

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ИЗДЕЛИЙ
ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики
и радиоэлектроники в качестве пособия для специальностей
1-36 04 01 «Программно-управляемые электронно-оптические системы»,
1-39 02 02 «Проектирование и производство программно-управляемых
электронных средств»*

Минск БГУИР 2015

УДК 621.382-027.31(076.5)

ББК 32.85-02я73

П79

А в т о р ы:

А. П. Достанко, С. В. Бордусов, С. И. Мадвейко, Е. В. Телеш

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра энергетики и электронной техники учреждения образования
«Полоцкий государственный университет» (протокол №4 от 17.12.2014 г.);

профессор кафедры технологии металлов учреждения образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет»,
доктор физико-математических наук, профессор Н. К. Толочко

П79

Проектирование и производство изделий интегральной электроники. Лабораторный практикум : пособие / А. П. Достанко [и др.] . – Минск : БГУИР, 2015. – 82 с. : ил.

ISBN 978-985-543-147-4.

Содержит пять лабораторных работ по изучению и исследованию конструкций и технологии тонкопленочных и толстопленочных ГИС и микросборок, формирования диэлектрических пленок методом ионно-лучевого распыления, лазерного формообразования отверстий, методов корректировки номиналов тонкопленочных элементов гибридных интегральных схем.

Предназначено для закрепления и углубления теоретических знаний, приобретения практических навыков работы с оборудованием и изделиями интегральной электроники.

УДК 621.382-027.31(076.5)
ББК 32.85-02я73

ISBN 978-985-543-147-4

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2015

СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1 КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И МИКРОСБОРОК.....	4
Лабораторная работа №2 КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЯ ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫХ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И МИКРОСБОРОК.....	26
Лабораторная работа №3 ФОРМИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ИОННО-ЛУЧЕВОГО РАСПЫЛЕНИЯ.....	39
Лабораторная работа №4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ.....	50
Лабораторная работа №5 КОРРЕКТИРОВКА НОМИНАЛОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ.....	71
Литература.....	80

Лабораторная работа №1

КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И МИКРОСБОРОК

Цель работы: изучение конструкции элементов гибридных интегральных схем и микросборок, конструкторско-технологических требований и маршрутной технологии их изготовления.

1.1. Краткие теоретические сведения

Тонкопленочная технология с каждым годом находит все более широкое применение в новой интенсивно развивающейся отрасли – макро- и микроэлектронике. Тонкопленочное направление интегральной электроники основано на последовательном наращивании пленок различных материалов на общем основании (подложке) с одновременным формированием из этих пленок пассивных элементов и внутрисхемных соединений.

1.1.1. Подложки тонкопленочных гибридных интегральных схем

Подложки в пленочных и гибридных интегральных микросхемах играют важную роль. Во-первых, подложка является конструктивной основой пленочной микросхемы: на нее наносят в виде тонких пленок пассивные элементы схемы и формируют контактные площадки для активных структур (кристаллов). Во-вторых, от материала подложки и его обработки существенно зависят параметры осаждаемых пленочных слоев и надежность всей микросхемы. Материал подложки должен обладать высоким удельным электрическим сопротивлением, быть механически прочным при небольших толщинах, химически инертным к осаждаемым веществам, иметь высокую физическую и химическую стойкость при нагревании до нескольких сот градусов, не выделять газов в вакууме, обладать хорошей полируемостью поверхности, иметь температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) по возможности близким к ТКЛР наносимых слоев, быть недефицитным и иметь невысокую стоимость. Наиболее широкое применение при создании маломощных гибридных интегральных схем (ГИС), не испытывающих больших механических воздействий, получили подложки из бесщелочных боросиликатных стекол С41-1, С48-3, а также ситаллы, например СТ50-1. Для мощных схем применяют керамику «Поликор», 96%-ю окись алюминия, сапфир. Для особо мощных ГИС рекомендуется 98%-я окись бериллия, брокерит-9.

Подложки, применяемые для ГИС, имеют, как правило, квадратную или прямоугольную форму. Промышленностью выпускаются подложки различных типоразмеров. Однако в качестве базовых преимущественно используются подложки размером 100×100 и 50×50 мм из стекла и 48×60 мм – из ситалла и керамики. Другие типоразмеры подложек получают делением сторон базовой под-

ложки на части. Например, для подложки из ситалла в качестве делителя чаще всего используют цифры 2 и 3 или кратные им. По толщине наибольшее распространение получили подложки размером 0,6; 1 и 1,6 мм. В технически обоснованных случаях применяют и более тонкие подложки до 0,2 мм.

Материал подложки и технология ее изготовления должны обеспечивать требуемый класс чистоты поверхности. Шероховатость поверхности подложки должна соответствовать не менее чем 14-му классу чистоты обработки. Высота гребешков микрорельефа допускается не более 25 нм. Высокая чистота обработки поверхности подложки необходима для обеспечения однородности и воспроизводимости электрических параметров пленочных элементов микросхемы и для создания требуемых условий проведения процессов вакуумного осаждения или фотолитографии.

1.1.2. Резисторы

Материалы, применяемые для изготовления тонкопленочных резисторов, должны обеспечивать возможность получения широкого диапазона стабильных сопротивлений, обладающих низким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) и высокой коррозионной стойкостью. Тонкопленочные резисторы можно изготавливать из металлов, сплавов, полупроводников и смесей металлов и неметаллов (керметов).

С конструктивной точки зрения применяются резисторы различной конфигурации, которые завершаются контактными переходами, образованными резистивной полоской и контактной площадкой (рис. 1.1).

Наиболее оптимальна форма резистора, изображенного на рис. 1.1, а. Однако, если расчетная длина резистора оказывается чрезмерно большой и резистор не может быть размещен на подложке в одну линию, его выполняют в виде изогнутых полосок – меандр (рис. 1.1, б, в).

При масочном методе изготовления резисторов отношение длины полоски l к ширине b не должно превышать 10 (см. рис. 1.1, а, в). Для резисторов формы меандр (см. рис. 1.1, б) отношение амплитуды меандра к расстоянию между полосками также не должно превышать 10.

При фотолитографическом методе эти соотношения не критичны и зависят от площади, отведенной для резистора.

Конструктивный расчет резисторов линейчатого типа сводится к определению размеров его длины l и ширины b . Здесь важно соблюдать условие, чтобы при заданной величине сопротивления резистор обеспечил рассеяние заданной мощности P_a . Основным параметром пленочного резистора является коэффициент формы K_ϕ :

$$K_\phi = \frac{l}{b} = \frac{R}{\rho_\square}, \quad (1.1)$$

где l – длина резистора;

b – его ширина;

R – сопротивление, Ом;

ρ_{\square} – удельное поверхностное сопротивление, Ом/□.

Удельное поверхностное сопротивление ρ_{\square} представляет собой сопротивление квадрата пленки любого размера и численно равно отношению удельного сопротивления пленочного слоя к его толщине, что наглядно следует из соотношения $R = \rho \frac{l}{db}$ при $l = b$, где d – толщина пленки.

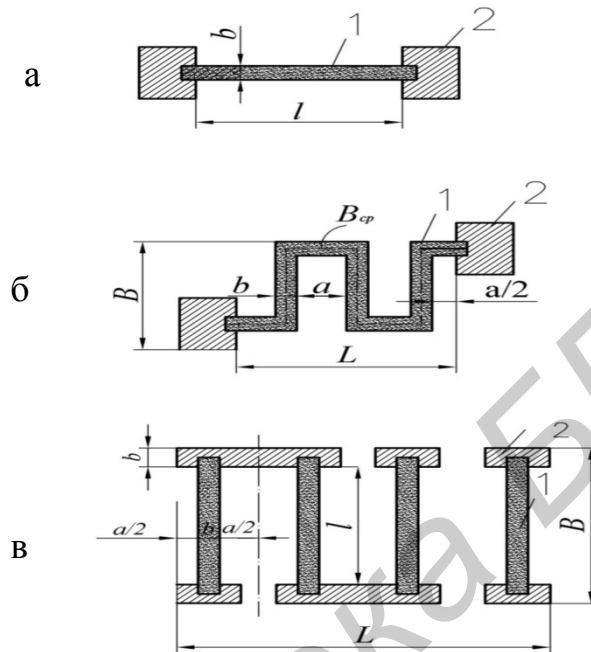


Рис. 1.1. Тонкопленочные резисторы различных конструкций:
 а – линейчатый; б – меандрический; в – меандрический с проводящими элементами;
 1 – резистивная пленка; 2 – контактная площадка

Удельная мощность, которую может рассеять единица площади резистора:

$$P_0 = \frac{P_a}{S}. \quad (1.2)$$

Тогда расчетная ширина резистора B_p определяется из условия допустимой рассеиваемой удельной мощности P_0 как

$$B_p = \sqrt{\frac{\rho_{\square}}{R} \cdot \frac{P_a}{P_0}}. \quad (1.3)$$

Расчетная ширина резистора должна быть не меньше той, которая может быть выполнена при современном состоянии технологии. За ширину резистора принимают ближайшее к расчетному большее целое значение, кратное шагу координатной сетки, принятому для чертежа топологии. После окончательного выбора b определяется длина резистора l , если $K_{\varphi} > 1$:

$$l = bK_{\varphi}. \quad (1.4)$$

Если $K_\phi < 1$, то

$$l_p = \sqrt{\frac{R}{\rho_\square} \cdot \frac{P_a}{P_0}} \quad (1.5)$$

В настоящее время при масочном методе обычные предельные размеры резистора составляют $b \approx 0,2$ мм и $l \approx 0,3$ мм. Предельные размеры при фотолитографическом методе $b = l = 0,1$ мм.

Выбор удельного поверхностного сопротивления ρ_\square может быть сделан по графику рис. 1.2, а затем исходя из ρ_\square , может быть выбран материал резистивной пленки.

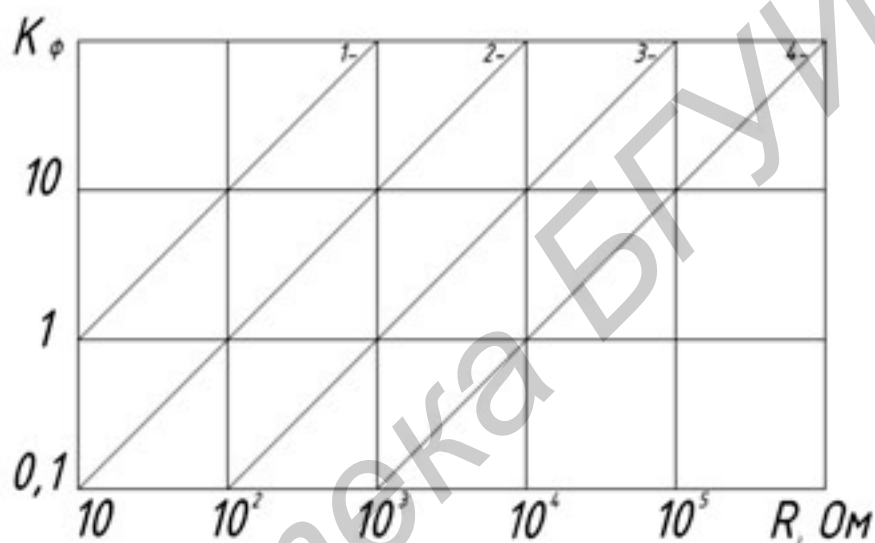


Рис. 1.2. График для выбора удельного поверхностного сопротивления:
 1 — $\rho_\square = 10$ Ом/□; 2 — $\rho_\square = 100$ Ом/□; 3 — $\rho_\square = 1000$ Ом/□; 4 — $\rho_\square = 10\,000$ Ом/□

В тех случаях когда $K_\phi > 10$, целесообразно конструирование резисторов сложной формы. Полагая (из рис. 1.1, б), что длина резистора равна длине его средней линии (это допущение дает несколько завышенное сопротивление), имеем

$$K_\phi = \frac{l_{cp}}{b} \quad (1.6)$$

Из рис. 1.1, б следует

$$l_{cp} = n(a + b), \quad (1.7)$$

где n — число Z-образных элементов,

$$L = n(a + b), \quad (1.8)$$

$$B = \frac{l_{\text{ср}} - an}{n}. \quad (1.9)$$

Площадь, занимаемая резистором вместе с изолирующей зоной, минимальна, если резистор имеет квадратную форму, т. е. $L = B$, тогда, приравнявая выражения (1.6) и (1.9) и решая полученные соотношения относительно n , получим

$$n = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{a}{a+b}\right)^2 + \frac{l_{\text{ср}}}{2(a+b)}} - \frac{a}{2(a+b)}. \quad (1.10)$$

Обозначим $\frac{a}{b} = m$, тогда

$$n = \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{m}{m+1}\right)^2 + \frac{l_{\text{ср}}}{2(m+1)}} - \frac{m}{2(m+1)}. \quad (1.11)$$

Величинами $\frac{1}{4} \left(\frac{m}{m+1}\right)^2$ и $\frac{m}{2(m+1)}$ по сравнению с отношением $\frac{l_{\text{ср}}}{b}$ можно пренебречь, тогда

$$n = \sqrt{\frac{K_{\varphi}}{m+1}}. \quad (1.12)$$

Обычно n в формуле (1.12) бывает числом с дробным остатком. Округляя до ближайшего большего целого, определяем размеры резистора L и B по формулам (1.8) и (1.9).

В заключение необходимо проверить условие обеспечения жесткости маски:

$$\frac{B-b}{a} \leq 10. \quad (1.13)$$

Для фотолитографического метода это условие не критично.

1.1.3. Конденсаторы

Характеристики тонкопленочных конденсаторов зависят как от материала диэлектрического слоя, так и от материала обкладок. Материал обкладок конденсатора должен удовлетворять следующим требованиям: иметь низкое электрическое сопротивление (для ВЧ конденсаторов); ТКЛР, равный или близкий к ТКЛР подложки и диэлектрического слоя; иметь хорошую адгезию как к подложке, так и к ранее напыленным пленкам; обладать высокой антикоррозионной стойкостью в условиях агрессивной среды.

Для изготовления обкладок конденсаторов чаще всего применяются следующие материалы: алюминий А-99 ГОСТ 11069-74, тантал ТВЧ ТУ 95.311-75;

титан ВТ1-0 ТУ 1-5-111-73. Алюминий по сравнению с другими металлами (например, никелем, хромом, золотом) обеспечивает значительно меньшее число коротких замыканий между обкладками через диэлектрик. Это объясняется низкой температурой испарения алюминия и пониженной подвижностью его атомов на поверхности подложки из-за тенденции к окислению.

Материалы, применяемые для изготовления диэлектрических слоев, должны удовлетворять следующим требованиям: иметь высокое значение диэлектрической проницаемости; минимальный температурный коэффициент емкости (ТКЕ); минимальные потери энергии на высокой частоте ($\text{tg}\delta$); обладать высокой влагустойчивостью и теплостойкостью; обеспечивать получение плотных и однородных пленок; иметь хорошую адгезию как к подложке, так и к материалам обкладок; обладать высокой электрической прочностью.

Наиболее часто применяют моноокись кремния SiO_2 , трехсернистую сурьму Sb_2S_3 , моноокись германия GeO_2 . Можно также использовать сульфид цинка ZnS , фтористый магний MgF_2 и некоторые редкоземельные окислы и фтористые соединения. Возможно применение ферроэлектрических пленок, например, титаната бария BaTiO_3 и смеси титаната бария с титанатом стронция $\text{BaTiO}_3 + \text{SrTiO}_3$. Для получения конденсаторов большой емкости используют анодированные пленки тантала Ta_2O_5 , а также анодированный алюминий Al_2O_3 .

В тонкопленочных микросхемах различают преимущественно три варианта конструкции конденсаторов: с трехслойной структурой (две проводящие обкладки, разделенные диэлектриком); многослойные, отличающиеся от предыдущего варианта повторяющимся нанесением проводящих и диэлектрических пленок; гребенчатые, у которых емкость образуется за счет краевого эффекта. Многослойные конденсаторы выполняются для расчетной площади $> 1-2 \text{ мм}^2$. Разновидности конденсаторов приведены на рис. 1.3.

Если расчетная площадь конденсатора $S < 1 \text{ мм}^2$, его можно выполнять либо в виде последовательно соединенных конденсаторов (рис. 1.3, в), либо в виде двух пленочных обкладок и подложки в качестве диэлектрика (рис. 1.3, г). Такая конструкция позволяет получить емкость порядка нескольких пикофарад на 1 см^2 площади. Для получения еще меньшей емкости (доли пикофарлада) можно выполнить гребенчатые конденсаторы (рис. 1.3, д) или конденсаторы в виде двух параллельных полосок (рис. 1.3, е). Емкость гребенчатого конденсатора определяется по формуле

$$C = \beta \epsilon_p l, \quad (1.14)$$

где β – коэффициент, определяемый по графику, приведенному на рис. 1.4, б;

l – длина общей границы двух гребенок;

ϵ_p – результирующая проницаемость подложки и среды (воздух или заливка):

$$\epsilon_p = \frac{\epsilon_n + \epsilon_c}{2}, \quad (1.15)$$

где ϵ_n – проницаемость подложки;

ϵ_c – проницаемость среды.

Конструктивный расчет тонкопленочного конденсатора сводится к определению его геометрических размеров S и d и удельной емкости C_0 .

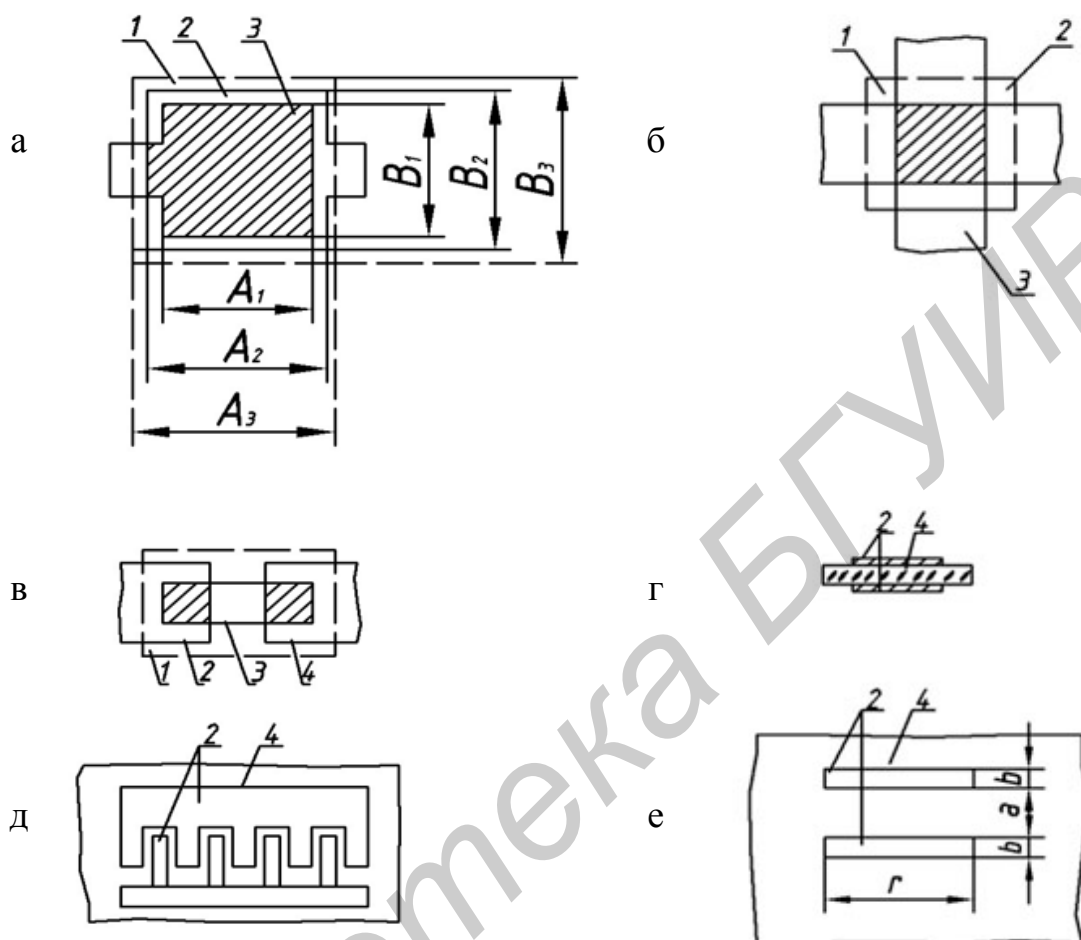


Рис. 1.3. Разновидности конструкций тонкопленочных конденсаторов:
 а – с активной площадью перекрытия обкладок $S > 5 \text{ мм}^2$; б – с $S = 1\text{--}5 \text{ мм}^2$;
 в, г – с $S < 1 \text{ мм}^2$; д – гребенчатая; е – в виде двух параллельно расположенных
 проводящих пленок;
 1 – диэлектрик; 2, 3 – обкладки; 4 – подложка

Исходными для расчета являются: номинальная емкость C (пФ), относительное отклонение номинального значения емкости γ (%), рабочее напряжение U_p (В), рабочая частота f (МГц).

Расчет конденсаторов с помощью перекрытия обкладок 5 мм^2 и более (рис. 1.3, а) ведут в следующем порядке. Вначале определяют толщину диэлектрика:

$$d \geq \frac{U_p K_3}{E_{\text{пр}}}, \quad (1.16)$$

где $E_{\text{пр}}$ – пробивное напряжение для выбранного материала диэлектрика (В/см);
 K_3 – коэффициент запаса ($K_3 = 2\text{--}4$).

Затем вычисляют максимально допустимую относительную погрешность воспроизведения площади конденсатора:

$$\gamma_{C_{\text{доп}}} = \gamma_c - \gamma_{C_0} - \gamma_{C_t} - \gamma_{C_{cm}}, \quad (1.17)$$

где γ_{C_0} – погрешность воспроизведения удельной емкости (составляет 5–10 %);

γ_{C_t} – температурная погрешность емкости:

$$\gamma_{C_t} = \alpha_c (T - 20 \text{ } ^\circ\text{C}), \quad (1.18)$$

где α_c – температурный коэффициент емкости (ТКЕ) материала диэлектрика ($1/^\circ\text{C}$);

T – максимальная рабочая температура конденсатора ($^\circ\text{C}$);

$\gamma_{C_{cm}}$ – погрешность емкости, обусловленная старением тонкопленочных конденсаторов (не превышает 2–3 %).

Впоследствии оценивают удельную емкость материала диэлектрика по формулам

$$C'_0 = 0,0885 \frac{\varepsilon}{d}, \quad (1.19)$$

$$C''_0 = C \left(\frac{\gamma_{C_{\text{доп}}}}{\Delta A} \right) \cdot \frac{K_\phi}{(1+K_\phi)^2}, \quad (1.20)$$

где ΔA – абсолютная погрешность воспроизведения размеров конденсатора (для масочного метода $\Delta A = \pm 0,001$ см);

$K_\phi = A_1/B_1$ – коэффициент формы конденсатора.

Окончательное значение удельной емкости C_0 выбирается из условия

$$C'_0 < C_0 < C''_0. \quad (1.21)$$

В дальнейшем уточняется толщина диэлектрика по формуле

$$d = 0,0885 \frac{\varepsilon}{C_0}. \quad (1.22)$$

Минимальная толщина диэлектрика ограничивается электрической прочностью, а максимальная – возможностями пленочной технологии. Чаще всего толщина диэлектрика находится в пределах от 0,3–0,5 до 1 мкм. После окончательного выбора d уточняется величина C_0 . Из соотношения $S = C/C_0$ определяют активную площадь перекрытия S обкладок конденсатора. Геометрические размеры конденсатора рассчитывают по следующим формулам:

– верхней обкладки:

$$A_1 = \sqrt{SK_\phi} = \frac{\Delta A}{\gamma_{S_{\text{доп}}}} (1 + K_\phi), \quad (1.23)$$

$$B_1 = \frac{A_1}{K_\phi} = \frac{\Delta A}{\gamma_{\text{сдоп}}} \frac{1+K_\phi}{K_\phi}; \quad (1.24)$$

– нижней обкладки:

$$A_2 = A_1 + 2(\Delta A + \eta), \quad (1.25)$$

$$B_2 = B_1 + 2(\Delta A + \eta); \quad (1.26)$$

– диэлектрика:

$$A_3 = A_2 + 2(\Delta A + \eta), \quad (1.27)$$

$$B_3 = B_2 + 2(\Delta A + \eta), \quad (1.28)$$

где η – погрешность установки и совмещения масок (см).

При площади перекрытия обкладок 1–5 мм² необходимо учитывать краевой эффект. Емкость конденсатора в данном случае вычисляется по формуле

$$C = 0,0885 \frac{\epsilon}{kd}, \quad (1.29)$$

где k – поправочный коэффициент, который определяется из графика, представленного на рис. 1.4.

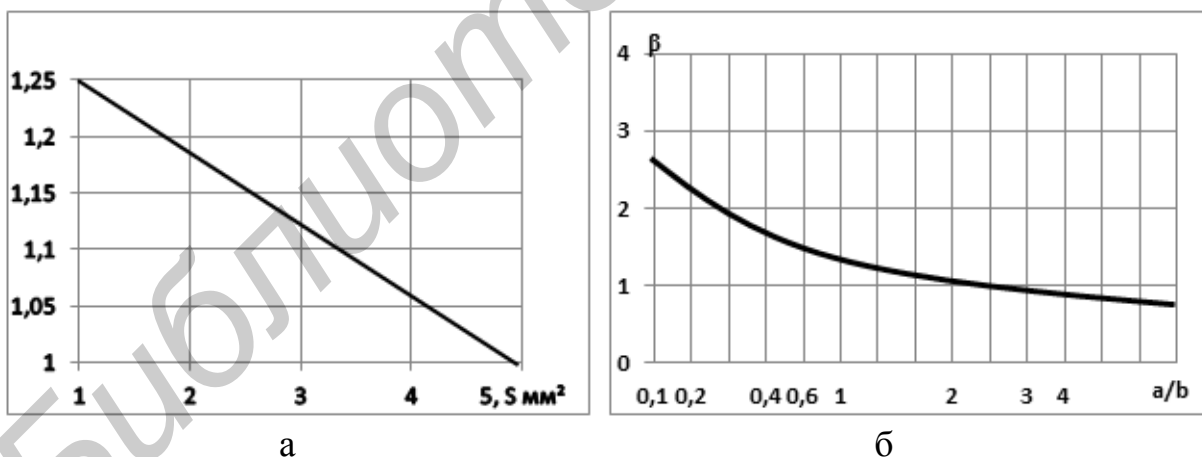


Рис. 1.4. Зависимости, характеризующие изменение поправочного коэффициента от конструктивных параметров пленочного конденсатора:

а – для конденсатора, показанного на рис. 1.3, б; б – для конденсатора, показанного на рис. 1.3, д, е (нижний для $b_1 = b_2$, верхний для $b_1 \leq b_2/3$)

С учетом краевого эффекта для получения заданной емкости конденсатора необходимо уменьшить его площадь в k раз. В остальном конструктивный расчет подобных конденсаторов не отличается от изложенного выше.

Емкость гребенчатого конденсатора определяется по формуле

$$C = \beta \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} l, \quad (1.30)$$

где β – коэффициент, значение которого определяется из графика рис. 1.4, б;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – диэлектрическая проницаемость соответственно материала подложки и окружающей среды;

l – длина совместной границы двух проводников.

1.1.4. Пленочные проводники

Для электрического соединения различных элементов микросхем и микросборок на подложке используют тонкопленочные проводники, которые должны быть выполнены из материалов с высокой проводимостью и адгезией к подложке. Конфигурацию таких проводников выбирают в виде полосок минимальной ширины, определяемой возможностями технологии с учетом максимального тока, протекающего по этому проводнику. Допустимую величину плотности тока принимают $j = 20 \text{ А/мм}^2$. Технологический процесс получения микросхем значительно упрощается, если для внутрисхемных соединений и контактных площадок используют одинаковые материалы. Наиболее подходящим для проводников является алюминий, однако трудно обеспечить хорошее механическое и электрическое соединения с алюминиевой пленкой. Можно применять также такие материалы, как серебро и золото, однако это не всегда экономически оправдано. Все эти материалы, обладая высокой проводимостью, имеют сравнительно низкую адгезию к подложке. Поэтому зачастую используют двух- или трехслойные пленочные структуры для межсоединений. Для достижения высокой адгезии напыляют подслои из хрома или никеля на подложки из ситалла, стекла, керамики или на межслойную изоляцию монооксида кремния. Материал следующего слоя выбирают из условия хорошей проводимости и возможности подсоединения внешних выводов. Обычно для этих целей используют золото, никель, медь вакуумной плавки и алюминий. Иногда применяют трехслойные структуры. В табл. 1.1. приведены характеристики некоторых материалов, применяемых для проводников и контактных площадок гибридных микросхем.

В конструкции тонкопленочной интегральной микросхемы часто один проводник пересекает другой. В месте пересечения проводники должны быть изолированы друг от друга тонкой пленкой диэлектрика. Каждое пересечение должно иметь сопротивление проводников не более $0,8 \text{ Ом/см}$, а емкость не более 1 пФ . При выборе материала межслойной изоляции и прилегающих проводников необходимо учитывать совместимость материалов. Несовместимость может иметь место, например, при использовании хрома для проводника и монооксида кремния, снижая пробивное напряжение. Может возникнуть и другое явление – гальванодиффузионный эффект. Этот эффект появляется в структурах металл – диэлектрик – металл, он увеличивает ток утечки в месте пересечения

проводников и разрушает проводники. Для изоляции проводников в большинстве случаев применяют моноокись кремния и халькогенидное стекло.

Таблица 1.1

Характеристики материалов, применяемых для проводников и контактных площадок

Материал	Толщина слоя, нм	ρ_{\square} , Ом/□	Рекомендуемый способ контактирования внешних выводов
Подслой – нихром Слой – золото	10–30 600–800	0,03–0,04	Пайка микропаяльником или сварка импульсным косвенным нагревом
Подслой – нихром Слой – медь Покрытие – никель	10–30 600–800 50–60	0,02–0,04	Сварка импульсным косвенным нагревом
Подслой – нихром Слой – медь Покрытие – серебро	10–30 400–1000 80–100	0,02–0,04	Пайка микропаяльником или сдвоенным электродом, сварка импульсным косвенным нагревом или сдвоенным электродом
Подслой – нихром Слой – медь Покрытие – золото	10–30 600–800 50–60	0,02–0,04	Пайка микропаяльником или сварка импульсным косвенным нагревом
Подслой – нихром Слой – алюминий Покрытие – никель	40–50 250–350 50	0,1–0,2	Пайка сдвоенным электродом

1.1.5. Навесные элементы

В гибридных интегральных микросхемах в качестве активных элементов применяют навесные полупроводниковые микроминиатюрные элементы: дискретные транзисторы и диоды, транзисторные и диодные матрицы, бескорпусные полупроводниковые микросхемы (кристаллы). Конструктивно бескорпусные полупроводниковые элементы (микросхемы) представляют собой защищенные от воздействия окружающей среды специальными покрытиями (лаками, эмальями, компаундами и др.) полупроводниковые кристаллы, в объеме и на поверхности которых размещаются элементы и межэлементные соединения.

Выбор компонентов для дискретной микросхемы ведут исходя из схемотехнических, конструктивно-технологических и других требований, которые предъявляются к параметрам, габаритам и методам сборки разрабатываемой конструкции.

При конструировании гибридных микросхем наряду с полупроводниковыми активными компонентами используют также миниатюрные резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности и трансформаторы.

Размещение навесных компонентов на плате осуществляют с учетом выбираемых вариантов их установки по ОСТ 4.ГО.010.043. Рекомендуется навесные компоненты располагать рядами, параллельными сторонам коммутационной платы. Размещение навесных компонентов на плате должно быть выполнено с учетом возможности их замены; обеспечения как ручной, так и автоматизированной установки; рационального использования площади подложек; обеспечения минимальной длины проводников при минимальном количестве мест их пересечения; обеспечения рекомендуемых зазоров между проводниками и контактными площадками на плате; обеспечения необходимого сопротивления между компонентами и соединительными проводниками; требований по обеспечению заданного теплового режима микросхемы.

Для крепления к коммутационной плате бескорпусных компонентов с гибкими выводами используют клей ВК-9 и др. При установке на плате бескорпусных компонентов с жесткими выводами не предусматривается дополнительное крепление компонентов.

1.1.6. Технология получения гибридных микросхем и микросборок

При проектировании микросхем одной из важнейших задач является размещение на подложке всех пленочных элементов и навесных компонентов. При размещении элементов и компонентов на подложке необходимо учитывать конструкторские требования и технологические ограничения. Основные из них приведены в табл. 1.2.

С учетом приведенных рекомендаций строится топология схемы. После выполнения расчетов, связанных с определением паразитных связей в микросхеме, с оценкой ее тепловых режимов, т. е. после оценки качества разработанной топологии, приступают к ее изготовлению.

Технология изготовления гибридных микросхем состоит из двух основных этапов производства:

- 1) изготовление пассивной части – формирования на диэлектрической подложке пленочных пассивных элементов и внутрисхемных соединений;
- 2) сборки и герметизации – осуществления монтажа навесных элементов, монтажа в корпус, защиты и получения готовой конструкции схемы.

Основные конструкторские требования и технологические ограничения

Содержание ограничений (требований)	Величина ограничений		
	М*	Ф*	С*
1	2	3	4
Минимально допустимый размер резистора (мм)	0,3	0,1	0,3
Точность воспроизведения линейных размеров пленочных элементов (мм)	–	0,01	–
Минимальное расстояние между пленочными элементами, расположенными в одном слое (мм)	0,2	0,1	0,3
Минимальное расстояние между пленочными элементами, расположенными в разных слоях (мм)	0,2	0,1	0,2
Минимальное расстояние от пленочных элементов до края платы (мм)	0,5	0,2	0,5
Минимальная величина перекрытия для совмещения пленочных элементов, расположенных в разных слоях (мм)	0,2	0,1	0,2
Максимальное отклонение сопротивления резистора от номинального значения (%)	–	±15	–
Минимальная величина перекрытия диэлектриком нижней обкладки конденсатора (мм)	–	0,1	–
Минимальный выступ нижней обкладки конденсатора за край верхней (мм)	–	0,2	–
Минимальное расстояние от края диэлектрика до мест соединения выводов обкладок конденсатора с другими пленочными элементами (мм)	–	0,3	–
Минимальная площадь перекрытия обкладок конденсаторов (мм)	–	0,5×0,5	–

Окончание табл. 1.2

1	2	3	4
Максимальное отклонение емкости конденсатора от номинального значения (%)	–	±12	–
Минимальная ширина пленочных проводников (мм)	0,1	0,05	0,1
Размеры контактных площадок для монтажа навесных компонентов с шариковыми или столбиковыми выводами (мм)	–	0,2×0,2	–
Минимальное расстояние между контактными площадками для припайки и приварки проволочных выводов (мм)	–	0,2	–
Минимальные размеры контактных площадок (мм): – для приварки проволочных выводов – для припайки проволочных выводов – для контроля пленочных элементов	–	0,2 0,2×0,25 0,4×0,4 0,2×0,2	–
Минимальное расстояние от проволочного проводника или вывода до края пленочного элемента, не защищенного изоляцией (мм)	–	0,2	–
Максимальная длина тонкого проволочного проводника без дополнительного крепления (мм)	–	3	–
Минимальное расстояние (мм) от края навесного компонента до: – края платы – края другого компонента – проволочного проводника – края пассивного компонента – края контактной площадки, предназначенной для приварки проволочных выводов	–	0,4 0,3 0,3 0,6 0,4	–
Минимальные размеры периферийных контактных площадок (мм) при шаге их расположения: – 0,625 мм – 0,25 мм – 2,5 мм	–	0,4×0,4 1×0,4 1×0,4	–

*М – масочный метод изготовления пленочных элементов; Ф – метод фотолитографии; С – совместное использование масочного и фотолитографического методов.

Сущность тонкопленочной технологии заключается в том, что для реализации пленочных элементов тонкие пленки наносят вакуумными способами (термическим испарением в вакууме, ионным распылением, реактивным ионным распылением и т. п.), а необходимая конфигурация пленочных элементов и внутрисхемных соединений достигается использованием известных методов – свободных или контактных масок, фотолитографии, комбинации фотолитографии и свободных масок, электронно-лучевой гравировки.

В связи с этим разработано большое количество типовых технологических процессов для изготовления пассивной части гибридных микросхем. Наибольшее распространение получили следующие типовые технологические процессы:

- вакуумный с использованием свободных масок;
- вакуумный с использованием фотолитографии;
- комбинированный;
- вакуумный с использованием электронно-лучевой гравировки;
- вакуумный на основе пленок тантала (танталовая технология).

При масочном методе для получения каждого слоя тонкопленочной структуры из одного материала требуется отдельная маска, с помощью которой воспроизводят топологию формируемого слоя. Типовой технологический процесс изготовления пассивной части гибридной микросхемы, содержащей пленочные резисторы, конденсаторы и соединительные проводники, включает в себя напыление через съемные маски вначале пленки резистивного материала, затем – проводящего. На последней стадии формируют трехслойную структуру пленочных конденсаторов. Заканчивается процесс нанесением защитного слоя.

На рис. 1.5 показана последовательность формирования простейшей тонкопленочной RC-схемы масочным методом, тогда соединительные проводники и нижнюю обкладку конденсаторов наносят в одном вакуумном цикле через одну маску.

Фотолитографический процесс основан на нанесении нескольких слоев пленок различных материалов в вакууме в виде сплошных покрытий с последующим получением конфигурации каждого слоя методом фотолитографии.

На рис. 1.6 показана последовательность формирования участка пассивной части гибридной микросхемы, содержащей резистор (нихром) и контактные площадки (медь с подслоем ванадия).

Фотолитографический процесс по точности изготовления пленочных элементов и плотности их размещения превосходит масочный. Однако его нельзя применять для создания многослойных конструкций тонкопленочных микросхем, так как каждый раз для получения рисунка очередного слоя требуется обработка подложки химическим травителем. При этом неизбежно воздействие травителя на другие слои, в результате чего могут меняться их электрофизические свойства. Кроме того, данный метод отличается значительной трудоемкостью из-за наличия в технологическом процессе дополнительных операций, связанных с фотохимическим травлением рисунков слоев. Более подробно с методом можно ознакомиться по прилагаемому к работе стенду.

Особенностью технологии электронно-лучевой гравировки является возможность ее автоматизации, при этом вначале на керамическую подложку в виде сплошных покрытий напыляют резистивный и проводящий слои, после чего проводят два фрезерования с помощью электронного луча для получения необходимой конфигурации пленочных элементов.

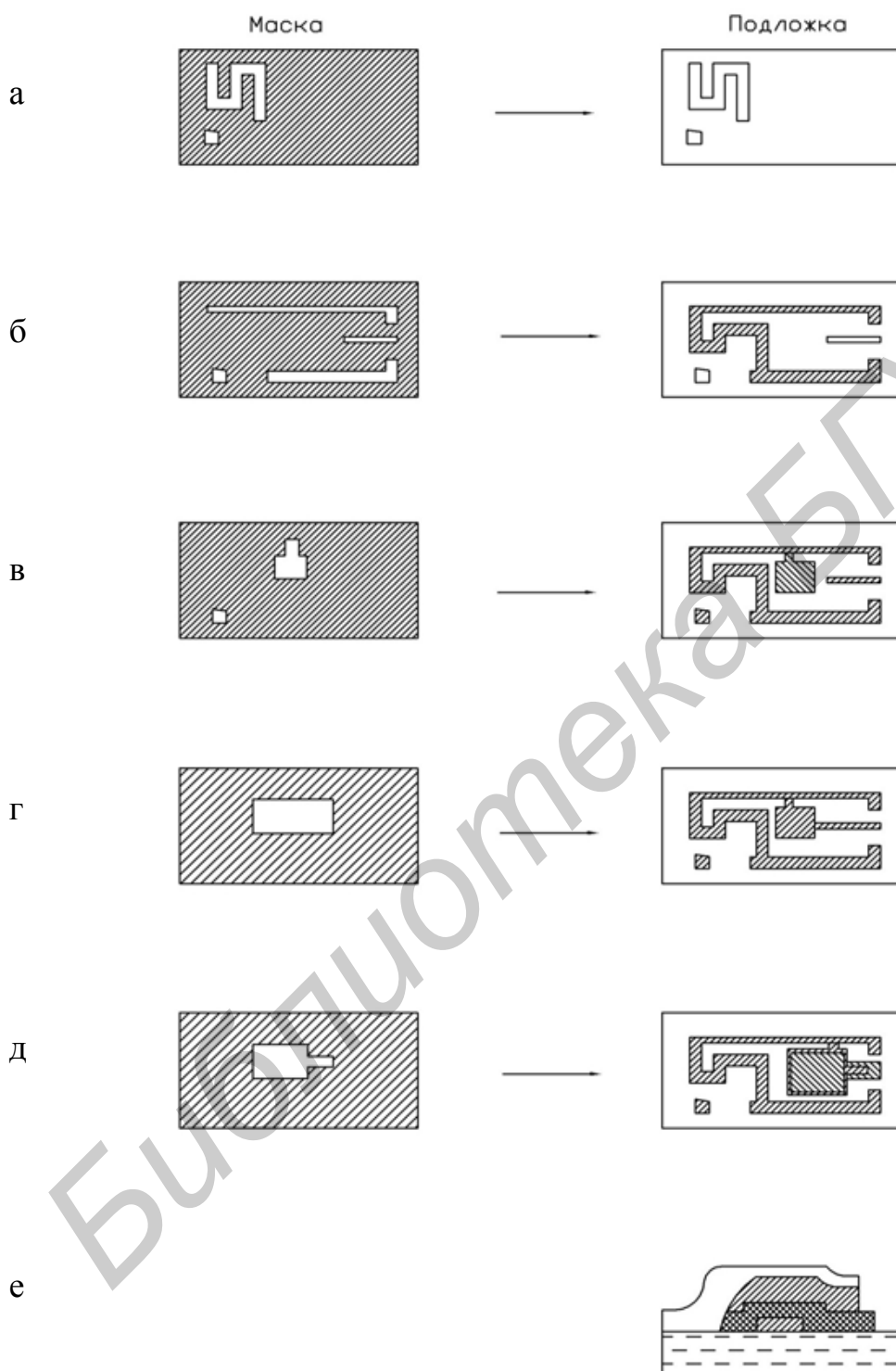


Рис. 1.5. Последовательность формирования тонкопленочной RC-схемы осаждением пленок через съёмные маски:

а – нанесение резистивного слоя; б – нанесение контактных площадок и соединений; в – нанесение нижней обкладки конденсатора; г – нанесение диэлектрического слоя; д – нанесение верхней обкладки конденсатора; е – нанесение защитного покрытия

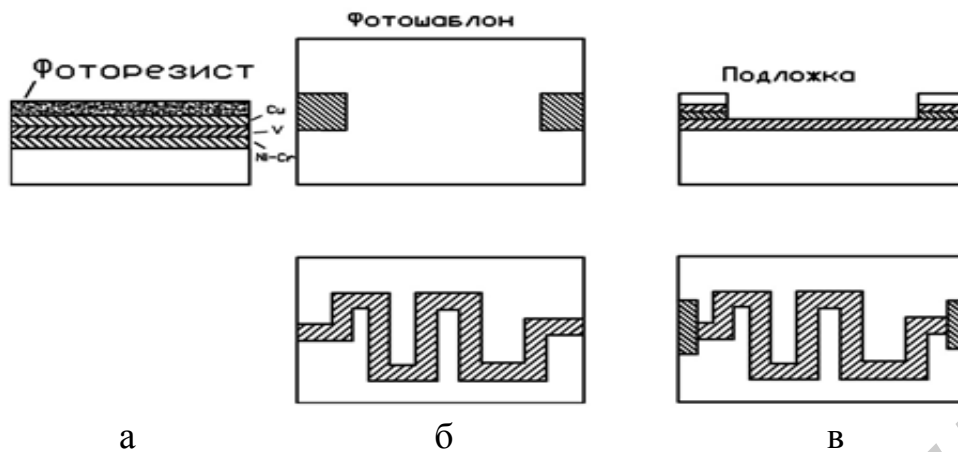


Рис. 1.6. Последовательность формирования тонкопленочной схемы, содержащей резистор и соединения, с использованием фотолитографии:

- а – исходная структура после операций вакуумного нанесения всех пленок и формирования слоя фоторезиста;
- б – фотолитография для создания контактных площадок;
- в – фотолитография для создания резисторов

Типовые технологические процессы изготовления пассивной части гибридных микросхем по танталовой технологии основаны на ионном распылении танталовой мишени для нанесения пленок тантала и различных способах получения пленочных конфигураций. При этом металлические пленки из тантала являются исходным материалом для формирования проводящих резистивных и емкостных элементов. Так, применяя реактивное ионное распыление, можно получать резистивные пленки с большим диапазоном удельного сопротивления, а используя анодирование пленок тантала, – диэлектрические слои.

На рис. 1.7 представлен наиболее распространенный процесс изготовления тонкопленочной RC-структуры по танталовой технологии.

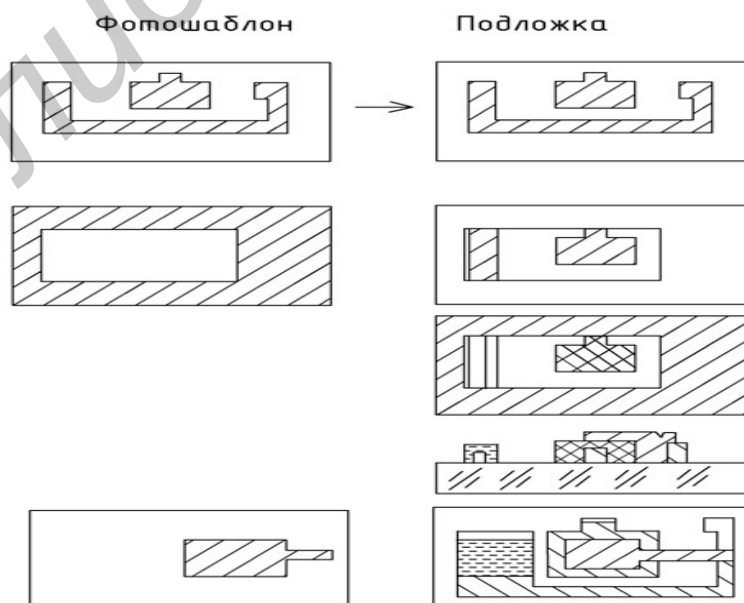


Рис. 1.7. Последовательность формирования тонкопленочной танталовой RC-схемы

1.2. Перечень оборудования и приборов, необходимых при выполнении лабораторной работы

1. Микроскоп металлографический БМИ-1.
2. Цифровой вольтметр В7-65.
3. Микроскоп-интерферометр МИИ-4.
4. Измеритель имитанса Е7-20.
5. Зондовое устройство.

1.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами (микроинтерферометр МИИ-4, цифровой вольтметр В7-65, измеритель имитанса Е7-20, инструментальный микроскоп БМИ-1, зондовое устройство) и инструкциями по их эксплуатации.

2. Получить у преподавателя тонкопленочную гибридную микросхему или микросборку.

3. Подготовить микроинтерферометр для измерения толщины пленки, формирующей элементы микросборки, измерить ее значение, руководствуясь нижеприведенной инструкцией.

1.3.1. Настройка микроинтерферометра МИИ-4

1. Тумблер включения **39** на блоке питания осветителя **МИИ-4** (рис. 1.8) установить в положение «вкл».

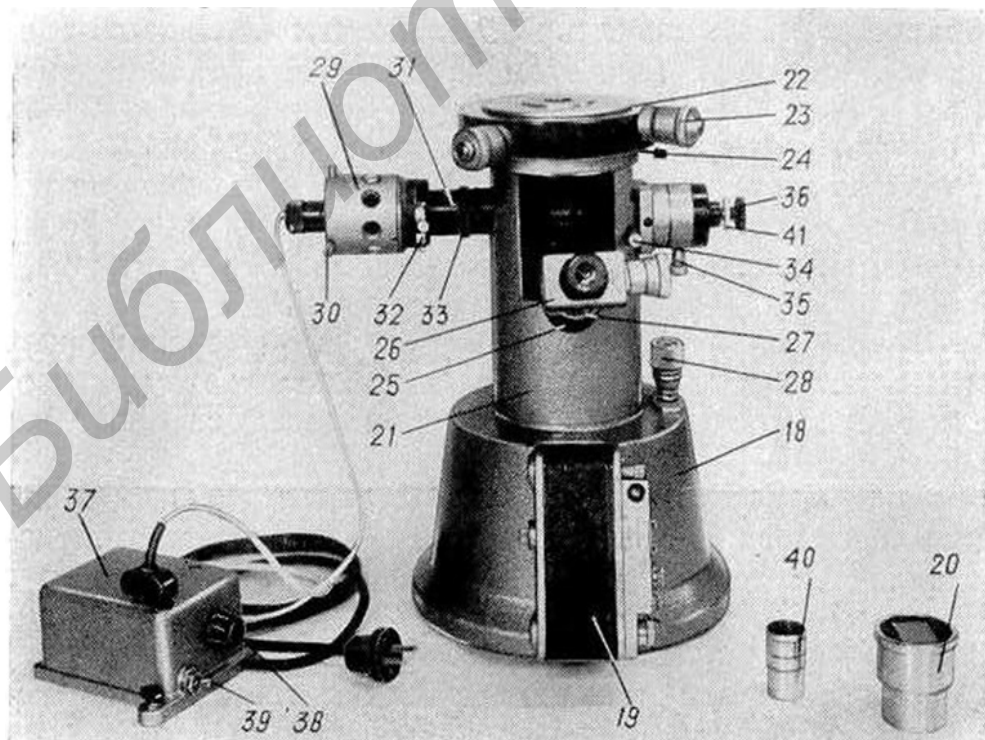


Рис. 1.8. Внешний вид микроскопа-интерферометра МИИ-4

2. Положить на столик **МИИ-4** микросборку исследуемой поверхностью вниз.

3. Произвести настройку освещения, для чего:

– перемещением патрона лампы установить нить накала лампы так, чтобы ее изображение было резко видно в зрачке объектива; изображение нити лампы и зрачок объектива хорошо видны при вынутом окуляре;

– с помощью центровочных винтов **30** отцентрировать изображение нити лампы относительно зрачка объектива, апертурная диафрагма при этом должна быть полностью открыта;

– повернуть рукоятку **34** так, чтобы стрелка на ней стояла вертикально;

– с помощью микрометрического винта **28** сфокусировать микроинтерферометр на исследуемую поверхность;

– поворотом рукоятки **34** включить правую часть интерференционной головки (стрелка на рукоятке должна быть в горизонтальном положении); при этом в поле зрения должны быть видны интерференционные полосы;

– с помощью микрометрического винта **28** добиться наиболее резкого изображения полос и исследуемой поверхности. Если при резкой фокусировке на микросборку наиболее резкие и контрастные полосы получились не в центре поля зрения, следует отвернуть контргайку **41** и, вращая винт **36**, перевести полосы в центр поля зрения. Проверив фокусировку, закрепить винт **36** контргайкой **41**;

– вращением винта **35** вокруг оси установить необходимый для работы интервал между полосами;

– поворотом винта **35** вокруг оси интерференционной головки установить интерференционные полосы перпендикулярно границе дорожки или резистора на поверхности микросборки.

1.3.2. Измерение толщины пленки

Измерение толщины пленки производится с помощью винтового окулярного микрометра **26**.

При правильной настройке микроинтерферометра в его поле зрения должны быть видны одновременно исследуемая поверхность и интерференционные полосы, изогнутые в местах, где проходит граница дорожки или резистора, причем интерференционные полосы должны быть ориентированы перпендикулярно направлению границы дорожки (резистора).

Все измерения производятся по двум наиболее ярким полосам одного цвета. Величина интервала между этими полосками выражается числом делений шкалы барабанчика окулярного микрометра. Затем измеряется величина изгиба полос (ступеньки) (рис. 1.9).

Толщина пленки определяется из выражения

$$0,27 \frac{b}{a} \text{ (мкм)}, \quad (1.31)$$

где b – величина изгиба (мкм);
 a – величина интервала между полосками (мкм).

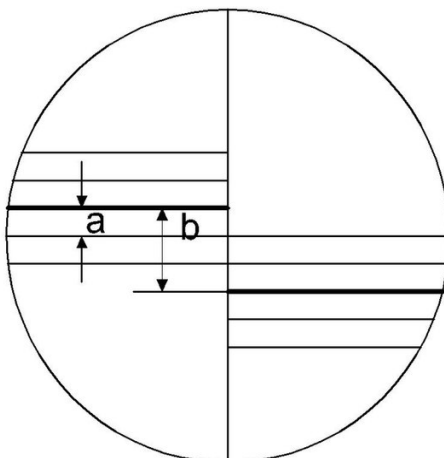


Рис. 1.9. Измерение толщины пленки

4. Включить **тумблер** блока питания осветителя инструментального микроскопа.

5. Разместить на рабочем столике микроскопа гибридную микросхему (микросборку); используя лимбы и измерительные шкалы лимбов микроскопа, измерить геометрические параметры заданных преподавателем элементов (длину, ширину, амплитуду меандра).

6. Определить на полученных образцах соответствие пленочных элементов конструктивным и технологическим требованиям и ограничениям в соответствии с табл. 1.2, результаты занести в табл. 1.3.

Таблица 1.3

Результаты измерений

№ п/п	Измеряемый параметр	Измеряемая величина	Рекомендуемая величина
1			
2			
...			

7. Разместить на рабочем столике зондового устройства гибридную микросхему (микросборку), установить зонды на контактные площадки указанного преподавателем элемента.

8. Подключить клеммы зондового устройства к гнездам «U, R, L» и «0» цифрового вольтметра В7-65.

9. Включить цифровой вольтметр В7-65, для чего:

– подключить сетевой кабель к питающей сети, установить тумблер «сеть» на задней панели вольтметра в положение «I»;

- индикация включения – кратковременное сообщение «АВТОТЕСТ», «АВК1», «АВК2», «АВК3»;
- после завершения теста прибор переходит в рабочий режим;
- установить режим работы вольтметра для измерения сопротивления, для чего нажать кнопку «R»;
- установить необходимый диапазон измерения кнопками «>», «<»;
- записать измеренную величину сопротивления.

10. Пользуясь описанной в подразд. 1.2, 1.3 методикой расчета, определить материал резистора.

11. Для измерения величины емкости конденсатора включить измеритель иммитанса «E7-20», для чего: подключить сетевой кабель к питающей сети, установить переключатель «сеть» на задней панели E7-20 в положение «I» и провести корректировку нуля холостого хода (XX), короткого замыкания (K3), тока утечки, руководствуясь положением параграфа 3.2 руководства по эксплуатации прибора.

Выбор режима работы прибора осуществляется с помощью *меню*. После нажатия кнопки *меню* на передней панели прибора:

- выбрать параметр С (на дисплей выводится символ CD);
- при необходимости выбрать нужный предел измерений, нажав кнопку «пред»;
- подключить устройство измерительное к гнездам I', U', U, I прибора и к зондовому устройству, провести отсчет емкости выбранного конденсатора.

12. Обосновать выбор формы имеющихся на подложке резисторов и конденсаторов.

13. Разработать на технологических картах маршрутную технологию микросборки.

1.4. Индивидуальные задания

1. Спроектировать тонкопленочный резистор, изготавливаемый методом фотолитографии, со следующими параметрами: $R = 2 \text{ кОм}$; $P = 0,5 \text{ Вт}$; $\delta = \pm 1 \%$.

2. Спроектировать конденсатор со следующими параметрами: $C = 2,1 \text{ пФ}$; $\gamma = \pm 15 \%$; $U_p = 1 \text{ В}$; $f = 1 \text{ мГц}$.

3. Спроектировать топологию и составить маршрутную технологию изготовления микросхемы (схему задает преподаватель) методом свободных масок.

4. Спроектировать топологию и составить маршрутную технологию микросхемы п. 3 методом фотолитографии.

5. Составить маршрутную технологию изготовления RC-структуры по танталовой технологии.

1.5. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Индивидуальное задание.
3. Результаты измерений.
4. Расчет резистора и анализ материала (расчет проводится на микро-ЭВМ).
5. Обоснование выбора формы резисторов и их эскизы.
6. Маршрутная технология (в виде профильной схемы).
7. Технологический процесс изготовления микросборки, оформленный на технологических картах (форма 2).
8. Выводы.

1.6. Контрольные вопросы

1. Материалы, применяемые для изготовления тонкопленочных резисторов.
2. Конструкции тонкопленочных резисторов.
3. Материалы, применяемые для изготовления тонкопленочных конденсаторов.
4. Конструкции тонкопленочных конденсаторов.
5. Основные технологические требования и конструкторские ограничения тонкопленочных гибридных микросхем.

Лабораторная работа №2

КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИЯ ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫХ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ И МИКРОСБОРОК

Цель работы: изучение конструкций элементов гибридных толсто пленочных интегральных схем (ГИС) и микросборок, конструкторско-технологических требований и маршрутной технологии их изготовления.

2.1. Краткие теоретические сведения

Существующие в настоящее время методы изготовления микроэлектронных изделий могут быть разделены на три основных класса:

- 1) технология производства полупроводниковых схем (включает в себя интегральные схемы средней и высокой степени интеграции);
- 2) тонкопленочная гибридная технология;
- 3) толсто пленочная гибридная технология.

Сравнивая гибридные тонко- и толсто пленочные схемы по технологии производства, надо отметить, что для первых характерна возможность достижения более высоких параметров в области ВЧ- и СВЧ-техники, тогда как преимущество вторых состоит в их низкой стоимости и большой рассеиваемой мощности. С развитием полупроводниковых интегральных схем выявились некоторые недостатки их производства, которые заставили заняться совершенствованием технологии и расширением производства ГИС на тонких и толстых пленках. Сюда прежде всего относится высокая стоимость оборудования полупроводникового производства, невозможность создания прецизионных пассивных элементов. Поэтому при производстве мелкосерийной продукции и схем с повышенной точностью пассивных элементов предпочтение отдается гибридной технологии тонких и толстых пленок. Эта технология, в свою очередь, может использовать в качестве навесных компонентов ГИС отдельные функциональные блоки в виде чипов интегральных схем в полупроводниковом исполнении, универсальность которых позволяет выпускать их большими партиями. Другое направление, где толсто пленочная технология может успешно конкурировать, – производство мощных схем, работа которых сопровождается большим рассеянием энергии. Необходимо также отметить, что толсто пленочная технология находит применение в производстве больших гибридных интегральных схем для создания плат с многослойной разводкой, а также в конструкциях некоторых типов корпусов для формирования выводов.

Толсто пленочная технология основана на последовательном нанесении на керамическую подложку различных по составу и назначению паст (проводящих, резистивных и диэлектрических) через сеточный трафарет и последующей термообработке для образования толстых (5–25 мкм) пленок.

2.2. Материалы толсто пленочных ГИС

2.2.1. Материалы подложек

Подложки для толсто пленочных ГИС должны, кроме традиционных требований, предъявляемых к подложкам ГИС, обладать:

- 1) высоким значением сопротивления изоляции;
- 2) минимальным ТКЛР материала подложки, так как изменение размеров подложки ведет к изменению размеров резисторов и даже к их разрушению;
- 3) оптимальной жесткостью материала-подложки: изгиб ее ведет к изменению размеров резисторов. Однако слишком высокая жесткость подложки приводит к разрушению резистора в условиях нагрузки;
- 4) материал должен выдерживать воздействие вибрации и ударных нагрузок;
- 5) высокой теплопроводностью и термостойкостью материала: он должен выдерживать температуру 800–1000 °С (температура вжигания паст).

В табл. 2.1. приведены характеристики некоторых типичных материалов, используемых для подложек.

Таблица 2.1

Физические свойства некоторых керамических материалов, используемых для подложек

Материалы	ТКР $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	Теплопроводность Дж/(см·с·град) при 25 °С	Удельное сопротивление, Ом·см		Диэлектрическая проницаемость (2 мГц)	Модуль Юнга 10^{-4} кг/см ²	Прочность на из- гиб, кг/см ²	Прочность на из- гиб, кг/см ²
			25 °С	300 °С				
Al ₂ O ₃	7,3	0,4	10 ¹⁴	10 ¹⁴	3,6	0,10	3,73	3515,5
BeO	8,0	2,2	10 ¹⁴	10 ¹⁴	8,7	0,096	3,16	1157,7
3Al ₂ O ₃ xSiO ₂	5,3	0,6	10 ¹⁴	10 ¹⁴	8,5	0,082	1,48	1125,7
ZrSiO ₄	4,0	0,1	10 ¹⁴	10 ¹⁴	6,5	0,098	2,11	1546,6
MgAl ₂ O ₃	8,8	0,1	10 ¹⁴	–	6,0	0,097	2,39	1757,7
Боросиликат- ное стекло	3,3	0,1	10 ¹⁴	10 ¹⁴	4,1	0,067	0,74	1054,7
Кварцевое стекло	0,55	0,1	10 ¹⁴	10 ¹⁴	3,8	0,065	0,52	843,7

Наибольшее распространение в отечественной практике получили подложки из глиноземистой керамики, окиси алюминия (95 % Al_2O_3), электрокорунда (99 % Al_2O_3) и титаната бария для В4-микросхем.

Бериллиевые керамики (99,5 % BeO) в 6–10 раз превышают глиноземистые по теплопроводности, но токсичны, имеют стоимость в 15 раз выше и уступают им по прочности. Одним из основных недостатков керамических подложек является трудность получения на них плоских поверхностей с отклонениями менее 0,1 мм на 25 мм длины.

Подложки обычно имеют квадратную или прямоугольную форму. Минимальная площадь подложки составляет 6 мм², а максимальная – 500 мм². Наименьшая толщина принимается 0,25 мм.

Керамические подложки изготавливают литьем с последующим обжигом. В подложке могут быть сделаны различные отверстия, углубления, выемки и др. Поверхность подложек обрабатывается до Ra 0,63–0,32.

Важная отличительная особенность подложек для толстопленочных ГИС состоит в том, что их поверхность должна быть достаточно шероховатой, чтобы обеспечить необходимую адгезию с веществом пасты.

Перед нанесением паст подложки тщательно обезжириваются и отмываются, затем сушатся и прокаливаются при температуре 600–1000 °С.

2.2.2. Пасты

В качестве материала для изготовления толстопленочных элементов принимаются резистивные, диэлектрические и проводящие пасты. Они представляют собой суспензию порошков наполнителя и стекла в какой-либо органической связующей жидкости или растворе. Наполнитель является основой пасты и придает пленкам необходимые резистивные, проводящие или диэлектрические свойства.

Основные требования, предъявляемые к пастам:

- возможность нанесения их через трафарет и термообработка (вжигание);
- воспроизводимость свойств;
- хорошая адгезия к подложке;
- совместимость с другими элементами;
- соответствующие электрические свойства;
- способность к пайке и термокомпрессии.

Плата должна быть определенной текучести. Слишком большая текучесть приводит к растеканию пасты и искажению рисунка, а малая текучесть – к плохому продавливанию пасты через трафарет.

В качестве наполнителей проводниковых паст используются порошки металлов и сплавов с размером частиц не более 5 мкм. Размеры и форма частиц оказывают сильное влияние на физические и электрические свойства толстых пленок. Наполнители паст должны обладать крайне низкой химической активностью при высоких температурах термообработки в окислительной среде и при соприкосновении с химически активным стеклом, а также должны быть воспри-

имчивы и устойчивы (нерастворимы) к воздействию припоя, применяемого при монтаже пайкой. Этим объясняется применение в качестве наполнителей благородных металлов: золота, серебра, сплавов золото – палладий, золото – платина, серебро – палладий и др. Сравнительная оценка проводниковых паст на основе различных наполнителей приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Свойства проводниковых паст*

Наполнитель	Стоимость	Электропроводность	Адгезия	Устойчивость к расплавленному припою	Контакт с резисторами	Миграция
Au	4	3	4	5	5	2
Pt-Au	5	5	3	3	1	1
Au-Pd	3	4	3	2	3	2
Ag-Pd	2	2	2	3	2	3
Ag	1	1	1	5	4	5

*Оценка дана по 5-балльной системе, 1 – высший балл.

Наряду с приведенными в табл. 2.2 наполнителями для проводниковых паст применяются неблагородные металлы: медь, никель, алюминий, вольфрам, молибден. Они обеспечивают не только меньшую стоимость паст, но и в ряде случаев лучшие параметры и стабильность при высоких температурах. Медь, например, является единственным металлом с высокой электропроводностью, к которому можно подсоединять внешние выводы как сваркой, так и пайкой. Кроме того, медь имеет хорошую адгезию к алюмокерамическим подложкам, высокую теплопроводность, стойкость к выщелачиванию, к радиации, хорошие свойства в диапазоне СВЧ.

В качестве наполнителей резистивных паст применяется серебро, золото, палладий, платина, рений, окислы таллия, рутения, рения, палладия, а также различные композиции: серебро – палладий – оксид палладия, серебро – оксид рутения, висмут – рутений, рутений – иридий, платина – оксид иридия и др. Толстопленочные резисторы имеют номиналы сопротивлений от 1 до 10^9 Ом, удельное сопротивление от 1 до 10^7 Ом/□ и широкий диапазон значений ТКС.

При изготовлении диэлектрических паст для конденсаторов в качестве наполнителей применяют смеси порошков керамических материалов и флюсов, а также стекла и ферроэлектрические материалы. Например, пасты на основе композиции титанат бария – оксид титана – оксид алюминия – легкоплавкое стекло имеют диэлектрическую проницаемость от 10 до 2000.

Диэлектрики для межуровневой изоляции проводников изготавливают

на основе стеклокерамических материалов. По сравнению с диэлектриками для конденсаторов они обладают меньшей диэлектрической проницаемостью.

В качестве постоянного связующего в состав паст входят стекла, которые не удаляются после формирования пленки и остаются в готовом пленочном элементе. В проводниковой пасте стекло служит для удерживания в контакте зерен наполнителя и для обеспечения адгезии толстой пленки к подложке. При выборе состава стекла необходимо учитывать зависимость его вязкости от температуры, смачивание подложки, химическую активность и коэффициент термического расширения. Эти свойства стекла влияют на режим термообработки, образование механических связей между зернами металлического наполнителя, удельное сопротивление пленки и процессы подсоединения выводов к контактным площадкам. От состава стекла в значительной степени зависит стабильность параметров резисторов. В диэлектрике, применяемом для межуровневой изоляции проводников, постоянное связующее является одновременно и основным функциональным компонентом. В диэлектрике конденсаторов стекло не должно вносить дефектов, приводящих к возникновению коротких замыканий между обкладками. В качестве постоянного связующего применяются легкоплавкие стекла: свинцово-боросиликатные, цинкоборосиликатные, кадмиевые.

В качестве органических связующих и растворителей паст может применяться широкий набор материалов: этилцеллюлоза, воски, ланолин, вазелиновое масло, циклогексан, жидкие смолы, органические растворители.

Органические связующие и растворители вводятся для обеспечения равномерного распределения частиц порошков различных компонентов в процессе приготовления пасты, для получения определенной консистенции и для придания пасте необходимой вязкости. При нанесении пасты на подложку органические связующие полностью удаляются в процессе термообработки. При неполном удалении органических связующих в составе диэлектрика, например, остается углерод, который резко повышает электропроводность.

Специальные добавки вводят в состав паст для улучшения адгезии, паяемости, для придания пастам тиксотропности и др.

Тиксотропность называется способность паст под действием механического давления увеличивать текучесть и затем после прекращения воздействия давления снова загустевать. Для придания пастам тиксотропных свойств в их состав вводят высокомолекулярные соединения, например фуранкарбоновую или терефталевую кислоту.

2.3. Элементы толстопленочных интегральных схем

Проводники толстопленочных схем выполняются путем нанесения через трафареты проводниковых паст.

Проводниковые пасты должны обеспечивать получение следующих характеристик композиции (после вжиганий):

1. Высокую удельную проводимость во избежание заметного падения напряжения и нагрева.

2. Высокую адгезию пленки с подложкой, поскольку непосредственно к ней присоединяются выводы и навесные элементы.

3. Возможность присоединения к поверхностям проводников монтажных проводов и навесных элементов пайкой или сваркой.

4. Композиция должна быть устойчива к воздействиям, связанным с выполнением технологических процессов, и выдерживать заданные условия эксплуатации.

Проектирование топологии толсто пленочных проводников во многом аналогично проектированию печатных плат. Проводники должны изготавливаться предельно короткими, чтобы уменьшить сопротивление схемы. Поверхностное сопротивление толсто пленочных проводников должно изменяться в пределах от $0,005 \text{ Ом}/\square$ до $0,1 \text{ Ом}/\square$ в зависимости от типа применяемой пасты. Для нанесения проводников необходимо использовать только одну сторону подложки. Количество пересечений должно быть минимальным, поскольку для их создания необходимы две дополнительные операции нанесения и вжигания пленок (нанесение межслойного диэлектрика и второго проводящего слоя). Для современной технологии стандартной шириной проводника считается $0,25 \text{ мм}$, однако, если это необходимо, можно изготавливать полоски шириной до $0,125 \text{ мм}$. Такие же значения допускаются и для расстояний между проводниками.

Толщина слоя проводника, например, на основе композиций палладий – серебро составляет $10\text{--}25 \text{ мкм}$, минимальная ширина (длина) проводника колеблется в пределах $0,15\text{--}0,20 \text{ мм}$ при нанесении пасты на керамику и $0,20\text{--}0,30 \text{ мм}$ при нанесении на слой диэлектрика. Минимальное расстояние между проводниковыми элементами $0,05\text{--}0,20 \text{ мм}$ в зависимости от рецептурного состава пасты.

Резисторы. Резистивные пасты изготавливаются на основе более высокоомных функциональных материалов, обычно композиций: серебро – палладий – окись палладия, серебро – окись рутения, висмут – рутений, рутений – иридий, платина – окись иридия. Резистивные пасты, изготавливаемые на основе композиции палладий – серебро, обеспечивают номинальные сопротивления резисторов от 25 Ом до 1 МОм . Сопротивление квадрата резистивной пленки соответствует ряду значений: $5, 100, 500, 1000, 3000, 6000, 20\ 000, 50\ 000 \text{ Ом}/\square$. Температурный коэффициент сопротивления подобных паст не превышает $800 \cdot 10^{-6} \text{ 1/град}$ в интервале температур $-60 \dots +125 \text{ }^\circ\text{C}$. Толщина резистивных пленок после вжигания составляет примерно $18\text{--}25 \text{ мкм}$.

Учет отношения длины пленочного резистора L к его ширине B является очень важным при проектировании толсто пленочных резисторов. Отношение сторон L/B или B/L никогда не должно превышать 10. Его лучше выбирать равным 3 или меньше. При проектировании схемы следует избегать зигзагообразных резисторов или резисторов в форме меандра. При такой геометрии на резисторе образуются области перегрева, а сопротивление резистора трудно подогнать к номиналу. Минимальный размер резистора должен быть порядка $0,5 \times 0,5 \text{ мм}$, однако резисторы должны быть по возможности большими для уве-

личения процента выхода годных и облегчения их последующей подгонки. Для обеспечения надежного электрического контакта резистор должен быть уже проводника на 0,25 мм (по 0,125 мм с каждой стороны), а длина перекрытия резистора проводником должна быть не меньше 0,125 мм (рис. 2.1).

Минимальное расстояние от края контактной площадки до края резистора должно быть не меньше 0,25 мм.

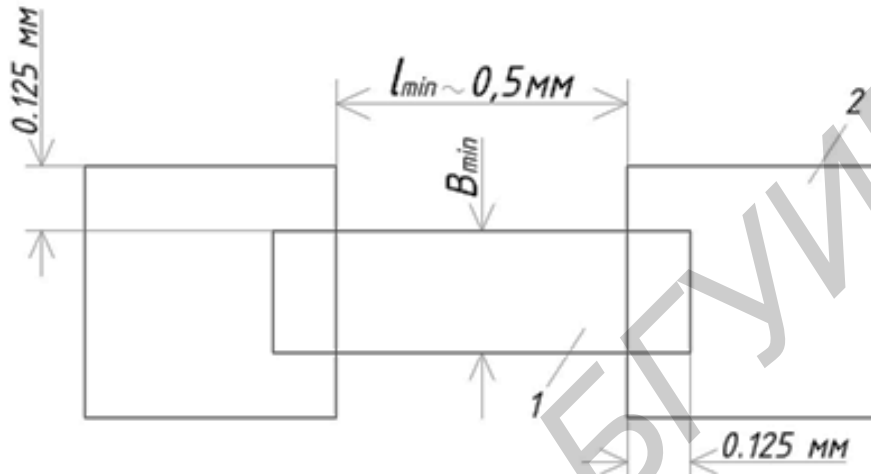


Рис. 2.1. Толстопленочный резистор:
1 – резистивная пленка; 2 – контактная площадка

Расчет резисторов производится следующим образом. Номинальное значение сопротивления резистора определяется по формуле

$$R = \rho_{\square} K_{\phi}, \tag{2.1}$$

где ρ_{\square} – сопротивление квадрата резистивной пленки, Ом/□;
 $K_{\phi} = l/b$ – коэффициент формы.

Ширина резистора

$$B \geq \sqrt{\frac{K_p \cdot \rho \cdot \rho_{\square}}{\rho_0 R^2}}, \tag{2.2}$$

где ρ – расчетное значение мощности рассеяния резистора, Вт;
 ρ_0 – максимальная мощность рассеяния резистивной пленки, Вт/мм;
 K_p – коэффициент запаса мощности, учитывающий подгонку резистора:
 $K_p = 2n/100 + 1$;
 n – допустимое отрицательное отклонение сопротивления резистора от номинального до подгонки, %.

Максимальное значение n принимается равным 52 %. Расчетная длина резисторов определяется из соотношения для K_ϕ и по формуле (2.2). Расчет резисторов, имеющих $K_\phi < 1$, начинают с определения длины, заменяя ширину B в формуле (2.2) на длину l .

Удельная мощность рассеяния резисторов на основе композиции палладий – серебро обычно принимается равной 3 Вт/см², однако толсто пленочные резисторы могут быть нагружены и сильнее, до 6 Вт/см² и более (для паст других составов) при условии правильной организации охлаждения.

Конденсаторы. Диэлектрические пленки в толсто пленочных микросхемах применяются в качестве диэлектриков конденсаторов, межслойной изоляции, защитных слоев.

Диэлектрические пасты для конденсаторов изготавливаются на основе смеси керамических материалов и флюсов. Толщина диэлектрических толстых пленок для конденсаторов после термической обработки составляет 40–60 мкм.

Используя пленки, обеспечивающие удельную емкость $C_0 = 3700$ пФ/см², изготавливают конденсаторы с номинальной емкостью от 500 до 300 пФ, а пленки с $C_0 = 10\,000$ пФ/см² позволяют производить конденсаторы в диапазоне от 100 до 2500 пФ. В большинстве толсто пленочных гибридных схем и микросборок используются многослойные дискретные керамические конденсаторы, поскольку на площади, необходимой для нанесения конденсатора с номиналом 300 пФ, можно расположить навесной многослойный конденсатор на 10 000 пФ. Погрешность номинальной емкости конденсаторов обычно составляет ± 15 %. Пробивное напряжение не менее 150 В.

Величина диэлектрической проницаемости для диэлектрических паст конденсаторов на основе композиции титанат бария – окись титана – окись алюминия – легкоплавкое стекло составляет от 10 до 2000.

Основное соотношение для емкости конденсатора имеет вид

$$C = \frac{8,85\varepsilon \cdot A(N-1) \cdot 10^3}{d} \text{ (пФ)}, \quad (2.3)$$

где ε – диэлектрическая постоянная;

A – площадь, мм²;

N – число обкладок;

d – толщина диэлектрической пленки, мм.

Исходя из (2.3) можно вычислить площадь, необходимую для изготовления конденсатора.

Расчетная площадь верхней обкладки определяется по формуле

$$S = C/C_0, \quad (2.4)$$

где C – номинальное заданное значение емкости;

C_0 – удельная емкость.

Нижняя обкладка конденсатора должна выступать за край верхней не менее чем на 0,3 мм, пленка диэлектрика – за край нижней обкладки не менее чем на 0,2 мм. Пасты верхних обкладок должны быть инертны к лужению.

Защитные покрытия. Для межслойной изоляции и защиты микросборок от внешней среды изготавливаются пасты из низкоплавкого стекла и глинозема.

Толщина диэлектрического слоя составляет от 30 до 70 мкм, удельная емкость – от 150 до 200 пФ/см², пробивное напряжение – 500 В.

Диэлектрическая проницаемость пленок для изоляции и защиты находится в пределах от 10 до 15; тангенс угла диэлектрических потерь на частоте от 1 кГц до 1,5 МГц и не превышает $25 \cdot 10^{-4}$; сопротивление изоляции более 10^{12} Ом при постоянном напряжении 100 В. Для многослойной сложной разводки межсоединений используется кристаллизующееся стекло. В целях удобства сортировки различных микросхем на операциях сборки применяются разноцветные защитные пасты.

2.4. Основные этапы изготовления толстопленочной ГИС

Производство современных типов толстопленочных ГИС и микросборок осуществляется в настоящее время в условиях комплексно-механизированного и гибкого автоматизированного производства.

Схемы типовых маршрутов изготовления толстопленочных микросборок показаны на стендах.

Основное преимущество технологии нанесения толстых пленок – простота применяемого оборудования и низкая стоимость производства.

К недостаткам следует отнести то, что толстопленочные элементы имеют большие размеры, меньшую точность воспроизведения номинальных значений по сравнению с тонкими пленками. Для устранения этих недостатков разрабатываются новые трафареты и новые пасты, позволяющие применять для формообразования фотолитографическую обработку.

2.5. Оборудование и материалы, необходимые для выполнения работы

1. Набор толстопленочных ГИС и микросборок (без герметизации).
2. Цифровой вольтметр В7-65.
3. Зондовое устройство.
4. Микроскоп инструментальный БМИ-1.
5. Измеритель иммитанса Е7-20

2.6. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с приборами (цифровой вольтметр **В7-65**, измеритель иммитанса **Е7-20**, инструментальный микроскоп **БМИ-1**, зондовое устройство) и инструкциями по их эксплуатации.

2. Получить у преподавателя образец толстопленочной микросхемы или микросборки.

3. Включить **тумблер** блока питания осветителя инструментального микроскопа.

4. Разместить на предметном столике микроскопа гибридную толсто-пленочную микросхему (микросборку);

5. Используя лимбы и измерительные шкалы лимбов микроскопа, измерить геометрические параметры заданных преподавателем элементов (резисторов, проводников, конденсаторов), данные занести в табл. 2.3.

6. Оценить выполнение конструкторско-технологических требований к элементам толсто-пленочных ГИС и микросборок.

7. Разместить на рабочем столике зондового устройства гибридную микросхему (микросборку), установить зонды на контактные площадки указанного преподавателем элемента.

8. Подключить клеммы зондового устройства к гнездам «U, R, L» и «0» цифрового вольтметра.

9. Включить цифровой вольтметр В7-65, для чего:

– подключить сетевой кабель к питающей сети, установить тумблер «**сеть**» на задней панели вольтметра в положение «**I**»;

– индикация включения – кратковременное сообщение «**АВТОТЕСТ**», «**АВК1**», «**АВК2**», «**АВК3**»;

– после завершения теста прибор переходит в рабочий режим;

– установить режим работы вольтметра для измерения сопротивления, нажав на передней панели прибора кнопку «**R**»;

– установить необходимый диапазон измерения кнопками «>», «<»;

– записать измеренную величину сопротивления резистора, конденсатора или проводника.

10. Исходя из данных подразд. 2.4, 2.5, используя методику расчета, выбрать материалы резистивной и проводящей паст.

11. Для измерения величины емкости конденсатора включить измеритель иммитанса **E7-20**, для чего подключить сетевой кабель к питающей сети, установить переключатель «**сеть**» на задней панели **E7-20** в положение «**I**» и провести корректировку нуля холостого хода (**ХХ**), короткого замыкания (**КЗ**), **тока утечки**, руководствуясь положением параграфа 3.2 руководства по эксплуатации прибора.

Выбор режима работы прибора осуществляется с помощью *меню* после нажатия кнопки «**меню**» на передней панели прибора:

– выбрать параметр **C** (на дисплей выводится символ **CD**);

– при необходимости выбрать нужный предел измерений, нажав кнопку «**пред**»;

– подключить устройство измерительное к гнездам **I', U', U, I** прибора и к зондовому устройству, провести отсчет емкости выбранного конденсатора.

12. Обосновать выбор конструкции каждого элемента и микросхемы (микросборки) в целом.

Конструкторско-технологические требования к элементам толсто пленочных
ГИС и микросборок

Содержание	Измеренная величина	Рекомендуемая величина
1	2	3
Резисторы		
Форма резистора	1. 2. 3.	
Площадь резистора, мм ²	1. 2. 3.	
Соотношение сторон резистора	1. 2. 3.	
Расстояние от края контактной площадки до края резистора, мм	1. 2. 3.	
Ширина резистора, мм	1. 2. 3.	
Длина резистора, мм	1. 2. 3.	
Перекрытие резистора с проводником, мм	1. 2. 3.	
Конденсаторы		
Минимальная площадь, мм ²	1. 2. 3.	
Выступ нижней обкладки конденсатора за край верхней, мм	1. 2. 3.	
Выступ диэлектрика за край нижней обкладки, мм	1. 2. 3.	
Проводники		
Минимальная ширина проводника, мм	1. 2. 3.	

1	2	3
Минимальная длина проводника, мм	1. 2. 3.	
Минимальное расстояние между проводниками, мм	1. 2. 3.	
Конструкция пересечения проводников		
Сопротивление проводника, Ом/□	1. 2. 3.	

2.7. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Топология микросхемы.
3. Результаты измерений на соответствие конструкторско-технологическим требованиям.
4. Расчет резистора и выбор его материала и материала проводника (индивидуально для каждого студента по табл. 2.4.)
5. Обоснование конструкции элементов и микросхемы.
6. Маршрутная технология изготовления ГИС в рисунках.
7. Маршрутная технология изготовления ГИС на технологических картах.
8. Выводы.

Таблица 2.4

Индивидуальные задания для выполнения лабораторных работ

№ подгруппы	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
1	Схема 1 P1, P2	Схема 2 P1	Схема 3 P1, P2	Схема 4 P1, P2
2	Схема 1 P3, P4	Схема 2 P2	Схема 3 P3, P4	Схема 4 P3, P4
3	Схема 1 P5, P6	Схема 2 P3	Схема 3 P5, P6	Схема 4 P5, P6
4	Схема 1 P7, P8	Схема 2 P4	Схема 1 P7, P8	Схема 4 P7, P8

2.8. Контрольные вопросы

1. Достоинства и недостатки толстопленочных ГИС и микросборок.
2. Материалы проводников, требования к ним.
3. Материалы резисторов и их основные характеристики.
4. Материалы диэлектриков и их основные характеристики.
5. Состав паст. Назначение каждой компоненты.
6. Конструкции резисторов и основные конструкторско-технологические ограничения.
7. Конструкции конденсаторов и основные конструкторско-технологические ограничения.
8. Способы подсоединения навесных элементов ГИС.
9. Способы герметизации ГИС.

Лабораторная работа №3

ФОРМИРОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК МЕТОДОМ ИОННО-ЛУЧЕВОГО РАСПЫЛЕНИЯ

Цель работы: изучение процесса формирования пленок двуокиси кремния ионно-лучевым распылением кварцевой и кремниевой мишеней; ознакомление с технологическим оборудованием, конструкцией и принципом работы ионного источника на базе ускорителя с анодным слоем; освоение методики контроля основных параметров диэлектрических пленок.

3.1. Краткие теоретические сведения

Диэлектрические пленки являются одним из основных конструктивных элементов интегральных схем (ИС). Свойства пленок и технология их формирования во многом определяют параметры ИС и их предельные возможности.

В технологии изготовления ИС нашли применение диэлектрические пленки оксида и нитрида кремния (SiO_2 , Si_3N_4), а также примесно-силикатных стекол (ФСС, БФСС, БСС) и др. Такие пленки выполняют функции маскирующих, изолирующих или пассивирующих слоев и могут служить конструктивными элементами ИС.

Основное назначение пленок SiO_2 толщиной более 0,2 мкм – создание маски, необходимой при локальной обработке поверхности полупроводниковых пластин (диффузия, ионное легирование, травление) для предохранения (маскирования) части поверхности пластин от диффузии основных легирующих примесей (В, Р, Sb, As).

Более высокие свойства по маскированию имеют пленки Si_3N_4 толщиной более 0,1 мкм. Они препятствуют диффузии в пластине не только перечисленных примесей, но и индия, галлия, алюминия и др. Нитрид кремния применяется также для создания маски при травлении поверхности кремния и пленок SiO_2 , а также в качестве защитного слоя (при защите ИС от механических повреждений и воздействий окружающей среды).

Для электрической изоляции элементов микросхем и разделения металлизированных слоев многослойных соединений используют главным образом пленки SiO_2 .

Пассивирующие слои предохраняют поверхность полупроводниковых пластин от химической и электрохимической коррозии, окисления, нитрирования, сульфитации, гидратации и других воздействий окружающей среды, обеспечивая стабильность свойств ИС по времени. Хорошие пассивирующие свойства имеют фосфорно-силикатные стекла (ФСС), которые препятствуют диффузии щелочных металлов (Na, K).

Слои SiO_2 и Si_3N_4 в качестве конструктивных элементов ИС используют как подзатворный диэлектрик в МДП-транзисторах.

В табл. 3.1 представлены основные области применения диэлектрических пленок в технологии ИС.

Таблица 3.1

Основные области применения диэлектрических пленок в технологии ИС

Место применения	Цель применения
В структурах прибора	Изоляция элементов микросхемы
	Вертикальная изоляция высокотемпературных проводящих слоев в многослойных структурах на основе поликремния, силицидов, тугоплавких металлов
	Вертикальная изоляция низкотемпературных проводящих слоев в многослойных структурах на основе алюминия
	Барьер по отношению к ионам щелочи и влаги
	Геттерирование примеси
	Планаризация или выравнивание рельефа
	Пассивация металла и <i>p-n</i> -переходов
	Подзатворный диэлектрик
	Диэлектрик для накопительного конденсатора
	Компенсация остаточных напряжений
	Антиотражающие пленки
Для временных (удаляемых) слоев	Маскирующие структуры для окисления
	Геттерирующие слои для примесей
	Вспомогательный «взрываемый материал» при формировании рисунка обратной литографией
	Источники диффузии из твердого тела
	Защитные слои при диффузии и ионной имплантации
	Неорганические маски для травления
	Фотолитографические маски для травления
	Среда планаризации
Компоненты для многослойных резисторов	

В зависимости от назначения к диэлектрическим пленкам предъявляют различные требования. Так, маскирующие пленки не должны быть пористыми, так как они являются барьером для диффундирующих легирующих примесей, должны хорошо тормозить ионы при ионной имплантации, а также обеспечивать получение минимального клина травления при локальном травлении.

Изолирующие пленки также не должны иметь пор, чтобы не происходило замыкание металлизированных слоев. Они также должны иметь высокие диэлектрические свойства.

Пассивирующие слои должны иметь высокую стойкость к влажным и агрессивным средам, стабильность во времени.

Подзатворный диэлектрик должен иметь минимальный положительный встроенный заряд, высокие защитные и диэлектрические свойства.

Все пленки не должны иметь и не должны создавать в приповерхностном слое полупроводникового материала больших механических напряжений, которые могут привести к дефектообразованию и короблению пластин. Общим для диэлектрических пленок следует считать требование технологичности, под которой понимают прежде всего совместимость процессов получения покрытия с изготовлением структуры ИС в целом. Технологичными следует считать также процессы, осуществляемые при невысоких температурах нагрева пластины и обеспечивающие приемлемую для производства скорость роста пленок.

Остальные требования к свойствам диэлектрических пленок приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Требования к свойствам диэлектрических пленок для ИС

Свойства пленок	Требуемые характеристики
Электрические	Высокое напряжение диэлектрического пробоя
	Низкая диэлектрическая постоянная, чтобы уменьшить паразитную емкость (3,5–4,5)
	Низкий коэффициент диэлектрических потерь
	Высокое электрическое удельное сопротивление
Химические	Контролируемость композиционного состава
	Химическая стабильность
	Геттерирование ионов щелочи
	Осаждение при низкой температуре
Физические/ механические	Отсутствие пор, микротрещин, дисперсных включений, раковин
	Конформное покрытие ступенек
	Низкое напряжение пластической деформации
	Однородная толщина пленки
	Хорошая адгезия с подложками
	Барьер для ионов щелочи
	Возможность формирования рисунка с помощью прецизионной литографии селективного травления
	Возможность оплавления для сглаживания рельефа или планаризации

Многообразие методов формирования диэлектрических пленок можно разделить на две группы – за счет частичного расходования материала подложки и без использования материала подложки. Первая группа методов основана на физико-химическом взаимодействии компонента (компонентов) подложки с атомарным или ионизированным кислородом (азотом) в газовой, жидкой или парогазовой смеси. Вторая группа методов формирования пленок не требует использования подложки и основана на нанесении диэлектрических пленок из внешней среды. На рис. 3.1 представлена классификация методов формирования диэлектрических пленок.

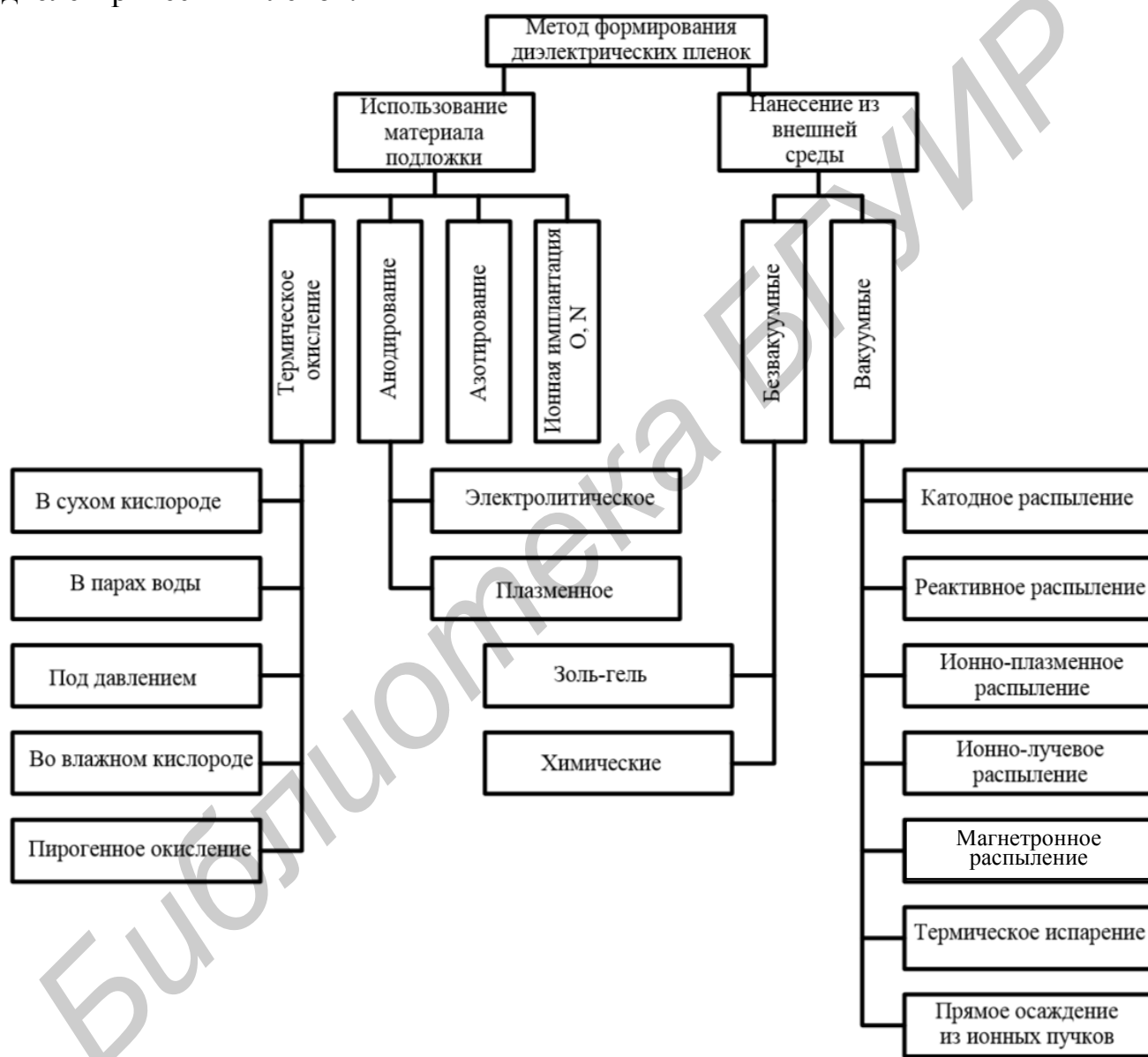


Рис. 3.1. Классификация методов формирования диэлектрических пленок

Методы, основанные на использовании материала подложки, обеспечивают высокое качество пленок (плотность, электрофизические параметры, адгезия, равномерность по толщине).

Осаждение диэлектрических пленок на поверхность кремниевой пластины взамен их окисления позволяет, во-первых, уменьшить температурное воздействие на пластину и, во-вторых, использовать широкий круг материалов, обладающих в конкретных условиях применения наилучшими защитными или электрическими характеристиками.

3.1.1. Ионно-лучевое распыление

Ионно-лучевое распыление является одним из наиболее перспективных способов нанесения пленок. Метод основан на бомбардировке мишени из распыляемого материала потоком ионов, которые выбивают с ее поверхности частицы вещества, формирующие затем пленку на подложке. Этот метод обладает рядом преимуществ, среди которых можно назвать:

- более низкое рабочее давление (10^{-2} Па), что на порядок ниже давления при магнетронном распылении;
- возможность распыления любых материалов;
- использование любых рабочих газов;
- минимальное воздействие вторичных электронов на подложку;
- пространственное разделение области распыления и области конденсации.

Ионные источники – устройства для получения направленных потоков ионов. Существует три основных вида источников ионов:

- многосеточный источник Кауфмана;
- ускоритель с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗДП);
- ускоритель с анодным слоем (УАС).

Ионно-лучевые источники создаются в основном на базе ионных источников Кауфмана и холловских ускорителей с анодным слоем. Ионный источник Кауфмана осуществляет ускорение ионов путем подачи напряжения на специальную сетку-электрод, при этом ионы проходят через ячейки сетки. Однако в этом случае происходит распыление сетки ионами и материал сетки попадает в мишень, что вызывает загрязнение последней.

Преимуществом ионных источников на основе плазменных ускорителей является отсутствие накаливаемого термокатода и ионно-оптической системы, что существенно упрощает их конструкцию и увеличивает ресурс работы. Ионные источники на базе ускорителей с анодным слоем содержат кольцевой анод 1 и электромагнитную систему, состоящую из катушки соленоида 4, катодов 2 и магнитопровода 3 (рис. 3.2).

С помощью катушки соленоида создается радиальное магнитное поле в ускоряющей промежутке – зазоре между катодом и анодом, а между анодом и катодом, который обычно находится под нулевым потенциалом, – электрическое поле, силовые линии которого перпендикулярны силовым линиям магнитного поля. Электроны (в любом газе всегда имеется некоторое количество свободных электронов из-за воздействия различных ионизирующих излучений, например,

космическая радиация, естественный радиоактивный фон и т. д.), совершая замкнутый холловский дрейф в скрещенных $E \times H$ полях, ионизируют атомы рабочего газа и в прианодном слое возникает плазменный разряд. Так как анод находится под большим положительным потенциалом $U_a = 0,5-5$ кВ, то ионы будут отталкиваться от него, приобретать энергию, равную $E = (0,5-0,7)U_a$. В результате формируется пучок ускоренных ионов, который будет иметь трубчатую (О-образную) форму. Данный пучок можно направить на мишень из расплываемого материала или на подложку с целью очистки и травления последней.

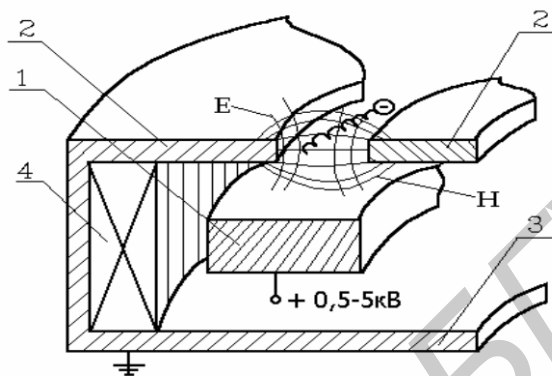


Рис. 3.2. Схема холловского ускорителя с анодным слоем

В качестве ионного источника в данной лабораторной работе используется двухлучевой плазменный ускоритель с анодным слоем, упрощенная схема которого показана на рис. 3.3. Он позволяет формировать два независимых пучка ионов: из верхней ступени в виде полого цилиндра и конусообразный из нижней ступени. Первый пучок предназначен для ионных очистки и бомбардировки, второй, непосредственно используемый нами, — для распыления мишени.

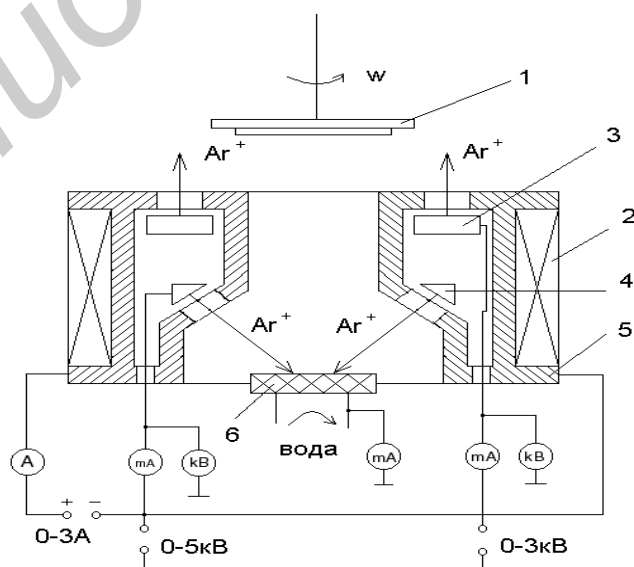


Рис. 3.3. Упрощенная схема двухлучевого плазменного ускорителя с анодным слоем:
1 – подложкодержатель; 2 – соленоид; 3 – анод верхней ступени; 4 – анод нижней ступени; 5 – магнитопровод; 6 – мишень, охлаждаемая водой

Формирование пленок диоксида кремния будет проводиться двумя способами:

1. Путем ионно-лучевого распыления кварцевой мишени ионами аргона с использованием термоэлектронного компенсатора для нейтрализации положительного заряда на мишени.

2. Путем реактивного ионно-лучевого распыления кремниевой мишени ионами аргона и кислорода.

3.1.2. Методы контроля диэлектрических пленок

Кратко рассмотрим основные параметры диэлектрических пленок и методы их контроля.

Состав диэлектрических пленок можно определять с помощью ИК-спектроскопии. Спектр поглощения диоксида кремния характеризуется максимумом поглощения на длине волны $\lambda = 9,3$ мкм. Спектр поглощения нитрида кремния имеет резкую полосу поглощения с максимумом в области длин волн $\lambda = 11,6 - 12,1$ мкм. Наличие максимума связано с поглощением на связях Si-N. Если в слоях нитрида кремния имеются примеси кислорода, углерода, водорода и др., то в спектре ИК-поглощения появляются дополнительные максимумы. Например, поглощение на связях Si-O дает максимум на $\lambda = 9,4$ мкм, поглощение на связях Si-H дает максимум на $\lambda = 2,9$ мкм, на связях Si-C на $\lambda = 12,4$ мкм и т. д. Сопоставляя интенсивность различных полос поглощения в ИК-спектрах, можно определить относительное содержание элементов, входящих в состав пленки.

Структура пленок исследуется с помощью электронного микроскопа или рентгеновским методом. Как правило, лучшими диэлектрическими свойствами обладают аморфные пленки.

Плотность пленок можно определить непосредственно по увеличению массы образца после нанесения пленки. На производстве обычно применяют методы качественной косвенной оценки: по скорости травления пленки диоксида кремния в стандартном P-травителе или по коэффициенту оптического преломления. В первом случае пленку известной толщины травят в составе 15 объемных частей 49%-й HF+10 объемных частей 70%-й HNO₃ +30 объемных частей H₂O. Плотные термически выращенные пленки диоксида кремния имеют скорость травления около 0,2 нм/с. Большие скорости травления соответствуют менее плотным пленкам.

Плотные термически выращенные пленки диоксида кремния имеют показатель преломления $n = 1,46$.

Толщина пленок измеряется эллипсометрическими, интерференционными методами, по интенсивности отражения, по цвету пленок и др.

В простейшем случае пластину с пленкой диоксида кремния наклонно погружают в стакан с фтористоводородной кислотой и затем медленно вынимают. В процессе такого травления получают клин. При исследовании клина травления

под микроскопом наблюдают цветные кольца. Подсчитав количество колец и заметив граничный со стороны нестравленной пленки диоксида кремния цвет последнего кольца, определяют с помощью специальной таблицы толщину пленки.

Для измерения толщины и показателя преломления диэлектрических пленок наиболее перспективен метод эллипсометрии. Лазерный эллипсометрический микроскоп ЛЭМ-1 на основе промышленного газового лазера ЛГ-55 позволяет измерять диэлектрические пленки толщиной 5–1000 нм с точностью $\pm 0,1$ нм во всем диапазоне, а также их показатель преломления.

Плотность сквозных пор в пленке определяется с помощью метода электрографии. Между двумя графитовыми электродами зажимается фотобумага, смоченная водой, и образец Si/SiO₂. Между электродами подается напряжение около 10–15 В. Электрический ток, проходя через систему, воздействует на эмульсию фотобумаги, вызывая ее почернение в местах микродефектов.

Величина адгезии определяется с помощью механических испытаний (например методом царапания), которые проводятся до отслаивания пленки от поверхности полупроводниковой пластины.

Электрическая прочность пленок определяется пробивной напряженностью электрического поля при определенном токе. Диэлектрическая проницаемость определяется по емкости МДП-структуры (металл – диэлектрик – полупроводник) по формуле

$$\varepsilon = \frac{Cd}{S\varepsilon_0}, \quad (3.1)$$

где C – емкость МДП-структуры, Ф;

d – толщина диэлектрической пленки, м;

S – площадь металлического контакта, м²;

ε_0 – диэлектрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м).

Состояние границы раздела диэлектрик – полупроводник оценивается концентрацией носителей заряда под диэлектриком, поверхностным, потенциалом, неподвижным зарядом в диэлектрике, плотностью поверхностных состояний, стабильностью неподвижного заряда, временем релаксации поверхностных, состояний. Большинство параметров границы раздела диэлектрик – полупроводник можно контролировать путем измерения вольт-фарадных характеристик МДП-структур.

Пассивирующие свойства пленок оцениваются по степени деградации (ухудшения) p - n -переходов после воздействия на них влажной атмосферы. Критерием оценки качества пассивации служат обратные токи переходов и пробивные напряжения.

3.2. Описание лабораторной установки

Экспериментальная установка представляет собой модернизированную УВМ типа УРМ 3.279.017 (рис. 3.4, а). Она оснащена механическим пластинчато-роторным насосом НВР-5Д со скоростью откачки 5 л/с, паромасляным диффузионным насосом со скоростью откачки 500 л/с. Управление установки – ручное. Давление в камере контролируется с помощью вакуумметра ВИТ-2. Подколпачные устройства включают в себя горизонтальную карусель с подложкодержателями, приводимую во вращение электродвигателем РД-9 с редуктором, и двухлучевой ионный источник с барабаном на четыре мишени (рис. 3.4, б). Питание ионного источника осуществляется высоковольтным блоком питания БП-94. Установка оснащена гидроприводом для подъема колпака, системой напуска аргона и кислорода с помощью ручных игольчатых натекателей.



Рис. 3.4. Внешний вид установки вакуумного напыления УРМ 3.279.017 (а) и внешний вид подколпачного объема (б)

Для материалов мишеней используются особо чистый кварц, кремний поликристаллический КП-4 и никель (для формирования металлического контакта). Покрытия из диоксида кремния будут наноситься на подложки из кремния и оптического стекла К8. Термоэлектронный компенсатор представляет собой проволоку из вольфрама диаметром 0,3 мм, закрепленную на стальном кольце. Для нагрева компенсатора используется отдельный блок питания. Никелевые контакты размером $0,8 \times 0,8 \text{ мм}^2$ для МДП-структуры наносятся через металлическую маску. Измерение емкости и тангенса диэлектрических потерь пленок SiO_2 осуществляется на частоте 1 МГц с помощью измерителя Е7-20.

3.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с теоретическими сведениями по данной лабораторной работе.
2. Получить вариант задания у преподавателя (табл. 3.3).
3. Установить на барабане необходимые мишени.
4. Закрепить на подложкодержателе подложки из кремния и стекла.
5. Осуществить процесс откачки вакуумной камеры до остаточного давления $3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.
6. Провести процесс нанесения пленки SiO_2 в соответствии с вариантом.
7. Извлечь подложки из камеры, разрезать с помощью стеклореза кремниевую подложку пополам.
8. Нанести на одну половину кремниевой подложки контакты из никеля.
9. Определить толщину полученной пленки диоксида кремния по цвету (табл. 3.4).
10. Измерить емкость и тангенс угла диэлектрических потерь структуры $\text{Ni/SiO}_2/\text{SiC}$ помощью измерителя E7-8. Для получения достоверных результатов измерения провести не менее чем в пяти точках структуры. По формуле (3.1) рассчитать значение диэлектрической проницаемости пленки SiO_2 .

Таблица 3.3

Варианты индивидуальных заданий

Параметры	Вариант			
	1	2	3	4
Мишень	Кремний	Кремний	Кварц	Кварц
Ток компенсатора, А	–	–	12	16
Содержание O_2 , %	50	75	–	–
U_a , кВ	3,0	3,0	4,0	4,0

Таблица 3.4

Определение толщины пленки по цвету

Толщина, мкм	Цвет	Толщина, мкм	Цвет
0,05	Бежевый	0,17	Металлический
0,07	Коричневый	0,20	Светло-золотой
0,10	Темно-фиолетовый	0,22	Золотистый
0,12	Голубой	0,25	Оранжевый
0,15	Светло-голубой	0,27	Красно-фиолетовый

11. Визуально оценить пропускание покрытия на подложке из стекла.
12. Оформить отчет о проделанной работе.

3.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Индивидуальное задание.
3. Схема технологической установки.
4. Результаты экспериментов и расчетов.
5. Анализ полученных результатов.
6. Выводы.

3.5. Контрольные вопросы

1. Какие функции выполняют диэлектрические пленки?
2. Области применения диэлектрических пленок.
3. Требования, предъявляемые к диэлектрическим пленкам.
4. Методы формирования пленок с использованием материала подложки.
5. Методы формирования пленок без использования материала подложки.
6. На что влияет ток термокомпенсатора?
7. Как влияет значение парциального давления кислорода на основные электрофизические параметры пленок?
8. Основные характеристики диэлектрических пленок и методы их контроля.
9. Достоинства метода ионно-лучевого распыления.
10. Принцип работы ускорителя с анодным слоем.

Лабораторная работа №4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Цель работы: изучение процессов формирования отверстий лазерным излучением в листовых материалах; проведение экспериментальных исследований и анализ полученных данных.

4.1. Краткие теоретические сведения

4.1.1. Излучение и вещество

Лазерное излучение. Наиболее важными свойствами лазерного излучения являются его когерентность, направленность, монохроматичность, малая длительность импульса и большая интенсивность. Рассмотрим кратко эти свойства с точки зрения их роли при взаимодействии лазерного излучения с веществом

Монохроматичность лазерного излучения. Она характеризует способность лазера излучать в узком диапазоне длин волн и определяется величиной $\Delta\omega / \omega$. Лазерное излучение не идеально монохроматично, т. е. не выполняются условия

$$\Delta\omega / \omega \equiv 0, \quad \Delta\omega \equiv 0, \quad (4.1)$$

где ω – частота излучения;

$\Delta\omega$ – ширина спектра излучения.

Предположение об идеальной монохроматичности лазерного излучения может использоваться в качестве модели излучения лишь в ограниченном числе случаев. Реальная ширина спектра излучения $\Delta\omega$ определяется эффективной шириной рабочего перехода в активной среде лазера, свойствами резонатора, длительностью импульса излучения. На практике при использовании одночастотного режима генерации одной моды с фиксированными поперечными и продольными индексами реализуется величина $\Delta\omega$ порядка $10^{-3} - 10^{-4} \text{ см}^{-1}$, что для частоты ω светового диапазона соответствует степени монохроматичности излучения $\Delta\omega / \omega \sim 10^{-8}$. В случае стандартных лазеров на красителях с изменяемой частотой генерации обычно $\Delta\omega \sim 1 \text{ см}^{-1}$, а в случае мощных твердотельных лазеров, например на стекле с неодимом, – $\Delta\omega \sim 10 \text{ см}^{-1}$.

Когерентность лазерного излучения. Когерентность обусловлена вынужденным характером излучения. Для электромагнитной волны существуют понятия *пространственной* и *временной* когерентности. Если разность фаз для любых точек волнового фронта в любой момент времени t остается неизменной, то данная волна является *полностью пространственно когерентной*. Если разность фаз сохраняется лишь в некоторой конечной области пространства, то волна является *лишь частично пространственно-когерентной*. Если в данной точке простран-

ства на интервале времени Δt фаза волны остается неизменной, то существует *временная когерентность* на интервале Δt . Если Δt не ограничено, то имеет место *полная временная когерентность*; если Δt ограничено, то это *частичная временная когерентность* (рис. 4.1). Понятие временной когерентности связано с понятием монохроматичности излучения. Так как $\Delta\omega \leq \frac{1}{\Delta t}$, то полная временная когерентность соответствует идеально монохроматическому излучению.

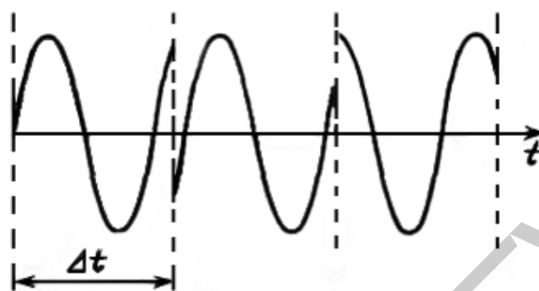


Рис. 4.1. Схема излучения с частичной (на интервале времени Δt) временной когерентностью

Направленность лазерного излучения. Направленность излучения обусловлена геометрией резонатора. В резонаторе возбуждаются лишь такие волны, которые распространяются вдоль оси резонатора или под небольшим к ней углом. Конечный размер апертуры резонатора (или поперечного размера активной среды) обуславливает возникновение дифракции излучения. Расходимость излучения, обусловленная дифракцией, описывается известным соотношением:

$$\theta \approx \frac{\lambda}{D}, \quad (4.2)$$

где λ – длина волны излучения;

D – диаметр апертуры резонатора (или активной среды).

Так как на практике $\lambda \sim 1$ мкм, а $D \sim 1$ см, то $\theta \sim 10^{-4}$ рад (рис. 4.2).

Длительность действия лазерного излучения. Длительность определяется конструкцией лазера. Можно выделить следующие типичные режимы распределения излучения во времени: непрерывный режим; импульсный режим так называемой свободной генерации (длительность импульса определяется при этом длительностью вспышки лампы накачки, типичная длительность $\Delta\tau_n \sim 10^{-3}$ с); режим модуляции добротности резонатора (длительность импульса излучения определяется превышением накачки над порогом генерации и скоростью включения добротности, типичная длительность лежит в интервале $10^{-9} - 10^{-8}$ с – это так называемый наносекундный диапазон длительностей излучения).

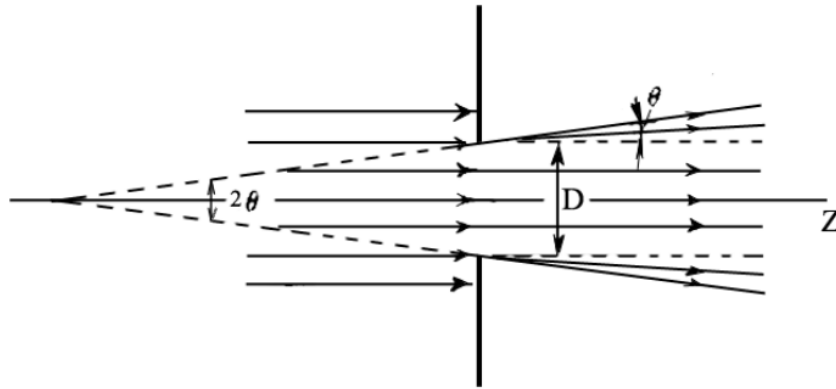


Рис. 4.2. Схема возникновения расходимости излучения, обусловленной дифракцией при падении плоской волны на экран с отверстием

При осуществлении различных импульсных режимов излучения укорочение длительности импульса всегда ведет к уменьшению энергии в импульсе, но, как правило, к увеличению средней мощности излучения за импульс. Форма импульса излучения существенно зависит от режима работы лазера.

Интенсивность лазерного излучения. Интенсивность является не единственной энергетической характеристикой, определяющей характер взаимодействия излучения с веществом. Помимо интенсивности F (число фотонов (или энергия), проходящих через единицу площади сечения за единицу времени) в ряде случаев можно использовать для характеристики излучения также мощность излучения P :

$$P = \int_S F ds \quad (4.3)$$

(число фотонов (или энергия), проходящих через плоскость, нормальную к направлению распространения излучения за единицу времени) или энергию излучения Q :

$$Q = \int_0^{\tau_{\text{л}}} P(t) dt \quad (4.4)$$

(число фотонов (или энергия), проходящих через плоскость за время длительности импульса излучения $\tau_{\text{л}}$).

Интенсивность лазерного излучения определяется энергией в импульсе излучения Q , длительностью импульса $\tau_{\text{л}}$ и направленностью излучения, от которой зависит площадь S , через которую проходит излучение. Так как распределение излучения во времени и по площади неравномерно, то и интенсивность излучения зависит от момента времени t и координат x, y на плоскости, нормальной к оси пучка излучения.

Вещество. Рассматривая взаимодействие некогерентного света с прозрачными макроскопическими телами – газами, жидкостями, стеклами и кристаллами, всегда предполагают, что свойства самой прозрачной среды под действием света не изменяются. В случае лазерного излучения ситуация качественно отличается. Ввиду большой интенсивности излучения изменяются усредненные оптические характеристики среды, например ее показатель преломления. Это приводит к новым эффектам, например к *самофокусировке излучения*. Когерентность лазерного излучения обуславливает тот факт, что нелинейная поляризация среды имеет вид волны, распространяющейся в среде наряду с падающей волной.

Эффект возникновения и развития *электронной лавины* под действием лазерного излучения приводит к превращению различных прозрачных сред в плазму, т. е. к переходу вещества в новое состояние. При рассмотрении взаимодействия лазерного излучения с прозрачными средами конкретные свойства среды часто не рассматриваются, среда характеризуется усредненной нелинейной оптической характеристикой, например нелинейной восприимчивостью. Однако в некоторых случаях конкретный тип среды играет определяющую роль.

Взаимодействие излучения с прозрачными средами. Если исходить из основного предположения, что среда прозрачна, то, очевидно, надо под термином *взаимодействие* иметь в виду процесс распространения излучения в среде. Основные законы распространения света в прозрачных средах, справедливые в рамках линейной оптики, – это закон прямолинейного распространения света; закон независимости световых пучков; законы отражения и преломления на границе различных сред; законы поглощения Бугера и Бера.

За счет нелинейной поляризации среды лазерное излучение может распространяться непрямолинейно, световые пучки взаимодействуют друг с другом, а законы Бугера и Бера не выполняются. Эти новые закономерности составляют основы *нелинейной оптики*.

Новые явления при распространении лазерного излучения в прозрачных средах возникают и вне рамок собственно нелинейной оптики.

Это, во-первых, ряд нестационарных явлений, обусловленных когерентностью и малой длительностью резонансного воздействия лазерного излучения на вещество; в качестве конкретного примера можно привести *явление самоиндуцированной прозрачности*, когда импульс излучения проходит через поглощающую среду без потерь.

Во-вторых, новые явления возникают и из-за экстремально большой интенсивности лазерного излучения. Эти явления заключаются в изменении агрегатного состояния самих прозрачных сред под действием лазерного излучения – в превращении газа в плазму, в испарении жидкостей, в разрушении твердых тел. Типичным является возникновение оптического пробоя в конденсированных средах.

Взаимодействие излучения с непрозрачными средами. Из курса оптики известно, что процесс взаимодействия света с непрозрачными средами сводится к отражению и рассеянию света поверхностью и его поглощению в очень тонком

поверхностном слое (скин-слое – в случае металлов). По причине относительно малой интенсивности обычного, некогерентного света его поглощение в поверхностном слое не приводит к каким-либо интересным наблюдаемым эффектам, поэтому основное внимание всегда обращается на отражение и рассеяние света.

Для лазерного излучения характерна качественно иная ситуация. Исключительно большая интенсивность лазерного излучения обуславливает проявление разнообразных эффектов, связанных именно с поглощением излучения веществом. Под действием лазерного излучения твердые, непрозрачные тела, например металлы, нагреваются до высокой температуры, расплавляются, испаряются, а их пары ионизируются, образуя плазму. Именно эти процессы представляют наибольший интерес как для фундаментальных исследований, так и для практических приложений, из которых можно упомянуть *лазерный термоядерный синтез* и *лазерную обработку материалов*.

4.1.2. Генерация лазерного излучения

Для генерации лазерного излучения необходимо выполнение двух условий:

- 1) наличие инверсии населенностей;
- 2) усиление света должно компенсировать затухание энергии, обусловленное потерями в резонаторе (пороговое условие).

Инверсная заселенность для двух энергетических состояний (рис. 4.3) существует в том случае, если число атомов в энергетически более высоком состоянии больше, чем число атомов в более низком состоянии.

Инверсия заселенностей легче достигается в следующих случаях (см. рис. 4.3):

- при большом времени жизни верхнего уровня 2;
- при малом времени жизни нижнего уровня 1;
- при большой вероятности перехода 0–3;
- при быстром переходе 3–2.

Процесс создания инверсии заселенностей, часто называемый термином *накачка*, протекает различными способами и в значительной степени характеризует различные типы лазеров. Инверсия заселенностей образуется с помощью оптической накачки, возбуждения электронным ударом, электрического тока через *p-n*-переход и химической накачки.

Оптическая накачка. Возбуждение верхнего уровня 3 происходит путем поглощения оптического излучения, которое соответствует переходу 0–3 (типично для твердотельных лазеров и лазеров на красителях). В качестве источников накачки применяются мощные импульсные лампы (преимущественно для твердотельных лазеров) и лазеры (например, аргоновый ионный лазер, преимущественно для лазеров на красителях).

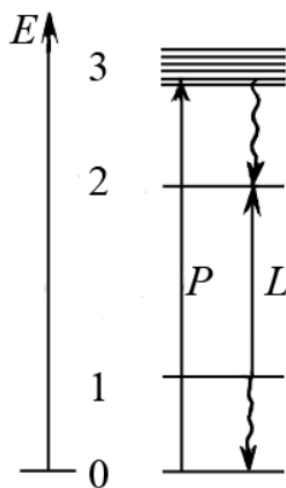


Рис. 4.3. Принципиальная схема энергетических уровней для лазерного процесса (L – лазерный переход; P – возбуждение накачкой)

Выбор источников накачки происходит с учетом необходимой мощности накачки (выполнение порогового условия) и спектрального распределения.

Принципиально необходимо, чтобы преобладающая спектральная доля интенсивности соответствовала более высокой частоте по сравнению с частотой лазерного перехода $2-1$ и имела максимум в области перехода $0-3$. Для передачи энергии излучения накачки активной среде применяются различные устройства, определяемые типом лазера.

Оптические резонаторы. Обратная связь для поля, усиленного в процессе вынужденного излучения, достигается с помощью подходящей резонансной структуры. Благодаря такой резонансной структуре выделяется только относительно немного собственных колебаний. Усиление для этих собственных колебаний достаточно, чтобы компенсировать потери, так что возникает генерация излучения.

Собственные колебания резонатора характеризуются частотой, направлением распространения и поляризацией, так что типичные свойства излучения, как, например, спектральная плотность энергии, монохроматичность и расходимость, определяются селективными свойствами резонатора.

Конфигурации оптических резонаторов могут быть разными. Следует различать следующие типы резонаторов:

- резонаторы с плоскими или концентрическими зеркалами;
- устойчивые резонаторы;
- неустойчивые резонаторы.

Электромагнитное излучение имеет характер стоячей волны в резонаторах типа Фабри – Перо (рис. 4.4) и бегущей волны в кольцевых резонаторах (рис. 4.5).

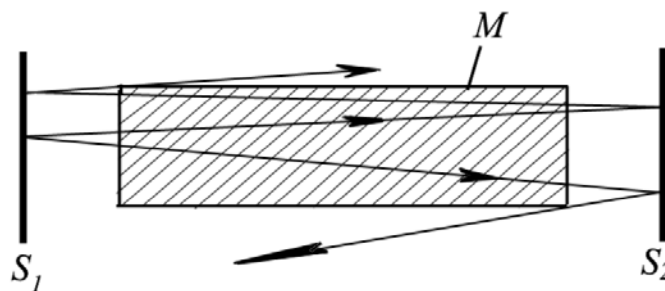


Рис. 4.4. Схема лазерного плоскопараллельного резонатора (резонатора Фабри – Перо) (S_1, S_2 – зеркала; M – активная среда)

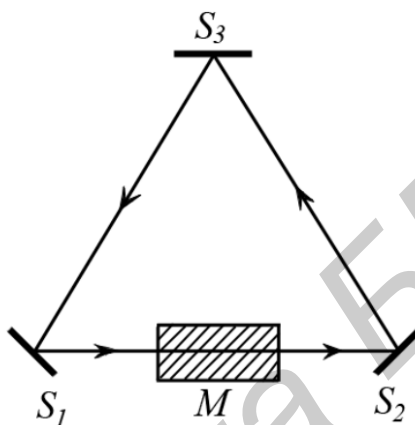


Рис. 4.5. Кольцевой резонатор (S_1-S_3 – зеркала; S_2 – выходное зеркало; M – активная среда)

В соответствии с многообразием лазерных активных сред, а также возможностями применения лазеров конструкции резонаторов, включая размеры (длина 1 мм – 200 м, диаметр 50 мкм – 50 см), сильно различаются.

Пороговое условие генерации лазера. Усиление поля за счет испускания вынужденного излучения при полном проходе через резонатор должно быть больше, чем потери его за проход (обусловленные в основном выводом излучения из резонатора). Только тогда становится возможной генерация лазерного излучения. Экспериментальное значение коэффициента усиления слабого сигнала можно определить, зная характеристики резонатора (длину, коэффициенты отражения зеркал).

4.1.3. Образование отверстий в непрозрачных материалах

С помощью лазерного излучения могут быть осуществлены сверление и резка материалов. Эти операции можно выполнить различными методами, выбор которых зависит от возможностей лазерного оборудования, свойств материала и требований к результатам обработки. В настоящее время получили развитие два метода лазерной обработки: *метод копирования*, при котором формируемая поверхность повторяет с той или иной степенью точности форму луча, и *метод обхода по контуру*, при котором форма обрабатываемой поверхности определяется

траекторией относительного перемещения луча и обрабатываемой заготовки (рис. 4.6). При обработке методом копирования относительное перемещение луча и детали в направлении, перпендикулярном направлению распространения излучения, отсутствует.

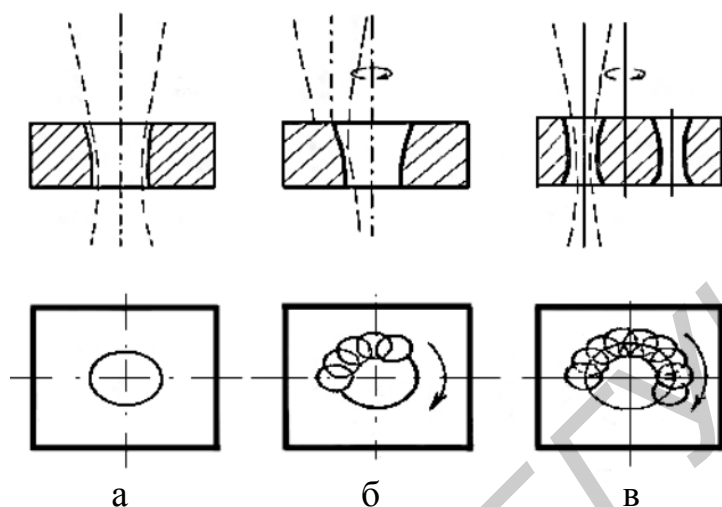


Рис. 4.6. Методы формообразования при размерной обработке лучом лазера:
а – метод копирования; б – расширение отверстия обходом по контуру;
в – вырезание отверстия обходом по контуру

Метод копирования нашел широкое применение при получении отверстий. Необходимая форма светового луча в зоне обработки может быть получена с помощью оптических систем. Круглые отверстия могут быть образованы при фокусировке излучения лазеров с активными элементами круглого сечения без применения ограничивающих диафрагм и масок в оптических системах. Применение проекционного метода позволяет повысить точность круглых отверстий, а также получать отверстия некруглой формы (рис. 4.7).

Сформировав световой пучок с кольцевым поперечным сечением, например, при помощи аксиконов, можно получить отверстия относительно большого диаметра аналогично тому, как сверлят отверстия трубчатым инструментом. Точность соответствия формы и размеров отверстий, обрабатываемых методом копирования, форме и размерам луча зависит от режима обработки.

Для обработки методом обхода по контуру применяются лазеры, работающие как в импульсном, так и в непрерывном режиме. В первом случае непрерывный контур получается в результате последовательного наложения отверстий друг на друга с некоторым смещением. Контурная обработка может быть применена для расширения (см. рис. 4.6, б), вырезания (см. рис. 4.6, в) отверстий любой формы поперечного сечения, а также для резки материалов.

Основными процессами, приводящими к образованию отверстий в материалах с использованием лазерного излучения, являются испарения и плавления вещества. По глубине отверстие растет за счет испарения, а по диаметру – за счет плавления стенок и вытеснения жидкости избыточным давлением паров.

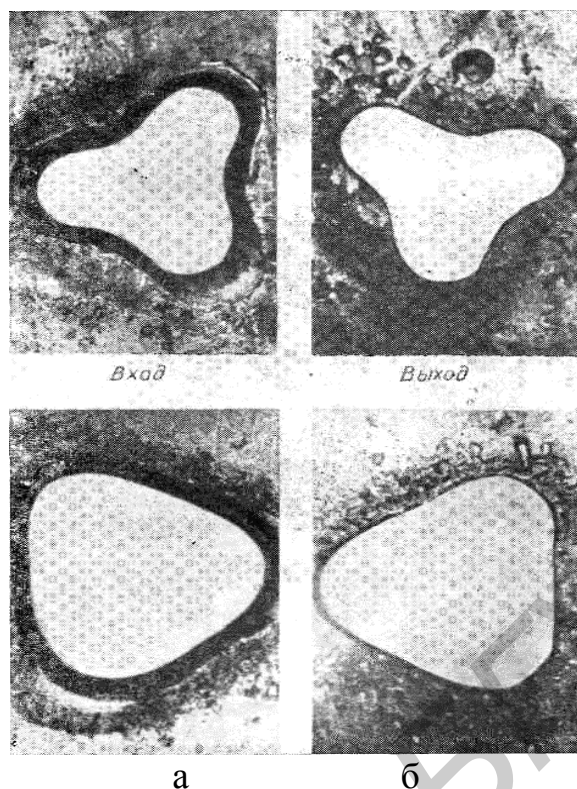


Рис. 4.7. Фигурные отверстия в пластине из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм, просверленные проекционным методом: а – вид отверстий со стороны входа излучения; б – те же отверстия, вид со стороны выхода. Максимальный размер поперечного сечения отверстия 0,3 мм

При взаимодействии лазерного излучения с поверхностью материала часть излучения поглощается и рассеивается продуктами разрушения.

Наиболее существенное влияние на поглощение излучения в факеле оказывает паровая фаза продуктов разрушения, представляющая собой низко-температурную слабоионизированную плазму, прозрачность которой определяется ее температурой и концентрацией. Экспериментально доказано, что поглощение излучения в плазме начинает иметь наиболее существенное значение при плотностях потоков излучения $g \geq 10^8 - 10^9 \text{ Вт/см}^3$.

Эта величина ограничивает сверху диапазон рабочих плотностей потоков излучения, используемых для получения отверстий в материалах.

Нижняя граница определяется плотностью потока, при которой процесс образования лунки начинается в момент окончания импульса, т. е. примерно соответствует порогу начала разрушения материалов (металлов) $g = 10^5 - 10^6 \text{ Вт/см}^3$.

Выбор технологических режимов при прошивке отверстий лазерным лучом основывается на учете таких свойств обрабатываемого материала, как:

– коэффициент поглощения и отражательная способность при данной длине волны лазерного излучения, определяющие процесс поглощения энергии: удельная теплопроводность и температуропроводность, определяющие тепловой поток в материале;

– плотность, удельная теплоемкость, скрытая теплота и температура фазового перехода, определяющие энергоемкость процесса перехода материала в новое фазовое состояние.

При выборе режимов необходимо учитывать влияние энергетических и временных характеристик лазерного излучения. Многие технологические лазерные установки имеют одну неизменную продолжительность импульса. В таком случае получение заданных размеров отверстия достигается подбором нужного значения энергии импульса и зависимость глубины и диаметра полученного отверстия от энергии является одной из основных характеристик, определяющих возможности лазерной обработки. Величину энергии можно менять путем изменения электрической энергии импульсных ламп, применения светофильтров, диафрагмированием луча. При этом установлено, что когда энергия изменяется накачкой или диафрагмированием луча, диаметры полученных отверстий меньше, чем диаметры отверстий, получаемых при изменении энергии светофильтрами.

Уменьшение диаметра при диафрагмировании луча объясняется уменьшением его расходимости, а в случае изменения энергии – уровнем накачки активного элемента, уменьшением как расходимости луча, так и длительности излучения. Диафрагмирование луча при постоянной накачке активного элемента приводит к особенности: если диаметр отверстий связан с диаметром диафрагмы, то глубина отверстий меняется весьма слабо при изменении диафрагмы в широких пределах.

Неизменность глубины отверстия при диафрагмировании луча объясняется тем, что диафрагма не меняет распределения плотности потока в поперечном сечении луча, изменяя лишь общую расходимость и диаметр луча. Поскольку скорость роста лунки в глубину определяется плотностью мощности потока, то глубина отверстия не должна существенно изменяться при диафрагмировании луча.

Экспериментальные исследования показывают, что размеры отверстий зависят определенным образом и от длительности импульса лазерного излучения.

Изменение длительности импульса с 0,25 до 0,85 мс при неизменной энергии накачки приводит к увеличению глубины отверстия в 1,5 раза с одновременным уменьшением диаметра на 30 %. Зависимость глубины и диаметра получаемого отверстия от длительности импульса можно объяснить двумя факторами. Первый – распределение интенсивности излучения в поперечном сечении луча падает от своего максимального значения в центре луча к периферийным участкам его сечения. Второй фактор – уменьшение экранирующего влияния продуктов разрушения материала при уменьшении плотности светового потока, когда длительность импульса увеличивается. Это объясняется увеличением доли жидкой фазы, которая остается на стенках отверстия и не может быть вытеснена из лунки из-за снижения давления паров и, таким образом, практически не участвует в экранировании излучения.

Важным фактором в образовании наплывов расплава по стенкам отверстия является наличие у импульса излучения пологого заднего фронта. Опыты, проведенные с отсечкой заднего фронта импульса, показывают, что при этом микроре-

льеф поверхности отверстия становится более ровным, практически без наплывов расплавленного материала, хотя глубина отверстия изменяется незначительно (15 % при отсечке заднего фронта длительностью 300 мкс).

Согласно феноменологической модели, строгий анализ роста лунки при плавлении стенок требует решения гидродинамической задачи при движении пара и вязкой жидкости вдоль стенок с учетом всех факторов их нагрева. Рассмотрим упрощенную модель, согласно которой при фокусировке излучения вблизи передней поверхности материала образуется лунка, профиль которой близок к цилиндрическому (рис. 4.8).

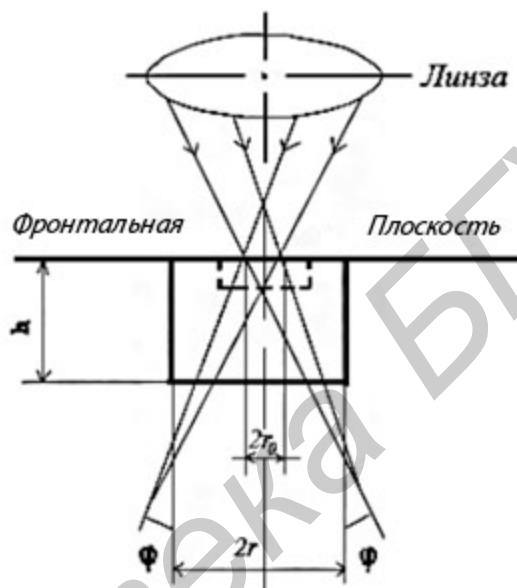


Рис. 4.8. Изменение глубины h и радиуса r лунки во времени

Изменение размеров лунки со временем происходит так, что в первом приближении текущий радиус $r(t)$ и глубина $h(t)$ связаны между собой и направлением светового конуса для крайних лучей пучка с углом раствора 2ϕ соотношением

$$r(t) = r_0 + h(t)\operatorname{tg}(\phi), \quad (4.5)$$

где r_0 – радиус пятна изменения на поверхности материала.

При построении феноменологической модели пренебрегают также температурной зависимостью полной теплоты испарения материала и экранировкой поверхности испарения продуктами разрушения.

Согласно феноменологической теории, если излучение лазера фокусируется на поверхность материала, то к моменту окончания действия импульса образуется отверстие глубиной

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r_0}{\operatorname{tg}\phi}\right)^3 + \frac{3E}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2\phi \cdot L_0}} - \frac{r_0}{\operatorname{tg}\phi} \quad (4.6)$$

и диаметром

$$d = 2\sqrt[3]{r_0^3 + \frac{3E \cdot \operatorname{tg}\phi}{\pi \cdot L_0}}, \quad (4.7)$$

где $E = P\tau$ – энергия излучения в импульсе;

P – импульсная мощность;

r_0 – начальный радиус лунки, равный радиусу светового пятна;

ϕ – половинный угол раствора светового пятна;

L_0 – удельная скрытая теплота испарения вещества.

Таким образом, определяющим фактором, влияющим на соотношение глубины и диаметра отверстия, является величина $\operatorname{tg}\phi$, характеризующая угол светового конуса после фокальной плоскости оптической системы. Чем меньше $\operatorname{tg}\phi$, тем больше отношение глубины к диаметру отверстия. Поэтому для получения глубоких узких отверстий оптимальным является случай, когда $\operatorname{tg}\phi = 0$, при этом

$$h = \frac{E}{\pi \cdot r_0 L_0}; \quad d = 2r_0; \quad \frac{h}{d} = \frac{E}{2\pi \cdot r_0 L_0}. \quad (4.8)$$

Соотношения (4.8) описывают процесс роста отверстия внутри цилиндрической световой трубки, в которую вырождается световой конус ($\operatorname{tg}\phi = 0$).

Если $\operatorname{tg}\phi \neq 0$, то расфокусировка лазерного пучка приводит к уменьшению плотности энергии в его нижней части. Следствием этого является существование предельных размеров отверстия, образующегося в материале под действием неограниченного числа световых импульсов с заданной энергией E :

$$h_{\text{пред}} \approx \frac{\sqrt{\frac{E}{\pi \cdot Q} - r_0^2}}{\operatorname{tg}\phi}, \quad (4.9)$$

$$d_{\text{пред}} \approx 2\sqrt{\frac{E}{\pi \cdot Q}}, \quad (4.10)$$

где Q – пороговая плотность энергии, соответствующая установлению процесса квазистационарного испарения к концу импульса.

На профиль отверстия и на его размеры существенное влияние оказывают условия фокусирования лазерного излучения, под которыми понимают фокусное расстояние фокусирующей системы и смещение фокальной ее плоскости относительно поверхности обрабатываемой заготовки.

На рис. 4.9 приведены профили отверстий, полученные в материале при одной и той же энергии излучения, но при различных положениях фокуса Δf относительно поверхности обрабатываемой заготовки.

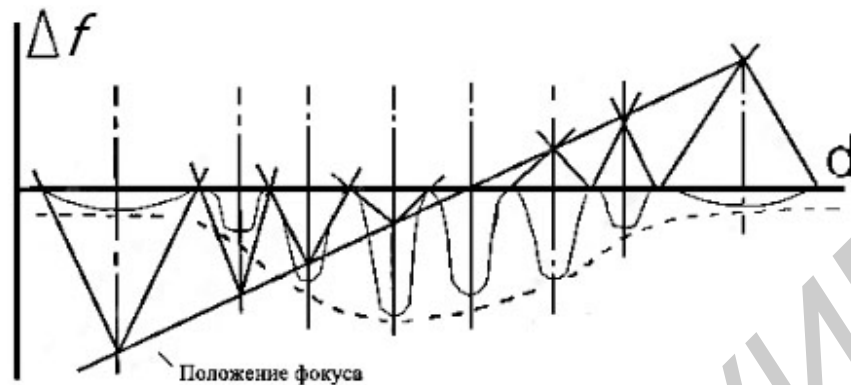


Рис. 4.9. Изменение профиля отверстия при различных положениях фокуса относительно поверхности материала

Из рис. 4.9 видно, что в сходящемся лазерном пучке характерным является конический профиль отверстия, при этом стенки его практически не поглощают световой поток, распространяющийся вдоль них, и механизм разрушения представляет в этом случае испарение материала за счет теплопроводности. При облучении в расходящемся лазерном пучке достаточной плотности энергии происходит интенсивное плавление стенок и, хотя общее количество удаляемого вещества при этом несколько возрастает за счет жидкой фазы, глубина отверстия уменьшается из-за расфокусировки луча. Рассмотрим условия получения отверстий максимальной глубины за один импульс с заданной энергией и длительностью импульса лазерного пучка.

Из опытных наблюдений известно, что для получения отверстий максимальной глубины h_{\max} требуется сфокусировать световой пучок на расстоянии l_0 от поверхности внутри материала.

Расчет величины l_0 производится с предположением, что до фокуса оптической системы отверстие повторяет форму и размеры светового конуса и механизмом его образования является испарение. В результате получим

$$l_0 = \frac{r_0}{\beta} \left[\sqrt{1 + \frac{3E\beta \cdot \operatorname{tg}\phi}{\pi \cdot L_0 \cdot r_0^3 (\beta + \operatorname{tg}\phi)}} - 1 \right]; \quad (4.11)$$

$$h_{\max} = l_0 \frac{\beta + \operatorname{tg}\phi}{\operatorname{tg}\phi}, \quad (4.12)$$

где $\beta = \frac{D + 2\alpha \cdot l}{2f}$, D – диаметр светового пучка на выходном зеркале лазера;

2α – угол расходимости излучения; l – расстояние от лазера до переднего фокуса линзы с фокусным расстоянием f .

На практике важно по заданным размерам отверстия h и d рассчитать энергию E , длительность импульса τ , размер пятна сфокусированного лазерного излучения. Для решения этой задачи необходимо учитывать характер связи глубины с диаметром отверстия, согласно уравнению светового конуса:

$$d = d_0 2h \cdot \operatorname{tg}\phi. \quad (4.13)$$

Для получения большей точности в определении диаметра можно воспользоваться простым соотношением между объемом удаленного из цилиндрического отверстия вещества и затраченной энергией излучения E :

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} h L_p = E, \quad (4.14)$$

где L_p – удельная энергия разрушения единицы объема вещества, определяемая экспериментально.

Экспериментально полученные значения удельной энергии разрушения некоторых материалов L_p действием лазерного излучения приведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Удельная энергия разрушения и удельная энергия испарения некоторых материалов и сплавов

Материал	Al	Bi	Fe	Cd	Cu	Mo	Ni	Sn	Pb
L_p , Дж/см ³	14,5	12	52	12,5	35	65	59	8	13,5
L_o , Дж/см ³	23	9,4	55	8,6	47	69	54	20	11

Окончание табл. 4.1

Материал	Mg	Cr	Zn	Дюраль Д-16Т	Бронза Б1АМ9-4	Орг-стекло	Сталь Ст.10	Полипропилен
L_p , кДж/см ³	13	70	15	13,5	42	9,5	62	–
L_o , Дж/см ³	12,5	50	12,5	–	–	–	–	10,4

4.2. Используемое лабораторное оборудование

1. Лазерный перфоратор ПЛ-01

Питание прибора осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц или от сети постоянного тока напряжением 12 В.

Технические характеристики:

1. Длина волны импульсного лазерного излучения – 2,94 мкм.
2. Диаметр реза (пятна излучения) – 0,4 мкм.
3. Энергия импульса лазерного излучения, Дж:
 - а) для уровня 1 – 0,25–0,40;
 - б) для уровня 2 – 0,40–0,60;
 - в) для уровня 3 – 0,60–0,95.
4. Потребляемая мощность максимальная – 18 Вт.
5. Время готовности к работе после включения – не более 5 мин.
6. Режим работы лазера – импульсный с частотой следования импульсов не менее 2 имп/мин.
7. Время непрерывной работы – не более 6 ч с последующим перерывом не менее 3 ч.
8. Габаритные размеры (без педали) – 165×435×261 мм.
9. Масса – 7 кг.

Принцип работы прибора основан на взаимодействии излучения эрбиевого лазера с длиной волны 2,94 мкм с материалом: за один импульс излучения производится испарение (перфорация) материала на заданную глубину.

Прибор обеспечивает:

- возможность изменения энергии излучения (три уровня энергии);
- возможность управления прибором с помощью напольной педали;
- указание места позиционирования при помощи светового маркера;
- стабильные энергетические параметры за счет использования системы автофокусировки.

Конструктивно прибор выполнен в виде настольного рабочего модуля, к которому присоединяется педаль. В рабочем модуле расположены функциональные узлы:

- излучателя;
- системы позиционирования и автофокусировки;
- блока накачки и поджига.

Общий вид прибора приведен на рис. 4.10.

На панели управления расположены органы управления прибором и световая индикация основных режимов работы.

Общий вид панели управления приведен на рис. 4.11.

На задней панели прибора расположены функциональные элементы, приведенные на рис. 4.12.

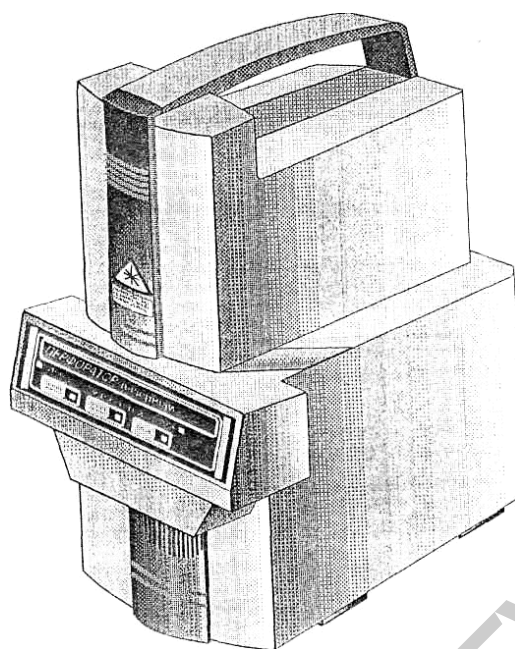


Рис. 4.10. Общий вид прибора



Рис. 4.11. Панель управления

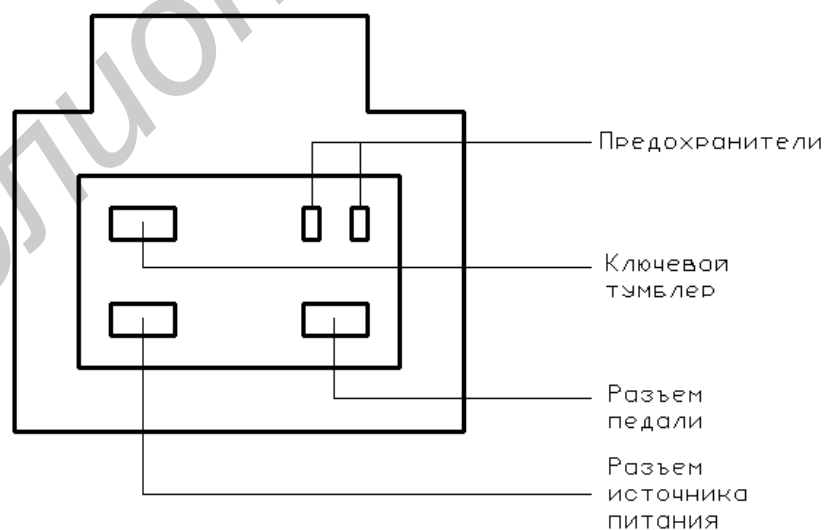


Рис. 4.12. Схема расположения функциональных элементов

Подготовка к работе:

1. Установить прибор на рабочее место оператора и снять заглушку с отверстия в корпусе, через которое испускается лазерное излучение.

2. Подсоединить соединительный кабель от источника питания и педаль к соответствующим разъемам на задней стенке прибора (см. рис. 4.12).

3. Подключить прибор к сети посредством сетевого кабеля источника питания и снять заглушку с объектива.

4. Повернуть ключевой тумблер на задней стенке прибора в направлении, указанном стрелкой (см. рис. 4.12). При этом должны загореться лампы накаливания системы позиционирования и индикатор СЕТЬ на панели управления (см. рис. 4.11). В рабочей зоне прибора (см. рис. 4.10) должен появиться световой маркер. Прибор готов к работе.

После окончания работы выключить прибор ключевым тумблером на задней стенке прибора.

Для «холостого» разряда конденсаторов (без произведения импульса лазерного излучения) достаточно нажать кнопку СБРОС (см. рис. 4.11).

2. Микроскоп измерительный ГОСТ 8074-56 №1844

Микроскоп измерительный ГОСТ 8074-56 №1844 (рис. 4.13) предназначен для измерения линейных и угловых размеров в проходящем и отраженном свете в прямоугольной или полярной системах координат, в частности: резьбовых изделий, режущего инструмента, профильных шаблонов, лекал, кулачков, конусов, метчиков. Кроме того, на микроскопе можно измерять диаметры малых отверстий.

Технические характеристики:

1. Диапазон измерения длин:

– в продольном направлении: 0 ... 100 мм;

– в поперечном направлении: 0 ... 50 мм.

2. Диапазон измерения плоских углов окулярной угломерной головкой: 0... 360°.

3. Угол поворота накладного круглого стола: 360°.

4. Угол поворота предметной плиты координатного стола: ± 5°.

5. Максимальный угол наклона линии центров бабки относительно горизонтальной плоскости: ± 12°.

6. Видимое увеличение отсчетного устройства окулярной угломерной головки: 45 крат.

7. Максимальное расстояние между объективом микроскопа и предметным стеклом координатного стола: 175 мм.

8. Максимальный диаметр устанавливаемого изделия:

– в центрах бабки с наклоняемой линией центров: 70 мм;

– в центрах бабки с горизонтальным положением линии центров: 85 мм;

– в призматических опорах: 100 мм.

9. Шаг винта: 1 мм.

10. Цена деления шкалы барабана: 0,005 мм.

11. Габаритные размеры микроскопа: 445×445×610 мм.
12. Параметры питания: 220/50 В/Гц.
13. Масса микроскопа с окулярной угломерной головкой: 37 кг.

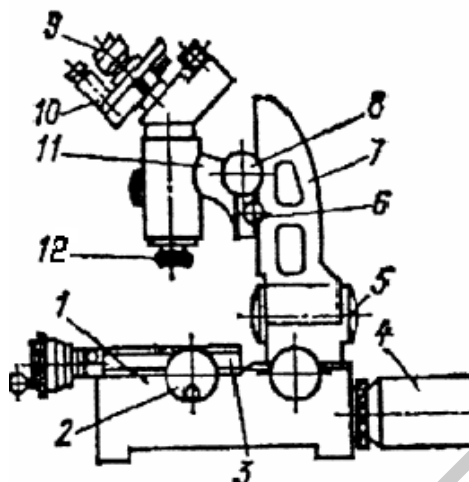


Рис. 4.13. Общий вид микроскопа измерительного:

- 1 – основание; 2 – микрометрические винты для отсчета перемещений стола; 3 – стол;
- 4 – осветитель; 5 – ось наклона колонки; 6 – фиксатор кронштейна; 7 – колонка;
- 8 – микрометрические винты для настройки изображения; 9 – окуляр основного микроскопа; 10 – отсчетный микроскоп окулярной угломерной головки;
- 11 – кронштейн; 12 – объектив сменный основного микроскопа

Настройка микроскопа. Включить блок питания и положить на стол 3 объект исследуемой поверхностью вверх (к объективу). Произвести настройку освещения, для чего вращением микрометрических винтов 8 и передвижением резиновой насадки на окуляре 9 добиться резкого изображения в зрачке объектива.

Путем вращения микрометрических винтов 2 в двух взаимно перпендикулярных направлениях определяем положение исследуемого изображения на столе 3. Измерение размеров производится путем вращения микрометрического винта, перемещением перекрестия, видимого в окуляре 9 от начального до конечного участка. Величина размера оценивается по шкале микрометрического винта.

4.3. Порядок выполнения работы

1. Изучить описание к лабораторной работе.
2. Изучить конструкцию и принцип работы лазерного перфоратора ПЛ-01, микроскопа измерительного.
3. Порядок работы с установкой ПЛ-01:
 - выбрать уровень 1 энергии импульса лазерного излучения. Уровню 1 соответствует минимальная энергия импульса, уровню 3 – максимальная;

- нажатием кнопки на панели управления (см. рис. 4.11) установить выбранный уровень энергии. При этом загорится индикатор ГОТОВ;
- поместить образец в рабочую зону прибора, которая обозначается системой позиционирования – световым маркером;
- установить держатель образцов в среднее положение ($\Delta f = 0$ мм), т. е. в точке фокуса, где световой маркер на образце наиболее четок;
- произвести перфорирование, нажав и отпустив педаль;
- произвести перфорирование при том же уровне энергии, увеличивая последовательно высоту держателя образцов на 10 мм относительно среднего положения и уменьшая на 10 мм относительно среднего положения.

4. При помощи инструментального микроскопа провести измерение диаметров полученных отверстий. Результаты занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Экспериментальные значения диаметров отверстий в материале для различных положений фокуса относительно поверхности образца

Положение фокусировки	d (мм) для режима лазера 1	d (мм) для режима лазера 2	d (мм) для режима лазера 3
$\Delta f = 0$ мм			
$\Delta f = +10$ мм			
$\Delta f = -10$ мм			

5. По формуле (4.14) рассчитать глубину полученных отверстий ($E_1 = 0,3$ Дж, $E_2 = 0,5$ Дж, $E_3 = 0,75$ Дж). Результаты занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Расчетные значения глубины отверстий при разной энергии лазерного излучения

Положение фокусировки	d (мм) для режима лазера 1	d (мм) для режима лазера 2	d (мм) для режима лазера 3
$\Delta f = 0$ мм			
$\Delta f = +10$ мм			
$\Delta f = -10$ мм			

6. Построить графики зависимостей диаметра и глубины прошиваемого в материале отверстия от энергии лазерного излучения при положении фокуса на поверхности образца ($\Delta f = 0$).

7. Получить следующий образец и произвести перфорирование поверхности полученного образца:

- а) выбрать уровень 1 энергии импульса лазерного излучения;
- б) установить держатель образцов в среднее положение ($\Delta f = 0$ мм);
- в) произвести перфорирование, нажав и отпустив педаль;
- г) повторить пп. а–в для каждого уровня энергии по 6 раз. Полученные данные занести в табл. 4.4.

Таблица 4.4

Значения диаметров отверстий, получаемых при разных значениях энергии импульса лазерного излучения

Номер опыта	d (мм) для режима лазера 1	d (мм) для режима лазера 2	d (мм) для режима лазера 3
1			
2			
...			
6			

8. Рассчитать среднее квадратическое отклонение диаметра отверстия в материале для каждого уровня энергии импульса лазерного излучения. Данные занести в табл. 4.5.

Математическое ожидание $M(x) = \sum_{i=1}^n x_i p_i$.

Дисперсия $D(x) = M[X - M(x)]^2$.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) $\sigma(x) = \sqrt{D(x)}$.

Таблица 4.5

Расчетные значения математического ожидания, дисперсии и СКО диаметра отверстия в материале от энергии импульса лазерного излучения ($\Delta f = 0$)

Расчетные значения	d (мм) для режима лазера 1	d (мм) для режима лазера 2	d (мм) для режима лазера 3
$M(x) =$			
$D(x) =$			
$\sigma(x) =$			

9. Построить график зависимости СКО диаметра отверстия в материале от энергии импульса лазерного излучения при положении фокуса на поверхности ($\Delta f = 0$).

10. Провести анализ полученных результатов и сделать выводы.

11. Подготовить и оформить отчет по лабораторной работе.

4.4. Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Приборы и методики измерений и расчетов.
4. Экспериментальные и расчетные данные.
5. Вывод.

4.5. Контрольные вопросы

1. Основные физические свойства лазерного излучения.
2. Что такое интенсивность лазерного излучения и от чего она зависит?
3. Особенности взаимодействия лазерного излучения с прозрачными средами.
4. Особенности взаимодействия лазерного излучения с непрозрачными средами.
5. Механизм создания инверсионной заселенности активных центров в рабочей среде лазера.
6. Влияние свойств материала на выбор технологических режимов при прошивке отверстий лазерным излучением.
7. Зависимость размеров получаемых отверстий от энергетических и временных характеристик лазерного излучения.
8. Характер изменения формы отверстий при одной и той же энергии, но при различных положениях фокуса объектива относительно поверхности образца.

Лабораторная работа №5

КОРРЕКТИРОВКА НОМИНАЛОВ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ГИБРИДНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Цель работы: изучение методов подгонки тонкопленочных резисторов и конденсаторов.

5.1. Краткие теоретические сведения

Сопротивление пленочного резистора определяется по формуле

$$R = \rho_s l / b = \rho_s K_{\phi}, \quad (5.1)$$

где ρ_s – удельное поверхностное сопротивление резистивной пленки;

l, b – длина и ширина резистора соответственно;

K_{ϕ} – коэффициент формы резистора.

Из формулы (5.1) видно, что точность резистора зависит как от точности воспроизведения ρ_s при изготовлении резистора, так и от точности воспроизведения геометрических размеров резистора. В настоящее время основным методом формирования конфигурации тонкопленочных элементов является фотолитография, которая обеспечивает довольно точное воспроизведение размеров резисторов. Поэтому основной вклад в величину изменения номинала резисторов вносит точность воспроизведения величины удельного поверхностного сопротивления резистивных пленок.

Величина ρ_s является функцией многих технологических факторов: толщины пленки, угла падения пучка испаренных частиц на подложку, температуры подложки, скорости нанесения, степени остаточного и рабочего вакуума. Основное влияние на ρ_s оказывает толщина пленки. Современные вакуумные установки позволяют наносить тонкие пленки с неравномерностью по толщине $\pm 5\%$ и ниже. Влияние остальных технологических факторов сводится к изменению структуры и состава резистивных пленок, что также сказывается на величине ρ_s . В результате точность номиналов резисторов обычно составляет $\pm 10\%$.

При изготовлении интегральных схем специального назначения требуются резисторы с точностью не меньше $\pm 1\%$ и стабильностью $\pm 0,005\%$. Поэтому возникает необходимость корректировки (подгонки) номиналов последних. В последнее время широко применяются методы технологической обработки и подгонки, совместимые с технологией интегральных схем. Существует большое количество различных методов подгонки, но в основе их лежит, как правило, один из двух механизмов воздействия на резистивную пленку – изменение геометрических размеров тела резистора или электрофизических свойств резистивной пленки. Классификация методов подгонки резисторов приведена на рис. 5.1. Кратко рассмотрим эти методы.

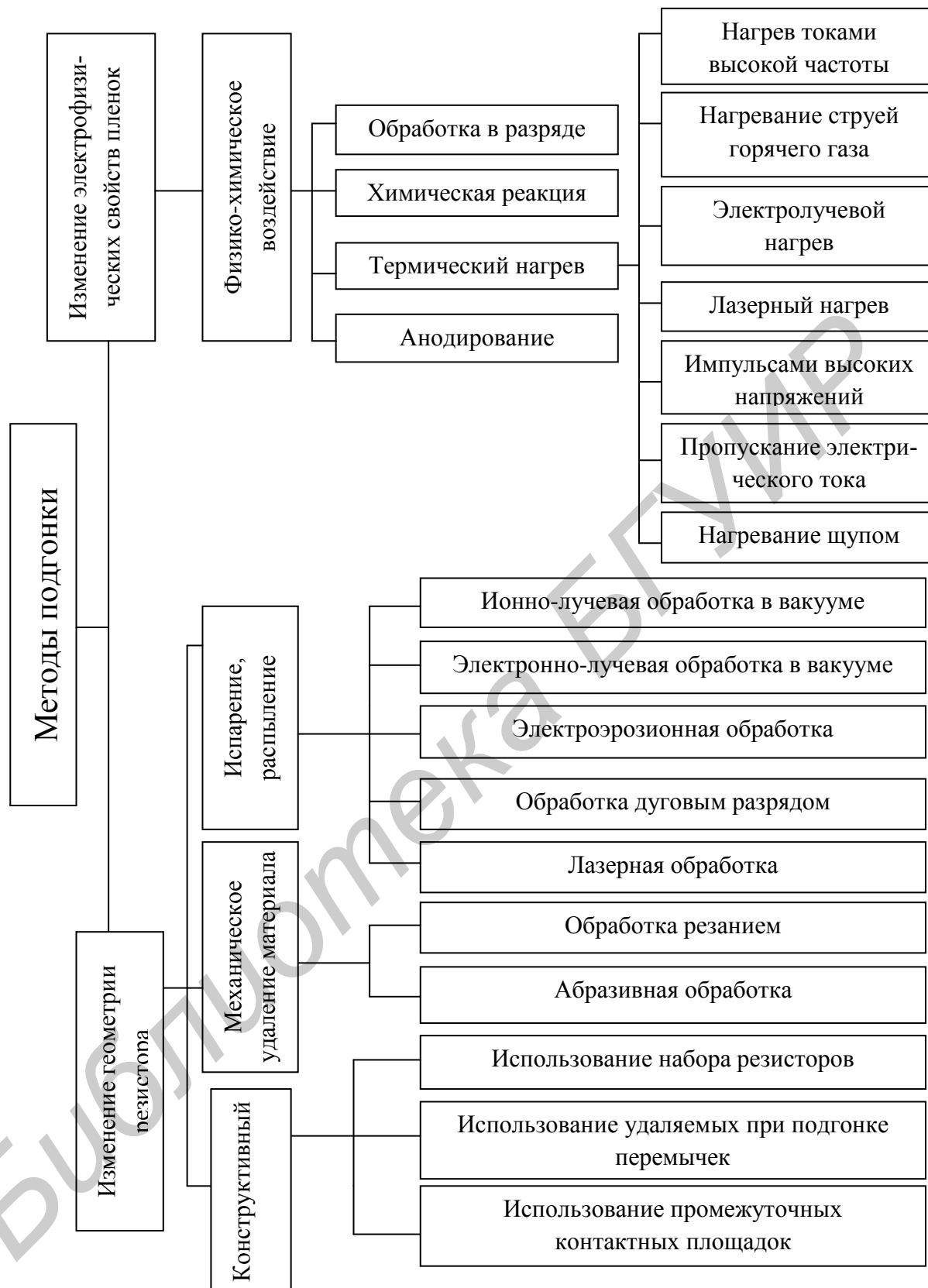


Рис. 5.1. Классификация методов подгонки тонкопленочных резисторов

Конструктивные методы основаны на введении в конструкцию резисторов дополнительных подстроечных резистивных или проводящих секций – эле-

ментов корректировки (ЭК). Такие резисторы принято называть корректируемыми (КР). На рис. 5.2 приведены основные варианты КР.

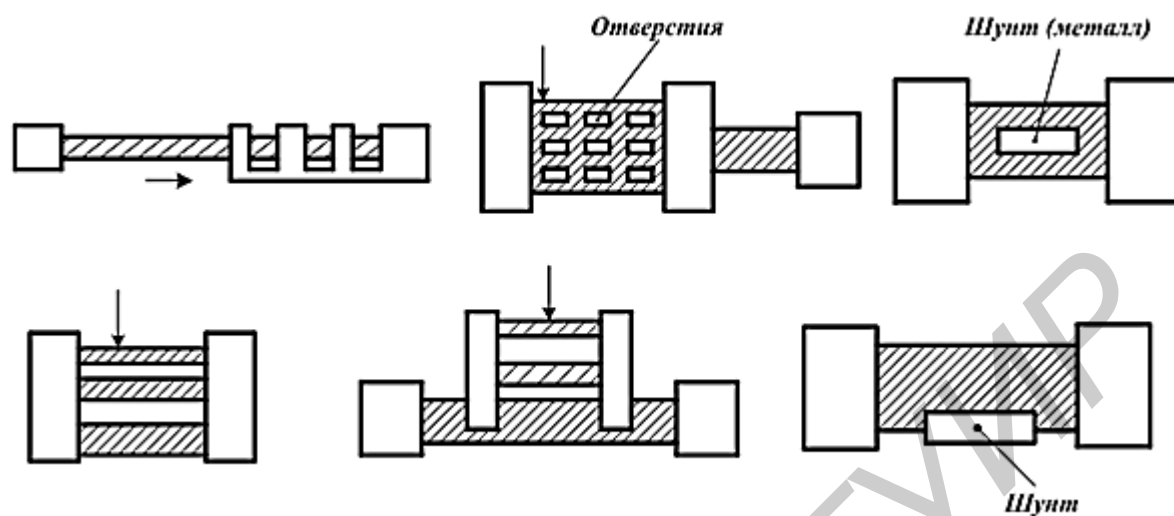


Рис. 5.2. Варианты конструкций корректируемых резисторов

Сущность подгонки заключается в перерезании подгоночных секций любым методом или удалении части шунта. Сопротивление резистора при такой подгонке изменяется ступенчато (дискретно) и только в сторону увеличения номинала. Точность подгонки может достигать $\pm 0,01\%$. Недостатком такого метода является большая площадь, занимаемая резистором.

Целью **механической подгонки** является изменение ширины или толщины тонкопленочного резистора (ТПР) путем удаления части резистивной пленки. Это делают соскабливанием, скрайбированием алмазным резцом, фрезеровкой бором, обработкой струей абразивного порошка. Наибольшее распространение получил последний вид подгонки. Он заключается в снятии части пленки с помощью выбрасывания потоком воздуха мелких (~ 20 мкм) абразивных частиц из форсунки. Интенсивность абразивной струи и количество абразивного порошка, попадающего в воздушный поток, регулируются. При скорости движения форсунки до 15 см/мин точность подгонки составляет $\pm 0,3\%$. На крупных предприятиях воздушно-абразивную подгонку проводят с помощью автоматических установок производительностью 40 000 резисторов в час.

Основными недостатками этого метода являются возможность повреждения близлежащих проводников, резисторов и нарушение защитного слоя последних. Также этот метод неэффективен для резистивных пленок твердых материалов.

Лазерная обработка. При воздействии светового излучения на поверхность ТПР часть его отражается от поверхности, часть излучения поглощается материалом резистивного слоя и превращается в тепло. При этом удельная мощность может достигать $15\text{--}20$ кВт/см². В результате такого воздействия резистивная пленка испаряется и сопротивление ТПР увеличивается. Такой метод является прецизионным (точность до $0,01\%$), характеризуется малой шириной и

высокой чистотой среза, дает возможность подгонять резисторы из любых материалов, исключает повреждения близлежащих элементов.

Электронные и ионные методы подгонки. Электронно-лучевая подгонка обладает всеми преимуществами лазерной. Мощность пучка электронов может достигать 10 Вт/см^2 . Однако для проведения такой подгонки необходим вакуум.

Ионно-лучевая обработка также проводится в вакууме. Здесь используется ионный (аргоновый) луч с плотностью тока $\sim 0,5 \text{ мА/см}^2$. Ионный луч с такой энергией способен фрезеровать резистивные пленки со скоростью 25 нм/мин .

Метод **электроэрозионной подгонки** основан на том, что резистивная пленка может быть избирательно удалена электрической искрой. При этом один полюс источника напряжения ($U = 10\text{--}30 \text{ В}$) подсоединяют к резистору, другой – к острию электрода. При касании электрода с пленкой проскакивает искра, которая испаряет или окисляет участок пленки размером $10\text{--}100 \text{ мкм}$. Металлический электрод может колебаться с ультразвуковой частотой, благодаря чему создается ритмично непрерывный контакт с пленкой. Точность подгонки может достигать $\pm 0,1 \%$.

Термический нагрев. Известно, что тонкие пленки материалов, применяемых для изготовления тонкопленочных резисторов, обычно имеют мелкокристаллическую структуру. Электропроводность таких пленок обуславливается прохождением электронов через межкристаллитные барьеры.

Рассмотрим подробнее процессы, протекающие при отжиге. Их можно разделить на следующие группы:

1. Отжиг дефектов различных типов внутри зерна. На этой стадии протекают процессы, связанные с уменьшением концентрации неравновесных точечных дефектов, и процессы перераспределения дислокаций.

2. Рекристаллизация. На этой стадии происходит уменьшение числа разориентированных кристаллитов путем изменения границ и увеличения размеров зерен (рис. 5.3), что приводит к уменьшению числа границ и соответственно к снижению сопротивления.

3. Химические реакции в твердой фазе, в том числе окисление в атмосфере остаточных газов, что приводит к возрастанию сопротивления.

Часто все эти процессы протекают одновременно. Вероятность того или иного процесса зависит от температуры, времени отжига, материала резистивного слоя.

Использование явлений упорядочения структуры и изменения размеров кристаллитов (зерен) тонких резистивных пленок позволяет изменять сопротивление последних. Характер процесса изменения сопротивления при термической обработке мало зависит от способа нагрева. Для локального разогрева пленок используют разогретый щуп, струю горячего газа, лазерное излучение, ВЧ-поле, нагрев пучком электронов, пропускание через ТПР электрического тока (так называемая токовая подгонка).



а б
Рис. 5.3. Изменение структуры пленки при термообработке:
а – до термообработки; б – после термообработки

В последнем случае могут использоваться постоянный, переменный и импульсный токи. Величина изменения сопротивления зависит от подаваемого на резистор напряжения. Подгонка ТПР импульсами большой мощности и малой длительности позволяет осуществить локальный разогрев резистора, исключая нагрев находящихся вблизи элементов схемы и подложки. Точность подгонки составляет 0,5–1 %.

Если нагрев осуществляется в вакууме или в атмосфере инертного газа, то сопротивление резистора будет уменьшаться. При подгонке на воздухе происходит окисление материала пленки и сопротивление ТПР может увеличиваться.

Обработка пленок в тлеющем разряде. При помещении в тлеющий разряд тонкие пленки на диэлектрической подложке заряжаются электронами отрицательно относительно плазмы. Возникающее при этом электрическое поле ускоряет положительные ионы до энергии 1–4 эВ. Заряженные частицы с такой энергией могут возбуждать поверхностные атомы и активировать некоторые химические реакции (например, окислительные, восстановительные). Кроме того, электронно-ионная бомбардировка вызывает разогрев пленок. В результате такой обработки сопротивление ТПР может изменяться в пределах 4–20 %. Точность подгонки невысока.

Анодирование или анодное оксидирование заключается в создании на поверхности резистивной пленки оксидного слоя путем электрохимической реакции. Обрабатываемую пленку соединяют с положительным полюсом источника питания, а дополнительный электрод-катод – с отрицательным. Схема процесса приведена на рис. 5.4.

В качестве электролита служат растворы кислородосодержащих кислот, а также высоковязкие эластичные электролиты на основе желатина и глицерина.

Толщина окисной пленки будет пропорциональна прилагаемому напряжению:

$$\Delta d = kU, \quad (5.2)$$

где k – коэффициент пропорциональности.

При комнатной температуре k для титана составляет около 22 А/В, для тантала – 16 А/В.

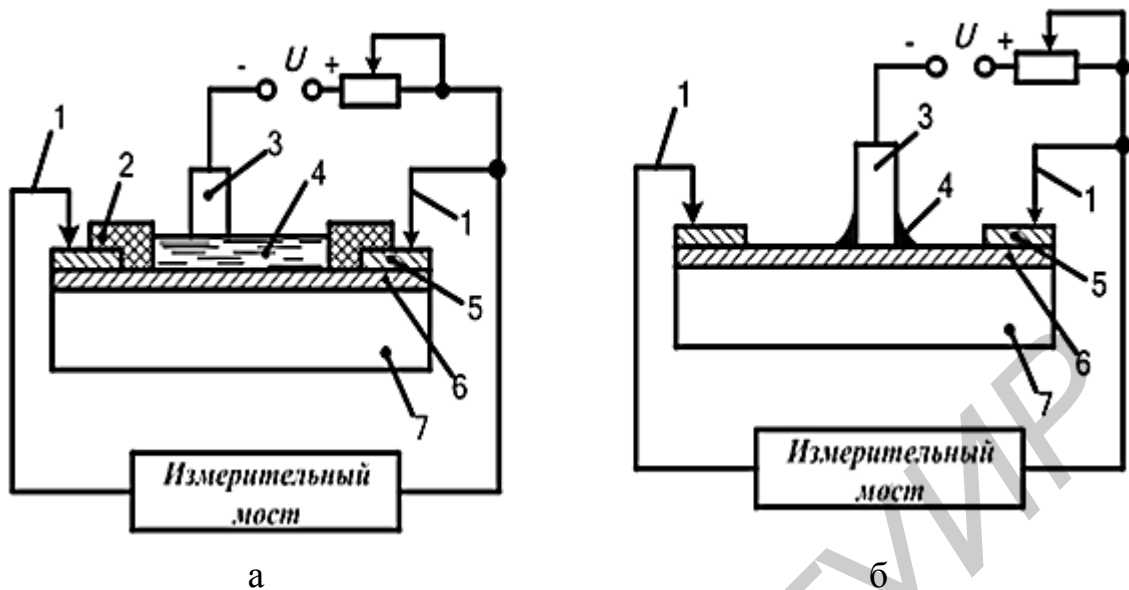


Рис. 5.4. Схема подгонки анодированием по всей поверхности (а) и локально (б):
 1 – измерительные зонды; 2 – защитная пленка; 3 – электрод; 4 – электролит;
 5 – контактная площадка; 6 – резистивная пленка; 7 – подложка

В результате анодирования верхний слой резистивной пленки превращается в оксид, толщина ее уменьшается, а сопротивление ТПР возрастает.

При анодировании происходит не только подгонка ТПР, но и их защита стеклообразным практически беспористым слоем оксида, который характеризуется высокой стойкостью к климатическим и тепловым воздействиям, истиранию.

Процесс подгонки может осуществляться или по всей поверхности резистора или по его локальным участкам. Наиболее часто для подгонки ТПР применяют локальное анодирование. Оно позволяет проводить подгонку даже в полностью собранной интегральной схеме перед ее герметизацией с помощью зонда, на острие которого наносят пастообразную каплю электролита. Точность подгонки ТПР на основе вентильных металлов (Ti, Ta, Nb, V, Al) может достигать 0,005 %.

Химические методы подгонки основаны на использовании окислительно-восстановительных реакций, протекающих на поверхности пленок и внутри их. При этом изменяется удельное сопротивление материала резистора. Пленки подвергаются обработке в растворах, выделяющих при нагреве атомарный кислород, что приводит к окислению поверхностных слоев. Если не все резисторы микросхемы требуют подгонки до номинала, микросхему покрывают защитным слоем лака, оставляя открытыми те резисторы, которые требуют подгонки. После подгонки лак удаляют.

Подгонку ТПР по всей площади резистивного слоя иногда проводят также окислением струей нагретого кислорода. Участок пленки, на котором происходит интенсивное окисление, не превышает 1 мм, точность подгонки не ниже $\pm 10\%$.

Подгонка тонкопленочных конденсаторов (ТПК). ТПК представляет собой обычно трехслойную структуру – две металлические обкладки, разделенные диэлектриком. Есть еще одна разновидность конденсаторов – щелевые, представляющие собой планарно расположенные на поверхности диэлектрической подложки пленки, разделенные воздушным зазором. Емкость трехслойного конденсатора определяется выражением

$$C = \epsilon\epsilon_0 S/d, \quad (5.3)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая постоянная;

ϵ – диэлектрическая проницаемость межслойного диэлектрика;

d – толщина диэлектрика;

S – площадь перекрытия обкладок.

Очевидно, что корректировка номинала ТПК возможна только изменением диэлектрической проницаемости и площади перекрытия. Поэтому для подгонки ТПК после его изготовления можно использовать изменение площади верхней обкладки. Это можно проделать теми же методами, какими изменялись размеры ТПР, в частности, электроэрозионной обработкой, испарением лучом лазера и т. п. Однако эти методы могут привести к нарушению диэлектрика, что вызовет короткое замыкание. Поэтому более приемлемым является удаление части верхней обкладки локальным химическим травлением. На рис. 5.5 приведена конструкция ТПК с подгоночными секциями, которая исключает нарушение слоя диэлектрика.

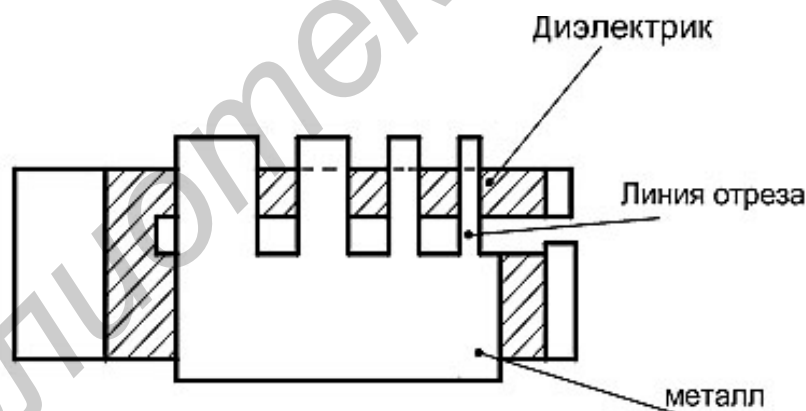


Рис. 5.5. Конструкция ТПК с подгоночными секциями

Щелевые конденсаторы подгоняются увеличением ширины щели между пленками металла известными методами.

Другим способом изменения емкости ТПК является воздействие на межслойный диэлектрик посредством термообработки либо импульсным разрядом. При этом в структуре диэлектрика происходят процессы, которые способствуют исчезновению пор, дефектов, газовых включений, что приводит к изменению диэлектрической проницаемости ϵ .

Точность подгонки ТПК может достигать 0,2 %.

5.2. Описание лабораторного макета

Схема лабораторного макета для электроэрозионной и токовой подгонки показана на рис. 5.6, а внешний вид – на рис. 5.7. Он состоит из блока питания, цифрового вольтметра В7-27, зондового устройства. Кнопка Кн2 служит для выбора режима подгонки: ЭП – электроэрозионная; ТП – токовая. Кнопка Кн1 служит для включения схемы измерения или подгонки. Сопротивление R ограничивает ток при электроэрозионной подгонке. В конденсаторе C происходит накопление энергии для импульса при электроэрозионной подгонке.

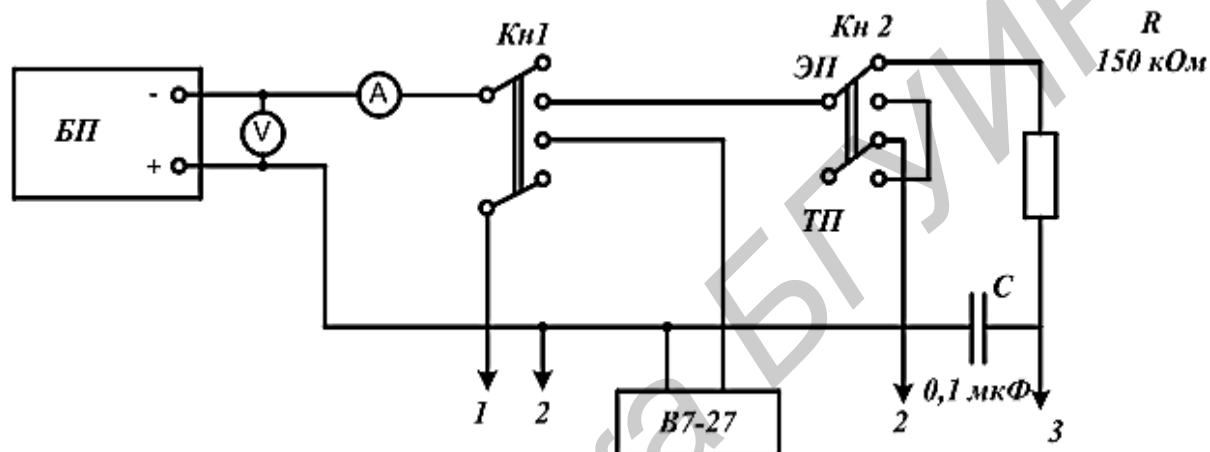


Рис. 5.6. Схема лабораторного макета для электроэрозионной и токовой подгонки

Процесс подгонки ТПР

1. Электроэрозионная подгонка:

- установить на контактные площадки резистора зонды; замерить номинал резистора;
- поставить кнопку Кн2 в положение «ЭП»;
- установить напряжение блока питания (20–40 В);
- нажать кнопку Кн1 и одновременно коснуться электродом 3 поверхности резистивной пленки;
- отпустить кнопку Кн1 и замерить номинал резистора. При необходимости дальнейшего увеличения номинала резистора повторить процесс подгонки.

2. Токовая подгонка:

- установить зонды на контактных площадках резистора;
- поставить кнопку Кн2 в положение «ТП»;
- установить необходимое напряжение (40–60 В);
- нажать кнопку Кн1 и выдержать в течение 5–10 с;
- после охлаждения резистора измерить его сопротивление.



Рис. 5.7. Внешний вид лабораторного макета для электроэрозионной и токовой подгонки

5.3. Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с лабораторным макетом, получить у лаборанта подложки с резисторами.
2. Установить резистор в зондовом устройстве и провести 5–8 циклов его электроэрозионной обработки.
3. Установить другой резистор. Провести токовую подгонку (5–6 циклов) при различных напряжениях подгонки.
4. Построить графики $R = f(N)$ для электроэрозионной и токовой подгонки, где N – число циклов подгонки.

5.4. Содержание отчета

1. Эскизы рабочих образцов резисторов.
2. Таблицы результатов измерений.
3. Графики зависимостей $R = f(N)$.
4. Расчет точности электроэрозионной подгонки.
5. Выводы.

5.5. Контрольные вопросы

1. Каковы причины отклонения номиналов ТПР и ТПК?
2. Методы дискретной подгонки ТИР и ТПК.
3. Методы плавной подгонки ТПР и ТПК.
4. В чем сложность подгонки тонкопленочных конденсаторов?
5. Какие процессы протекают при термическом нагреве материала резисторов?

Литература

1. Пасынков, В. В. Материалы электронной техники : учебник / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. – СПб. : Лань, 2001. – 368 с.
2. Ашкрофт, Н. Физика твердого тела. В 2 т. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М. : Мир, 1979.
3. Барыбин, А. А. Электроника и микроэлектроника. Физико-технологические основы / А. А. Барыбин. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 424 с.
4. Епифанов, Г. И. Физические основы микроэлектроники / Г. И. Епифанов. – М. : Сов. радио, 1971.
5. Гусев, А. И. Нанокристаллические материалы / А. И. Гусев, А. А. Ремпель. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2001.
6. Стоянов, А. А. Покрытия контактных площадок кристаллов и траверс корпусов микросварки внутренних выводов 3D изделий / А. А. Стоянов, С. В. Петров, Б. А. Спиридонов // Микроэлектроника. – 2013. – №5. – С. 361–374.
7. Матсон, Э. А. Справочное пособие по конструированию микросхем / Э. А. Матсон, Д. В. Крыжановский. – Минск : Выш. шк., 1982.
8. Микроэлектроника. Физические и технологические основы, надежность : учеб. пособие для вузов / И. Е. Ефимов [и др.]. – М. : Высш. шк., 1977.
9. Хамер, Д. Технология толсто пленочных гибридных интегральных схем / Д. Хамер, Дж. Биггерс ; пер. с англ. ; под ред. Т. Д. Шермергора. – М. : Мир, 1975.
10. Топфер, М. Микроэлектроника толстых пленок / М. Топфер ; пер. с англ. ; под ред. Т. Д. Шермергора. – М. : Мир, 1973.
11. Праттон, М. Введение в физику поверхности / М. Праттон. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000.
12. Питер, Ю. Основы физики полупроводников / Ю. Питер, М. Кардона. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 560 с.
13. Технология изделий интегральной электроники : учеб. пособие / Л. П. Ануфриев [и др.] ; под общ. ред. А. П. Достанко, Л. И. Гурского. – Минск : Алмафея, 2010. – 536 с.
14. Свадковский, И. В. Ионно-плазменные методы формирования тонкопленочных покрытий / И. В. Свадковский. – Минск : Бестпринт, 2002. – 214 с.
15. Аппаратные средства контроля параметров твердотельных структур в производстве СБИС / В. А. Емельянов [и др.]. – Минск : БГУИР, 1997. – 112 с.
16. Емельянов, В. А. Оборудование для химического осаждения из газовой фазы функциональных слоев / В. А. Емельянов, А. С. Турцевич, О. Ю. Наливайко. – Минск : Бел. наука, 2007. – 255 с.
17. Айхлер, Ю. Лазеры. Исполнение, управление, применение / Ю. Айхлер, Г.-И. Айхлер. – М. : Техносфера, 2008. – 440 с.

18. Звелто, О. Принципы лазеров / О. Звелто. – М. : Мир, 1990. – 559 с.
19. Григорьянц, А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. – М. : Машиностроение, 1989. – 304 с.
20. Крылов, К. И. Основы лазерной техники / К. И. Крылов, В. Г. Прокопенко, В. А. Гарлыков. – Л. : Машиностроение, 1990. – 316 с.
21. Технология и техника прецизионного лазерного модифицирования твердотельных структур / Ф. П. Достанко [и др.] ; под ред. А. П. Достанко, Н. К. Толочко. – Минск : Технопринт, 2002. – 375 с.
22. Готра, З. Ю. Тонкопленочные резисторы микросхем / З. Ю. Готра. – Львов : Каменяр, 1976. – 134 с.
23. Структура, топология и свойства пленочных резисторов / Л. И. Гурский [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1987. – 347 с.
24. Сергеев, В. П. Подгонка тонкопленочных резисторов / В. П. Сергеев, Э. К. Мурадян // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Технология производства и оборудование. – 1974. – Вып. 4. – С. 15–19.

Учебное издание

Достанко Анатолий Павлович
Бордусов Сергей Валентинович
Мадвейко Сергей Игоревич
Телеш Евгений Владимирович

***ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ИЗДЕЛИЙ
ИНТЕГРАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ***

ПОСОБИЕ

Редактор *Е. И. Герман*
Корректор *Е. Н. Батурчик*
Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоя*

Подписано в печать 30.09.2015. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 5,0. Уч.-изд. л. 3,5. Тираж 70 экз. Заказ 54.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий №1/238 от 24.03.2014, №2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6