

УДК 537.525

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПУШЕК ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА В ПРОИЗВОДСТВЕ ИЗДЕЛИЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

*канд. техн. наук В.И. МЕЛЬНИК, канд. техн. наук, доц. И.В. МЕЛЬНИК  
(Национальный технический университет Украины «КПИ», г. Киев, Украина)*

*Рассмотрены результаты разработки различных типов газоразрядных электронных пушек, предназначенных для сварки в низком и среднем вакууме и для нанесения покрытий сложного химического состава. Показаны возможности использования разработанных пушек в производстве изделий электронной техники и в радиоэлектронной промышленности.*

Введение. Электронно-лучевые технологии в последние 20 - 30 лет находят широкое применение в производстве изделий радиоэлектроники и микроэлектроники. Основные возможности использования электронного луча как технологического инструмента в этих отраслях промышленности связаны со сваркой контактов и корпусов электронных изделий, нанесением металлических и диэлектрических покрытий, электронно-лучевым отжигом полупроводников. В радиоэлектронной промышленности электронно-лучевое нанесение покрытий может использоваться при изготовлении керамических высококачественных конденсаторов, при нанесении отражающих и просветляющих покрытий в производстве оптоэлектронных приборов, и в производстве печатных плат. В современной микроэлектронике возможно использование электронно-лучевого напыления тонких пленок при реализации таких технологических операций, как нанесение медных шин на полупроводниковые кристаллы в производстве высокочастотных микропроцессоров, изготовление высокочастотных транзисторных структур в микросхемах энергозависимой и энергонезависимой памяти, производство ячеек памяти flash на пленочных структурах типа металл-оксид-металл [1].

Широкое внедрение электронно-лучевых методов термообработки изделий в микроэлектронике и радиоэлектронной промышленности обусловлено их преимуществами над традиционными, такими как высокая общая и удельная мощность электронного пучка, гибкость управления потоком заряженных частиц, возможность реализации технологического процесса в контролируемой газовой среде при различных давлениях и температурах. При этом наряду с традиционными термокатодными источниками электронов используются электронные пушки на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) [2, 7]. Диапазон рабочих давлений пушек ВТР составляет единицы - десятки паскалей, что исключает необходимость использования дорогостоящих высоковакуумных откачных средств при их эксплуатации. При этом электронные пушки ВТР устойчиво работают в среде различных газов, включая активные, отличаются надежностью и долговечностью холодного катода, относительно просты по конструкции и не требуют использования дорогостоящих материалов. Кроме того, пушки ВТР позволяют сравнительно просто формировать профильные электронные пучки различной конфигурации, включая конические, трубчатые, дисковые, ленточные и другие.

1. Газоразрядные электронные пушки для сварки, формирующие пучки с точечным фокусом. В НТУУ «КПИ» в течение последних 25 лет разработан ряд электронных пушек ВТР, предназначенных для сварки, испарения и других термических процессов, выполняемых в низком и среднем вакууме. В результате были созданы электронные пушки ВТР различного назначения, разработаны системы автоматического управления параметрами пушек и технологических процессов, а также выполнен ряд работ по созданию промышленного электронно-лучевого технологического оборудования на их основе. Схемы конструкций разработанных электронных пушек, предназначенных для универсальной сварки, моноимпульсной сварки профильными пучками и для нанесения тонких пленок, приведены на рис. 1.

Газоразрядные электронные пушки с холодным катодом устойчиво работают в широком диапазоне давлений, слабочувствительны к составу газовой среды, отличаются надежностью и долговечностью холодного катода. Условия работы этих пушек наиболее хорошо согласуются с условиями выполнения технологического процесса сварки в промежуточном вакууме. Известно, что как защитная среда вакуум порядка  $10^{-1}$  Па лучше особо чистого аргона, поэтому для качественного соединения ряда конструкционных материалов в электронной промышленности могут с успехом использоваться упрощенные высокопроизводительные установки с промежуточным вакуумом в сварочной камере [3]. Использование в таких установках газоразрядных электронных пушек, работающих в том же диапазоне давлений, ведет к упрощению сварочного вакуумного оборудования и является экономически целесообразным.

Из-за сравнительно невысокой плотности тока ионно-электронной эмиссии с поверхности холодного катода, которая составляет, в зависимости от материалов катода и режимов разряда, десятки-сотни миллиампер на квадратный сантиметр, увеличение мощности пушек ВТР связано с увеличением площади эмиссионной поверхности катода, а следовательно, угла сходимости электронного пучка и его поперечного размера в фокусе. В связи с этим мощность сварочных пушек, формирую-

щих электронные пучки с точечным фокусом и с малым углом сходимости (до  $30^\circ$ ) (рис. 1, а), не превышает десятков киловольт при ускоряющих напряжениях до 40 кВ. Диаметр сфокусированного электронного пучка на поверхности изделия при расстоянии от пушки до изделия 100 - 150 мм составляет 0,5 - 1,5 мм (рис. 2) при угле сходимости около  $10^{-1}$  рад, а его удельная мощность при этом не превышает  $10^6$  Вт/см<sup>2</sup>. При ускоряющих напряжениях до 35 кВ глубина проплавления сварного шва достигает 10 - 20 мм (рис. 3) [3].

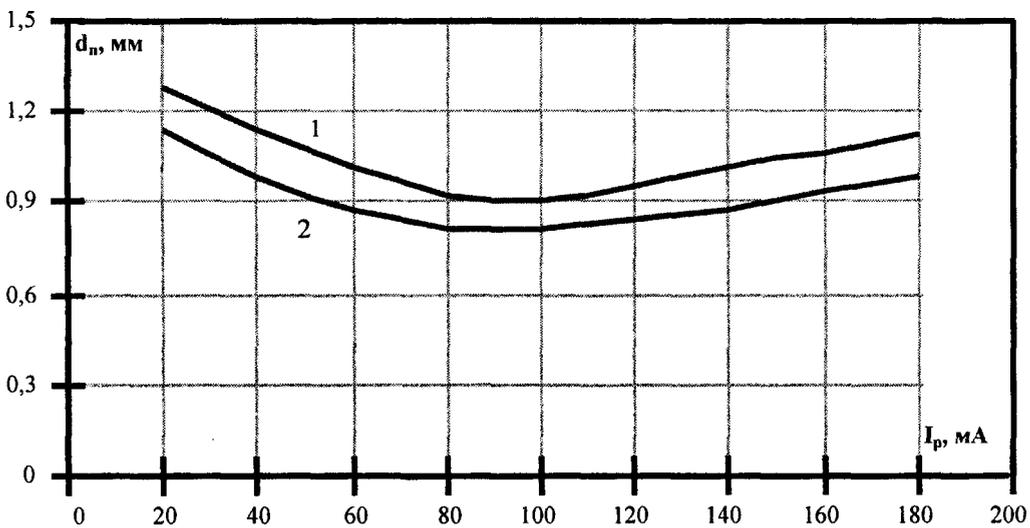
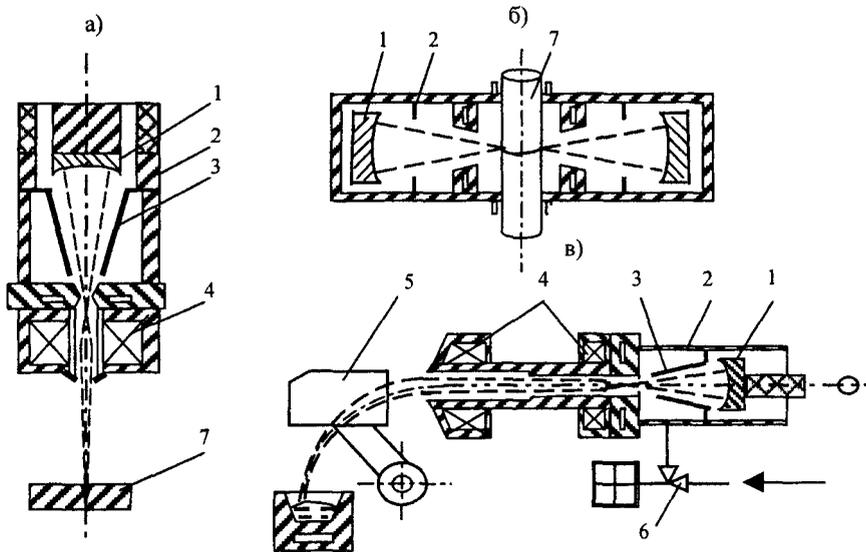


Рис. 2. Зависимость диаметра электронного пучка в фокусе от тока разряда пушки.  
 Ускоряющее напряжение: 1 - 20 кВ; 2 - 25 кВ

Перспективным применением таких пушек в радиоэлектронной и приборостроительной промышленности является сварка тонкостенных изделий из конструкционных материалов или контактов электронных приборов. При этом для уменьшения зоны термического воздействия электронного пучка может использоваться импульсный режим работы пушки. При импульсной модуляции мощно-

сти электронного пучка частота следования импульсов может изменяться в пределах 10 - 200 Гц, а их длительность составляет 1 - 50 мс [3].

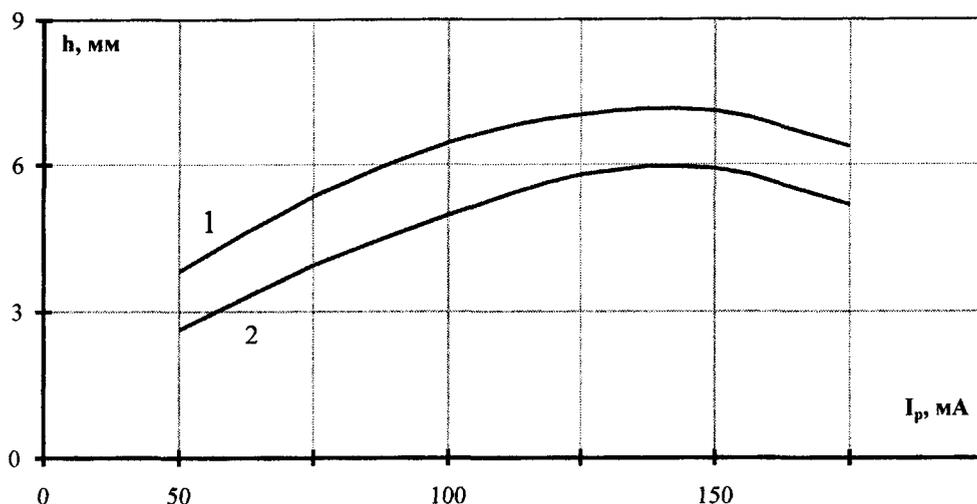


Рис. 3. Зависимость глубины проплавления от тока разряда газоразрядной электронной пушки при ускоряющем напряжении 30 кВ:  
1 - меди; 2 - нержавеющей стали

2. Газоразрядные электронные пушки для сварки, формирующие профильные пучки. Для электронно-лучевой сварки корпусов электронных изделий и других деталей сложной формы при крупносерийном и массовом производстве перспективны электронные пушки ВТР, формирующие электронные потоки, форма которых соответствует конфигурации шва (см. рис. 1, б). Вследствие небольшой удельной мощности в протяжённом фокусе формируемого потока (до  $10^5$  Вт/см<sup>2</sup> при общей мощности до 50 кВт и токе электронного пучка до 2 А) пушки обеспечивают полусферическое проплавление и могут использоваться для моноимпульсной сварки тонкостенных изделий встык или изделий с отбортовкой кромок. Разработанные пушки позволяют выполнять моноимпульсную сварку кольцевых швов диаметром от 3 до 60 мм с глубиной проплавления до 2 - 3 мм, а также сварку-пайку разнородных металлов и пайку твердыми припоями с минимальной зоной нагрева возле шва. Длительность сварочных импульсов составляет 0,1 - 1 с, а время пайки - единицы - десятки секунд. Рабочее давление при этом составляет  $10^{-1}$  - 1 Па, что значительно сокращает время откачки сварочной камеры. Относительная простота пушек, их систем питания и управления, а также систем откачки существенно упрощает электронно-лучевое сварочное оборудование.

На основе разработанных пушек, формирующих профильные пучки, был создан комплекс автоматизированного сварочного оборудования для высокопроизводительной сварки в крупносерийном или массовом производстве [4]. Вследствие небольшой удельной мощности в протяжённом фокусе электронного пучка эти пушки обеспечивают проплавление на глубину до 2 - 3 мм, а также сварку с оплавлением стыка и пайку твердыми припоями с минимальной зоной нагрева возле шва. В процессе сварки под воздействием кольцевого пучка происходит оплавление стыка одновременно по всей его длине с образованием кольцевой ванны. Положение ванны относительно стыка можно регулировать путем смещения фокальной плоскости пучка вдоль свариваемых деталей. Такое смещение необходимо при сварке разнородных металлов с различными теплофизическими свойствами. В зависимости от требований к сварному соединению сварка может выполняться при частичном или сквозном проплавлении стыка разнородных материалов со смещением зоны нагрева на металл с большей теплопроводностью и с меньшей температурой плавления. Такой технологический процесс называется сварка-пайка [4]. Сварные соединения, полученные таким методом, характеризуются малым тепловложением при их выполнении и высокими эксплуатационными характеристиками. Сварка профильными пучками производится обычно в моноимпульсном режиме. В отдельных случаях могут использоваться дополнительные импульсы нагрева как перед сварочным импульсом, так и после него. Такие импульсы предназначены для очистки поверхностей кромок перед сваркой, оплавления острых выступов, для сглаживания неровностей поверхности шва с целью повышения качества сварных соединений. Образцы сварки-пайки меди с коваром, выполненной для изделий электронной промышленности, приведены на рис. 4.

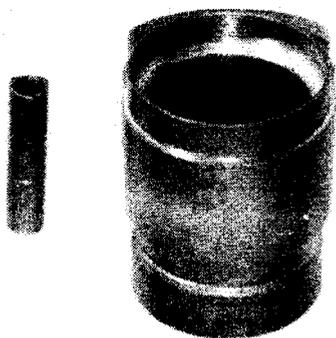


Рис. 4. Образцы сварки-пайки меди с коваром (изделия диаметром 50 и 8 мм)

3. Газоразрядные электронно-лучевые испарители. Разработано также несколько вариантов электронно-лучевых испарителей с пушками на основе ВТР мощностью от 5 до 50 кВт (см. рис. 1, в) [5]. Испарители могут легко интегрироваться в промышленное вакуумное напылительное оборудование при незначительной его модернизации. Кроме электронной пушки испаритель включает систему фокусировки и отклонения электронного пучка и систему его сканирования по поверхности испаряемого металла. Устройство фокусировки и транспортировки пучка выполнено в виде отдельного узла, расположенного у тигля, и позволяет обеспечить отклонение электронного пучка на требуемый угол. Это упрощает интеграцию испарителя в промышленное вакуумное напылительное оборудование. При необходимости нанесения сложных многослойных структур испарение может осуществляться из различных тиглей. При проведении процесса реакционного напыления для сохранения стехиометрии наносимых покрытий необходимо контролировать и стабилизировать и концентрацию паров испаряемого вещества, и парциальное давление остаточных газов в технологической камере. Изменение концентрации паров испаряемого вещества при электронно-лучевом испарении осуществляется регулированием мощности электронного пучка. В газоразрядных источниках электронов управлять мощностью пучка можно регулированием тока разряда за счет изменения давления в пушке при неизменном ускоряющем напряжении. Такая система управления обеспечивает регулирование тока пушки во всем рабочем диапазоне и его стабилизацию на заданном уровне. Отклонение регулируемой величины тока от заданной не превышает 2 % [6]. При термоионном осаждении покрытий для поддержания химической реакции между парами металла и технологическим газом необходимо осуществлять ионизацию пара в дуговом разряде, который зажигается и поддерживается с помощью кольцевого электрода, располагаемого возле поверхности испаряемого материала [5]. Дуговой разряд в парах испаряемого материала поддерживается термоэмиссией и вторичной электронной эмиссией из области воздействия электронного пучка на испаряемый материал. Величина тока разряда в зависимости от общей и удельной мощности электронного пучка может составлять единицы - десятки ампер при напряжении десятки вольт. Дуговой ионизатор конструктивно прост, и для поддержания разряда могут использоваться простые источники питания. Комбинация электронно-лучевого испарения с ионизацией пара в дуговом разряде позволяет осуществлять испарение без наличия капельной фракции в потоке пара, что значительно повышает качество изделий электронной промышленности. Схема экспериментальной установки для нанесения покрытий с газоразрядной электронной пушкой приведена на рис. 5.

Для разработанных и исследованных конструкций газоразрядных испарителей при ускоряющих напряжениях от 10 до 25 кВ ток электронного пучка зависит от давления в области горения разряда и составляет от 0,1 до 1,5 А. При совместной откачке пушки и технологической камеры давление в области нанесения покрытий зависит от режима работы пушки и составляет  $10^{-2}$  - 1 Па. При дифференцированной откачке или при дополнительном напуске газа в технологическую камеру давление в ней может варьироваться в более широких пределах. Электрические параметры вспомогательного дугового разряда определяются особенностями технологического процесса нанесения покрытий и в значительной степени влияют на их химический состав и стехиометрию. Обычно на анод дугового разряда подается положительный потенциал величиной 20 - 60 В, а рабочий ток дуги составляет от 2 до 20 А. Частота сканирования электронного пучка по поверхности испаряемого материала в зависимости от требований технологического процесса изменялась от 0,1 до 1 кГц.

Скорость осаждения покрытий зависит от общей и удельной мощности электронного пучка, термодинамических свойств испаряемого металла, а также от давления в технологической камере и от расстояния между тиглем и поверхностью изделия. Например, скорость осаждения пленок оксида алюминия в кислородной среде при ускоряющем напряжении 10 кВ и токах разряда от 100 до 500 мА изменялась в пределах от 0,1 до 0,9 мкм/мин (рис. 6) [7].

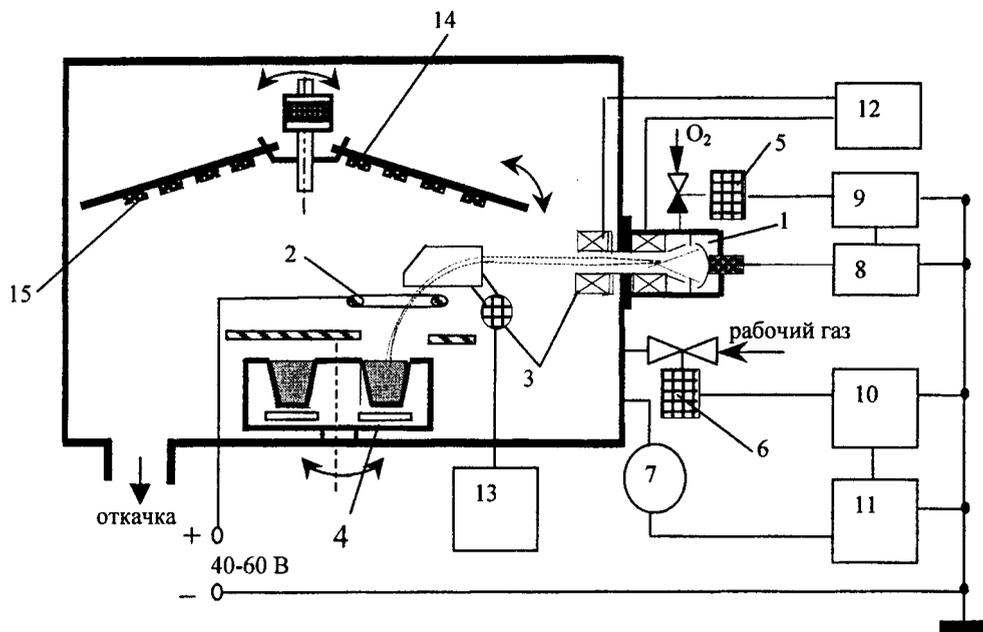


Рис. 5. Схема устройства для термоионного осаждения покрытий с газоразрядным электронно-лучевым испарителем:

1 - газоразрядная электронная пушка; 2 - анод дугового разряда; 3 - система поворота и фокусировки пучка; 4 - медный водоохлаждаемый тигель; 5, 6 - электромагнитные натекатели; 7 - электроразрядный манометр; 8 - высоковольтный источник питания; 9, 10 - электронные блоки управления давлением; 11 - вакуумметр; 12 - источник питания магнитных линз; 13 - источник питания системы поворота пучка; 14 - карусель; 15 - подложки

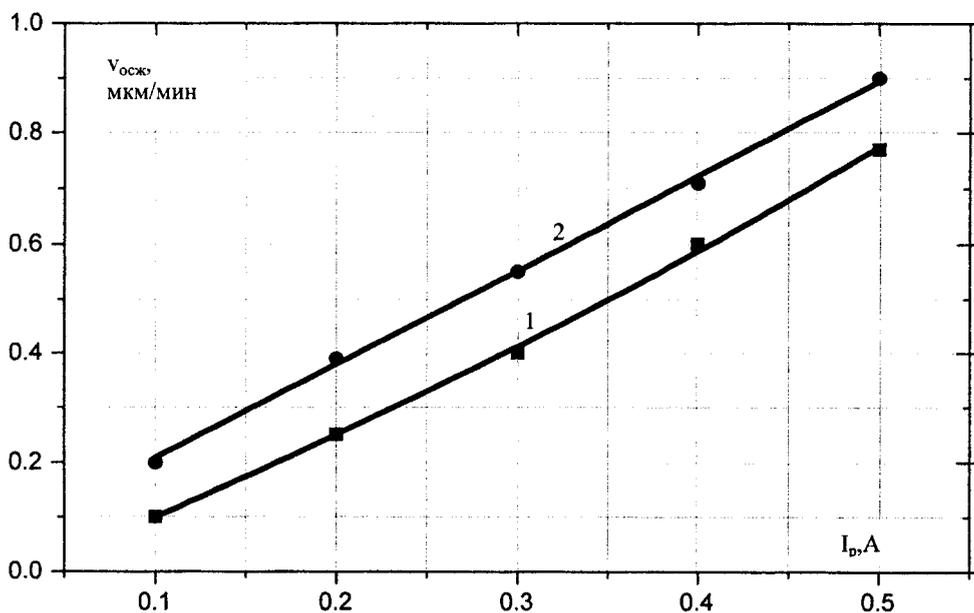


Рис. 6. Зависимость скорости осаждения пленок оксида алюминия от мощности электронного пучка. Ускоряющее напряжение: 1 - 10 кВ; 2 - 12 кВ. Расстояние от тигля до подложек 180 мм

Нами было разработано и внедрено в электронной промышленности несколько вариантов испарительных установок с использованием газоразрядных пушек для различных технологических применений.

1. Внедренный на ряде предприятий электронной промышленности газоразрядный электронный испаритель мощностью до 5 кВт для нанесения оптических покрытий. Испаритель был разработан применительно к промышленной установке для напыления ВУ-1А. На изделия наносились покрытия из ок-

сидов редкоземельных металлов для улучшения оптических свойств. Процесс нанесения покрытий осуществлялся в среде кислорода при давлениях  $10^{-2}$  -  $10^{-3}$  Па.

2. Разработан и внедрен в промышленность электронно-лучевой испаритель мощностью до 10 кВт для нанесения высококачественных диэлектрических покрытий в изделиях электронной промышленности и микроэлектроники. Испаритель разработан применительно к промышленной установке УРМ-3, оснащенной аксиальной терموкатодной пушкой. Использование разных методов электронно-лучевого испарения, которые выбираются в соответствии с требованиями реализуемого технологического процесса и физическими условиями в технологической камере, позволило расширить технологические возможности установки.

Выводы. Примеры применения сварочных и испарительных электронных пушек ВТР на предприятиях электронной промышленности показывают, что при реализации ряда технологических операций эти пушки имеют определенные преимущества перед другими источниками высококонцентрированной энергии, включая лазерный и ВЧ-нагрев. При необходимости пушки интегрируются в вакуумные электронно-лучевые технологические комплексы, которые включают систему стабилизации высоковольтного питания, систему контроля тока разряда и систему отклонения и позиционирования электронного пучка в технологической камере.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Таруи Я. Технология производства СБИС. - М.: Радио и связь, 1985. - 480 с.
2. Плазменные процессы в технологических электронных пушках / М.А. Завьялов, Ю.Е. Крейндель, А.А. Новиков, Л.П. Шантурин. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 256 с.
3. Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А. Применение электронных пушек высоковольтного тлеющего разряда для сварки в среднем вакууме // Вакуумные технологии и оборудование ICVTE-5: Пятый Междунар. симп. - Харьков, 2002. - С. 242 - 244.
4. Мельник В.И., Мельник И.В., Тугай Б.А. Разработка и применение электронных пушек ВТР для сварки профильными пучками // Высокие технологии в промышленности России (материалы и устройства электронной техники): Материалы IX Междунар. науч.-техн. конф., 2003. - С. 52 - 55.
5. Мельник В.И., Мельник И.В. Применение газоразрядного электронно-лучевого испарителя в установках стандартных типов // Вакуумные технологии и оборудование ICVTE-4: Четвертый Междунар. симп. - Харьков, 2001. - С. 178-181.
6. Model of control of glow discharge electron gun current for microelectronics production applications / S.V. Denbnovetsky, V.I. Melnyk, I.V. Melnyk, B.A. Tugay. - Proceedings of SPIE. Sixth International Conference on «Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics». - Vol. 5065 (2003). - P.64-76.
7. Denbnovetsky S.V., Melnyk V.G., Melnyk I.V. High voltage glow discharge electron sources and possibilities of its application in industry for realising of different technological operations. - IEEE Transactions on plasma science. -2003. - Vol. 31, № 5 - October. - P. 987 - 993.