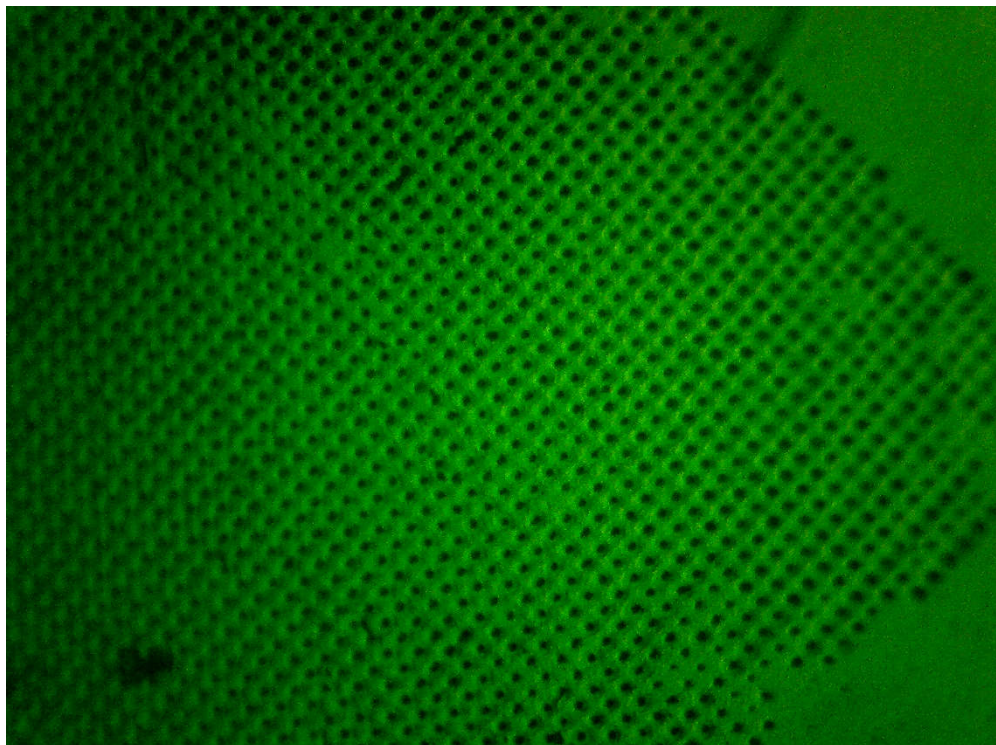




**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ**  
**Разработка конструкторско-технологического базиса вакуумных**  
**интегральных схем (ВИС)**



**Красноярск, 2001**

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
---------------	---

### 1.ПРОЕКТНАЯ ЧАСТЬ

1. Теоретическое обоснование.....	5
1.1. Физические основы полевой эмиссии электронов.....	5
1.2. Теория автоэлектронной эмиссии.....	9
1.3. Особенности автоэлектронной эмиссии полупроводников.....	13
1.4. Автоэлектронная эмиссия в высокочастотном поле.....	21
1.5. Быстродействие вакуумных микроэлектронных приборов.....	25
1.6. Конструкции и способы создания автоэмиссионных микроприборов...	31
1.6.1. Тонкопленочные автоэлектронные микрокатоды.....	37
1.6.2. Полупроводниковые автоэлектронные микрокатоды.....	42
1.6.3. Планарно-торцевые автоэлектронные микрокатоды.....	46
Особенности вакуумных интегральных схем (ВИС) .....	48

### 2.КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

2.1. Оптимизация конструкции путем размещения катода и анода на одной подложке.....	52
2.2. Алмазосодержащие катодные покрытия.....	54
2.3. Применение резистивных слоев.....	58
2.4. Вакуумирование автоэмиссионных микроприборов.....	61
2.5. Новые способы низковольтного управления полевой эмиссией в микроприборах.....	62
2.5.1. Управление автоэлектронной эмиссией из полупроводников барьером Шоттки.....	63
2.5.2. Управление эмиссией электронов путем изменения геометрии катода.....	65

### 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

3.1. Острийные кремниевые диоды.....	67
3.1.1. Создание маскирующего покрытия субмикронного разрешения методом фотолитографии.....	67
3.1.2. Формирование матрицы трехмерных микроструктур методом плазмохимического травления .....	74
3.1.3. Принцип самосовмещения при построении управляющих электродов	87
3.2. Технология острижных кремниевых триодов.....	90
3.3. Планарные диодные углеродные структуры.....	94
<b>Сравнительный анализ острижных и планарно–торцевых автоэлектронных микроприборов</b> .....	96
<b>Перспективы применения вакуумных микроприборов изготовленных с применением групповых микроэлектронных технологий</b> .....	98
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	100

## ВВЕДЕНИЕ

С развитием радиоэлектроники все острее встает задача расширения электронной компонентной базы (ЭКБ). Так, например, остается незаполненным верхний диапазон СВЧ, КВЧ и ГВЧ, где работают приборы на пучках свободных электронов, имеющие большие габариты и высокое энергопотребление, к тому же, перекрывающие только большие и средние мощности. Интенсивно развивается новый класс электронных приборов - вакуумные микроэлектронные приборы, которые объединяют в себе достоинства как полупроводниковых, так и электровакуумных приборов. В работах [1-4] показана возможность получения высоких значений плотностей тока порядка  $10^9$  А/см<sup>2</sup> с автоэлектронных катодов при напряженности электрического поля  $10^7$  В/см без дополнительных затрат энергии на разогрев катода. Автоэлектронный катод - это единственный источник электронов который не требует энергетических затрат на акт эмиссии, способен работать в широком диапазоне температур от гелиевой до точки плавления материала, устойчив к радиации. Безынерционность работы автокатаода при изменении внешнего электрического поля и другие свойства открывают функционально новые возможности для совершенствования известных и создание новых приборов микроэлектронной техники СВЧ.

В лаборатории вакуумной микроэлектроники ВИТИМ с 1985 года ведутся работы по созданию различных вакуумных микроприборов. Экспериментальные исследования вакуумных приборов подтвердили модельные представления и показали перспективность применения разработанных приборов вакуумной микроэлектроники. Было доказано, что разработка жизнеспособных устройств вакуумной микроэлектроники (диодов, триодов, полевых эмиссионных дисплеев и др.) требует более глубокую теоретическую проработку принципов построения, конструкций и вопросов технологии.

## ПРОЕКТНАЯ ЧАСТЬ

Научное обоснование создания конструкторско-технологического базиса построения электронной компонентной базы (ЭКБ)

### 1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Для обоснования новой ЭКБ необходимо решить следующие взаимосвязанные задачи:

1. Выбор принципа действия приборов
2. Обоснование конструкций
3. Разработка технологий изготовления

#### 1.1. Физические основы автоэлектронной (полевой) эмиссии электронов

Для создания автоэмиссионных приборов используется явление эмиссии электронов из материала в вакуум под влиянием сильного электрического поля. Эмиссия электронов в вакуум при воздействии высокой напряженности электрического поля на катоде происходит из эмиссионных центров которыми могут являться следующие неоднородности или дефекты: микровыступы; диэлектрические включения; оксидные и другие неорганические диэлектрические пленки; слои адсорбированного газа; выход на поверхность межзеренных границ; микрочастицы; продукты крекинга паров масла; края кратеров, образовавшихся в результате пробоев; поры и трещины. Различные типы эмиссионных центров, приведенные на рис. 1, классифицированы в работе [5].

Эмиссионные центры приводят к пробоям вакуумных промежутков и к целому ряду предпробойных явлений, лежащих в основе полевой эмиссии электронов. Одним из этих процессов является автоэлектронная эмиссия, на

которой базируется проектирование и технологии создания ненакаливаемых или холодных катодов [1].

К катодам, как к источникам электронов, предъявляется ряд требований:

- однородность эмиссии по поверхности катода;
- высокая и стабильная плотность тока;
- однородность энергетического распределения эмитированных электронов;
- отсутствие испарения материала с поверхности катода;
- способность катода работать в определенной среде;
- время жизни катода в заданных условиях работы.

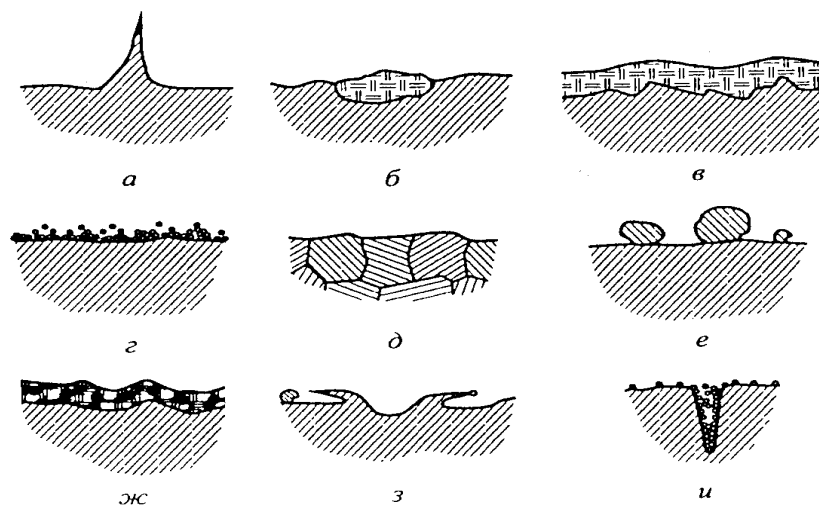


Рис. 1. Различные типы эмиссионных центров, приводящих к пробоям вакуумных промежутков [5]: а)– микровыступы; б)– диэлектрические включения; в)– оксидные и другие неорганические диэлектрические пленки; г)– слои адсорбированного газа; д) – выход на поверхность межзеренных границ; е) – микрочастицы; ж) – продукты крекинга паров масла; з) – края кратеров, образовавшихся в результате пробоев; и) – поры и трещины.

Термокатоде обычно эксплуатируются в режиме потоков, ограниченных пространственным зарядом. Плотность тока в этом случае слабо зависит от температуры катода, тогда как термоэлектронная эмиссия в режиме насыщения зависит экспоненциально от температуры. Требования к температурной стабильности для обеспечения постоянства эмиссии не позволяют использовать катоды в режиме насыщения. Функция распределения работы выхода

эмитирующей поверхности может зависеть от времени и любых изменений вакуумной среды, в которой эксплуатируется катод. Пространственный заряд позволяет уменьшить на несколько порядков флуктуации тока, определяемые как дискретным характером пучка электронов (дробовой шум), так и случайными изменениями эмиссионной способности различных точек поверхности катода (шум фликер-эффекта) [6].

Энергетическое распределение электронов, полученных в результате термоэлектронной эмиссии, определяется статистикой Максвелла-Больцмана, согласно которой велико число электронов на «хвостах» функции распределения для энергий как выше, так и ниже энергии, соответствующей величине электрического поля, при помощи которого ускоряются электроны. Средний энергетический разброс, однако, очень мал - порядка  $kT$ . Для автоэлектронной эмиссии максимум функции распределения по энергиям соответствует уровню Ферми, однако при нормальной температуре очень мало электронов имеют энергию, превышающую уровень Ферми. Таким образом, здесь по существу имеется только один «хвост» функции распределения, содержащий электроны с энергиями ниже той, до которой они ускоряются. После удаления низкоэнергетического «хвоста» можно получить очень малый энергетический разброс.

Шум фликер-эффекта заметно проявляется в катодах, где работа выхода понижена адсорбированным монослоем электроположительных атомов. Такие атомы в виде двумерного газа мигрируют по поверхности до тех пор, пока не испарятся. Утраченные атомы восполняются из толщи материала катода за счет механизма диффузии. Микроскопический участок поверхности катода часть времени находится в эмитирующем состоянии, если на нем адсорбирован электроположительный атом, а все остальное время, когда на нем нет адсорбированного электроположительного атома, в не эмитирующем состоянии. Непрерывное появление и исчезновение эмитирующих участков вызывает шум. Спектр такого шума зависит от средних времен существования участков в эмитирующем и не эмитирующем состояниях.

Если от данного термокатода требуется высокая плотность тока, необходимо увеличить рабочую температуру. Естественные ограничения связаны либо с расплавлением материала катода, либо с превышением давления паров испарившегося материала некоторого предела, характерного для прибора, в котором работает катод. Из-за существования таких ограничений очень небольшое число используемых на практике термокатодов может непрерывно работать при плотностях тока, превышающих  $10 \text{ А/см}^2$ .

Еще одно ограничение связано с охлаждением поверхности катода при отборе с нее тока высокой плотности. Каждый электрон, покидая поверхность, уносит в среднем энергию  $E_e + 2kT$ . Когда охлаждение за счет работы выхода становится существенно выше потерь на излучение, возникают все большие трудности с поддержанием температуры поверхности без расплавления или заметного испарения катодного узла. Несмотря на то, что на практике с катодов были получены плотности тока в непрерывном режиме вплоть до  $20 \text{ А/см}^2$ , абсолютный предел для термокатодов, работающих в непрерывном режиме, по всей видимости, лежит между  $20$  и  $100 \text{ А/см}^2$  [7]. Проблема может быть до некоторой степени облегчена путем получения тока в течение очень коротких промежутков времени (от наносекунд до микросекунд) с достаточно большим временем для восстановления теплового режима катода, однако такой подход ограничен узкой областью применения.

Катоды, принцип действия которых связан с диспенсированием к их поверхности активного материала, могут терять активность (отравляться) за счет небольших количеств веществ, которые либо изменяют химический состав катодной поверхности, либо препятствуют потоку диспенсированного материала.

Было доказано [8], что в случае автоэлектронной эмиссии можно получить плотности тока, превышающие  $10^8 \text{ А/см}^2$ . Однако такие плотности тока могут быть достигнуты только с очень малых поверхностей (площадью, меньшей чем несколько квадратных микрометров). Обнаружено, что электроны эмитируются с микроскопических поверхностей (даже представляющих собой грани монокристалла), очищенных и обработанных с использованием лучших

из известных методов, при величине напряженности приложенного макроскопического электрического поля  $10^5$  В/см вместо ожидаемых  $10^7$ - $10^8$  В/см, характерных для возникновения автоэлектронной эмиссии. Эти электроны испускаются сравнительно небольшим количеством микроострий, на которых легко достигается коэффициент умножения напряженности поля, превышающий 100. Высота острий варьируется в диапазоне 10-1000 атомов, причем на кончиках находится 1-100 атомов [9].

## 1.2. Теория автоэлектронной эмиссии

Поиск путей решения проблемы создания надежных микроэлектронных вакуумных приборов требует тщательного изучения теории автоэлектронной эмиссии. Поэтому в первую очередь необходимо рассмотреть основные положения теории автоэлектронной эмиссии металлов и полупроводников, а также особенности автоэлектронной эмиссии и автоэлектронных приборов в полях СВЧ.

Автоэлектронной эмиссией (АЭЭ) называют эмиссию под действием сильного внешнего электрического поля с напряженностью  $E \approx 10^7 \div 10^8$  В/см.

Теория автоэлектронной эмиссии металлов, базирующаяся на квантовомеханических представлениях, была построена Фаулером и Нордгеймом [10]. Теория предполагает следующие ограничения:

1. В качестве модели для металла выбрана зоммерфельдовская модель свободных электронов в потенциальном ящике [11], образующих вырожденный газ, подчиняющийся статистике Ферми-Дирака.

2. Поверхность раздела металл-вакуум считается идеальной плоскостью, задача сводится к одномерной.

3. Накладываемое внешнее поле не влияет на состояние электронов в металле.

4. Вне объема металла электрон подвергается воздействию только внешнего электрического поля и «силы зеркального изображения».

5. Прозрачность барьера вычисляется с помощью классического метода Вентцеля, Крамера и Бриллюэна (ВКБ).

Вид потенциального барьера, на границе металл-вакуум с учетом этих ограничений, приведен на рис. 2.

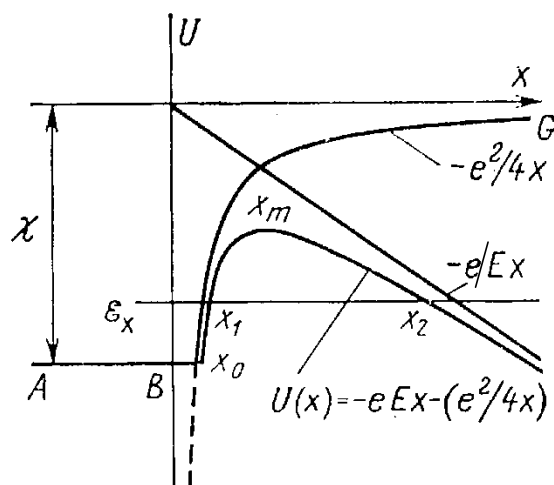


Рис. 2. Зависимость потенциала у поверхности металла в зависимости от расстояния :  $e^2/4x$  – потенциал сил «зеркального изображения»;  $e/Ex$ – внешний потенциал;  $U(x)$  – суммарный потенциал;  $\varepsilon_x$ - уровень Ферми в металле;  $\chi$  – полная глубина потенциальной ямы в металле.

С учетом сделанных ограничений плотность автоэмиссионного тока может быть представлена выражением:

$$j = e \int_0^{\infty} n(\mathcal{E}_x) D(\mathcal{E}_x, E) F(\mathcal{E}_x, T) d\mathcal{E}_x, \quad (1)$$

где  $e$  - заряд электрона;  $n(\mathcal{E}_x)$ - число электронов в интервале энергий  $\mathcal{E}_x, \mathcal{E}_x + d\mathcal{E}_x$ , падающих каждую секунду на  $1\text{см}^2$  площади барьера изнутри металла;

$D(\mathcal{E}_x, E)$  - коэффициент прозрачности потенциального барьера;

$F(\mathcal{E}_x, T)$  - функция распределения Ферми.

Вычисляемая по методу ВКБ прозрачность барьера  $D$  с потенциальной функцией

$$U(x) = e^2/4x - eEx \quad (2)$$

имеет вид

$$D(\mathcal{E}_x, E) = \exp \left\{ \frac{8\pi\sqrt{2m}}{3he} \frac{|\varphi|^{3/2}}{E} g(y) \right\}, \quad (3)$$

где  $\mathcal{E}_x = P_x^2 / 2m$  – часть кинетической энергии электрона, связанная с компонентой импульса по нормали к поверхности (ось  $x$ );  $e$  – заряд электрона;  $h$  – постоянная Планка;  $m$  – масса покоя свободного электрона;  $g(y)$  – табулированная функция Нордгейма аргумента  $y = \sqrt{eE / \mathcal{E}_x}$ .

В результате расчетов [10] для плотности автоэмиссионного тока при  $T=0\text{K}$  было получено:

$$j = \frac{e^3}{8\pi h t^2(y)} \frac{E^2}{\varphi} \exp \left\{ \frac{8\pi\sqrt{2m}}{3he} \frac{\varphi^{3/2}}{E} g(y) \right\}, \quad (4)$$

или после подстановки констант [12] для  $\varphi$  (работы выхода) в эВ,  $E$  в В/см,  $j$  в А/см<sup>2</sup>.

$$j = 1,54 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{t^2(y)\varphi} \exp \left\{ -6,83 \cdot 10^7 \frac{\varphi^{3/2}}{E} g(y) \right\} \quad (5)$$

причем 
$$y = 3,79 \cdot 10^4 \sqrt{E/\varphi} \quad (6)$$

$$t(y) = g(y) - (2y/3)(dg(y)/dy) \quad (7)$$

Значения функций  $g(y)$ ,  $t(y)$  табулированы, причем  $t(y)$  близка к единице. Функция Нордгейма  $g(y)$  сильно изменяется при изменении  $y$  (следовательно, и при изменении  $E$ ), и стоит в показателе экспоненты. Тем не менее это не нарушает основного – резкой экспоненциальной зависимости  $j$  от  $E$  и  $\varphi$  (линейной зависимости  $\lg j = f(1/E)$ ). Вид расчетных зависимостей  $\lg j = f(1/E)$  приведен на рис. 3. Формулы (4) или (5) можно рассматривать как

основные формулы автоэлектронной эмиссии металлов. Они отражают экспоненциальную зависимость плотности тока от напряженности электрического поля и работы выхода и достижение огромных плотностей тока в полях порядка  $10^7$  В/см.

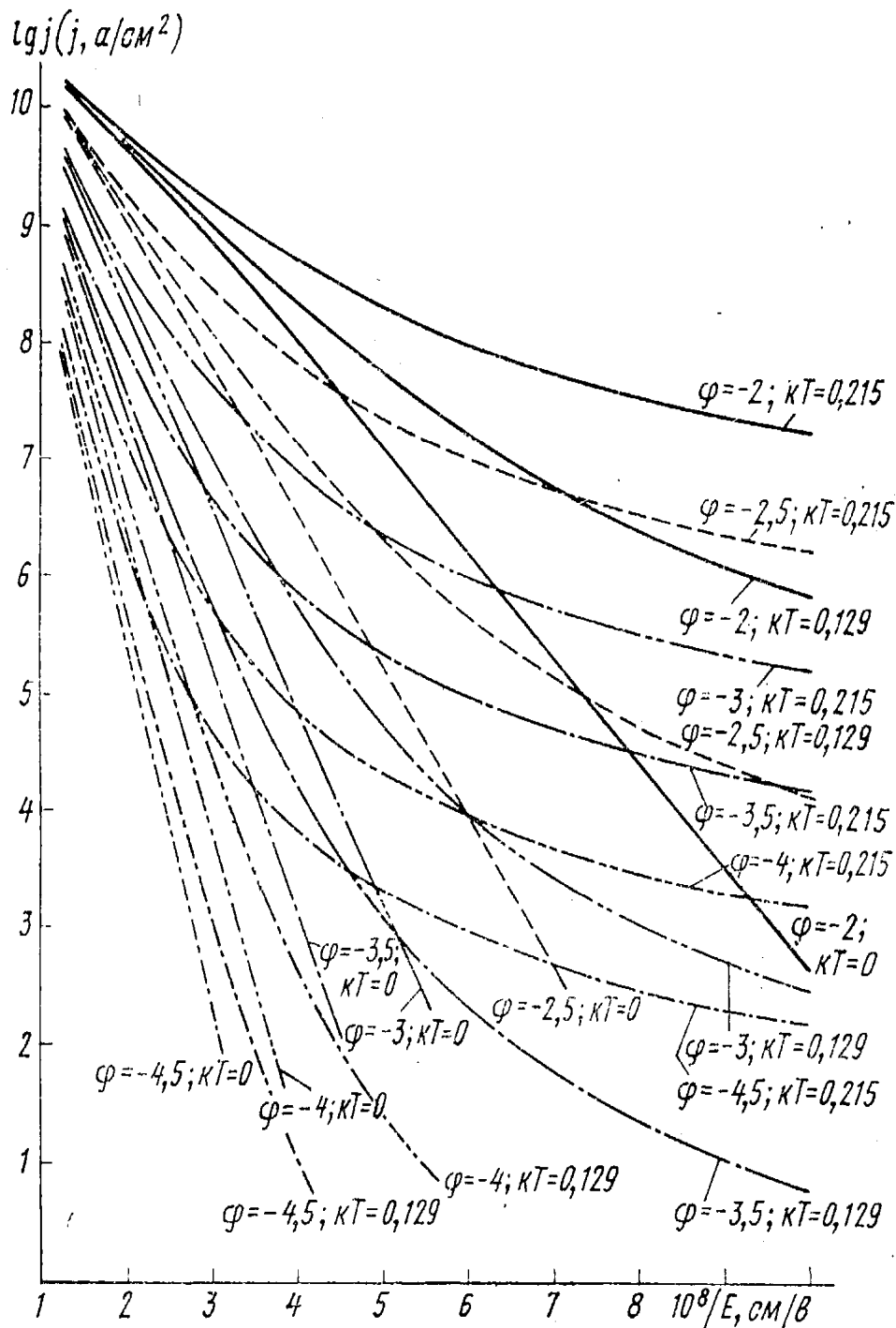


Рис. 3. Зависимость  $\lg(j)=F(1/E)$ , полученная численным методом для металлов в интервалах  $\varphi=2\dots4,5$  эВ;  $T=0\dots3000$  К. ( $kT$  в эВ) [1].



В результате изгиба зон изменяется энергетическое распределение электронов в зоне проводимости, а также на донорных уровнях и возрастает концентрация электронов в приповерхностном слое. При сильных полях изгиб зон может быть большим, и уровень Ферми может оказаться выше дна зоны проводимости у границы полупроводника с вакуумом, так что электронный газ зоны проводимости невырожденный в глубине полупроводника, может стать вырожденным в приповерхностном слое.

Протекание больших сквозных автоэмиссионных токов через полупроводниковый эмиттер, в особенности при значительном его сопротивлении, сопровождается падением напряжения, сосредоточенным в основном у вершины острия. Если внутренние поля, обусловленные этим падением напряжения велики, они могут приводить к перегреву электронного газа, т.е. к переходу его из термодинамически равновесного состояния в неравновесное, а также к генерации электронов в зону проводимости за счет ударной ионизации электронов валентной зоны, либо за счет автоионизации электронов локальных уровней (эффекты сильного поля). Падение напряжения на острие при отборе тока автоэмиссии может, кроме того, приводить к нагреву острия джоулевым теплом.

Наличие поверхностных состояний в полупроводнике обычно сопровождается возникновением внутреннего тормозящего поля (а следовательно, дополнительного потенциального барьера у его поверхности), которое несколько снижается при наложении внешнего поля. Существование внутреннего барьера снижает автоэлектронную эмиссию, главным образом, из-за уменьшения приповерхностной концентрации электронов.

Сложность явления автоэлектронной эмиссии полупроводников заключается еще и в том, что в отличие от металлов, у которых эмиссия идет из одной только зоны проводимости, у полупроводников источниками электронов могут быть как зона проводимости так и валентная зона.

Особенностью автоэлектронной эмиссии полупроводников является то, что у некоторых полупроводников барьер электронного сродства  $\chi$  невелик, и

он может быть полностью снят внешним полем (например для  $\chi=1$  эВ, если барьер шоттковский, это произойдет при  $E=7 \cdot 10^6$  В/см). Однако, при этом и закономерности эмиссии станут иными.

Несмотря на значительный прогресс в области накопления и обобщения экспериментальных данных по автоэлектронной эмиссии полупроводников и установления некоторых общих закономерностей процесса, количественная теория до сих пор не построена. Существуют расхождения во взглядах на интерпретацию даже частных вопросов, таких как появление участков с различным наклоном ВАХ, влияние на эмиссию разогрева электронного газа, роль возможного квантования электронных состояний в приповерхностной области эмиттера и др. Анализ существующих теоретических работ и экспериментальных данных, как новых, так и относящихся к более раннему периоду, позволяет сделать вывод, что качественно механизм автоэлектронной эмиссии полупроводников заключается в следующем – приложенное к образцу внешнее электрическое поле, ускоряющее электроны, искривляет энергетические зоны полупроводника и вблизи его поверхности формирует экранирующий слой пространственного электронного заряда. Если прозрачность потенциального барьера, образованного внутрикристаллическим и внешним электрическими полями, достаточно велика, электроны из экранирующего слоя туннелируют в вакуум. С ростом анодного напряжения вследствие увеличения прозрачности барьера растет и плотность туннельного эмиссионного тока, картина качественно совпадает с той, что наблюдается в металлах.

В отличие от металлов, при дальнейшем увеличении напряжения и повышении уровня отбора электронов плотность эмиссионного тока из полупроводника начинает зависеть не только от прозрачности барьера, но и от скорости притока электронов из глубины образца к поверхности. В отсутствие “размножения” носителей заряда во внутреннем поле кристалла этот поток ограничен, он определяется скоростью их генерации в приповерхностной области и постоянными дрейфа и диффузии [1]. Поэтому плотность тока

стабилизируется – на вольт-амперной характеристике появляется характерная ступенька (рис. 5). Насыщение особенно четко наблюдается в эмиссии полупроводников  $p$ -типа и высокоомных образцов  $n$ -типа. Дальнейшее увеличение анодного напряжения приводит к дальнейшему возрастанию тока, до пробоя и разрушения эмиттера. Наличие этого участка обычно связывают с началом лавинного размножения носителей тока в кристалле.

Фундамент теории автоэлектронной эмиссии полупроводников заложен в работах Моргулиса [14], Стреттона [15, 16]. В области относительно слабых токов теория строится аналогично тому, как это делается для металлов. В основу ее положено предположение о термодинамической равновесности процесса эмиссии и, следовательно, о постоянстве уровня химического потенциала в образце. Последнее справедливо в том случае, когда лишь небольшая часть электронов, падающих на потенциальный барьер, туннелирует в вакуум.

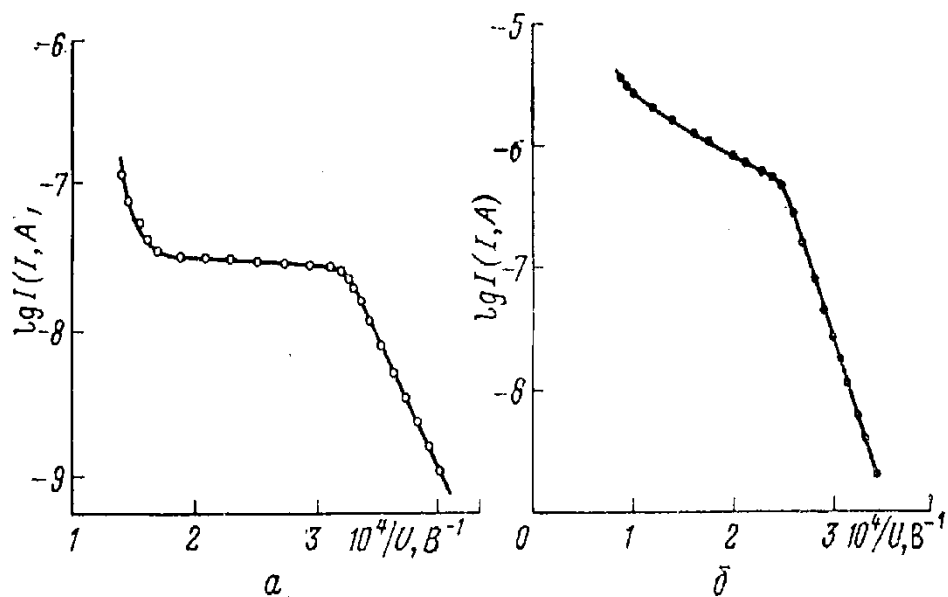


Рис. 5. Автоэмиссионные вольт-амперные характеристики [1]:  
а)  $p$ -Si; б)  $n$ -Si.

Суммарный ток через образец значительно меньше дрейфового потока электронов к поверхности и диффузионного потока электронов от поверхности в глубину образца, поэтому соответствующее приближение называется «приближение нулевого тока» [1]. Плотность тока эмиссии определяется

характером заполнения электронных энергетических состояний в приповерхностной области полупроводника, т.е. степенью вырождения электронного газа вблизи поверхности: энергетическим интервалом  $\mathcal{G}_s$  (рис.4).

В приближении нулевого тока решение задачи о строении приповерхностной области пространственного заряда и распределения поля в образце сводится к решению уравнения Пуассона с заданными граничными условиями [15], [17-19]. Найденное таким образом значение  $\mathcal{G}_s$  определяет функцию Ферми распределения электронов  $f(E)$  в выражении для плотности тока эмиссии:

$$j = \frac{2e}{h^3} \int_{-\infty}^0 dP_x \int_{-\infty}^{\infty} dP_y dP_z f(\mathcal{E}) \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial P_x} D(\mathcal{E}, P_y, P_z), \quad (8)$$

где  $D$  - вероятность преодоления потенциального барьера электроном с полной энергией  $\mathcal{E}$  и тангенциальными к поверхности компонентами импульса  $P_y$  и  $P_z$ . Фактически прозрачность барьера зависит лишь от нормальной к поверхности компоненты импульса  $P_x$  и определяется (1).

Расчет плотности тока эмиссии в пределах применимости приближения нулевого тока был проведен в работе [20]. Вольтамперные характеристики для случаев эмиссии из валентной зоны и из зоны проводимости при произвольной степени вырождения электронного газа в приповерхностной области кристалла являются прямыми в координатах  $\lg j = f(1/E)$ . Их наклон определяется сродством к электрону  $\chi$ , шириной запрещенной зоны  $\mathcal{E}_g$  (в случае эмиссии из валентной зоны) и параметром вырождения  $\mathcal{G}$ , вблизи поверхности принимающим значение  $\mathcal{G}_s$  (рис. 4). Также как и в случае автоэлектронной эмиссии металлов, эмиссионный ток слабо зависит от температуры вплоть до  $T=1000$  К. При увеличении ширины запрещенной зоны плотность тока быстро падает.

Оценочные расчеты, проведенные в работе [21], показывают, что напряженность поля, при котором наступает вырождение электронного газа на поверхности  $E^{(0)}$  - значительно меньше напряженности поля необходимой для

начала заметной автоэмиссии:  $E_{Ge}^{(0)} = 3,7 \cdot 10^6$  В/см,  $E_{Si}^{(0)} = 5,1 \cdot 10^6$  В/см, т.е. в стационарном случае эмиссия практически всегда идет из вырожденной зоны проводимости.

В области, где ВАХ отклоняются от прямой Фаулера-Нордгейма, происходят значительные изменения в характере эмиссионного процесса. Автоэмиссия становится чувствительной к освещению и температуре, заметно возрастает падение напряжения на эмиттере, размеры эмиссионного изображения уменьшаются с увеличением напряжения. Эти явления сохраняются на протяжении всего участка насыщения. Результаты разносторонних экспериментов на полупроводниках *p*-типа и на высокоомных образцах *n*-типа легко интерпретировать, если принять, что появление области насыщения на ВАХ связано с ограниченностью притока носителей из глубины образца [22, 23]. При этом имеют место такие взаимосвязанные процессы: происходит уменьшение концентрации носителей в приповерхностной области образца, поле более глубоко проникает внутрь полупроводника (вследствие чего изменяется конфигурация поля вблизи катода острейного типа), возрастает падение напряжения на объемном сопротивлении кристалла, происходит некоторый разогрев электронного газа во внутреннем поле. Эмиссионный ток при этом полностью ограничен скоростью поступления электронов к поверхности, почти не зависит от прозрачности потенциального барьера и, следовательно, от внешнего поля. Энергетические диаграммы полупроводников *p*- и *n*-типа в сильном электрическом поле при наличии протекающего через образец тока приведены на рис. 6. Для полупроводника *p*-типа ток через образец и соответственно ток эмиссии при сильных электрических полях ограничиваются, в основном, проводимостью обедненной области. Согласно [21]:

$$j^{(m)} = Ae_0\mu_n \sqrt{\pi\alpha} \frac{E}{K} \exp\left[-\frac{\mathcal{E}_g}{2kT}\right], \quad (9)$$

где 
$$A = 4\pi(2m_n kT/h^2)^{3/2}; \quad \alpha = \frac{\mu_p}{\mu_n} \left(\frac{m_p}{m_n}\right)^{3/2}; \quad e_0 - \text{заряд электрона};$$

$\mu_p, \mu_n$  – подвижность дырок и электронов соответственно;  $m_p, m_n$  – эффективные массы дырки и электрона;  $K$  - диэлектрическая постоянная полупроводника.

Значения предельных плотностей тока вычисленные по формуле (9) составляют для  $p$ -Ge ( $N_a=10^{15} \text{ см}^{-3}, T=300\text{К}$ )  $j^{(m)}=2 \cdot 10^4 \text{ А/см}^2$ , для  $p$ -Si ( $N_a=10^{15} \text{ см}^{-3}, T=300\text{К}$ )  $j^{(m)}=1 \text{ А/см}^2$ , что значительно меньше критических плотностей токов, приводящих к разрушению эмиттера.

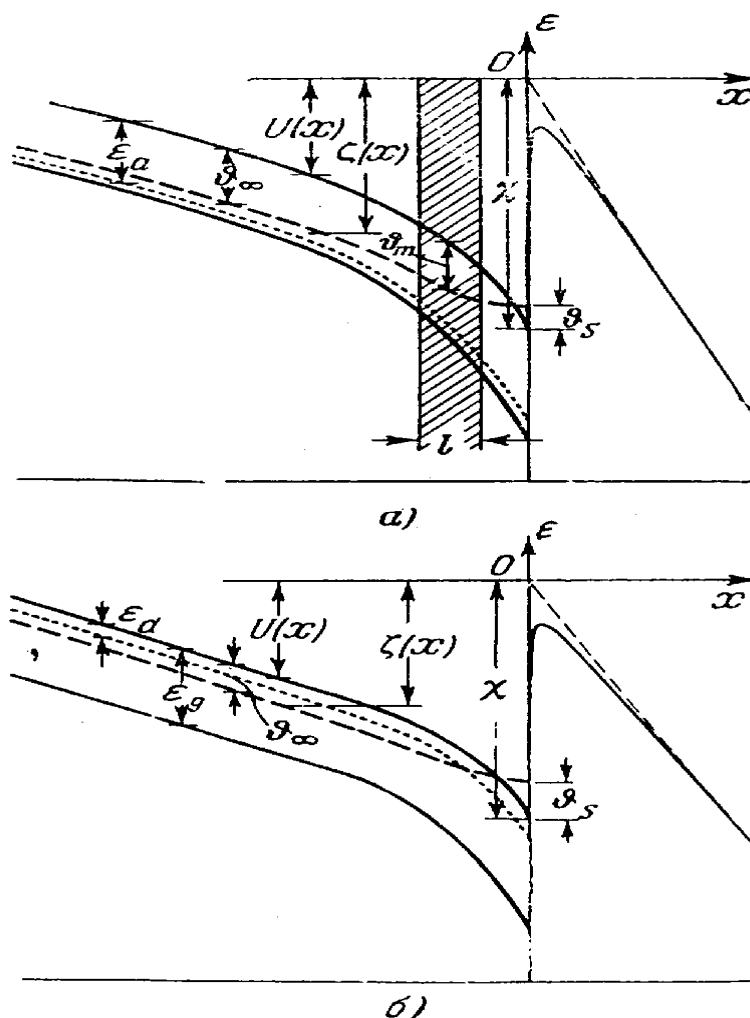


Рис. 6. Энергетические диаграммы полупроводниковых эмиттеров в сильном электрическом поле при наличии электрического тока через образец для полупроводников  $p$ -типа (а) и  $n$ -типа (б) [13].

Предельная плотность тока почти не зависит от степени легирования полупроводника, так как определяется проводимостью обедненной области, зависящей от концентрации собственных носителей. При этом пренебрегается незначительной зависимостью подвижности носителей от концентрации примесей.

Из формулы (9) следует сильная зависимость предельной плотности тока от температуры. Пренебрегая предэкспоненциальными множителями из формулы (9) можно записать соотношение:

$$\frac{d \ln j^{(m)}}{d(1/kT)} \approx -\frac{\mathcal{E}_g}{2}. \quad (10)$$

Полученный результат свидетельствует о важной роли генерации носителей тока в обедненной области и сильной температурной чувствительности полупроводникового автоэмитера при плотности тока близкой к максимальной. Ясно также, что проводимость обедненной области может быть увеличена за счет генерации носителей заряда светом, и следовательно, в области насыщения тока автоэмиссия должна быть фоточувствительной.

Для полупроводников  $n$ -типа согласно [21] предельная плотность тока определяется:

$$j^{(m)} = \frac{e_0 E}{K} \mu_n n_\infty, \quad (11)$$

где  $n_\infty$  - концентрация носителей в глубине образца.

Из формулы (11) следует сильная зависимость тока насыщения для полупроводников  $n$ -типа от концентрации примеси.

$$\frac{d \ln j^{(m)}}{d(1/kT)} \approx \frac{\mathcal{E}_d}{2}. \quad (12)$$

Так как  $\mathcal{E}_d \ll \mathcal{E}_g$ , то температурная зависимость плотности тока насыщения для полупроводников  $n$ -типа значительно слабее, чем для полупроводников  $p$ -типа и проявляется только при низких температурах.

Результаты численных расчетов ВАХ для эмиттеров из электронных полупроводников приведены на рис. 7.

Следует отметить, что вычисленные значения плотности тока насыщения  $j^{(m)}$  значительно меньше экспериментальных, что обусловлено одномерностью выбранной модели эмиттера.

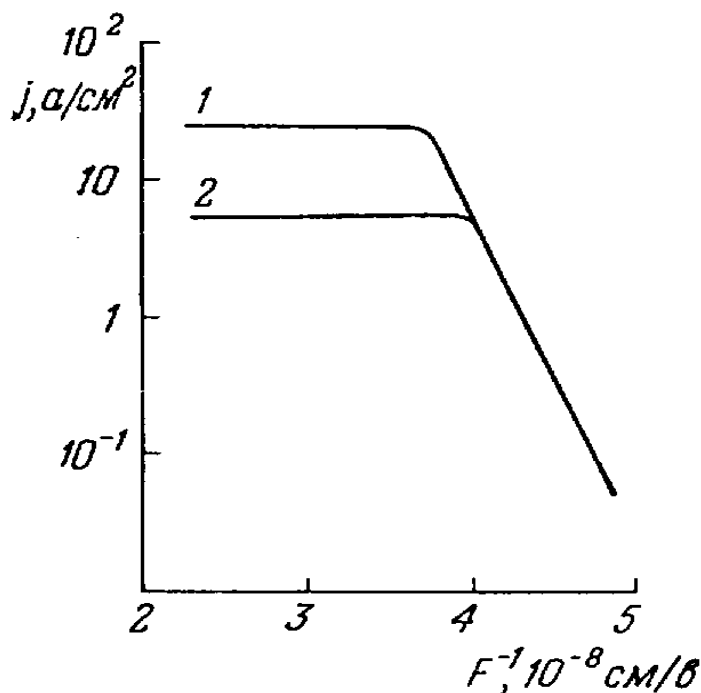


Рис. 7. Вольтамперные характеристики  $n$ -Si, рассчитанные с учетом зависимости подвижности  $\mu_n$  от напряженности внутреннего поля в кристалле  $E$ , при  $T=300$  К [13].

#### 1.4. Автоэлектронная эмиссия в высокочастотном поле

Впервые вопрос об адиабатичности процесса туннелирования в приложении к автоэлектронной эмиссии в поле СВЧ был рассмотрен Бункиным и Федоровым [24]. Было показано, что вплоть до частот  $10^{14}$  Гц плотность тока эмиссии определяется обычным соотношением Фаулера-Нордгейма с заменой напряженности поля  $E$  его мгновенным значением. Этот результат полностью согласуется с расчетами инерционности процесса туннелирования

непосредственно через время туннелирования [25]. Столь малая инерционность процесса туннелирования вызвала в последние годы повышенный интерес к исследованию автоэлектронной эмиссии в переменных и, особенно в СВЧ полях. Это связано с перспективами создания электровакуумных приборов с уникальными параметрами: умножителей частоты, линейных усилителей, генераторов, преобразователей СВЧ энергии.

В режиме СВЧ при синусоидальном напряжении  $U$  ток автоэмиссии  $I$  отбирается в течение малой части периода, вблизи вершины синусоиды одного из полупериодов. Сильная нелинейность вольтамперной характеристики автоэлектронной эмиссии, возрастающая с изменением тока, создает весьма крутые фронты у пика импульса тока. Такой импульс содержит гармоники высокой амплитуды кратные основной частоте и поэтому, применяя автоэлектронный катод, легко осуществить умножение частоты. Относительная моноэнергетичность электронов в импульсе приводит к группировке их в сгустки, не вызывая необходимости в больших пролетных расстояниях, что уменьшает габариты СВЧ приборов. В ряде применений СВЧ ценным качеством оказывается высокая плотность тока автоэлектронной эмиссии и «точечность» источника, что облегчает создание электронных «шнуров» высокой плотности. Автоэлектронный катод малогабаритен, поэтому он без ухудшения качества резонатора может применяться вплоть до предельных СВЧ. Узкий пик энергетического распределения автоэлектронной эмиссии при низких температурах приводит к малым шумам, что улучшает качество СВЧ приборов, использующих автоэлектронную эмиссию. Наконец, отсутствие термокатода и малые габариты (порядка нескольких микрон), присущее автоэлектронным катодам, крайне важно в режиме СВЧ. Все перечисленные особенности автоэлектронной эмиссии определяют интерес и перспективность их использования в этом режиме. Таким применениям способствует ряд факторов, благоприятно влияющих на стабильность работы автокатода на СВЧ. Уже ранние эксперименты по исследованию автоэлектронной эмиссии показали, что в СВЧ поле стабильность эмиссии заметно повышается [26-28].

Этот факт связан с коренным изменением характера ионной бомбардировки в СВЧ поле [29]. Характерной особенностью структуры электрического поля вблизи вершины эмиттера является наличие больших градиентов напряженностей, достигающих  $10^{12}$ - $10^{13}$  В/см<sup>2</sup>. При движении в быстропеременном поле с таким градиентом на медленные ионы действует сила, направленная в область снижения напряженности поля. Именно эта сила и вызывает эффективное выталкивание ионов от поверхности эмиттера. Используя в работе [29] метод [30], авторы показали, что ионы с энергией  $\mathcal{E} < \mathcal{E}_{mi}$  не достигают поверхности автокатода,

$$\text{где } \mathcal{E}_{mi} = \begin{cases} 2^{-10/3} (eE_o r_k^2)^{2/3} (m_i \omega)^{1/3}, & \omega < \omega_1, \\ 2^{-2} (eE_o)^2 / (m_i \omega^2), & \omega > \omega_1 \end{cases}$$

$r_k$  – радиус вершины эмиттера,  $m_i$  – масса иона,  $\omega_1 = (2eE_o/m_i r_k)^{1/2}$ .

На рис. 8 приведена зависимость величины  $\mathcal{E}_{mi}$  от  $\omega$ .

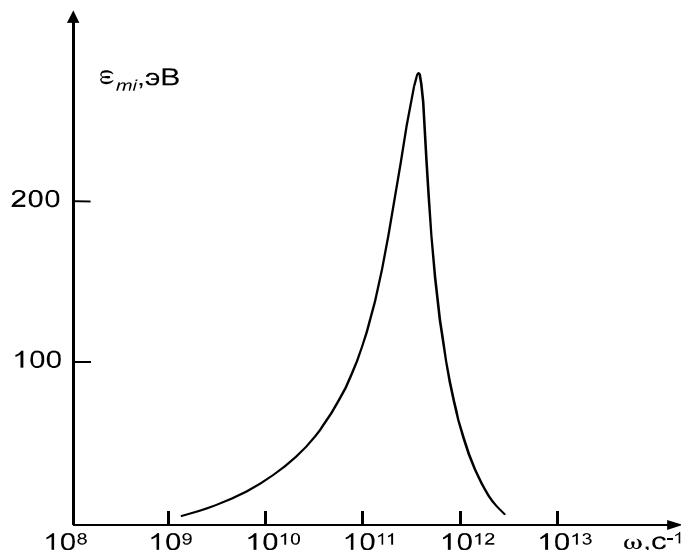


Рис. 8. Зависимость максимальной энергии ионов  $\mathcal{E}_{mi}$ , не долетающих до поверхности катода, от частоты переменного поля  $\omega$  [8]:

На вершине катода радиусом  $r_k=0,5$ мкм амплитуда напряженности поля  $E_o=6 \cdot 10^7$  В/см.

На рис. 9 представлены траектории ионов кислорода, имеющих начальную энергию  $\mathcal{E} = 10$  эВ и падающих на эмиттер под различными углами.

В работе [29] в адекватных условиях проведено сравнение стабильности тока автоэлектронной эмиссии при подаче видеоимпульсов, когда присутствует ионная бомбардировка, и радиоимпульсов, когда ионная бомбардировка отсутствует. В случае видеоимпульсов после быстрого спада наблюдается резкий рост тока эмиссии, завершающийся взрывом катода и развитием вакуумного пробоя. На эмиссионном изображении возникают интенсивно эмитирующие подвижные центры. Их появление связано с интенсивной поверхностной миграцией, возникающей под действием ионной бомбардировки. В СВЧ режиме после первоначального спада, связанного с адсорбцией молекул остаточного газа, наблюдается стабилизация тока автоэлектронной эмиссии. При давлении  $10^{-5}$  Торр никаких заметных изменений тока эмиссии и автоэмиссионного изображения не обнаружено.

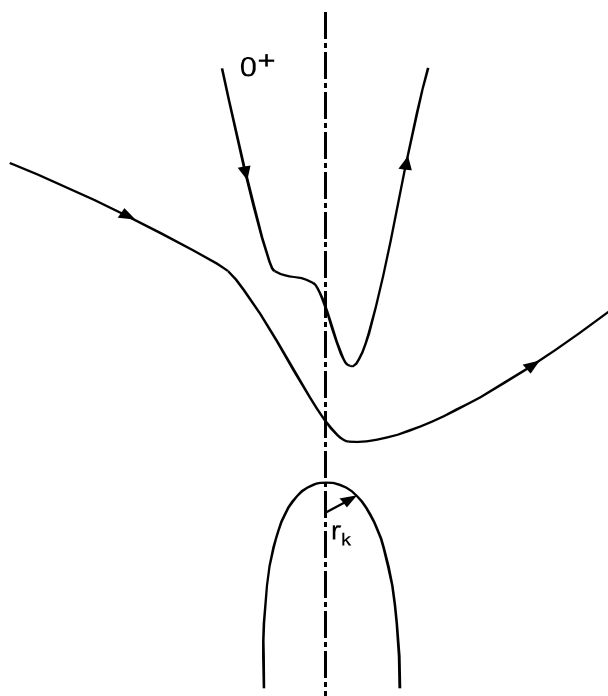


Рис. 9. Траектории ионов кислорода  $O^+$ , падающих из бесконечности на острие радиусом  $r_k = 0,5$  мкм;  $\omega = 3 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ ,  $E_0 = 6 \cdot 10^7 \text{ В/см}$  [8].

При этом ослабляется катодное распыление автокатода [31], поскольку ионы остаточных газов с их большой массой (сравнительно с электронной) в резко переменном поле не могут набрать большого ускорения, направленного к автокатоде. Для автоэлектронного катода, помещенного в резонатор, мощность пучка ограничивается мощностью резонатора, что мешает развитию вакуумного пробоя. Также, в режиме СВЧ, как показано Циммером [28], снижается чувствительность тока эмиссии к изменениям работы выхода  $\varphi$  на СВЧ.

Если определить величину  $g$  формулой:

$$g=(dI/I)/(d\varphi/\varphi),$$

то по Циммеру на СВЧ для автокатода в резонаторе  $g$  составляет 18 или 25% от  $g$  для стационарного режима при  $j=10^6$  или  $10^7$  А/см<sup>2</sup> соответственно.

Закономерности автоэлектронной эмиссии в поле СВЧ экспериментально проверены в пределах четырех порядков изменения плотности тока. В указанных пределах подтверждена справедливость соотношения Фаулера-Нордгейма для случая поля СВЧ [29, 32, 33].

Следует отметить, что применение автокатода в СВЧ приборах требует большого объема экспериментальных и теоретических работ. В настоящее время недостаточно данных, чтобы просто заменить термокотод соответствующей конструкцией автоэлектронного катода. Применяя в СВЧ приборах автокатод целесообразно видоизменять и конструкцию самих приборов и технологию их изготовления в целом.

### 1.5. Быстродействие вакуумных микроэлектронных приборов

Помимо стойкости к внешним воздействиям автоэлектронные микроструктуры (триоды, диоды) потенциально могут обладать высоким быстродействием. Действительно, пролетное время электрона от катода до анода  $t$ , разность потенциалов между которыми составляет менее 100 В, а зазор менее 1 мкм, лежит в интервале  $10^{-12}$ – $3 \cdot 10^{-13}$  сек. В традиционной

осесимметричной конструкции микротриода величина  $t$  может быть значительно меньше времени перезарядки паразитных межэлектронных емкостей, которые можно оценить известным соотношением ( $\tau \cong R_{\partial}C$ ), где  $R_{\partial}$  – дифференциальное сопротивление в рабочей точке анодно-сеточной характеристики,  $C$  – межэлектродная емкость. В этом случае величина  $\tau$  будет определять быстродействие прибора и влиять на его высокочастотные свойства.

В работе [34] проведена оценка быстродействия триодной структуры, имеющей осевую симметрию, с наиболее типичными формами автокатодов (пленка, лезвие, острие). Согласно формуле Фаулера-Нортгейма, ток эмиссии автокатода равен

$$i = AS \varepsilon E^2 \exp(-D/E),$$

где  $A$  и  $D$  – постоянные для данного катода величины,  $S_{\varepsilon}$  – площадь эмиссии катода,  $E$  – максимальная напряженность электрического поля на его поверхности. Если в триодной структуре напряженности электрического поля, создаваемые потенциалами анода и управляющего электрода, имеют максимум в одной и той же точке поверхности катода, то в этой точке можно представить величину

$$E = B_{ку} U_{упр} + B_{ка} U_a = B_{ка} [U_a + (B_{ку}/B_{ка}) U_{упр}],$$

где  $B_{ка}$  и  $B_{ку}$  – форм-факторы в системах катод-анод и катод-управляющий электрод.

Величина  $k = dU_a/dU_{упр} = B_{ку}/B_{ка}$  – статический коэффициент усиления триодной структуры по напряжению.

Если обозначить  $U_a + kU_{упр} = U_{об}$ , то для семейства анодно-сеточных характеристик триодной структуры напряженность электрического поля на вершине катода будет определяться величиной  $B_{ка}$  и обобщенным напряжением  $U_{об}$ , т. е.

$$E = B_{ка} U_{об}.$$

Подставив и дифференцируя по  $dU_{упр}$ , получим

$$di_{\varepsilon}/dU_{упр} = [AS \varepsilon B_{ка}^2 k \exp(-D/B_{ка} U_{об})] (2U_{об} + D/B_{ка}).$$

В силу того, что  $D \gg B_{ка} U_{об}$ ,

$$di_{э}/dU_{уп} = AS_{э} B_{ка} Dk \exp(-D/B_{ка} U_{об}) = Bki_{э}/B_{ка} U_{об}^2).$$

Следовательно,  $\tau \cong EU_{об} C/Dki_{э}$ . Если триодная структура сформирована на проводящей подложке, то величина  $C$  определяется по сути емкостью конденсатора, обкладками которого являются управляющий электрод и подложка:  $C = \varepsilon \varepsilon_0 S/l$  где  $\varepsilon, \varepsilon_0$  – диэлектрические постоянные изолятора и вакуума,  $l$  – толщина слоя изолятора,  $S$  – площадь обкладок конденсатора. Межэлектродные емкости в структуре, как правило, меньше емкости указанного конденсатора и ими можно пренебречь. Следовательно, в этом случае

$$\tau = EU_{об} \varepsilon \varepsilon_0 S/Dki_{э} l.$$

Для удобства сравнения величина  $S/S_0$  принимается одинаковой для рассматриваемых триодных структур.

Таким образом, из выражения следует, что величина быстродействия триодной структуры определяется максимальной напряженностью электрического поля  $E = E_m$  на поверхности автокатода при данных значениях потенциалов электродов, током эмиссии катода и статическим коэффициентом усиления триодной структуры по напряжению.

Для оценки значения  $\tau$  необходимо знать распределение напряженности электрического поля в структуре и определить траектории электронов. Исследование полей и траекторий электронов в осесимметричных ячейках с острыми микроавтокатодами методом численного моделирования было проведено в [35], где рассматривались триодные структуры, в которых расстояние до анода существенно превышало характерные размеры ячейки. Поэтому влияние потенциала анода на распределение напряженности электрического поля в ячейке являлось незначительным и им можно было пренебречь. В тоже время большой интерес для практического применения представляет случай, когда расстояние в триодной структуре между электродами соизмеримы.

В работе [34] проведено физическое моделирование триодной структуры с пленочным, лезвийным и острийным микроавтокатодами, имеющей соизмеримое расстояния между электродами.

Размеры моделируемых структур лежали в субмикронной области: расстояние между катодом и управляющим электродом, а также между анодом и управляющим электродом составляло 0,2–0,6 мкм, толщина пленки управляющего электрода равнялась 0,2 мкм, высота катода – 0,8 мкм. Значения напряжений на аноде  $U_a$  и управляющем электроде  $U_{упр}$  принимались равными соответственно 1 и 0,4  $U_a$ , катод был заземлен. Влиянием пространственного заряда пренебрегалось.

Зная распределение напряженности электрического поля по поверхности вершины автокатаода и траектории электронов в триодной структуре, можно определить величину перехвата тока эмиссии управляющим электродом. Величина полного тока с поверхности катода равна сумме токов, эмитируемых каждой точкой этой поверхности:

$$i = \sum_n i_n \cdot$$

Здесь  $i_n$  дается формулой Фаулера-Нордгейма, где значения  $S$  и  $E$  проставлены с индексом  $n$ . Суммирование проводится по всей поверхности катода. Площадь эмиссии  $S_n$  определяется малой окрестностью вблизи  $n$ -й точки с напряженностью электрического поля  $E_n$ . Выбирая достаточно малый шаг, можно предположить, что величина  $S_n$  практически постоянна и  $S_s = n S_n$ , где  $S_s$ -площадь эмиссии катода.

Таким образом, вычисляя значения полного тока эмиссии катода и тока одного из электродов с учетом вышеуказанного, определяется доля тока управляющего электрода по отношению к току анода  $i_{упр}/i_a = p$ .

Зависимость  $p(\Delta x)$  при различных  $R/(Y/2)$  для триодной структуры с пленочным, лезвийным и острийным катодом показывает, что доля тока управляющего электрода минимальна для триодной структуры с острийным катодом, имеет несколько большее значение для структуры с лезвийным

катодом и резко возрастает для триодной структуры с пленочным катодом. Последнее связано с трубчатой конфигурацией электронного потока.

При заглаблении автокатада доля тока резко возрастает и зависит от положения анода. С уменьшением  $R/(Y/2)$  влияние анода на распределение электрического поля в пространстве между катодом и управляющим электродом усиливается, что приводит к уменьшению угла наклона траектории электронов к оси симметрии структуры и снижению токоперехвата управляющим электродом.

Одним из параметров, определяющим быстродействие триодной структуры, является величина тока эмиссии автокатада  $i_a$ . Поскольку постоянная времени обратно пропорциональна  $i_a$ , то для получения максимального быстродействия величина  $i_a$  должна быть максимальной при данных значениях напряжений на электродах. Учитывая, что при этом необходимо иметь минимальный ток управляющего электрода ( $p(\Delta x) \ll 1$ ), рассматривается область значений  $\Delta x$ , для которых  $i_a = i_a$ . Зная зависимость  $p(\Delta x)$  при различных  $R/(Y/2)$  и величину тока эмиссии катода, можно определить зависимость  $i_a(\Delta x)$ .

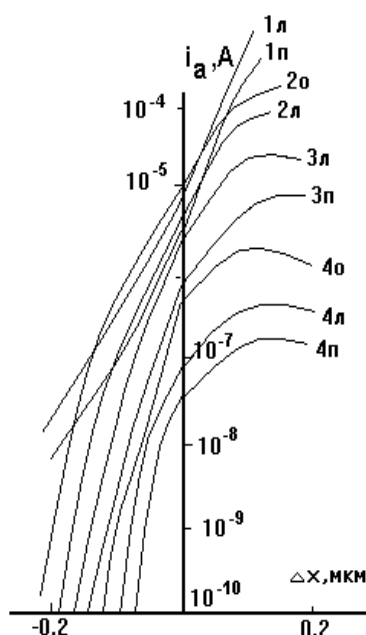


Рис. 10. Зависимость тока анода  $i_a(\Delta x)$  в триодных структурах с пленочным (п), лезвийным (л) и острийным (о) автокатадами [34].

Положения максимумов кривых (рис.10)  $i_a(\Delta x)$  при  $R/(Y/2)=3$  совпадает с положениями максимумов соответствующих зависимостей  $E_m(\Delta x)$ . При уменьшении  $R/(Y/2)$  положение максимума кривой  $i_a(\Delta x)$  смещается вправо, т.к. становится существенной величина напряженности электрического поля у поверхности автокатода, создаваемая потенциалом анода, что приводит к постоянному нарастанию анодного тока. Для  $R/(D/2)<2$  максимума зависимости  $i_a(\Delta x)$  в рассматриваемом интервале  $\Delta x$  не наблюдается.

Параметром определяющим величину быстродействия триодной структуры, является также статический коэффициент усиления по напряжению

$$k = \left. \frac{dU_a}{dU_y} \right|_{E_k}$$

Значение  $k$ , соответствующие заданному взаимному расположению электродов в триодной структуре, определялось изменением потенциалов  $U_a$  и  $U_y$ , при котором оставалась постоянной величина напряженности электрического поля  $E_k$  поверхности автокатода.

На величину  $k$  существенное влияние оказывает взаимное расположение электродов в триодной структуре (рис. 11).

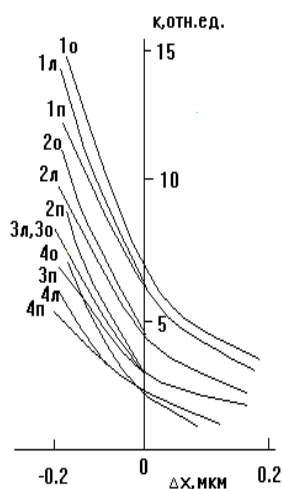


Рис. 11. Зависимость статического коэффициента усиления по напряжению  $k$  в триодных структурах с пленочным (п), лезвийным (л) и острым (о) автокатодом от величины  $\Delta x$ ;  $R/(D/2)=3$  (1); 2 (2); 1,5 (3); 1 (4) [34].

При перемещении вершины катода по оси  $x$  к аноду ( $\Delta x > 0$ ) коэффициент усиления уменьшается и при  $\Delta x > 0,15$  мкм становится меньше 1 для  $R/(D/2) < 2$ . Заглубление вершины катода ( $\Delta x < 0$ ) приводит к быстрому возрастанию статического коэффициента усиления по напряжению, что обусловлено повышением экранирующего действия управляющего электрода. С этим же связано возрастание  $k$  с увеличением параметра  $R/(D/2)$ .

На основании зависимостей  $\tau(\Delta x)$  [34] оптимальное взаимное расположение электродов в триодных структурах с пленочным, лезвийным и острым автоэлектронным катодом, обеспечивающее их максимальное быстродействие, может быть представлено в виде зависимостей  $\Delta x_{\text{опт}}(R/(D/2))$  (рис.12, б).

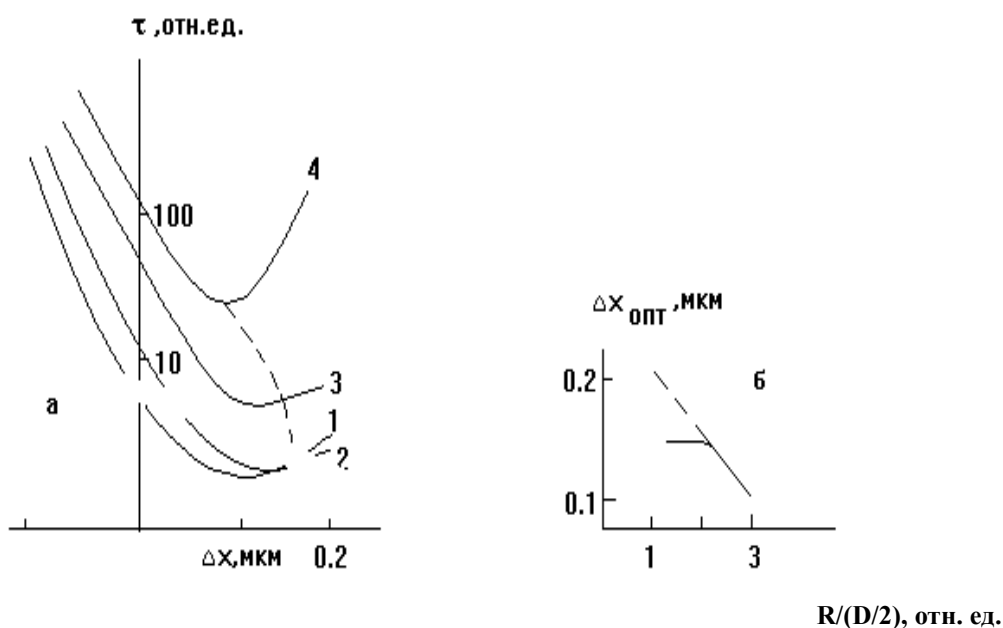


Рис. 12. а–зависимость постоянной времени  $\tau$  триодной структуры с лезвийным катодом от величины  $\Delta x$ ; б–зависимость оптимального расположения вершины автокатаода от величины  $R/(D/2)$  в триодных структурах с пленочным, острым и лезвийным автоэлектронным катодом [34]: Пунктирная линия соединяет положение минимумов кривой  $\tau(\Delta x)$ .

Сравнивая значения  $\tau_{min}$  для рассматриваемых триодных структур, следует отметить, что наибольшее быстродействие в точке максимума имеет структура с острым автокатодом, наименьшее-триодная структура с пленочным автоэлектронным катодом.

#### 1.6. Конструкции и способы создания автоэмиссионных микроприборов

Принципиальных конструктивных решений, реализующих различные типы катодных эмиссионных центров показанных на рис. 1, всего два. Создание геометрической формы (острия, впадины, лезвия и т.д.) и выбор материала катода или типа покрытия (металлические, полупроводниковые, диэлектрические и композиционные). Усложнение реализации конструктивных решений катода состоит в том, что в материале катода или в покрытии создаются неоднородности различных масштабов для обеспечения функциональности автоэмиссионного катода в заданном диапазоне рабочих частот, напряженностей поля, стабильности эмиссии, надежности и времени безотказной работы.

Техническая реализация автоэмиссионного прибора кроме изготовления катода заключается в создании анода и управляющих электродов, которые помещаются в вакуумный объем.

Использование автоэлектронной эмиссии, вместо термоэлектронной, обеспечивает возможность мгновенного токового отклика на изменение управляющего напряжения, исключает потери энергии на эмиттирование электронов (при оптимальной конструкции прибора ток управляющего электрода не превышает 0,1% от общего тока эмиссии).

Проволоки, стравленные до чрезвычайно острых иголок, имеют разброс по эмиссионным характеристикам, если, как было продемонстрировано Мюллером в 1936 году, на их кончиках не сформированы в результате термической обработки монокристаллы. Эти кристаллы обычно имеют размеры 0,2–1 мкм и ориентированы к поверхности различными гранями. Грани с

наименьшей работой выхода отличаются наибольшей эмиссионной способностью, поэтому при использовании таких катодов в электронных источниках необходимо иметь возможность отбора электронов с определенной грани. Такие катоды характеризуются нестабильностью тока и малым сроком службы главным образом из-за распыления поверхности катода в результате бомбардировки ионами остаточного газа, образующимися в приповерхностной зоне. В таких устройствах, для того чтобы обеспечить длительную работу катода без повреждения из-за распыления, требуется обеспечить остаточное давление около  $10^{-12}$  Па, хотя при проведении краткосрочных экспериментов могут быть получены приемлемые сроки службы в несколько часов при давлении  $10^{-8}$  Па [36].

К настоящему времени наиболее полно изучена автоэлектронная эмиссия одиночных металлических эмиттеров [2–4], одним из основных применений которых стала сканирующая туннельная микроскопия. Продолжается также изучение эмиссионных свойств металлоподобных материалов и полупроводников, а также других соединений, с целью создания эффективных автокатодов.

Указывая на основные пути достижения больших абсолютных значений тока, авторы работ [1, 37] утверждают, что, когда требуется высокая энергия в пучке, наряду с большими токами, применять в качестве сильноточного катода одиночное острие большого радиуса эффективно. Однако, экспериментальное изучение эмиссии одноострийных автокатодов в работе [11] показало, что ток растет только при  $r < 1,6$  мкм и определяется выражением

$$I = 2\pi jr^2(1 - \cos\theta),$$

где  $I$  – полный автоэмиссионный ток;  $j$  – плотность автоэмиссионного тока;  $r$  – радиус острия;  $\theta = \theta(\alpha, F)$  – полуугол эмиссии, зависящий от форм-фактора вершины острия  $\alpha$  и напряженности электрического поля  $F$ .

При  $1,6 < r < 2,1$  мкм ток не увеличивается. Расчетная эмитирующая площадь в интервале значений  $r$  практически остается постоянной. Авторы объясняют это уменьшением форм-фактора  $\alpha$  с ростом радиуса острия. При  $r \geq 2$  мкм отмечают уменьшение как тока эмиссии так и расчетной эмитирующей площади, что связано с невозможностью получить «правильную», т.е. скругленно–сглаженную форму вершины при больших радиусах. Эксперименты [38], проведенные на вольфрамовых остриях размерами  $0,7 < r < 2$  мкм, показали что при  $r > 1,5$  мкм фактически невозможно получить распределение эмиссии по поверхности, соответствующее скругленно–сглаженной форме отжига, для которой справедлива зависимость  $I \sim jr^2$ . Для данных радиусов остриев активация процесса поверхностной самодиффузии при высокой температуре приводит не к образованию скругленно–сглаженной формы отжига, а к полиэдрической форме роста, т.е. к появлению огранки на вершине острия. Это подтверждается как эмиссионными изображениями, так и микрофотографиями профилей остриев. В результате, несмотря на большие средние значения  $r$ , эмитирует лишь относительно небольшая часть поверхности, соответствующая участкам с максимальной кривизной, т. е. углами и ребрами. Общий ток одноострийного катода микронных размеров не превышает известных значений автоэлектронных токов в статическом режиме  $I \sim 10^{-5}$  А. Единственная возможность достигнуть больших абсолютных значений автоэмиссионного тока – это использовать высокоэффективные многоострийные системы с обычными для автокатодов радиусами  $r \approx 0,1 \dots 0,6$  мкм [38, 39].

Известны многоострийные медные автокатоды, полученные методом плазменной обработки. Их эмитирующая поверхность имеет развитый рельеф, состоящий из хаотически расположенных микроконусов высотой порядка десятков микрометров с радиусом закругления вершин, не превышающим 0,1 мкм. Подобный рельеф создается, если одновременно с бомбардировкой ионами плазмы мишень облучается потоком атомов вольфрама [40, 41]. В этих условиях распыление поверхности происходит неравномерно. На ней

образуются конические выступы, высота и плотность расположения которых определяется дозой облучения и количеством атомов вольфрама. Преимущества этого способа изготовления автоэмиссионных катодов является его простота, а также возможность получения микрорельефа практически на любых металлах и на поверхностях сложных форм. Кроме того, автоэмиссионные центры в виде микроскопических конусов, являясь фактическим продолжением материала катода, не могут отделиться от него при резких перепадах температур в процессе эксплуатации.

Некоторые исследователи работают над тонкопленочными структурами металл–диэлектрик–металл (МДМ–структуры) имеющими развитый рельеф нижнего металлического электрода и сверхтонкий верхний металлический слой. После определенной тренировки в структуре формируются микрокатоды [42], которые расположены случайным образом.

Композитные автоэлектронные эмиттеры, структуры металл–диэлектрик–вакуум (англ. *MIV*), которые состоят из залитых в диэлектрик частиц или хлопий на поверхности металла. Эта структура имеет высокую плотность эмитирующих мест (центров эмиссии). Так была создана структура, имеющая структуру металл–диэлектрик–металл–диэлектрик–вакуум (англ. *MIMIV*). Композит имел проводящие частицы, рассеянные в эпоксидной смоле [43]. Для получения подобных структур в семидесятых годах использовали также и отвердевшие эвтектические сплавы (англ. *DSE*). Эмитирующая поверхность состоит из одного материала находящегося в структуре другого. Более новые применения описаны в патенте [44].

Из более известных материалов, которые, с одной стороны, обладают этим свойством, а с другой могут иметь реальное практическое применение, в последнее время наиболее интенсивно изучаются пленки на основе углерода (среди них наилучшие результаты получены для алмазоподобных пленок и углеродных нанотрубок) [45]. Известен метод плазменного нанесения углерода, где физические свойства осаждаемых углеродосодержащих пленок сильно варьируются в зависимости от режима плазменного возбуждения. Получаемые

пленки с высокоэффективными эмиттерами авторы характеризуют как микрографит [46].

Все эти способы изготовления катодов позволяют создать большие эмитирующие поверхности, но имеют хаотическое размещение эмитирующих мест.

Известны способы радиационно-химического формирования массивов острых структур типа кластер–глобула–поверхность в виде единого монолита [47]. В этом случае, формирование массивов острых структур осуществлялось в результате заполнения металлом различных участков (сердцевины «шубы» и около трекового пространства) проявленных треков тяжелых заряженных частиц в полимерах. Эти острые массивы также имеют неупорядоченную структуру, но по мнению авторов менее подвержены пондемоторным силам разрушающим острия, так как представляют собой цельнометаллическую структуру.

Примером реализации матрицы, имеющей упорядоченное расположение эмитирующих мест служит массив вольфрамовый острый [48]. Направленной кристаллизацией эвтектики изготавливают массив тонких вольфрамовых острий диаметром 1 мкм в диэлектрической матрице из окиси урана. На поверхность катода (рис. 13) с выступающими остриями напыляют вначале диэлектрик (окись алюминия), а затем металл (молибден).

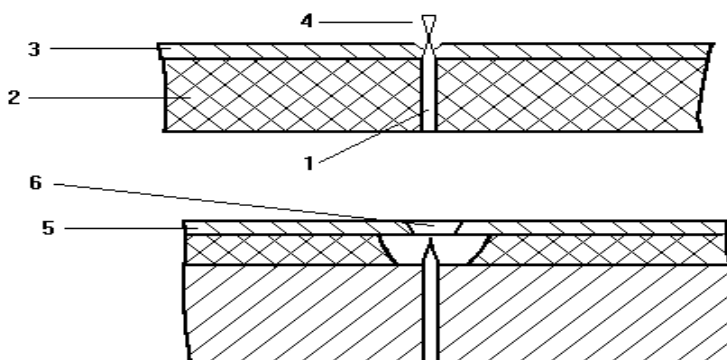


Рис. 13. Технология изготовления низковольтных автоэмиттеров [48]:

- 1 – вольфрамовое острие; 2 – матрица из окиси урана; 3 – спейсерный слой из окиси алюминия; 4 – напыляющаяся на острие «шляпка»; 5 – модуляторный слой;  
6 – отверстие в модуляторе.

При этом образующаяся на острие «шляпка» маскирует прилегающий к острию участок подложки, так что вокруг острия в напыляемых слоях остаётся коническое углубление. По окончании напыления шляпка с острия удаляется подтравливанием диэлектрика. Полученная таким образом структура близка к тонкопленочным автоэмиссионным катодам как по внешнему виду, так и по эмиссионным характеристикам. Плотность упаковки острий достигает  $10^7$  шт/см<sup>2</sup>.

Низковольтные автоэмиссионные матрицы на основе углерода отличаются относительной простотой технологии, поскольку собственная развитая микрошероховатость графита позволяет снизить управляющие напряжения до 100 В при зазоре катод-модулятор 5-10 мкм, а не 0,5-1 мкм, как в случае перечисленных металлических или полупроводниковых катодов [49]. Конструктивно низковольтный матричный углеродный катод представляет собой плоскую перфорированную стеклянную пластину толщиной 1мм со сквозными отверстиями диаметром около 200 мкм (рис. 14).

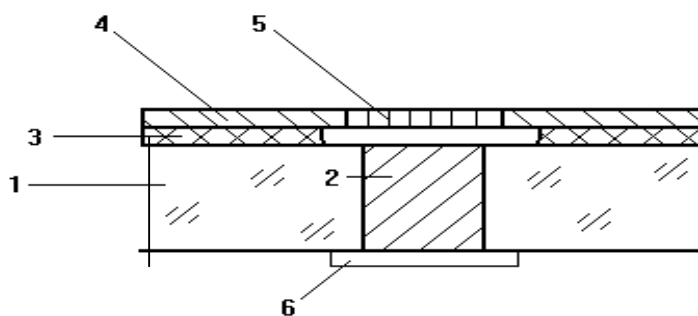


Рис. 14. Матричный углеродный автокатод [49]:

- 1 – стеклянная подложка; 2 – пирографитовый эмиттер; 3 – кварцевый спейсер;  
4 – модуляторная пленка; 5 – отверстия в сеточной структуре; 6 – катодная шина.

В отверстиях закреплены эмиттеры – столбики из пирографита. На тыльную сторону пластины напылены катодные шины, а на рабочую сторону – кварцевый спейсер толщиной 1-10 мкм и молибденовая модуляторная пленка. В последние методы оптической фотолитографии изготовлена сеточная структура, подвешенная над каждым из эмиттеров. Величина зазора катод модулятор задаётся, таким образом, не прецизионной электронно-лучевой литографией, а лишь толщиной напыленного спейсера, которую легко регулировать.

#### 1.6.1. Тонкопленочные автоэлектронные микрокатоды

Наиболее интересны автоэлектронные структуры, выполненные с применением технологий разработанных для твердотельных микроприборов.

В последнее время выделилась новая область техники, где вакуумные приборы и устройства создаются с помощью микротехнологий, разработанных для СБИС и других твердотельных устройств – это направление называется вакуумная микроэлектроника (ВМ). Это название было введено относительно недавно, в 1988г., на первой Международной конференции по вакуумной микроэлектронике, которая проводилась в г. Вильямсбурге (штат Вергиния, США).

Ключевым элементом ВМ являются совокупность (матрица) полевых эмиттеров (ПЭМ, англ. *FEAs*). Она состоит из множества острых электронных эмиттеров и вытягивающих электродов, электроны излучаются в вакуум из вершин конусов или других заостренных структур при туннелировании через поверхностный барьер под влиянием высокого электрического поля порядка  $5 \cdot 10^7$  В/см. При использовании упомянутых выше микротехнологий формируется плотно упакованный массив эмиттеров. Величина каждого из них может быть порядка микрона. Такие автокатоды получили название матричных автоэлектронных катодов. При этом принципиально увеличение тока многоэмиттерной системы при заданном

анодном напряжении по сравнению с одиночным острием пропорционально числу элементов и эффективности их одновременного эмитирования.

В Стенфордском исследовательском институте (*SRI*) были продемонстрированы *FEAs* с плотностью эмитерного тока, достигающей  $1000 \text{ A/cm}^2$ . При дальнейшем уменьшении размеров острий и увеличении плотности их упаковки видимо достижима величина плотности электрического тока до  $10^4 \text{ A/cm}^2$ .

Первым значительным шагом на пути создания матриц низковольтных автокатодов следует считать работы Спиндта [50-53]. Такие катоды, названные авторами тонкоплёночными, изготавливают следующим образом. Подложку из кремния (рис. 15) покрывают слоем термического окисла толщиной  $1,5 \text{ мкм}$ , на который напыляют модуляторный слой из молибдена толщиной  $0,4 \text{ мкм}$ .

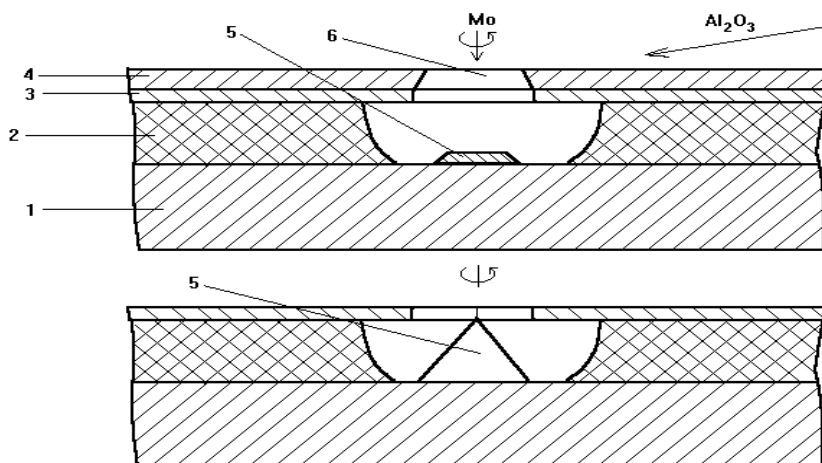


Рис. 15. Технология изготовления тонкоплёночных катодов Спиндта [50]:

1 – подложка из кремния; 2 – слой термического окисла; 3 – модуляторный слой; 4 – прослойка из окиси алюминия; 5 – напыляемый конус эмиттера; 6 – запыляемое отверстие в модуляторе.

В молибдене с помощью электронно-лучевой литографии изготавливают отверстия диаметром  $1-1,5 \text{ мкм}$ . Затем в слое окисла под модулятором вытравливают полость. На молибден напыляют под углом  $10^\circ-30^\circ$  слой окиси алюминия, после чего перпендикулярно поверхности еще раз напыляют

молибден. Из-за постепенного запыления краёв отверстия на дне полости вырастает молибденовый конус эмиттера. Рост конуса прекращается после полного запыления отверстия. Толщина напыленного поверх окиси алюминия слоя молибдена составляет 4–8 мкм. После удаления лишних слоёв структура отжигается в вакууме.

Однако пленки тугоплавких металлов (*Mo*, *W*), используемых в качестве материала затвора, в процессе изготовления матрицы склонны к окислению. Это приводит к снижению электропроводности пленки затвора и, следовательно, к нарушению стабильности эмиссии электронов катодом. Кроме того, эти пленки отличаются большими внутренними механическими напряжениями, что вызывает их деформацию и отслаивание от изолирующей пленки  $SiO_2$ . Для устранения перечисленных недостатков специалисты фирмы *Sony* предложили заменить тугоплавкий металл силицидом и формировать между затворным электродом и изолирующей пленкой слой поликристаллического кремния толщиной 50–100 нм [54]. Это позволило снять внутренние напряжения металлической пленки и обеспечить хорошую адгезию к  $SiO_2$ . Но при этом данная структура сохраняет такие недостатки, как, во-первых, сверхвысокий рабочий вакуум на уровне  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  Па и, во-вторых, сложная электронно-лучевая технология и необходимость высоконаправленного напыления молибдена. Это затрудняет изготовление матриц больших размеров (десятки квадратных сантиметров).

Для снижения неравномерности эмиссии между отдельными остриями матрицы Роберт Мэйер предложил ввести в цепь катода вертикальное сопротивление [55, 56]. Для этого в конструкции с вертикальным сопротивлением в цепи катода между катодными электродным и изолирующим слоями формировался резистивный слой с удельным сопротивлением от  $10^2$  до  $10^6$  Ом/см [57]. Образованное в результате между катодом и катодным электродом вертикальное сопротивление играет роль отрицательной обратной связи (увеличение тока эмиссии приводит к уменьшению напряжения на катоде, а уменьшение тока эмиссии – наоборот), стабилизирует и выравнивает

эмиссию катодов. Введение резистивного слоя в структуру подавляет флуктуации эмиссионного тока катодов во времени. Ученые исследовательского института фирмы *Matshushita*, изучавшие влияние величины вертикального сопротивления на стабильность работы матрицы микрокатодов, установили, что наилучшие результаты достигаются при 50 МОм и более [58].

В 1973 году запатентован способ изготовления тонкопленочного многоострийного автоэлектронного эмиттера, который состоит в последовательном напылении и фототравлении тонких пленок различных материалов [59]. На подложку из стекла, керамики или сапфира селективно напыляют первый слой проводящего материала в виде системы островков и второй сплошной слой проводящего материала, который затем селективным травлением удаляют повсюду, кроме точечных участков на проводящих островках, образуя систему острий. Резистивная пленка имеет ширину, примерно равную ширине участков первого слоя проводящего материала. Затем резистивная пленка удаляется, и на всю поверхность наносят пленку диэлектрика, которая селективно удаляется с областей, окружающих острия; на оставшуюся поверхность наносят четвертый слой проводящего материала, который служит положительным электродом автоэмиттера.

Существует и технология, реализующая вертикальные тонкопленочные лезвия из металла в виде открытых коробочек [60]. На диэлектрической или проводящей подложке размещены открытые коробчатые ячейки из проводящего материала, кромки которых являются эмитирующими (рис. 16). Катод был изготовлен следующим образом. На подложку напыляют слой вытравливаемого материала, например, меди, кварца. В местах расположения будущих ячеек удаляют до подложки этот слой, так что поверхность слоя покрывается отверстиями, затем запыляют всю поверхность и боковые стенки отверстий пленкой материала катода. Сошлифовывают эту пленку с верхней плоскости, так что она остается только на дне и боковых стенках отверстий, полностью удаляют вытравливаемый слой избирательным травлением. На

поверхности подложки остаются коробчатые ячейки. При высоте ячеек 3 мкм, толщиной стенок 0,05–1 мкм, при вытягивающем напряжении 200В на образцах был получен ток 100–200 мкА. Материал подложек сапфир, ячеек – тугоплавкие металлы типа молибден, вольфрам.

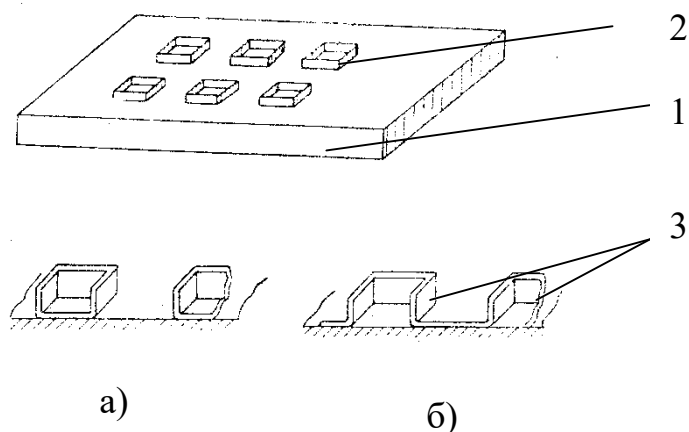


Рис. 16. Автоэлектронный катод [60]:

1 – подложка; 2 – коробчатые ячейки; 3 – эмитирующие кромки.

а) разрез ячейки катода при расположении пленки из проводящего материала на подложке внутри ячеек. б) то же при расположении пленки между ячеек.

Более поздняя реализация, включающая и управляющий электрод [61], приведена на рис. 17.

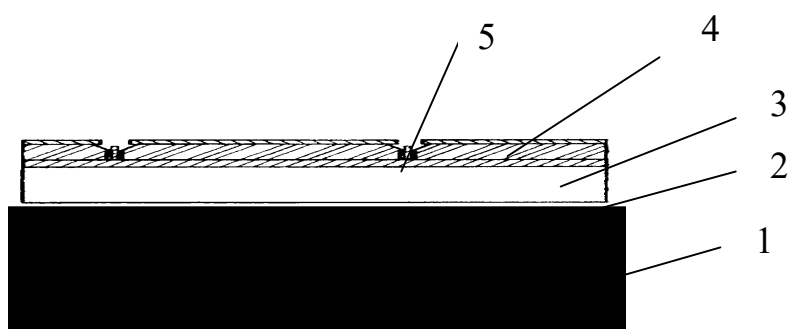


Рис. 17. Полевой эмиссионный прибор с лезвийным эмиттером и метод его изготовления [61]:

1 – подложка; 2 – катодная шина; 3 – диэлектрический слой; 4 – управляющий электрод; 5 – эмитирующие вертикальные лезвия.

### 1.6.2. Полупроводниковые автоэлектронные микрокатоды

Технология кремниевых автоэлектронных матриц основана на кристаллографическом заострении и фотолитографии [62]. На полированной подложке из монокристаллического кремния с ориентацией (100) создают слой термического окисла толщиной 1 мкм (рис. 18), затем с помощью фотолитографии из окисла формируют диски диаметром 2 мкм. Анизотропным травителем, травящим по направлению (100), но слабо взаимодействующим с плоскостью (111), под дисками вытравливают четырехгранные пирамиды эмиттеров. Процесс прекращают непосредственно перед полным стравливанием вершины пирамиды, чтобы обеспечить минимальный радиус кривизны вершины. На полученные пирамиды со шляпками напыляют слой двуокиси кремния и модуляторную пленку золота. После окончательного растворения окисных дисков структура кремниевых матриц близка по геометрии к тонкопленочным автоэлектронным катодам.

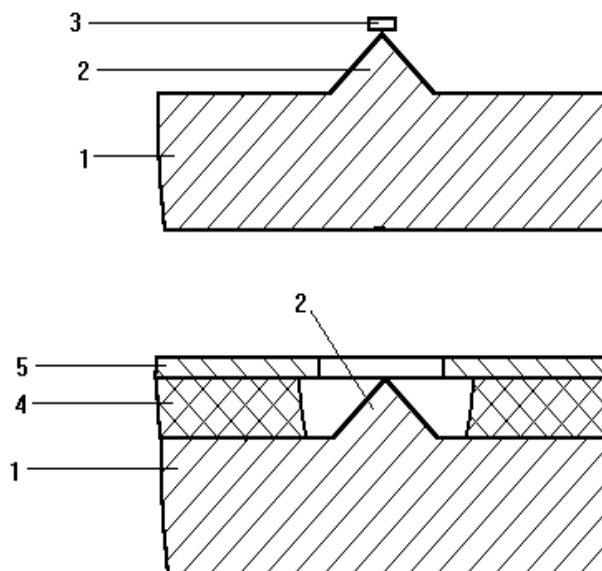


Рис. 18. Технология изготовления кремниевых автоэммитеров [63]:

1 – подложка из монокристаллического кремния; 2 – пирамида эмиттера после анизотропного травления; 3 – маскирующая «шляпка» из термического окисла; 4 – кварцевый спейсер; 5 – модулятор.

Диаметр отверстий в модуляторе – около 5 мкм. Основные технологические сложности кремниевых автоэлектронных матричных катодов – необходимость точного прерывания травления конусов во избежание перетрава, а также проблема равномерности прецизионного травления на больших площадях.

Кремниевые лезвийные автокатоды (рис. 19) изготавливают с использованием электронно-лучевой литографии.

С её помощью на поверхности монокристаллического кремния формируют выступы, близкие к прямоугольным шириной менее 1 мкм и длиной до 10 мкм. Затем поверхность кремния окисляют, при этом в выступе под слоем окисла остается неокисленное кремниевое лезвие. На выступ напыляют слой диэлектрика и ниобиевый модулятор. После подтравливания двуокиси кремния лезвие эмиттера открывается, а ширина отверстия в модуляторе вдоль лезвия становится равной ширине первоначального выступа [64, 65].

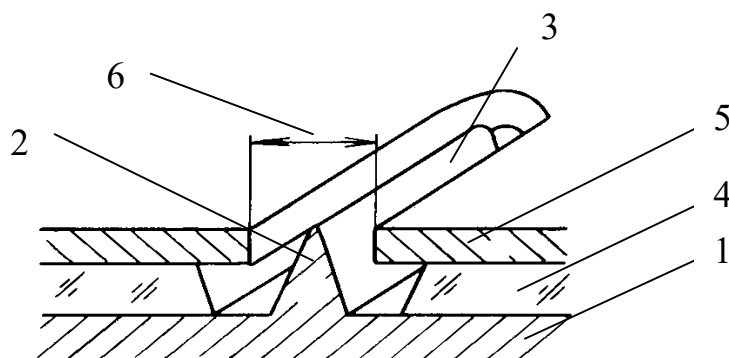


Рис. 19. Технология изготовления кремниевых лезвийных автокатодов [64]:

1 – кремниевая подложка; 2 – выступ на подложке после электролитографии; 3 – не окисленное лезвие в выступе; 4 – кварцевый спейсер; 5 – модулятор; 6 – отверстие вдоль лезвия в модуляторе.

Следует подчеркнуть, что стабильность эмиссии кремниевых автокатодов достигается благодаря наличию на поверхности катода тонкого слоя собственного окисла туннельно-тонкой толщины порядка 2–3 нм.

Микроминиатюрный автоэлектронный катод и метод его изготовления заявлены в США [66, 67]. На монокристаллической подложке из кремния или германия создается множество углублений с микроостриями, разделенными диэлектрической прослойкой. Нанесенный на поверхность общий проводящий слой (*Cr*, *Mo*) служит анодом. Система острий создается методом селективного травления и может образовывать регулярную матрицу.

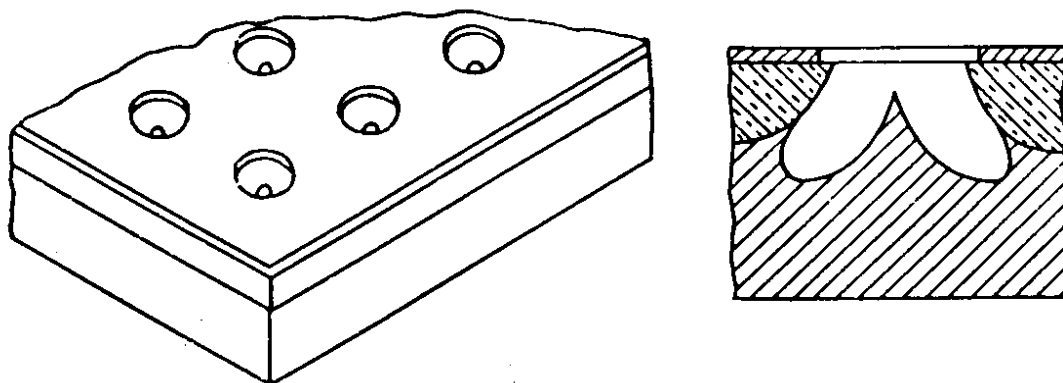


Рис. 20. Конструкция автоэлектронного катода [66]:

Интересна технология самосовмещения эмиттера и управляющего (вытягивающего) электрода основанная на термическом окислении кремния [68]. Эта разработка интересна тем, что при ее изготовлении применяются только стандартные методы изготовления, широко применяемые для создания твердотельных микроэлектронных приборов.

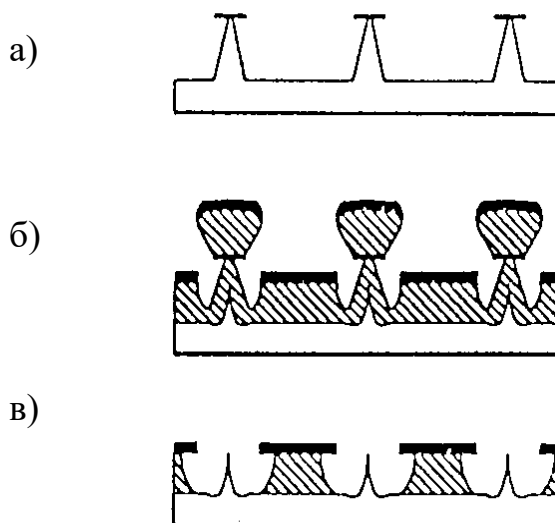


Рис. 21. Технология изготовления полупроводникового автоэлектронного катода с использованием термического окисления кремния [68]:

- а) – создание матрицы кремниевых острий; б) – термическое окисление кремния и нанесение диэлектрического и металлического слоев управляющего электрода; в) – удаление маски и подтравливание окисла.

Подобная технология, но более поздняя (1993 год), была разработана в университете Нортвесторна (США) [69]. Технология отличается в основном способом формирования первого маскирующего покрытия (маски). С помощью латексных микрошариков получают диски диоксида кремния размером 100 нм. Плазменным травлением в среде  $SF_6/O_2$  вытравливают столбики высотой 200 нм и диаметром примерно 25 нм, затем напыляют  $SiO_2$  толщиной 100 нм и проводят окисление в течение 25 мин. в сыром кислороде при температуре 1000 °С. Управляющий электрод формируют нанесением слоя  $Cr$  толщиной 40 нм.

Еще один пример автоэлектронного триода изготовленного на основе кремниевой подложки приведен в работе [70]. Игольчатый эмиттер был окружен диэлектриком первого слоя и непосредственно соприкасался с ним. Вершина эмиттера возвышалась над поверхностью управляющего электрода на 0,25 мкм, радиус скругления вершины составлял 800 А, угол конуса в сечении эмиттера 150°, высота острий 1,75 мкм, слой управляющего электрода был выполнен из тантала толщиной 0,15 мкм, диаметр отверстия в управляющем электроде 1,4 мкм. Анод изготавливался из меди толщиной 0,6 мкм.

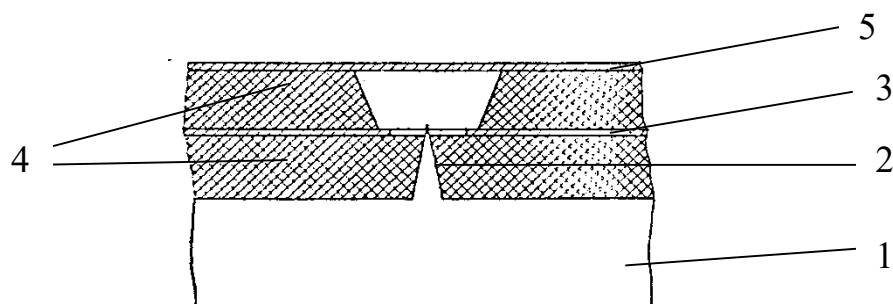


Рис. 22. Автоэлектронный триод [70]:

- 1 – кремниевая подложка; 2 – выступ на подложке (катод);  
3 – управляющий электрод; 4 – диэлектрические слои; 5 – анод.

Величина тока автоэлектронной эмиссии менялась от 50 до 200 мкА в интервале напряжений на управляющем электроде 50-150 В.

### 1.6.3. Планарно-торцевые автоэлектронные микрокатоды

Прорывной с точки зрения простоты технологии изготовления стала конструкция планарно–торцевого катода, где эмиссия электронов происходит из торца планарно расположенного лезвийного катода, причем толщина катодной пленки и определяет радиус скругления эмитирующей кромки. Толщина пленки легко контролируется при ее нанесении. Для увеличения механической прочности лезвия катод сделан из двух слоев: диэлектрика и эмитирующего проводящего материала. При этом пленка диэлектрика может быть более толстой и прочной и поэтому успешно противостоять механическим нагрузкам, а проводящая пленка иметь толщину, достаточную для необходимой концентрации электрического поля у эмитирующей кромки лезвия [71, 72].

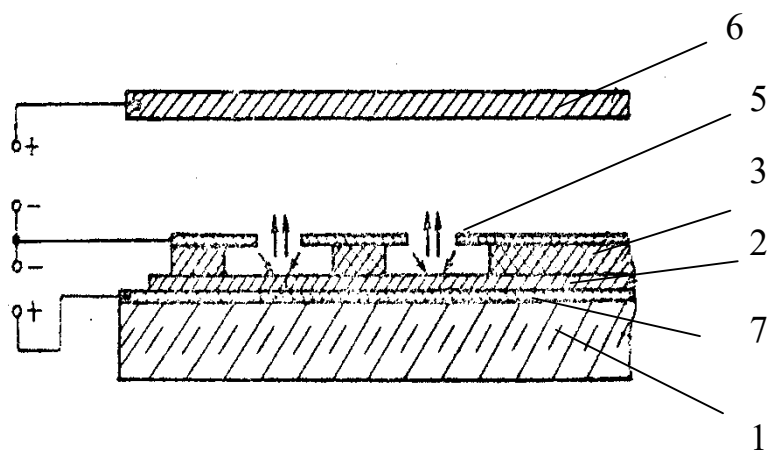


Рис. 23. Автоэлектронный катод [71]:

1 – диэлектрическая подложка; 2 – диэлектрическая пленка с коэффициентом вторичной эмиссии больше 1; 3 – слой держателя катода (диэлектрик, проводник); 4 – катодная пленка; 5 – эмитирующая кромка катодной пленки; 6 – коллектор электронов; 7 – стартовый проводящий электрод. Стрелками показано направление движения электронов.

При испытаниях данного катода было замечено, что катод работает нестабильно, имели место пробой вакуумного промежутка катод–анод. При этих пробоях развивалась вакуумная дуга, распространяющаяся по всей ширине лезвия катода, разрушая проводящую пленку катода и оставляя характерный след в виде ажурных узоров. Разрушение имеет место только при определенных толщинах проводящей пленки не меньше определенного порога. Например, при исследовании катода, состоящего из слоев окиси алюминия и вольфрама, при толщине вольфрамовой пленки меньше 200–300 Å, вакуумная дуга не распространялась по слоистому лезвию и не разрушала его даже при вакуумных пробоях. Вероятная причина этого – недостаток материала для создания достаточного давления паров катодного материала, необходимого для развития в этих парах вакуумной дуги, при малых толщинах проводящей пленки.

В некоторых приборах материалом катода выбран углерод, проявляющий уникальные автоэмиссионные свойства [73, 74].

Структура легко формируется последовательным нанесением диэлектрических и проводящих слоев.

Подобная конструкция, но с круглыми ячейками описана в более позднем европейском патенте [75].

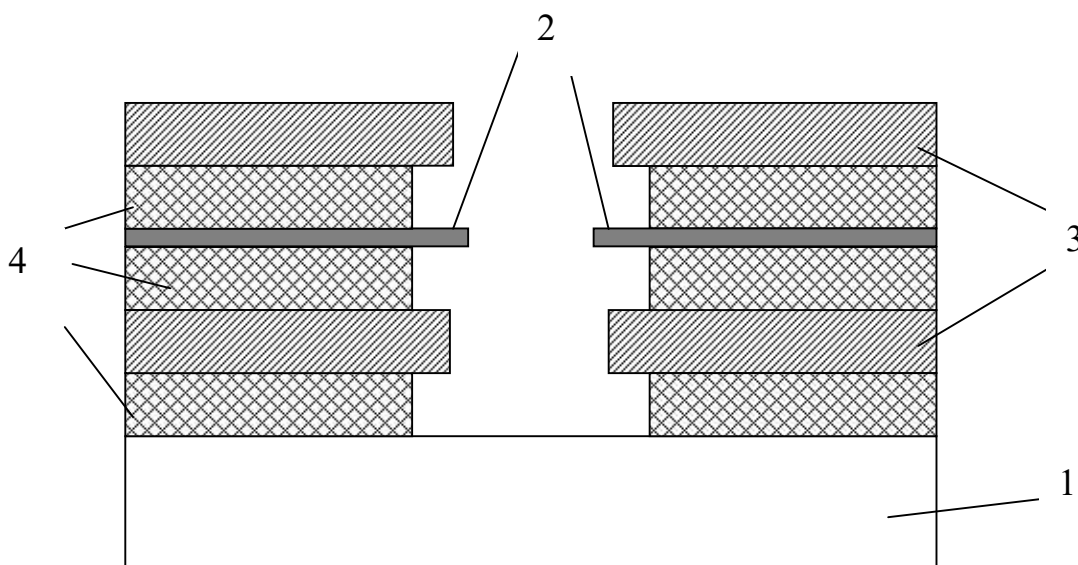


Рис. 24. Матричный автоэлектронный катод [73]:

1 – основание; 2 – эмитирующий стержень; 3 – электроды; 4 – диэлектрические слои.

### Особенности вакуумных интегральных схем (ВИС)

1. ВИС способны работать на частотах до  $10^{14}$  Гц.
2. На сверхвысоких частотах ВИС работают более стабильно, что связано со снижением ионной бомбардировки катода.
3. При проектировании ВИС необходимо применять микрокатод из множества эмиссионных мест. Разрушение эмиттеров сокращает срок службы и уменьшает выход годных автоэмиссионных микроприборов.
4. Из многообразия разрабатываемых микрокатодных матриц можно выделить два класса: на стеклянных и кремниевых подложках. Оба имеют свои достоинства, определяющие их область применения. Основное достоинство матриц на стеклянных подложках – возможность изготовления на их основе дисплеев с экраном больших размеров (45 см и более по диагонали). Для матриц на кремниевых подложках характерны высокая воспроизводимость геометрических параметров и стабильность свойств (работы выхода) материала катодов, а также возможность изготовления элементов матрицы совместно с управляющими транзисторами.
5. При всем многообразии конструкций и технологий изготовления ВИС, в наиболее эффективных технологиях низковольтных автокатодов, пара конструктивных элементов «эмиттер – отверстие модулятора» изготавливается самосовмещёнными способами: либо напыляя конус эмиттера с использованием модулятора в качестве маски для формирования катода; либо позиционируя отверстия с помощью напыляемой шляпки на остриях; либо напыляя модулятор на окисел (кремниевый лезвийный автокатод). Это упрощает и удешевляет технологию изготовления приборов, а также, за счет

более точного воспроизведения топологических размеров, повышает эмиссионные характеристики катодов.

Рассмотренные примеры конструкций острийных, лезвийных катодов и технологий их изготовления показывают, что практическая реализация матричных автоэлектронных катодов возможна только при разработке оптимальной конструкции с одновременным решением технологических вопросов и выбора материала катода.

## 2. КОНСТРУКТОРСКАЯ ЧАСТЬ

### Конструктивно-технологические особенности низковольтных автоэмиссионных микроприборов

Создание низковольтных автоэлектронных приборов требует формирования структур с микронными и субмикронными размерами элементов. Это возможно только с применением технологий, используемых в микроэлектронике, таких, как вакуумное напыление, фотолитография, сухое травление и т.д. Поэтому особый интерес представляют низковольтные автоэмиссионные микроприборы выполненные на основе полупроводниковых подложек и (или) методами тонких пленок. Применение микроэлектронных технологий накладывает ряд ограничений, основное из которых – комплексное решение задачи «конструкция – технология – материалы».

Автоэлектронные катоды обладают известной нестабильностью эмиссии, поэтому усилия многих исследователей направлены на поиск путей повышения стабильности эмиссии данных источников электронов.

Уравнение для плотности тока автоэлектронной эмиссии можно представить в следующем виде:

$$j \approx \frac{1}{8\pi} \frac{e^3}{ht^2(\varphi, E)} \frac{E^2}{\varphi} \exp\left[-\frac{8\pi}{3eh} \frac{(2m)^{\frac{1}{2}} \varphi^{\frac{3}{2}}}{1 E}\right] \theta(\varphi, E),$$

где  $e, h, m, \pi$  – известные фундаментальные постоянные, а  $\theta(\varphi, E), t^2(\varphi, E)$  – хорошо известные табулированные функции, значения которых в практически важных случаях можно принять равными 0,7 – 0,9 для  $\theta(\varphi, E)$  и 1,06 – 1,16 для  $t^2(\varphi, E)$ .

Из этого уравнения следует, что стабильный, устойчивый во времени поток свободных электронов из катода возможен лишь при условиях постоянства значений  $\varphi$  (работы выхода электронов его поверхности) и  $E$

(напряженности электрического поля вблизи ее). Однако реализация этих условий при отборе тока заметной плотности чрезвычайно затруднена. Дело в том, что непрерывная адсорбция атомных частиц остаточных газов на поверхности катода вызывает неконтролируемые изменения работы выхода электронов  $\varphi$ , которые вследствие экспоненциальной зависимости  $j(\varphi)$  приводят к резким колебаниям эмиссионного тока. Например, при увеличении работы выхода электронов вольфрамового автокатада вследствие адсорбции кислорода от 4,6 до 6,3 эВ, т.е. всего лишь на 37%, эмиссионный ток падает более чем на четыре порядка величины, что может служить причиной отказа электронной аппаратуры. Далее, при отборе тока в межэлектродном промежутке происходит ударная ионизация атомных частиц остаточных газов, образующиеся ионы бомбардируют катод, вызывая его распыление. Это приводит к изменению формы и размеров эмитирующего острия, обуславливая тем самым заметные изменения напряженности электрического поля  $E$  у его поверхности и, следовательно, резкие колебания автоэмиссионного тока опять-таки вследствие экспоненциальной зависимости  $j(E)$ . Например, при затуплении конусообразного острия в процессе катодного распыления так, что радиус закругления его вершины увеличивается вдвое, эмиссионный ток уменьшается на 5–6 порядков величины.

Еще одна причина нестабильности автоэлектронной эмиссии это термо- и электромиграция атомных частиц на поверхности автокатада, вызывающая в конечном счете изменение его геометрии и работы выхода электронов и, следовательно, отбираемого тока.

Из этого следует, что стабильные автокатады могут быть реализованы на основе решения нескольких задач:

- оптимизация геометрии катода (для стабилизации форм-фактора);
- выбор соответствующего катодного материала или покрытия катода дополнительным слоем (уменьшение работы выхода);
- включение в цепь каждого эмитирующего центра (острия) ограничивающего ток резистора;

– улучшение вакуума в приборе.

## 2.1. Оптимизация конструкции путем размещения катода и анода на одной подложке

Автокатоды, работающие при напряжениях на аноде порядка несколько десятков вольт, требуют создание вакуумных промежутков катод–управляющий электрод (сетка) и катод–анод единицы и десятые доли микрон.

Чтобы получить большие токи, необходимо тем или иным образом увеличивать эмитирующую площадь при сохранении малого радиуса кривизны катода. Основными решениями этой задачи являются создание многоострийных систем и развитие поверхности в одном измерении, формирование катодов в виде лезвия [1]. Многоострийные катоды предложены и впервые применены в практических устройствах Дайком [37]. Принципиально увеличение тока многоэмитерной системы при заданном анодном напряжении по сравнению с одиночным острием пропорционально числу элементов и эффективности их одновременного эмитирования. Однако, начиная с некоторого критического расстояния между остриями начинает сказываться эффект взаимозранирования элементов. Для многоострийного катода взаимозранирование можно не учитывать когда отношение шага расположения острий ( $d$ ) к поперечному размеру острия ( $b$ ) больше пяти. Для лезвий условия менее жесткие и отсутствие экранировки определяется  $d/b > 3$ .

Используя кристаллографические направления монокристаллических полупроводниковых пластин можно создать так называемые полевые эмитерные решетки (*FEArs*) [53]. Полупроводниковые эмиттеры имеют область насыщения автоэмиссионного тока, где эмиссия слабо зависит от прозрачности потенциального барьера и начинает определяться объемными свойствами кристалла. Обстоятельный анализ и сравнение особенностей поли- и монокристаллических эмиттеров показывает, что последние обладают чрезвычайно высокой механической прочностью, приближающейся к ее

теоретической величине,  $10^2-10^4$  кг/мм<sup>2</sup>. Это позволяет использовать монокристаллические эмиттеры в относительно сильных полях, создающих повышенные нагрузки в материале электродов. В жёстких условиях используются также поликристаллические мелкодисперсные пленочные, стержневые или нитевидные автокатоды с П-образным сечением рабочего торца. При послойном уносе материала торца в результате распыления последнего обнажается идентичная поверхность, сохраняющая средние значения шероховатости и работы выхода электронов и, следовательно, свои эмиссионные свойства практически неизменными. Совершенно уникальными свойствами обладают автокатоды из углеграфитовых материалов, в частности из полиакрилонитрильного волокна. Отдельное волокно диаметром несколько микрон обладает внутренней фибрильной суперструктурой. Такие фибриллы представляют собой цилиндрические чешуйки длиной в несколько сотен и диаметром в несколько десятков ангстрем, располагающихся приблизительно вдоль оси волокна и занимающие около 90% его объема. Вершины фибрилл, плотность которых составляет около  $10^{12}$  см<sup>-2</sup>, являются центрами автоэлектронной эмиссии. Высокая плотность таких центров позволяет рассматривать рабочую поверхность волокна в целом как систему с устойчивой средней эмиссией. Срок службы автокатаода из одиночного волокна в режиме непрерывного токоотбора на уровне около 60 мкА, что соответствует средней плотности тока около 150 А/см<sup>2</sup>, при давлении остаточных газов около  $10^{-7}$  мм.рт.ст. к настоящему времени составляет около  $10^4$  часов. В течение указанного срока колебания автоэмиссионного тока не превышали 3% его исходной величины. Высокая стабильность эмиссии из углеграфитовых материалов, обусловлена постоянством значения работы выхода электронов, сохраняющегося практически неизменным в широком диапазоне давления окружающей среды от  $10^{-3}$  до  $10^{-7}$  мм.рт.ст. Это связано с высокой летучестью соединений углерода с газами и парами окружающей среды, вследствие чего рабочая поверхность сохраняет свои свойства практически неизменными [76].

Одиночный волоконный эмиттер представляет собой практически точечный безнакальный источник электронов для электронно-лучевых трубок.

Наиболее просты в изготовлении конструкции планарно-торцевого пленочного микроприбора где и катод и анод выполнен на одной подложке и представляют собой полноценный прибор. Данная конструкция разработана в Красноярском политехническом институте и носит название *КГТУ/VITIM* [77]. Эта диодная конструкция легко воспроизводима и при нанесении на анод слоя люминофора может применяться, например, в матричном плоском индикаторе изображения. Все электроды выполнены на одной подложке. Расстояние катод-анод задается толщиной диэлектрического слоя 5.

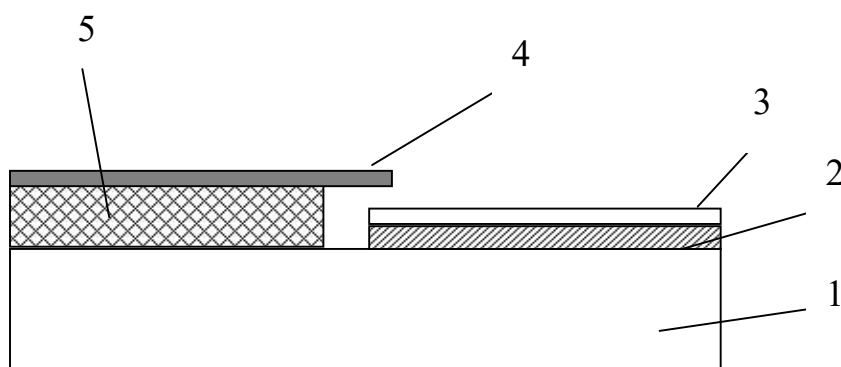


Рис. 25. Конструкция планарно-торцевой структуры, где катод и анод выполнены на одной подложке: 1—подложка; 2— анод; 3—анодное покрытие (люминофор); 4— катод; 5— диэлектрический слой.

## 2.2. Алмазосодержащие катодные покрытия

Для создания автоэмиссионного прибора, способного работать длительное время, необходимо выбрать соответствующий материал катода, обладающий стабильной эмиссией. Задача стабилизации работы выхода электронов является центральной для любой области эмиссионной электроники. Однако традиционные пути ее решения, известные, например, в термоэмиссионной электронике, нельзя в принципе использовать для автоэмиссионной. Питание эффективных термокатодов, с целью создания и

поддержания в состоянии динамического равновесия тонкопленочного активного покрытия, осуществляется в процессе диффузии активного вещества из его запасов в объеме катода. Этот процесс протекает при сравнительно высокой температуре, характерной для термокатодов. Но для автокатодов, функционирующих при комнатной и более низких значениях температуры, процесс диффузии крайне замедлен и не может обеспечить питание автокатаода, т.е. создания на его поверхности динамически равновесного слоя со стабильным значением работы выхода электронов.

К материалу катода предъявляются такие требования, как: – низкая работа выхода электронов в вакуум; – высокая плотность тока на единицу площади; – устойчивость к ионной бомбардировке; – тугоплавкость; – высокая механическая прочность; – технологичность.

Уменьшить рабочие напряжения микроприбора (сохраняя необходимую для АЭЭ напряженность поля на катоде) возможно за счет применения материала или покрытий катода, снижающих работу выхода электронов в вакуум вследствие присущей им электронной и геометрической структуры. Вероятность туннелирования электронов через потенциальный барьер на границе раздела «твердое тело–вакуум» определяется высотой и шириной потенциального барьера. Для невырожденных полупроводников *n*-типа удобнее в качестве высоты барьера использовать сродство к электрону  $\chi$ , которое, по определению, есть разница между уровнем энергии свободного электрона в вакууме и дном зоны проводимости. Для полупроводников *p*-типа в качестве величины барьера следует брать сумму ширины запрещенной зоны и сродства к электрону.

Таблица 1

Значение электронного сродства для некоторых полупроводников [13]

Полупроводник	$\chi$ , эВ	Полупроводник	$\chi$ , эВ
Кремний Si	4	Германий Ge	4,2
Арсенид галлия GaAs	4,1	Сульфид свинца PbS	4,2

Сульфид кадмия CdS	3,8 ...4,8	Иодид калия KI	1,1
Оксид магния MgO	1	Антимонид калия K <sub>3</sub> Sb	1,6
Алмаз	-0,7-+2,3	Теллурид цезия Cs <sub>3</sub> Te	0,5

Из таблицы видно, что наименьшее значение  $\chi$  у алмаза, поэтому в последние годы проявляется повышенный интерес к автоэмиссионным приборам на основе алмазных катодов (катодных покрытий). Связано это, прежде всего с тем, что данный материал обладает такими уникальными физическими свойствами, как высокая химическая и физическая стабильность, рекордная по сравнению с другими материалами теплопроводность. Данные свойства позволяют ожидать эффективной работы алмазных катодов в режиме больших токов. В настоящее время используются различные подходы при создании алмазных автокатодов: алмазное покрытие на вершине острейшего эмиттера из проводящего материала [78]; алмазная пленка на плоской подложке [79]; острейшие структуры полученные в результате селективного травления или направленного роста [80]; катоды на основе плоских или острейших структур с покрытиями из алмазного порошка, синтезированного по технологии высоких давлений [81]. Выращивание алмазной пленки происходит при очень высокой температуре (около 2000 °С), что затрудняет применение данного технологического процесса в создании реальных приборов. Покрытия из алмазного порошка обладают невысокой механической прочностью и, следовательно, подвержены разрушению в сильных электрических полях. Наиболее технологичны пленки, нанесенные методом лазерной облучения.

Были проведены испытания пленок «*amorphous diamond*» нанесенных методом лазерной сублимации графитовой мишени в вакууме в фирме *SIDT* (США, г. Остин). Представленные пленки светло-серого цвета на стеклянной подложке обладали высоким удельным сопротивлением и были устойчивы к механическим воздействиям. После нагрева образцов в вакууме до 400–450 °С все образцы пленок безвозвратно утрачивали и электрические и механические параметры (рис. 26). Так пленки с сопротивлением  $2,716 \cdot 10^6$  Ом, после отжига имели сопротивление  $2,668 \cdot 10^4$  Ом, были рыхлые по структуре и легко

удалялась ватным тампоном. Измерения проводились в вакууме. Соответственно, при изготовлении опасного прибора при необходимом прогреве для обезгаживания объема, данный катодный материал будет деградировать.

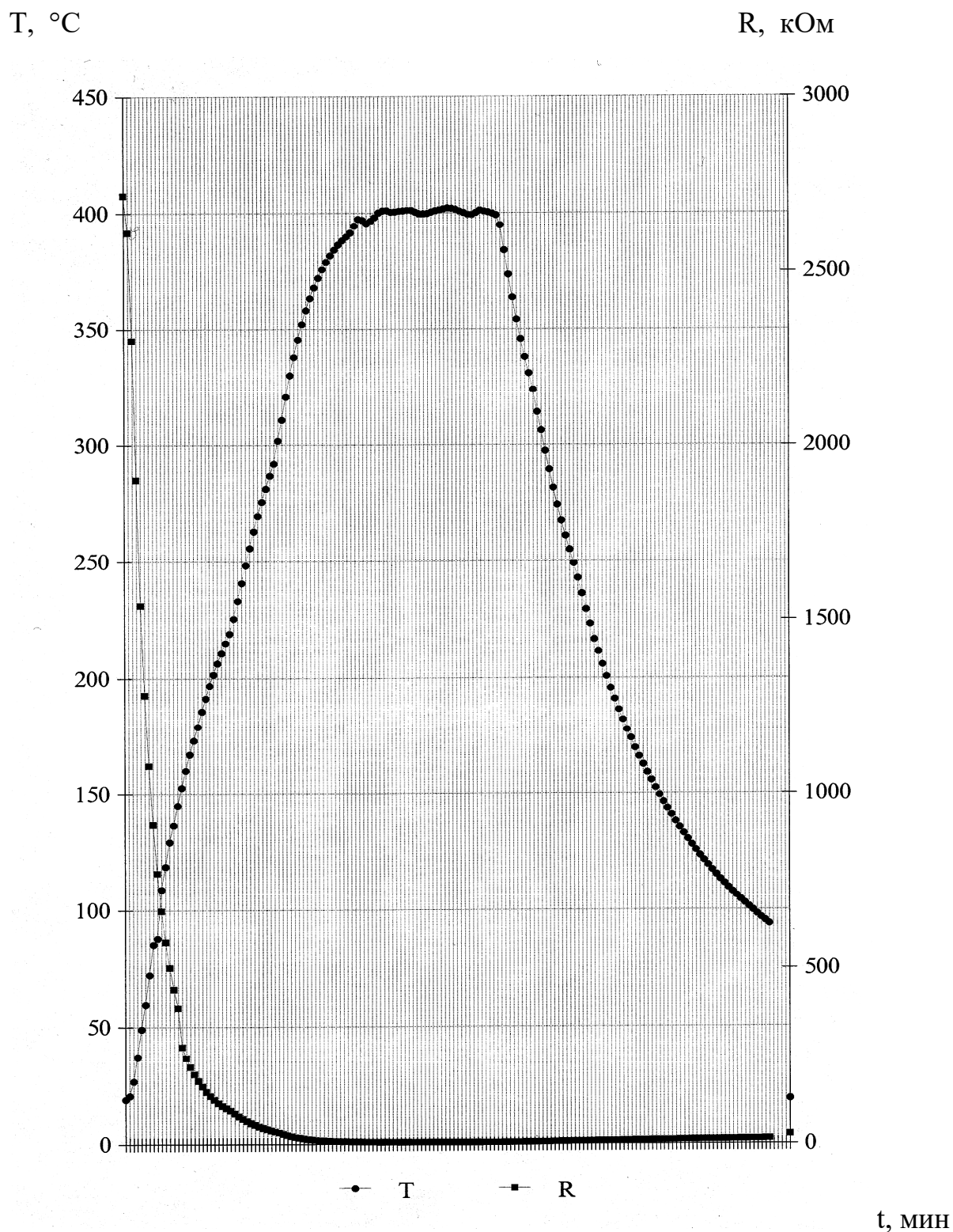


Рис. 26. Изменение резистивности катодной пленки при отжиге в вакууме.

Одной из ключевых проблем при создании практического алмазного катода является выбор конкретного «алмазного материала». Здесь следует учитывать как физические свойства материала (легирование, состояние поверхности и пр.) так и технологические критерии (воспроизводимое формирование алмазных покрытий на большой площади, время жизни катодов, стоимость процесса) [81]. В то же время физический механизм эмиссии из алмаза до настоящего времени не ясен. До настоящего времени не удалось получить алмаз *n*-типа с заметной проводимостью при комнатной температуре [82-84].

### 2.3. Применение резистивных слоев

Учитывая, что требуемая плотность тока с катода превышает предельно допустимый ток одиночного острья, катод должен содержать несколько, а в идеале много, одновременно эмитирующих эмиссионных центров. Поскольку близко расположенные микровыступы могут взаимно экранировать друг друга, а при редком их расположении невозможно достичь требуемых значений плотности и равномерности электронной эмиссии по поверхности катода, то предпочтительно формировать упорядоченные эмиссионные структуры с заранее заданным количеством и качеством эмиссионных мест. Современные микроэлектронные технологии позволяют создавать массивы упорядоченных микронных элементов.

Для повышения эмиссионной однородности и надежности катодной матрицы применен резистивный слой для ограничения тока с острий и усреднения их характеристик [85, 86]. Расположение резистивного слоя проиллюстрировано на рисунке 27. Конструкция с сопротивлением в катоде устраняет также возможность короткого замыкания между затвором и

проводящим слоем катодного электрода при попадании проводящей частицы (например, пылинки) между катодом и затвором. Тем самым обеспечивается нормальный режим работы соседних микрокатодов, что очень важно для матричных катодов больших размеров с более чем  $10^8$  эмитирующих мест. Однако в случае прокола резистивного слоя затвор через частицу пыли может замкнуться на проводящий катодный электрод и нарушить работу соседних эмиттеров. Для исключения таких отказов специалисты фирмы *Sony* предложили создать под катодом окно в проводящем катодном электроде. В результате в цепи катода образуется планарное сопротивление, что исключает замыкание между затвором и катодным слоем в случаях прокола катодного электрода или попадания на катод частиц пыли [87]. Возможен так же прокол изолирующего слоя. Эта проблема решена специалистами фирмы *Coloray Display* путем нанесения двухслойной изолирующей пленки [88].

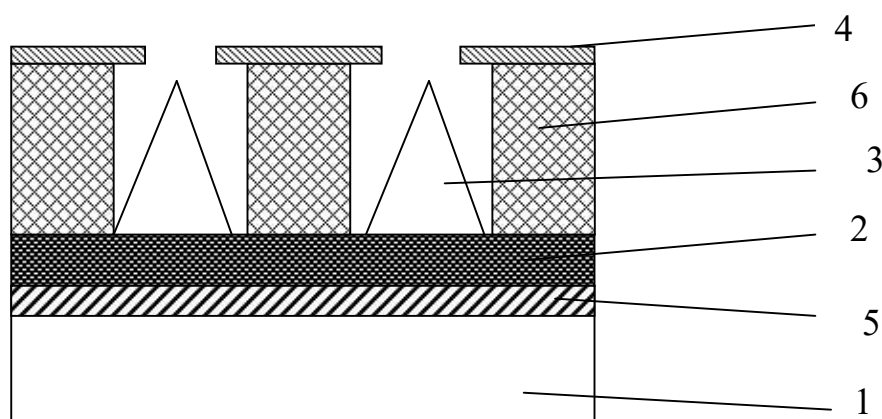


Рис. 27. Матрица микроострий с резистивным слоем [86]:

1– подложка; 2– резистивный слой; 3– острийные эмиттеры; 4– управляющий электрод; 5– катодная шина; 6– диэлектрический слой.

Анализ достоинств и недостатков двух типов структур (с вертикальными и планарными сопротивлениями) с точки зрения электрической и термической стабильности показал, что структура с планарным сопротивлением превосходит структуру с вертикальным по электрической устойчивости в 10 раз, а по термической – в 100 раз [89]. Таким образом, вертикальный резистор

ограничивает плотность тока катода. Но и планарная структура не лишена недостатков: при больших плотностях размещения эмиттеров на подложке сопротивления катодов могут сильно отличаться друг от друга из-за разного расстояния от катодного электрода. Для устранения недостатков этих двух структур, при сохранении их достоинств была предложена конструкция с вертикальным и планарным резистором, последовательно включенным с катодом [90]. Вертикальный резистор формируется в резистивной пленке между катодом и проводящим электродным слоем на изолирующей подложке, планарный – в резистивной пленке между проводящим электродным слоем на изолирующей подложке и катодной сеткой.

В случае острийных полупроводниковых автоэмиссионных структур, выполненных на пластине высокоомного монокристаллического кремния, каждое острие катода представляет собой полупроводниковый объемный резистор. При применении полупроводника, образующего собственный устойчивый окисел туннельной толщины, окисная пленка предохраняет вершину катода от разрушения.

Для планарной конструкции разработаны резистивные элементы [91, 92], которые позволяют распределить эмиссию электронов по торцу эмитирующей пленки катода и сохранить отдельные эмиссионные центры от разрушения вследствие протекания большого эмитерного тока. Разработанная конструкция приведена на рисунке 28.

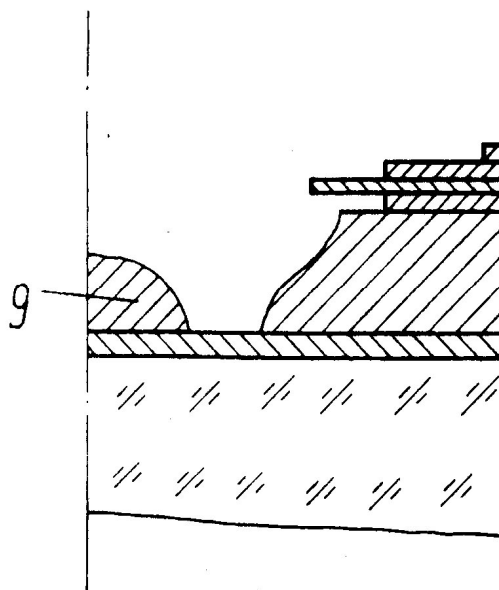


Рис. 28. Конструкция планарного вакуумного микродиода, содержащая в катоде резистивные элементы:

1—подложка (стекло); 2—анодный слой;

3—диэлектрический слой; 4,6,8—дополнительные катодные слои; 8—резистивный слой;  
9— анод.

#### 2.4. Вакуумирование автоэмиссионных микроприборов

Для стабильной работы катода необходимо создать вакуумные условия в приборе не хуже чем  $10^{-6}$  мм. рт. ст. При более высоких давлениях ( $10^{-4} \dots 10^{-5}$  мм. рт. ст.) эмиссия постепенно падает, что, вероятно, объясняется воздействием ионной бомбардировки [1]. Вакуумирование автоэмиссионных микроприборов проводится по технологии, разработанной ранее для электронных вакуумных ламп с термоэлектронными катодами. Размеры баллонов этих ламп несравнимо больше размеров автоэмиссионного микрокатода. Это не обосновано увеличивает общие габариты прибора. Поэтому необходим поиск новых путей вакуумирования микроприборов.

Для изготовления вакуумированного пленочного триода по технологии «острие вниз» предложен способ создания микрокапсул, каждая из которых содержит микроострие и имеет размеры всего несколько микрон [93,94].

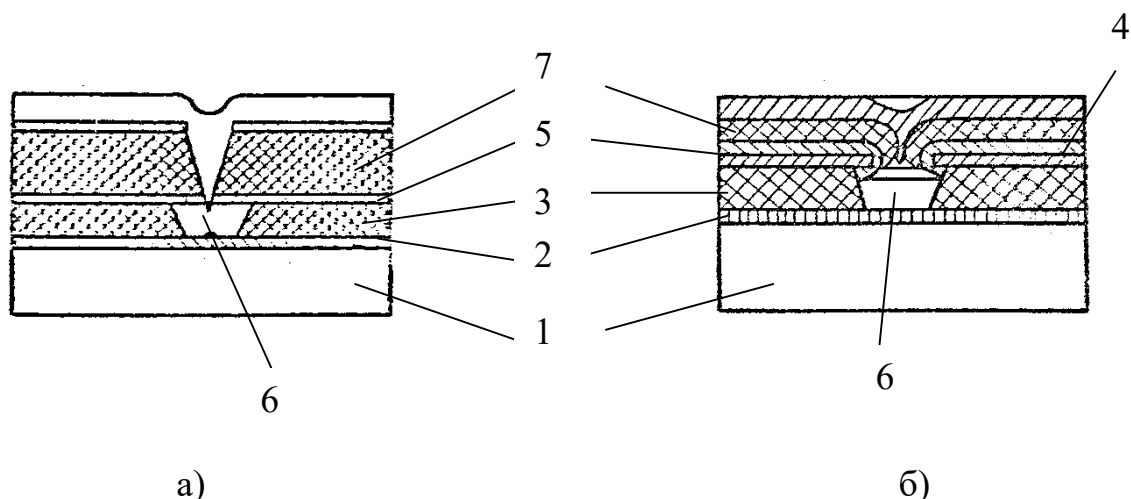


Рис. 29. Способ изготовления пленочного автоэлектронного триода: 1—подложка; 2—анод; 3,7— диэлектрические слои; 4,5— управляющий электрод; 6— вакуумная полость; 8— катод. а) [93], б) [94].

Разработанная конструкция самовакуумирующихся микрообъемов для микроприборов выполнена на полупроводниковой подложке [95, 96].

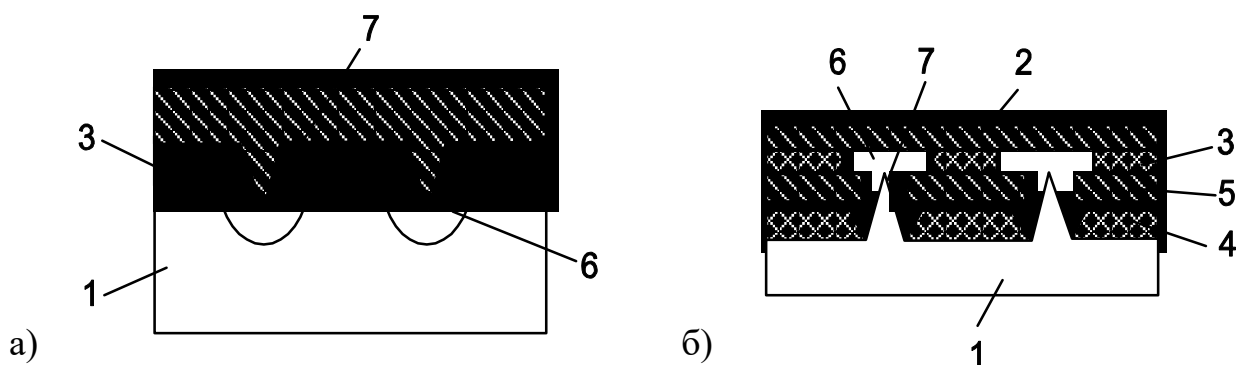


Рис. 30. Конструкции вакуумированных триодов на кремниевой подложке: 1—подложка; 2—анод; 3,4—диэлектрические слои; 5—управляющий электрод; 6—вакуумная полость; 7—катод. а) с полупроводниковым анодом; б) с полупроводниковым катодом.

Следует учесть, что при расстояниях катод–анод десятые доли микрона и анодных рабочих напряжениях несколько десятков вольт вероятность ионизации остаточного газа значительно ниже, чем в больших вакуумных приборах. Следовательно, требования к вакууму могут быть снижены. Однако, до настоящего времени метода измерения и контроля вакуума в микрообъеме не

предложено, а оценивать вакуумные свойства микрозазора посредством протекающего электронного или ионного тока без достоверно известной составляющей опять же автоэлектронного тока представляется затруднительным.

## 2.5. Новые способы низковольтного управления полевой эмиссией в микроприборах

Для создания низковольтного автоэмиссионного микроприбора необходимо располагать управляющий электрод в непосредственной близости от катода. Для автоэмиссионного катода, выполненного на полупроводниковой пластине, возможно управление током автоэлектронной эмиссии путем изменения концентрации носителей в самом полупроводниковом эмиттере.

### 2.5.1. Управление автоэлектронной эмиссией из полупроводников барьером Шоттки

В полевых транзисторах с энергетическим барьером Шоттки барьер образован на границе плоскостей слоя металла (затвора) и полупроводника. Подавая на затвор напряжение различной полярности и амплитуды, можно обогащать или обеднять электронами объем полупроводника между истоком и стоком, таким образом управляя током полевого транзистора. При этом области обогащения и обеднения распространяются от плоскости затвора вглубь полупроводника. Используя подобную структуру для острейного или лезвийного катода возможно также получить эффект управления автоэмиссионным током. На рис. 31 приведена конструкция острейного автоэлектронного катода, включающая проводящую подложку 1, полупроводниковый эмиттер 2, диэлектрический слой 3 и металла 4 [97]. Вершина эмиттера 2 расположена выше слоя металла 4, который образует с боковой поверхностью полупроводникового эмиттера барьер Шоттки.

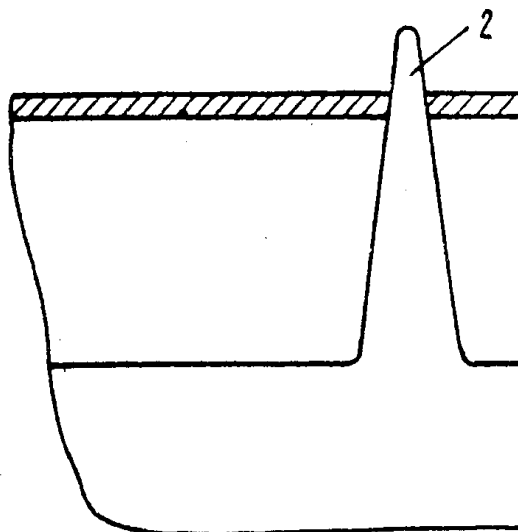


Рис. 31. Автоэлектронный катод:

1–проводящая подложка; 2–полупроводниковый эмиттер; 3–диэлектрический слой;  
4–металлическая пленка, образующая с материалом эмиттера барьер Шоттки.

Диаметр поперечного сечения эмиттера катода на границе контакта его поверхности со слоем металла  $D$  выбирают из неравенства:

$$2,1036 \cdot 10^7 \sqrt{\frac{\varepsilon U_k}{N}} < D < 2,1036 \cdot 10^7 \sqrt{\frac{\varepsilon}{N} (U_k + 0,8U_{np})}$$

где  $\varepsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала эмиттера катода;  $N$  – концентрация электронов в материале эмиттера катода,  $\text{см}^{-3}$ ;  $U_k$  – высота барьера Шоттки в месте контакта поверхности эмиттера катода со слоем металла при отсутствии напряжения на слое металла, В;  $U_{np}$  – пробивное напряжение контакта металл-полупроводник, В; 0,8 – коэффициент запаса;  $D$  – диаметр поперечного сечения эмиттера катода на границе контакта его поверхности со слоем металла, в микронах.

Прибор работает следующим образом. В условиях вакуума на дополнительно установленный анод (на рисунке не показан) подают напряжение, создающее напряженность поля на вершине эмиттера 2, достаточное для автоэлектронной эмиссии. В результате возникает холодная эмиссия электронов с вершины эмиттера 2 к аноду. На слой металла 4 подается управляющее напряжение, изменяющее высоту энергетического барьера на

границе контакта боковой поверхности полупроводникового эмиттера 2 со слоем металла 4. На границе контакта увеличивается ширина области полупроводника, обедненная электронами. При этом проводящий канал в объеме эмиттера 2, расположенном в металлическом слое 4, сужается. В результате ток автоэлектронной эмиссии в цепи анода уменьшается. При некоторой величине напряжения на затворе проводящий канал перекрывается полностью, и ток автоэлектронной эмиссии прекращается.

В сравнении с автокатодами, выполненными с управляющим электродом, преимуществом этого прибора является снижение управляющих напряжений в 7–10 раз, что позволит повысить крутизну вольт амперных характеристик и надежность прибора, снизить его энергоемкость [98].

#### 2.5.2. Управление эмиссией электронов путем изменения геометрии катода

Из уравнения Фаулера-Нордгейма следует, что эмиссионный ток чрезвычайно сильно зависит от напряженности электрического поля  $E$ . Поскольку  $E = \beta U$ , в полях  $5 \cdot 10^7$  В/см и работе выхода  $\phi = 4,5$  эВ отклонение  $\beta$  на 1% приводит к изменению в токе приблизительно на 15%. Эта резкая зависимость послужила основой для создания конструкции автоэмиссионного прибора, управление эмиссией которого производится оперативным изменением форм-фактора катода [99]. Конструкция катодного узла, управляемая изменением форм-фактора катода приведена на рис. 32.

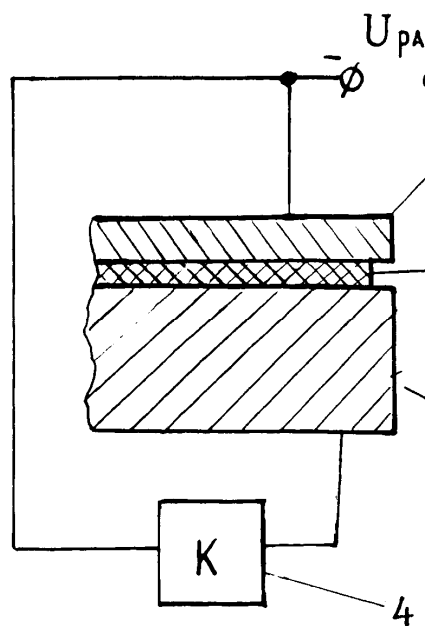


Рис. 32. Катодный узел:

1—эмиттер; 2—управляющий электрод; 3—диэлектрический слой; 4—низковольтный ключ; 5—коллектор электронов.

Катодный узел работает следующим образом. При приложении рабочего напряжения между эмиттером 1 и коллектором электронов (анод) 5 при разомкнутом положении ключа 4 на кромке полевого эмиттера за счет искажения силовых линий электрического поля возникают условия, достаточные для автоэлектронной эмиссии, а именно — напряженность электрического поля, превышающая  $10^7$  В/см, что инициирует поток электронов от полевого эмиттера 1 к коллектору электронов 5. При замыкании низковольтного ключа 4, управляющий электрод 2 и полевой эмиттер 1 электрически соединяются, при этом их потенциал выравнивается, что равнозначно дискретному изменению форм-фактора катодного узла. Таким образом, при замыкании ключа изменение форм-фактора катодного узла приводит к уменьшению напряженности электрического поля на кромке полевого эмиттера, что, в свою очередь, приводит к снижению или полному прекращению потока электронов от полевого эмиттера 1 к коллектору электронов 5. Применение катодного узла в сравнении с известными конструкциями позволяет расширить возможности применения за счет

дополнительного множества приборов, где ранее для управления высокими рабочими напряжениями могли применяться только высоковольтные ключи, позволяет повысить надежность, долговечность и стабильность работы катодного узла. Кроме того, достигается повышение технологичности изготовления с одновременным снижением стоимости изготовления приборов, связанные с доступностью и не столь жесткими требованиями к физическим параметрам материалов для изготовления катодного узла. Катодный узел может быть изготовлен по тонкопленочной технологии, с выполнением эмиттера из любого тугоплавкого проводящего материала, например, вольфрама, молибдена, углерода, коммутированного посредством внешней цепи через низковольтный ключ 4 с управляющим электродом 2, который выполняется из проводящего материала, например, алюминия или меди, диэлектрический слой 3 формируется, например, из монооксида кремния или диоксида кремния. Низковольтный ключ выполняется на базе быстродействующего транзистора. Конструкция, содержащая несколько управляющих электродов и имеющая несколько рабочих режимов, описана в патенте [100]. Новые перспективные способы низковольтного управления автоэлектронным током требуют экспериментального подтверждения и исследования.

### 3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ

### ЧАСТЬ

#### Создание низковольтных автоэмиссионных микроприборов

##### 3.1. Острийные кремниевые диоды

Диодные структуры на основе матрицы острий выполнены на монокристаллической пластине кремния. Острия формируются последовательным плазмохимическим и химическим травлением. Изготовление острий, имеющих микронные размеры с радиусами скругления вершины порядка десятых и сотых долей микрона и шаг расположения единицы микрон, требует создания маскирующего покрытия соответствующих размеров.

##### 3.1.1. Создание маскирующего покрытия субмикронного разрешения методом фотолитографии

Для получения микронных и субмикронных элементов в микроэлектронной технологии используются методы электроно-, рентгено- и ионно-лучевой литографии. Ограничения размеров из-за рассеяния в резисте составляют соответственно 20-300 нм, 5-80 нм и 5-40 нм. Все эти методы низкопроизводительны. Наиболее доступной и высокопроизводительной считается фотолитография. Для фотолитографии минимальный размер элемента обусловлен, прежде всего, длиной волны используемого излучения. Так, при снижении последней до 400 нм можно добиться ширины линии около 1,5 мкм. При оценке предельной величины разрешающей способности фотолитографии необходимо учитывать физические ограничения получения оптического изображения, а также накладываемые резистом (профиль, размер зерна и т.д.) и качество воспроизведения изображения по пластине. Наиболее простым видом фотолитографии является контактная печать. Разработаны различные методы и

конструктивно–технологические приемы повышения разрешающей способности литографии, направленные на изготовления элементов интегральных схем субмикронных размеров. Условно их можно разделить на методы механической обработки, усовершенствование конструкции масок, травление многослойных структур, осаждение под углом и окисление. Кроме того, представляет интерес получение субмикронных размеров за счет конструктивно–технологических особенностей разрабатываемых элементов схем.

По принципу переноса изображения можно выделить две группы технологических операций: первая реализует прямой перенос рисунка, вторая инверсная или “взрывная” (*Lift-off*).

Для метода взрывной литографии необходимо сформировать резистивную маску с вертикальным или нависающим профилем боковых стенок. Для оптической литографии разработан способ получения резистивной маски с нависающим профилем боковых стенок, основанный на обработке фоторезистов в хлорбензоле (до или после экспонирования) [101]. Толщина верхнего модифицированного слоя резиста зависит от температуры первой сушки и длительности погружения в хлорбензол. Простота этого способа сделала его очень распространенным в технологии формирования элементов межсоединений, однако ряд его недостатков препятствует формированию элементов с шагом менее 4 мкм [102]. Несколько уменьшить ширину нависающего края резистивной маски, и, следовательно, повысить разрешающую способность метода позволяет применение модификаторов с меньшей активностью, например, ксилола [103]. Специалистами фирмы *Siemens AG* был разработан метод формирования межсоединений БИС с использованием вспомогательных слоев. [104]. Первоначально на кремниевые структуры осаждают вспомогательный слой (хром или алюминий) и формируют маску из фоторезиста. Травление незащищенных участков вспомогательного слоя проводят в растворе сульфата церия при комнатной температуре. Подтрав под край маски обычно не превышает 0,3 мкм. На

подготовленные таким образом пластины при комнатной температуре на установке с планетарным вращением подложек напыляют слой металла. Резистивную маску с осажденными участками металла удаляют в растворителе фоторезиста в ультразвуковой ванне, области вспомогательного слоя удаляют селективным плазмохимическим травлением.

Разработанная технология создания маскирующих покрытий с субмикронным разрешением основывалась на обнаруженном эффекте, который заключался в том, что подвергая маску из фоторезиста (ФР) марки *AZ-1350H* термической обработке при повышенных температурах (140-160°C) наблюдался сдвиг края ФР маски. Изменение размеров фоторезистивных масок в процессе термообработки известно из ряда работ, причем их авторы, в основном, отмечают это явление как негативное и предлагают различные способы для его устранения. В работе [105] упоминается, что позитивные фоторезисты имеют тенденцию при резком нагреве исказить геометрию проявленных элементов структур с малыми размерами и для уменьшения температурных искажений рисунка фоторезистивной маски предлагается задубливание выполнять двумя последовательными стадиями – низкотемпературной (80–90°C) и высокотемпературной (110–120°C). Встречаются также попытки практического использования термической обработки фоторезистивной маски, например, для формирования сглаженного рельефа (использование эрозии фоторезистивной маски при плазмохимическом травлении (ПХТ). Предлагается перед ПХТ фоторезист выдержать при температуре, обеспечивающей его размягчение и текучесть достаточную для округления профиля. Температура и длительность такой обработки должны тщательно контролироваться во избежание заплывов фоторезиста и ухода критических размером [106].

В работе [107] например, рассматривается воспроизводимое изменение края фоторезистивной маски (рис. 33 а), что, по мнению авторов, обусловлено высокой температурой задубливания фоторезиста.

В ходе работы также неоднократно отмечалось увеличение площади фоторезистивной маски после ее термообработки при температурах 130–160 °С. Проведенные исследования, направленные на определение возможности практического использования данного явления для формирования самосовмещенных маскирующих покрытий с микронным и субмикронным разрешением показали, что край маски после термообработки при повышенных температурах имеет следующий вид (рис. 33 б).

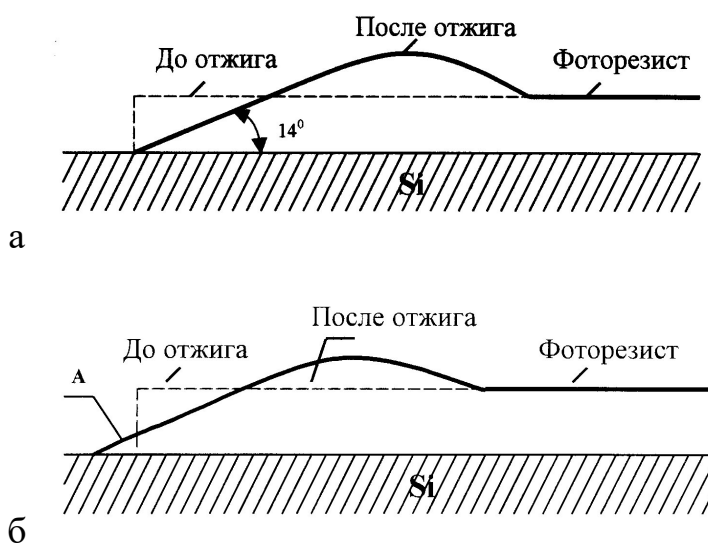


Рис. 33. Изменение края фоторезистивной маски после отжига.

а) [107]; б) изменение края фоторезистивной маски при повышенной температуре.

А– сдвиг края фоторезистивной маски.

Технологический процесс формирования маскирующих покрытий отрабатывался на кремниевых подложках, покрытых слоем термически выращенного окисла. Предварительно на подложки напылялся слой хрома толщиной 0,1 мкм. Нанесение фоторезиста производилось методом центрифугирования. Сушка осуществлялась в термической печи при температуре 70 °С. Время сушки составляло 20 минут. Маска представляла собой набор отверстий и прямоугольников. Диаметр круглых отверстий составлял 2 и 4 мкм, прямоугольные окна имели размер 2х300 мкм и 4х300 мкм. Маски выполнялись из фоторезиста *AZ-1350H* и *ФП-051Ш*.

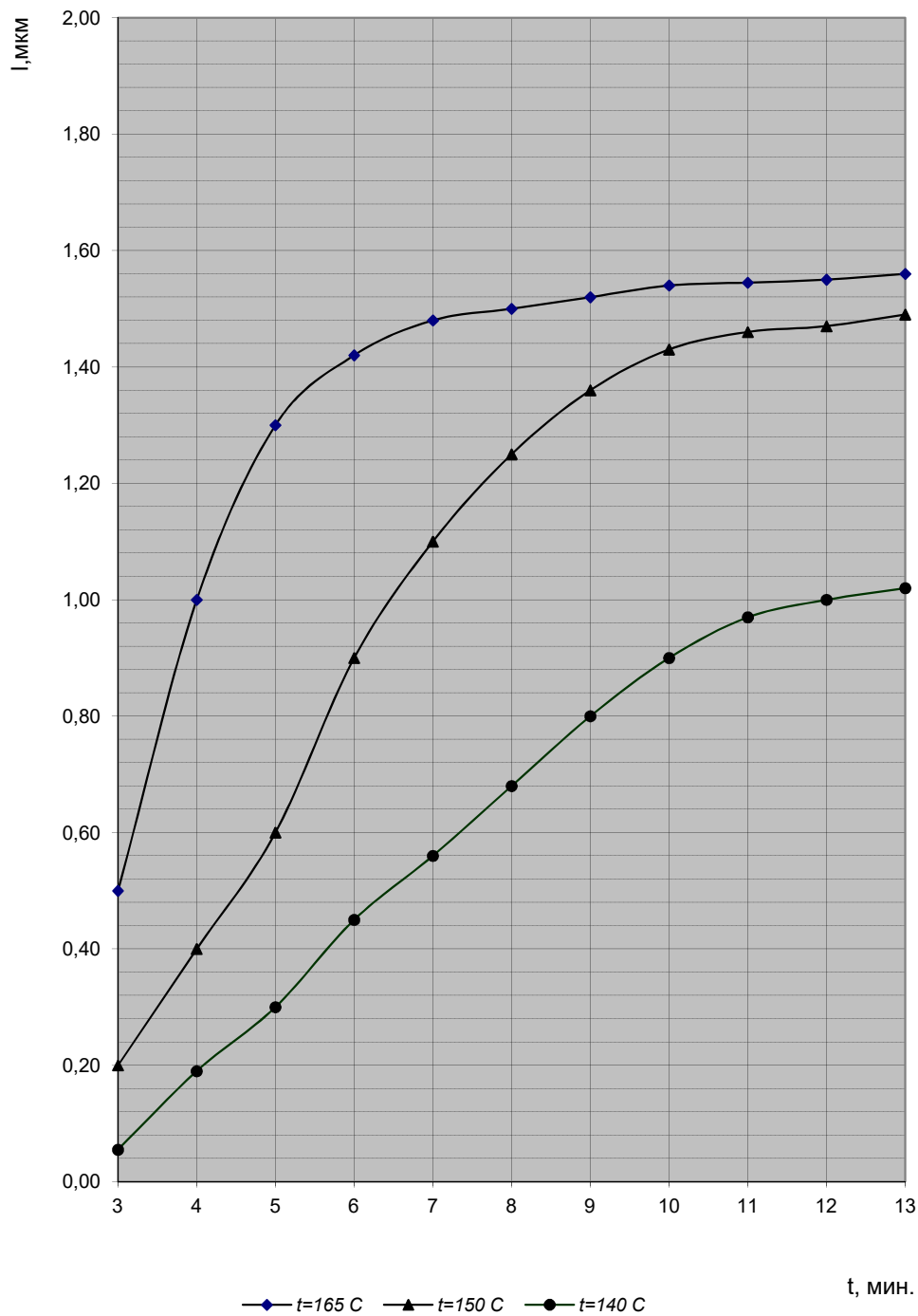


Рис. 34. Зависимость величины сдвига края ФР маски от времени термообработки: Фоторезист AZ-1350H. Толщина слоя фоторезиста  $d = 1$  мкм.

Контроль сдвига маски проводился на бинокулярном микроскопе "Люам И2" с измерительной приставкой МОВ-1-15<sup>x</sup> ГОСТ 7865-56.

Исследовалось влияние температуры и времени термообработки на величину сдвига края фоторезистивных масок при различных ее толщинах. Требования, предъявляемые к толщине слоя фоторезиста, противоречивы. С одной стороны, необходимо минимизировать количество дефектов в слое фоторезиста, что достигается при максимальной толщине фоторезиста. С другой стороны, необходимо обеспечить высокое разрешение в целях получения размеров элементов структур 1,5 мкм и ниже, что достигается при минимальной толщине фоторезиста. Примененный процесс термообработки позволяет изменять размеры рисунка фоторезистивной маски в пределах от 0,3 до 1,5 мкм (рис. 34) с воспроизводимостью достаточной для практического применения [108, 109].

Для создания данного субмикронного маскирующего покрытия из фоторезиста *AZ-1350H* опытным путем была подобрана оптимальная толщина фоторезистивного слоя 1 мкм. Температура сушки 70 °С, время сушки 20 минут и время термообработки 2 минуты при  $T_{об} = 160$  °С.

Как показали эксперименты, в значительной степени на величину сдвига края фоторезистивной маски влияет температура задубливания. Было также установлено, что химическая жидкостная обработка в некоторых составах травителей практически не влияет на величину сдвига края фоторезистивной маски.

Наклонный край ФР маски не позволяет применить метод *Lift-off* для создания маскирующего покрытия т.к. при напылении материала маски не достигается полного разделения слоев по краю фоторезиста, что является необходимым условием воспроизводимой взрывной литографии. Поэтому был применен дополнительный слой металлизации. Разработанный метод формирования маски с субмикронными размерами применен в технологии изготовления вакуумных диодов на кремниевой подложке [110, 111] и показан на рис. 35.

В результате экспериментальных исследований была показана возможность контролируемого изменения размеров рисунка фоторезистивной маски в пределах 0,4–1,5 мкм, что может быть эффективно использовано в технологии изготовления структур с микронным и субмикронным разрешением

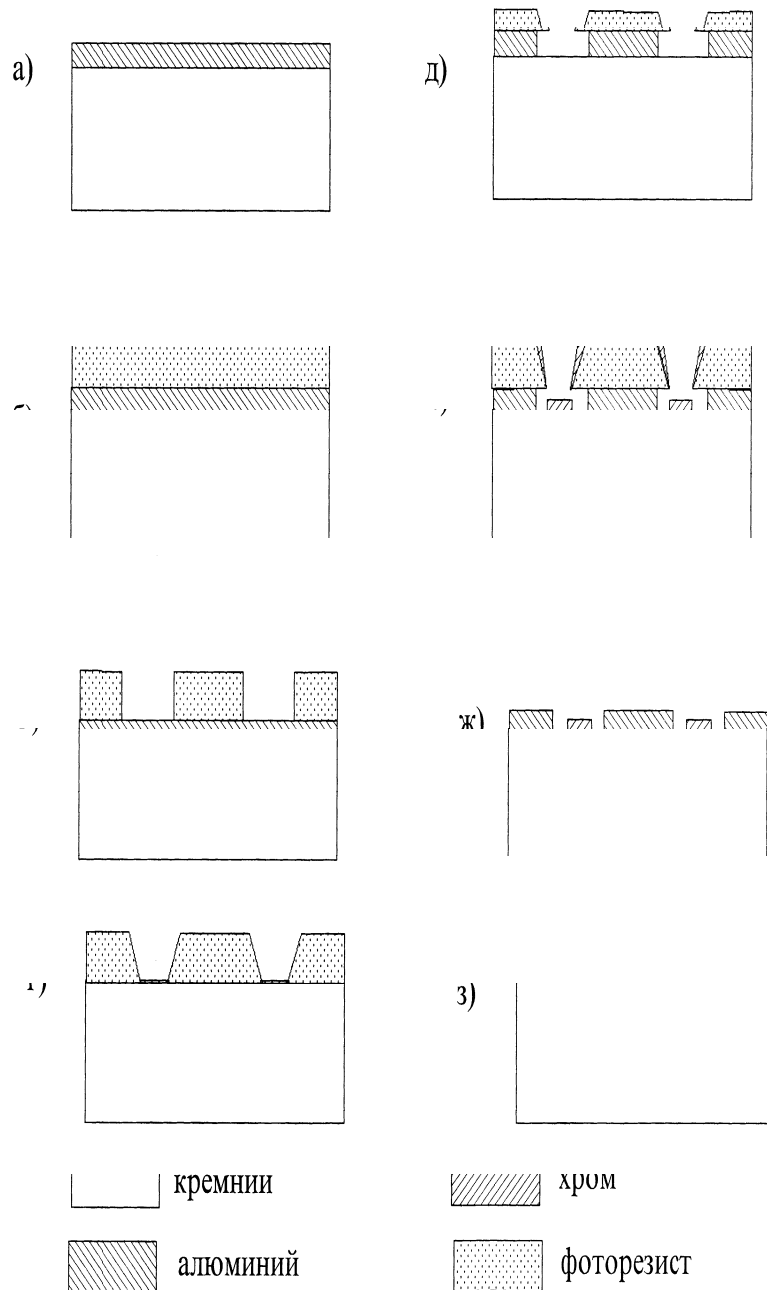


Рис.35. Создание маски с субмикронными размерами методом фотолитографии:  
 а)– напыление пленки алюминия толщиной 0,15 мкм; б) -нанесение фоторезиста толщиной 2 мкм; в)– проведение процесса фотолитографии; г)– термическая обработка фоторезиста;

д)– травление алюминия; е)– напыление хрома 0,1 мкм; ж)– снятие фоторезистивной маски; з)– удаление алюминия.

на широко используемом, недорогом, стандартном фотолитографическом оборудовании. Фотошаблон содержал поле с окнами 2x2 мкм с шагом расположения шесть микрон. Микрофотография полученной маски приведена на рис. 36.

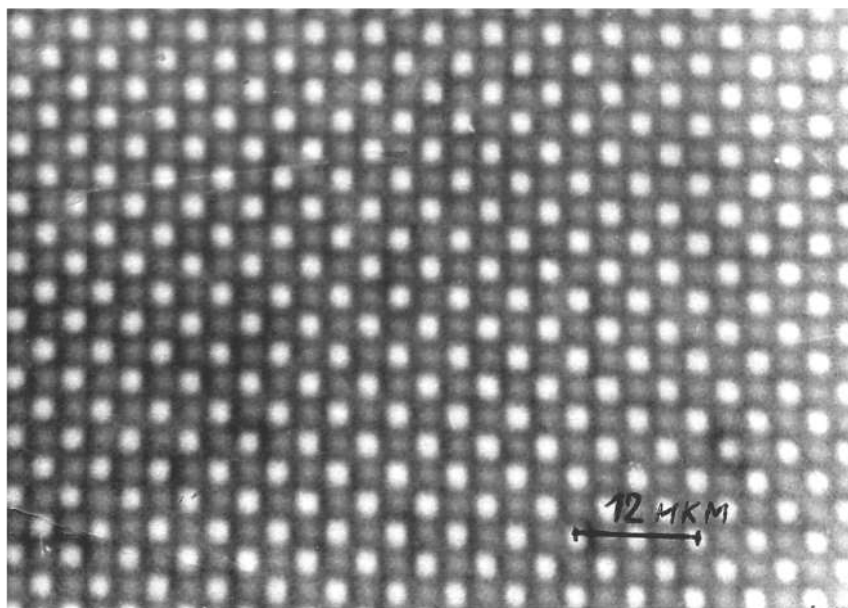


Рис. 36. Микрофотография маскирующего покрытия.

### 3.1.2. Формирование матрицы трехмерных микроструктур методом плазмохимического травления

Изотропное химическое травление не пригодно для получения элементов с микронными размерами, когда толщина активного слоя соизмерима с горизонтальными размерами элементов.

Рисунки на резисте, формируемые методами литографии, не являются элементами готового прибора, скорее они есть отображение действительных схемных элементов. Для формирования топологии схемы необходимо перевести рисунки резиста в соответствующие слои полупроводниковой структуры. Один из методов такого перевода заключается в селективном

удалении немаскированных участков резиста. Этот процесс называют травлением. Методы так называемого “сухого травления” хорошо подходят для технологического процесса изготовления субмикронных элементов микроэлектроники. Сухое травление называют также “плазменным травлением” [112] подразумевая использование в этих методах плазмы в виде газовых разрядов при низком давлении. Методы сухого травления широко применяются в технологии СБИС, так как они характеризуются способностью высокоточного перевода рисунков резиста. Первые применения плазменных методов в технологии кремниевых интегральных схем относятся к концу 60-х годов, когда начались исследования возможности применения различных видов кислородной плазмы для снятия фоторезиста [113]. В тоже время проводились работы по использованию плазмы для травления кремния, завершившиеся изобретением способа травления в газовых смесях  $CF_4-O_2$  [114]. Тогда еще не существовало универсальной тенденции применения методов сухого травления, которые рассматривались как новые варианты известных способов химического травления.

Плазменное травление может осуществляться различными методами. При использовании методов ионного травления, включающего ионно-лучевое и ионно-плазменное травление, процесс травления происходит исключительно по механизму физического распыления. Реактивные методы, включающие собственно плазменное травление, реактивно-лучевое травление и реактивное ионно-плазменное травление, основаны на различной степени сочетания химических реакций, в ходе которых образуются летучие или квазилетучие соединения, и физических взаимодействий, таких, как ионная бомбардировка. Термин “плазменное травление” часто применяется для обозначения чисто химических реакций, в которых плазма служит исключительно источником реакционно-способных электрически нейтральных компонент, вступающих во взаимодействие с атомами поверхности твердого тела, в результате чего образуются летучие продукты реакций. Известны примеры применения плазменного травления в технологии микроэлектроники, для которых данное

определение является полностью адекватным. Однако физические эффекты, такие, как ионная бомбардировка, часто играют важную роль в плазменном травлении, так же как и в реактивном ионном травлении. Поэтому следует быть осторожным при определении “механизма” конкретного процесса травления, основанного на терминологии, используемой для описания этого процесса. Предпочтительно разделять методы сухого травления не по механизму, а по функциональным признакам, т. е. присущим им комбинациям функциональных параметров [115]. В настоящее время сухое травление широко используется в микроэлектронной технологии для травления полупроводников, металлов, диэлектриков, как обладающее рядом преимуществ по сравнению с другими методами травления: а) процесс сухого травления легко поддается управлению и контролю; б) сухое травление обеспечивает высокую избирательность и незначительную величины подтравливания под маску; в) большая разность в скорости травления различных материалов обеспечивает простоту создания устойчивой маски; г) возможность травления различных материалов;

д) возможность создания трехмерных микроструктур.

Для создания матрицы микрокатодов с субмикронными размерами острий (высота острия порядка 1 – 4 мкм, радиус скругления вершины порядка 0,1 – 0,02 мкм) необходимо точно контролировать все факторы влияющие на процесс создания микроострий. На процесс сухого травления (на скорость и селективность) наиболее сильно влияют следующие факторы: а) энергия и угол падения ионов на подложку; б) состав, давление и скорость потока рабочего газа; в) плотность мощности и частота прикладываемого электрического поля; г) температура подложки; д) загрузочный эффект камеры, материалы травления.

Влияние энергии и угла падения ионов на интенсивность распыления, определяемую числом атомов поверхности, выбиваемых с нее одним падающим ионом. Энергия ионов должна превышать пороговую величину порядка 20 эВ, при которой начинается распыление, и должна быть намного

выше указанной величины (несколько сотен электрон-вольт) для достижения практически приемлемых скоростей ионно-плазменного травления. Интенсивность распыления большинства материалов монотонно возрастает по мере повышения энергии ионов до 2 кэВ. При этом наибольшие приращения в скорости травления достигаются при энергиях ионов до 300 эВ [112].

Интенсивность распыления зависит от угла, под которым ионы соударяются с поверхностью. Ионы, падающие на поверхность под наклонным углом, характеризуются более высокой по сравнению со случаем нормального падения вероятностью эмитирования атома, вектор скорости которого направлен от поверхности подложки. Кроме того, такие ионы передают большую долю своей энергии приповерхностным атомам, вероятность эмиссии которых выше. Ионы, образующиеся в процессе разряда, соударяются с поверхностью подложки как при плазменном, так и при реактивном ионном травлении. Распыление способствует увеличению скорости травления, но при обычных рабочих параметрах процесса это увеличение незначительно. Большую значимость имеет эффект, оказываемый атомными соударениями на протекающие на поверхности химические реакции. В настоящее время эти, стимулируемые ионами реакции, являются предметом интенсивного изучения. Растущее число экспериментальных фактов свидетельствует о том, что стимулируемые ионами реакции между электрически нейтральными травящими частицами, образованными в разряде, и поверхностью твердого тела играют доминирующую роль во многих процессах сухого травления, которые применяются в технологии микроэлектроники.

Для объяснения зависимости скорости реакции от ионного облучения можно предложить несколько механизмов: а) ионная бомбардировка создает на поверхности дефекты, катализирующие хемосорбцию или реакцию; б) ионная бомбардировка обеспечивает непосредственную дислокацию молекул травящих газов; в) ионная бомбардировка способствует удалению нелетучих остатков, замедляющих травление [116].

Относительная важность этих и других механизмов до сих пор является объектом исследований, дающих в некоторых случаях противоречивые результаты. Облучение ионами высоких энергий обуславливает протекание физических процессов, таких, как образование дефектов решетки, термоудар и молекулярная дислокация, которые способны значительно ускорить или даже возбудить химические реакции между электрически нейтральными травителями и поверхностью твердого тела. В случае фторосодержащей плазмы травление кремния осуществляется самопроизвольно, т.е. в отсутствие ионной бомбардировки реакционно способным веществом (атомами фтора), но скорость реакции повышается в результате облучения ионами высокой энергии. В случае хлоросодержащей плазмы в отсутствие ионной бомбардировки травления вообще не происходило.

Явления, происходящие при травлении в реактивных плазмах, можно объяснить тем, что травящие компоненты (в основном электрически нейтральные), возникающие в процессе разряда, адсорбируются на поверхности и вступают с ее атомами в химические реакции, в ходе которых создаются десорбирующие соединения, причем скорость всего процесса может быть повышена (или реакции могут возбуждаться) за счет воздействия в плазме ионов высокой энергии. Очевидно, что степень, в которой ионы повышают скорость реакций, зависит от вида травящих газов, подвергаемых травлению материалов и рабочих параметров процесса.

Состав рабочего газа – доминирующий фактор, определяющий скорость травления и селективность при плазменном и реактивном ионном травлении. Для процессов травления в технологии СБИС применяются почти исключительно галогеносодержащие газы, за исключением процессов, связанных с удалением фоторезиста и переносом рисунков в органические слои, когда используют плазму  $O_2$ . Выбор этих газов отражает тот факт, что образование применяемыми для изготовления СБИС материалами летучих и квазилетучих соединений с галогенами термодинамическими и кинетически

возможно при температурах, близких к комнатной. Также эти газы (для кремния это –  $CF_4$ ,  $CF_4+O_2$ ,  $SF_6$ ,  $SF_6+O_2$ ,  $NF_3$ ,  $CL_2$ ,  $CCL_4$ , и др.) наиболее удобны и безопасны в работе. Для реактивного травления часто применяют многокомпонентные смеси, представляющие собой обычно главную компоненту с одной или несколькими добавками, которые вводятся для обеспечения наряду с требуемой скоростью травления других заданных характеристик: селективности, однородности, профиля края [117]. Давление газа, плотность мощности и частота прикладываемого электрического поля – независимые параметры, но на практике индивидуальное влияние каждого из них на процесс травления иногда трудно объяснить или предсказать. Однако являются очевидными несколько общих тенденций. Так понижение давления и (или) частоты и повышение плотности мощности приводят к увеличению средней энергии электронов и энергии, падающих на подвергаемую травлению поверхность ионов. Повышение плотности мощности вызывает также повышение плотности радикалов и ионов в плазме. Таким образом, в процессах ионно–стимулируемого травления путем уменьшения давления и частоты или увеличения мощности можно повысить степень анизотропии скорости травления. Как правило, с увеличением мощности скорость травления монотонно возрастает, хотя темп приращения замедляется. Почти вся прикладываемая мощность, в конечном счете, рассеивается в виде тепла, поэтому при обеспечении очень большой плотности мощности электрического поля необходимо предусматривать охлаждение подложек во избежание нежелательных последствий нагрева, таких, как плавление и подгорание фоторезиста или потеря селективности травления.

Температурная зависимость скорости реактивного травления определяется главным образом влиянием температуры на скорость протекания химических реакций. Это влияние обычно описывается зависимостью Аррениуса (скорость травления прямо пропорционально  $\exp[-Q/kT]$ , где  $Q$ – энергия активации,  $T$ –абсолютная температура подложки,  $k$ –постоянная Больцмана) при относительно малых значениях энергии активации ( $Q < 0,5$

эВ/м). Основной причиной нагрева подложек является их разогрев плазмой. Кроме того, заметный вклад в повышение температуры может вносить тепло, выделяемое в результате протекания экзотермических реакций травления. Известно, что иногда скорость травления уменьшается с ростом температуры [118]. Для обеспечения однородных и воспроизводимых скоростей травления необходимо контролировать температуру подложки.

При реактивном травлении иногда наблюдается уменьшение скорости травления при увеличении суммарной площади поверхности, подвергаемой травлению. Это явление известно как загрузочный эффект, происходящий в тех случаях, когда активные компоненты быстро вступают в реакцию с подвергаемым травлению материалом, но обладают длительным временем жизни в отсутствие этого материала. В этом случае доминирующим механизмом потерь активных компонент является само травление, поэтому, чем больше площадь подвергаемой травлению поверхности, тем выше скорость потерь. Скорость образования активных компонент определяется рабочими характеристиками процесса (давление, мощностью, частотой и т. д.) и почти не зависит от количества подвергаемого травлению материала в реакторе. Таким образом, средняя концентрация активных компонент, равная разности скоростей образования и потерь, уменьшается с увеличением площади поверхности, подвергаемых травлению. Зависимость скорости травления  $R$  от площади подвергаемой травлению поверхности  $\Phi$  в простейшем случае травления одним активным веществом имеет вид

$$R = \frac{\beta\tau G}{1 + K\beta\tau\Phi},$$

где  $\beta$  – постоянная скорости реакции;  $\tau$  – время жизни активного вещества в отсутствие подвергаемого травлению материала;  $G$  – скорость образования активного вещества;  $K$  – коэффициент, постоянный для данных материала и геометрии реактора.

Из этого выражения следует, что загрузочный эффект заметно не проявляется, пока  $K\beta\tau\Phi \ll 1$ . Это условие удовлетворяется при использовании плазмы, в которой собственное время жизни ( $\tau$ ) активных компонент очень мало, т.е. когда превалируют иные по отношению к самому травлению механизмы потерь [119]. Наиболее серьезная проблема, связанная с загрузочным эффектом, возникает при контроле размеров элементов в условиях бокового травления. Это связано с тем, что при стравливании до конца заданного слоя, площадь подвергаемой травлению поверхности резко уменьшается и развивается процесс перетравливания, характеризующийся тем, что скорость травления намного превышает номинальную. Это существенно затрудняет контроль размеров элементов, так как при таких условиях осуществляется ускоренное боковое травление.

Загрузочный эффект можно считать макроскопическим, поскольку присутствие в реакторе одной пластины влияет на скорость травления другой пластины, расположенной в другой части реактора. Из этого следует, что транспортные процессы в плазме протекают достаточно быстро и в ее объеме не могут образовываться значительные градиенты концентрации активных элементов. Наблюдались также и микроскопические проявления загрузочного эффекта, когда размеры и плотность расположения вытравливаемых элементов влияют на скорость травления [120]. В последние годы исследователи проявляют большой интерес к сверхскоростному травлению в реакторах, рассчитанных на индивидуальную обработку пластин [121]. Скорость потока рабочего газа определяет максимально возможный приток к подложке реакционноспособных компонент. В действительности приток зависит от равновесия между процессами генерации и рекомбинации в плазме активных элементов. Один из механизмов потерь травящих компонент – унос их вязким газовым потоком. Скорость потерь обратно пропорциональна продолжительности пребывания  $t_r$ , определяемой как

$$t_r = 0,175Vp/F,$$

где  $p$  – давление, Па;  $V$  – объем плазмы;  $F$  – скорость газового потока.

Продолжительность пребывания – мера средней продолжительности нахождения молекулы в плазме. При обычных условиях протекания процесса скорость потока рабочего газа оказывает незначительное воздействие на скорость травления. Это влияние проявляется при экстремальных условиях, когда, либо скорость потока настолько мала, что скорость травления лимитируется доставкой травителя к подложке, либо скорость травления столь велика, что унос газовым потоком становится доминирующим механизмом потерь активных компонент. Возможность реализации последней ситуации зависит от скорости откачки, вязкости рабочего газа и вида материалов, находящихся внутри реактора.

Для формирования матрицы эмиттеров методом реактивного плазмохимического травления (РПХТ) была разработана и изготовлена экспериментальная установка, учитывающая все влияющие на процесс травления факторы, которые рассматривались выше. Схематическое изображение установки приведено на рис. 37. Для исключения влияния эффекта загрузки на скорость травления кремниевых подложек была применена конструкция реактора для индивидуальной обработки пластин, что также удобно для индивидуальной работы с отдельными экспериментальными пластинами кремния.

Разработанный процесс травления предусматривает изменение режимов работы реактора в процессе травления. Реактор индукционного типа с индуктором, содержащим 12 витков медного провода диаметром 2 мм. Кварцевый стакан диаметром 120 мм и высотой 200 мм. В рабочую камеру введен электрод, расположенный над подложкодержателем. Подложкодержатель цилиндрической формы выполнен из алюминия.

При обработке пластин была обнаружена большая разница в скорости травления по поверхности образца. Так, глубина протрава на краю пластины в 1,5–2 раза превышала глубину травления в центре пластины. Это по-видимому связано с градиентом распределения химически активных частиц и наличием ускоренных ионов. Понижение давления в рабочей камере несколько снижает

неравномерность травления, но резко падает также и скорость процесса травления, что нежелательно, особенно при индивидуальной обработке каждой пластины.

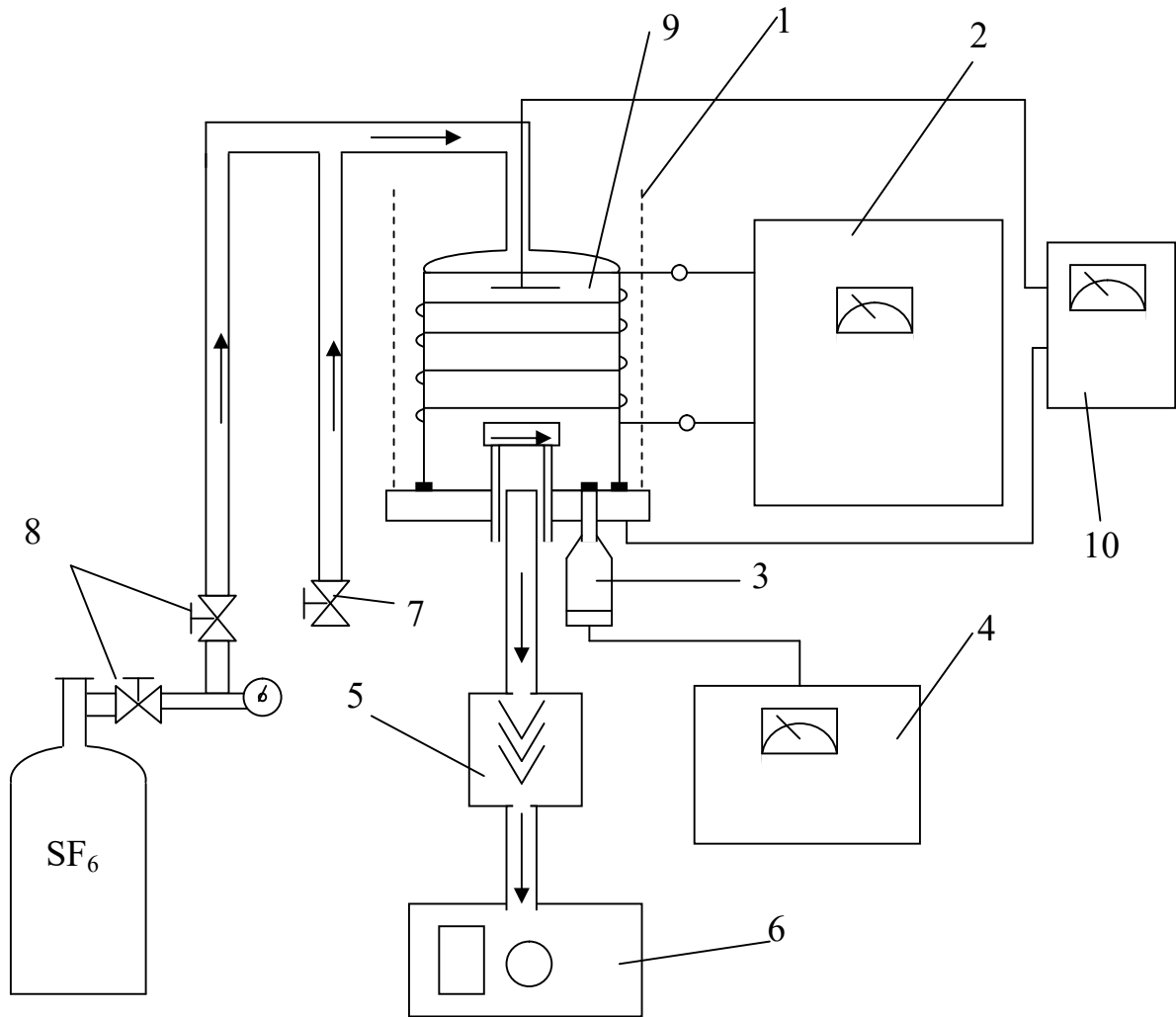


Рис. 37. Схема установки плазмохимического травления:

1– защитный экран; 2– высокочастотный генератор; 3– датчик вакуума; 4– измеритель вакуума; 5– заливная азотная ловушка; 6– вакуумный насос; 7– натекаль; 8– газовая магистраль; 9– реактор; 10– источник постоянного напряжения.

Уменьшить неравномерность скорости травления подложек можно, устранив градиент концентрации травящих частиц над подложкой. Для выравнивания концентрации травителя необходимо уменьшить диффузионный поток активных частиц, который подпитывает прежде всего периферийные области подложки. Это можно выполнить с помощью экрана охватывающего подложку. Для обработки кремниевых пластин диаметром 60 мм был применен кварцевый цилиндр диаметром 65 мм. Наиболее равномерное травление образца происходило при высоте цилиндра 8–10 мм. Неравномерность травления при глубине 4–6 мкм при последующем контроле на МИИ-4 не была заметна.

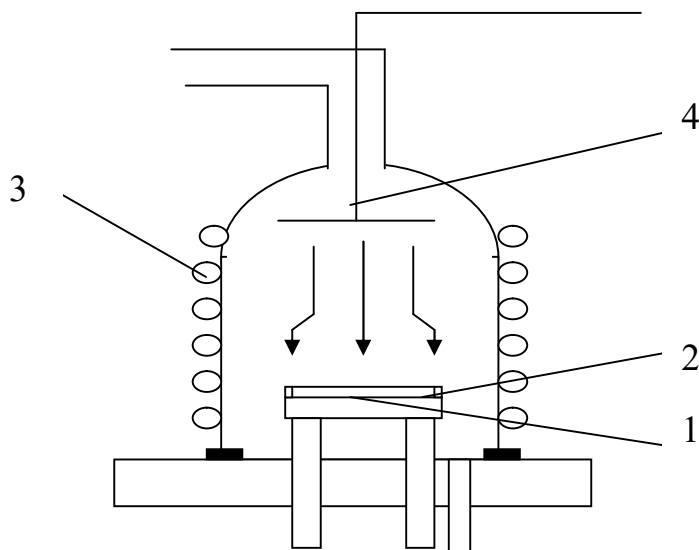


Рис. 38. Схема реактора установки реактивного плазмохимического травления: 1– подложкодержатель; 2– выравнивающий стакан; 3– индуктор; 4– дополнительный электрод.

Перед началом обработки кремниевые пластины подвергались двухстадийному процессу очистки. В стандартную процедуру очистки пластин  $Si$  входили следующие операции: 1) очистка в тлеющем разряде  $O_2$ ; 2) промывка сначала в растворе  $H_2SO_4$ , а затем – в деионизированной воде; 3) очистка промывкой в растворах  $NH_4OH + H_2O_2$  и  $HCl + H_2O_2$ . После каждой отдельной

операции пластины  $Si$  промывались в слабом растворе  $HF$ . В результате всей процедуры очистки стравливался приповерхностный слой  $Si$  толщиной 8 нм [122]. Затем, после помещения пластины в кварцевую камеру установки и откачки до  $3 \cdot 10^{-2}$  мм.рт.ст. проводилась очистка поверхности пластины методом реактивного плазмохимического травления при токе 300 мА в течение одной минуты.

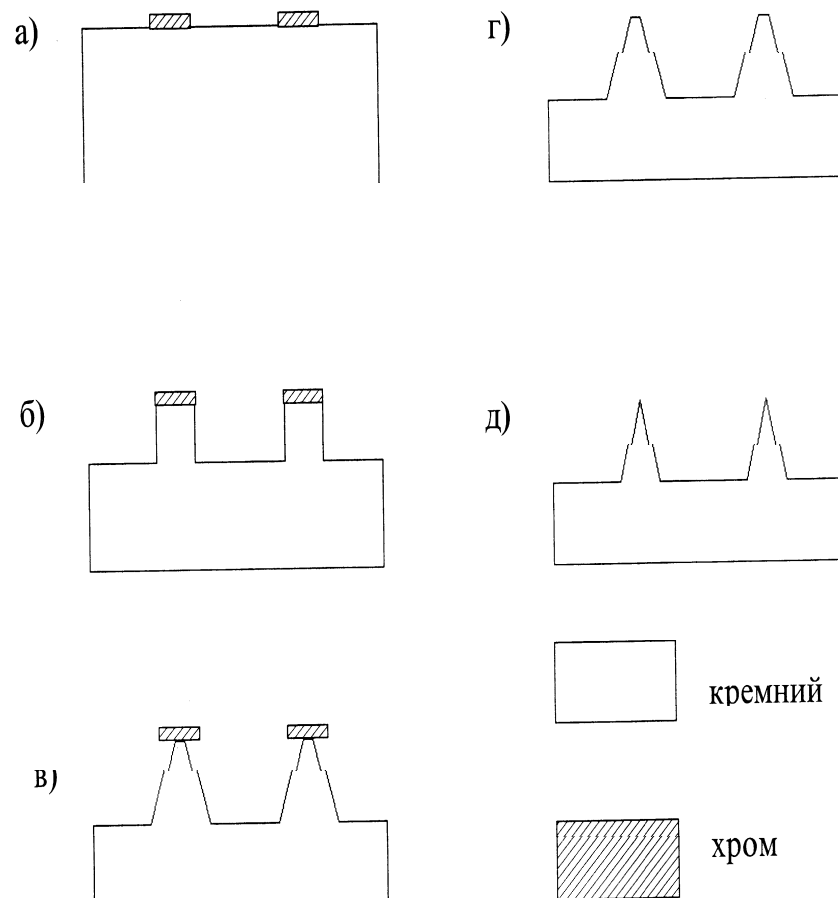


Рис. 39. Создание массива микроострий методом плазмохимической и химической обработки.

а)– маска субмикронных размеров; б)– травление кремния методом реактивного плазмохимического травления; в)– травление кремния методом плазмохимического травления; г)– снятие маски; д) – "острение" микрокатодов в жидкостном травителе.

Примененный метод очистки пластины позволил проводить травление Si пластины на глубину до 5-6 мкм сохраняя протравленную поверхность зеркальной. Последующее острение микроострий проводилось в жидкостном анизотропном травителе используя различные кристаллографические направления кристаллической решетки [123, 124].

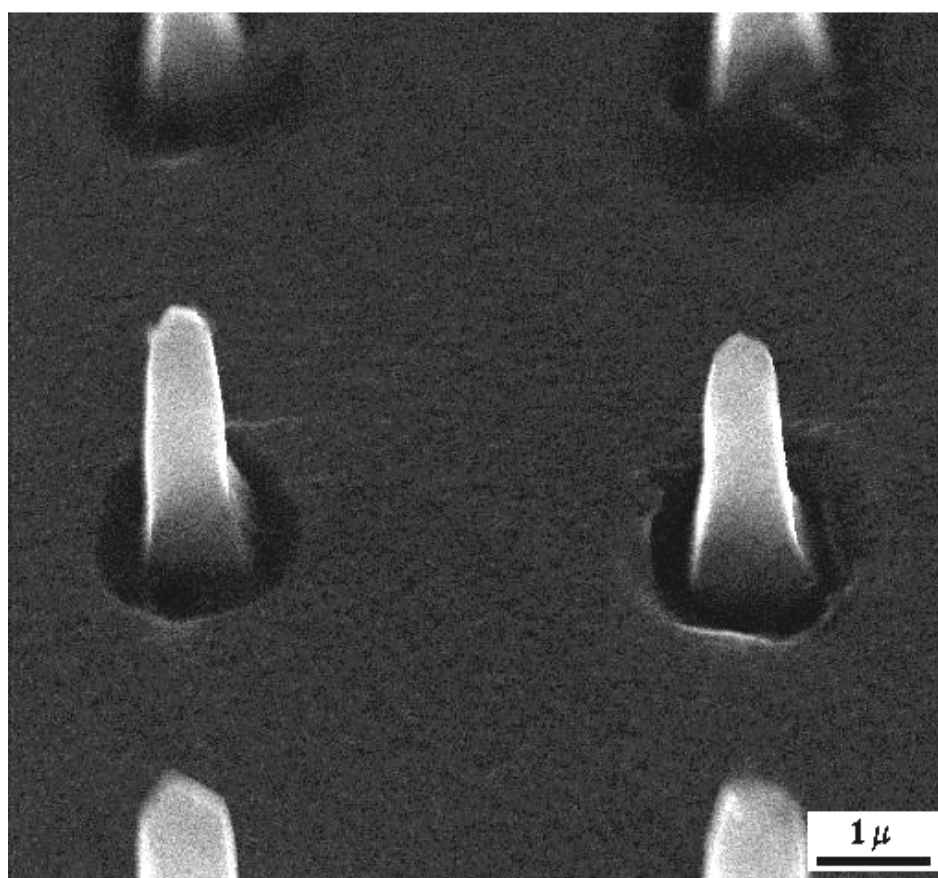
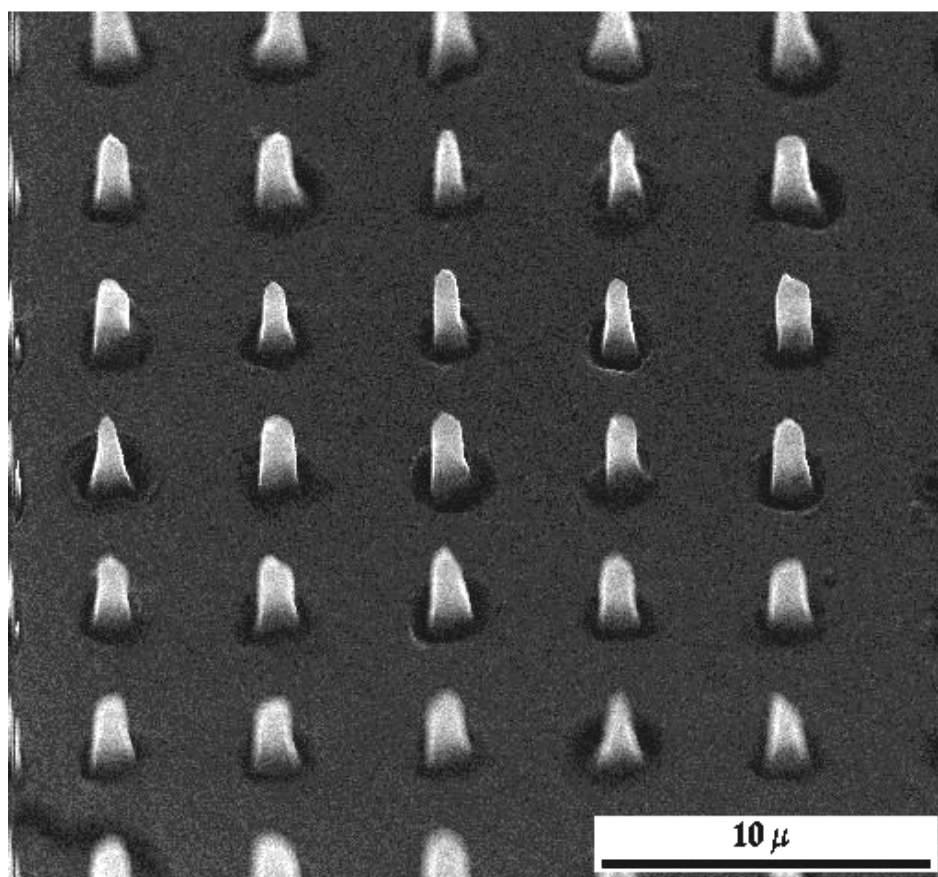


Рис. 40. Микрофотография матричного кремниевого катода

Шаг расположения острий 6 мкм. Угол 25–30 град.

### 3.1.3. Принцип самосовмещения при построении управляющих электродов

Из низкотемпературных методов наибольшее распространение получила планаризация с использованием специального травления толстой пленки выравнивающего материала, наносимой на неровную поверхность подложки [125-130]. Планаризация осуществляется, либо за счет одинаковой скорости травления различных слоев, выравненных по толщине при осаждении на поверхность [131-135], либо за счет разной скорости травления диэлектрических материалов на выступах и впадинах [136]. При этом в качестве выравнивающих слоев применяют пленки органических материалов, такие как фоторезисты [136], полиамиды [137] и их комбинации [138,139], а также осаждаемые в плазме диэлектрические слои, например  $SiO_2$ ,  $Si_3N_4$ , оксинитрид и другие [140]. В большинстве случаев обращаются к плазмохимическому травлению выравнивающего слоя, в некоторых случаях – к распылению ионами инертных газов [141].

При размере топологических элементов 0,5 мкм становится необходимым управление размерами и процессом травления элементов с точностью 0,05 мкм. Все процессы получения элементов с такими размерами по своей природе и требованиям к ним будут анизотропными. В этом случае используют плазмохимическое и реактивное плазмохимическое травление. Скорость травления кремния или диоксида кремния при облучении их поверхности ионами и одновременно воздействию фторосодержащего соединения намного превышает простую сумму скоростей химического и ионного травления. Разработанная конструкция реактора плазмохимической установки позволяет изменять энергию ионов в процессе обработки пластин, что позволяет проводить операцию анизотропного травления. Для планаризации конструкции и использования рельефа структуры для формирования самосовмещенного управляющего электрода применялось реактивное плазмохимическое

травление с высокими энергиями ионов. В качестве планаризирующего слоя использовался толстый слой фоторезиста (4-5 мкм) [142]. До травления фоторезист обрабатывался при температуре 140°C в течение 6 мин.

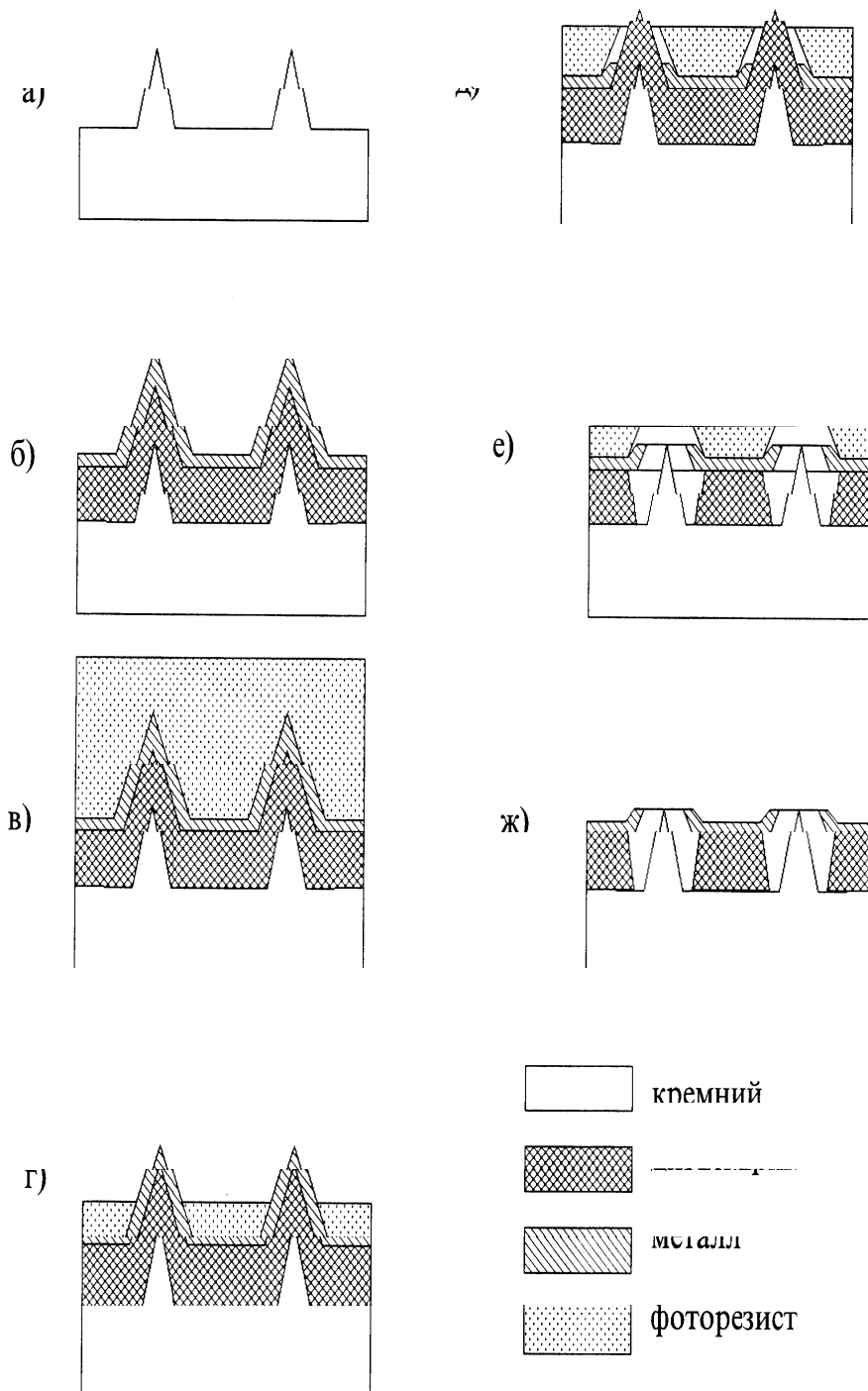
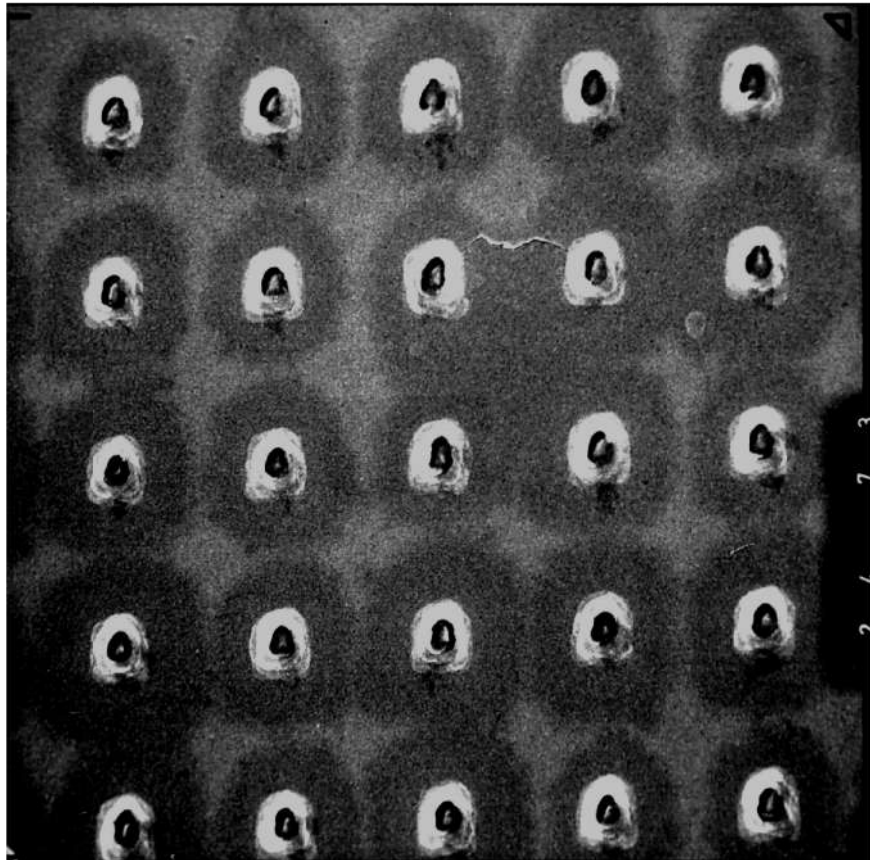


Рис. 41. Схема технологического процесса изготовления микрокатода с управляющим электродом.

- а)– полученные микроострия; б)– напыление слоев двуокиси кремния и хрома;  
в)– нанесение слоя фоторезиста; г)– операция планаризации; д)– травление хрома;  
е)– травление двуокиси кремния; ж)– удаление фоторезистивной маски.

а)



б)

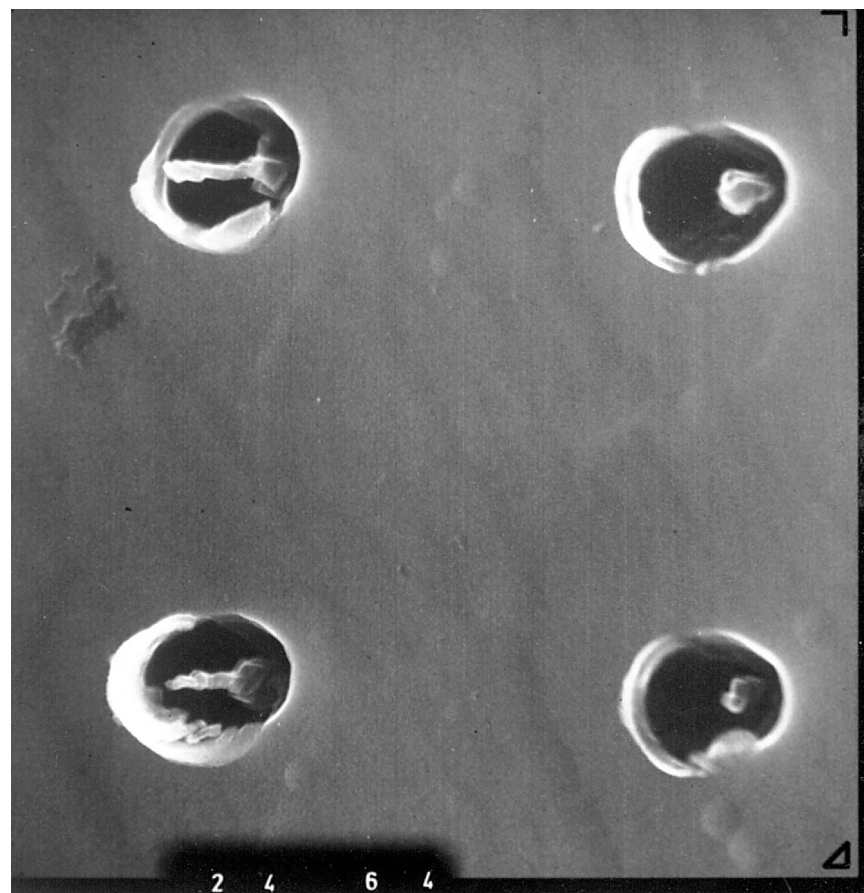


Рис. 42. Микрофотография матрицы микрокатодов с управляющим электродом: а) увеличение 3600 раз; б) увеличение 10000 раз.

### 3.2. Технология острых кремниевых триодов

Для создания низковольтных автоэмиссионных триодных структур необходимо создать управляющий электрод (сетку) и анод в непосредственной близости около катода. Это требует применение спейсеров микронного размера. Наиболее технологично располагать все электроды на одной подложке, что исключает такую трудоемкую операцию сборки, как совмещение катодной структуры с анодной.

Разработан способ изготовления триодной структуры матричного эмиссионного прибора (рис.43), с применением только микроэлектронных технологий и выполненного на полупроводниковой подложке. На стадии изготовления катода с управляющим электродом (рис.41, д) после формирования управляющего электрода, напыляются второй диэлектрический слой и металлический анодный. В анодном слое 4 методом фотолитографии на четыре соседних острия выполняется одно отверстие, причем требования к совмещению не высоки, затем вытравливается полость в диэлектрике (д). Вакуумирование производится термическим напылением монооксида кремния 5 на поверхность анода и часть поверхности управляющего электрода, ограниченную отверстием, выполненным в аноде. Напыление проводилось при давлении  $10^{-6}$  мм.рт.ст. В процессе герметизации образуется вакуумная полость 3.

По предлагаемому способу были изготовлены пленочные триоды с автокатадами с плотностью эмитирующих элементов  $2,88 \cdot 10^6$  ед./см<sup>2</sup>. Величина зазора между вершиной эмиттера и кромкой управляющего электрода составляла около 0,3 мкм, между вершиной эмиттера и анодом 0,6 мкм. Способ позволяет повысить выход годных пленочных автокатодов на 30-35%, снизить в 3-5 раз анодное и управляющее напряжение, а,

следовательно, повысить чувствительность и снизить энергоёмкость автокатода в пленочном исполнении [143].

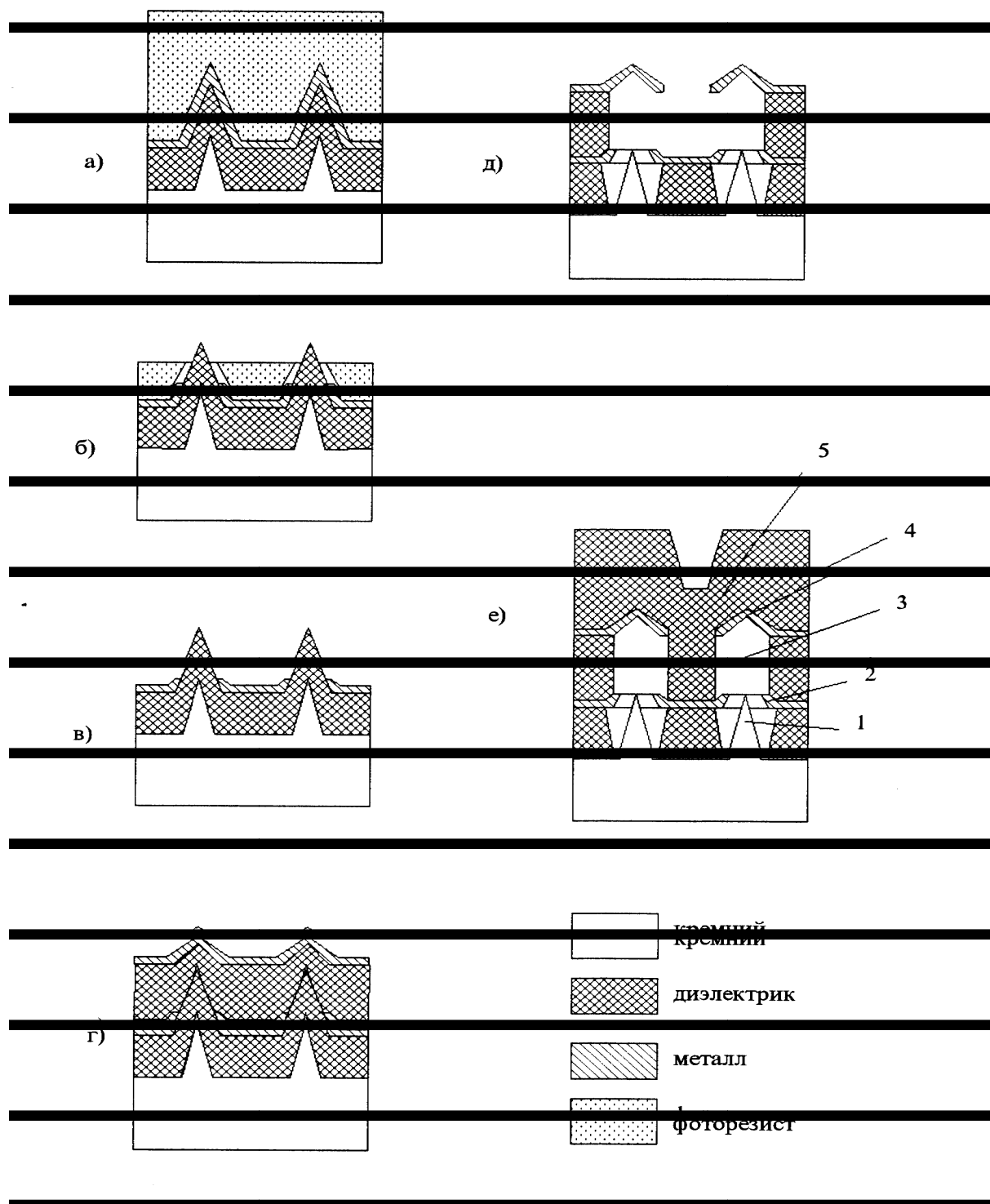


Рис. 43. Изготовление вакуумного микротриода на кремниевой подложке:

а)– нанесение слоя фоторезиста; б)– операция планаризации; в)– травление хрома; г)– нанесение второго диэлектрического и металлического слоев; д)– травление диэлектрических слоев; е)– нанесение герметизирующего слоя.

1– катод; 2– управляющий электрод; 3– вакуумная полость; 4– анод; 5– герметизирующий диэлектрический слой.

Второй вариант изготовления вакуумированного микротриода на полупроводниковой пластине, где вакуумная полость выполнена непосредственно в полупроводнике, показан на рис. 44.

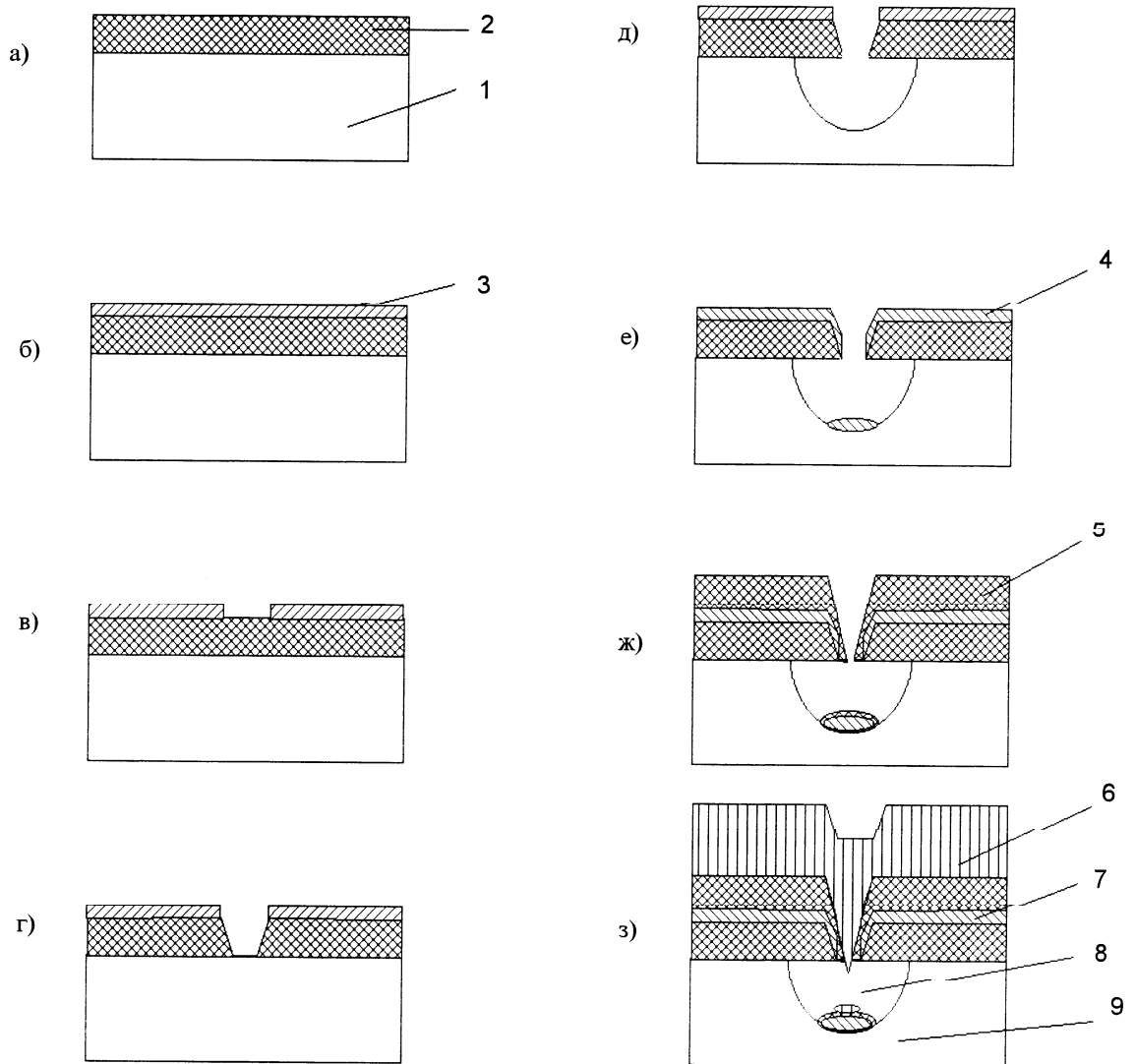


Рис. 44. Технология изготовления вакуумного микротриода:

а)– кремниевая подложка с окислом; б)– нанесение хрома; в)– травление хрома; г)– травление окисла; д)– вытравливание полости в подложке; е)– нанесение слоя управляющего электрода; ж)– нанесение второго диэлектрического слоя; з)– нанесение катодного слоя.

1– подложка; 2– оксидная пленка; 3, 4– металлическая пленка; 5– второй диэлектрический слой; 5– катодный слой; 7– управляющий электрод; 8– вакуумная полость; 9– анод.

На поверхности анода 1 формируют первый диэлектрический слой 2. Затем в нем формируют отверстие с заданным геометрическим профилем, путем нанесения на диэлектрический слой 2 маскирующего покрытия и изготовления из него методами фотолитографии и травления маски 3 с отверстием, травлением через него отверстия с заданным геометрическим профилем в первом диэлектрическом слое 2. Через отверстие в аноде 1 вытравливают вакуумную полость 8, удаляют маску 3 и формируют управляющий электрод 7 с отверстием, путем нанесения слоя металла на поверхность первого диэлектрического слоя 2. После этого на поверхности управляющего электрода 7 формируют второй диэлектрический слой 5. При этом его толщина должна обеспечивать сохранение отверстия в вакуумную полость 8 со стороны второго диэлектрического слоя. Затем формируют автоэмиттер с проводящим контактным слоем путем нанесения проводящего слоя 6 на поверхность второго диэлектрического слоя 5. Нанесение проводящего слоя 6 производится термическим напылением при давлении  $10^{-6}$  мм.рт.ст. до полного зарастания отверстия в управляющем электроде, что и формирует вакуумную микрополость для каждой триодной ячейки. По предлагаемому способу были изготовлены пленочные автокатоды с плотностью эмитирующих элементов  $2,88 \cdot 10^6$  ед./см<sup>2</sup>. Зазор между вершиной эмиттера и кромкой управляющего электрода составлял 0,25–0,27 мкм, это позволило снизить управляющие напряжения без уменьшения автоэмиссионного анодного тока [95]. При решении проблемы геттерирования (сохранения вакуума) в микрообъемах [144] возможно создание вакуумных микротриодов с большим временем жизни.

Данные технологии по применяемым процессам полностью совместимы с технологиями создания твердотельных микроэлектронных устройств, что позволяет выполнять как вакуумные, так и твердотельные микроприборы на одной полупроводниковой подложке. При соответствующей коммутации возможно создания микрочипов, содержащих полупроводниковые и микровакуумные элементы.

### 3.3. Планарные углеродные диодные структуры

Автоэмиссионные матричные структуры большой площади изготавливаются на диэлектрических подложках, например, на полированном стекле. Катодные и анодные шины расположены на одной подложке и изготовлены по тонкопленочной технологии (рис. 45). Тонкопленочная структура формируется на стеклянной подложке 2.

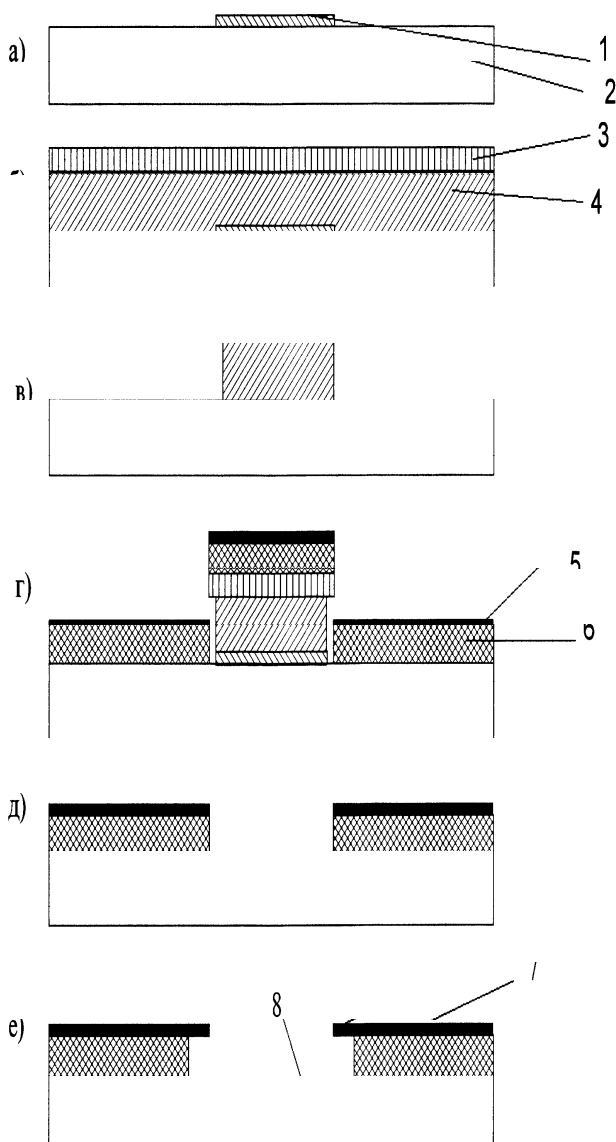


Рис. 45. Технология изготовления планарной диодной автоэмиссионной структуры:

а) – формирование анодного слоя; б) – нанесение двух металлических слоев; в) – создание биметаллического маскирующего покрытия; г) – нанесение диэлектрического и катодного слоев; д) – удаление маски; е) – формирование эмитирующей кромки.

1– анодная шина; 2– диэлектрическая подложка; 3,4 – масочные слои; 5 – слой катодной шины; 6– диэлектрический слой; 7– эмиттер (катод); 8– анод.

Реализация матрицы на стекле методом прямого травления невозможна из-за воздействия травителя диэлектрика на материал подложки. Поэтому «колодец» пикселя создается методом обратной литографии. Вначале создаются анодные шины 1 на которые наносят маскирующий слой, состоящий из слоя меди 4 толщиной 4 мкм и слоя хрома толщиной 0,05 мкм. Методом фотолитографии формируют маску для процесса обратной литографии (фиг. В). На всю поверхность методом вакуумного напыления наносится диэлектрический слой 6 и слой катодной шины 5. После удаления металлической маски формируют катодные шины с эмитирующим выступом 7. Полученная структура представляет собой матрицу пикселей, содержащих планарно-торцевые катоды, где катоды и аноды разделены слоем диэлектрика и расположены на одной подложке [77, 145, 146].

## **Сравнительный анализ острейных и планарно–торцевых автоэлектронных микроприборов**

На базе разработанных и апробированных технологий формирования эмиссионных микроприборов на полупроводниковой подложке (Si) возможно создание электронных пушек, диодов, триодов и тетродов в спектре рабочих напряжений от 25 до  $10^3$  Вольт с плотностью тока порядка единицы миллиампер на квадратный миллиметр. Использование полупроводниковой подложки позволяет применять и низковольтное управление барьером Шоттки. При изготовлении данных вакуумных микроламп используются только групповые микроэлектронные технологические процессы, поэтому можно формировать и вакуумные и твердотельные микроприборы в одних технологических циклах на одной подложке, т.е. открывается возможность создания вакуумно-твердотельных микросхем. Ограничение дрейфа носителей в полупроводнике и влияние на этот процесс различного типа воздействий открывает возможность разработки целого спектра сенсоров, например, оптических датчиков или датчиков ионизирующего излучения.

Лезвийные планарно–торцевые структуры с металлическим катодом изготовленные на диэлектрической подложке не чувствительны к оптическому и даже к жесткому ионизирующему излучению, что значительно расширяет область применения данных приборов. Эмиссионные центры в лезвийных планарно-торцевых приборах имеют одномерное расположение, и следовательно, приборы выполненные по данной технологии уступают двумерному острейному массиву острий по плотности тока. Но при изготовлении планарных приборов не требуется создание трехмерных субмикронных микроструктур, что значительно упрощает технологию их изготовления. Рабочие напряжения прибора легко задаются толщиной диэлектрических слоев и могут варьироваться от 50 до  $10^3$  Вольт. Предложенный способ управления автоэлектронной эмиссией методом оперативного изменения форм–фактора в приборе дает возможность

низковольтного управления эмиссией электронов. Простая технология изготовления и выполнение структур на диэлектрической подложке, например, на полированном стекле, позволяет формировать приборы большой площади, что очень важно при создании различных устройств отображения информации.

## **Перспективы применения вакуумных микроприборов изготовленных с применением групповых микроэлектронных технологий**

Низковольтные вакуумные микроприборы, в основе работы которых лежит явление автоэлектронной (полевой) эмиссии и выполненные с применением только групповых микроэлектронных технологий, представляют собой новый класс микроприборов – это вакуумные лампы в микроэлектронном исполнении. Они сочетают в себе достоинства как ламповой техники, так и полупроводниковой, такие как:

- малые размеры элементов и групповые способы изготовления;
- возможность интеграции и изготовление на одном чипе с твердотельными микроэлектронными приборами;
- безинерционность (широкий частотный диапазон вплоть до  $10^{14}$  Гц);
- широкий диапазон рабочих температур (более  $500$  °С);
- моноэнергетичность эмитированных электронов (полуширина энергетического спектра при  $T=300$  К составляет  $0,2$  эВ);

Решение проблемы стабильности эмиссии во времени заключена в уменьшении ионной бомбардировки в приборе и сохранении эмиссионной способности катода, что в свою очередь зависит от изменения форм-фактора катода и работы выхода. Задача стабилизации форм-фактора в процессе эксплуатации катода решена в данной работе путем защиты каждого эмиссионного центра резистивным элементом, что ограничивает его ток и предотвращает разрушение. Задача сохранения стабильности работы выхода материала катода, в отличие от термокатодов, не может быть решена активацией катода веществом с низкой работой выхода. Это связано с вероятностью адсорбции молекул остаточного газа на поверхность катода и сложностью их десорбции, вследствие отсутствия нагрева катода. Сильное внешнее поле на поверхности катода налагает ограничения и на использование катодных покрытий, отслаивание которых приводит не только к изменению работы выхода и форм-фактора, но и к пробоем в приборе. По всей видимости,

решение этой задачи лежит в использовании катодного материала с высокой работой выхода. В этом случае при адсорбции молекулы газа будет происходить снижение работы выхода в месте нахождения молекулы или иона и молекула будет «унесена» электронным током, т.е. будет происходить самоочищение эмиссионного центра.

Снижая рабочие напряжения вакуумных микроприборов вплоть до порога ионизации газа, уменьшается и вероятность ионизации остаточного газа в приборе. Порог ионизации основных газов, присутствующих в составе воздуха

( $N_2$ -78,03%,  $O_2$ -20,93%,  $CO_2$ -0,03%, инертные газы-1,01%) составляет 20–45 эВ [165]. Локальные прикатодные области, с сильными полями, в микроприборе работающем при десятках вольт, составляют менее 10% от общего вакуумного объема прибора. При работе на высоких частотах проявляется эффект выталкивания ионов из катодной области [29]. Прибор с автоэлектронным катодом не подвергается нагреву, следовательно, не происходит десорбция газа со стенок в вакуумный объем. Все это дает основания утверждать, что низковольтные вакуумные микроприборы потенциально обладают большей стабильностью эмиссии и долговечностью, особенно в области СВЧ. Вероятно, что в случае микроприбора возможно значительно снизить требования и к давлению остаточного газа. При исследовании выше представленных микроприборов, заметного влияния увеличения количества остаточного газа на свечение люминофора в приборе не отмечено вплоть до  $10^3$  мм.рт.ст. Предложенные решения микрокапсул [95, 96] и конструкция плоского геттера [144] еще один шаг в решении проблемы вакуума для микроприбора. Дальнейшее уменьшение зазора катод–анод вполне может позволить заполнить это расстояние тонким диэлектриком туннельной толщины, т.е. толщина диэлектрической пленки должна составлять несколько длин свободных пробегов электрона  $\lambda$  в диэлектрике (для  $Al_2O_3$   $\lambda \approx 10$  А). Полученные низковольтные полностью твердотельные приборы позволят обойти проблему

вакуума, но, очевидно, что это будут только очень низковольтные приборы, т.к. расстояние катод–анод не будет превышать 100 ангстрем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ненакаливаемые катоды. Под ред. М.И.Елинсона. М., «Сов. радио», 1974, 336 с.
2. Иванова А.В., Светликина И.А., Кузнецова О.Ф. Катоды. Часть III. Холодные и боридные катоды. Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ. Вып.14 (1210), 1986.
3. Иванова А.В., Карсова Е.Н., Кузнецова О.Ф. Электронные пушки. Часть II. Электронные пушки для ускорителей. Электронные пушки для электронно-лучевых трубок Применение электронных пушек в промышленности. Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ. Вып.10 (1380), 1988.
4. Светликина И.А., Иванова А.В., Кузнецова О.Ф. Электронные пушки. Часть III. Электронные пушки с острийными катодами. Электронные пушки для приборов М-типа, гиротронов, мазеров. Обзоры по электронной технике. Сер.1. Электроника СВЧ. Вып.19 (1412), 1988.
5. Месяц Г.А. Эктоны в вакуумном разряде: пробой, искра, дуга. - М.:Наука, 2000. -424с.
6. Smullin L.D., Haus H.A., Noise in Electron Devices, MIT Press and Wiley & Sons, New York, 1959.
7. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии. Пер. с англ. -М.: Мир, 1985.
8. Модинос А. Авто-, термо- и вторично-электронная эмиссионная спектроскопия: Пер. с англ. Под ред. Г.Н. Фурсея. - М.: Наука.1990.
9. Brodie I., Studues of Field Emission and Electrical Breakdown between Extended Nickel Surfaces in Vacuum, J. Appl. Phys., 35, 2322-2324, 1964.
10. Fowler R.H., Nordheim L. Electron emission in intense electric fields. - "Proc. Roy. Soc." 1928, v119, № A781, p.173-181.
11. Бете Г., Зоммерфельд А. Электронная теория металлов, пер. с нем., М., ОНТИ НКТП СССР, 1938.

12. Good R.H., Muller E.W. Physik (Ed. by S. Flugge). Field emission.-In Handbuch der Bd. 21, Springer Verl. Berlin, 1956, pp.176-231.
13. Добрецов Л.Н. и Гамаюнова М.В. Эмиссионная электроника, М., “Наука”, 1966г., 564 стр.
14. Моргулис Н.Д. К вопросу об эффекте Шоттки для сложных полупроводниковых катодов. -”ЖЭТФ”, 1946, т.16, N11, стр. 959-964.
15. Stratton R. Field emission from semiconductors. -“Proc. Phys. Soc. (London)”, 1955, v. B68, p.746-757.
16. Stratton R. Theory of field emission from semiconductors. -“Phys. Rev.”, 1962, v.125, № 1, p.67-82.
17. Kingston R.H., Neustadter S.F. Calculation of the space charge, electric field and free carrier concentration at the surface of a semiconductor. - “J. Appl. Phys.”, 1955, v.26, №6, p.718-720.
18. Seiwatz R., Green M. Space charge calculations for semiconductors.-”J. Appl. Phys.”, 1958, v.29, №7, p. 1034-1040.
19. Grove A.S., Deal B.E., Show E.H., Sah C.T. Simple physical model for the space-charge capacitance of metal-oxide-semiconductor structures. - “J. Appl. Phys”, 1964, v.35, №8, p.2458-2460.
20. Фурсей Г.Н., Капланов М.И., Львов О.И. К теории автоэлектронной эмиссии р-типа полупроводников, “Вестник ЛГУ Сер. физики и химии”, 16 (167), 1968.
21. Фишер Р. и Нойман Х. Автоэлектронная эмиссия полупроводников, М., “Наука”, 1971.
22. Baskin L.V., Lvov O.I., Fursey G.N. General features of field emission from semiconductors. - “Phys. Stat. Sol. (b)” 1971, v.47, pp.49-62.
23. Фурсей Г.Н., Иванов Г.В. Автоэлектронная эмиссия кремния, очищенного десорбцией полем, “ФТГ”, т.9,6, 1812,1967.
24. Бункин Ф.В. и Федоров М.В. ЖЭТФ.-1965.-Т.48.-С1341.
25. Баскин Л.М. и Соколовский Д.Г. Тез. докл. 19-ой Всесоюзной конференции по эмиссионной электронике. Ташкент, 1984. - стр. 69.

26. Воронков Р.М., Гасс В.А., Даниличев В.А., Смирнов И.А. ПТЭ. 1974, №4. стр.18.
27. Гасс В.Ф. Вопросы атомной науки и техники. 1962, Вып. 4. стр.29.
28. Zimmer H. Improved stability of field - emission current at microwave frequencies. "Appl. Phys. Letters", 1965, v.7, #11, pp.297-300.
29. Баскин Л.М., Ананьев Л.Л., Борисов А.Д. и др. Эффект устранения ионной бомбардировки автоэлектронного катода. Радиотехника и электроника. 1983. т.28, №12. стр.2462-2464.
30. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Механика. : Наука, 1965.
31. Елинсон М.И. и Горьков В.А. Некоторые особенности работы автоэлектронных катодов в электрических полях СВЧ. «Радиотехника и электроника», 1961, т.6, №2, стр.336-339.
32. Zimmer H. Improved stability of field - emission current at microwave frequencies. "Appl. Phys. Letters", 1965, v.7, #11, pp.298-300.
33. Ананьев Л.Л., Богатский М.М., Борисов А.Д. и др. Методика исследования автоэмиссии в сверхвысокочастотном электрическом поле. ПТЭ. - 1983. - №5. - С. 165-168.
34. Дюжев Н.А., Козлов А.И., Махов В.И., Северовайский В.М. Быстродействие микроэлектронных структур с автоэлектронными катодами. Микроэлектроника. Том 19, вып. 5, 1990г. стр.478-485.
35. Славянский В.В., Солтанов У.Б., Сушков А.Д., Карпов Л.Д. Электронная техника. Сер.4. Электровакуумные и газоразрядные приборы. 1981. Вып. 4. стр.3.
36. Van Oostrom A., Field Emission Cathodes, J. Appl. Phys., 33, 2917-2922, 1962.
37. Dyke W.P., Dolan W.W. Adv. in Electron and Electron Phys., 1956, vol. 210, #1, p.90.
38. Вентова И.Д. Ограничение предельных автоэмиссионных токов одноострийных катодов. Электронная техника. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. Вып. 4 (87), 1981г.

39. Карпенко А.Д. и др. Радиотехника и электроника, 1976, т.21, вып. 1, стр.207
40. Wehney G.K. J. of Vac. Science and Technology. 1985. Sec. A. Vol. 47. #12. p. 5248.
41. Беграмбеков Л.Б., Захаров А.М., Пустобаев А.А. Многоострыйный автоэмиссионный катод. Мощные ф.-э. системы. 1988. стр.41-48.
42. Бесон Ф.М., Троян П.Е. Влияние микрорельефа нижнего электрода на плотность эмиссионных центров МДМ-катода. Радиотехника и электроника. т.37. стр. 1332-1335.
43. Bajic S., Latham R.V. High Voltage Vacuum Insulation, J. Appl. Phys. 21 (1988) pp.200-204.
44. Патент PCT #WO97/06549. Field electron emission materials and devices. 1997.
45. Zhu W. Fundamentals of Vacuum Microelectronics. New York: Wiley & Sons, 2000г.
46. Рахимов А.Т. Автоэмиссионные катоды (холодные эмитеры) на нанокристаллических углеродных и наноалмазных пленках (физика, технология, применение. УФН. Т.170, №9, 2000г.
47. Лаврентович Я.И., Коноплев Ю. М., Зайцев Б.В., Мазалов Ю.П. Массивы металлических острых структур типа кластер-глобула-поверхность. Поверхность. Физика, химия, механика. №9, 1991.
48. Cochran J.K., Lee J.-D., Chapman A.T., Hill D.N. Method of producing low voltage field emission cathode structure. Pat. 4253221 USA, 03.03.1981.
49. Бондаренко Б.В., Черепанов А.Ю., Шахбазов С.Ю. и др. Сильноточный автокатод на основе углеродных волокон. Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ.- 1989. Вып. 10(4040). стр. 45-48.
50. Spindt C.A., Shouldeers K.R. Rescaarch in micronsized field-emission tubes. IEEE 8-th Conf. on Tube Techniques. New York, Sept., 1966.
51. Spindt C.A. A thin-film field -emission cathode. J. of Appl. Phys. 1968. v.39.# 6. p.3504.

52. Spindt C.A., Brodie I., Humphrey L., Westerberg E.R. Physical properties of thin-film field emission cathodes with molybdenum cones. J. of Appl. Phys. 1976. v. 47. #12. pp. 5248-5263.
53. Spindt C.A. Development program on a cold cathode electron gun. NASA Contract #NAS3-20096. Final Report, May, 1979.
54. Европейский патент №048381. опублик. 16.08.1995г.
55. U. S. Patent # 4940916. опублик. 17.10.1990г.
56. U. S. Patent # 5194780. опублик. 16.03.1993г.
57. Mayer R. 4<sup>th</sup> Inter. Vac. Micr. Conf. – Japan, 1991, p.6-9.
58. Kaneko A., Sumita J. 7<sup>th</sup> Inter. Vac. Micr. Conf. – France, 1994, p.80.
59. Патент США № 3998678. 21.12.1976г.
60. Чесноков В.В. Автоэлектронный катод. А.С. СССР №339986, 08.04.1969г.
61. Karpov L.D., Genelev A.P., Dratch V.A. Field emission device with edge emitter and method for making. Patent USA #5818166, 6 oct. 1998.
62. Thomas R.N., Wickstrom R.A., Schroder D.K. and Nathanson H.C. Fabrication and some applications of large-area silicon field emission arrays. Solid State Electronics, 1974, Vol.17. pp.155-163.
63. Oray H.F. All-silicon gridded FEA's. Presented at 1980 Tri-Services Cathode Workshop. New York, April, 1980.
64. Васенков А.А., Дюжев Н.А., Козлов А.И., Махов В.И. Низковольтные кремниевые матричные автоэлектронные катоды. Электронная промышленность. Вып. 8(166). 1987.
65. Махов В.И., Дюжев Н.А., Пинаев И.В. Влияние диэлектрического покрытия туннельной толщины на эмиссионные характеристики автоэлектронного катода. Тез. докл. XIX Всесоюзной конференции по эмиссионной электронике, Ташкент, 1984, секция 4, стр.45.
66. Патент США №3970887. 20.07.1976г.
67. Патент Великобритании №31498232. 18.01.1978г.

68. Захаров А.А., Карпов Л.Д., Лишнев Л.А., Славянский В.В., Салтамов У-Б. С. Способ изготовления автоэлектронного катода с управляющим электродом. А.С. СССР №1132722. 10.01.81г.
69. Huang Z., Mc Gruer N.E., Warner K. 200- nm Gated Field Emitters. IEEE Electron Device Letters, vol. 14 #3, march, 1993.
70. Захаров А.А., Карпов Л.Д., Лишнев Л.А., Пятнышев Е.Н., Солтамов У.Б.- С. Автоэлектронный пленочный триод. А.С. СССР №1414209. 25.11.1985г.
71. Чесноков В.В. Автоэлектронный катод. А.С. СССР №376826, 09.03.1971г.
72. Чесноков В.В. Автоэлектронный катод. А.С. СССР №374677, 03.04.1972г.
73. Винник Н.Д., Петров Е.Н. Матричный автоэлектронный катод. А.С. СССР №3921022. 27.12.83г.
74. Шаховский А.Г., Черепанов А.Ю. Эмиссионные характеристики высоковольтного триода с матричным автокатодом из углеродных волокон. Электронная техника. Сер. 4. Электровакуумные и газоразрядные приборы, МЭП СССР, 1990, вып. 1, стр.68.
75. Feist Wolfgang M. European Patent Application #0501785A1. Priority 01.03.1991.
76. Carey J. D., Forrest R. D., Khan R. U. A., and Silva S. R. P.. Influence of sp<sup>2</sup> clusters on the field emission properties of amorphous carbon thin films // App. Phys. Lett. 77, Issue 13 pp. 2006-2008 (2000).
77. Карпов Л.Д., Драч В.А., Засемков В.С., Миргородский Ю.В. Индикатор изображения. Патент России №2022393, 1994.
78. Zhirnov V.V., Givargizov E.I., Plekhanov P.S. Field emission from silicon spikes diamond coatings. J. Vac.Sci. Technol. B 13(2), Mar/Apr 1995.
79. Kumar N., Schmidt H., Chenggang X. Diamond-based field emission flat panel displays. Solid State Technology, May 1995.
80. Twichell J.C., Geis M.W., Bozler C.O. and et. Diamond field-emission cathodes. Report on the 6<sup>th</sup> Intern. Vacuum Microelectronics Conf., 12-15 July, Newport, RL, 1993.

81. Алимова А.Н., Жирнов В.В., Детков П.Я., Белобров П.И., Kuttel О.М. Эмиссионные свойства ультрадисперсионного алмаза. Труды Межд. Конф. «Алмазы в технике и электронике», М., Полярон, 1998, стр.119-129.
82. Zhu W., Kochanski G. P., Jin S. Low-Field Electron Emission from Undoped Nanostructured Diamond // Science, Vol. 282, pp.1471-1473 (1998).
83. Jin S., Kochanski G. P., Zhu W.. Method of making field emission devices employing ultra-fine diamond particle emitters. US Patent 5709577, Jan. 20 (1998).
84. Jin S., Kochanski G. P., Zhu W.. Field emission devices employing diamond particle emitters. US Patent 5977697, Nov. 2 (1999).
85. Ghis A., Meyer R., Rambaud P., Levy F., Leroux T. Sealed vacuum devices: Fluorescent microtip displays. IEEE Trans. Electron Devices. 1991. 38, #10. pp.2320-2322.
86. Meyer R. European Patent Application #0461990 A1. Priority 13.06.1990.
87. Европейский патент №0503638. Оpubл.19.06.1996г.
88. U. S. Patent #5075591. Оpubл.24.12.1991г.
89. Levine J.D. 8<sup>th</sup> Inter. Vac. Micr.Conf. – USA. 1995. p.67.
90. Itoh S. 8<sup>th</sup> Inter. Vac. Micr.Conf. – USA. 1995. p.99.
91. Драч В.А., Засемков В.С., Карпов Л.Д., Петров Е.Н. Вакуумный микротриод. Патент России №2075130. 1997.
92. Karpov L.D., Genelev A.P., Drach V.A., Zasemkov V.S. Fabrication of Gated Field Emitter Arrays with Self-Lateral Resistors.. Papers the 10-IVMC, 1997.
93. Карпов Л.Д. Способ изготовления прибора с пленочным автокатодом. А.С. СССР №1360484. 20.02.86г.
94. Карпов Л.Д., Королев В.Л., Ивченко С.В. Способ изготовления пленочного автоэлектронного триода. А.С. СССР №1405613. 27.11.86г.
95. Карпов Л.Д., Будзиаловский В.В., Драч В.А., Засемков В.С., Ивченко С.В. Способ изготовления триода с пленочным автоэмиттером. Авторское свидетельство СССР №1473595, 1987.

96. Карпов Л.Д., Будзиаловский В.В., Драч В.А., Засемков В.С. и Ивченко С.В. Способ изготовления пленочного триода с автокатодом. Авторское свидетельство СССР № 1552913, 1987.
97. Карпов Л.Д., Турчанинов Г.С. и Засемков В.С. Автоэлектронный катод. Авторское свидетельство СССР №1556426, 1988.
98. Genelev A.P., Levitsky A.A., Zasemkov V.S., Field Emission Structure with Shottky-Barrier Electrode. - опубликовано в сборнике тезисов (Book of Abstracts of MRS Spring Meeting (MRS'2000), 2000, San Francisco, USA, p.286).
99. Будзиаловский В.В., Засемков В.С., Ивченко С.В., Новик И.А. Катодный узел. Патент России №2083019, 1993.
100. Новик И.А., Будзиаловский В.В., Ивченко С.В., Засемков В.С., Драч В.А. Катодный узел. Патент России №2073281, 1994.
101. Патент США №4212935.
102. IBM J. Res. Develop., 1980.v.24, №2, pp.195-205.
103. Solid State Technol., 1982, v.25, №5, pp. 456-464.
104. IEEE J. Electron. Eng., 1976, v.116, № 1, pp.53-57.
105. Сушкевич Т.В., Макаренко Л.Г. Применение фоторезиста ФП-РН-27В в технологий изготовления БИС // Техника средств связи. Сер. "Технология производства и оборудования". - 1984. Вып.1, стр. 60-65.
106. Плазменная технология в производстве СБИС: Пер. с англ. с сокращ. / Под ред. Н.Айнспрука, Д.Брауна. - М.: Мир, 1987, стр. 271.
107. Ida M., Mirutani T., Asai K., Uchida H., Shimada L., Ishida S. Fabrication technology for an 80-ps normally - off GaAs MESFET logic. - IEEE Jtrans., 1981, v.ED -28, #5, pp. 489-493.
108. Карпов Л.Д., Будзиаловский В.В., Драч В.А., Засемков В.С. Формирование фоторезистивной маски с субмикронным разрешением методом термообработки // Тезисы докладов 1 Всесоюзной конференции до физическим основам твердотельной электроники. -Ленинград, 1989. стр. 204.

109. Засемков В.С., Карпов Л.Д., Симачев В.Н. Влияние термообработки на геометрические размеры рисунка фоторезистивных маскирующих покрытий. Меж. вуз. сб. "Микроэлектронные устройства. Проектирование и технология", 1990, стр.71-73.
110. Драч В.А., Карпов Л.Д. Разработка технологии изготовления активных элементов БИС СВЧ // Тезисы Всесоюзной научно-технической конференции "Интегральная электроника СВЧ", Красноярск, 1988, стр. 30-35.
111. Драч В.А., Засемков В.С., Карпов Л.Д., Генелев А.П., Миргородский Ю.В. Активные элементы вакуумных интегральных схем. Материалы научно-технической конференции с международным участием. Красноярск, КГТУ, 22-25 марта, 1994г.
112. Melliar-Smith C.M., end et. Plasma - Assisted Etching Techniques for Pattern Delineation, Thin Film Processes, Academic, New York, 1979.
113. Irving S.M., A Plasma Oxidation Process for Removing Photoresist Films, Solid State Technol., 14, 1971.
114. Irving S.M., Lemons K. E., Boris G. E., Gas Plasma Vapor Etching Process, U.S. Patent #3615956.
115. Технология СБИС. Под редакцией Зи. М.:Мир, 1986, стр.23.
116. Coburn J. W., Winters H. F., Plasma Etching - A Discussion of Mechanisms, j. Vac. Sci. Technol., 16, 391 (1979).
117. Flamm D. L., Donnelly V.M., The Design of Plasma Etchants, Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1, 317, 1981.
118. Schwartz G. C., Schaible P.M., Reactive Ion Etching of Silicon, j. Vac. Sci. Technol., 16, 410, 1979.
119. Mogab C.J., The Loading Effect in Plasma Etching, J. Electrochem. Soc., 124, 1262 (1977).
120. Mogab C.J., Levinstein H.J., Anisotropic Plasma Etching of Polycrystalline Silicon, J. E. Sci. Technol., 17, 721, 1980.

121. Reichelderfer R. F., Single Wafer Plasma Etching, Solid State Technol., 25, 160 (1982).
122. Hosoya Tetsio, Ozaki Yoshiharu, Hirata Kazuo. Effect of wet cleaning on Si Contaminated with Reavy metals during reactive ion etching. "J. Electrochem. Soc." 1985, 132, #10, 2436-2439.
123. Zasemkov V.S., Making of vacuum active elements on the based of silicon emitter arrays, Techn. Digest 40th Int. Field Emission Symposium, Nagoya, Japan, 2-7 August, 1993.
124. Генелев А.П., Драч В.А., Засемков В.С., Комаров Р.Н., Левицкий А.А. Изготовление субмикронных полупроводниковых структур». Материалы Второй Всероссийской научно-практической конференции "Достижения науки и техники - развитию сибирских регионов", часть 3, Красноярск, 16-18 марта, 2000, стр. 133-134.
125. Solid State Technology, 1984, v. 27, № 5 pp. 155-161.
126. Патент США № 4520041.
127. Патент США №4377438.
128. Заявка Великобритании № 2119166.
129. Symp. VLSI Technol., San Diego, Sept., 1984, Tokio, 1984, pp. 20-23.
130. Патент США №4451326.
131. TESLA electron., 1985,v. 18, № 2, pp.57-59.
132. Патент США № 4594769.
133. Заявка Японии № 59-104142.
134. Заявка Японии № 60-192337.
135. Заявка Японии № 59-205721.
136. Заявка Японии № 59-152647.
137. Заявка Японии № 59-195845.
138. J. Electrochem. Soc., 1979, v. 126, № 9, pp. 1531-1533.
139. Заявка Японии № 59-50543.
140. Nat. Techn. Rept., 1986, v. 32, № 1, pp. 144-149.
141. Заявка Японии № 59-69950.

142. Засемков В.С. и Карпов Л.Д., Способ изготовления автоэлектронного катода с управляющим электродом, А.С. 1493000 (СССР), 25.12.86.
143. Карпов Л.Д., Будзиаловский В.В., Драч В.А. и Засемков В.С., Способ изготовления автоэлектронного катода с управляющим электродом. А.С. 1720426 (СССР), 5 января 1990.
144. Будзиаловский В.В., Новик И.А., Ивченко С.И., Засемков В.С. Катодлюминесцентная индикаторная панель. Патент РФ №2069411, 20 ноября 1996.
145. Karpov L.D., Dratch V.A., Zasemkov V.S., Genelyov A.P., Mirgorodsky Y.V., Tihonsky A.N. and Proskurnin S.B. Futher development of monolithic Field Emission Displays for improvement of basic characteristics. 7th Vacuum Microel. Conf. France, 1994.
146. Засемков В.С., Егоров Н.М. Особенности построения вакуумных микроэлектронных приборов с автоэлектронными катодами. Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч.трудов. Под ред. Сарафанова А.В. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2000, стр. 283-290.