

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

Кафедра микро- и наноэлектроники

ТЕХНОЛОГИЯ БГИС

Лабораторный практикум
для студентов специальности «Микро- и наноэлектронные
технологии и системы»

В 4-х частях

Часть 3

В. В. Шульгов

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ
ТОПОЛОГИИ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Минск БГУИР 2010

УДК 621.3.049.776(076.5)

ББК 32.844.1я73

Т38

Т38

Технология БГИС : лаб. практикум для студ. спец. «Микро- и наноэлектронные технологии и системы». В 4 ч. Ч. 3 : Технологические процессы формирования топологии пленочных элементов / В. В. Шульгов. – Минск : БГУИР, 2010. – 30 с. : ил.

ISBN 978-985-488-566-7 (ч. 3).

Лабораторный практикум позволяет получить представление о технологических процессах формирования топологии пленочных элементов БГИС (формирование фоторезистивной маски, травление, электрохимическое осаждение); изучить отдельные операции технологического маршрута и контрольные операции после различных этапов изготовления БГИС; получить практические навыки в выборе и расчете технологических режимов отдельных операций.

УДК 621.3.049.776(046.5)

ББК 32.844.1я73

Часть 1 «Алюмооксидная металлизация БГИС» издана в БГУИР в 2000 г.

Часть 2 «Алюминиевый корпус для БГИС» издана в БГУИР в 2002 г.

ISBN 978-985-488-566-7 (ч. 3)

ISBN 978-985-444-065-1

ISBN 985-444-065-6

© Шульгов В. В., 2010

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2010

Лабораторная работа №3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИИ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы: получить представление о технологических процессах формирования топологии пленочных элементов БГИС (формирование фоторезистивной маски, травление, электрохимическое осаждение). Изучить отдельные операции технологического маршрута и контрольные операции после различных этапов изготовления БГИС; получить практические навыки в выборе и расчете режимов и параметров отдельных операций технологического маршрута. Научиться проводить анализ технологического процесса по результатам измерений и расчетов.

3.1. Последовательность выполнения работы

1. Ознакомиться с технологическим маршрутом формирования топологии пленочных элементов БГИС (подразд. 3.3). Изучить технологический маршрут изготовления пленочных элементов БГИС на ПК и особенности изготовления фотошаблонов.

2. Получить у преподавателя задание на выполнение лабораторной работы. Изучить требования по технике безопасности и описание программы по проведению лабораторной работы на персональном компьютере (ПК).

3. Изучить основные технологические операции формирования топологии пленочных элементов БГИС.

4. Получить у преподавателя исходные данные для выполнения работы. Измерить геометрические размеры пленочных элементов на фотошаблонах и подложке БГИС.

5. После окончания измерений проанализировать возможные причины отклонений размеров пленочных элементов на фотошаблонах и макетах БГИС.

6. Представить результаты эксперимента на утверждение преподавателю.

7. Для защиты работы подготовить рекомендации по изменению технологического процесса формирования топологии пленочных элементов БГИС.

3.2. Приборы и принадлежности

1. Персональный компьютер.

2. Комплект фотошаблонов для изготовления пленочных элементов БГИС.

3. Микроскоп типа МБС-9 с измерительным окуляром.

4. Пенал с подложками БГИС.

5. Макеты БГИС со вскрытыми крышками корпуса.

3.3. Формирование топологии пленочных элементов

3.3.1. Формирование фоторезистивной маски

Основными операциями по обработке фоторезиста являются сушка, экспонирование и проявление.

Нанесение фоторезиста. Наиболее распространенным способом нанесения фоторезиста на подложки является центрифугирование [1].

Нанесенная на поверхность подложки доза фоторезиста (2...3 мл) за счет вращения подложки равномерно распределяется по ее поверхности. В образовании слоя фоторезиста участвуют центробежные и вязкостные силы, взаимодействие которых определяет толщину слоя. При нанесении слоя фоторезиста необходимо при минимальной толщине слоя добиться получения минимального количества проколов – дефектов в слое.

Вязкость фоторезиста – величина непостоянная: она различается для разных партий фоторезиста, а также изменяется при его хранении.

Толщину слоя фоторезиста (как основной параметр процесса) можно изменять за счет варьирования скорости вращения и вязкости. Взаимосвязь этих параметров и толщины слоя приведена на рис. 3.1 и 3.2.

Большая частота вращения центрифуги обеспечивает более тонкие и равномерные слои фоторезиста, разброс по толщине обычно не превышает $\pm 2\%$; при частоте вращения менее 2000 мин^{-1} разброс по толщине достигает $\pm 10\%$.

Один из основных дефектов при получении рисунка элементов – поры в слое фоторезиста. Их наличие приводит к дефектам пленочных элементов, которые проявляются в процессе химического травления или гальванического осаждения.

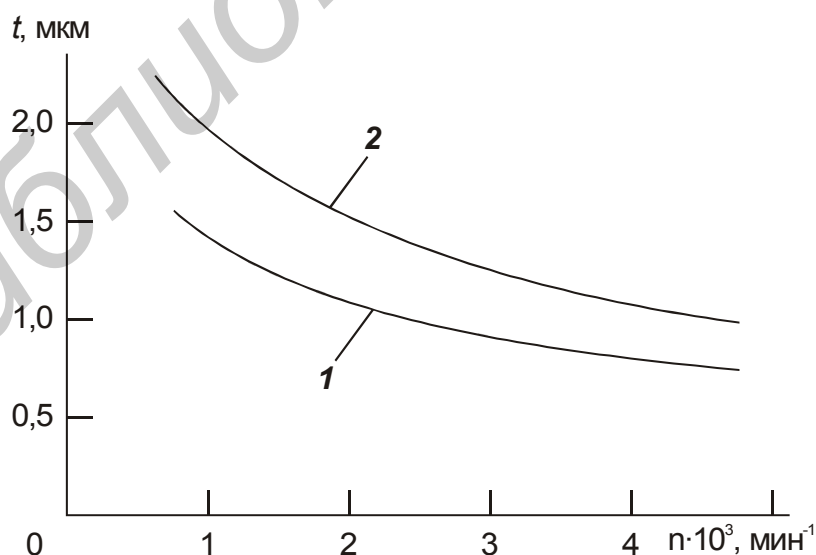


Рис. 3.1. Зависимость толщины слоя t фоторезиста от частоты вращения n центрифуги:
1 – вязкость $2,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; 2 – вязкость $4,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

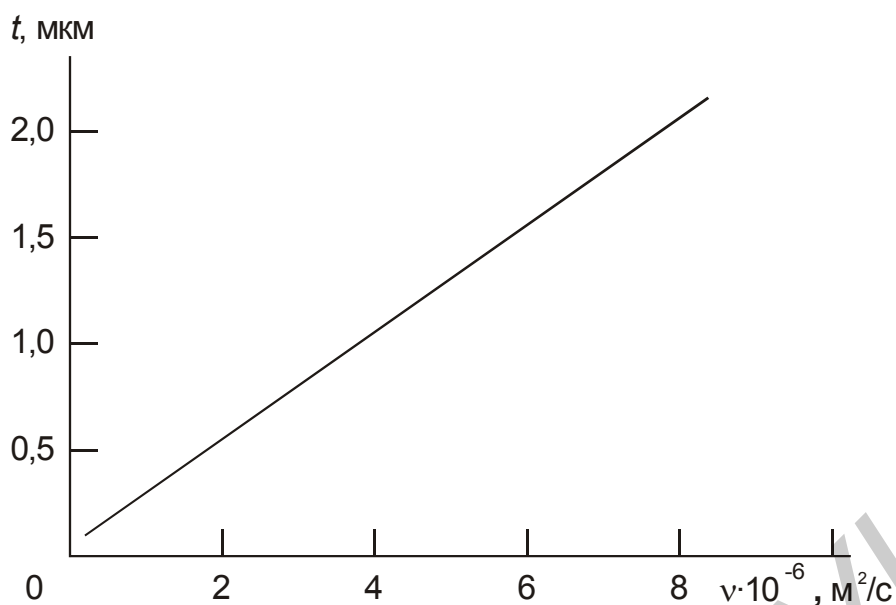


Рис. 3.2. Зависимость толщины слоя t фоторезиста от вязкости ν , частота вращения центрифуги $n = 3300 \text{ мин}^{-1}$

При неравнотолщинной пленке фоторезиста и одинаковом времени экспозиции в местах с более тонким покрытием возникает эффект «передержки», поэтому из пленки фоторезиста может выделяться азот, служащий причиной появления пор.

Таким образом, количество пор – проколов в слое фоторезиста – зависит от толщины фоторезиста, определяемой частотой вращения центрифуги, и его вязкости [1].

Экспериментальные данные по оценке пор в позитивном фоторезисте ФП-383 приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1
Влияние частоты вращения центрифуги на качество фоторезистивного слоя

Характеристика фоторезиста	Частота вращения центрифуги, мин^{-1}		
	2000	2500	3000
Толщина слоя, мкм	0,95	0,85	0,7
Количество пор, $1/\text{мм}^2$	822	61	105

Сушка. Предварительная сушка фоторезиста после его нанесения на подложку необходима для того, чтобы снизить и стабилизировать в нем содержание растворителя и влаги, которой в составе фоторезиста содержится около 0,5 %. В зависимости от температуры сушки изменяются содержание влаги в фоторезисте и условия протекания фотохимической реакции при экспонировании.

Если температура сушки снижается до $75 \text{ }^\circ\text{C}$, растворитель и вода еще содержатся в фоторезисте. Когда слой фоторезиста экспонируется, значительное количество воды и растворителя удаляется в этом процессе. При

температуре сушки ниже $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ ухудшается также адгезия фоторезиста, искажаются размеры неэкспонированных областей. Если фоторезист, высушенный при низкой температуре, экспонируется, то в нем происходит процесс послеэкспозиционной сушки, а сами превращения в фотоактивном веществе происходят менее активно.

В процессе сушки происходит изменение толщины фоторезиста, которое зависит от температуры сушки в соответствии с рис. 3.3. Как видно, при температуре сушки свыше $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ зависимость толщины фоторезиста от времени сушки носит практически линейный характер, при этом толщина уменьшается со скоростью примерно $1,3\text{ нм/с}$.

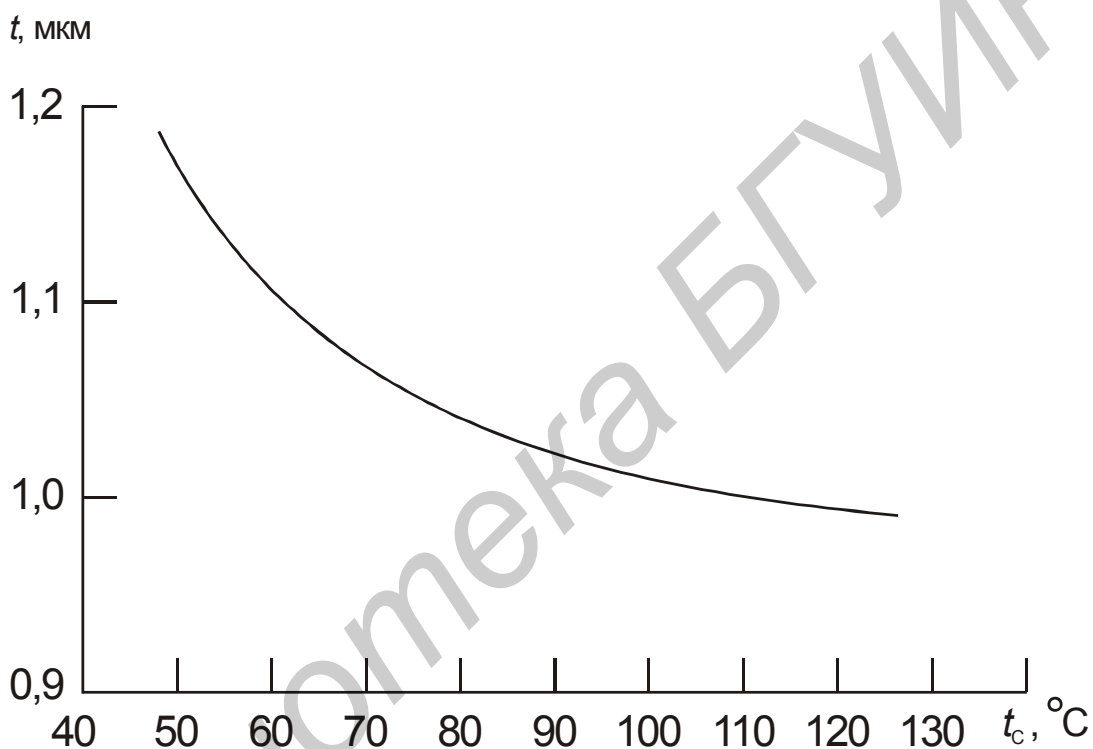


Рис. 3.3. Зависимость толщины t позитивного фоторезиста от температуры сушки t_c (время сушки 45 с)

Процесс предварительной сушки оказывает существенное влияние на воспроизводимость размеров элементов фоторезистивной маски. Основными параметрами, влияющими на точность воспроизведения размеров, являются температура и время сушки и энергия экспонирования. Взаимосвязь температуры сушки и энергии экспонирования приведена на рис. 3.4.

От температуры сушки фоторезиста зависит также скорость растворения фоторезиста при его последующей обработке (рис. 3.5).

При увеличении температуры сушки слой фоторезиста становится более тонким, так как большее количество летучих компонент испаряется. На растворимость фоторезиста влияет также операция экспонирования. Особенно это проявляется, если сушка проведена при низких температурах.

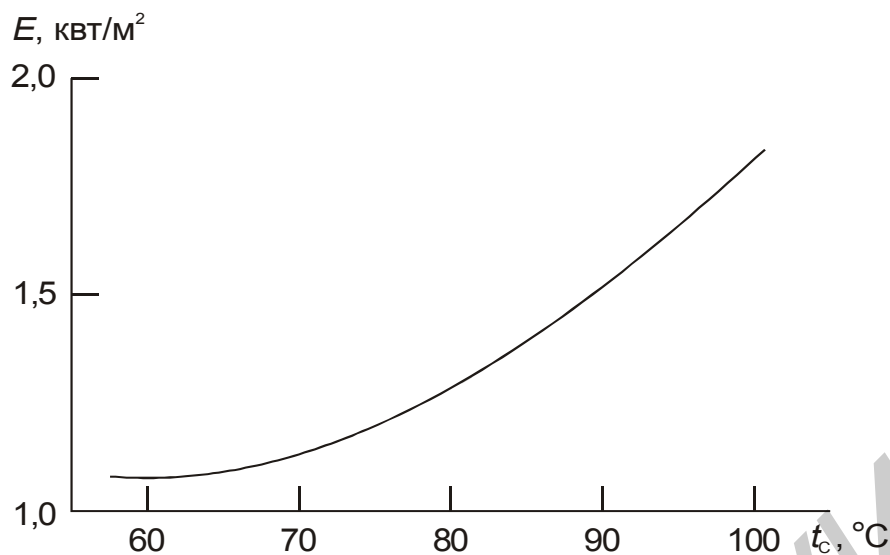


Рис. 3.4. Взаимосвязь температуры сушки t_c и энергии экспонирования E (время сушки 2 мин)

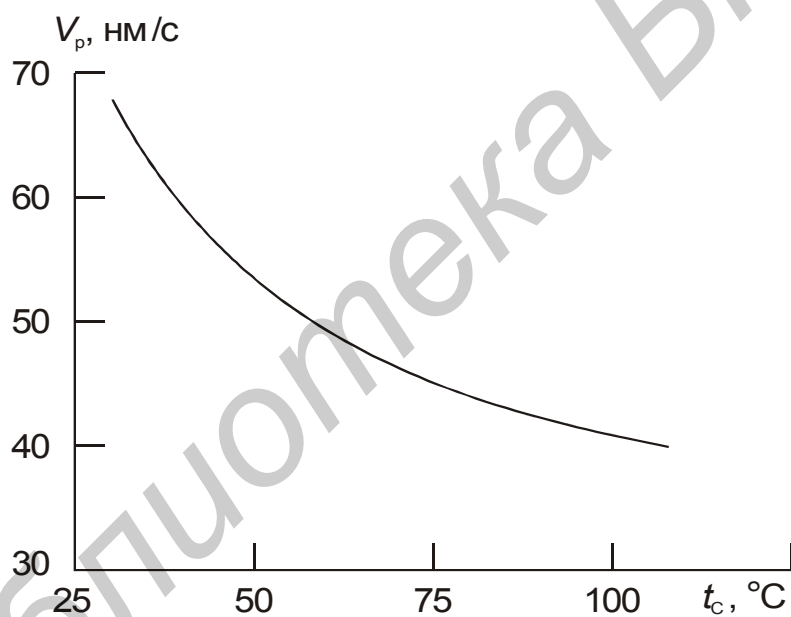


Рис. 3.5. Зависимость средней скорости растворения V_p фоторезиста от температуры сушки t_c

Экспонирование. Это процесс поглощения слоем фоторезиста активного излучения, создаваемого источником – лампами ультрафиолетового света (ртутно-кварцевыми или ксеноновыми) [2]. В процессе экспонирования в слое фоторезиста происходят основные реакции, в результате которых изменяются его свойства. Характер этих изменений зависит от типа фоторезиста, который может быть позитивным или негативным, его светочувствительности и параметров экспозиции.

В процессе экспонирования необходимо обеспечить такие условия, чтобы поглощение слоем фоторезиста ультрафиолетовой энергии было наибольшим. Поэтому при выборе источника облучения следует исходить из спектральных характеристик фоторезиста, приближая к ним спектральные характеристики источников облучения. Для процесса экспонирования основными параметрами являются энергия и время.

При прочих равных условиях доза поглощенной энергии определяет глубину и объемы происшедших в фоторезисте фотохимических реакций, точность размеров и качество линий фоторезистивной маски.

На рис. 3.6 приведена зависимость отклонения ширины линий фоторезиста от дозы поглощенной энергии. Оптимальная величина дозы энергии, позволяющая получить минимальное отклонение ширины линии от номинального значения, зависит также от операции проявления (рис. 3.7) и операции сушки (тепловая обработка фоторезиста приводит к увеличению дозы энергии экспонирования).

Часто в производственном процессе подложки с нанесенным фоторезистом могут пролежать некоторое время, исчисляемое днями до их экспонирования. За этот период времени произойдут определенные превращения в слое фоторезиста, но они будут незначительными и практически не влияющими на величину энергии экспонирования.

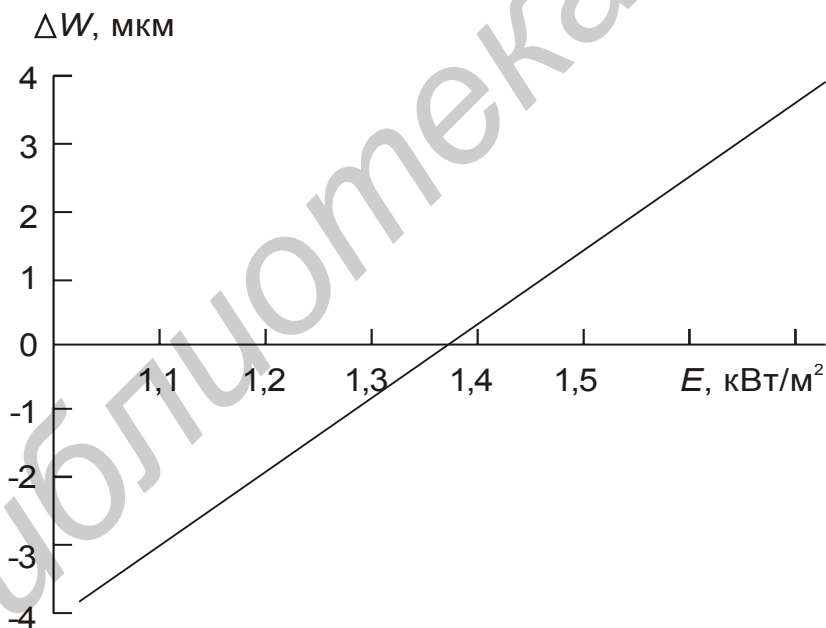


Рис. 3.6. Зависимость отклонения ширины линии ΔW фоторезиста от поглощенной энергии E

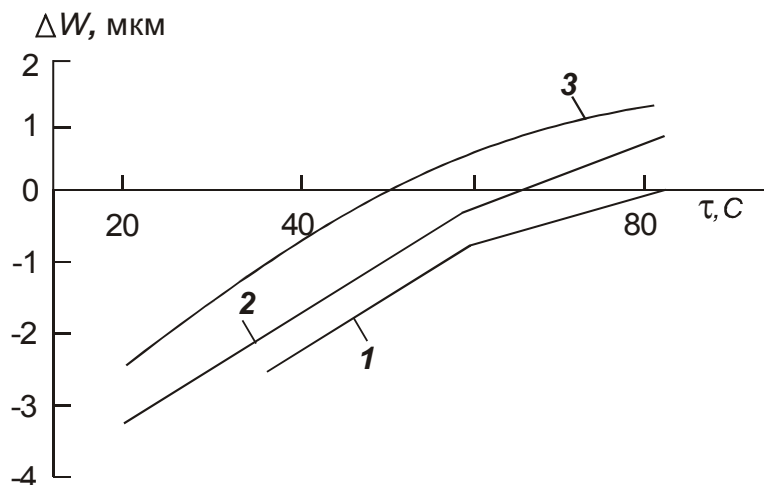


Рис. 3.7. Взаимосвязь времени экспонирования τ с отклонением ширины линии ΔW фоторезиста для различного времени проявления: 9(1), 6(2) и 3(3) мин

Проявление. Эта операция следует за экспонированием; она состоит в удалении-растворении участков фоторезиста. У негативных фоторезистов удаляются необлученные участки, у позитивного – подвергнутые облучению.

После проявления фоторезиста можно оценить, насколько правильно выбраны значения параметров операции сушки и экспонирования. Критерием качества служат достигнутые размеры элементов фоторезиста и прочность прилегания к поверхности осажденных пленок.

Изменение профиля фоторезистивной маски после проявления приведено на рис. 3.8 [3].

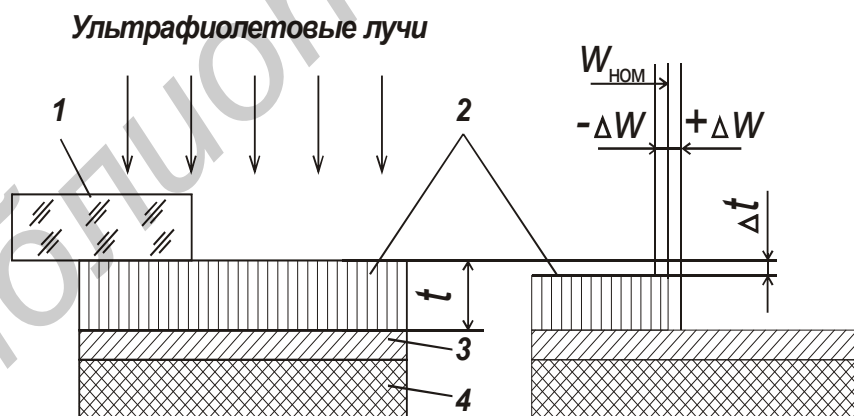


Рис. 3.8. Изменение профиля фоторезиста в процессе проявления:
 а – экспонирование; б – проявление фоторезиста;
 1 – фотошаблон; 2 – фоторезист (позитивный); 3 – металлическая пленка; 4 – подложка;
 $W_{НОМ}$ – номинальная ширина линии фоторезиста; ΔW – изменение размера; t – толщина слоя фоторезиста; Δt – уменьшение толщины фоторезиста при проявлении

В процессе проявления фоторезиста необходимо контролировать следующие параметры: температуру и концентрацию проявителя, время проявления, время между нанесением фоторезиста и экспонированием. От концентрации проявителя и способа его взаимодействия с фоторезистом зависит воспроизводимость ширины фоторезистивной маски. Анализ кривых $R_1 - R_4$ на рис. 3.9 показывает, что отклонение геометрических размеров в слое фоторезиста становится слабо зависимым от концентрации раствора и времени проявления с уменьшением концентрации растворителя. Используя разбавленные растворы для проявления фоторезиста, можно регулировать время проявления.

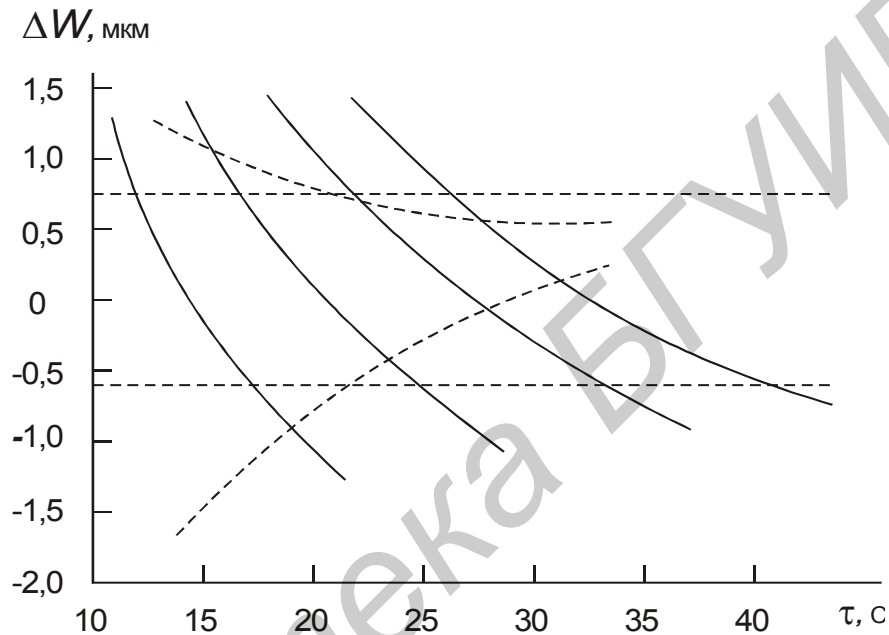


Рис. 3.9. Зависимость отклонений ширины ΔW фоторезистивного элемента от времени проявления τ :
 $R_1 > R_2 > R_3 > R_4$ — концентрация раствора;
 - - - - поле допуска $\pm 0,5\%$;
 - - - - среднее квадратичное отклонение

Выбор оптимальных параметров процесса проявления зависит от способа взаимодействия проявителя со слоем фоторезиста. Скорость протекания процесса проявления увеличивается при подаче на подложку распыленной струи растворителя. В этом случае можно использовать менее концентрированные растворы, тем самым снизив строгий контроль за временем проявления. Достоинством растворов с малой концентрацией проявителя является однократность их использования, что повышает чистоту и качество обработки [3].

В процессе проявления фоторезиста происходит «истощение» раствора, что требует корректировки параметров экспонирования.

Можно отметить следующие факторы, влияющие на растворимость фоторезистов при проявлении:

- доза экспонирования, т. е. степень фотохимического изменения фотоак-

тивного вещества;

– степень химического взаимодействия фотоактивного и связующего веществ;

– поверхностные эффекты: высыхание, окисление связующего вещества и др.;

– количество влаги и летучих растворителей в фоторезисте.

Термическая обработка. Эта обработка является завершающей стадией получения фоторезистивной маски. Она проводится при более высоких температурах, чем сушка (100...180 °С). Во время термообработки завершаются процессы полимеризации вещества в негативных фоторезистах, а в позитивных – его разрушение.

В результате термообработки фоторезистивная маска приобретает стойкость к воздействию кислот.

Последующими операциями получения профиля пленочных элементов являются жидкостное (в химических растворах) или сухое (газовое) травление и наращивание (химическое или гальваническое).

3.3.2. Травление

Общие закономерности процессов травления. Процессы травления применяются как в производстве ГИС, так и БГИС. Хотя используемые для травления материалы (растворы, газы) и сами способы травления различаются для этих групп ГИС и БГИС, им присущ ряд общих закономерностей.

Для оценки процессов травления и сравнения различных способов целесообразно ввести следующие показатели [3].

1. Коэффициент селективности травления двух материалов:

$$K_c = \frac{V_1}{V_2}, \quad (3.1)$$

где V_1 и V_2 – соответственно скорости травления материала, непосредственно подвергаемого травлению и лежащего под ним, например, пленки и подложки или пленок из разных материалов.

Коэффициент селективности травления K_c свидетельствует о «качестве» процесса травления, т. е. правильности выбора типа травящего раствора или газа и параметров протекания процесса. Чем больше K_c , тем лучше выбраны травящие среды и параметры процесса.

2. Коэффициент анизотропности травления K_a характеризует различие в скоростях травления в вертикальном и горизонтальном направлениях:

$$K_a = \frac{V_{\text{верт}}}{V_{\text{гор}}}, \quad (3.2)$$

где $V_{\text{верт}}$ и $V_{\text{гор}}$ – скорости травления в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Для изотропного травления $K_a = 1$. Значение K_a зависит от способа травления, состава травящих сред и структуры материала, подвергаемого травлению.

3. Коэффициентом бокового травления может быть оценен конечный результат травления вне зависимости от характера протекания процесса травления в горизонтальном и вертикальном направлениях:

$$K_{б.т} = \frac{\Delta W_\tau}{\Delta t_\tau}, \quad (3.3)$$

где ΔW_τ и Δt_τ – изменение ширины с одной стороны пленки и изменение толщины элемента в момент времени τ .

4. Коэффициент стойкости защитной маски (фоторезиста, металла) к травлению:

$$K_{ст} = \frac{V_{пл}}{V_{з.м}}, \quad (3.4)$$

где $V_{пл}$ и $V_{з.м}$ – скорости травления пленки и защитной маски соответственно.

Для увеличения $K_{ст}$ можно увеличить толщину пленки или уменьшить толщину маски.

5. Коэффициент искажения формы профиля:

$$K_{и.ф} = f(\Delta W_t), \quad (3.5)$$

где $f(\Delta W_t)$ – функция, характеризующая форму профиля; ΔW_t – отклонение ширины элемента по толщине слоя.

Коэффициент искажения профиля зависит от структуры и плотности вещества, подвергаемого травлению, применяемых травящих растворов (или газовых сред) и их характеристик.

Так, при жидкостном травлении с использованием растворов кислот или их смесей скорость и характер протекания процесса зависят от состава травителя, его температуры и ограничиваются диффузией травителя и продуктов реакции.

6. Коэффициент неоднородности травления $K_{н.т}$ отражает различие в окончании процесса травления на разных участках подложки.

Причинами неоднородности травления являются различия в толщине пленки ($\pm \Delta t_i$) и скоростях травления ($\pm \Delta V_i$) на различных участках подложки.

В производственных условиях партия подложек обрабатывается одновременно в течение времени

$$\tau_{теор} = \frac{t_{теор}}{V_{теор}}. \quad (3.6)$$

Реальное время травления в точке i подложки будет

$$\tau_i = \frac{t_{\text{теор}} \pm \Delta t_i}{V_{\text{теор}} \pm \Delta V_i}. \quad (3.7)$$

Тогда существуют

$$\tau_{\text{max}} = \frac{t_{\text{теор}} + \Delta t_i}{V_{\text{теор}} - \Delta V_i} \quad (3.8)$$

и

$$\tau_{\text{min}} = \frac{t_{\text{теор}} - \Delta t_i}{V_{\text{теор}} + \Delta V_i}, \quad (3.9)$$

а коэффициент неоднородности травления

$$K_{\text{н.т}} = \frac{\tau_{\text{max}} - \tau_{\text{min}}}{\tau_{\text{max}} + \tau_{\text{min}}} \cdot 100 \%. \quad (3.10)$$

Понятие «неоднородность» травления можно классифицировать по трем категориям:

- неоднородность на одной пластине (подложке);
- неоднородность в пределах одной партии пластин (подложек);
- неоднородность в различных партиях пластин (подложек).

Некоторые характеристики неоднородности процессов травления приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Коэффициент неоднородности для различных способов травления и партий подложек

Способ травления	Коэффициент неоднородности, %		
	для одной партии	для различных партий	в пределах подложки
Химический	15–30	15–30	15–40
Газовый в цилиндрическом реакторе	5–15	10–20	15–30
Газовый в планар- ном реакторе	5–10	5–10	10–15

Жидкостное травление. При этом способе ширина линии пленочного элемента отличается от ширины фоторезистивной маски за счет явления «подтравливания». Одновременно изменяется профиль элемента (рис. 3.10). Считая, что процесс жидкостного травления проходит изотропно, фронт травления можно описать уравнением окружности с центром в точке O и радиусом r , т. е.

$$x^2 + y^2 = r^2, \quad (3.11)$$

где $r = V_{\text{тр}} \cdot \tau$; $V_{\text{тр}}$ – скорость травления; τ – время травления.

При нормальном окончании процесса травления боковое подтравливание верхней плоскости пленки равно толщине пленки t , т. е. $\Delta W_i = t$ и $W = W_{\text{фр}} - 2\Delta W_1$; а $\Delta W_H = 0$ и $W_H = W_{\text{фр}}$.

При передержке времени травления граница подтравливания перемещается в направлении оси x , достигая по верхней плоскости точки B_i , а по нижней – A_i . В этом случае величина подтравливания составляет:

- для верхней плоскости $\Delta W_i = t + \Delta W$, а $W = W_{\text{фр}} - 2(t + \Delta W)$,
- для нижней плоскости $\Delta W_{Hi} = \Delta W$, а $W_H = W_{\text{фр}} - 2\Delta W$.

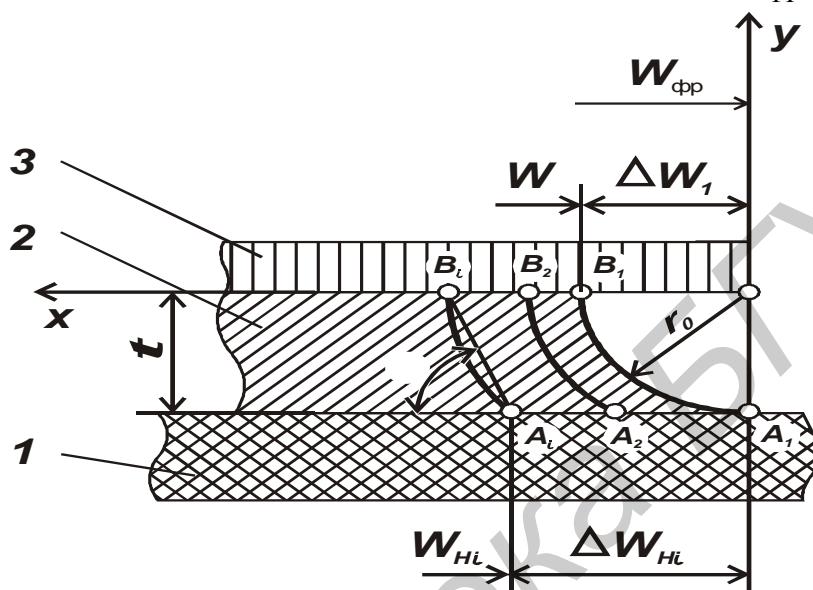


Рис. 3.10. Схема процесса жидкостного травления:
1 – подложка; 2 – пленка; 3 – фоторезист

Таким образом, при нормальном травлении боковая грань элемента представляет собой поверхность цилиндра радиусом r_i (при нормальном окончании процесса $r_i = r_0 = t$). В том случае, если процесс травления не окончен своевременно, происходит изменение профиля и размеров элементов: увеличивается угол наклона боковой грани, уменьшается ширина верхней и нижней плоскостей.

Скорость травления (основной параметр процесса) – величина, зависящая от структуры пленки, ее плотности, концентрации примесей, внутренних напряжений, т. е. технологических параметров процесса осаждения пленки. Кроме того, скорость травления зависит от параметров травления: температуры и концентрации травящих растворов, условий выделения продуктов химических реакций и пр.

На рис. 3.11 приведен график зависимости времени травления резистивных пленок нихрома от температуры подложки в процессе осаждения. Как видно из графика, наименьшее время травления имеют пленки, осажденные на холодную (около 25 °С) подложку. По-видимому, эти пленки имеют «рыхлую» структуру слабо связанных между собой частиц сплава.

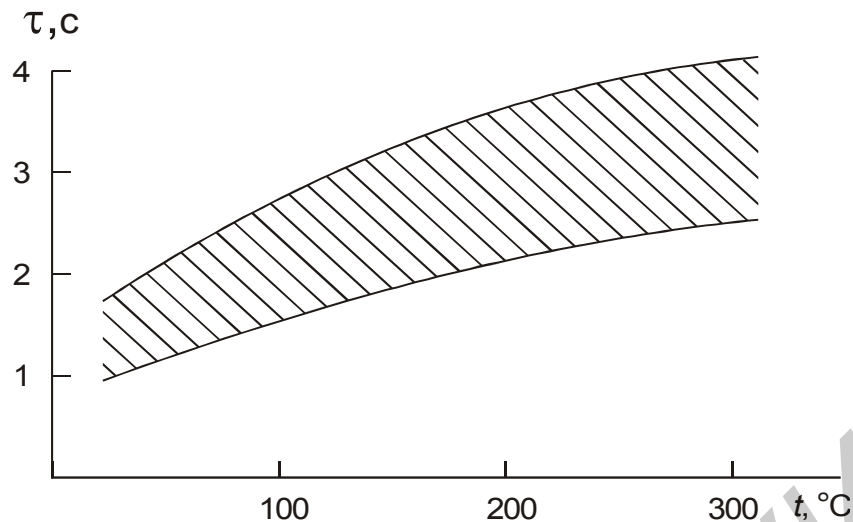


Рис. 3.11. Зависимость времени травления τ пленок никрома, осажденных при различных температурах подложки t ($c_{\square} = 90 \text{ Ом}$)

С повышением температуры текстура пленки становится более упорядоченной, повышаются ее плотность и связь между частицами. Время травления такой пленки увеличивается.

В процессе формирования пленок легкоокисляющихся металлов, например хрома, происходит взаимодействие его частиц с молекулами остаточного газа – кислорода. В результате происходит изменение состава и скорости травления пленки.

Техника фотолитографической обработки может быть также применена к толстым пленкам, особенно в тех случаях, когда требуется получить размеры линий менее 80 мкм.

Перспективный способ фотолитографической обработки толстых пленок связан с использованием фоточувствительных паст, содержащих в своем составе светочувствительные вещества.

Процесс травления фоточувствительных паст зависит от параметров их сушки. Существует широкий диапазон параметров сушки: температуры (70...120 °С) и времени (15...30 мин).

При использовании жидкостного травления способом погружения трудно получить требуемую точность размеров элементов из-за явления подтравливания. Этот дефект компенсируется коррекцией размера на фотошаблоне. Такой дефект как неровность края проводника ликвидировать затруднительно, так как подсушенный слой пасты имеет неровную поверхность.

Определенные достоинства для травления фоточувствительных толстых пленок имеет способ струйной обработки. Струйное травление осуществляется за счет распыления (пульверизации) травящего состава при его взаимодействии с нанесенной на поверхность подложки пасты.

С помощью этого способа следует осуществлять контроль давления подаваемой жидкости, расстояния до подложки, времени травления и скорости

движения подложек. При изменении давления струи травителя от 0,1 до 0,5 МПа время травления изменяется от 4 до 2 с.

Рассмотренные выше способы получения рисунка элементов тонко- и толсто пленочных схем в качестве основного процесса используют химическое травление. «Мокрое» химическое травление без интенсивного задубливания фоторезиста приводит к подтравливанию в случае плохой адгезии фоторезиста к пленке. Задубливание фоторезиста в свою очередь приводит к его термической деформации или деградации свойств, что вызывает изменение размеров «окон» в этом слое.

Кроме того, жидкостный способ травления является изотропным, т. е. процесс травления происходит равномерно по всем направлениям, в том числе и в нежелательном – под фоторезистивную маску. Этот процесс требует прецизионного контроля времени травления.

Этих недостатков лишены способы «сухого» (газового) травления.

Газовое травление. Этот способ широко применяется для травления диэлектриков, металлов, силицидов и других материалов, используемых в производстве ГИС и БГИС. Травление осуществляется с помощью ионов, поэтому такой процесс называют ионным травлением. По способу формирования ионных потоков существуют две разновидности ионных процессов: ионно-лучевые и ионно-плазменные. Эти способы можно назвать реактивными, если в процессе распыления/травления происходят химические реакции, приводящие к изменению химического состояния вещества.

Достоинства этой группы процессов связаны с возможностью травления пленочных материалов на большой площади, возможностью создания высокой плотности ионного потока при относительно малых энергиях ионов.

Недостатки ионно-плазменных процессов – высокое давление в области, где расположены распыляемые (подвергаемые травлению) поверхности (около 10 Па), что приводит к обратной диффузии распыляемых частиц, и воздействие плазмы на распыляемую поверхность.

В ионно-лучевых процессах бомбардировку – травление поверхности материалов осуществляют сформированным ионным пучком, т. е. ионы экстрагируют из плазмы, ускоряют и фокусируют на поверхности пластин (рис. 3.12).

Этот способ имеет следующие достоинства: независимое регулирование в широких пределах плотности тока ионного пучка и энергии ионов, низкое давление в области размещения мишени ($10^{-3} \dots 10^{-4}$ Па), отсутствие воздействия плазмы на мишень, возможность изменения угла бомбардировки.

Недостатки процесса связаны с малым диаметром ионного пучка (около 20 мм), нестабильностью плотности ионного тока и энергии.

Ионно-плазменное травление наряду с жидкостным травлением применяется для получения рисунка пленочных элементов ГИС и БГИС. Особое место этот способ занимает в производстве полупроводниковых ИМС, где размеры элементов достигают нескольких микрометров, а точность – долей микрометров [4].

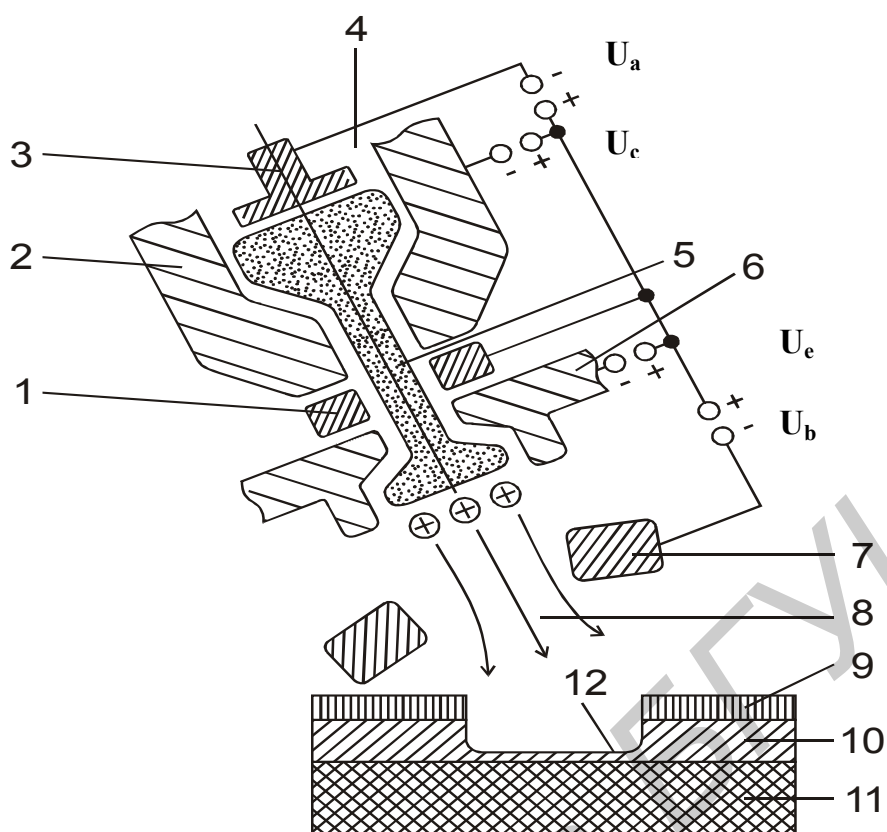


Рис. 3.12. Схема ионно-лучевого травления пленочной структуры с использованием плазмотронного источника:

- 1 – анод; 2 – промежуточный электрод; 3 – горячий катод;
 4 – место впуска рабочего газа; 5 – плазма; 6 – выходной электрод;
 7 – ускоряющий электрод; 8 – ионный поток; 9 – защитная маска;
 10 – обрабатываемая пленка; 11 – подложка; 12 – зона распыления;

U_a – анодное напряжение; U_b – ускоряющее напряжение;

U_c – напряжение промежуточного электрода; U_e – напряжение выходного электрода

По своей физической сущности ионно-плазменное травление подобно ионному распылению материалов с теми особенностями, которые обеспечивают точность размеров элементов.

Технология ионно-плазменного травления имеет определенные достоинства по сравнению с химическим жидкостным травлением (прежде всего она обеспечивает высокую воспроизводимость формы и размеров элементов):

- в практическом отсутствии явления подтравливания, т. е. в возможности получения вертикального края (отклонение от вертикали не превышает 15°);
- в возможности достижения большого соотношения между толщиной пленки t и шириной линии W или зазора s , т. е. $t/W(s) = 3...4$.

Изменение профиля пленки при ионном травлении пленок приведено на рис. 3.13 [3].

Взаимосвязь относительных скоростей травления никеля и золота от парциального давления кислорода приведена на рис. 3.14.

При ионном травлении пленок золота можно применять также защитную маску из титана.

При ионном травлении материалов пленочных структур можно варьировать и величинами подводимой мощности, и парциальным давлением газа. Любое изменение значений этих параметров будет изменять энергию бомбардирующих ионов.

При очень малой подводимой удельной мощности ($1 \dots 3 \text{ Вт/см}^2$) скорость травления пропорциональна ей.

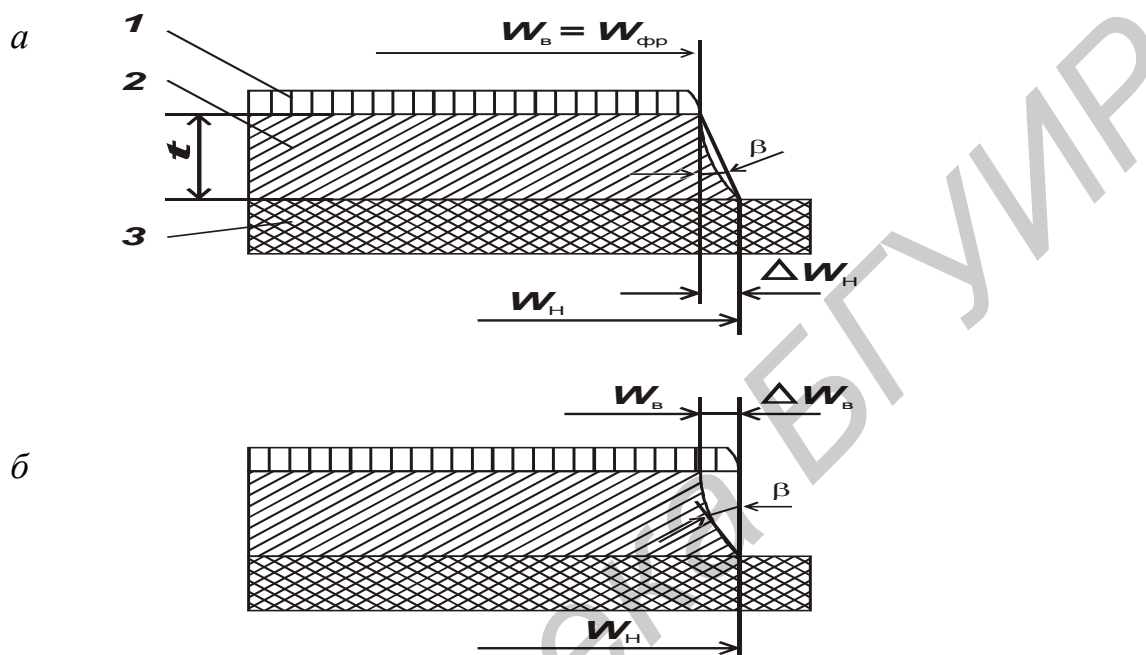


Рис. 3.13. Изменение профиля пленочного элемента при ионном травлении:
 а – случай нормального окончания процесса травления; б – случай «передержки»;
 1 – слой фоторезиста; 2 – пленка материала; 3 – подложка;
 t – толщина слоя; W_B – ширина верхней кромки проводника; W_H – ширина нижней кромки;
 ΔW_H и ΔW_B – погрешность ширины при «передержке» процесса травления;
 β – угол профиля при ионном травлении

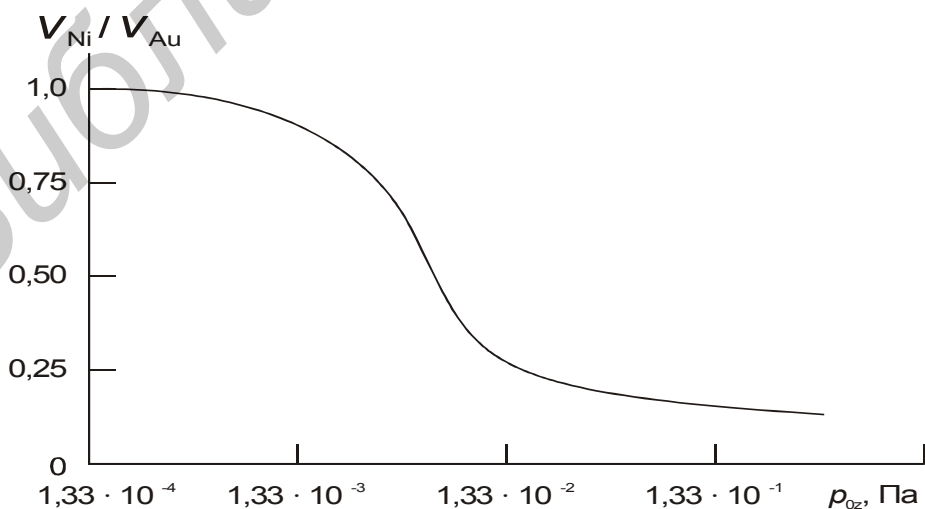


Рис. 3.14. Изменение относительной скорости травления V_{Ni}/V_{Au}

никеля и золота от парциального давления кислорода P_{O_2}

Реактивное плазменное травление представляет собой процесс бомбардировки материала пленки активным газом, вызывающим ее распыление с одновременным протеканием химической реакции. Этот процесс осуществляют в газовых камерах-реакторах. Характер процесса реактивного травления определяется характером протекания физических превращений и химических реакций в плазме газового разряда.

Газовый разряд, используемый для травления пленочных структур, характеризуется величиной давления от 6,6 до 660 Па, плотностью электронов от 10^9 до 10^{12} см⁻³ и средней энергией электронов от 1 до 10 эВ (такая энергия соответствует температуре $10^4 \dots 10^5$ К).

3.3.3. Электрохимическое осаждение

Процесс электрохимического осаждения применяется в производстве ГИС и БГИС для увеличения толщины основного проводящего слоя и нанесения защитного покрытия на проводники [3, 5]. Нарастивание основного слоя проводника (обычно это медь) проводят после вакуумного осаждения на сплошную пленку меди или на открытые участки – в окна фоторезистивной маски или на уже сформированный рисунок проводников. При разработке технологии электрохимического нарастивания следует провести правильный выбор материала фоторезистивной маски, обеспечить равномерное нанесение слоя. Фоторезисты позитивного типа являются более предпочтительными, так как они имеют более высокую стойкость в щелочных электролитах.

Наиболее трудной задачей является получение большой (около 10 мкм) толщины фоторезистивного слоя. Для этой цели можно использовать сухой пленочный фоторезист.

Осаждение пленок меди проводят из пиррофосфатных или серноокислых электролитов.

Пиррофосфатный электролит позволяет получать мелкозернистые плотные блестящие осадки. Однако эти электролиты имеют более высокую стоимость, сложны в приготовлении, требуют точного поддержания состава электролита и параметров электролиза.

Серноокислый электролит имеет простой состав, позволяет получать осадки с меньшими внутренними напряжениями, не требует нагрева.

При электролитическом осаждении пленок меди необходимо использовать химически чистые электроды, точно так же, как и необходимо поддерживать чистоту электролита. Наличие примесей и попадание их в осажденный слой увеличивает его электросопротивление в соответствии с рис. 3.15.

В качестве защитных слоев применяют золото, серебро, олово или сплав олово – висмут. На свойства золотых осадков влияют параметры процесса: плотность тока, температура раствора, концентрация золота и кислотность электролита. Поэтому такие параметры необходимо постоянно контролировать и регулировать.

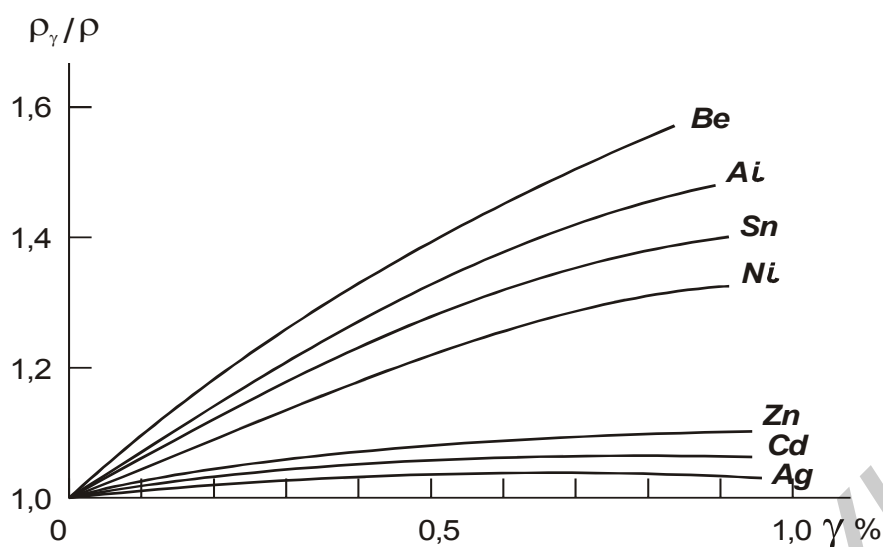


Рис. 3.15. Влияние содержания примесей металлов γ на относительное изменение электросопротивления ρ_γ/ρ пленок меди, осажденных гальваническим способом

На рис. 3.16 приведен график зависимости скорости осаждения золота от плотности тока. Как видно из графика, зависимость скорости осаждения от плотности тока в интервале от 0,5 до 0,85 А/дм² имеет линейный характер. Однако следует считать оптимальным интервал 0,6...0,7 А/дм². При этой плотности золотое покрытие имеет металлический блеск, мелкозернистую структуру; цвет покрытия – светло-желтый. При осаждении золота при плотности тока свыше 0,7 А/дм² возможно возникновение разряда других имеющихся в растворе ионов – в результате качество осадка ухудшается. При плотности тока менее 0,6 А/дм² уменьшается скорость осаждения.

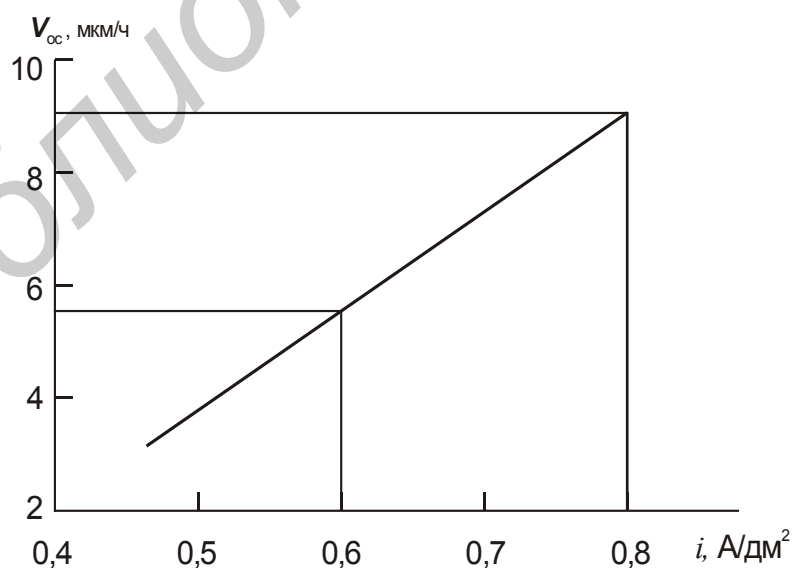


Рис. 3.16. График зависимости скорости осаждения $V_{ос}$ золота от плотности тока i : концентрация золота 8 г/л, температура раствора 30 °С, рН = 4,6

На рис. 3.17 представлена зависимость скорости осаждения золотого покрытия от температуры электролита. Скорость осаждения практически не зависит от температуры раствора. Однако температура раствора влияет на качество осадка. На образцах, полученных при температуре ниже 27 °С и выше 34 °С, покрытие имело темно-желтый цвет, повышенную шероховатость и пористость, недостаточную адгезию. Для электролитического процесса золочения оптимальный интервал температур составил от 28 до 32 °С.

На рис. 3.18 показана зависимость скорости осаждения золота от концентрации дицианоаурата калия в составе электролита. От концентрации электролита, т. е. степени насыщенности его ионами осаждаемого металла, зависит скорость осаждения металла. Увеличение концентрации золота свыше 10 г/л приводит к получению рыхлого, крупнокристаллического осадка, а уменьшение ниже 7 г/л – к уменьшению размера осаждаемых частиц и замедлению роста осадка.

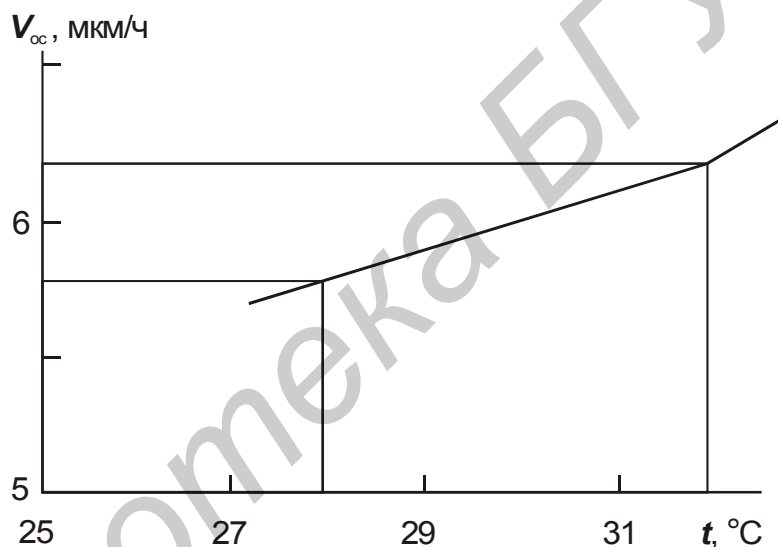


Рис. 3.17. График зависимости скорости осаждения $V_{ос}$ золота от температуры t электролита: плотность тока $0,6 \text{ А/дм}^2$; концентрация золота $9 \dots 10 \text{ г/л}$; $\text{pH} = 4,6$

От величины pH раствора зависит качество осадка и стабильность работы электролита. Образцы, полученные при $\text{pH} = 3,5$, имеют рыхлую, пористую структуру. Наилучшие по качеству осадки получены при $\text{pH} = 4,5 \dots 4,7$.

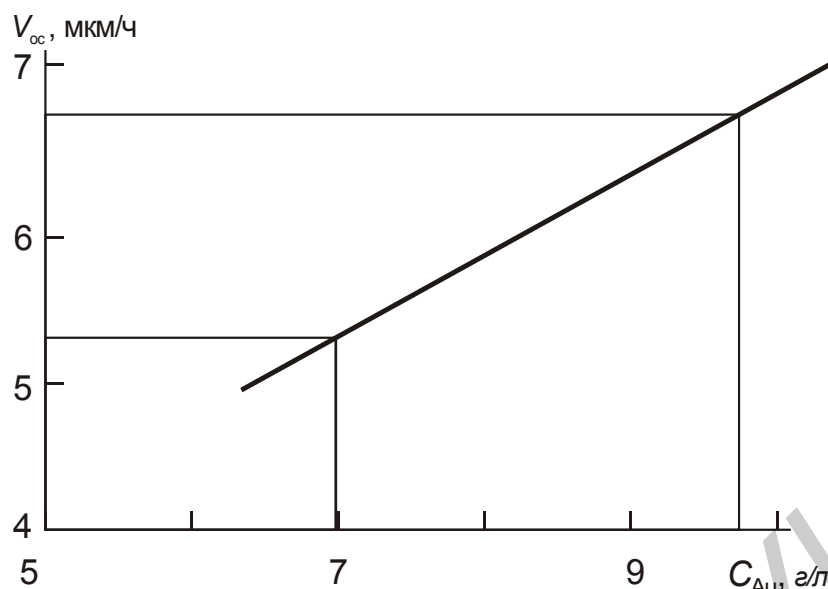


Рис. 3.18. График зависимости скорости осаждения $V_{ос}$ золота от концентрации C электролита: плотность тока $0,6 \text{ А/дм}^2$, температура $30 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$; $\text{pH} = 4,6$

При выборе состава ванны для селективного осаждения золота необходимо учитывать требования, предъявляемые к осаждаемой пленке.

Пленки золота с мелкозернистой структурой, высоким блеском и требуемой толщиной могут быть осаждены из нейтральной ванны, характеризующейся большой рассеивающей способностью. Однако такие электролиты не позволяют нанести пленки с большой адгезией. Вот почему электроосаждение пленок происходит в две стадии. Первоначально золото осаждают в слаббокислом электролите, а затем – в нейтральном электролите при температуре 50 и $60 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно.

Применение пленок серебра весьма привлекательно в связи с тем, что этот металл имеет наилучшую электропроводность. Однако серебро имеет такие недостатки, как высокая миграция, способность к образованию сернистых соединений, которые ухудшают электропроводность и затрудняют процесс пайки навесных компонентов. К числу факторов, ограничивающих применение серебра, необходимо отнести его дефицитность. Поэтому его применение ограничено. Оно использовалось в качестве защитного покрытия медных проводников.

Нанесение серебряных покрытий проводят обычно электрохимическим способом.

В конструкциях ГИС и БГИС, содержащих навесные элементы, устанавливаемые способом пайки, и не требующих большой точности в воспроизведении ширины проводников, в качестве защитных покрытий применяют химически осаждаемое олово или сплав олово – висмут.

3.4. Порядок выполнения лабораторной работы

3.4.1. Формирование фоторезистивной маски

1. По заданным преподавателем значениям вязкости и толщине фоторезиста необходимо определить угловую скорость вращения центрифуги, используя программу Mathcad или другую, имеющуюся на ПК (рис. 3.1, 3.19).

2. По заданному времени сушки (45 с) и толщине фоторезиста определить оптимальную температуру сушки фоторезиста (рис. 3.3, 3.20).

3. По найденной в п. 2 температуре сушки фоторезиста определить среднее время растворения фоторезиста при его последующей обработке (время = толщина/скорость) (рис. 3.5, 3.21).

4. По заданным времени экспонирования и проявления фоторезиста определить отклонение ширины линии ΔW (рис. 3.7, 3.22).

5. Проанализировать полученные результаты.

6. Ответить на контрольные вопросы.

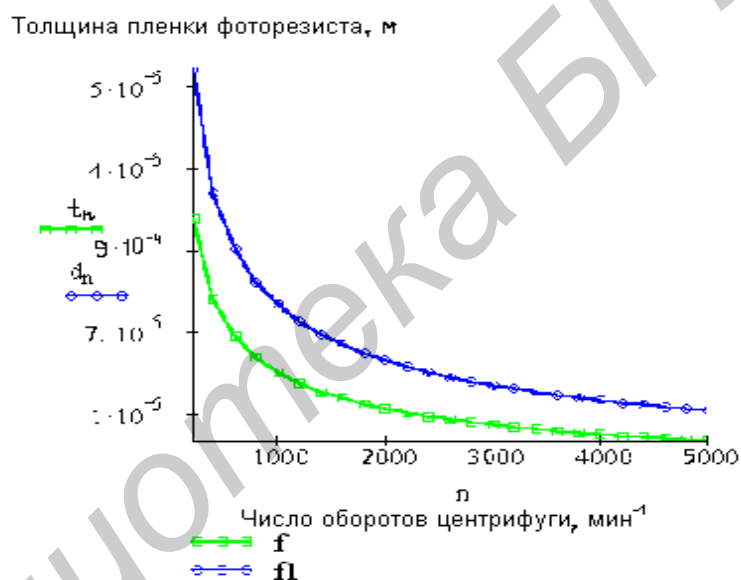


Рис. 3.19. Зависимость толщины пленки фоторезиста от числа оборотов центрифуги

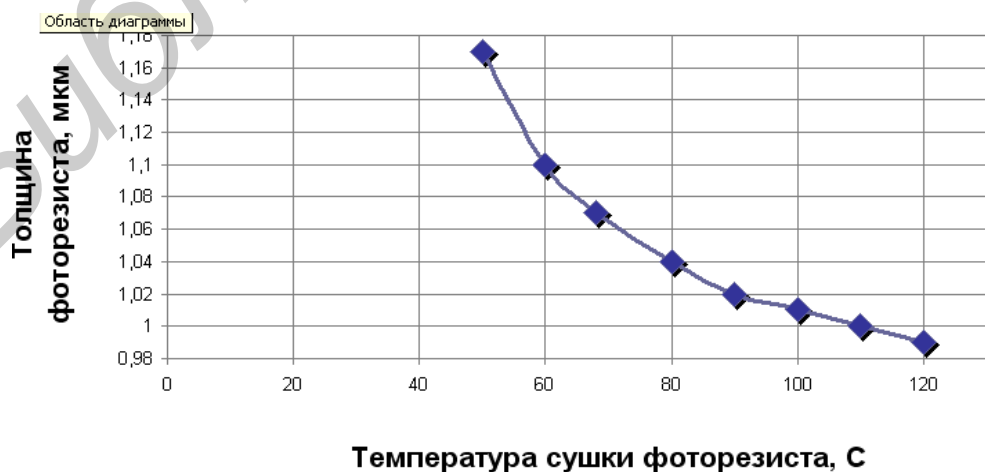


Рис. 3.20. Зависимость толщины позитивного фоторезиста от времени сушки (45 с)

Студентам может быть предложен другой вариант задания к п. 3.4.1 данной лабораторной работы:

1. По заданным преподавателем вязкости и угловой скорости вращения центрифуги необходимо определить толщину слоя фоторезиста (см. рис. 3.1, 3.19).

2. По заданной толщине фоторезиста и времени сушки (45 с) фоторезиста определить оптимальную температуру сушки фоторезиста.

3. Оценить количество пор в фоторезисте по заданной толщине слоя фоторезиста и частоте вращения центрифуги.

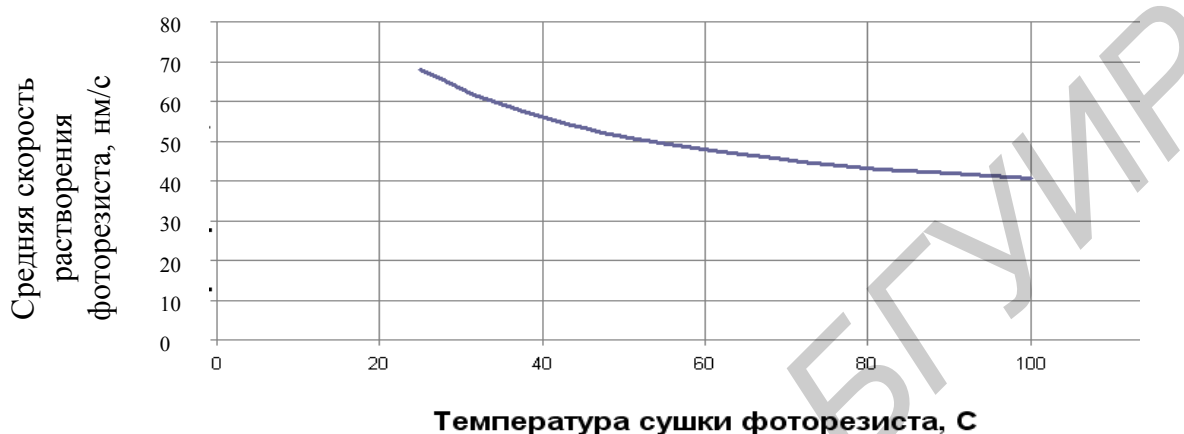


Рис. 3.21. Зависимость средней скорости растворения фоторезиста от температуры сушки

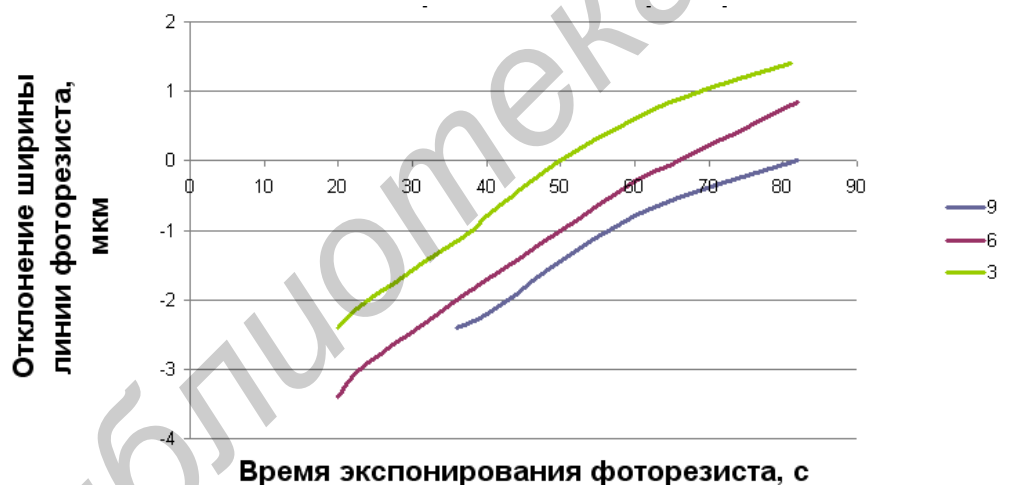


Рис. 3.22. Взаимосвязь времени экспонирования с отклонением ширины линии фоторезиста

4. Рассчитать энергию экспонирования по температуре сушки фоторезиста и времени сушки 2 мин (см. рис. 3.7, 3.22). Проанализировать полученные результаты.

5. По найденной в п. 2 температуре сушки фоторезиста определить среднее время растворения фоторезиста при его последующей обработке (время = толщина/скорость) (см. рис. 3.5).

6. По найденной в п. 5 энергии экспонирования определить отклонение ширины линии ΔW (см. рис. 3.6).

7. По найденной в п. 6 ширине линии ΔW определить время экспонирования при заданном времени проявления (см. рис. 3.7).
8. Проанализировать полученные результаты
9. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Назовите виды брака при формировании фоторезистивной маски.
2. Назовите основные причины брака фоторезистивной маски.
3. Какова последовательность операций при полном цикле фотолитографии?
4. Каковы особенности и основные параметры позитивных и негативных фоторезистов?
5. От чего зависит толщина нанесенного слоя фоторезиста?
6. От чего зависит энергия экспонирования?
7. Какие способы нанесения фоторезиста вы знаете?
8. От чего зависит количество пор-проколов в фоторезисте?
9. Каковы различия между негативным и позитивным фоторезистом?
10. Что происходит в результате термообработки фоторезистивной маски?

3.4.2. Травление

1. По заданным преподавателем значениям толщины слоя фоторезиста и времени травления определить оптимальную скорость травления.
2. По заданным скоростям травления в вертикальном и горизонтальном направлениях определить коэффициент анизотропности травления K_a (3.2).
3. По заданным скоростям травления материала, непосредственно подвергаемого травлению и лежащего под ним, определить коэффициент селективности травления двух материалов (3.1).
4. По изменению ширины с одной стороны пленки и изменению толщины элемента в момент времени ϕ определить коэффициент бокового травления (3.3).
5. Проанализировать полученные результаты
6. Ответить на контрольные вопросы.

Студентам может быть предложен другой вариант задания к п. 3.4.2 данной лабораторной работы:

1. По заданным преподавателем значениям скорости травления слоя фоторезиста и времени травления определить оптимальную толщину слоя фоторезиста.
2. По заданной скорости травления в вертикальном направлении и коэффициенту анизотропности травления K_a определить скорость травления в горизонтальном направлении (см. рис. 3.20).

3. По заданному коэффициенту селективности травления двух материалов, скорости травления материала, непосредственно подвергнутого травлению определить скорость травления материала, лежащего под ним (см. рис. 3.19).

4. По изменению ширины с одной стороны пленки и коэффициенту бокового травления определить изменение толщины элемента в момент времени ϕ (см. рис. 3.21).

5. Проанализировать полученные результаты.

6. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные виды брака при жидкостном и «сухом» травлении?

2. Назовите основные причины брака при жидкостном и «сухом» травлении?

3. Почему «сухие» процессы травления обеспечивают более высокую, чем жидкостные, разрешающую способность?

4. О чем свидетельствует коэффициент селективности травления?

5. От чего зависит скорость травления?

6. Какие дефекты могут возникнуть при жидкостном травлении?

7. Назовите достоинства и недостатки газового травления?

8. По каким категориям можно классифицировать «неоднородность» травления?

9. От чего зависит коэффициент искажения профиля?

10. Что отражает коэффициент неоднородности травления?

3.4.3. Электрохимическое осаждение

1. По заданным преподавателем значениям плотности тока, концентрации золота, температуре раствора необходимо определить скорость осаждения V_{oc} (см. рис. 3.16).

2. По заданной скорости осаждения V_{oc} , концентрации золота, температуре раствора необходимо определить температуру t электролита (см. рис. 3.17).

3. Определить скорость осаждения V_{oc} золота по заданной концентрации C электролита и известных значениях плотности тока и температуре 30 ± 2 °C; pH = 4,6 (см. рис. 3.18).

3. Проанализировать полученные результаты.

4. Ответить на контрольные вопросы.

Студентам может быть предложен другой вариант задания к п. 3.4.3 данной лабораторной работы:

1. По заданным преподавателем скорости осаждения V_{oc} , концентрации золота, температуре раствора необходимо определить значения плотности тока (см. рис. 3.16).

2. По заданным температуре t электролита, плотности тока, концентрации золота требуется определить скорость осаждения V_{oc} (см. рис. 3.17).

3. По заданному проценту содержания примесей металлов Γ определить относительное изменение электрического сопротивления пленок меди, осажденных гальваническим способом (см. рис. 3.15).

4. Проанализировать полученные результаты.

5. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные виды брака при использовании технологического процесса электрохимического осаждения.

2. Назовите основные причины брака при использовании технологического процесса электрохимического осаждения.

3. Для чего применяют процесс электрохимического осаждения?

4. Что применяют в качестве защитных слоев?

5. От чего зависит скорость осаждения?

6. От чего зависит качество осадка и стабильность работы электролита?

7. Достоинства и недостатки пирофосфатного электролита.

8. Достоинства и недостатки сернокислого электролита.

9. Какого типа фоторезисты являются более предпочтительными при электрохимическом осаждении и почему?

10. Как температура раствора влияет на качество осадка?

3.4.4. Структура программы на ПК

Программа состоит из двух блоков. Первый блок теоретический, а второй – практический. В первом блоке обучающийся изучает эскизный маршрут формирования конфигурации пленочных элементов ГИС и БГИС. Предусмотрен пошаговый вариант изучения технологии и конструкции тестовых структур (рис. 3.23).

ФОРМИРОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
1. Теоретическая часть
1.1. Методы формирования топологии
1.2. Проверка знаний
2. Практическая часть
2.1. Выполнение лабораторного задания
3. Контрольные вопросы

Рис. 3.23. Внешний вид экрана монитора после загрузки программы

В процессе изучения на экран последовательно выводится информация о применяемых материалах, режимах и параметрах каждой технологической операции. Движение вперед осуществляется путем нажатия кнопки «Далее». Каждое сечение снабжено информативной строкой, в которой отражается название операции с комментарием. Из комментария студент может получить более подробную информацию о технологической операции (оборудование, режимы и т. п.). Если в процессе изучения по какой-либо причине понадобилось вернуться на один или несколько шагов назад, то для этого предусмотрена кнопка «Назад». Если несколько раз нажать эту кнопку, можно вернуться к любому ранее изученному разделу работы.

Теоретическая часть заканчивается контролем уровня усвоения технологического процесса. Пользователю предоставляется возможность ответить на блок вопросов. Для каждого вопроса предусмотрено несколько вариантов ответов, один из которых правильный. На этом первый (теоретический) блок заканчивается.

Во втором блоке обучающийся проводит расчет технологических режимов изготовления пленочных элементов БГИС. Студент получает у преподавателя задание в виде наименований и значений параметров, которые следует использовать при расчетах. Примерные варианты заданий приведены в пп. 3.4.1 – 3.4.3 данного лабораторного практикума. Для каждой операции предусмотрен набор графических зависимостей (графиков), которые связывают параметры технологического процесса. Выбор соответствующей графической зависимости осуществляется из меню, расположенного над этой зависимостью. После получения задания студенту необходимо мышью установить курсор в точку графика, соответствующую заданному параметру. Контроль значения заданного параметра осуществляется в окне, расположенном над графической зависимостью. Произвести отсчет полученного значения другого параметра из окна, расположенного над графической зависимостью. Далее необходимо записать полученное значение и использовать его при вычислении следующего параметра в соответствии с заданием. Затем действия повторяются. Движение по меню происходит стандартным методом с помощью мыши или клавиатуры. После того как пользователь выбрал один из рассчитываемых параметров, программа переходит в режим имитации процесса вычисления. После окончания процесса измерения и вычисления студент должен сохранить эти результаты и внести их в отчет.

После того как обучающийся переписал данные, он с помощью кнопки «Закрыть» (или «Alt + F4») переходит к окну с результатами статистического анализа.

По полученным данным необходимо проанализировать параметры и режимы технологического процесса, объяснить возможные причины отклонений (если таковые имеются) и дать рекомендации по изменению режимов технологических операций для устранения расхождений.

Разделы программы закрываются курсором, помещаемым в красный ромбик, расположенный в строке перед названием этапа работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Смирнов, В. И. Физико-химические основы технологии электронных средств : учеб. пособие / В. И. Смирнов. – Ульяновск : УлГТУ, 2005.
2. Технология приборостроения : учеб. пособие / В. А. Валетов [и др.]. – СПб. : СПбГУ ИТМО, 2008.
3. Бушминский, И. П. Технологическое проектирование микросхем СВЧ : учеб. пособие для вузов / И. П. Бушминский, Г. В. Морозов. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.
4. Полтавцев, Ю. Г. Технология обработки поверхностей в микроэлектронике / Ю. Г. Полтавцев, А. С. Князев. – Киев : Техника, 1990.
5. Белов, А. Н. Электрохимические процессы в технологии микро- и нанoeлектроники. Основы наук / А. Н. Белов, С. А. Гаврилов. – М. : Высш. образование, 2009.
6. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры / К. И. Билибин [и др.] ; под общ. ред. В. А. Шахнова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005.

Учебное издание

ТЕХНОЛОГИЯ БГИС

Лабораторный практикум
для студентов специальности «Микро- и нанoeлектронные
технологии и системы»

В 4-х частях

Часть 3

Шульгов Владимир Владимирович

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ТОПОЛОГИИ ПЛЕНОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Редактор Е. Н. Батурчик
Корректор Л. А. Шичко

Подписано в печать 04.06.2010.
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 1,6.

Формат 60x84 1/16.
Отпечатано на ризографе.
Тираж 70 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л.
Заказ 274.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.
220013, Минск, П. Бровки, 6