

К ВОПРОСУ О ПОДГОТОВКЕ СТУДЕНТОВ В СВЯЗИ С РАЗВИТИЕМ НОВЫХ НАПРАВЛЕНИЙ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ

Т.Д. ЗНАМЕНСКАЯ, доц. каф. информационно-измерительных систем и технологии приборостроения МГУЛ, канд. техн. наук

tzn957@gmail.ru

ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»
141005 Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1, МГУЛ

Анализируются проблемы высшего образования и трудоустройства выпускников в России. На основании анализа сделаны выводы о необходимости изменения подхода к обучению студентов – традиционную «эстафету знаний» необходимо заменять на «эстафету идей». В качестве перспективной идеи рассматривается вакуумная микроэлектроника (ВМЭ), дается краткий обзор ее истории и развития. Вакуумные интегральные схемы появились раньше полупроводниковых – в 1926 г. в Германии выпускались предложенные М. фон Арденне приборы, содержащие несколько активных и пассивных элементов, образующих усилительный каскад в общем вакуумированном объеме. Объективная тенденция к уменьшению габаритов электронных ламп, упрощению их конструкции и технологии изготовления, снижению энергопотребления, а также их естественные преимущества по радиационной и термостойкости и скорости движения зарядов в вакууме привели к созданию в СССР как особо устойчивых устройств, которые работали на раскаленной поверхности Венеры, так и вакуумных интегральных микросхем, диодно-триодных матриц, работавших в сверхглубоких скважинах при температуре $+250^{\circ}\text{C}$. С появлением полупроводниковой электроники работы над вакуумными приборами были на некоторое время приостановлены. Но новые технологические приемы, освоенные в твердотельной электронике, оказались востребованными и эффективными при разработке вакуумных микроэлектронных устройств, которые сохраняли все преимущества перед полупроводниковыми. Первая международная конференция по вакуумной микроэлектронике под девизом «Обратно в будущее» прошла в Вильямсбурге, США в 1988 г., и с тех пор это «новое старое» направление стремительно развивается. В статье приводятся описания и характеристики устройств вакуумной микроэлектроники, микротриода Шоулдерса, катода Спиндта, баллистического транзистора, даются сведения о развитии этого направления в России, предлагаются изменения, которые необходимо внести в учебные программы для повышения востребованности выпускников.

Ключевые слова: высшее образование, кризис перепроизводства, эстафета идей, вакуумная микроэлектроника, вакуумные интегральные микросхемы.

Статистика последних двух десятилетий показывает, что значительная часть выпускников российских высших учебных заведений либо не может, либо не желает работать по полученной специальности.

Классический рыночный кризис перепроизводства ярко проявился в сфере высшего образования – сотни тысяч новоиспеченных юристов, экономистов, менеджеров и т. п. не могли найти работу по профилю. Такая ситуация, с одной стороны, приводит к стрессу каждого несостоявшегося специалиста, а с другой стороны, подрывает репутацию вуза, выпускник которого не смог трудоустроиться по специальности.

Правительство, располагающее информацией о том, какие специалисты потребуются народному хозяйству в ближайшей и отдаленной перспективе, не формирует перспективный заказ вузам на количество и специализацию выпускников. В таких условиях неопределенности стратегия вуза, направленная на то, чтобы его выпускники были востребованы, должна включать два аспекта. Во-первых, вуз

должен давать достаточный объем знаний по фундаментальным наукам – математике, физике, химии, механике, электротехнике и т. д., так как фундаментальные знания наиболее универсальны и позволяют легко овладевать прикладными дисциплинами. Во-вторых, в учебных программах особое внимание должно уделяться не только достигнутому уровню технологий, но и путям развития, истории, и, главное, перспективам развития каждого направления, ориентировать выпускников на будущее, «играть на опережение» [1, 2]. Мы должны создать не только «эстафету знаний», но и «эстафету идей». Одна из идей, которая может быть востребована, – развитие вакуумной микроэлектроники (ВМЭ).

Несмотря на достигнутые в последние десятилетия успехи, твердотельная электроника подходит к пределу развития, прежде всего по частотным характеристикам, т. к. скорость передвижения зарядов в твердом теле на несколько порядков ниже, чем в вакууме. С другой стороны, в производстве полупроводниковых интегральных микросхем

накоплен уникальный технологический потенциал, позволяющий работать с микрообъектами величиной десятки нанометров.

Следует вспомнить, что первые интегральные схемы были вакуумными. В 1926 г. в Германии серийно выпускались приборы, в едином вакуумированном баллоне которых находились 1–3 электронные лампы и 4–6 пассивных элементов, резисторов и конденсаторов, образующих, например, усилительные каскады [3].

В 1934 г. ленинградские ученые А.А. Шапошников и Ю.А. Кацман создали «пакетную» электронную лампу, исключительно простую, технологичную и надежную [4]. В 50-е годы фирма «General Electric» выпускала такие лампы миллиметрового размера, намного меньше, чем транзисторы тех лет, а в 70-е годы на пакетных лампах работала советская космическая станция, передающая информацию с поверхности Венеры. Более того, в 1983 г. в СССР были созданы не имеющие мировых аналогов вакуумные интегральные микросхемы, включающие матрицы кенотронов (диодов) и микротриодов, предназначенные для работы в сверхглубоких скважинах при температуре $+250^{\circ}\text{C}$ [5].

В 60-е годы вакуумные лампы новой конструкции, ориентированные на массовое автоматическое производство – нувисторы – успешно конкурировали с транзисторами, не превышая их по размерам и выигрывая в параметрах [5]. Но с появлением интегральных полупроводниковых микросхем вакуумные приборы стали сдавать позиции.

Основная причина – принципиальное технологическое различие. Процесс изготовления полупроводниковой микросхемы заключался в обработке одной детали – кремниевой пластины, которая после завершения технологического цикла разделялась на множество индивидуальных микросхем [6, 7]. А электронная лампа в любом случае состояла из нескольких деталей, которые изготавливались из разных материалов по различным технологиям. Это не было принципиально важно, пока на печатной плате среди пассивных элементов – резисторов, конденсаторов и намоточных деталей – ставился активный прибор, транзистор или нувистор, но объединение в полупроводниковой интегральной схеме ак-

тивных и пассивных элементов окончательно вывело вакуумные приборы из конкуренции.

В 1988 г. в Вильямсбурге (США) прошла первая международная конференция по вакуумной микроэлектронике (ВМЭ) под девизом «Обратно в будущее», и с тех пор конференции по этой тематике проводятся ежегодно. К преимуществам вакуумных микроэлектронных схем специалисты относят сверхвысокое (субпикосекундное) быстродействие, высокий КПД, устойчивость к радиации и высокой температуре, нулевой обратный ток. Учитывая, что полупроводниковые ИМС приближаются к исчерпанию возможностей, а в этой отрасли накоплен высокий потенциал работы с микрообъектами, мысли ученых и специалистов все чаще возвращаются «обратно в будущее». И в ближайшие годы следует ожидать все большего роста интереса к вакуумной микроэлектронике и новых достижений в этой области.

В первую очередь это касается той области, которую называют «экстремальной электроникой» – работа в условиях высоких температур, повышенной радиации, механических воздействий. Причем работать в экстремальных условиях (например, в пожарных или спасательных работах) приходится не только цифровым схемам обработки сигналов, но и силовой электронике. В этих условиях особенно ярко проявляются такие достоинства автоэмиссионных холодных катодов, как стойкость к радиации, высокая плотность тока автоэмиссии, безынерционность, высокая крутизна вольт-амперных характеристик.

Соединение технологий полупроводниковой микроэлектроники и физических принципов вакуумной электроники позволили создать новый перспективный класс приборов – вакуумные интегральные схемы (ВИС) [8].

Основой ВИС является активный элемент – электронная микролампа, или вакуумный микротриод. Как и классический вакуумный триод, она имеет катод, испускающий электроны, анод, принимающий их, и управляющий электрод – «сетку» – регулирующий движение электронов. Один из первых вариантов конструкции микролампы, созданной по пленочной технологии американским исследователем К. Шоулдерсом, приведен на рис. 1.

Принципиальной проблемой при создании ВИС является катод. Назначение катода – инжектировать в вакуум достаточное количество электронов с малым разбросом по энергиям. В классической лампе эта задача решалась нанесением на поверхность катода специального эмитирующего состава и нагревом катода до высоких температур. Нагрев всегда считался – и был – непроизводительным расходом энергии и источником проблем, поэтому активно велись работы по созданию автоэмиссионных холодных катодов. Но для хорошей эмиссии нужна высокая напряженность электрического поля, т. е. такие лампы требовали высоких напряжений. Но поскольку напряженность прямо пропорциональна напряжению, приложенному к электродам, и обратно пропорциональна расстоянию между ними, то ясно, что при микроразмерах получить высокую напряженность можно и при малых напряжениях.

Полученные в последние десятилетия знания о микро- и наномире позволяют строить автоэмиссионные катоды из новых материалов и на новых принципах. Известно, например, что эмиссия электронов лучше всего идет с острия. На этой идее базируется конструкция катода и микролампы, предложенных в 1973 г. американским физиком Чарльзом Спиндтом. Достигнутый уровень микроминиатюризации ВМЭ уже таков, что в круге диаметром 1 мм можно разместить 5000 таких катодов. Но их принципиальный недостаток – трехмерная структура. Для создания такого катода требуется трехслойная основа металл–изолятор–металл, затем лазером прожигается отверстие диаметром 1–3 мкм до нижнего слоя металла и внутри этого отверстия выращивается напылением или электрохимическим методом проводящий конус до уровня верхнего слоя металла.

В настоящее время технологии ВМЭ находятся в стадии становления, идет поиск лучших решений. И наряду со спиндтовским катодом с вертикальными полостями разрабатываются иные конструкции, с планарным расположением электродов. Планарные микролампы позволят совместить все достижения твердотельной микроэлектроники, которая планарна по самой своей природе, со

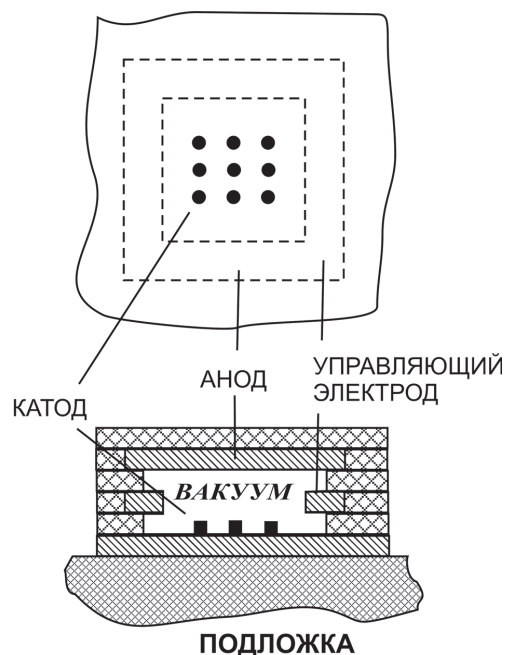


Рис. 1. Микротриод Шоулдерса с игольчатым катодом

Fig. 1. Shoulders mikrotriode with a needle cathode

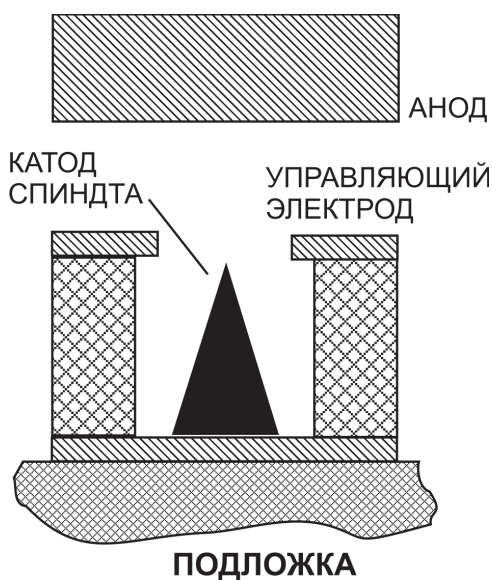


Рис. 2. Поперечное сечение микротриода с катодом Спиндта

Fig. 2. The cross section of the mikrotriode with a Spindt cathode

всеми преимуществами, которые дают вакуумные электронные приборы.

Еще более радикальной и, следует отметить, «архаичной», чем идея планарной микролампы, является идея устройства, которому его разработчики – группа исследователей из Рочестерского университета (Нью-Йорк, США) – дали название «ballistic deflection

transistor, BDT», «баллистический транзистор» [9]. Хотя, строго говоря, по принципу работы этот прибор ближе всего не к транзистору или радиолампе, которые разрабатывались, прежде всего, как усилительные приборы, а к катодным трубкам, которые были известны с XIX в., и более точно его следовало бы называть баллистическим реле или переключателем. Как и в катодной трубке, в баллистическом транзисторе электроны, проходящие в рабочем канале, отклоняются под действием потенциалов, подаваемых на управляющие электроды. Принципиальное отличие заключается в микроминиатюрных размерах – если размеры катодных трубок составляли десятки сантиметров, то размеры «баллистического транзистора» – доли и единицы микрометров.

На рис. 3 представлена реальная топология исследовательского прототипа «баллистического транзистора», созданного в Рочестерском университете. В зависимости от полярности подаваемых на управляющие электроды УЭ1 и УЭ2 потенциалов влетевший в рабочий канал электрон будет отклоняться влево или вправо и окончательно направляться на левый или правый выход специальным электродом – дефлектором.

Для понимания и описания работы нового устройства американские ученые ввели понятие двумерного электронного газа (2-dimension electronic gas, 2DEG). Это понятие

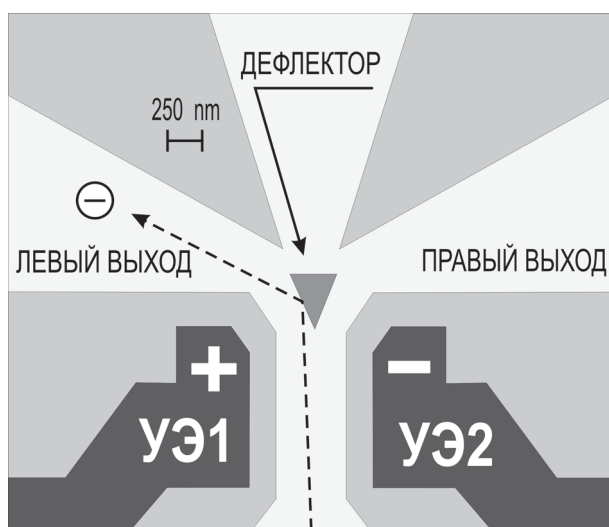


Рис. 3. Топология исследовательского прототипа «баллистического транзистора»

Fig. 3. The topology of a research prototype of «ballistic transistor»

и сама топология BDT напоминают о созданном в 60-е годы в СССР новом направлении автоматике – пневмонике, струйной автоматике, работающей на газах низкого давления [10].

В ближайшие годы следует ожидать все большего роста интереса к вакуумной микроэлектронике и новых достижений в этой области. В России работы по этой тематике ведутся на кафедре электроники и волновых процессов Саратовского государственного университета.

Очень интересные результаты получены на кафедре физики полимеров и кристаллов МГУ, в лаборатории углеродных материалов. При исследовании автоэмиссии пленочных катодов из алмазных, графитоподобных материалов и нанотрубок разработаны технологии получения катодов, которые могут использоваться и в катодолюминесцентных лампах и дисплеях, и в схемах вакуумной микроэлектроники. Важным преимуществом катодов из наноуглеродных материалов является их стойкость к примесным газам, способность устойчиво работать в условиях технического вакуума. Более того, полученные в лаборатории пленки обладают свойствами полупроводника и из них могут формироваться привычные твердотельные БИС. Таким образом, возможно органическое совмещение как вакуумной, так и твердотельной микроэлектроники, а значит и оптимальное распределение функций между частями единой интегральной схемы.

Итак, в электронике появилось – или возродилось – очень перспективное направление – вакуумная микроэлектроника. Но за годы единовластного царствования твердотельной электроники из курсов большинства вузов вакуумная электроника практически исчезла. Далеко не все студенты могут сегодня рассчитать ламповую схему, понимать во всех тонкостях работу катода. Поэтому, чтобы готовить современных востребованных специалистов, способных работать в новых, прорывных направлениях, мы должны восстановить преподавание некоторых разделов электроники, усилить подготовку студентов по базовым, фундаментальным предметам и вооружить их новыми идеями.

Студенты должны иметь ясное представление о ламповой схмотехнике, которая отличается от полупроводниковой. Кроме того, достаточно очевидно, что эта новая схмотехника будет отличаться от классической ламповой, где каждая лампа была отдельной. При наличии матриц и решеток микроламп появляется возможность совсем иначе обрабатывать сигналы, чем принято в классике. Наконец, надо будет знать о том, как сочетаются классическая твердотельная и вакуумная микроэлектроника – вполне возможно, что в компьютерах при организации вычислительного процесса часть задач будет обеспечиваться привычными БИС, а часть – быстродействующими приборами вакуумной микроэлектроники. А быстродействие этих приборов уже сегодня может достигать сотни терагерц. Все это потребует коррекции учебных планов и программ, но зато повысит качество наших выпускников.

Конечно, речь не идет о том, что надо просто извлечь из библиотечных архивов старые учебники. Переход к микроминиатюризации электронных ламп – это переход в микромир, где действуют совершенно иные законы и требуются совершенно иные знания. Если в традиционных электронных лампах катод рассматривался как плоская коробка, покрытая специальным составом, с нагревателем внутри, то в микролампах встает проблема создания многоострийных катодов, обеспечивающих эмиссию с каждого острия, микроструктур в форме пучков нитей, иголок, торцов нанотрубок, пакета лезвий, факталов и иных сложных форм.

Следовательно, в курсе физики потребуется уделять больше внимания таким темам, как эмиссия с острия, туннельный эффект, эмиссия с различных граней кристалла, эмиссия под воздействием различного рода излучений. Новое и очень перспективное направление – явление интенсивной эмиссии электронов с торцов нанотрубок в электрическом поле вдоль оси нанотрубки. Если в обычных электронных лампах движение электронов можно было рассматривать как ламинарный поток, то в микролампах важным уже становится анализ движения электронов в неравномерном электрическом поле по сложным траекториям – следовательно,

нужно давать более фундаментальные знания по этому вопросу. Студентов следует более подробно знакомить с явлениями в вакууме, свойствами и параметрами вакуума, способами его создания и поддержания. Естественно, это потребует изменения как в курсах математики, дающей инструмент как для описания и анализа физических процессов и конструкции элементов ВИС, так и для описания вычислительных операций, которые они выполняют. Это особо относится к баллистическим транзисторам, где может быть пригоден математический аппарат струйной автоматики.

Если технологии твердотельной электроники ориентированы, в основном, на операции с объемом внутренней части полупроводника, то для вакуумной микроэлектроники наиболее важны явления на поверхности, создание и стабилизация «острого» рельефа автоэмиссионной поверхности, для чего используется электрохимическое травление, или выращивание острий из пара по механизму пар–жидкость–кристалл, когда на подложке растут из конденсирующегося пара тонкие перпендикулярные ей острия, или напыление через маску. Следовательно, необходимо давать студентам знания и по явлениям на поверхности, на границе раздела сред, на границе с вакуумом.

Можно с достаточной степенью уверенности предположить, что в ближайшее десятилетие вакуумная микроэлектроника, взяв на вооружение технологические наработки электроники твердотельной, станет быстроразвивающейся отраслью, где смогут найти применение знаниям многие выпускники МГУЛ.

Таким образом, в современных условиях для повышения востребованности выпускников необходимо усилить подготовку по базовым, фундаментальным предметам и вооружить их новыми идеями.

Библиографический список

1. «Об утверждении Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года». Распоряжение Правительства РФ от 08.12.2011 № 2227-р.
2. Болдырев, Н.Н. Научно-исследовательская деятельность как основа повышения качества образования в вузе / Н.Н. Болдырев, А.А. Артемов // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – Т. 9. – № 1. – 2004. – С. 147–148

3. IT-журнал «Высокие технологии» «Loewe 3NF Multi-valve – первая интегральная схема» <http://itnewsrussia.ru/novosti/loewe-3nf-multi-valve-pervaya-integralnaya-schema.html>
4. Электронная лампа (Патент SU 39876): H01J19/42 – монтаж, крепление, размещение или изоляция электродов или электродных узлов / А.А. Шапошников, Ю.А. Кацман.
5. «Разработка термостойких вакуумных интегральных схем (ВИС) на $T = 250^{\circ}\text{C} \div 350^{\circ}\text{C}$: матрицы кенотронов, триодов, УНЧ, мультивибратор усилитель импульсных сигналов»: отчёт ВНИИПКИ геофизических исследований, испытания и контроля нефтегазозазведочных скважин, 1983. – 125 с.
6. Ефимов, И.Е. Основы микроэлектроники / И.Е. Ефимов, И.Я. Козыр. – М.: Лань, 2008. – 384 с.
7. Коледов, Л.А. Технология и конструкция микросхем, микропроцессоров и микросборок: учеб. пос. / Л.А. Коледов. – М.: Лань, 2009. – 400 с.
8. Щука А.А. Электроника: учеб. пос. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 800 с.
9. Транзистор на двумерном электронном газе: Новости химии, 2006. – <http://www.chemport.ru/datenews.php?news=178>
10. Касимов, А.М. Развитие пневматических средств автоматизации / А.М. Касимов // Конф. «Технич.и програм. средства систем управления, контроля и измерения». – М.: ИПУ им. Трапезникова РАН, 2010. – С. 1–13.

ON THE ISSUE OF STUDENT PREPARATION IN CONNECTION WITH NEW MICROELECTRONICS PROSPECTS DEVELOPMENT

Znamenskaya T.D., Assoc. Prof. MSFU, Ph.D (Tech.)

tzn957@gmail.ru

Moscow State Forest University (MSFU), 1st Institutskaya st., 1, 141005, Mytischki, Moscow reg., Russia

Some issues of higher education and employment of new graduates are analyzed. Based on the analysis, conclusion on the necessity of adjusting the approach to a traditional university education is made. The author offers a move from a traditional «transfer of knowledge» to a new «transfer of ideas» approach. Vacuum microelectronics is exemplified as a prospective idea with a brief description of its history and development. Vacuum integral circuits emerged before semiconductor circuits. In 1926 in Germany several devices constructed by M. von Ardenne, containing several active and passive elements and generating an amplification cascade in evacuated volume, were manufactured. A common tendency for size reduction and simplification of design and manufacturing of electronic tubes, as well as their natural advantages in radiation and temperature resistance and speed of charges movement in the vacuum, leads to developing highly resilient devices capable of functioning on Venus surface in the USSR. At the same time, vacuum integral micro-circuits and diode-triode matrices, which were working in the deepest wells at temperatures as high as $+250^{\circ}\text{C}$, were created. With emergence of semi-conductor electronics, development of vacuum devices had temporarily ceased. However, new technological methods established in solid-state electronics were in demand and effective in the development of vacuum microelectronic devices, which preserved all their advantages as compared to semi-conductor ones. The first international conference in vacuum microelectronics with a «Back to the future» motto took place in Williamsburg, the USA in 1988, and since that time this «new old» venue has been rapidly developing. The article exemplifies descriptions and characteristics of various vacuum microelectronic devices, Shoulders microtriode, Spindt cathode, and a ballistic transistor. Information on the development of vacuum microelectronics in Russia is provided, and changes necessary to improve marketability of new graduates are offered.

Keywords: higher education, overproduction crisis, ideas relay, vacuum microelectronics, vacuum integrated microcircuits.

References

1. «Ob utverzhdenii Strategii innovatsionnogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda». Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 08.12.2011 N 2227-r. [«On approval of the Strategy of innovative development of the Russian Federation for the period till 2020». Order of the Government of the Russian Federation from 08.12.2011 № 2227-p.].
2. Boldyrev N.N., Artemov A.A. *Nauchno-issledovatel'skaya deyatel'nost' kak osnova povysheniya kachestva obrazovaniya v vuze* [Research activities as a basis for improving the quality of education in the university]. Bulletin of the University of Tambov. Series: Natural and Technical Sciences. V. 9. № 1. 2004. pp. 147-148.
3. IT-zhurnal «Vysokie tekhnologii» «Loewe 3NF Multi-valve – pervaya integral'naya skhema» [IT-magazine «High Technology» «Loewe 3NF Multi-valve - the first integrated circuit» <http://itnewsrussia.ru/novosti/loewe-3nf-multi-valve-pervaya-integralnaya-schema.html>].
4. Shaposhnikov A.A., Katsman Yu.A. *Elektronnaya lampa (Patent SU 39876): H01J19/42 - montazh, kreplenie, razmeshchenie ili izolyatsiya elektrodov ili elektrodnykh uzlov* [Electronic Lamp (No. SU 39876): H01J19 / 42 - Installation, mounting, placement of the electrodes or insulation or electrode assemblies].
5. *Razrabotka termostoykikh vakuumnykh integral'nykh skhem (VIS) na $T=2500\text{S}-3500\text{S}$: matritsy kenotronov, triodov, UNCh, mul'tivibrator usilitel' impul'snykh signalov* [Development of heat-resistant vacuum integrated circuits (VIS) at $T = 250^{\circ}\text{C} \div 350^{\circ}\text{C}$: matrix kenotrons, transistors, ULF, multivibrator amplifier pulse signals]: report VNIIPKI geophysical research, testing and control of oil and gas exploration wells, 1983. 125 p.
6. Efimov I.E., Kozyr' I.Ya. *Osnovy mikroelektroniki* [Fundamentals of Microelectronics]. Moscow: Lan', 2008. 384 p.
7. Kolodov L.A., *Tekhnologiya i konstruktsiya mikroskhem, mikroprotssessorov i mikrosborok* [Technology and design of chips, microprocessors and microassemblies]. Moscow: Lan', 2009. 400 p.
8. Shchuka A.A. *Elektronika* [Electronics: studies]. SPb.: BHV-Petersburg, 2006. 800 p.
9. *Tranzistor na dvumernom elektronnom gaze* [The transistor on the two-dimensional electron gas]. News Chemistry, 2006. <http://www.chemport.ru/datenews.php?news=178>
10. Kasimov A.M. *Razvitie pnevmaticheskikh sredstv avtomatizatsii* [The development of pneumatic automation equipment]. Conf. «Technical and software control systems, monitoring and measurements». Moscow: INX them. Trapeznikova RAS, 2010. pp. 1-13.