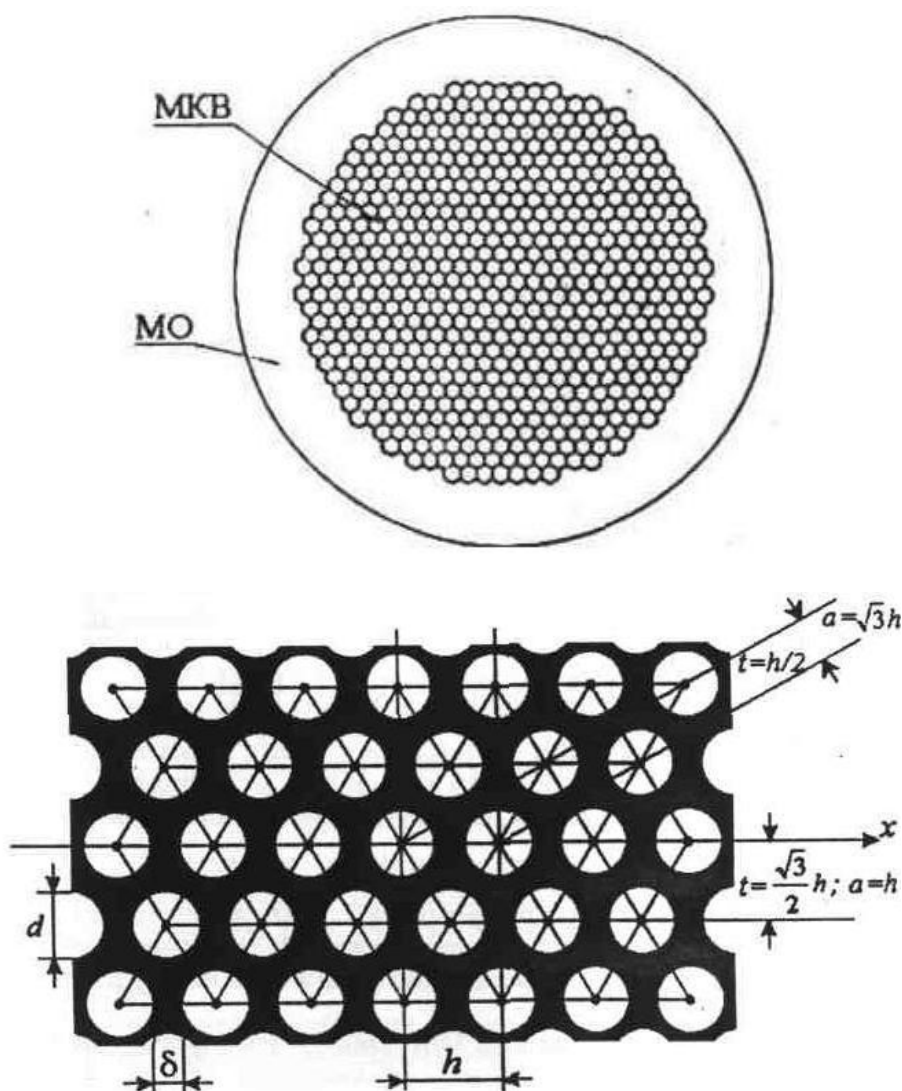


Конструкция и принцип действия МКП



Микроканальная пластина с монолитным обрамлением

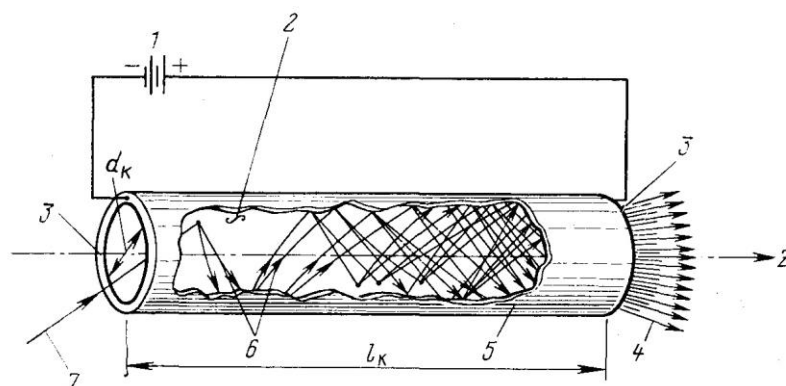
h – шаг структуры каналов, d – диаметр канала, δ – толщина стенки между каналами, t – расстояние между рядами, a – густота

Микроканальная пластина – это тонкая (0,2-2,0 мм) пластина из свинцового стекла с большим числом параллельных каналов. Каналы могут располагаться либо перпендикулярно поверхности пластины, либо под небольшим углом к ней (3-8°). Разброс диаметров каналов не превышает 1-2 %.

При шестигранной укладке каналов в МКП их число определяется по формуле:

$$N_k = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{D_{МКП}}{h_k} \right)^2,$$

где N_k – число каналов МКП; $D_{МКП}$ – диаметр МКП; h_k – расстояние между центрами каналов.



1 – источник питания, 2 – резистивный вторично-эмиссионный слой, 3 – металлизированный торец канала, 4 – вылетающие из канала электроны, 5 – стеклянная трубка, 6 – траектории электронов внутри канала, 7 – влетающий в канал электрон, z – ось координат, d_k – диаметр канала, l_k – длина канала

Движение электронов в прямом канале МКП

МКП используется в ЭОП 2-3 поколения, фотоэлектронных умножителях, для сверхскоростной фотографии, различных позиционно-чувствительных детекторах и т.д.

Таблица– Эффективность регистрации МКП различных излучений и частиц

Тип частицы или излучения	Энергия, КэВ	Эффективность регистрации, %
Электрон	0,2 - 2	50 - 85
	2 - 50	10 - 60
H^+ , He^+ , Ar^+	0,5 - 2	5 - 85
	2 - 50	60 - 85
	50 - 200	4 - 60
Ультрафиолетовое	0,008 - 0,011	1 - 5
	0,011 - 0,415	5 - 15
Мягкое рентгеновское	1 - 6	5 - 15
Жёсткое рентгеновское	60 - 100	1

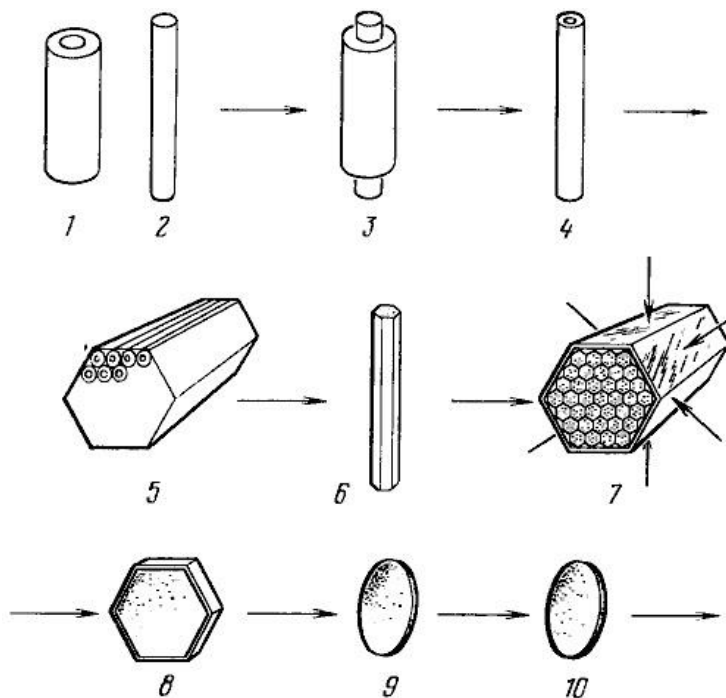
Технология изготовления МКП

Трубки из свинцово-силикатного стекла (С 87-2) и цилиндр из боратно-бариевого стекла (С 78-5) подгоняются по сопряженным диаметрам. Они собираются в двуслойный стержень и перетягиваются (1:50) в одножильные световоды-стержни (ОЖС) одинаковые по диаметру (0.5-0.6 мм).

Далее эти стержни укладываются в шестигранник (длина 1 м, размер по апофеме 35-45 мм). Он нагревается (630-650 С) и перетягивается (1:50) в многожильный световод-стержень (МЖС), при этом диаметр внутренней жилы доводится до требуемого диаметра канала (апофема (перпендикуляр из центра многоугольника на любую из его сторон) – 0.7-0.8 мм).

Сборка блока МСЖ в виде 12-гранника, длиной 3-10 см. Диаметр описанной окружности 20 -30 -45 мм (для типовых МКП) . Установка в трубку для монолитного обрамления (С 78-4). Спекание (579-600 С) с приложением внешнего давления.

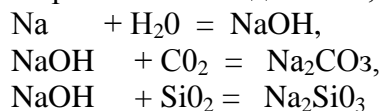
Микроканальный блок (МКБ) нарезается под нужным углом на отдельные пластины, которые округляются, шлифуются до нужной толщины и полируются.



1 – трубка из свинцово-силикатного стекла, 2 – цилиндр из боратно-бариевого стекла, 3 – двуслойный стержень, 4 – перетянутый одножильный световод (ОЖС), 5 – шестигранник из большого числа ОЖС, 6 – перетянутый многожильный световод (МЖС), 7 – спечённый блок из большого числа МЖС, нарезанные пластины, 8 – нарезанные пластины, 9 – округлённые полированные пластины, 10 – пластины с вытравленными каналами

Процесс термоводородного восстановления.

Продиффундировавшие при восстановлении к поверхности ионы Na, K, Ba, Ca вступают в химические связи с кремнием, водородом, водой, кислородом и другими примесями газа в реакторе, с образованием различных соединений, например:



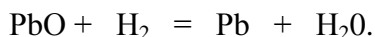
Образуемые соединения при восстановлении могут разлагаться, частично испаряться и удаляться. Кроме того, еще до образования химических соединений металлы могут испаряться с поверхности. При термоводородном восстановлении есть возможность образования инородных соединений, многие из них летучи и могут переноситься с последующей конденсацией и в свою очередь влиять на эмиссионные свойства поверхности.

Термоводородное восстановление осуществляется в реакторе с проточной газовой фазой.

Диапазон рабочих температур процесса восстановления микроканальных пластин лежит в интервале от 420°C до 500°C. Его основные этапы:

- подвод водорода к поверхности,
- адсорбция (поглощение объемом) водорода,
- диффузия водорода вглубь,
- химическое взаимодействие со стеклом (в том числе восстановление),
- диффузия и коагуляция восстановленных **атомов свинца**,
- диффузия группы OH⁻ к поверхности,
- выход продуктов реакции восстановления (OH⁻ и Pb) на поверхность,
- поверхностные химические реакции и повторная диффузия,
- десорбция продуктов в газовую фазу.

При температуре около 400 °C для адсорбции требуется диссоциация молекул водорода на ионы H, которые могут диффундировать на всю глубину стенки. Упрощенно можно говорить, что идет реакция:



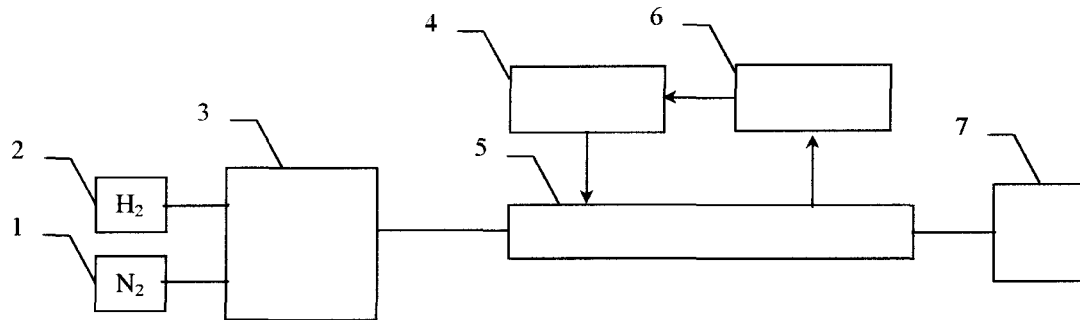
Атомы водорода прочно садятся на поверхность, образуя химические связи, возникает градиент концентрации водорода в стекле, под влиянием чего протекает диффузия водорода вглубь стекла. В диапазоне рабочих температур водород легко диффундирует в стекло, происходит **гидратация** стекла, с одновременным образованием свободных атомов свинца.

Гидратация – присоединение молекулы воды к атомам или ионам. Содержание воды в стекле составляет 0.2% по массе. Насыщение по содержанию воды наступает при концентрации 3.5%

Свинец диффундирует случайно. Атомы свинца, сталкиваясь, образуют дуплеты, триплеты, элементарные группировки, которые могут расти и распадаться. При этом с их ростом падает их подвижность, можно говорить, что образуются неподвижные элементарные зародыши, новой дисперсной фазы. Структура этой фазы, то есть размеры зародышей и расстояния между ними зависят от температуры восстановления. При высоких температурах зародышей мало, размер их большой и расстояния между ними велики. При низких температурах зародышей много, размер их меньше и расстояния между ними невелики. Поскольку размер зародышей и расстояния между ними влияют на сопротивление, то структура, полученная при низких температурах, будет иметь большую проводимость. Начальная структура далее качественно не меняется, а происходит увеличение размера зародышей, вследствие чего уменьшается расстояние между ними. По мере нарастания гидратации становится все более заметным процесс отрыва групп OH⁻, которые диффундируют на поверхность, где объединяются в воду, увлажняют водород и участвуют в поверхностных химических реакциях.

Скорость диффузии воды на несколько порядков меньше скорости диффузии водорода, если воду не отводить из стекла, то процесс восстановления стекла останавливается.

Установка восстановления МКП



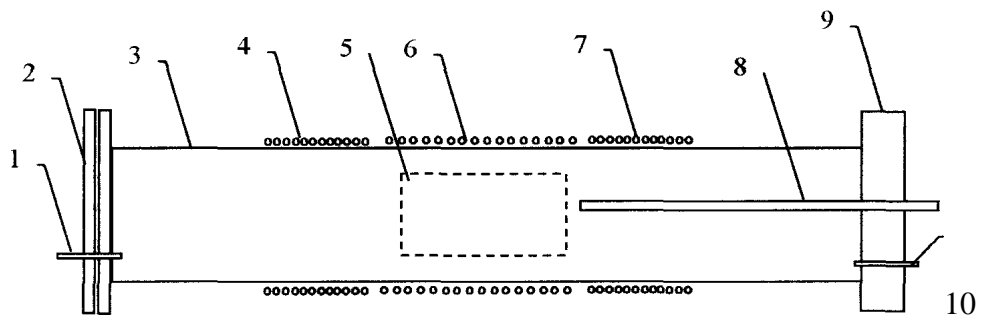
1 - источник азота;
3 - система подачи и осушки газов;
5 - водородная печь;
7 - система утилизации газов.

2 - источник водорода;
4 - схема управления печью;
6 - схема контроля температуры;

Блок-схема установки восстановления МКП

Источником азота 1 является азотная магистраль цеха, водород поступает из баллона высокого давления 2. Система осушки газов 3 представляет собой вымораживатель (металлический стакан охлаждаемый жидким азотом). Расход газов управляется ротаметрами. В системе утилизации газов 7 используется раскаленная спираль на которую подается водород с выхода печи.

Конструкция реактора печи восстановления



1 - штуцер для подачи газов; 2 - передний фланец 3 - кварцевая трубка; 4 - передний нагреватель; 5 - рабочая зона; 6 - центральный нагреватель; 7 - задний нагреватель; 8- кварцевый палец для термопар; 9 - задний фланец; 10 - штуцер для отвода газов

Установка металлизации МКП

Для нанесения электроконтактного покрытия на микроканальные пластины используется установка напыления.

Установка напыления представляет собой вакуумную камеру с вакуумной системой из форвакуумного насоса НВР-5ДМ и турбомолекулярного насоса типа 01АБ-450-003. Для исключения попадания масла из форвакуумного насоса используется азотная ловушка. Давление в камере не хуже $1 \cdot 10^{-3}$ Па.

Для напыления электроконтактных покрытий МКП в установке используется кольцевой магнетрон. В рабочую камеру подаётся аргон до давления 0,2-0,6 Па. Отрицательное напряжение на катоде магнетрона - 300-400 В.

Предусмотрена финишная ионная очистка МКП перед напылением. Ионный источник обеспечивает регулируемую энергию ионов 200-800 В. Рабочий газ - аргон.

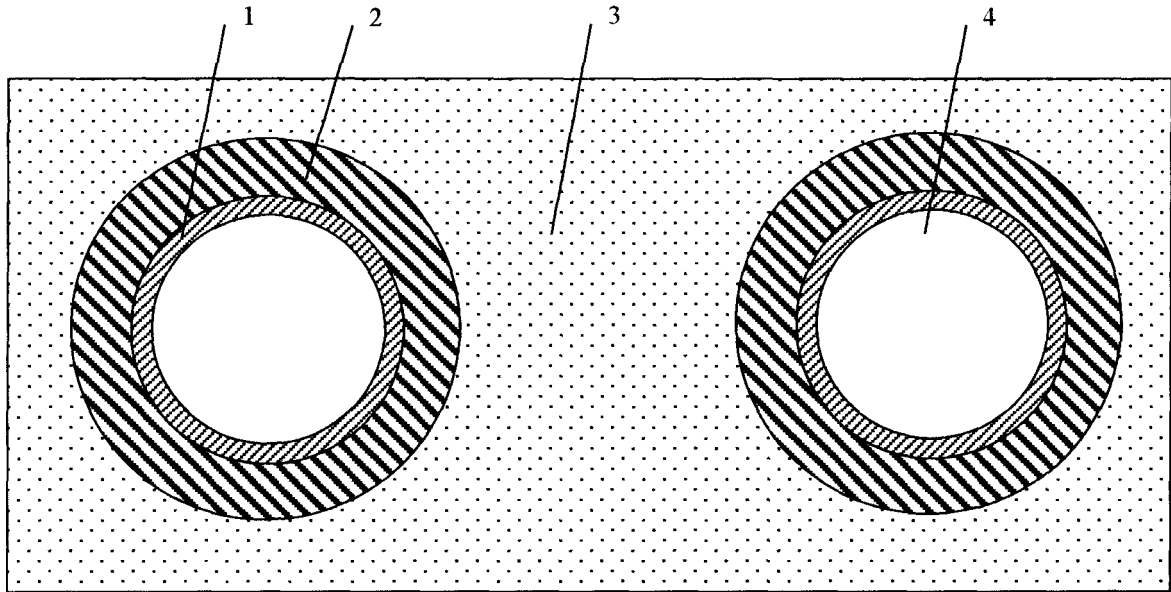
Для обеспечения равномерности покрытия рабочая камера оснащена закреплённым на подшипнике, поворотным столом, на котором в специальной оправке устанавливаются МКП. Поворотный стол приводится во вращение электродвигателем.

Характеристики покрытия:

- материал – хром, нихром;
- толщина пленки ~ 0.1 мкм;
- глубина запыления каналов на входе пластины 0.5 – 2 диаметра канала, глубина запыления каналов на выходе пластины составляет 1 - 4 диаметра канала.

Разброс параметров контактного покрытия не более 5 %.

Структура резистивно-эмиссионного слоя.



1.- эмиссионный слой, 2. - резистивный слой, 3. -стекло, 4. - канал.

Поверхность канала практически покрыта слоем SiO_2 (1) - эмиссионный слой (50 - 100 Å); под ним уже находится проводящая зона 2, содержащая свинец - резистивный слой (1000 - 2000 Å), под которым, в свою очередь, находится третий слой 3, состоящий главным образом из стекла матрицы (1,5 - 2 мкм).

Требования предъявляются к резистивно-эмиссионному слою:

- 1) величина эмиссионного слоя ~ 50 - 100 Å;
- 2) компактность, совершенство структуры, гладкость, отсутствие пористости, отсутствие примесей в слое SiO_2 ;
- 3) отсутствие субмикронных посторонних частиц на поверхности, а так же отсутствие инородных химических загрязнений;

После химической обработки микроканальных пластин на поверхности имеется слой $\text{SiO}_2 \times \text{H}_2\text{O}$ (фактически силикогель), химически вода связана и уходит только при прогреве пластины (считается, что полностью уходит вода при прогреве до температуры порядка 500 °C) оставляя пустоты (каналы) ~ 2,5 Å (размер молекулы воды). Эти каналы вследствие термообработки, и соответственно усадки материала, могут быть развиты в большей или меньшей степени, в зависимости от режима обработки. Так например, чем ниже температура отжига, тем выше пористость и больше остается воды.

Термическое обезгаживание

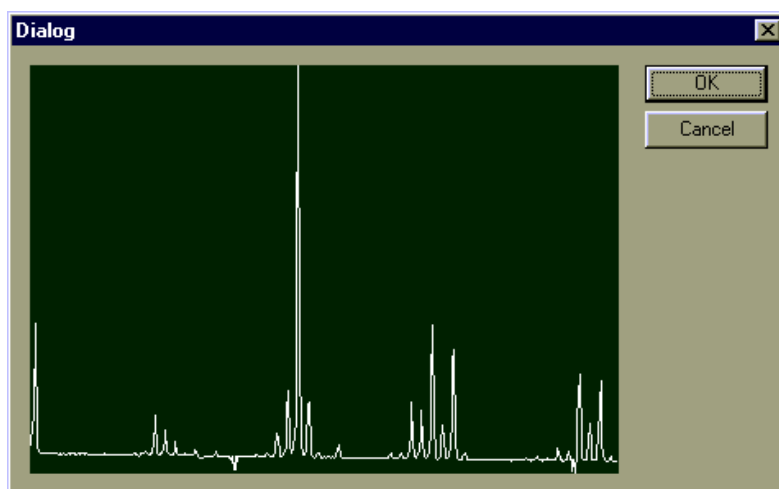
Термическое обезгаживание – это процесс удаления с поверхности и из объёма МКП остаточных газов, воды и щелочных металлов, возникших на этапе изготовления МКП, посредством нагрева в вакууме или на атмосфере.

Время выдержки деталей при рабочей температуре устанавливают опытным путем на основе изучения газоотделения металлов при различных температурах и давлениях.

Рабочее давление в объемах установок вакуумного отжига составляет менее 10^{-5} Па.

В поверхностном слое стекла может быть сорбировано количество газа, эквивалентное более чем 50 мономолекулярным слоям. В состав этого газа входит преимущественно вода и лишь небольшое количество CO_2 и N_2 .

Однако не только в приповерхностном слое, но и во всем объеме стекла содержится большое количество газа. Обнаружено, что в результате химических реакций в стекле растворяются пары H_2O , CO_2 , O_2 и CO , причем эти газы попадают в стекло в процессе его изготовления, когда оно находится в расплавленном состоянии.



В результате прогрева стекла в вакууме при температуре порядка $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ большая часть поверхностно сорбированных газов выделяется в течение первых 2 — 3 мин. При температуре выше $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит постепенное «высушивание» приповерхностного слоя, при котором стекло как бы реставрируется: связи типа $Si-OH-HO-Si$ переходят в основные связи типа $Si-O-Si$, освобождая при этом воду. При температурах выше $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ стекло снова длительно выделяет большое количество газов, опять преимущественно паров воды.

Задача удаления газов, растворенных в объеме стекла, практически не осуществима. Она не должна возлагаться ни на предварительную обработку стекла, ни на процессы обезгаживания его при откачке, так как потребовала бы для этой цели многие сотни часов.

Характер изменения усиления и сопротивления МКП в процессе термообработки зависит от того, ведётся ли обезгаживание на атмосфере, либо данный процесс проходит в вакууме. Обычно при проведении термического обезгаживания в вакууме сопротивление МКП только увеличивается. Причём кратность увеличения сопротивления может быть различной: от 20 — 30 % до 2 — 4 раз. Коэффициент усиления может как увеличиваться, так и уменьшаться. Неоднозначность в динамике изменения усиления и сопротивления зависит от режима (температура, уровень вакуума и время) вакуумно — термического обезгаживания и от технологической предыстории МКП (как на этапе изготовления так и на этапе ранних обработок пластины).

Термическое обезгаживание в различных газовых средах

Важным фактором при обезгаживании МКП является, состав остаточной атмосферы в камере СВВУ. Для того чтобы стимулировать и управлять многими процессами в каналах

МКП при обезгаживании можно специально создавать газовую среду с избыточной концентрацией нужного нам газа (в нашем случае – это водород или кислород). Результат, полученный в итоге при использовании разных газов, получается разный. Так, например, при использовании водородного отжига в объёме детали может происходить накопление водорода. Этот водород действует как восстановитель для поверхностных окислов.

Однако восстановление водородом не всегда позволяет удалить с поверхности окислы. Препятствуют этому, имеющиеся на поверхности молекулы воды. Вода за счет большого размера своих молекул диффундирует через слой окисла с низкой скоростью, что тормозит реакцию. Возникает механическое напряжение в окисле, в результате того, что из глубины слоя на него давят водяные пары. Это способствует его разрыхлению. Выход воды на поверхность облегчается, но при этом увеличиваются потери водорода, который рекомбинирует в порах оксидной пленки и выходит по порам с большой скоростью, не реагируя с окислами. В ряде экспериментов наблюдается падение коэффициента усиления 25 %, падение сопротивления составляет от 20 до 25%. Глубина проникновения водорода соответствует 0.2-0.5 мкм.

Иначе обстоит дело при рассмотрении процессов термического обезгаживания в атмосфере кислорода. При нагреве МКП в вакууме в окислительной среде сопротивление может несколько увеличиваться. Причиной этому, при некоторых допущениях, является испарение части свинца, в пределах РЭС, так же дополнительное окисление части свинца.

Нагрев на атмосфере приводит к доокислению кремнезёма. При этом значение коэффициента вторичной эмиссии несколько увеличивается. Однако при этом возрастает сопротивление кремнезёмного эмиссионного слоя. Вакуумный нагрев в окислительной среде обычно проводится при температурах 300 – 400 °С увеличивает усиление МКП.

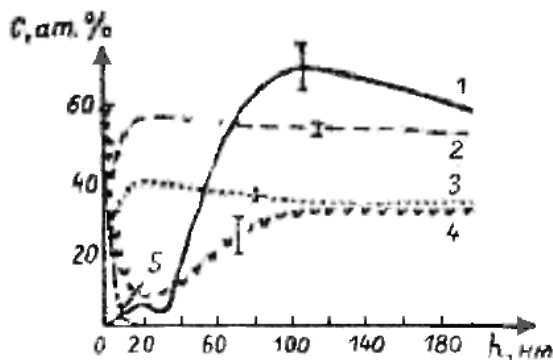
Избыток кислорода в камере СВВУ приводит к окислению поверхностного слоя МКП (кремнезём – богатого слоя), что увеличивает значение коэффициента вторичной эмиссии, и как следствие увеличение усиления МКП. Объяснить такое поведение параметров МКП можно, если предположить, что взаимодействие кислорода с эмиссионным слоем канала МКП носит поверхностный характер. Это предположение можно считать верным, если принять концентрацию кислорода на поверхности очень большую, а в глубине слоя очень малую с учётом коэффициента диффузии кислорода (при температуре $T=380^{\circ}\text{C}$ он составляет $6,3 \cdot 10^{-28} \text{ м}^2/\text{с}$). В то время как толщина эмиссионного слоя составляет порядка 0,01 мкм.

Электронная тренировка

Финишным этапом обработки МКП является электронная тренировка, основная задача которой – дополнительное обезгаживание и стабилизация усиления.

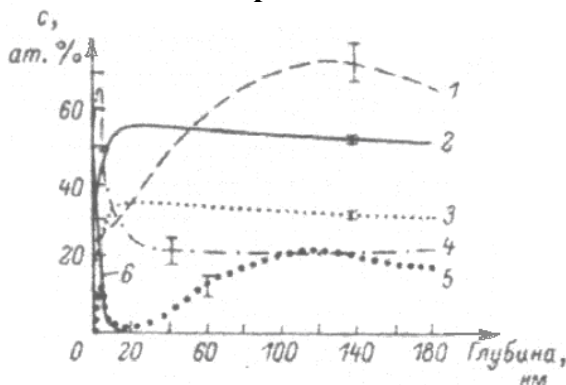
В течение обработки наблюдается изменение усиления, причем на начальном этапе усиление возрастает, а затем падает и стабилизируется. Такие изменения могут объясняться изменением сопротивления РЭС и изменением КВЭЭ, которые в свою очередь во многом зависят от химического состава стекла.

В результате облучения поверхности электронами происходит перераспределение концентрации некоторых элементов.



1 – свинец ($\times 10$), 2 – кислород, 3 – кремний, 4 – калий ($\times 10$), 5 – углерод ($\times 10$); ($\times 10$) – масштаб увеличен в 10 раз.

Профиль концентрации элементов в поверхностном слое ВССС на глубине h



1 – барий ($\times 10$), 2 – кислород, 3 – кремний, 4 – калий ($\times 10$), 5 – свинец ($\times 10$), 6 – углерод; ($\times 10$) – масштаб увеличен в 10 раз.

Профиль концентрации элементов, содержащихся в стекле

Таким образом, в результате электронной бомбардировки наблюдаются:

- а) существенные изменения в концентрации происходят на глубине порядка 100...140 нм;
- б) на поверхности наблюдается избыток щелочных металлов, которые оказывают влияние на эмиссионные свойства канала, например, натрия и калия, концентрация калия меняется на 40...50 ат. % на глубине канала ~20 нм;
- в) свинец в чистом виде на поверхности не регистрируется, а находится в объеме, на глубине ~100 нм присутствует около 70 % чистого свинца;
- г) наблюдается дефицит кислорода и кремния на поверхности на глубине ~20 нм.

Диффузия при электронной тренировке

Под действием электронного потока на поверхности канала МКП происходит разрушение окислов щелочных металлов, в результате часть элементов десорбируют в вакуум. Поверхность очищается и обедняется удаленными элементами. Однако поверхность связана с объемом тела, поэтому обедненная поверхность восстанавливается за счет объемной диффузии.

Диффузия связана с градиентом концентрации частиц и описывается двумя законами Фика, которые в одномерном случае имеют вид:

$$g = -D \, dc/dx, \quad dc/dt = D \, d^2c/dx^2,$$

где $g(t)$ – удельный диффузионный поток; D – коэффициент диффузии; $c(x,t)$ – распределение концентрации.

Задача диффузионного газоотделения из находящейся в вакууме пластины рассматривает поток диффузионного газоотделения из находящейся в вакууме пластины площадью 1 см^2 и толщиной $\delta = 2h$ при температуре T . Этот случай моделирует диффузию из стенки между каналами МКП.

Для нахождения распределения концентрации $c(x,t)$ в стенке необходимо решить второе уравнение Фика со следующими начальными и граничными условиями:

1) $t = 0, c = c_0$ (начальная концентрация), $x = 0 - \delta$;

2) $t > 0, c = 0$ при $x = 0$ и $x = \delta$ (выходящие на поверхность частицы немедленно десорбируют в вакуум).

Распределение концентрации в стенке имеет вид:

$$c(x,t) = c_0 \cdot 4/\pi \cdot \{ \sin \pi x / 2h \cdot \exp(-\pi^2 \tau / 4) + 1/3 \cdot \sin 3\pi x / 2h \cdot \exp(-\pi^2 9\tau / 4) + \dots \},$$

где $\tau = D \cdot t / h^2$ – безразмерный параметр, зависящий от времени и коэффициента диффузии (т.е. температуры); h – толщина стенки канала, м.

Поток диффузии из объема МКП в общем случае равен:

$$g_x = 2D \cdot \frac{dc}{dx}, \text{ м} \cdot \text{Па} / \text{с}.$$

Для начального периода обезгаживания параметр $\tau < 0,1$ поток диффузионного газоотделения равен:

$$g_\Gamma = 2c_0(D/\pi\tau)^{1/2}.$$

Количество удаленного газа за время t :

$$Q_{\text{выд}}(t) = \int g(t) dt = 4c_0(Dt/\pi)^{1/2}.$$

Степень обезгаживания или доля удаленного за время t газа:

$$\gamma(t) = 2(\tau/\pi)^{1/2}.$$

Коэффициенты диффузии

Газ	D, м ² /с (при T=20°C)	D, м ² /с (при T=200°C)
H ₂	$2,2 \cdot 10^{-18}$	$6,3 \cdot 10^{-16}$
N ₂	$1,5 \cdot 10^{-33}$	$8,3 \cdot 10^{-23}$
O ₂	$5 \cdot 10^{-32}$	$2,4 \cdot 10^{-22}$
Na	10^{-19}	-
H ₂ O	$3,3 \cdot 10^{-32}$	$1,7 \cdot 10^{-22}$

При $\tau \geq 0$, решение имеет вид:

$$g_r = 4c_0 D / h \cdot \exp(-\pi^2 \tau / 4),$$

$$Q_{\text{выд}}(t) = 2c_0 h \cdot \gamma(t),$$

$$\gamma(t) = 1 - 8 / \pi^2 \cdot \exp(-\pi^2 \tau / 4).$$

Результаты расчета потока диффузии и других вспомогательных параметров для воды при электронной тренировке в течение 10 часов при комнатной температуре (T=25 °C) приведены в таблице.

Результаты расчета потока диффузии для H₂O при T=25 и 100 °C и t=10 ч.

Газ	C ₀ , 1/м ³	τ	g _r , 1/м ² с, при T=25 °C	g _r , 1/м ² с, при T=100 °C
H ₂ O	$2 \cdot 10^{28}$	10^{-14}	$2 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{15}$

Электронно-стимулированная десорбция

Явление электронно-стимулированной десорбции – это десорбция с поверхности тела атомных частиц под действием электронной бомбардировки. При этом с поверхности десорбируют: молекулы, атомы, положительные и отрицательные ионы и пр.

Основной характеристикой электронной десорбции является **эффективность (ε)**, которая определяется как **отношение количества десорбированных частиц к числу падающих электронов**. Она зависит от рода бомбардируемого вещества и энергии электронов.

Эффективность электронной десорбции вначале растет с увеличением энергии электронов, достигает максимального значения при энергии 300...600 эВ, а затем медленно уменьшается. Значение эффективности при электронной бомбардировки поверхности канала МКП определено не однозначно и имеет широкий диапазон значений на уровне $10^{-1} \dots 10^{-5}$. По одним данным для водорода ε примерно равна $5 \cdot 10^{-4}$, для других компонент – на порядок меньше. По другим, говорится, что реальное значение может составлять порядка $10^{-1} \dots 10^{-2}$.

Поток электронной десорбции:

$$g_{эл} = \varepsilon \cdot \Theta \cdot j_e / e, \text{ ат./м}^2\text{с},$$

где ε – эффективность электронной десорбции; Θ – доля занятой адсорбированным продуктом поверхности; $j_{эл}/e$ – поток электронов, А/м^2 .

Если записать баланс частиц в виде:

$$n_s \cdot d\Theta/dt = - g_{эл} = - \varepsilon \cdot \Theta \cdot j_{эл}/e.$$

то получим решение уравнения:

$$\Theta(t) = \Theta(0) \cdot \exp(-(\varepsilon \cdot j_{эл}/e \cdot t)/n_s).$$

Это выражение можно переписать в виде:

$$\frac{d\Theta}{dt} = \Theta_0 \cdot \frac{\varepsilon \cdot j_{эл}/e}{n_s} \exp\left(-\frac{\varepsilon \cdot j_{эл}/e}{n_s} \cdot t\right), \text{ Па} \cdot \text{м}^3 / \text{с} \cdot \text{м}^2.$$

Поток электронной десорбции тогда можно записать следующим образом:

$$g(t) = n_s \cdot \frac{d\Theta}{dt} = \Theta_0 \cdot \frac{\varepsilon \cdot j_{эл}}{e} \exp\left(-\frac{\varepsilon \cdot j_{эл}/e}{n_s} \cdot t\right), \text{ ат./с} \cdot \text{м}^2.$$

Сорбционные процессы

Еще одним процессом, возникающем при бомбардировке поверхности МКП является сорбция, которая, в общем случае есть совокупность процессов, в результате которых попадающие на поверхность атомные и молекулярные частицы поглощаются телом, его поверхностью и объемом.

Среднее время жизни адсорбированной молекулы до адсорбции обратно в газовую среду зависит от прочности возникающей адсорбированной связи (энергии активации десорбции) и температуры:

$$\tau_a = \tau_0 \cdot \exp(-E_d/RT), \text{ с},$$

где $\tau_0 = 10^{-13}$ с – время одного полуколебания; E_d – энергия активации десорбции, Дж/моль; $R = kN_a$ – универсальная газовая постоянная, Дж/К·моль; T – абсолютная температура.

Время установления сорбционного равновесия на поверхности тела определяется из уравнения баланса частиц и равно:

$$t_p = \frac{4,6}{a_m \sqrt{2\pi mkT} + \frac{1}{\tau_a}}, \text{ с},$$

где a_m – плотность адсорбированных атомов газа, $1/\text{м}^3$; m – масса молекулы, кг; $\tau_a = \tau_0 \cdot e^{-Q_a/RT}$ – время адсорбции, $\tau_0 = 10^{-13}$; Q_a – теплота адсорбции; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана.

Результаты расчета времени сорбционного равновесия для воды и газов N_2 , O_2 , H_2 , CO , CO_2 . Приведены в таблице

газ	m , кг	Q_a , Дж/кмоль	τ_a , с	t_p , с
H_2O	$3,00 \cdot 10^{-26}$	$90 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^3$
CO	$4,65 \cdot 10^{-26}$	$12 \cdot 10^6$	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$6,0 \cdot 10^{-11}$
CO_2	$7,31 \cdot 10^{-26}$	$30 \cdot 10^6$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$8,2 \cdot 10^{-8}$
N_2 , O_2	$5 \cdot 10^{-26}$	$20 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$
H_2	$3 \cdot 10^{-27}$	$9 \cdot 10^6$	$3,7 \cdot 10^{-12}$	$1,7 \cdot 10^{-11}$

Таким образом, время установления сорбционного равновесия на поверхности в результате термических процессов для газов можно считать мгновенным. Однако, время сорбционного равновесия для паров воды достаточно большое, что приводит к значительному увеличению времени откачки при комнатной температуре.

Расчет уравнения материального баланса

Уравнение материального баланса включает в себя такие процессы, как диффузия, термическая десорбция, адсорбция и электронно-стимулированная десорбция:

$$ns \frac{d\Theta(t)}{dt} = V_{ad} \cdot (1 - \Theta(t)) - ns \cdot \Theta(t) \cdot V_{des} + V_{dif} - \Theta(t) \cdot g_e,$$

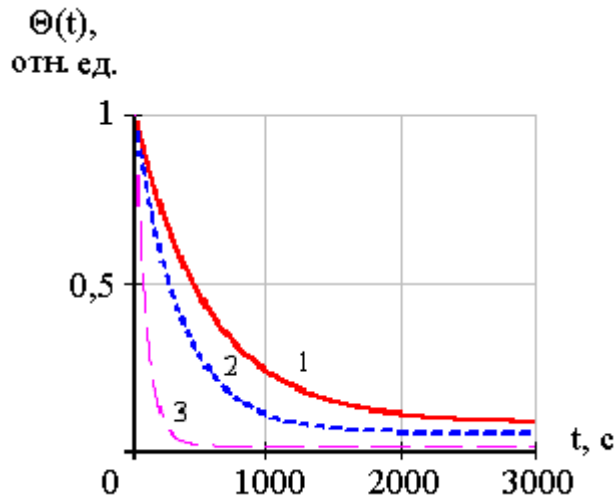
где $\Theta(t)$ – степень покрытия поверхности, адсорбированными частицами;

$$V_{ad} = \alpha \cdot \frac{P}{kT} \cdot \sqrt{8 \cdot \frac{kT}{\pi m}} \text{ – скорость адсорбции } (\alpha \text{ – коэффициент прилипания});$$

$$V_{des} = \frac{1}{\tau_a} \text{ – скорость десорбции};$$

V_{dif} – скорость диффузии;

$g_e = \varepsilon \cdot j_e / e$ – скорость электронно-стимулированной десорбции.

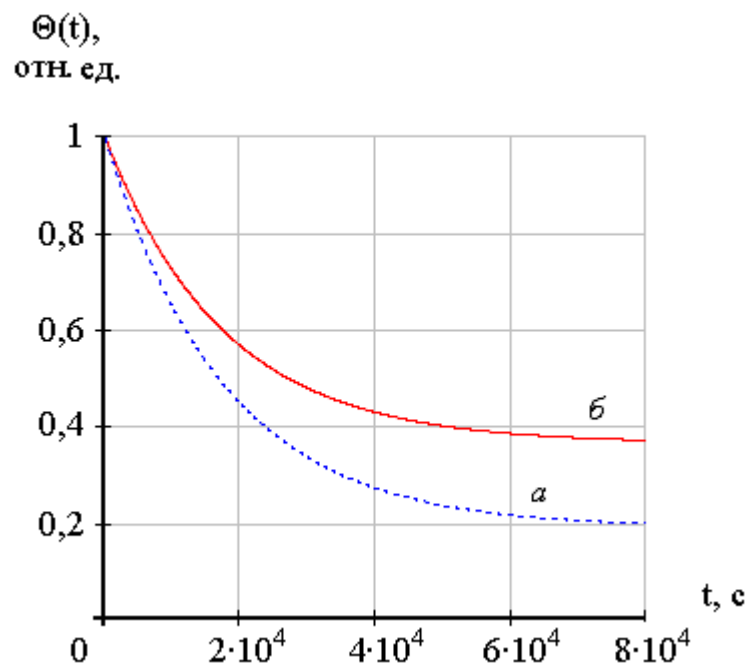


1 – при эффективности электронной десорбции $\varepsilon = 0,01$ и токе $J_e = 1 \cdot 10^{-12} \text{ А}$;

2 – с эффективностью электронной десорбции $\varepsilon = 0,1$ и токе $J_e = 9 \cdot 10^{-12} \text{ А}$;

3 – при эффективности электронной десорбции $\varepsilon = 1$, токе $J_e = 9 \cdot 10^{-12} \text{ А}$.

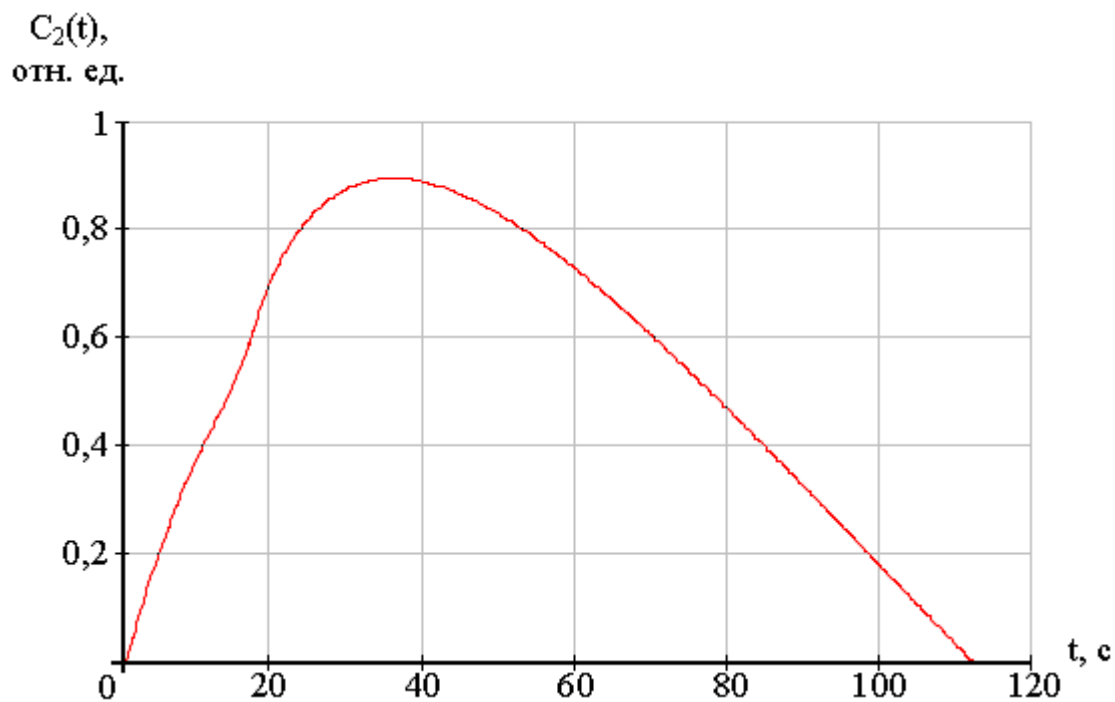
Зависимость степени покрытия от времени для молекул H_2O при $T = 25^\circ \text{C}$, $P_{\text{ост}} = 10^{-8} \text{ Па}$



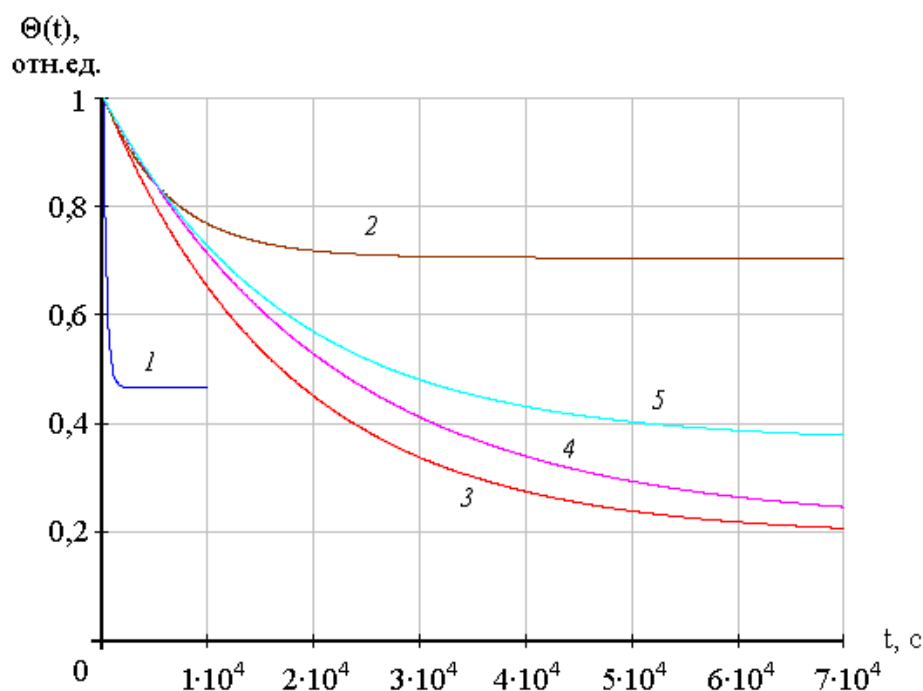
а – модель образования и испарения натрия без учета процесса диффузии;

б – модель, учитывающая образование натрия за счет объемной диффузии и диссоциации окислов

Зависимость степени покрытия поверхности канала от времени для натрия МКП при $T = 25^\circ\text{C}$, $\varepsilon = 0,1$ (без электронно-стимулированной десорбции)

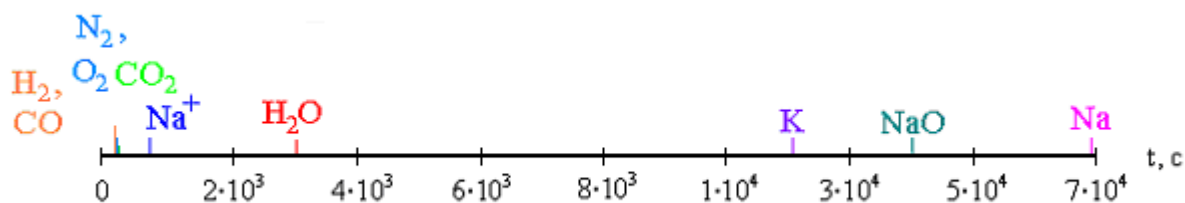


Изменение концентрации ионов Na на поверхности канала МКП под действием электронной бомбардировки с учетом сорбции

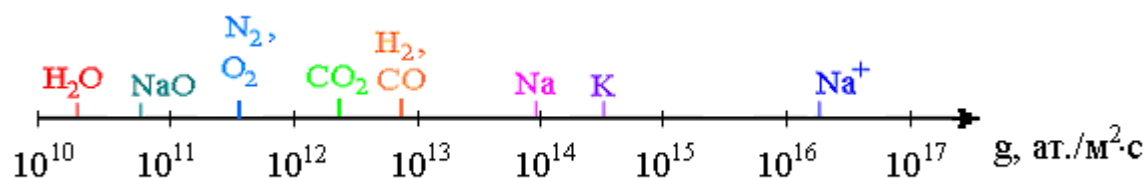


1 – сорбционное равновесие для паров воды; 2 – материальный баланс для К при электронной бомбардировке и испарении; 3, 4, 5 – материальный баланс для Na при электронной бомбардировке и испарении; испарении и диффузии; электронной бомбардировке, испарении и диффузии, соответственно.

Обобщенная зависимость изменения степени покрытия поверхности при 25 °С



Характерное время протекания процессов диффузии для газовых компонент, десорбции и испарения для щелочных металлов при 25 °С



Характерные значения потоков, выделяемых из МКП по завершению электронной тренировки при 25 °С в течение 10 ч

Факторы влияющие на стабильность основных параметров МКП:

- 1) Длительное хранение в упаковке: сопротивление и усиление стабильно до 5 %, верхний эмиссионный слой выполняет защитную функцию.
- 2) Нагрев на атмосфере при температуре выше 300 °С:
 - а) рост сопротивления на (20 - 100) % и более,
 - б) поперечное сопротивление резистивно-эмиссионного слоя резко возрастает.Слой SiO_x доокисляется ($x \sim 1,7$), становится настоящим диэлектриком, возникают явления зарядки каналов. Увеличение сопротивления связано с подокислением свинца. Все эти процессы приводят к следующим эффектам: память МКП, характеристики насыщения МКП приобретают аномальный характер.
- 3) Нагрев в вакууме: до температуры 350 °С не приводит к значительным изменениям, до температуры свыше 350 °С - имеется рост сопротивления до (10 - 50) %.
- 4) Электронная тренировка. При электронной тренировке микроканальные пластины выделяют кислород и щелочные металлы, в некоторых случаях воду. Кроме того, в зоне облучения происходят изменения связанные с возникновением заряда на поверхности. С учетом протекания процесса вторичной электронной эмиссии и отвода вторичных электронов, на поверхности возникает положительный заряд. Образующиеся положительные ионы натрия идут вглубь материала, где накапливаются, разряжаются, коагулируют, поэтому под зоной облучения стекло желтеет, получается проводящая зона, а на поверхности SiO_x происходит усадка. Для чистого кварцевого стекла этот эффект почти отсутствует, чем больше натрия тем больше эффект. Т.о. при электронном облучении материала происходит его разложение с выделением ионов натрия, калия, бария, кальция, часть из них пойдет в сторону входа по каналу, но основная масса под влиянием заряда уходит вглубь, коагулирует, следовательно сопротивление резистивно-эмиссионного слоя падает со временем. При работе канала наибольшее облучение происходит на выходе, следовательно, процесс деградации материала там идет быстрее, что приводит к снижению эффективности умножения на выходе канала. Данный процесс является необратимым.

Расчёт выходного тока канала МКП

Тогда ток на выходе канала определяется по формуле:

$$I_{\text{вых}} = I_{\text{вх}} * M,$$

где $I_{\text{вых}}$ – ток на выходе канала; $I_{\text{вх}}$ – ток на входе канала; M – коэффициент усиления.

В соответствии с шаговой моделью усиления коэффициент усиления имеет вид:

$$M = \left[\frac{AU^2}{\frac{2\pi}{3} * \bar{u}_0 \gamma_K^2} \right]^{\frac{\frac{2\pi}{3} * \bar{u}_0 \gamma_K^2}{U}},$$

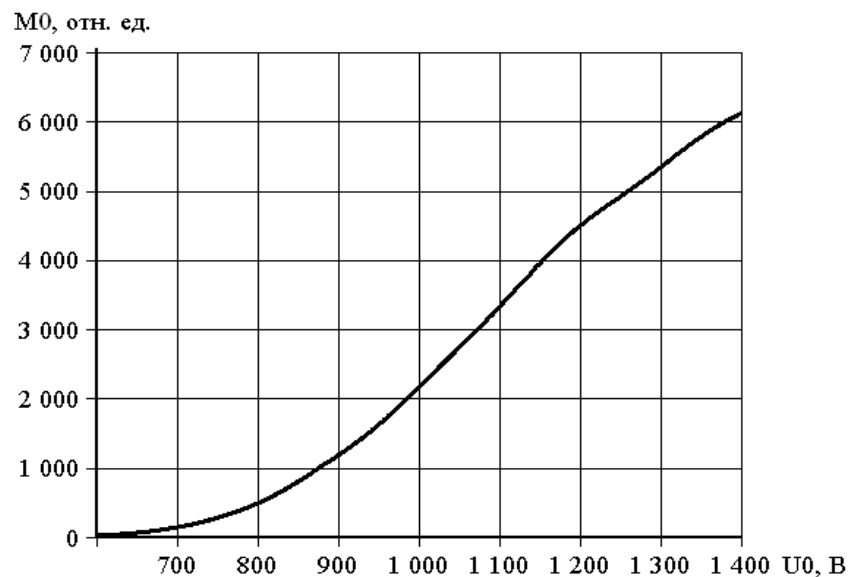
где A – коэффициент пропорциональности; U – напряжение, поданное на МКП; \bar{u}_0 – средняя энергия вторичных электронов.

Для расчета коэффициента усиления постоянного тока как в линейном, так и в нелинейном режимах можно воспользоваться выражением:

$$M = M_0 \frac{\ln M_0}{\left[\ln M_0 + \ln \left(1 + \frac{I_{\text{вх}} R}{U} \right) - \ln \left(1 + M_0 \frac{I_{\text{вх}} R}{U} \right) \right] * \left(1 + M_0 \frac{I_{\text{вх}} R}{U} \right)},$$

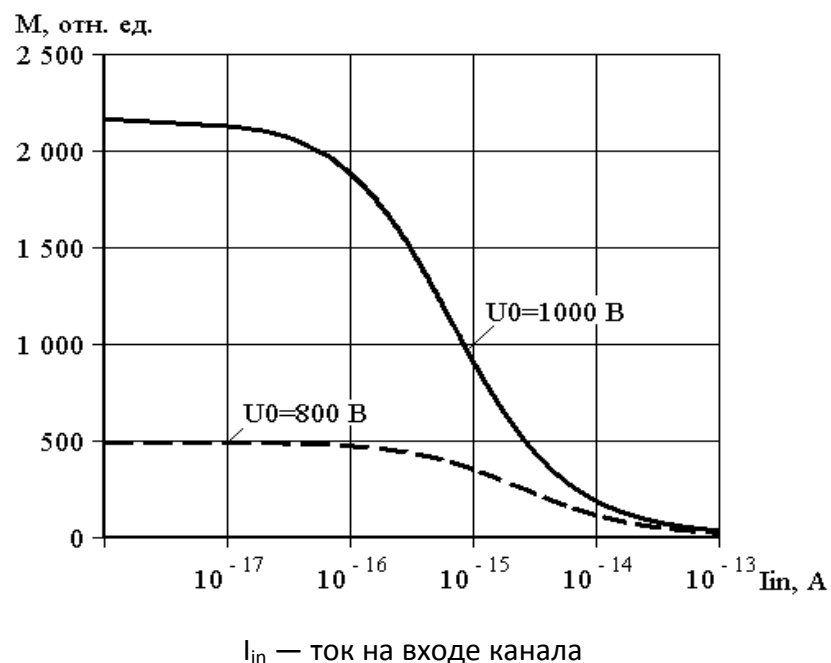
где M_0 – коэффициент усиления тока в линейном режиме, R – сопротивление резистивного слоя.

Зависимость коэффициента усиления от входного тока канала



M_0 — коэффициент усиления; U_0 — напряжение, приложенное к МКП

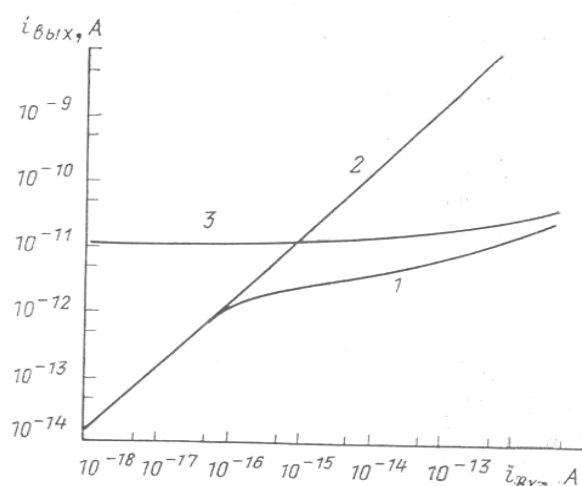
Зависимость коэффициента усиления в линейном режиме от напряжения на МКП



Зависимость коэффициента усиления от входного тока канала

Участок 1: усиление не зависит от величины входного тока каналов – режим счета одиночных импульсов (линейный режим). Второй участок кривой (примерно до входного тока 10^{-14} А) характеризуется сильной зависимостью коэффициента усиления от входного тока канала. Третий участок — это область больших входных токов, канал здесь работает в режиме насыщения, коэффициент усиления невелик и слабо зависит от величины входного тока канала.

На рисунке показаны зависимости величин выходного электронного тока МКП $I_{\text{вых}}$ от его входного электронного тока $I_{\text{вх}}$ для непрерывного режима (1) и режима одиночных импульсов (2). В непрерывном режиме ток на выходе МКП линейно нарастает с ростом тока на входе до тех пор, пока электронный ток на выходе не достигнет примерно 10% от величины тока проводимости. После этого наступает насыщение и усиление снижается до величин, близких к единице. Не ярко выраженный характер насыщения объясняется тем, что падение усиления связано со снижением напряженности поля на выходе канала. Поэтому к его начальному участку прикладывается большее напряжение и ток проводимости при насыщении повышается. В связи с тем величина выходного тока несколько повышается, следуя за повышением тока проводимости.



1 – в непрерывном режиме; 2 – в режиме редких одиночных импульсов; 3 – зависимость тока проводимости от выходного тока

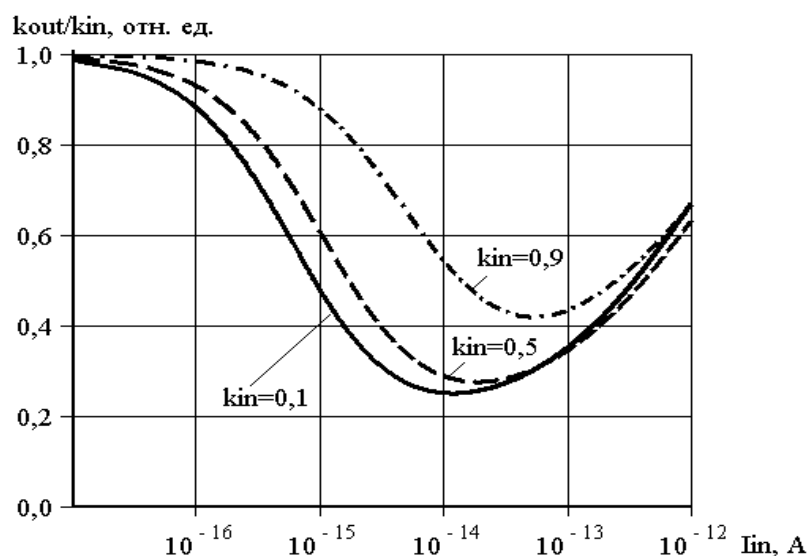
Рисунок– Зависимость величины выходного электронного тока от величины входного электронного тока для МКП

Помимо описанных ограничений **на усиление влияет и время наработки**. Если подавать на МКП постоянный входной ток, то выходной ток (и усиление) будет меняться со временем: вначале усиление будет быстро падать («электронная очистка» от поверхностных загрязнений, или «электронное обезгаживание»), затем следует длительный период стабилизации, и наконец усиление вновь начинает необратимо снижаться.

Под действием электронной бомбардировки происходит освобождение катионов щелочных и щелочноземельных металлов из соединений. Часть из них десорбируется в вакуум в виде положительных ионов и принимает участие в осуществлении ионной обратной связи. Положительный заряд на поверхности РЭС ведет к возникновению поперечного электрического поля в эмиссионном слое, причём это поле сильное из-за малой толщины эмиссионного слоя. Под действием этого поля катионы диффундируют вглубь, доходят до резистивного подслоя, разряжаются и увеличивают проводимость РЭС.

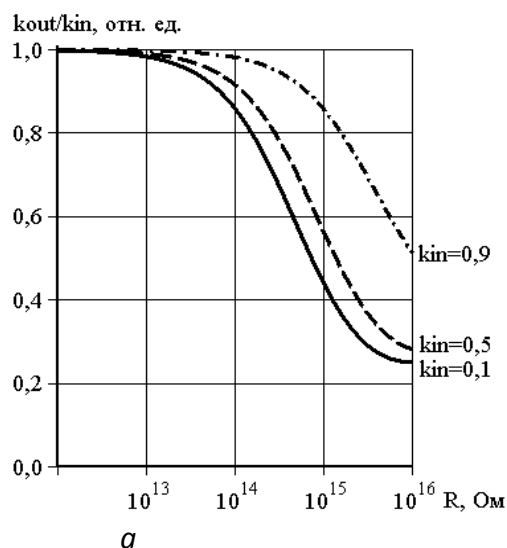
Таким образом, со временем проводимость на входе канала уменьшается, а это ведёт к изменению потенциала вдоль длины канала: на выходе напряжённость поля уменьшается. И как следствие, в результате наработке МКП деградирует. Отсюда следует, что чем меньше на поверхности загрязнений в виде щелочноземельных металлов, тем лучше работа МКП.

Передача контраста изображения через МКП зависит от режима усиления. На рисунке приводится зависимость коэффициента передачи контраста от сопротивления пластины, приходящегося на один канал, и напряжения МКП. Для этих графиков наибольший входной ток каналов 10^{-15} А. Очевидно, что с увеличением сопротивления канала и напряжения МКП передача контраста ухудшается.

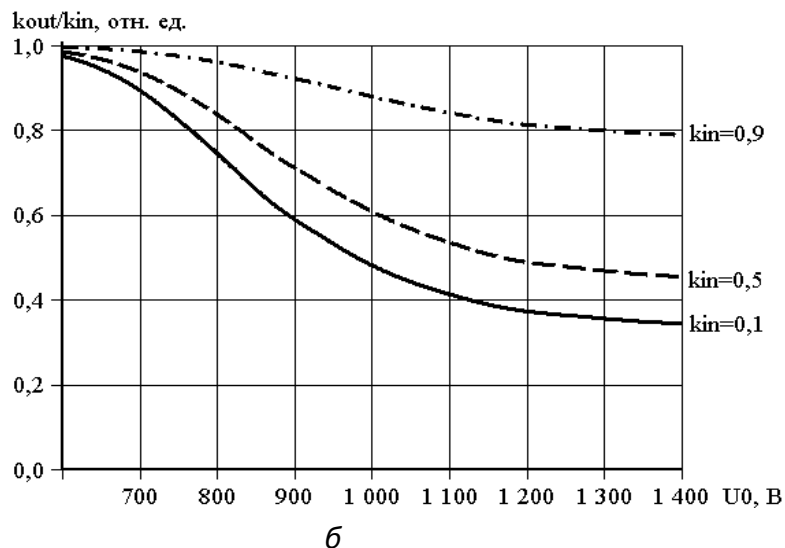


k_{out}/k_{in} — коэффициент передачи контраста; k_{in} — входной контраст; k_{out} — выходной контраст

Зависимость коэффициента передачи контраста от наибольшего входного тока каналов при $U_{мкп}=1000$ В



а



б

R — сопротивление, приходящееся на один канал

Зависимость коэффициента передачи контраста: а — от сопротивления, приходящегося на один канал, б — от напряжения на МКП