

Фотокатоды ЭОП

Параметры фотокатодов

Квантовый выход Y (%) — отношение числа эмитированных фотоэлектронов, приходящихся на один падающий фотон. Он определяется свойствами пленки фотокатода, а также энергией фотона.

Интегральная чувствительность S_A (А/лм) — способность фотокатода реагировать на воздействие всего светового потока, содержащего световые колебания различных частот.

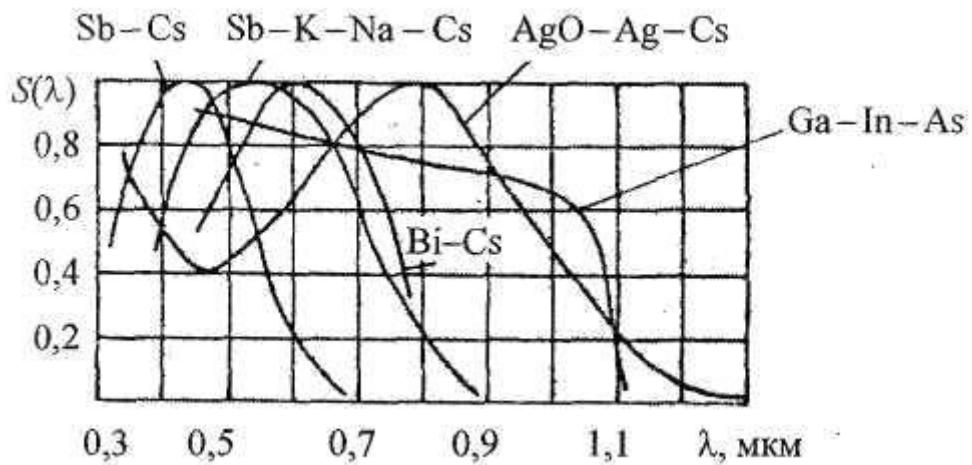
Спектральная чувствительность S_λ (А/Вт) — отношение величины фототока к **монохроматическому** лучистому потоку, падающего на фотокатод.

Темновой ток — это ток, возникающий при отсутствии света, но при подаче на прибор напряжения. Он определяется термо- и автоэмиссией. Минимальным уровнем обладает сурьмяно-калиево-цезиевый ФК.

Основные требования к фотокатодам ЭОП:

- поглощение света должно быть максимальным, чтобы достичь высокого квантового выхода, поэтому металлы с высоким коэффициентом отражения в качестве фотокатодов не применяются;
- работа выхода фотоэлектронной эмиссии должна быть минимальной для того, чтобы продлить спектральную чувствительность в длинноволновую область спектра;
- термоэлектронная работа выхода должна быть максимальна, чтобы влияние шумов на качество изображения было незначительным, так как этот шум и шум автоэлектронной эмиссии ухудшают пороговую чувствительность аппаратуры и уменьшают контраст изображения.

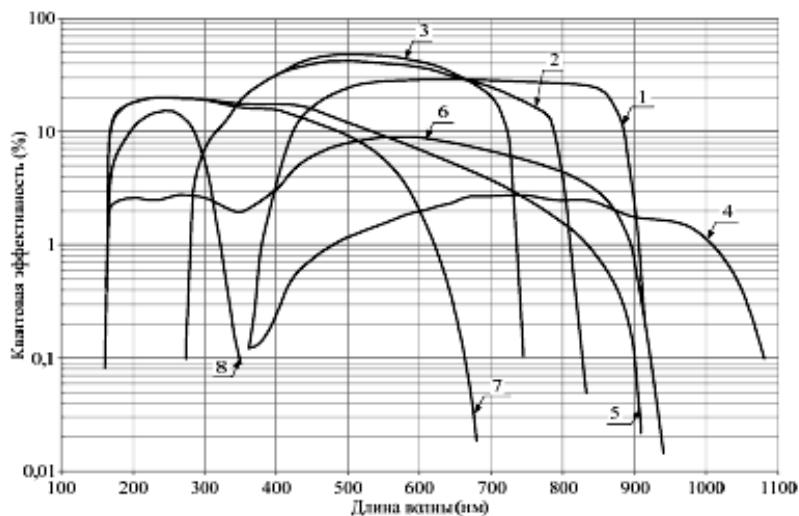
Фотокатод наносится на прозрачную стеклянную подложку. В качестве фотокатодов применяются тонкие полупрозрачные слои полупроводников сложной структуры.



Спектральные характеристики фотокатодов (нормированные)

Материалы фотокатодов и их входных окон

Обозначение	Материал фотокатода	Материал входного окна
1	GaAs (арсенид галлия)	Боросиликатное стекло
2	Улучшенный красный GaAsP (галлия арсенид-фосфид)	Боросиликатное стекло
3	GaAsP (галлия арсенид-фосфид)	Боросиликатное стекло
4	InGaAs (индий галлий арсенид)	Боросиликатное стекло
5	Щелочной	Синтетический диоксид кремния
6	Улучшенный красный щелочной	Синтетический диоксид кремния
7	Bialkali (сурьмяно-рубидий цезия Sb-Rb-Cs, сурьма-калий-цезий Sb-K-Cs)	Синтетический диоксид кремния
8	Теллурид цезия	Синтетический диоксид кремния



Солнечно-слепой фотокатод для наземных применений не должен воспринимать излучение длиннее 350 нм. Применяются соответственно KBr (граница 150 нм), CsJ (граница 180 нм), Cs₂Te или Rb₂Te (граница 280 нм). Квантовый выход достигает 10% и более в области 110–140 нм (KBr, CsJ) и 140–240 нм (Cs₂Te, Rb₂Te). Все эти катоды имеют большое сопротивление и при исполнении «на пристрел» должны иметь тонкую проводящую подложку (Cr, W).

Сурьмяно-цезиевый фотокатод (Sb – Cs) имеет область спектральной чувствительности 0,4...0,6 мкм, максимальный квантовый выход (чувствительность) на $\lambda_{\max} = 0,42$. Плотность темнового тока $I_T = 10^{-15} \dots 10^{-16}$ А/см; квантовый выход $Y = 0,2 \dots 0,3$ электрон/квант. При охлаждении до 183 К наблюдается падение чувствительности в длинноволновой области и возрастание в коротковолновой. Нагрев же до 373 К вызывает необратимые процессы в структуре фотокатода. Длительный срок службы катода приводит к его утомлению, увеличению работы выхода, что снижает интегральную чувствительность и вызывает смещение красной границы в коротковолновую область спектра. Заметное утомление наблюдается при токе выше 1 мкА/см². Малый темновой ток позволяет достичь высокой пороговой чувствительности в видимой области спектра.

Многощелочный фотокатод благодаря комбинации щелочных металлов имеет хорошую чувствительность в видимой области спектра, продленную в инфракрасный диапазон до 0,85 мкм. Так, соединение сурьмы со щелочными металлами Na, R, Sb (Sb - K - Na - Cs) имеет следующие параметры: $\lambda_{\max} = 0,52 \dots 0,6$ мкм; квантовый выход $Y = 0,35$; плотность темнового тока $I_T = 10^{-16} \dots 10^{-17}$ А/см². Благодаря малой величине термотока и чувствительности в ИК-области этот фотокатод позволяет создать универсальную аппаратуру, приспособленную для работы в широком диапазоне спектра. Таким образом, многощелочные фотокатоды превосходят сурьмяно-цезиевые. Токоустойчивость их также выше (на три порядка) и доходит до единиц миллиампер на квадратный сантиметр. Рабочая температура фотокатода не должна превышать 323..343 К.

Двухщелочные фотокатоды (Na₂K₂Sb, Na₂Cs₂Sb) имеют по сравнению с рассмотренным трехщелочным катодом меньший квантовый выход и более короткую красную границу (до 0,65 мкм), однако у этой группы фотокатодов меньше термоэмиссия и лучшая термостойкость (до 400 К).

Кислородно-серебряно-цезиевый фотокатод (AgO - Ag - Cs) отличается еще большей чувствительностью в ИК-области, которая простирается до 1,3 мкм. Кривая спектральной чувствительности имеет три максимума, но ее главный максимум находится на длине волны $\lambda_{\max} = 0,8$ мкм. Квантовый выход $Y = 0,01$, $I_T = 10^{-10} \dots 10^{-13}$ А/см². Основной недостаток этого катода - большой темновой ток, что делает его непригодным для применения вочных приборах пассивного действия.

Наиболее близким по спектральной чувствительности к глазу является **висмуто-серебряно-цезиевый катод** (Bi-Ag-O-Cs). Он обладает панахроматической (равномерной) чувствительностью в видимой области спектра, но из-за значительного темнового тока не нашел применения в ЭОП.

Фотокатоды, основанные на отрицательном электронном средстве, в которых снижением уровня Ферми добиваются величины работы выхода меньше ширины запрещенной зоны. В этом случае уровень вакуума располагается ниже дна зоны проводимости.

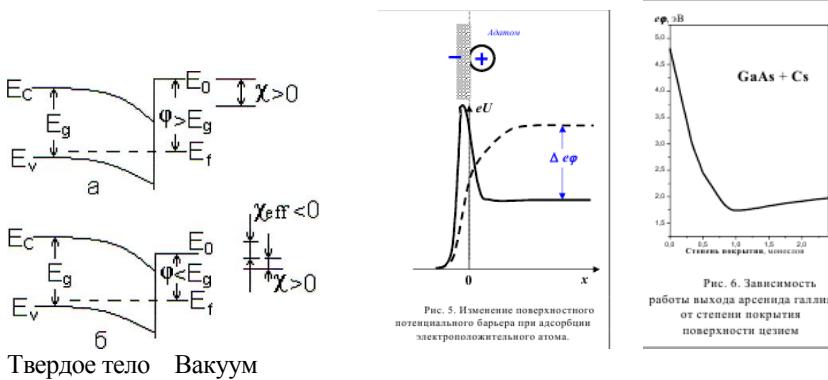


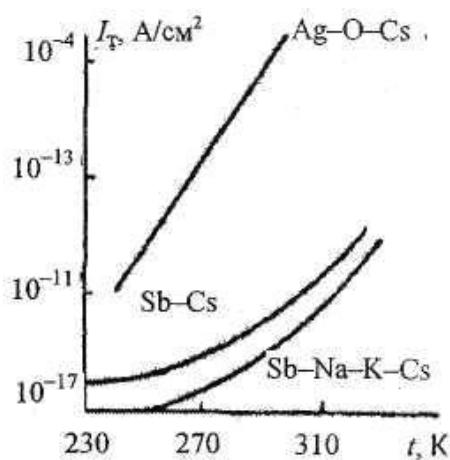
Рис. 6. Зависимость работы выхода арсенида галлия от степени покрытия поверхности цезием

Чтобы получить состояние ОЭС, необходимо понизить работу выхода полупроводника; это достигается путем адсорбции электроположительных, а в некоторых случаях комбинации электроположительных и электроотрицательных элементов на атомарно чистой поверхности. Чаще всего как адсорбаты используются Cs и O₂. Поверхность соединений типа A₃B₅ обычно очищается термообработкой в вакууме. Температура, при которой проводится очистка, зависит от конкретного материала, однако, она, как правило, лишь несколько ниже температуры разложения соединения.

После очистки поверхности от посторонних атомов на ней наносятся монослои адсорбатов. В случае GaAs необходимы как Cs, так и O₂, чтобы получить наиболее чувствительную ОЭС-поверхность. Эти два элемента могут наноситься на поверхность поочередно или одновременно. Толщина адсорбированной пленки Cs-O составляет 2-3 моноатомных слоя. Относительные количества Cs и O₂, оказавшиеся на поверхности, определяются эмпирически по величине фотоэмиссии, а нанесение адсорбатов продолжается, пока не будет достигнут максимум фоточувствительности.

Квантовый выход снижается вблизи порога фотоэффекта, поэтому спектральные кривые фотокатодов имеют подъем в красной области до длин волн 0,9... 1,06 мкм. Эти фотокатоды лучше рассмотренных по величине отношения сигнал/шум и сроку службы. Поэтому их применение перспективно в ИК-области. Так, чувствительность фотокатода InAsP-Cs₂O на длине волны 1,06 мкм в 20 раз превышает чувствительность кислородно-серебряно-цезиевого фотокатода. Фотокатод на основе отрицательного электронного средства (Ga-In-As) имеет чувствительность в области спектра от 0,2 до 1,03 мкм $S^{cb} = 2 \cdot 10^{+3}$ А/лм, $S = 3 \cdot 10^{-2}$ А/Вт.

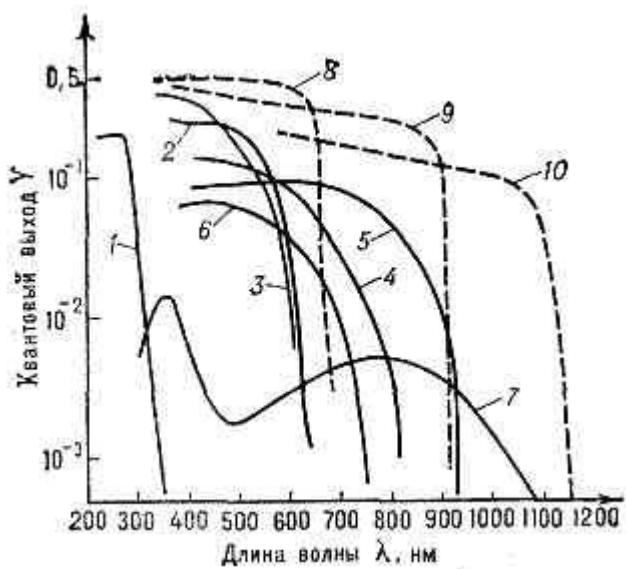
При эксплуатации фотокатодов обязательно учитывается их поведение в условиях изменения температуры. Охлаждение заметно снижает темновой ток, что иногда используется при проектировании аппаратуры для повышения ее чувствительности. Установлено, что для того чтобы изменить темновой ток на порядок, внешнюю температуру необходимо изменить на 15 К для кислородно-серебряных фотокатодов, на 25 К - для многощелочных фотокатодов и на 40 К — для сурьмяно-цезиевых.



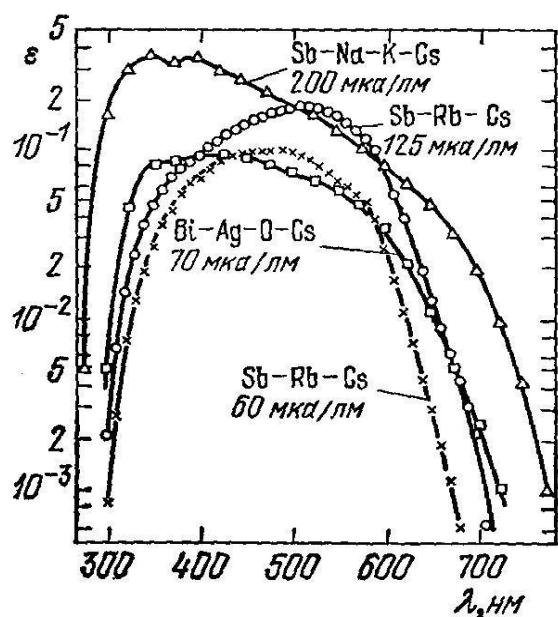
Изменение темнового тока фотокатодов в зависимости от их температуры

Плотность термоэмиссии GaAs(Cs-O) катода ($E_g \sim 1,4$ эв) при комнатной температуре составляет 10^{-16} А/см².

При эксплуатации фотокатодов необходимо помнить, что они подвержены утомлению и старению. Старение (снижение чувствительности при хранении) наиболее заметно в течение первых дней после изготовления, а утомление (снижение чувствительности в процессе работы) растет с увеличением падающего светового потока и анодного напряжения, а также при охлаждении фотокатода.



Спектральные характеристики квантового выхода Y основных типов фотокатодов (сплошные линии) и 3-х типов фотокатодов с отрицательным электронным средством (пунктир), представляющих собой эпитаксиальные пленки сильно легированных акцепторами полупроводников типа АПВВ, активированные монослоем Cs или Cs₂O; 1) CsTe; 2) CsSb; 3) K₂CsSb; 4) Na₂KSB; 5) Na₂KSB-Cs; в) Bi-Ag-O-Cs; 7) Ag-O-Cs; 8) ОЭС-Ф на основе GaAsP-Cs; 9) GaAs-Cs, O; 10) InGaAsP-Cs, O.



Спектральные характеристики двух- и трехщелочных фотокатодов

В максимуме спектральной чувствительности ($\lambda_m=420 - 450$ нм) квантовый выход мультищелочных катодов достигает величины $Y_m \approx 0.35 - 0.40$,

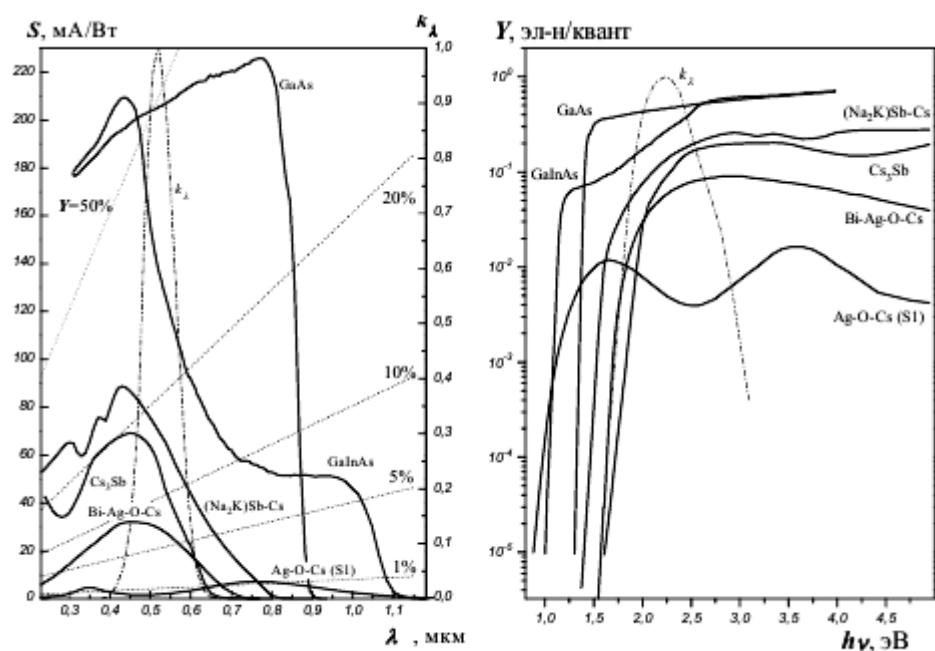
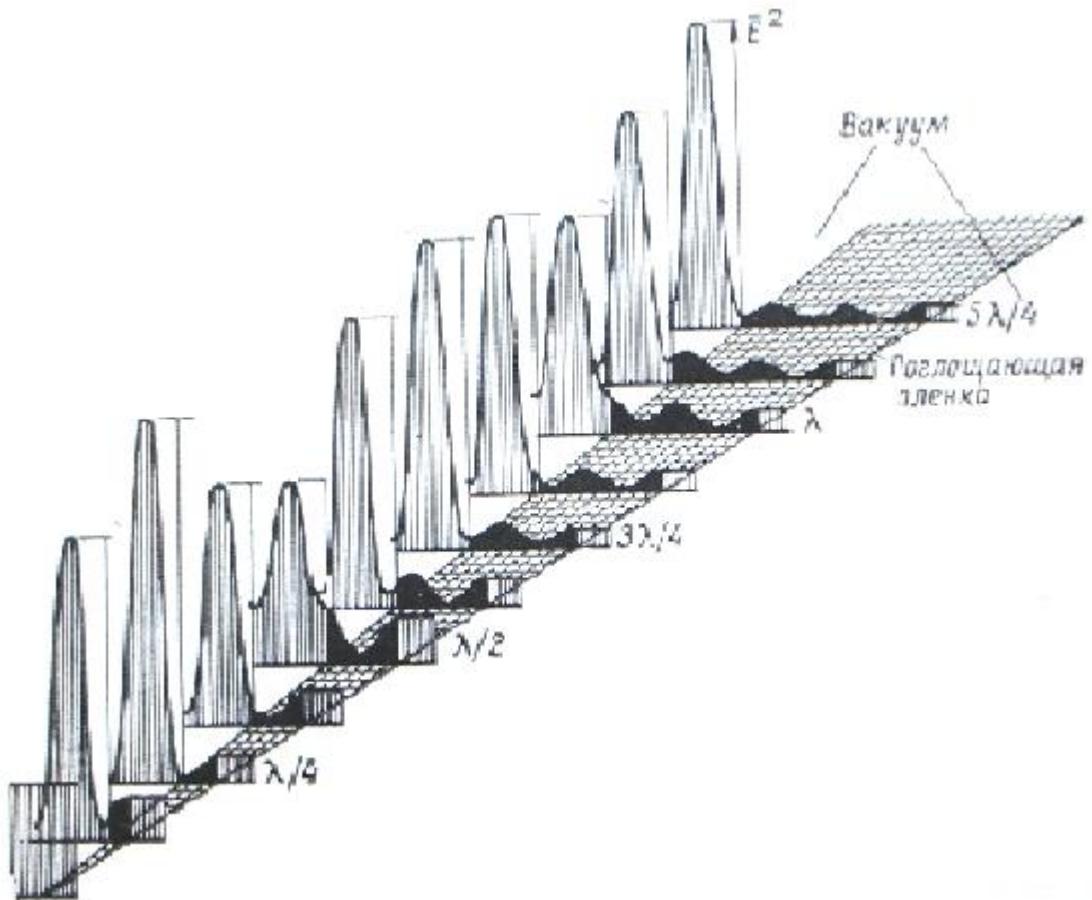


Рис. 12. Спектральные характеристики основных типов эффективных фотокатодов.

В ЭОП используются полупроводниковые катоды р-типа проводимости с отрицательным электронным средством: многощелочной катод и катод на основе арсенида галия.

Важными параметрами фотокатодов являются коэффициент отражения границы раздела катод – вакуум R , коэффициент поглощения света для материала фотокатода $a(\lambda)$, длина диффузии электронов L и вероятность выхода электронов с поверхности B , а также скорость поверхностной рекомбинации s на границе раздела подложка – катод и, наконец, толщина катода t .

Тонкий фотокатод представляет собой поглощающее интерференционное покрытие. Волновые поля впереди, внутри и позади поглощающей пленки представлены в зависимости от толщины пленки t



Волновые поля внутри и впереди поглощающей пленки в зависимости от ее толщины

Перед поглощающей пленкой всегда существуют стоячие волны независимо от ее толщины. Если толщина пленки составляет $\lambda/2$, амплитуда отраженной волны принимает наименьшее значение.

В фотоэлектрической пленке с оптической толщиной $\lambda/2$ большинство электронов возбуждается вблизи обеих границ и очень мало – в середине пленки. При освещении полупрозрачных пленок толщиной до $\lambda/4$ у задней границы всегда образуется больше фотоэлектронов, чем у передней. Кривая пространственного распределения \bar{E}^2 имеет пучность у первой границы, так как фазовый сдвиг для отраженной волны близок к нулю. Падающая и отраженная волны интерферируют со взаимным усилением.

Технология GaAs фотокатода

Чтобы получить в ОЭС-фотокатоде большие диффузионные длины, необходимо обеспечить высокое качество кристаллической структуры, что достигается при эпитаксиальном выращивании полупроводника.

Эпитаксия из паровой фазы:

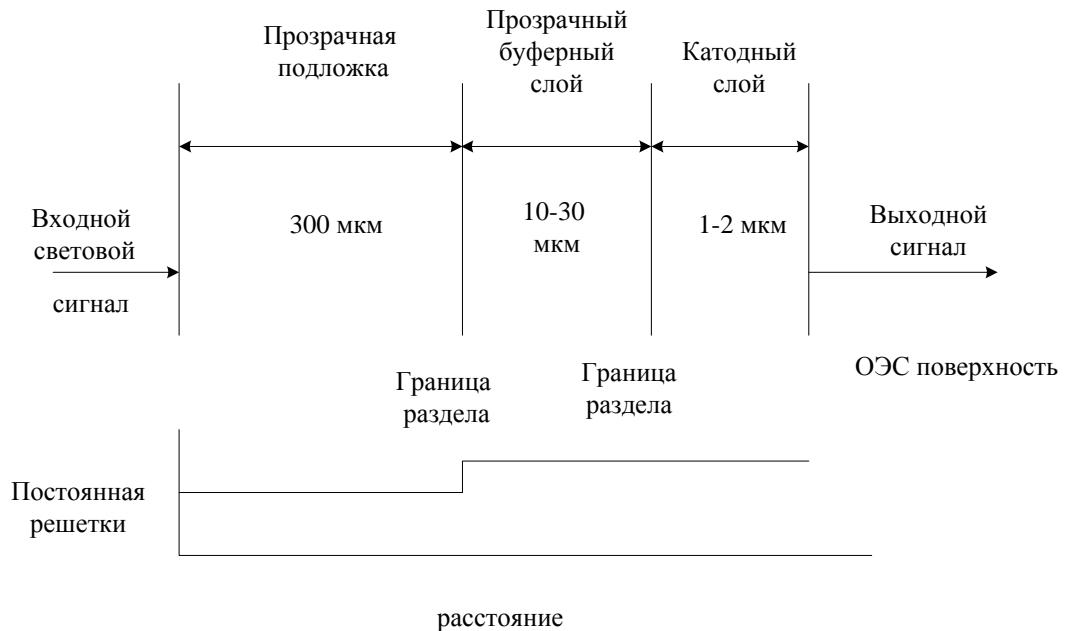
1. Смесь газов GaCl_3 и AsCl_3 или AsH_3 разлагается при высокой температуре для получения GaAs. Длина диффузии для материалов с высоким уровнем легирования ($\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$) остается меньше 3 мкм, но получаются более зеркальные поверхности. Однако, этот метод не позволяет осуществить эпитаксию соединения алюминия.
2. Эпитаксия из паров органометаллических соединений (МОС-гидридная): например, разлагается смесь $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$ и AsH_3 на подложке GaAs при высокой температуре. При такой эпитаксии для материалов с высоким уровнем легирования (10^{19} см^{-3}) длины диффузии получаются 3 мкм, зеркальные поверхности, а кроме того, по причине гибкости этого метода возможна реализация весьма сложных структур;

Молекулярно-лучевая эпитаксия:

Одновременное испарение в вакууме составляющих из хорошо контролируемых источников. Молекулярно-лучевая эпитаксия позволяет получать высокое качество кристалла, но практически такие структуры по фоточувствительности уступают жидкофазным и МОС-гидридным.

В настоящее время для выращивания фотокатодных структур чаще применяются жидкофазная и МОС-гидридная технологии.

Толщина катодов должна составлять 1-2 мкм. Для обеспечения механической прочности катод первоначально формируется на прозрачной подложке из GaAs или InP, которые прозрачны при $\lambda > 0,90$ мкм и $\lambda > 0,95$ мкм соответственно.



Структура фотокатода на пропускание с прозрачным **переходным** (буферным) слоем, введённым, чтобы исключить несоответствие решёток на обратной поверхности активного слоя катода.

Толщина активной области катода равна примерно 1 - 2 мкм; чтобы этот тонкий слой обладал высоким совершенством кристаллической структуры, необходимо хорошее согласование решётки материалов катода и подложки. Постоянные кристаллической решётки подложки и катода, вообще говоря, не совпадают. Выполнить условие согласования решёток удаётся, если между подложкой и катодом ввести прозрачный буферный слой из полупроводника с такой же постоянной решёткой, как и у материала катода. На рисунке изображена получающаяся гетероэпитаксиальная структура, указаны типичные размеры и приведён профиль распределения постоянной решётки по глубине. Резкое изменение постоянной решётки происходит теперь в плоскости I (на границе раздела подложка - буферный слой). Буферный слой выращивается достаточно толстым, так что дислокации, берущие начало в плоскости I, не могут достигнуть плоскости II (граница раздела буферный слой - катод). Таким образом, структура буферного слоя вблизи от границы раздела II оказывается сравнительно свободной от дефектов, а в самой плоскости выполняется условие согласования решёток.

InGaAs-фотокатод

Добавка в активный слой GaAs 14 процентов индия, приводит к сдвигу стандартной спектральной характеристики этого катода в спектральный диапазон 1.0-1.1мкм.

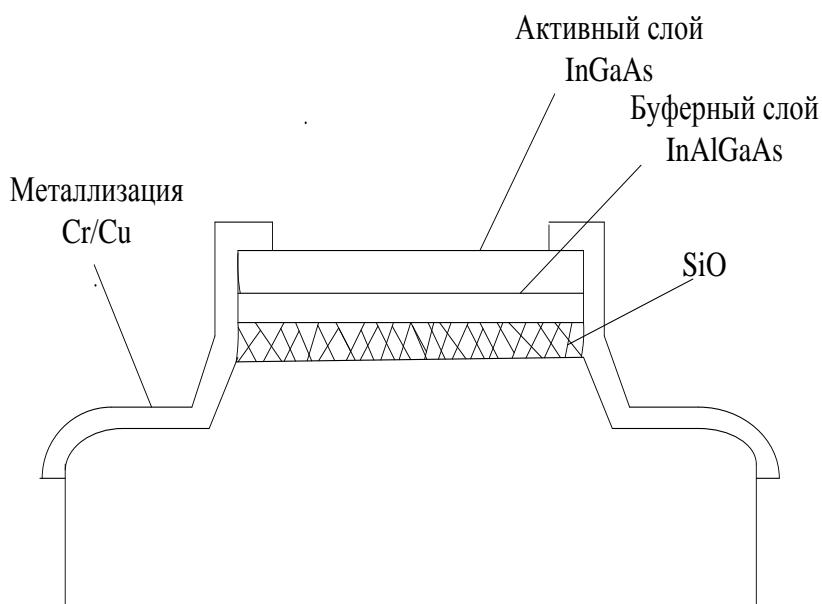
	In _{0.14} Al _{0.5} Ga _{0.86} As (буферный слой)
	In _{0.14} Ga _{0.86} As(активный слой)
	In _{0.14} Al _{0.5} Ga _{0.86} As (стопорный слой)
	Переходной слой
	GaAs (подложка)

Расположение слоев в фотокатодной InGaAs-InAlGaAs гетероэпитаксиальной структуре.

Буферный слой InAlGaAs служит для снижения поверхностной рекомбинации неравновесных электронов на передней границе активного слоя. **Активный слой** InGaAs после изготовления и активации является собственно фотокатодом. **Стопорный слой** In AlGaAs служит защитой активного слоя в процессе изготовления фотокатода. **Подложка GaAs** служит несущей основой и кристаллическим зародышем-ориентатором в процессе выращивания фотокатодной структуры. Кристаллические решетки GaAs и InAlGaAs отличаются на 1.3 процента, поэтому плотность дислокаций несоответствия 10^7 см^{-2} . Уровень легирования активной области $p=10^{19} \text{ см}^{-3}$. Для избежания генерации дислокаций несоответствия, в состав ГЭС добавляется **переходной слой**, чтобы обеспечить совпадение периода решетки активного слоя с подложкой.

Для изготовления GaAs-ФКУ применяется технология, включающая следующие **основные** технологические операции (всего более 20 операций):

1. Входной контроль ГЭС
2. Мойка ГЭС перед термодиффузионной сваркой.
3. Входной контроль стеклодисков.
4. Мойка стеклодисков перед термодиффузионной сваркой.
5. Термодиффузионная сварка ФКУ.
6. Удаление GaAs-подложки селективным травлением.
7. Удаление стопорного AlGaAs-слоя селективным травлением.
8. Мойка ФКУ перед металлизацией.
9. Металлизация ФКУ.
10. Выходной контроль ФКУ.
11. Финишное травление окисного слоя с GaAs-поверхности ФКУ.



Из-за большой разности коэффициентов преломления материала фотокатодной структуры и стекла на границе раздела стекло-структурка отражалось бы 22 процента падающего света, поэтому для уменьшения отражения света и, соответственно, увеличения фоточувствительности в спай вносят просветляющее покрытие из моноокси кремния (SiO), предварительно наносимое на структуру

Термодиффузионная сварка

При изготовлении фотокатодного узла после выращивания фотокатодной структуры ее нужно закрепить на стеклянном входном окне электронно-оптического преобразователя. Известны лишь два способа такого присоединения, обеспечивающих оптически чистое соединение - это термодиффузионная и электротермодиффузионная сварки. В обоих случаях процесс производится при высоких температурах -600°C и -400°C соответственно.

Термодиффузионная сварка для изготовления фотокатодных узлов электронно-оптических преобразователей осуществляется в установке «Вершина». Данная установка предназначена для сварки в высоком вакууме. В одном цикле может осуществляться сварка 24-х образцов, которые загружаются в специальные кассеты, сгруппированные по три (триады).

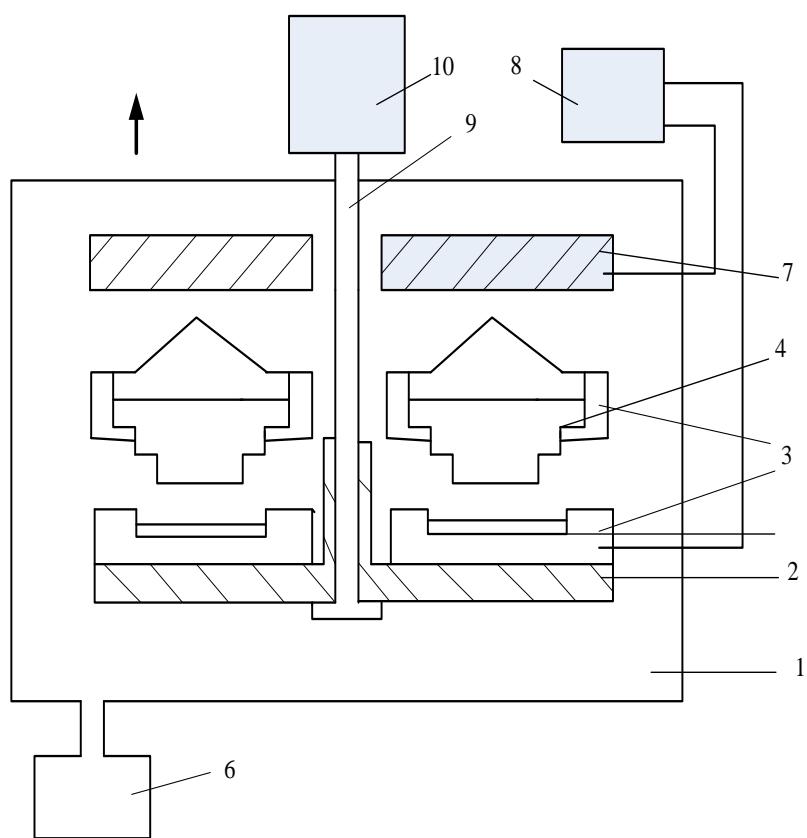


Схема установки термодиффузионной сварки

Установка имеет вакуумную рабочую камеру 1, в которую подвешивают кассеты 2 с установленными на них по три оправки 3 из графита, в которые помещают свариваемые стеклодиск 4 и ГЭС 5. Сварка производится в вакууме $\sim 10^{-4}$ Па при температуре $\sim 600^{\circ}\text{C}$. Разрежение в камере создается с помощью вакуумной системы 6, состоящей из двух насосов: форвакуумного насоса, предварительно откачивающего до давления 10^{-1} Па для эффективной работы более мощного турбомолекулярного насоса, создающего вакуум порядка 10^{-4} Па. Нагрев и остывание свариваемых деталей осуществляется резистивной печью 7, управляемых терморегулятором 8. Во время сварки кассеты с оправками со свариваемыми деталями поднимаются штоками 9 от внешнего пневмопривода 10 до касания с плоскостью нагревательной печи для приложения сварочных усилий. Точность поддерживания заданной температуры $\pm 1^{\circ}\text{C}$, неравномерность температуры по позициям $\pm 5^{\circ}\text{C}$. Усилие сжатия настраивается по тензометрическому датчику, точность прикладываемого усилия на каждую сварочную оправку $\pm 20\text{ г}$.

Температурно-временная зависимость режима сварки с промежуточной выдержкой

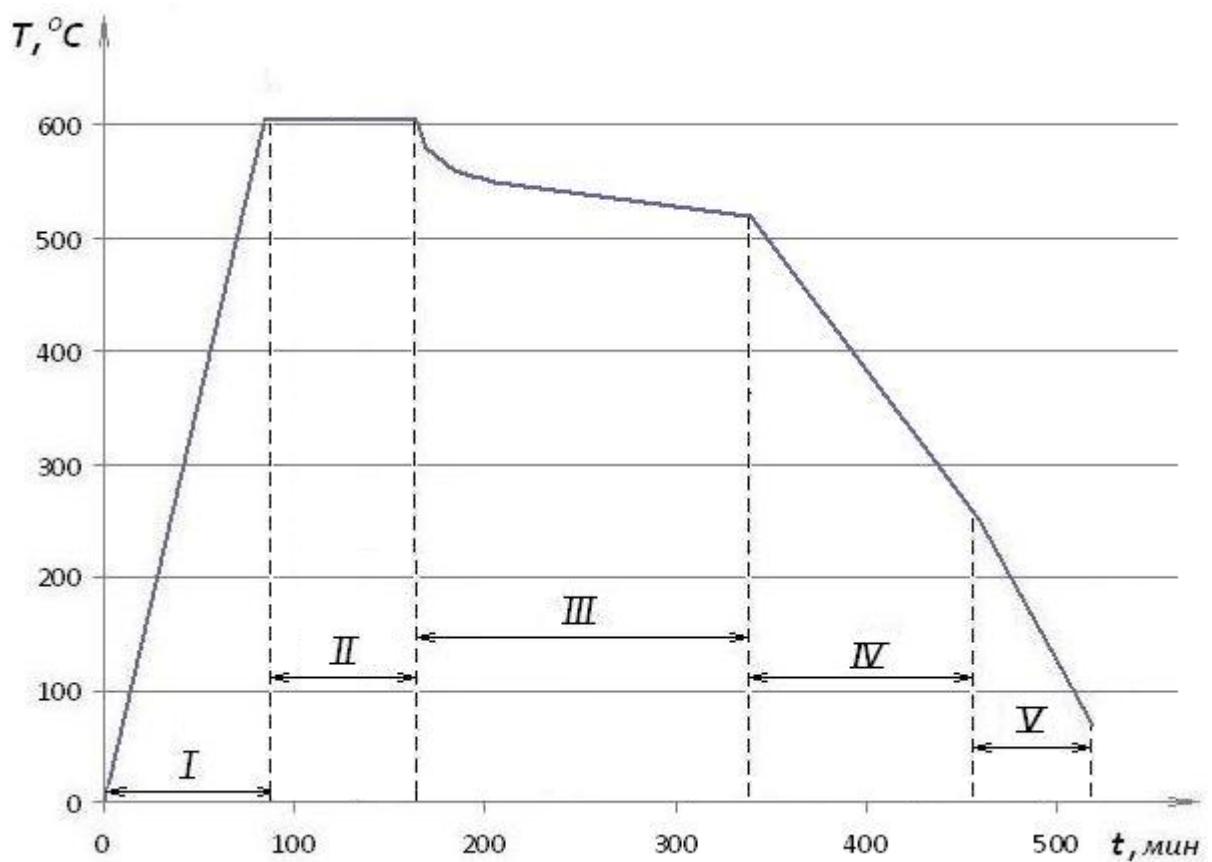


Рисунок - Температурно-временная зависимость для режима сварки с промежуточной выдержкой

I – нагревание со скоростью $\sim 7 {}^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ до температуры сварки;

II – изотермическая выдержка при температуре сварки $600 {}^{\circ}\text{C}$ в течение 50 минут (процесс обезгаживания свариваемых поверхностей) и сварка с приложением давления в течение 30 минут;

III – этап промежуточной выдержки (отжиг);

IV – охлаждение со скоростью $\sim 2 {}^{\circ}\text{C}/\text{мин}$. На этом этапе скорость остывания влияет на распределение напряжений в сварном соединении.

V – принудительное остывание со скоростью $\sim 3 {}^{\circ}\text{C}/\text{мин}$, осуществляющееся с помощью напуска азота в рабочую камеру.

Травление.

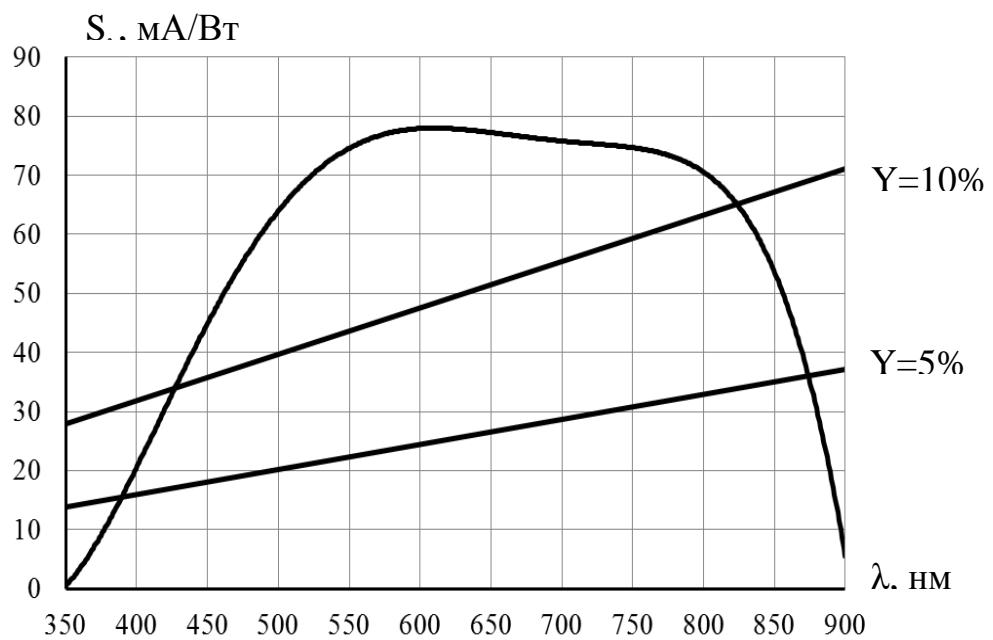
Травление является наиболее критичной частью процесса изготовления ФКУ. Ключевыми проблемами, которые следует учитывать при выборе, являются скорость, равномерность, селективность, а также различные повреждения поверхности, которые могут ухудшать электрические свойства и, следовательно, работу прибора.

Основным химическим механизмом большинства процессов жидкостного травления GaAs является окисление поверхности до образования окислов Ga и As, за которым следует растворение этих окислов химическим воздействием кислот или оснований. Многие травители GaAs требуют добавления перекиси водорода (H_2O_2), которая служит окисляющим средством для содействия образованию поверхностных окислов.

Чрезмерно большие скорости могут приводить к низкому качеству поверхности. Скорость окисления обычно управляет силой окислителя, так что увеличение доли H_2O_2 увеличивает скорость, однако поверхности имеют тенденцию становиться более шероховатыми в травителях, у которых содержание $H_2O_2 > 15\%$. Растворение окисла управляет величиной pH раствора, шероховатость поверхности увеличивается при pH > 7,5.

Для удаление GaAs-подложки и стопорного слоя применяют перекисно-аммичный травитель. Скорость травления GaAs-подложки составляет 7,5-8мкм/мин. Скорость травления стопорного AlGaAs-слоя - 0.02мкм/мин.

Щелочной фотокатод S25



Спектральная чувствительность фотокатода S25 толщиной 1200 Å и интегральной чувствительностью 705 мкА/лм

Классический метод получения МФ

Классический метод получения катода Na_2KSb с адсорбированным на нем моноатомным слоем цезия был описан в 1955 г. Соммером . Процесс выращивания ФК контролируют по падению пропускания света.

1 Сурьма испаряется до падения пропускания света на 70 % от первоначальной величины.

2 Путем обработки полученной пленки в парах К при температуре 160 °C получаем соединение K_3Sb .

3 Это соединение обрабатывается в парах Na при температуре 220°C. В это время в соединении K_3Sb калий постепенно замещается натрием. Данный процесс следовало бы остановить, когда отношение K:Na равняется 1:2, однако это технически невозможно. Поэтому контролирование данного процесса осуществляется по резкому падению чувствительности. Полученному соединению соответствует стехиометрия $\text{Na}_{>2}\text{K}_{<1}\text{Sb}$.

4 Чтобы добиться необходимой стехиометрии, постепенно добавляются порции K и Sb при температуре 160 °C. Процесс ведется до получения максимума чувствительности. Таких подпылений может потребоваться до 50, в зависимости от количества избыточного Na.

5 Для получения тонкого слоя цезия на поверхности Na_2KSb требуется поочередное добавление Cs и Sb при температуре 160 °C. Контролируется данный процесс по максимуму чувствительности.

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии

Метод молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) заключается в испарения и конденсации вещества в сверхвысоком вакууме, т.е. при давлении ниже 10^{-9} мм рт.ст. Низкие давление и скорость поступления атомов позволяют выращивать тонкие, практически монослойные, пленки, а также позволяет контролировать процесс выращивания. Напыление происходит из эфузионных ячеек, в которых находятся источники натрия, калия и сурьмы, которые создают атомные или молекулярные пучки. Необходимо обеспечить нагрев как стеклянной подложки, так и ячеек. Создание тонкого, толщиной 20...30 Å, слоя, состоящего из одного металла, возможно за счет того, что атомы в пучках двигаются по инерции в сверхвысоком вакууме и не сталкиваются с другими атомами. Такой способ напыления позволяет обеспечивать высокую однородность структуры. Перед напылением непосредственно самой смеси, состоящей из натрия, калия и сурьмы, на подложке следует вырастить поликристаллический слой сурьмы, скорость осаждения которой составляет один моноатомный слой в секунду. Однако недостатком этого метода является высокая стоимость, вызванная необходимостью использовать сверхчистые источники металлов, а также точный контроль температур подложки и эфузионных ячеек. Преимуществом является возможность контроля получаемого фотокатода.

Данный способ можно видоизменить. Вместо одновременного напыления всех металлов, следует сформировать базовый слой, типа A_3Sb , где A — щелочной металл. Na_3Sb обладает более высокой чувствительностью, чем K_3Sb , но соединение с натрием менее воспроизводимое, поэтому на практике используют структуру K_3Sb .

Далее формируют двухщелочной фотокатод Na_2KSb . Оптимальная стехиометрия достигается многократным повторением операций:

- Выделение натрия до падения чувствительности;
- Выделение калия и подпыление сурьмы до достижения максимального значения чувствительности.

Вышеописанные операции производятся при $t=200$ °C.

Для получения мультищелочного фотокатода производится многократное подпыление цезия и сурьмы.

Такая технология позволяет получать МФ с более высокой чувствительностью, особенно в красной области спектра.

Контроль процессов напыления.

На производстве контроль толщины получаемой структуры, а также скорость напыления может отслеживаться по оптическим параметрам фотокатода, таких как коэффициент отражения и коэффициент пропускания. На данный момент это единственный метод контроля процесса напыления. Для контроля выбирается коэффициент оптического отражения R . Из уравнения Френеля следует, что существует зависимость R от толщины пленки. Измерение этой зависимости следует проводить на зафиксированной длине волны падающего на пленку света. Также этот способ позволяет отследить замещение одного металла на другой, поскольку показатель преломления и коэффициент затухания, от которых зависит R , однозначно определены для каждого соединения. График $R=f(d)$ приведен на рисунке.

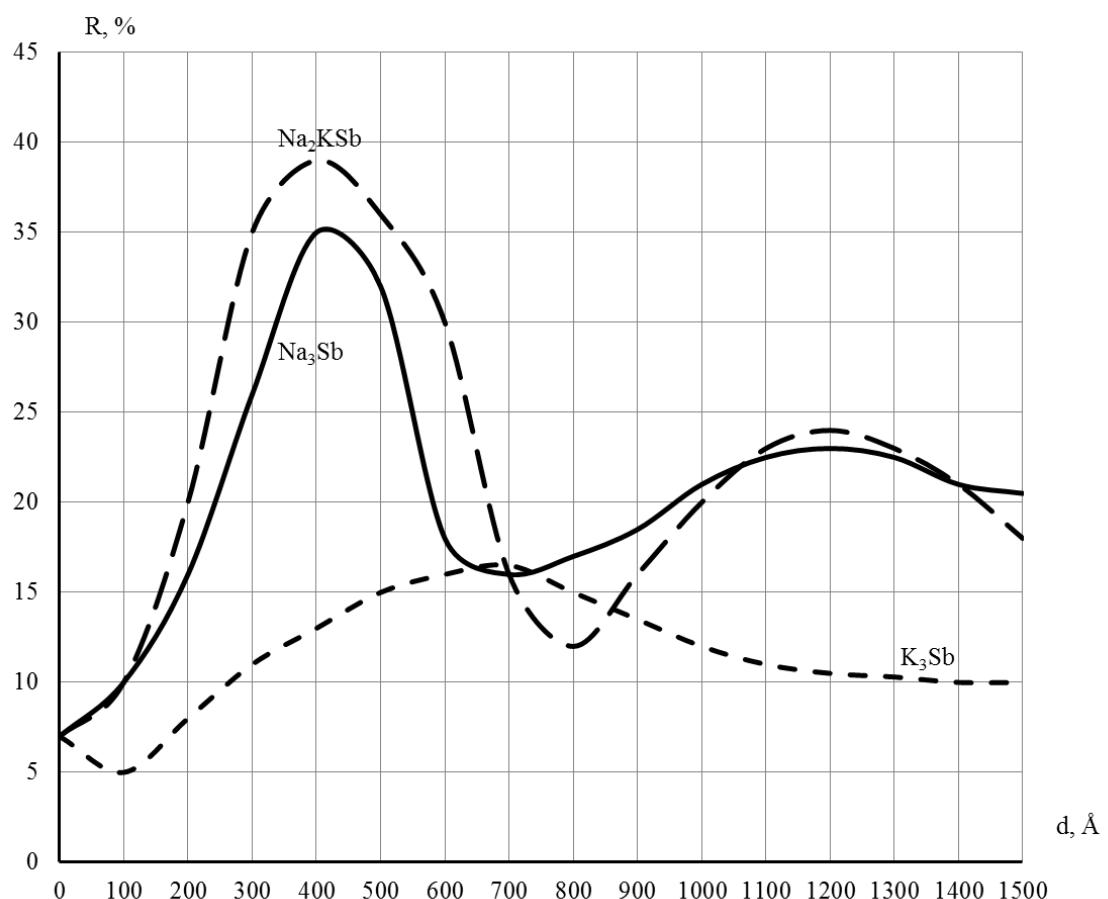


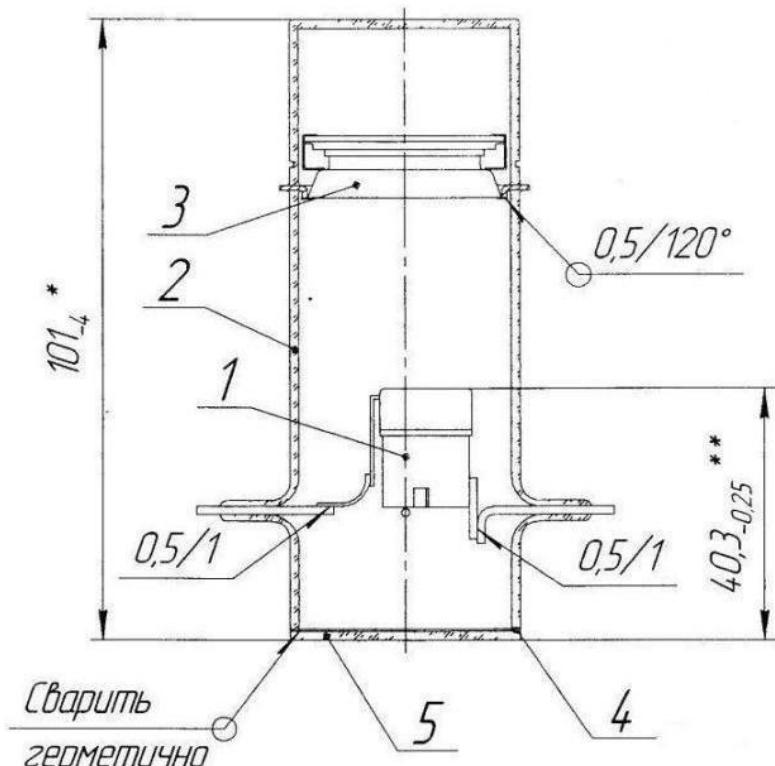
График зависимости коэффициента оптического отражения от толщины фотокатода

Контейнерный метод

Контейнер является вспомогательной колбой для изготовления фотокатода и представляет собой вакуумный объем цилиндрической формы, выполненный из стекла.

Сборочный чертеж контейнера.

— анод; 2 — колба; 3 — узел катодный; 4 — кольцо; 5 — диск



1 Пусть начальная толщина пленки Sb должна быть 500 \AA , тогда напыляем пленку в 300 \AA , толщиной около 60 % от первоначальной планируемой.

2 Производится добавление натрия диффузией из стекла при температуре $210\text{...}250^\circ\text{C}$. В полученной структуре будет 0,1 % избыточного Na, следовательно, стехиометрия будет Na_3Sb . Контроль ведется по максимуму чувствительности на длине волны 300 нм.

3 Полученная структура охлаждается до $150\text{...}160^\circ\text{C}$, и на нее напыляется пленка сурьмы толщиной 50 \AA , после чего производится обработка калием до появления чувствительности в областях $380\text{...}400 \text{ nm}$ и $500\text{...}550 \text{ nm}$. После получения максимума снова напыляется пленка сурьмы толщиной 50 \AA и обрабатывают калием до получения максимума чувствительности на вышеуказанных длинах волн.

4 Для получения оптимальной стехиометрии производят напыление 5 \AA сурьмы и анализируют изменение чувствительности. Если она упала, то обрабатывают слабым потоком калия до максимума чувствительности, а если возросла, то добавляют 5 \AA Sb. В результате получится оптимальная стехиометрия.

5 Цезиевание производят при температуре $40\text{...}80^\circ\text{C}$, сначала напылив $15\text{...}20 \text{ \AA}$ сурьмы, а затем обрабатывают в паре цезия. Потом охлаждают до комнатной температуры и добавляют Cs до максимума чувствительности в областях $650\text{...}750 \text{ nm}$ и $820\text{...}850 \text{ nm}$.

Особенности контейнерной технологии фотокатодов

Поскольку щелочные металлы активно вступают в реакции с кислородом, водяным паром и прочими газами, то остаточный газ необходимо обезгаживать путем прогрева всех его частей до восстановления щелочного металла. Время и температура обезгаживания зависят от конструкции прибора и используемых материалов. Обычно прогрев длится 1...5 ч при температуре 380...400°C.

При окончании процесса обезгаживания и достижения в приборе вакуума порядка 10^{-7} мм рт. ст. приступают к изготовлению фотокатода. Процесс изготовления можно разделить ориентировочно на следующие этапы: создание основного слоя, представляющего собой металл; активирование фотокатода щелочными металлами. Основной слой прозрачного катода наносится на подложку испарением в высоком вакууме.

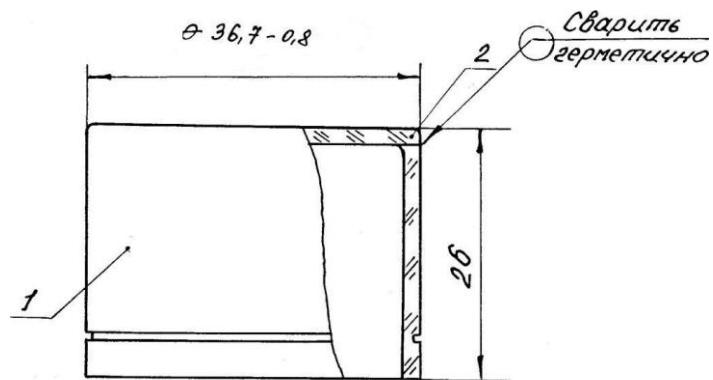
Весь процесс заключается в последовательном пылении слоев с дальнейшей активировкой щелочным металлом, чаще всего калием. Калий находится снаружи контейнера в отдельной ракуретке, представляющей стеклянный отросток.

После нанесения первоначального слоя сурьмы, капсула калия, находящаяся в ракуретке, нагревается, обезгаживается токами высокой частоты, выделяющиеся пары щелочного металла конденсируются на стенках отростка трубочки, откуда он перегоняется в расположенный рядом сферический объем. Нагрев ракуретки и контейнера производят одновременно, но температура ракуретки выше на 10°C. Таким образом, пары щелочного металла поступают в объем колбы прибора. После охлаждения производят второе пыление сурьмы. Далее проводится активировка калием, после чего ракуретку и рожок с калием отпаивают.

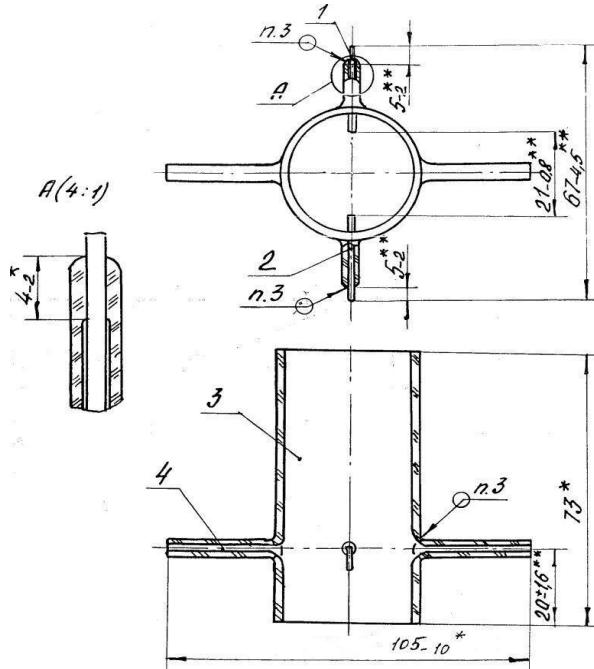
Недостатком этого метода является возможность загрязнения изготовленного фотокатодного слоя газами, освобождающимися при последовательном восстановлении щелочных металлов из исходных соединений. Поэтому крайне важно использовать чистых исходных материалов и металлических капсул и проведение тщательного обезгаживания деталей в начальной стадии изготовления фотокатода до нанесения слоя сурьмы.

Высокочастотная заварка контейнера

Высокочастотная заварка контейнера заключается в приварке к торцу стакана цилиндра штенгелеванного через плоскость металлического кольца. Высокочастотная заварка происходит в три этапа: прогрев стекла с помощью токов высокой частоты, заварка прибора и отжиг изделия. Отжиг в свою очередь состоит из двух стадий: нагрев колпака до температуры 700...800°C и медленное охлаждение. Длительность каждой опера-



ции подбирается эмпирическим путем для обеспечения качественного спая.



1 — цилиндр, 2 — диск Рисунок 5.2 — Стакан

1 — вывод прямой; 2 — вывод анодный; 3 — цилиндр; 4 — капилляр

Рисунок — Цилиндр штенгелеванный

При спаивании стекла с металлом токами высокочастотные вихревые индукционные токи возникают сначала только в металле, за счет теплоотдачи металла и прилегающие к нему участки стекла. Стекло разогревается быстро и равномерно, оно растекается по металлу, обволакивает его и образует герметичный спай.

Мойка колб заваренных и монтаж внутренней арматуры

Заваренную колбу промывают в 1% растворе плавиковой кислоты HF и растворе щелочи в ультразвуковых ваннах.

Принцип ультразвуковой очистки основан на явлениях кавитации, радиационного давления и акустического перемешивания в рабочей жидкости, в которую помещаются загрязненные колбы. Это приводит к механическому сбиванию загрязнений с колб, вызывают ускорение физико-химических процессов взаимодействия между загрязнениями и рабочей жидкостью. Она обеспечивает высокое качество очистки деталей и малый расход очищающих средств.

Плавиковая кислота используется для растворения поверхностного слоя стекла вместе с загрязнениями, для придания стеклу требуемой степени шероховатости, повышения также механической прочности стекла, потому что устраняются мелкие дефекты поверхности. При увеличении концентрации плавиковой кислоты более 5% на поверхности образуются плохо смываемые фториды, степень упрочнения стекла уменьшается.

Промывка стекла в однопроцентном растворе плавиковой кислоты позволяет в 8...10 раз снизить его газовыделение. При растворении поверхностного слоя стекла выделяется газ, фтористый кремний, придающий поверхности стекла шероховатость. Поскольку шероховатая поверхность имеет большую площадь соприкосновения с наносимыми покрытиями, прочность сцепления покрытий со стеклом повышается.

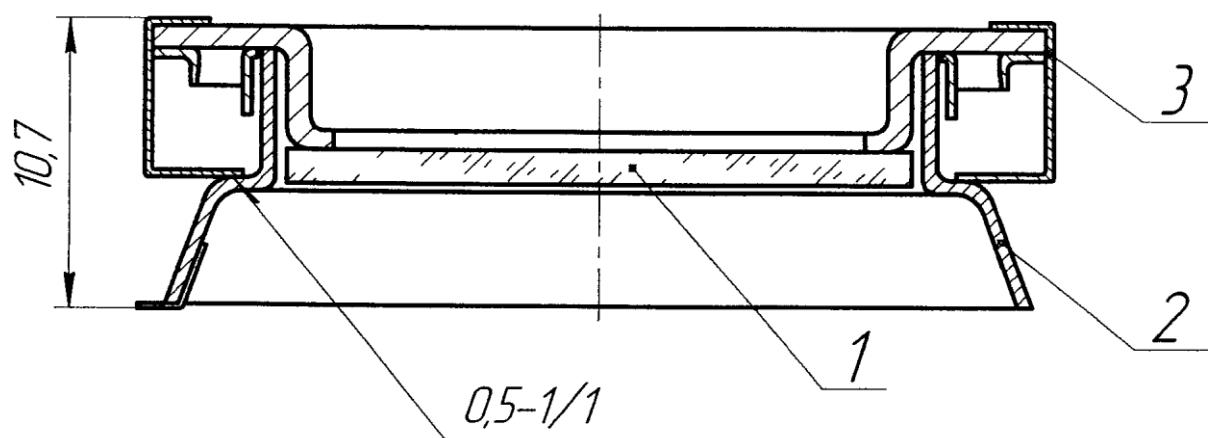
В качестве моющего раствора применяется тринатрийfosфат и смачиватель ОП-7. Тринатрийfosфат обладает наилучшей смываемостью среди обезжиривающих веществ, а также улучшает смываемость других составных частей обезжиривающего раствора. С повышением температуры щелочного раствора улучшается качество обезжиривания: уменьшается вязкость жиров, увеличивается скорость химических реакций, облегчается удаление твердых загрязнений и смываемость обезжиривающих растворов, но также и снижается устойчивость эмульсий и суспензий, образующихся при обезжиривании. Тогда загрязнения могут снова осесть на поверхности. Во избежание этого температура не должна быть выше 55°C.

После мойки колбы промывают в деионизованной воде и сушат в центрифуге при поддуве азота, нагретого до 90 °С. Оценку остаточных жировых загрязнений производят при поднесении колбы под струю пара. Если загрязнения отсутствуют, то пар будет либо равномерно стекать по стенкам, либо, при малом количестве пара, не будет оседать на стенках. На наличие других видов загрязнений проверяют колбу под микроскопом, на ней должны отсутствовать царапины и включения, образовавшиеся после мойки. После завершения этих работ приступают к монтажу деталей контейнера, причем эти детали должны быть предварительно очищены и обезжириены.

Монтаж внутренней арматуры контейнера

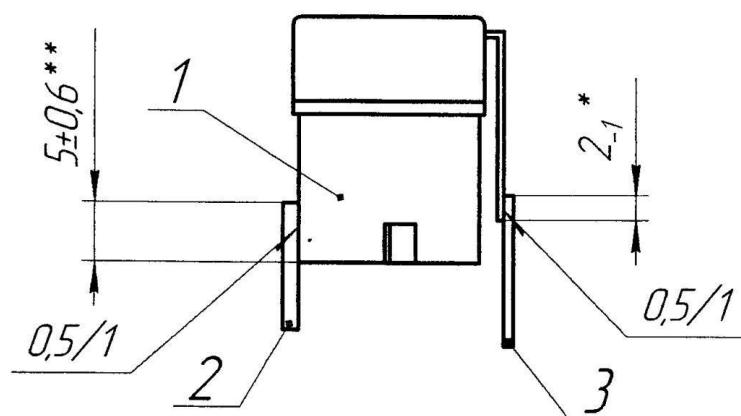
Монтажные операции выполняют на монтажных столах со сварочными механизмами при помощи универсальных монтажных инструментов (пинцет, ножницы, монтажная игла и т.д.). Также для удобства работы и обеспечения качества при монтаже применяют специальные инструменты. К ним относятся в основном оправки, предназначенные для предварительного фиксирования взаимного положения электродов. Детали на монтажном столе соединяются точечной сваркой, которая проводится со спиртом для отсутствия окисления деталей в месте сварки, соединение должно быть прочным, без прожогов и пережогов.

Фотокатод на этом этапе представляет собой стекло, на которое будет производится пыление. Подложка закреплена в катодном узле, сборочный чертеж которого представлен на рисунке.



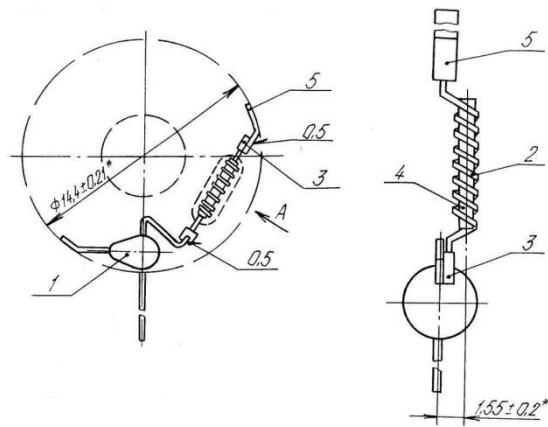
1 — узел катодный; 2 — кольцо собранное; 3 — лента

Рисунок — Узел катодный



1 — анод; 2 — соединитель; 3 — плющенка

Рисунок — Анод



1 — держатель формованный; 2 — подогреватель; 3 — трубка; 4 — распылитель; 5 — лента

Рисунок — Испаритель собранный

Собранный прибор продувают азотом высокого давления, который подается к монтажному столу, где установлено сопло. Прибор обдувается струей, исходящей из сопла несколько секунд, после чего накрывается плоским стеклом через металлическое кольцо. Затем следует высокочастотная заварка тылового стекла при помощи индуктора и контейнер приобретает окончательный вид.

Далее контейнер напаивают на откачную установку, откачивают и обезгаживают. Термическое обезгаживание применяется не только для удаления газов, растворенных в объеме металла, и восстановления окислов на поверхности деталей, но и для удаления оставшихся после мойки промывочных жидкостей, неорганических и органических соединений, образовавшихся в процессе хранения и неудаленных при химических методах очистки. Пиролиз позволяет дочистить поверхности. В процессе такой очистки образуются летучие газы, например, вода, метан или сероводород. При высокой температуре и большой продолжительности процесса, останутся только термостойкие химические элементы. Термическая очистка является наиболее эффективным и универсальным средством очистки[.

После прогрева и получения вакуума порядка 10^{-7} мм рт. ст. приступают к изготовлению фотокатода.

Пост откачной ПО-01

Пост позволяет проводить до восьми процессов одновременно, поскольку имеет восемь независимых каналов. На любом этапе технологического процесса оператор может вмешаться в процесс. Система позволяет проводить подбор технологических режимов и в дальнейшем автоматически воспроизводить их.

Для вывода результатов используется монитор.

Годная к работе система должна обеспечивать давление $6,65 \cdot 10^{-5}$ Па ($5 \cdot 10^{-7}$ мм рт. ст) через 30 мин после выключения печи прогрева, время подъема температуры печи прогрева 380°C — 15...25 мин, 280°C — 12-15 мин, 260°C — 6-9 мин, 180°C — 2-3 мин.

Устройство и назначение системы

Система технических средств вакуумной обработки, управляемая IBM PC состоит из: а) поста откачного; б) двух силовых блоков; в) компьютера.

Откачной пост имеет следующие основные узлы: металлический корпус, вакуумную систему и активировочную печь, разделенную на восемь ячеек.

Программа обеспечивает управление ходом технологического процесса, состоящего из:

- Прогрева коллектора;
- Температурного обезгаживания изделий;
- Напыления слоев сурьмы до заданного потери прозрачности стекла подложки;
- Активирования щелочными металлами до достижения заданного уровня фототока;
- Вывода информации на экран монитора, отображающих ход технологического процесса.

Для напыления металлов из ракуретки (включающей в себя индукционный нагрев и обезгаживания) используется генератор высокой частоты.

Спасибо за внимание

Основные характеристики современных ЭОП II+

Производитель	Модель	Спектральная чувствительность на длине волны 850 нм, мА/Вт	Интегральная чувствительность, мкА/лм	Сигнал/шум, не менее, относ.ед.
ЗАО «Экран Оптические системы»	ЭМП 6Г-1	45	700	18
То же	ЭМП 6Г-Д	30	500	19
»	ЭПМ66Г-2-СК	40	540	20
ОАО «Катод»	ЭМП 44Г-С	50	600	21
То же	ЭМП 44Г-Б	35	500	18
»	ЭПМ 105Г-00-22 А	45	550	19
«Photonis-Dep»	SuperGen	33...45	500...600	18
То же	XR-5	65	800	19
«Hamamatsu»	V6886U	62	280	—
То же	V6886U-01	45	550	—

Методы просветления фотокатодов

Просветлением оптики называют эффект уменьшения коэффициентов отражения поверхностей оптических деталей путем нанесения на них непоглощающих пленок, толщина которых соизмерима с длиной волны оптического излучения.

При углах падения, близких к нормальному, эффект просветления оптики максимален, если толщина тонкой пленки равна нечетному числу четвертей длины световой волны в материале пленки, показатель преломления n_2 удовлетворяет равенству $n_2^2 = n_1 \cdot n_3$, где n_1 и n_3 – показатели преломления сред, граничащих с пленкой. Отраженный свет ослабляется тем сильнее, чем больше разность $n_3 - n_2$; если же $n_2 > n_3$, то интерференция отраженных от границ пленки лучей, напротив, усилит интенсивность отраженного света.

На границе двух сред с различными показателями преломления (n_0, n_1) часть падающего света отражается. Амплитуда r_1 отраженной волны определяется формулой Френеля :

$$r_1 = \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0}.$$

Средний квадрат вектора результирующего электрического поля E в точке z перед границей равен :

$$\overline{E}^2(z) = 1 + r_1^2 - 2r_1 \cos \frac{4\pi \cdot n_0 z}{\lambda}.$$

При **оптической толщине пленки $n_1 t_1 = \lambda/2$ (t_1 – толщина пленки)** свет проникает в пленку – просветляющее покрытие.

Если оптическая толщина пленки равна $\lambda/4$ или нечетному кратному этой величины перед слоем образуется **большая стоячая волна – отражающее покрытие**

