

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОСАЖДЕНИЯ СЛОЕВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ПЛЕНОЧНЫХ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Г.И. Вадов, М.Н. Кузнецов, Ю.В. Никольский
(Москва)

При изготовлении пленочных полевых триодов с изолированным затвором широко используются пленки полупроводниковых веществ типа сульфида кадмия. Электрические свойства этих пленок могут быть изменены в широких пределах путем теплового режима процесса напыления, который, как правило, определяется температурой испарителя и подложки. Свойства пленок этих веществ очень чувствительны к скорости установления стационарного теплового режима процесса испарения, а также к степени постоянства скорости испарения напыляемого вещества [1].

Исследование зависимости свойств пленок сульфида кадмия от условий их получения показало, что диапазон изменения электрических свойств этих пленок за счет задания теплового режима может быть расширен при применении нагреваемого "горячего" экрана, расположенного между испарителем и подложкой. Конструкция такого испарителя для получения пленок сульфида кадмия показана на рис. 1. Испаритель состоит из двух основных частей:

- а) прямонакального графитового испарителя типа ячейки "Клудсена", что позволяет с известной степенью точности поддерживать скорость испарения сульфида кадмия путем контроля и стабилизации температуры испарителя;
- б) "горячего" экрана.

Иногда используют конусный отражатель паров, препятствующий прямому попаданию паров на подложку. Температура испарителя и "горячего" экрана контролируется термодарами.

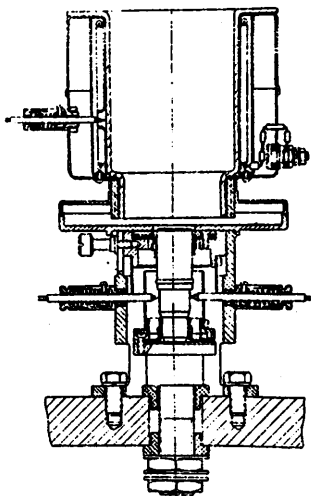


Рис. 1. Испаритель сульфида кадмия с "горячим" экраном.

"Горячий" экран состоит из кварцевого стакана и нагревателя. Между верхним краем "горячего" экрана и подложкой имеется узкий зазор, необходимый для перемещения заслонки.

Подложка подогревается радиационным нагревателем. Контроль температуры осуществляется с помощью термопары.

Применение данного испарителя дает возможность наносить пленку в более равновесных условиях, чем при простом методе вакуумного напыления, а также получить более высокую скорость нанесения слоев сульфида кадмия (например, при температуре подложки 300°C

скорость осаждения повышается в десять раз).

Изменяя температуру экрана при неизменных температурах испарителя и подложки, можно в широких пределах менять удельное сопротивление пленок от 10^5 до 10^{10} ом/см и величину эффективной подвижности от 5 до $250 + 300$ см²/в сек. Тем самым использование данного испарителя позволяет исключить дополнительную термообработку слоев сульфида кадмия, обычно применяемую для повышения сопротивления и подвижности электронов в пленках, полученных напылением в вакууме из молекулярного пучка.

Кроме того, испаритель позволяет снизить загрязнение пленки остаточными газами в вакуумной камере установки. Действительно, если в начальный момент напыление проводить при закрытой заслонке, то первые порции паров сульфида кадмия захватят пары наиболее агрессивных веществ, находящихся внутри "горячего" экрана, и вместе с ними осадут на заслонке. Так как давление внутри "горячего" экрана на 2-3 порядка выше давления внутри вакуумной камеры, то поток остаточных газов из вакуумной камеры внутрь экрана будет затруднен.

Применение специального испарителя со многими точками температурного контроля, управление процессом выхода на стац-

нарный тепловой режим испарения, поддержание этого стационарного режима вызывает необходимость применения аппаратуры автоматического управления процессом осаждения, который состоит из двух этапов: этапа обезгаживания испарителя, держателя подложки, самой подложки, испаряемого материала и экрана и этапа рабочего процесса осаждения пленки.

Для осуществления автоматического управления процессом осаждения разработана аппаратура программного регулирования, стабилизации и регистрации параметров термического напыления в вакууме (АПСР). Аппаратура дает возможность осуществлять: разогрев испарителя и подложки по определенной, заранее заданной программе для предварительного их обезгаживания, автоматический перевод из режима программного разогрева на режим стабилизации, стабилизацию скорости испарения и температуры подложки на заданных уровнях, измерение толщины напыляемой пленки в процессе осаждения и автоматическое окончание напыления при достижении заданной толщины пленки.

В связи с тем, что вакуумные установки могут оснащаться различными датчиками, аппаратура рассчитана на работу как от датчиков скорости испарения, так и термопар или любых других устройств, измеряющих температуру испарителя и подложки.

Аппаратура автоматического управления процессом осаждения обеспечивает:

1. Питание испарителя и нагревателя подложки мощностью до 3,5 ква.
2. Программный разогрев до заданной температуры с длительностью цикла от 20 мин до 24 часов.
3. Стабилизацию скорости испарения в диапазоне $10 - 200 \text{ Å}^0/\text{сек}$ с точностью 5%.
4. Стабилизацию температуры в диапазоне $100 - 1500^\circ\text{C}$ с точностью 2°C .

Комплект аппаратуры включает также аппаратуру регистрации следующих параметров вакуумного осаждения:

1. Температуры испарителя в диапазоне $400^\circ\text{C} - 1500^\circ\text{C}$.
2. Температуры подложки в диапазоне $50^\circ\text{C} - 500^\circ\text{C}$.
3. Давления в камере при использовании вакуумметра ВAB-III в диапазоне $5 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст.
4. Скорости испарения в диапазоне $10 - 200 \text{ Å}^0/\text{сек}$.
5. Величины активного сопротивления в процессе старения в диапазоне $10,0 + 2000 \text{ ом}/\text{см}^2$.

Аппаратура программного регулирования и стабилизации

Системы стабилизации имеют два функционально (и в значительной части аппаратно) одинаково построенных канала (рис. 2).

Канал управления режимом испарителя включает: испаритель, датчик скорости испарения (или датчик температуры: если скорость испарения контролируется по температуре испарителя), устройство задания параметра, программное устройство, регулятор и усилитель мощности.

В вакуумных напылительных установках могут быть использованы испарители самой различной конструкции, у которых статические характеристики (зависимость температуры испарителя от подведенной мощности) и динамические характеристики (постоянные времени) испарителей могут лежать в широком диапазоне.

Это обусловило необходимость разработки специального регулятора, обеспечивающего необходимые точность регулирования и динамические характеристики системы стабилизации.

Регулятор рассчитан на работу с датчиками, выходной сигнал которых представляет собой ЭДС постоянного тока величиной до 20 мВ. При стабилизации температуры испарителя таким датчиком может являться термопара, например, платино-платино-родиевая. В регуляторе предусмотрена компенсация изменения ЭДС термопары за счет неустойчивости температуры холодных концов. При работе регулятора от нетермопарного датчика сигнал подается, минуя компенсационное устройство.

Для управления мощностью испарителя (а также и нагревателя подложки) в аппаратуре использован усилитель мощности на тиристорах, состоящий из блока управления и самих тиристоров.

За счет изменения напряжения на выходе блока управления тиристорами можно управлять величиной мощности в испарителе.

Программный разогрев испарителя и подложки производится по сигналу программного задатчика, который представляет собой электромеханическое устройство с кулачковым носителем программы.

В системе стабилизации скорости испарения в качестве датчика скорости используется измеритель толщины и скорости ИСТИ-1 [2]. Принципы действия приборов основаны на частичной ионизации электронами паров осаждаемого материала в ионизационном датчике и измерении полученного ионного тока, пропорционального количеству паров вещества, проходящего через рабочий объем датчика.

Для разделения ионного тока остаточных газов и ионного тока

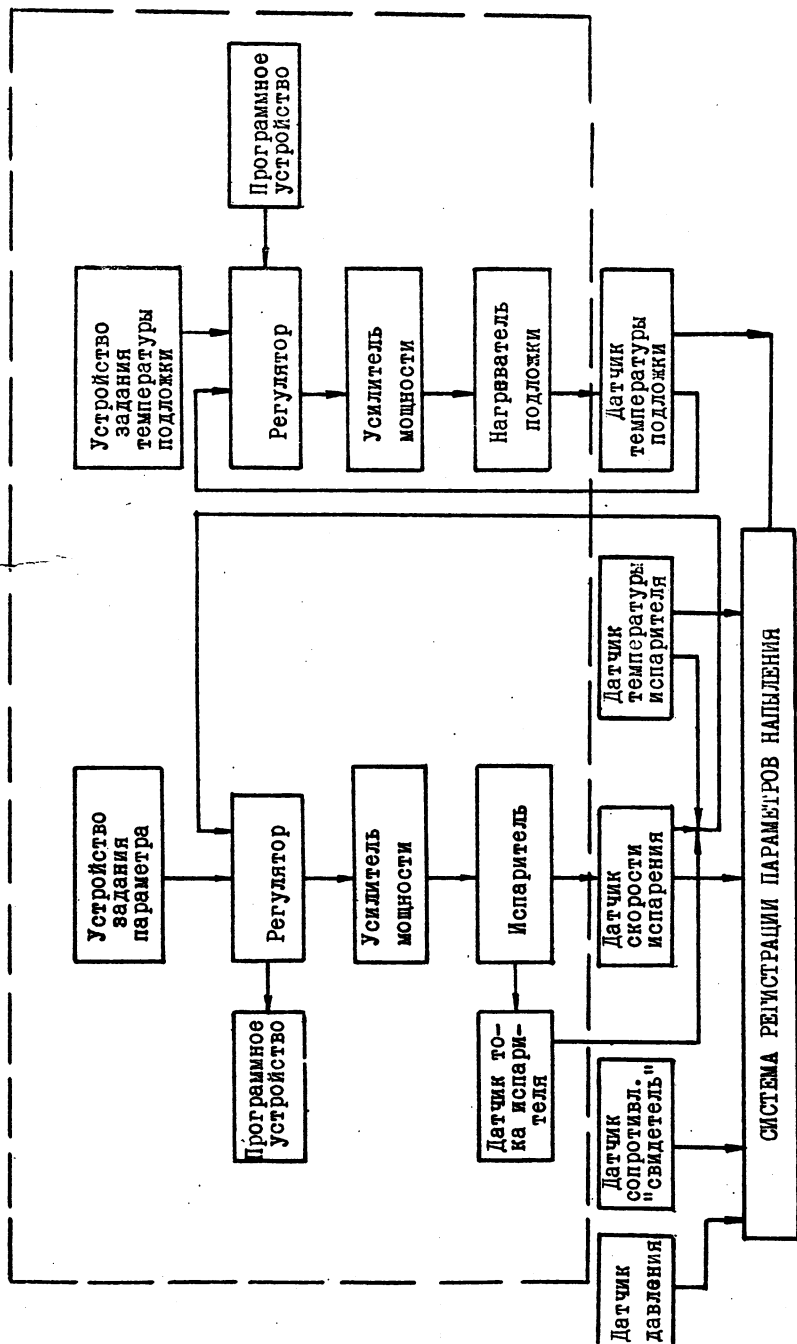


Рис. 2. Система стабилизации параметров наполнения

испаряемого вещества применена модуляция направленного потока молекул.

В измерительном приборе выделяется переменная составляющая полного тока датчика, пропорциональная скорости испарения материалов. Этот сигнал после усиления и детектирования подается на стрелочный индикатор, показания которого пропорциональны скорости осаждения, на интегратор для выработки сигнала, пропорционального толщине и на выходной разъем для использования в системе регулирования.

Прибор ИСТИ-I имеет следующие технические характеристики:

1. Диапазон измерительных скоростей испарения 10-200 $\text{\AA}/\text{сек}$.
2. Максимальная относительная погрешность измерения скорости испарения не более $\pm 15\%$.
3. Диапазон измеряемых толщин 1000 + 10000 \AA .
4. Максимальная относительная погрешность измерения толщины не более $\pm 3\%$.
5. Прибор выдает сигнал об окончании напыления при достижении заданной толщины пленки.

Система управления режимом испарителя работает следующим образом:

Ручным задатчиком в регуляторе устанавливается напряжение, равное напряжению с датчика при требуемом значении параметра.

В зависимости от того, какой параметр будет поддерживаться во время цикла напыления (скорость испарения или температура испарителя) на регулятор поступает сигнал соответствующего датчика - прибора ИСТИ-I или термопары. Программный задатчик устанавливается на требуемую программу.

При работе системы регулирования температуры испарителя, разогрев по программе производится с контролем сигнала от термопары.

В случае же работы системы с датчиком скорости ИСТИ-I, программный разогрев производится с контролем тока, протекающего через испаритель.

После разогрева испарителя и его обезгаживания происходит автоматическое переключение системы на режим поддержания заданного параметра, путем отключения со входа регулятора программного задатчика и подачи эталонного сигнала от ручного задатчика параметра.

Сигнал ручного задатчика сравнивается с сигналом от датчика параметра. Разность этих сигналов поступает на регулятор,

формирующий требуемый динамический закон регулирования. Напряжение с выхода регулятора поступает на суммирующий усилитель и далее на усилитель мощности на тиристорах. Испаритель разогревается до температуры, при которой устанавливается необходимая скорость испарения материала. При отклонении фактического значения параметра (скорости испарения или температуры испарителя) от заданного, на входе регулятора появляется сигнал, увеличивающий или уменьшающий мощность, подводимую к испарителю. Фактический параметр возвращается к заданному значению.

Аналогично работает система программного регулирования и стабилизации температуры подложки.

Аппаратура регистрации

Аппаратура регистрации рассчитана на запись пяти параметров: скорости испарения, температуры испарителя, температуры подложки, давления в камере и величины активного сопротивления.

Регистрация параметров осуществляется графическим путем. На диаграммной бумаге пятиканального самопишущего прибора Н-320/5 записываются отклонения (нестабильность) от заданных значений параметров. Все пять каналов аппаратуры регистрации построены по одинаковой схеме и отличаются только сопротивлениями делителей напряжения, необходимых для нормирования сигналов датчиков. Функциональная схема одного канала регистрации (усилителя-компенсатора) приведена на рис. 3.

Усилитель-компенсатор состоит из входного фотоэлектрического усилителя, преобразующего любой уровень сигналов от датчиков в напряжение от 0 до 9 в. Это напряжение компенсируется напряжением компенсатора и сигнал небаланса поступает на делитель, предназначенный для изменения шкалы регистратора. В усилителе-компенсаторе применены фотоэлектрические усилители типа Ф 120, чувствительным элементом которых является фотоэлектрический гальванометр. В случае измерения величины активного сопротивления на функциональной плате размещается измерительный мост и схема стабилизированного источника питания моста.

Напряжение с делителей переключателя шкал поступает на выходной фотоэлектрический усилитель и затем на головку самопишущего прибора.

Датчиками системы регистрации являются:

а) температуры испарителя - термопары типа ПП-I или ПР80/6.

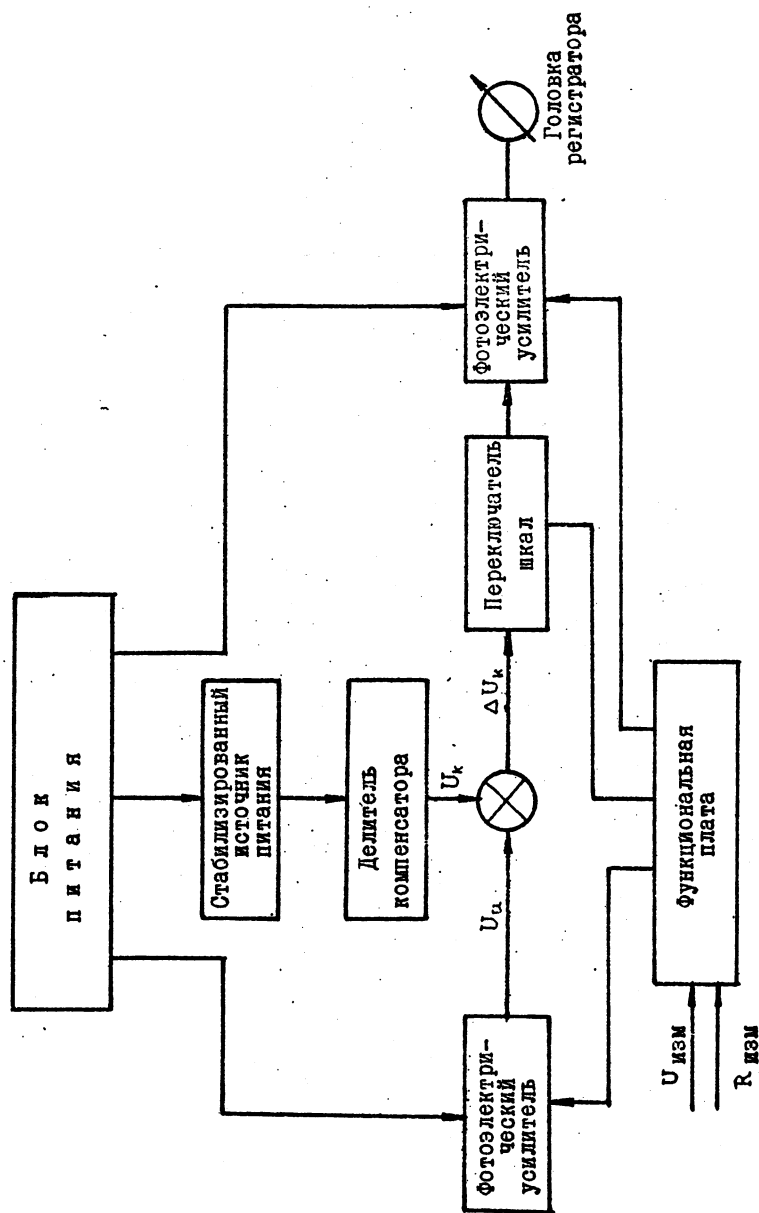


Рис. 3.

- б) температуры подложки - термопары типа ХК, ХА.
- в) давления в камере - вакуумметр ВАБ-І-П.
- г) скорости напыления - прибор ИСТИ-І.
- д) сопротивления - контрольное сопротивление "свидетель".

Результаты испытаний системы стабилизации скорости испарения показали, что, если при отсутствии стабилизации и при изменении напряжения сети на $\pm 10\%$, скорость испарения изменялась на $\pm 20\%$, то при наличии системы стабилизации, изменение скорости испарения при том же изменении напряжения сети составило $\pm 4\%$.

Одним из существенных возмущений, действующих на систему стабилизации, является изменение скорости испарения за счет уменьшения или увеличения поверхности испаряемого материала в испарителе. При испытаниях это явление имитировалось перекрытием заслонкой части потока испаряемого материала. Скорость испарения восстанавливалась до первоначального значения через 2-3 секунды. Интересно отметить, что значения температуры и тока испарителя при открытой и закрытой заслонке имеют разное значение. Это говорит о том, что в испарителях, где за цикл испарения происходит существенное изменение поверхности испаряемого материала, стабилизация температуры испарителя не дает возможность поддерживать неизменной скорость испарения.

Но для тех испарителей, где поверхность испаряемого материала остается постоянной в процессе испарения или где за счет конструктивных особенностей тигля скорость испарения не зависит от размера поверхности испарения, стабилизация температуры является предпочтительнее вследствие простоты датчика.

Испытания системы стабилизации температуры испарителя и подложки показали, что может быть получена точность до 2°C .

Система обезгаживания испарителя, испаряемого материала и подложки обеспечивала разогрев испарителя по заданной программе с точностью не хуже $\pm 15^{\circ}\text{C}$.

Из результатов испытаний аппаратуры можно сделать следующие выводы:

1. Использование датчика скорости испарения в системе стабилизации дает наилучшие результаты по поддержанию заданий скорости испарения с любым испарителем.

2. Стабилизация температуры испарителя для поддержания постоянной скорости испарения допустима лишь со специальными типами испарителей или при достаточно коротком интервале длительности испарения.

3. Разработанная система стабилизации скорости испарения с использованием ионизационного датчика скорости поддерживает заданное значение с точностью не хуже $\pm 5\%$ от текущего значения.

4. Системы стабилизации температуры испарителя и подложки обеспечивают ее поддержание с точностью не хуже $\pm 2^{\circ}\text{C}$.

5. Система обезгаживания испарителя, испаряемого материала и подложки обеспечивает разогрев по заданной программе с точностью не хуже $\pm 10^{\circ}\text{C}$.

В ы в о д ы

1. Применение испарителя специальной конструкции с "горячим" экраном позволяет расширить диапазон электрических параметров пленок сульфида кадмия, получаемых методом напыления в вакууме, например, удельного сопротивления до 10^{10} ом/см и эффективной подвижности электронов до $300 \text{ см}^2/\text{в.сек}$.

2. Применение экрана уменьшает влияние остаточных газов, входящих в рабочий объем, и тем самым снижает требования к максимальной степени разряжения вакуумной установки.

3. Использование описанного испарителя и системы контроля и управления процессом осаждения позволило получить воспроизводимость пленок сульфида кадмия по удельному сопротивлению в пределах 10% .

Л и т е р а т у р а

1. Drescher. - Solid State Electronics, 1962, vol.5, p.205.

2. Браунелл, Мак-Ленан, Рейми и Уайт. Автоматическая установка для нанесения тонких пленок испарением в вакууме, обеспечивающая высокую стабильность параметров процесса. Приборы для научных исследований 1964 г. № 9, стр. 47-51.

3. Баденко В.В. Температурный контроль в вакууме в условиях испарения. Электротермия, 1964 г. № 40, стр. 9-10.