

При этом те области поликристаллического слоя, где были металлические вкрапления, оказались окрашенными в различные цвета в зависимости от химического состава вкрапления.



Рисунок 3 – Образцы элементов экранов с двухслойным композиционным покрытием: а – до обработки; б – после обработки магнитоплазменным компрессором

УДК 621.793

Есипович Д.А., Опиок А.А.

## **РЕЗИСТИВНОЕ НАПЫЛЕНИЕ**

*БНТУ, Минск*

*Научный руководитель Комаровская В.М.*

Тонкие пленки, наносимые в вакууме, широко применяются в производстве дискретных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. Получение высококачественных и воспроизводимых по электрофизическим параметрам тонкопленочных слоев является одним из важнейших технологических процессов формирования структур как дискретных диодов и транзисторов, так и активных и пассивных элементов интегральных микросхем.

Таким образом, от совершенства технологических процессов нанесения тонких пленок в значительной степени зависят надежность и качество изделий микроэлектроники, технический уровень и экономические показатели их производства.

Тонкопленочная технология базируется на сложных физико-химических процессах и применении различных металлов и диэлектриков. Так, тонкопленочные резисторы, электроды конденсаторов и межсоединения выполняют осаждением металлических пленок, а межслойную изоляцию и защитные покрытия – диэлектрических.

В настоящее время исследованиям в данной области уделяется значительный интерес. Резистивное напыление – это первый метод нанесения тонкопленочных покрытий в вакууме, который до недавнего времени является наиболее распространенным. Отличительными его особенностями являются техническая простота, удобство контроля и регулирования режимов работы испарителя и возможность получения покрытий различного химического состава.

В резистивных испарителях тепловая энергия для нагрева испаряемого вещества образуется за счет выделения джоулева тепла при прохождении электрического тока через нагреватель.

К материалам, используемым для изготовления нагревателей резистивных испарителей, предъявляются следующие требования:

1. Давление пара материала нагревателя при температуре испарения осаждаемого вещества должно быть пренебрежительно малым;
2. Материал нагревателя должен хорошо смачиваться расплавленным испаряемым веществом, так как это необходимо для обеспечения хорошего теплового контакта между ними;
3. Между материалом нагревателя и испаряемым веществом не должны возникать никакие химические реакции и образовываться легколетучие сплавы этих веществ, так как в противном случае происходит загрязнение наносимых пленок и разрушение нагревателей. Для нанесения покрытий резистивным методом применяются различные конструкции и способы испарения металлов и сплавов. Наиболее широко

используются проволочные, ленточные, тигельные и автотигельные испарители дискретного действия.

Проволочные испарители, основное достоинство которых заключается в простоте устройства и высокой экономичности, изготавливаются из проволоки тугоплавких металлов (W, Mo, Ta) и выпускаются самых разнообразных форм (в виде петли, цилиндрической спирали, конической спирали, V-образной формы и др.). Применяются для испарения веществ, которые смачивают материал нагревателя. При этом расплавленное вещество силами поверхностного натяжения удерживается в виде капли на проволочном нагревателе. Применяемая проволока (обычно диаметром от 0,5 до 1,5 мм) должна иметь по всей длине одинаковое сечение, иначе из-за местных перегревов будет нарушена равномерность получаемого слоя и, кроме того, проволока быстро перегорит. При хорошем смачивании материала нагревателя испаряемым металлом всегда имеет место более или менее активное взаимодействие между ними, что в конечном счете приводит к разрушению испарителя и снижению чистоты наносимого покрытия.

Ленточные испарители изготавливаются из тонких листов тугоплавких металлов и имеют специальные углубления (в виде желобков, лодочек, чашек или корбочек), в которых размещается испаряемый материал. Они применяются для испарения порошковых материалов и неорганических соединений. Эти испарители, так же как и проволочные просты по конструкции, но по сравнению с последними потребляют большую мощность вследствие значительных потерь на тепловое излучение. Ленточные испарители имеют большую направленность испарения.

Тигельные испарители могут применяться для испарения материалов, не вступающих в реакцию с материалом тигля и не образующих с ним сплавов. Они изготавливаются из тугоплавких металлов (W, Mo, Ta) из окислов металлов ( $Al_2O_3$ ,  $BeO$ ,  $ZrO_2$ ,  $ThO_2$  и др.) и графита. Для осаждения материалов

с низкой температурой испарения можно также использовать тигли из тугоплавкого стекла и кварца.

Тигли из окиси алюминия используются для металлов температура испарения которых ниже  $1600^{\circ}\text{C}$  (Cu, Mn, Fe, Sn); тигли из окиси бериллия могут быть использованы до температуры  $1750^{\circ}\text{C}$ , окиси тория – до  $2200^{\circ}\text{C}$ . При испарении материалов при температурах порядка  $2500^{\circ}\text{C}$  применяются тигли из графита. Однако многие материалы при высоких температурах реагируют с углеродом с образованием карбидов и поэтому не могут быть испарены из таких тиглей (например, Al, Si, Ti). Из графитовых испарителей эффективно испаряются Be, Ag, Sr. Многие окислы активно восстанавливаются углеродом, что дает возможность очищать металлы с помощью графитовых тиглей.

Основное достоинство тигельных испарителей состоит в том, что с их помощью можно осуществлять испарение большого количества веществ. По сравнению с проволочными и ленточными испарителями они являются более инерционными, так как малая теплопроводность материалов не позволяет обеспечить быстрый нагрев испаряемого материала. Кроме того, тигли из окислов не допускают быстрого нагрева ввиду опасности их разрушения тепловым ударом. К недостаткам тигельных испарителей следует также отнести и то, что с их помощью может быть получен только узкий пучок испаряемого вещества.

Для испарения сплавов и веществ сложного состава (например, металлокерамических смесей), которые состоят из компонентов с резко отличными скоростями испарения, применяются поверхностные испарители дискретного действия. В них используется метод взрывного испарения. Температура поверхности испарителя, на которую падают мелкодисперсные частицы, выбирается такой, чтобы все падающие частицы сложного вещества мгновенно испарялись. Подача мелкодисперсных частиц на раскаленную поверхность

производится со скоростью, равной скорости испарения частиц этого вещества, что обеспечивает получение пленок требуемого состава. Широкое распространение получили, так называемые, автотигельные испарители, в которых капля или ванна расплавленного металла соприкасается с тем же металлом, находящимся в твердом состоянии. Такой способ позволяет получать покрытия высокой чистоты.

Методу резистивного испарения присущи недостатки, значительно снижающие область его использования. К числу основных недостатков метода следует отнести отсутствие заметной ионизации паров испаряемого материала, трудности управления основными параметрами потока, высокую инерционность испарителей.

УДК 621

Казачёк А.А., Бей К.И.

## **ВАКУУМНАЯ ФОРМОВКА ПОЛИМЕРОВ**

*БНТУ, Минск*

*Научный руководитель Комаровская В.М.*

Вакуумная формовка – это производство изделий из термопластичных материалов в горячем виде в условиях вакуума. Эта методика применяется в основном при серийном производстве объёмных изделий из пластика.

Вакуумная формовка, в сущности, является вариантом вытяжки, при которой листовой пластик, расположенный над или под матрицей (инструментом формовки), нагревается до определенной температуры, и повторяет форму матрицы за счет создания вакуума между пластиком и матрицей.

Производственный процесс вакуумной формовки не требует наличия мощного оборудования, высокопрочных матричных форм и значительных расходов энергоносителей. Вследствие этого производство считается экономным, а готовые изделия имеют низкую себестоимость. Также к преимуществам