МИИ-4 и микроскопа Leica VMH-MOT в пяти точках каждой пластины с точностью ± 1 мкм (рис. 2, б).

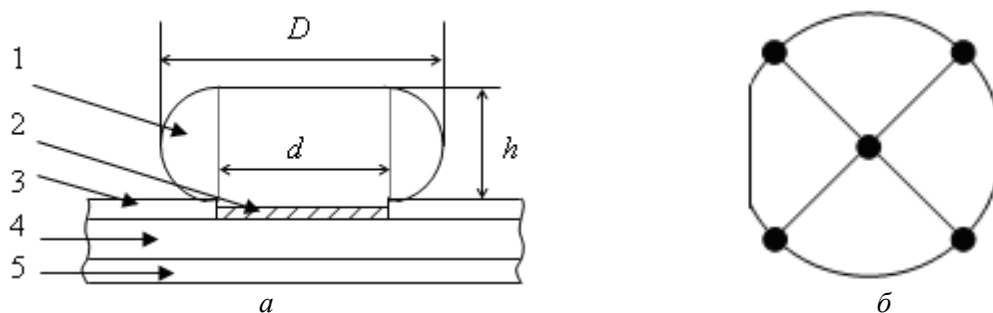


Рис. 2. Поперечное сечение структуры полупроводникового диода (а) и схема выбора объемных электродов по кремниевой пластине для измерения размеров (б): 1 – объемный вывод; 2 – металлизация планарной стороны; 3 – SiO₂, 4 – Si, 5 – защищенная лаком непланарная сторона; D – диаметр объемного вывода; d – диаметр вскрытого в фоторезистивном слое окна под объемный вывод; h – высота объемного вывода

Результаты и их обсуждение

При формировании гальваническим методом объемных выводов для изделий микроэлектроники одним из важнейших технологических параметров является коэффициент бокового разрастания

$$K_p = \frac{D-d}{2 \times h}, \quad (1)$$

где D – диаметр объемного вывода; d – диаметр вскрытого в фоторезистивном слое окна под объемный вывод; h – высота объемного вывода.

Вследствие особенностей, присущих способу формирования, на практике наблюдается значительное разрастание столбиковых выводов, что увеличивает расход дефицитных материалов, снижает количество приборов, получаемых на одной полупроводниковой пластине, а разновысотность столбиковых структур затрудняет проведение последующих технологических операций. Кроме того, большая высота выводов и длительный период их электрохимического осаждения приводят к снижению производительности, а также отражаются на качественных характеристиках изделий.

Анализ литературных источников [3, 4] показал, что использование при электроосаждении программируемых режимов нестационарного тока для формирования 3D-структур позволит снизить рассеивающую способность электролита (равномерность распределения металла по поверхности катода), приведет к преимущественному линейному росту объемных выводов и устранению вышеперечисленных технологических недостатков.

В ходе проведения исследований нами установлено, что коэффициент бокового разрастания зависит от вида электролита. В электролитах, характеризующихся повышенной поляризацией катода, эта величина максимальна (железистосинеродистый и синеродистороданистый). В электролитах, в которых серебро осаждается с низкой поляризацией, разрастание объемных выводов снижается, но качество полученных в них покрытий не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к изделиям электронной техники. С ростом плотности катодного тока для всех электролитов наблюдается снижение величины K_p . Это можно объяснить снижением поляризуемости электрода и рассеивающей способности электролита. С учетом результатов проведенных исследований по влиянию состава электролита на электропроводность, внутренние напряжения и адгезионную прочность серебряных покрытий [5–9] для получения объемных выводов был выбран дицианоаргентатный электролит серебрения следующего состава, г/л: KAg(CN)₂ – 50, KCNS – 200, K₂CO₃ – 30. Рабочая температура 19–25 °С, рН=9...10. Результаты исследований представлены на рис. 3–5 и в таблице.

Как видно из рис. 3, контакты, полученные на постоянном токе, имеют крупнокристаллическую структуру с дендритными наростами по краям и кратерами в центре

выводов, высокий (больше единицы) коэффициент бокового разрастания, уменьшающийся при увеличении плотности тока и перемешивании (таблица). Применение импульсного электролиза для формирования объемных серебряных выводов позволило существенно изменить тонкую структуру материала изделий вследствие ее формирования в течение коротких промежутков времени при высоких мгновенных значениях плотности тока. Она стала мелкокристаллической плотноупакованной с блестящей поверхностью. Одновременно улучшились геометрические характеристики выводов: уменьшились средний диаметр и величина разброса по высоте (рис. 3, б). Частота импульсного тока оказала незначительное влияние на характеристики получаемых изделий.

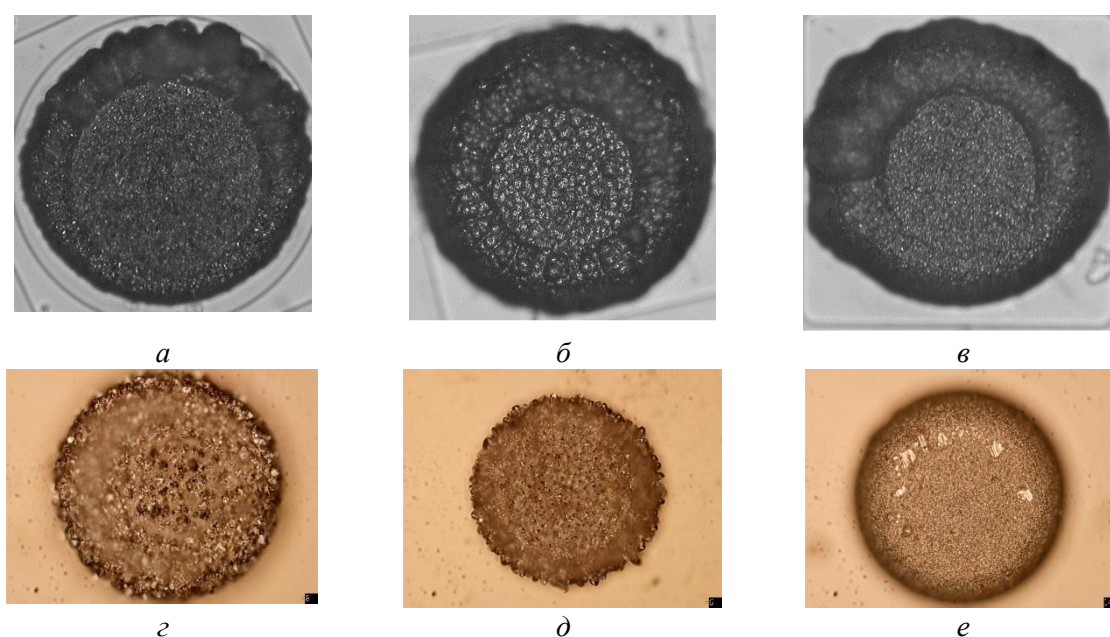


Рис. 3. Объемные серебряные выводы, полученные при осаждении без перемешивания (а, б, в) и с перемешиванием (г, д, е) электролита при различных режимах электролиза: а, г – постоянный ток; б, д – импульсный ток; в, е – реверсированный ток

Для выяснения причин улучшения качества покрытий, осажденных на импульсных токах, были изучены поляризация электродов и рассеивающая способность электролитов в условиях нестационарного электролиза [5]. На основании полученных результатов установлено, что изменение параметров импульсного тока позволяет как повышать, так и понижать рассеивающую способность электролита по сравнению с постоянным током. Увеличение плотности и скважности импульсного тока и инерционность изменения электродного потенциала существенно уменьшают поляризуемость катода и распределение тока по поверхности электродов ухудшается. Вместе с тем снижение выхода по току с ростом плотности тока приводит к увеличению равномерности распределения металла по поверхности катода. Повышение частоты также приводит к более равномерному осаждению металла.

При переходе от постоянного тока к импульсному разрастание выводов уменьшается вследствие снижения поляризуемости катода. Увеличение средней плотности импульсного тока способствует некоторому снижению величины K_p , а скважности – ее увеличению. Использование импульсного тока позволяет уменьшить размер зерна покрытий, но сохраняется разноразмерность объемных выводов по поверхности кремниевой пластины.

Технологические возможности процесса значительно расширились при формировании объемных структур с использованием реверсированных токов при одновременном совершенствовании структуры покрытий (рис. 3, в, табл.). Варьирование параметров реверсированного тока (частоты, длительности прямого и обратного импульсов, средней плотности тока) позволило также улучшить геометрические размеры контактов. С увеличением частоты от 1 до 100 Гц снижается рассеивающая способность электролита, что приводит к уменьшению в 1,5...2,5 раза коэффициента бокового разрастания и позволяет приблизить форму вывода к столбчатой и обеспечить экономию драгметалла. При увеличении плотности

реверсированного тока повышается скорость формирования объемных выводов, снижается коэффициент бокового разрастания (рис. 4, а, табл.). Уменьшение соотношения длительностей прямого и обратного импульсов ($\tau_{пр} : \tau_{обр}$) от 10:1 до 4:1 при одинаковой средней плотности тока приводит к снижению бокового разрастания выводов.

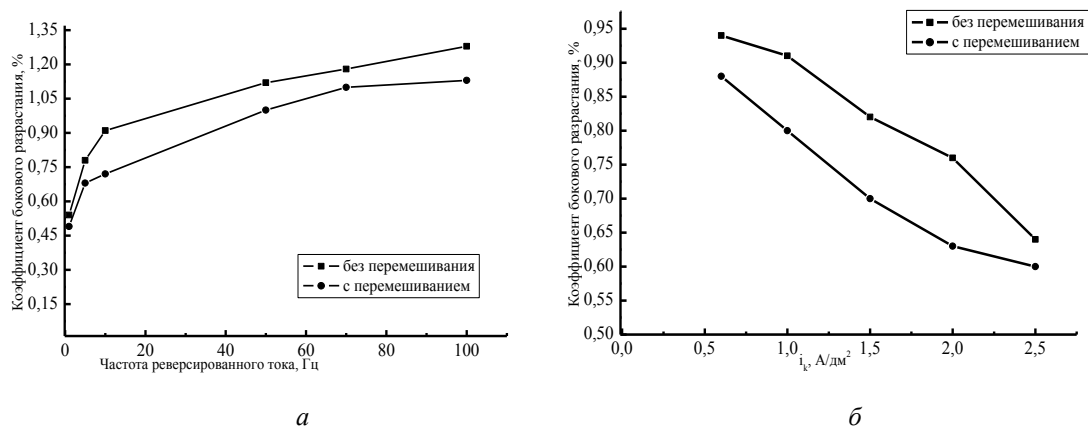


Рис. 4. Влияние частоты (а) и средней плотности реверсированного тока (б) на коэффициент бокового разрастания объемных серебряных выводов

Установленные закономерности нанесения серебряных покрытий избирательно на кремниевые пластины позволили выбрать оптимальные параметры реверсированного тока (средняя плотность тока 0,5...1,5 А/дм²; частота 1...10 Гц). Сформированные в этих условиях объемные выводы характеризуются минимальным разбросом по высоте по поверхности кремниевой пластины, низкими внутренними напряжениями и высокой адгезионной прочностью к коммутационному слою. Коэффициент бокового разрастания объемных выводов также значительно снижен по сравнению с объемными выводами, сформированными на постоянном токе.

Перемешивание электролита при осаждении на периодических токах улучшает качество выводов, при этом снижается на 15–20 % коэффициент бокового разрастания, достигается равномерный рост столбиковых структур по высоте по всей пластине (рис. 5, табл.). В промышленных условиях для обеспечения равномерности формирования выводов одновременно на 3–6 пластинах рекомендуется использовать более низкие значения средней плотности тока. Электроосаждение объемных выводов при программном ведении процесса, представляющем собой циклическое чередование различных режимов (постоянного и реверсированного тока, постоянного и импульсного, импульсного и реверсированного тока) позволяет улучшить качество выводов, но не имеет преимуществ перед использованием реверсированного тока.

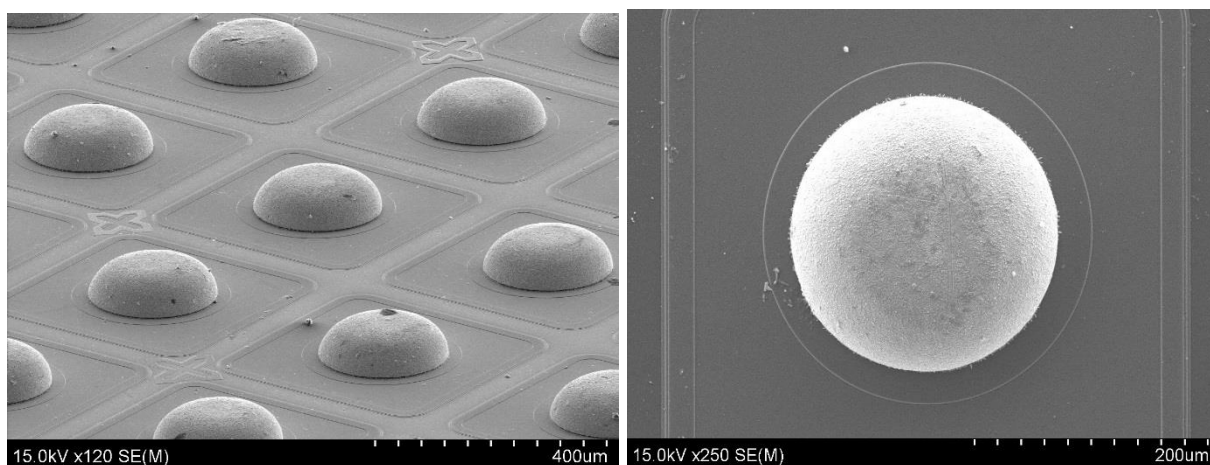


Рис. 5. Объемные серебряные выводы, сформированные на кремниевой пластине

Влияние условий формирования на качество объемных серебряных выводов

Средняя плотность тока, А/дм ²	Параметры периодического тока		Коэффициент разрастания выводов
	Импульсный ток, частота, скважность	Реверсированный ток, частота, соотношение $\tau_{пр}:\tau_{обр}$	
без перемешивания электролита			
1,0; постоянный ток			2,83
1,0	10 Гц, 1,25		1,55
1,0	10 Гц, 5		1,61
1,0		100 Гц, 4:1	1,28
1,0		10 Гц, 4:1	0,91
1,0		4,55 Гц, 10:1	0,62
1,0		1 Гц, 4:1	0,54
0,5		10 Гц, 4:1	0,94
1,0		10 Гц, 4:1	0,91
1,5		10 Гц, 4:1	0,86
2,0		10 Гц, 4:1	0,76
2,5		10 Гц, 4:1	0,64
перемешивание электролита			
0,5; постоянный ток			2,66
1,0; постоянный ток			2,50
0,5	10 Гц, 1,25		1,72
0,5	10 Гц, 5		1,72
0,5	25 Гц, 2		1,50
0,5		1 Гц, 4:1	0,80
0,5		10 Гц, 4:1	0,88
0,5		0,46 Гц, 10:1	1,26
0,5		4,55 Гц, 10:1	1,18
программный ток, перемешивание электролита			
0,5; постоянный ток		10 Гц, 4:1	1,00
0,5; постоянный ток	10 Гц, 5	10 Гц, 4:1	1,06
0,5	10 Гц, 5	10 Гц, 4:1	1,09

В результате проведенных исследований оптимизированы режимы нестационарного электролиза и разработан технологический процесс формирования объемных выводов на кремниевых пластинах для полупроводниковых приборов и гибридных ИМС. Это позволяет повысить производительность процесса и выход годных изделий, обеспечить экономию драгметаллов и электрической энергии из нетоксичного дицианоаргентатного электролита серебрения.

Заключение

Использование нестационарных режимов электролиза при электроосаждении серебряных столбиковых выводов полупроводниковых приборов позволило снизить их боковое разрастание и разновысотность по пластине, улучшить качественные характеристики изделий, увеличить количество приборов, получаемых на одной полупроводниковой пластине, и тем самым повысить производительность технологического процесса и обеспечить экономию драгметаллов.

ELECTRODEPOSITION OF SOLDER BUMP TO SEMICONDUCTOR DEVICES

A.A. KHMYL, I.I. KUZMAR, L.K. KUSHNER, N.V. BOGUSH, M.M. BORISIK, S.M. ZAVADSKI

Abstract

Using nonstationary regimes electrolysis for electrodepositing silver solder bump semiconductor blocked has reduced lateral expansion of different height on the plate, to improve the qualitative characteristics of the product, increase the number of devices produced on a semiconductor wafer, and thereby improve process performance and achieve economies of precious metals.

Список литературы

1. *Гаврилов С.А., Белов А.Н.* Электрохимические процессы в технологии микро- и нанoeлектроники. М., 2009.
2. *Спирин В.Г.* // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2005. № 2. С. 46–48.
3. *Кудрявцев Н.Т.* Электрохимические покрытия металлами. М., 1979.
4. *Ажогин Ф.Ф., Бельский М.А., Галь И.Е.* Гальванотехника. Справ. изд. М., 1987.
5. *Хмыль А.А.* Формирование тонкопленочных систем металлизации в нестационарных условиях электролиза. Дисс. ... д-ра. техн. наук. Минск, 2001.
6. *Хмыль А.А., Емельянов В.А., Мушовец И.И. и др.* // Гальванотехника и обработка поверхности. 2001. № 9 (3). С. 26.
7. *Хмыль А.А., Ануфриев Л.П., Кузьмар И.И. и др.* // Изв. Белор. инж. акад. 2002. №1 (7)/2. С. 186–188.
8. *Хмыль А.А., Кузьмар И.И., Кушнер Л.К.* // Матер. Междунар. научн.-техн. конф. «Энерго- и ресурсосберегающие технологии и оборудование, экологически безопасные технологии». Минск, 24–26 ноября 2010 г. С. 328–331.
9. *Кузьмар И.И.* Формирование серебряных покрытий с упрочняющей фазой из ультрадисперсных алмазов. Дисс. ... канд. техн. наук. Минск, 2003.