

Министерство высшего и среднего специального образования СССР
—
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

В. К. ИСАЧЕНКО, В. В. ХОЛЕВИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ
И МИКРОСВАРКИ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ
И ТЕХНОЛОГИИ ЭВА

Методические указания
к лабораторным работам по курсу
«Электрофизические методы обработки и микросварки»

Данные методические указания издаются в соответствии с учебным планом.

Рассмотрены и одобрены кафедрой П-8 7.04.80 г., Методической комиссией факультета П и Учебно-методическим управлением.

Рецензент к.т.н. Сикельников А.А.

С) Московское высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
I. Общие положения теории и технологии лазерной обработки материалов при использовании твердотельных лазеров ...	4
а) Поглощение световой энергии и преобразование ее в тепловые колебания решетки материала резистивной пленки	5
б) Нагрев материала пленки	7
в) Разрушение материала и удаление продуктов разрушения (испарение материала резистивной пленки)	8
2. Общие положения теории и технологии микросварки давлением	10
Работа № 3. Исследование технологии подгонки тонкопленочных резисторов с применением лазерной обработки	13
3. Особенности физических явлений и технологии лазерной подгонки тонкопленочных резисторов на диэлектрической подложке	16
4. Техническое описание лазерной установки СУ-1	21
Работа № 4. Исследование технологических характеристик процесса микросварки давлением с косвенным импульсным нагревом зоны сварки	28
5. Особенности физических явлений при микросварке давлением с косвенным импульсным нагревом (СКИН)	29
6. Техническое описание установки "Контакт-8А"	33

Редактор В.Т.Карсева

Корректор Л.И.Малюткина

Заказ 409 Объем 2,25 п.л. (2 уч.-изд.л.) Тираж 500 экз.

Госиздат Подписано к печати 26.03.81 г. План 1981 г., № 40

Типография МВТУ. 107005. Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5.

ВВЕДЕНИЕ

Данные методические указания составлены к лабораторным работам по одному из методов электрофизической размерной обработки — лазерной обработке, а также по одному из методов микросварки давлением — микросварке давлением с косвенным импульсным нагревом.

Пособие содержит:

1. Общие положения теории и технологии лазерной обработки материалов и микросварки, необходимые для выявления роли и влияния физических явлений и технологических приемов на технологические показатели, характерные для рассматриваемых методов.
2. Конкретную методику и порядок выполнения каждой лабораторной работы с указанием ее особенностей.
3. Методические указания по использованию: (лазерная обработка при подгонке сопротивлений и сведений) (лазерная обработка при подгонке сопротивлений толсто- и тонкопленочных резисторов; микросварка давлением с косвенным импульсным нагревом выводов и перемычек в микросхемах и микросборках). Эти сведения позволяют проанализировать результаты работы, установить причины получаемых погрешностей и дать рекомендации по выбору оптимальных режимов.

Каждая работа рассчитана на 4 часа аудиторных занятий, из которых 30 минут отводится на вводную лекцию. До выполнения лабораторной работы проверяются знания студентами теоретических основ лазерной обработки и микросварки давлением. Проверка осуществляется на установках "Экзаменатор" по контрольным карточкам, содержащим по три контрольных вопроса. К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, ответившие на все контрольные вопросы карточки. В противном случае студенты получают от преподавателя дополнительные индивидуальные задания на изучение определенных разделов теоретического курса, после чего вновь подвергаются контрольному опросу на "Экзаменаторе".

Лабораторные работы выполняются группами студентов из 2-3 чел. Отчет по работе составляет каждый студент. Зачет по работе проводится по готовому отчету сразу после выполнения лабораторной работы и только перед началом очередной работы.

I. Общие положения теории и технологии лазерной обработки материалов при использовании твердотельных лазеров

Одним из важных преимуществ пленочной микроэлектроники является возможность получения прецизионных резисторов микросхем путем использования специальных методов доводки сопротивлений резисторов до заданных номиналов после создания тонкопленочной структуры. Применяют дискретную и плавную подгонки. Первая предусматривает изменение топологии резистора перерезанием или напайванием специальных перемычек. Точность такой подгонки не превышает $\pm 2\%$. Плавная подгонка осуществляется без изменения топологии резистора за счет изменения ρ_0 (т.е. изменения объемных свойств и толщины резистивной пленки) путем изменения числа квадратов резистивной пленки (удаление участков пленки различными методами, в том числе и лазерным испарением). Точность плавной подгонки может достигать $0,1\%$ и выше.

Лазерный метод наиболее экономичен, производителен, доступен автоматизации и обеспечивает наибольшую точность подгонки (по сравнению с методами скрайбирования, электроэрозионной обработки, химической обработки, электроннолучевого испарения и др.).

Оптические квантовые генераторы имеют характеристики, позволяющие использовать их с наибольшим эффектом:

... возможность строгой локализации лазерного излучения в результате его фокусировки оптической фокусирующей системой установки (легкость и простота выполнения оператором);

высокая плотность энергии в плоскости фокуса лазерного излучения (до 10^{12} Вт/см²), обеспечивающая испарение любого материала;

небольшая глубина, на которую распространяется термическое воздействие излучения, что позволяет выполнять подгонку резисторов, исключая разрушение диэлектрической подложки микросхемы или материала слоев, расположенных под резистивной пленкой;

возможность простой регулировки плотности энергии излучения в плоскости фокуса на поверхности пленки путем изменения интегральной энергии излучения или небольшой расфокусировки лазерного луча относительно поверхности пленки;

незначительная длительность (до 10^{-7} с) импульса излучения с простой ее регулировкой, обеспечивающей достаточно строгую

локализацию термического воздействия только на необходимый для подгонки участок резистивной пленки без существенного изменения свойств материала в прилегающих к зоне обработки участках.

Плавная подгонка пленочных резисторов микросхем с помощью лазерного излучения предусматривает увеличение сопротивления резистора путем избирательного испарения участков пленки или уменьшение сопротивления путем избирательного нагрева без плавления и испарения участков резистивной пленки.

Одним из важнейших вопросов при разработке технологии лазерной подгонки резисторов микросхем является исследование воздействия мощного светового потока на резистивные материалы. Процесс воздействия условно можно разделить на несколько этапов:

поглощение световой энергии и передача ее с трансформацией в тепловые колебания решетки твердого тела (резистивного материала);

нагрев материала пленки;

разрушение материала и удаление продуктов разрушения (при подгонке испарением);

остывание материала после окончания действия излучения.

а) Поглощение световой энергии и преобразование ее в тепловые колебания решетки материала резистивной пленки

Этот этап воздействия для металлов и сплавов, полупроводников, диэлектриков протекает со всеми особенностями.

При взаимодействии с поглощающей средой световой поток частично отражается от поверхности, а частично проникает внутрь материала, поглощаясь в нем. Достаточно быстро лучистая энергия превращается в тепловую. Изменение плотности светового потока q , т.е. количество световой энергии, приходящейся на единицу поверхности материала в единицу времени, в поглощающей среде описывается законом Бутера-Ламберта

$$q(x) = q_0 A e^{-\int_0^x \alpha(x) dx}, \quad (I)$$

где q_0 - плотность падающего светового потока на поверхности материала;

A - поглощательная способность материала ($A = 1 - R$, где R - коэффициент отражения);

α - коэффициент поглощения света в среде.

Координата x отсчитывается от поверхности в глубь материала. Формула соответствует линейному поглощению излучения и применима к различным материалам в широком диапазоне длин волн. Значения входящих в нее величин A и α , а также механизмы поглощения света и перехода его в тепло могут сильно отличаться для материалов с различными свойствами.

В металлах кванты света поглощаются в основном электронами проводимости, которые рассеивают поглощенную энергию на тепловых колебаниях решетки за время $10^{-11} + 10^{-10}$ с. Этот процесс протекает в слое толщиной $10^{-6} + 10^{-5}$ см, приблизительно соответствующей глубине проникновения излучения в металл. Это время значительно меньше длительности световых импульсов, используемых для обработки, поэтому можно считать, что в течение импульса излучения тепловой источник, нагревающий решетку металла, поворачивает изменения светового потока с пренебрежимым во времени запаздыванием. Большинство металлов в диапазоне длин волн, характерных для излучения лазеров, имеет высокую отражательную способность $R = 1 - A$ и большой коэффициент поглощения $\alpha \approx 10^5 + 10^6 \text{ см}^{-1}$.

Полупроводники, имеющие при комнатной температуре незначительную концентрацию свободных электронов, поглощают световую энергию в основном за счет связанных носителей. Сильное поглощение излучения характерно для полупроводников, у которых ширина запрещенной зоны меньше энергии кванта излучения. Линейный коэффициент поглощения света α может достигать значений $10^4 + 10^5 \text{ см}^{-1}$. Выполнение перечисленных условий приводит к внутреннему фотоэффекту в полупроводнике и росту концентраций свободных носителей (электроны валентной зоны переходят в зону проводимости). С течением времени концентрация свободных фотоэлектронов стабилизируется в связи с различными видами рекомбинаций (междузонной, излучательной, безизлучательной на ловушках и др.) и диффузией электронов и дырок за счет градиента концентрации носителей в месте воздействия излучения. Интенсивное выделение тепла в решетке полупроводника начинается с момента достижения такой концентрации электронов, при которой они сами будут поглощать основную долю светового потока.

Для полупроводников, как и для металлов, сдвиг во времени между поглощением света и переходом его в тепло пренебрежимо мал. Но для полупроводников это утверждение справедливо при световых потоках плотностью не менее 10^6 Вт/см^2 . Меньшие

плотности вызывают нагрев за счет более медленных рекомбинационных процессов с появлением временного сдвига между поглощением и нагревом. Коэффициенты отражения у полупроводников обычно меньше, чем у металлов (в исходном состоянии).

Механизм поглощения света в непрозрачных неметаллических материалах сложен и может включать рассмотренные ранее механизмы внутрizonного и междוזонного электронного поглощения. Кроме того, возможно существенное примесное поглощение и поглощение на дефектах и включениях, которые приводят к собственному поглощению в материале в процессе нагрева.

б) Нагрев материала пленки

В результате перехода световой энергии в тепловую начинается нагревание материала пленки. Перенос тепла в твердом теле осуществляется механизмами теплопроводности, из которых для металлов и сильно вырожденных полупроводников основной является электронная, а для неметаллов — решеточная. Размер прогреваемой излучением области сначала определяется глубиной проникновения света в среду $\delta = 1/\alpha$, а с течением времени этот размер растет за счет теплопроводности в соответствии с величиной $\sqrt{\alpha t}$, где α — коэффициент температуропроводности материала.

Повышение температуры материала может сопровождаться изменением его оптических и теплофизических свойств, тепловым расширением, фазовыми переходами в твердом состоянии и плавлением. Возможна активация диффузионных процессов в твердом теле и некоторые химические реакции на его поверхности и в приповерхностном слое.

При нагревании излучением изменение оптических свойств материала (поглощательная способность и коэффициент поглощения) непосредственно влияет на количество выделенного тепла и его пространственное распределение. Отражательная способность металлов с ростом температуры практически линейно падает, так как уменьшается подвижность свободных электронов, а коэффициент поглощения не меняется. В полупроводниках при действии лазерного излучения и на фоне уменьшения подвижности электронов вызывает уменьшение отражения, но генерация электронов при нагреве сопровождается увеличением отражения. В среднем суммарное действие этих явлений приводит к некоторому росту отражения, не превышающему двукратного.

В общем случае скорость роста температуры материала (металла и неметалла) определяется помимо энергетических характеристик светового луча и свойств материала соотношением глубины проникновения излучения, толщины прогреваемого слоя и радиуса зоны облучения (при фокусировке излучения в круговое пятно). Если три последние величины меньше размеров облучаемого элемента, то этот элемент можно считать полубезграничным телом (приближенно к законам распространения тепла в твердом теле). Если прогревший за счет теплопроводности слой имеет толщину значительно большую, чем глубина проникновения излучения, то источник тепла можно считать поверхностным. Если радиус пятна (облучаемой площадки) много больше величины \sqrt{at} , то действием теплоотода в стороны от пятна можно пренебречь. Если же этот радиус много меньше этой величины, то боковой теплоотвод получает решающую роль.

В) Разрушение материала и удаление продуктов разрушения (испарение материала резистивной пленки)

В большинстве случаев начало разрушения непрозрачного материала под действием мощного лазерного излучения связано с испарением вещества. Другие механизмы термического разрушения, возможные при воздействии лазерного излучения, например растрескивание хрупких материалов под влиянием термических напряжений, термическое разложение и др., имеют обычно более низкий температурный порог, происходят или при непрерывном облучении или в режиме лазерной обработки длинными во времени импульсами. Для разрушения испарением необходимо импульсное лазерное излучение при незначительной длительности каждого импульса.

Процесс испарения твердого тела начинается в общем случае при любой температуре выше абсолютного нуля. Более высокая температура приводит к большей интенсивности процесса испарения. Результирующая скорость движения границы испарения зависит от соотношения испарения вещества и компенсирующей его конденсации из обратного потока (за счет столкновений атомов или паров вещества между собой и с атомами или молекулами окружающей среды). При лазерной обработке на воздухе и температуре нагрева, меньшей температуры кипения материала, отвод испаренного вещества осуществляется малоэффективными механизмами молекулярного переноса - в основном диффузией в воздухе. При этом парциальное давление пара ниже атмосферного. В этом случае испаре-

ние почти полностью уравновешено конденсацией частиц из обратного потока. Поэтому температура нагрева должна быть не ниже температуры кипения материала на воздухе. Такой нагрев приводит к газодинамическому механизму расширения пара и уменьшению влияния конденсации.

Технология лазерной размерной обработки испарением эффективна при достаточно точно установленном диапазоне плотностей световых потоков, при которых происходит испарение. Минимально допустимая плотность светового потока при малых длительностях импульсов лазерного излучения определяется из выражения

$$q_1^* = \frac{\sqrt{\alpha} K (T_v - T_n)}{2\sqrt{\alpha\tau}} \quad (2)$$

где K - коэффициент теплопроводности,
 T_v - верхняя температурная граница стадии нагревания материала без разрушения;
 T_n - начальная температура материала;
 α - коэффициент температуропроводности материала;
 τ - длительность импульса лазерного излучения.

Плотность излучения, при которой происходит оптимальное испарение, считается оптимальной, если она равна

$$q_2^* \approx (2-3) q_1^* \quad (3)$$

При такой плотности к концу импульса процесс испарения можно считать квазистационарным.

Дальнейшее увеличение плотности светового потока малоэффективно, так как связано с началом заметного ослабления и уничтожения продуктами разрушения (парами материала).

Тепловые процессы при лазерной обработке тонких пленок на диэлектрической подложке имеют частные особенности и будут рассмотрены в теоретической части лабораторной работы.

Стадия нагревания материалов излучением является основной при выполнении операции подгонки без разрушения (испарения) материала резистивной пленки. Нагрев осуществляют до температуры, при которой происходит рекристаллизация, приводящая к уменьшению электрического сопротивления пленки за счет уплотнения ее структуры. Этот способ особенно эффективен при подгонке сопротивлений металлических резисторов, не прошедших термическую обработку в вакууме, и металлокерамических на ос-

нове двухфазных систем (например, $\text{Cr} - \text{SiO}_2$; $\text{Au} - \text{Cr}_2\text{O}_3$ и др.).

Для сопротивлений из хрома, рения и других монометаллов используют термическое окисление. При нагреве на воздухе происходит интенсификация окислительных процессов на поверхности пленки и увеличение ее удельного сопротивления ρ_{\square} . Если резистивная пленка имеет защитное покрытие от окисления, то изменение ρ_{\square} происходит за счет отжига резистивного материала. Сопротивление пленки при этом является функцией длительности термической обработки. Импульсное расфокусированное лазерное воздействие на материал пленки вызывает необратимое уменьшение величины ρ_{\square} в связи со структурными превращениями в пленке. Наиболее сильные структурные превращения начинаются при интенсивности светового потока $3 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$. При интенсивности светового потока около $6 \cdot 10^3 \text{ Вт/см}^2$ проявляется стабилизация структурных превращений. При этом величина ρ_{\square} приближается к значению, характерному для массивного материала.

2. Общие положения теории и технологии микросварки давлением

Удельный вес операций по изготовлению различных видов микроселектронных приборов, в которых применяется сварка, составляет до 60% от общей трудоемкости изготовления всего изделия. Сварные и паяные узлы таких приборов выполняются из различных металлов, сплавов и других конструкционных материалов, большинство из которых имеет особые свойства - высокую теплопроводность, значительную коррозионную стойкость и т.п. Толщина соединяемых сваркой или пайкой элементов может составлять от нескольких микрометров до нескольких миллиметров.

Для получения микросварных соединений разработаны и широко применяются несколько способов сварки: термокомпрессионная, ультразвуковая, давлением с косвенным импульсным нагревом, односторонняя контактная и некоторые комбинированные.

Физическая природа схватывания и образования прочного соединения в общем одинака для всех способов микросварки давлением. Она обусловлена металлическими связями, формирующими единый кристалл из атомов за счет возникновения общих для атомов валентных электронов в виде так называемого "электронного газа".

Образование соединения при микросварке давлением без плавления происходит в результате ряда процессов, протекающих на

поверхности и в объеме соединяемых материалов. К ним относятся: разрушение (деструкция) окисных пленок и адсорбированных поверхностных слоев; развитие физического контакта в результате деформации микронеровностей; активации поверхностей соединяемых материалов; образование локальных микроконтактов между поверхностями; возникновение напряжений; поверхностная и объемная диффузия; релаксационные явления. Процесс соединения принято по физической природе делить на две стадии, различающиеся кинетикой и механизмом процесса. Первая стадия — это образование физического контакта, вторая — диффузионное зарастивание микронесплошностей.

Первая стадия соединения включает два последовательных процесса:

а) образование физического контакта, сопровождающееся пластической деформацией контактирующих микронеровностей соединяемых поверхностей и формированием действительной площади контактного соединения; разрушением и выносом окисных и адсорбированных пленок за пределы зоны контакта за счет пластического течения материала деформируемых микронеровностей; сближением на расстоянии, достаточные для межатомного взаимодействия, ювенильных контактирующих пластически деформированных микроучастков и образованием межатомных связей;

б) структурная подстройка, в течение которой формируются атомные связи в области фактического контакта.

Обычно процесс микросварки давлением требует нагрева материала в зоне соединения от внешнего источника. Это облегчает сварку за счет увеличения подвижности атомов в кристаллической решетке и ускорения процессов вязкого течения материала в зоне контакта и взаимной диффузии. При высокой скорости пластической деформации микронеровностей происходит локальный нагрев материала в зоне контакта в связи с проскальзыванием зерен друг относительно друга с высокой скоростью. На практике такая скорость деформации недопустима, поэтому необходим нагрев от внешнего источника.

Вторая стадия соединения характеризуется процессом диффузионного зарастивания образовавшихся микропор в плоскости контакта. Поры — несплошности между микровыступами — заполняются атомами за счет миграции вакансий, меняющихся местами с атомами, что способствует процессу зарастивания. Относительно небольшие давления при малоинтенсивной пластической деформации внеш-

вают преобладание диффузионных процессов связанных с замещением вакансий. Для высоких давлений при повышенной пластичности материалов характерны процессы и диффузионные и переноса атомных комплексов со скоростями, близкими скоростям деформации.

Активации процесса соединения осуществляется вводом в зону формирования микросоединения тепловой и механической энергии (нагрев локального участка соединяемых материалов и давление на этот участок).

Процесс пластической деформации в условиях релаксации напряжений, ползучести и старения может привести как к упрочнению или разупрочнению, так и к сохранению свойств микросварного соединения. Явление релаксации состоит в переходе с определенной скоростью упругих деформаций в пластические. Различают несколько разновидностей релаксации: низкотемпературную - при температуре до $0,25 T_{пл}$ материала, при которой отсутствуют процессы возврата и рекристаллизации; среднетемпературную - при нагреве в пределах от $0,25$ до $0,5 T_{пл}$, при которой активны процессы возврата и возможна рекристаллизация; высокотемпературную - при нагреве до температуры более $0,5 T_{пл}$, при которой наиболее активны процессы диффузии (вакансионный диффузионный процесс). На практике температура нагрева зоны соединения составляет от $0,25$ до $0,5 T_{пл}$, поэтому преобладает среднетемпературная релаксация.

Рассмотренные особенности характерны для микросварки давлением однородных металлов. Процесс соединения разнородных металлов более сложен и дополнительно сопровождается возникновением и ростом новой фазы - интерметаллической - в зоне образования соединения.

При соединении двух разнородных металлов независимо от взаимной растворимости может произойти химическая реакция с образованием интерметаллического соединения непосредственно на границе раздела (поверхности контакта). Вначале на поверхности раздела проявляется хемосорбция, т.е. адсорбция, при которой начинают действовать силы химического взаимодействия. При этом образуется интерметаллическая прослойка, разделяющая свариваемые металлы. Ее рост происходит за счет диффузии хотя бы одного из металлов в микрослой поверхности раздела. Интерметаллический слой характеризуется несплошностью и пока еще не приводит к снижению физико-механических свойств материала соединения.

Большинство металлов образует друг с другом несколько интерметаллических соединений, из которых не все вызывают резкое ухуд-

нение свойств соединения. Например, при микросварке широко применяемой пары металлов - Au и Al - образуются интерметаллические фазы типа $AuAl_2$, $AuAl$, Au_2Al , Au_3Al_2 , Au_4Al , обладающие различной микротвердостью и электропроводностью. Снижение механических и электрических свойств соединения вызывает в основном фаза $AuAl_2$ ("пурпурная чума"). Для ликвидации вредного влияния интерметаллических прослоек необходим режим микросварки, ограничивающий диффузионное взаимодействие разнородных металлов на ранних стадиях, когда интерметаллические фазы только начинают возникать и не имеют сплошности.

Работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОНКИ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

Цель работы: 1. Ознакомление с устройством и эксплуатацией лазерной установки СУ-1.

2. Исследование процесса подгонки тонкопленочных резисторов с помощью лазерного излучения.

Задание

Ознакомиться с устройством и правилами работы на лазерной установке.

На основании результатов эксперимента и особенностей физических явлений и технологии лазерной подгонки определить закономерности изменения сопротивления тонкопленочного резистора и относительную ошибку подгонки.

Порядок выполнения работы

1. Повторить теоретические основы, характеризующие особенности физических явлений и технологии при лазерной подгонке сопротивления тонкопленочных резисторов (см. раздел данной лабораторной работы).

2. Внимательно ознакомиться с указаниями по технике безопасности при работе на лазерной установке СУ-1.

3. По описанию установки ознакомиться с ее устройством и назначением узлов и элементов (НЕ ВКЛЮЧАТЬ УСТАНОВКУ В СЕТЬ БЕЗ РАЗРЕШЕНИЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЯ!).

4. Получив разрешение преподавателя, включить установку и компрессор в сеть и подготовить узлы установки к работе, для чего:

а) проверить освещение предметного столика. Включить тумблер освещения предметного столика. Вращением ручки потенциометра проверить плавность регулировки яркости освещения. Выставить потенциометр в положение минимальной яркости и выключить тумблер;

б) проверить подсвет у ОКГ (наличие точки светуказателя). Включить тумблер "подсвет"; положив на столик манипулятора лист белой бумаги, подвести его под объектив генератора. Установить плавным вращением рукоятки вертикальс с перемещения наиболее яркое свечение точки светуказателя и ее минимальный диаметр. Выключить тумблер "подсвет".

Проведение лабораторной работы

1. Тумблером на лицевой панели компрессора включить компрессор и убедиться в подаче охлаждающего воздуха (по выходу воздуха из зазоров генератора).

2. Установить в приспособление микросхему и подвести контакты к выводам указанного преподавателем резистора.

3. С помощью специального моста измерить и записать в табл. I исходное сопротивление резистора R_n .

4. Намеченный для обработки участок поверхности резистора установить в рабочее положение по точке светуказателя генератора.

5. Повернуть ключ на блоке питания "БП" в положение "вкл" (загорается красная лампочка на лицевой панели "БП") и потенциометром на панели установить напряжение заряда батареи конденсаторов, равное 800 В.

6. Кратковременным нажатием кнопки "пуск" на панели "БП" произвести единичный импульс воздействия лазерного излучения.

КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩАЕТСЯ НАБЛЮДАТЬ ЗА ОБРАБОТКОЙ ПРИ ЗАПУСКЕ ГЕНЕРАТОРА!

7. Измерить полученное значение сопротивления R_1 и занести его в табл. I.

8. После охлаждения генератора (~ 5 минут), устанавливая для обработки очередным импульсом излучения при помощи перемещения рабочего столика и точки светуказателя новый участок поверхности резистивной пленки, провести еще 4 воздействия импульсами излучения. После каждого импульса измерять величину R_i и заносить ее в табл. I.

Таблица 1

Исходная величина	№ импульса	Величина $R_{1...i}$	Величина $\Delta\tau_i = R_i - R_{i-1}$	Величина R_i / R_n
$R_n =$	I			
	...			
	...			
	...			
	5			

9. По полученным значениям R_i и исходному значению R_n установить абсолютное изменение сопротивления $\Delta\tau_i$ и относительное изменение по сравнению с R_n в результате действия каждого единичного импульса. Построить графическую зависимость $\Delta\tau = f(N)$.

10. С помощью полученной зависимости провести расчет подгонки резистора при другом исходном сопротивлении R_n до значения, указанного преподавателем.

11. Определить относительную ошибку подгонки.

12. Изменяя напряжения заряда батареи конденсаторов по дискретным значениям, приведенным в табл. 2, т.е. изменяя энергию импульса рабочего излучения, определить для каждого значения напряжения изменение сопротивления резистора в результате действия только одного рабочего импульса (на каждое напряжение). При этом для каждого напряжения устанавливается новый резистор, причем сопротивления резисторов должны быть одинаковыми.

Определить зависимость $\Delta\tau = f(U)$ и построить график ее.

Таблица 2

Напряжение заряда U , В	Сопротивление резистора		Абсолютное изменение. $\Delta\tau = R_n - R_n$
	исходное R_n	полученное R_n	
850			
900			
950			

13. Составить отчет по работе, содержащий:
 результаты экспериментов, сведенные в табл. 1 и 2;
 графические зависимости изменения сопротивления по заданным условиям подгонки;
 теоретические обоснования полученных результатов;

рекомендации по уменьшению абсолютной относительной ошибок подгонки.

Литература

1. Лазеры в технологии. Под ред. М.Ф.Стельмаха. - М.: Энергия, 1975.
2. Гимпельсон В.Д., Радионов Ю.А. Тонкопленочные микросхемы для приборостроения и вычислительной техники. - М.: Машиностроение, 1976.

3. Особенности физических явлений и технологии лазерной подгонки тонкопленочных резисторов на диэлектрической подложке

При подгонке тонкопленочных резисторов, расположенных на диэлектрической подложке, большое влияние на процессы нагрева участка пленки оказывает подложка, в которую может отводиться основная часть выделяющегося в пленке тепла. Высокая теплопроводность материала подложки обуславливает более интенсивный отвод тепла от нагреваемой пленки. Если материал пленки полупрозрачен для лазерного излучения, а подложка - непрозрачен, то излучение непосредственно проникает в подложку. В результате подложка является как бы дополнительным источником тепла при нагреве пленки.

Известно, что поглощение лазерного излучения материалами пленки и подложки с превращением энергии излучения в тепловую происходит за время $10^{-11} + 10^{-12}$ с, значительно меньшее длительности импульса лазерного излучения (10^{-3} с - в режиме свободной генерации; 10^{-7} с - в режиме модулированной добротности, т.е. гигантскими импульсами). Эта особенность позволяет считать, что с начала действия импульса излучения в тонкой пленке и частично в подложке образуется объемный источник тепла. Поэтому нагрев пленки можно объяснить положениями краевой задачи теплопроводности при допущении определенных начальных и граничных условий.

Если считать, что тепловой контакт пленки и подложки идеален, а подложка прозрачна для лазерного излучения, что оптические и теплофизические параметры пленки и подложки не зависят от температуры, а мощность тепловыделения в пленке постоянна по сечению светового пятна и неизменна в течение всего импульса излучения, то решение такой задачи теплопроводности принимает вид:

$$\Delta T(t) \approx \frac{2J(1-\tau-D)\sqrt{\alpha \cdot t}}{k\sqrt{\pi}} \quad (4)$$

где J - плотность мощности излучения лазера,
 τ - коэффициент отражения пленки для данной длины волны излучения,
 D - коэффициент прозрачности пленки,
 α - температуропроводность материала подложки,
 k - коэффициент теплопроводности материала подложки.

Из этого выражения следует, что режим свободной генерации лазера вызывает нагрев пленки, определяемый в основном теплопроводностью подложки, в которую отводится все выделенное в пленке тепло. Оптические свойства пленки влияют только на общее количество поглощенной энергии лазерного излучения.

При гигантских импульсах излучения справедливо считать, что граница раздела пленки и подложки адиабатическая. В этом случае температура, до которой нагревается пленка на диэлектрической подложке, может быть определена из выражения

$$\Delta T(t) = \frac{J(1-\tau-D)t}{\rho \cdot c \cdot h} \quad (5)$$

где ρ - плотность материала пленки,
 c - теплоемкость материала пленки,
 h - толщина пленки.

В результате можно считать, что при малых длительностях импульса излучения нагрев пленки в основном определяется ее объемной теплоемкостью.

Таким образом, для различных режимов работы лазерной установки можно определить необходимую температуру нагрева пленки для ее разрушения при подгонке испарением. Обычно считают начальной критической температурой нагрева пленки при ее разрушении температуру плавления.

В процессе доводки сопротивления тонкопленочных резисторов до номинальных значений необходимо по возможности исключить разрушение подложки при полном испарении материала пленки с облученного участка.

Это условие выполнимо, если за время действия теплового источника на поверхности пленки зона термического влияния не будет превышать толщины пленки. Зону термического влияния приближенно определяют из выражения $\sqrt{\alpha t}$, где α - температу-

ропроводность материала пленки. Для режима работы лазерной установки при воздействии на пленку гигантскими импульсами малой длительности даже при достаточно большой величине Ω зона термического влияния будет составлять величину около 1 мкм, т.е. будет приближенно равна толщине пленки.

Стадия остывания материала пленки после окончания действия импульса излучения влияет на возможные превращения в пленке в результате остаточных тепловых процессов. Поэтому эффективное время воздействия излучения всегда больше длительности импульса. Уменьшение приблизительно в 10 раз температуры участка пленки после прекращения нагрева излучением принято считать моментом прекращения структурных изменений в материале пленки. Это положение учитывают, определяя режим лазерного излучения при подгонке тонкопленочных резисторов.

Изменение геометрических размеров участков резистивной пленки, подвергшихся воздействию лазерного излучения при подгонке испарением, может привести к уменьшению допустимой мощности рассеивания резистора. Причиной того явления может быть резкое увеличение выделяющейся тепловой энергии в зоне уменьшения сечения пленочного резистора, где происходит концентрация линий тока.

Рассмотренная особенность ставит перед технологом задачу выбора участка пленки, удаление которого наименее повлияет на снижение допустимой мощности рассеивания. Средняя часть пленки работает в более напряженном режиме по сравнению с участками, расположенными около контактных площадок. Однако удаление участка пленки даже вблизи от контактной площадки не исключает снижения мощности рассеивания. На практике оптимальным вариантом считают удаление пленки с узкого продольного участка или распределение удаленных участков по всей длине резистора. Недопустим вариант с удалением участка, располагаемого в поперечном сечении пленки, что вызывает локальный перегрев пленки.

При разработке топологии пассивной части микросхемы необходимо учитывать возможную подгонку пленочных резисторов. Поэтому надо предусмотреть возможное уменьшение поперечного сечения резистора до 30-25%, при котором разогрев участка пленки в зоне подгонки не превысит допустимый.

Изменение сопротивления резистора при действии одного импульса излучения зависит от энергии импульса и его длительности, фокусного расстояния объектива установки и точности совмещения

поверхности пленки с фокальной плоскостью объектива. Перечисленные факторы в основном определяют диаметр единичного участка пленки, удаляемого злучением. Плавного изменения сопротивления наиболее просто достигают последовательным дискретным изменением положения поверхности пленки относительно плоскости фокуса объектива. При этом исключают резкие локальные перегревы участков пленки и обеспечивают процесс подгонки с переходом от грубой к точной и прецизионной.

Зависимость относительного приращения сопротивления от геометрических параметров пленочного резистора при продольной доводке имеет вид

$$\Delta R = \frac{\Delta L}{L} \cdot \frac{\Delta W}{W - \Delta W} \quad (6)$$

где L - длина резистивной пленки, мм;

W - ширина резистивной пленки, мм;

$\Delta L, \Delta W$ - соответственно длина и ширина удаленной части пленки, мм.

Однако значения сопротивлений резисторов, полученные экспериментально, оказываются завышенными по сравнению с результатами расчета по приведенной зависимости. Это объясняется неравномерностью распределения плотности тока в области резкого изменения ширины резистивной пленки, что равноценно эффективному удлинению резистора на величину $l_{\text{эф}}$.

Технологический процесс доводки тонкопленочных резисторов до заданного номинала на полуавтоматической лазерной установке обычно включает следующие операции:

1. Выбор оптимального варианта доводки для каждой серии резисторов и определение необходимых параметров лазерного импульса. При доводке низкоомных резисторов нет необходимости в специальных мерах. Для высокоомных резисторов целесообразно применять либо ступенчатую доводку, либо плавную путем удаления резистивной пленки с заранее расширенных участков сопротивления. При доводке резисторов с погрешностью не более 1% рекомендуется применять комбинацию ступенчатой и плавной доводки.

2. Для каждой серии резисторов в соответствии с требованиями к точности доводки их до номинала выбирают диаметр пятна луча лазера и рабочий режим доводки по методике, приведенной выше.

3. Подложку с нанесенными на нее пленочными резисторами помещают в контактное устройство установки

4. Перемещением предметного столика устанавливают резистор в начальное положение и в соответствии с выбранным диаметром пятна задают определенную скорость перемещения предметного столика.

5. При запуске установки генератор с заданной частотой начинает обработку резистора, автоматически перемещающегося с предметным столиком. Контрольное устройство непрерывно следит за изменением доводимого сопротивления и выключает установку в момент совпадения сопротивления резистора с требуемым.

Требования высокой точности при подгонке вызывают необходимость безынерционной остановки предметного столика для обеспечения высокой скорости подгонки и прекращения обработки после достижения сопротивления резистора установленного номинала. Однако это трудно осуществимо. Поэтому оставляют предметный столик с подложкой неподвижным, а перемещают лазерный луч с помощью специальных сканирующих зеркал, движущихся по заданной программе в перпендикулярных направлениях. При неподвижном резисторе облегчается использование контактирующего устройства и получение более надежного контакта и стабильного переходного сопротивления.

С удалением за каждый импульс излучения некоторого количества токопроводящего слоя сопротивление резистора меняется на величину ΔR . Изменяя выходную энергию лазера, можно изменять количество удаляемого токопроводящего слоя, т.е. величину ΔR .

Общая величина изменения сопротивления резистора

$$\Delta R = R_n - R_{n_0} \quad (7)$$

где R_{n_0} - исходное значение резистора;

R_n - номинальное значение резистора.

Величина ΔR определяется:

$$\Delta R = \Delta r_1 + \Delta r_2 + \Delta r_3 + \dots \quad (8)$$

где $\Delta r_1, \Delta r_2, \Delta r_3 \dots$ - изменение значения сопротивления резистора за первый, второй, третий и т.д. импульс излучения.

Вследствие того, что площадь резистора уменьшается после каждого импульса, эффект изменения значения сопротивления резистора за каждый импульс будет различен, т.е.:

$$\Delta r_1 \neq \Delta r_2 \neq \Delta r_3.$$

Поэтому необходимо знать зависимость $\Delta r = f(N)$, где N -

номер очередного импульса для определенного типа резисторов (например, с равной площадью).

4. Техническое описание лазерной установки СУ-1

1. Назначение

Сварочная установка СУ-1 предназначена для монтажа различных элементов микроэлектронной техники на микроплатах, твердых схемах и т.п. Установка СУ-1 может быть использована также для подгонки сопротивления пленочных резисторов.

2. Технические данные:

1. Напряжение питания, В	220 \pm 10%
2. Максимальная мощность, потребляемая из сети, кВт	1,2
3. Энергия излучения (полная при снятом объективе), Дж	не менее 0,7
4. Длительность импульса, мс	5; 4; 2
5. Режим работы - импульсный с частотой 4 импульса в минуту	
6. Фокусные расстояния съемных объективов генератора, мм	50; 40; 20; 10

3. Конструкция и принцип работы

Установка СУ-1 представляет собой комплекс оптико-механических и электрических приборов. Установка (рис. 1) включает: стол с батареей конденсаторов 1; оптический генератор 4; подставку 5; блок питания 6; манипулятор 2; сменный объектив 3.

Для наблюдения за наведением светового луча установка комплектуется дополнительно стереоскопическим микроскопом МЕС-2 (на рис. 1 не показан).

Принципиальная схема установки, в упрощенном виде, представлена на рис. 2. Основным звеном установки является оптический квантовый генератор (ОКГ) 1, активным элементом которого является стержень 4 из синтетического рубина с добавкой атомов трехвалентного хрома в количестве 0,05%. На торцы стержня нанесено диэлектрическое покрытие так, что левый торец является непрозрачным зеркалом, а правый - полупрозрачным зеркалом. Активный элемент 4 помещен внутри отражающей свет камеры (рефлектора) 3, в который помещена также импульсная газоразрядная лампа 5 типа ИФП-800.

Подготовка импульсной лампы к работе, заряд батареи кон-

денсаторов 9) производится с помощью переключателя П (нижнее положение). В рабочий режим лампа приводится этим же переключателем (верхнее положение).

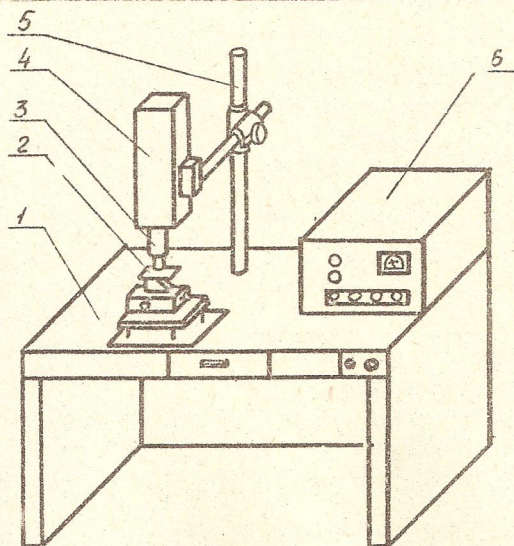


Рис. 1

При разрядке заряженной до высокого напряжения от блока питания 10 батареи конденсаторов 9 на импульсную лампу 5 вспышка последней возбуждает активный элемент 4. Атомы хрома, содержащиеся в корундовой (Al_2O_3) матрице и находящиеся в состоянии покоя на нижнем энергетическом уровне, под действием фотонов, испускаемых лампой, возбуждаются и переходят на энергетически более высокий уровень. Возбужденные атомы хрома, стремясь вернуться к равновесному состоянию, спонтанно переходят на энергетически более низкий уровень, излучая при этом фотоны. Большинство фотонов, излучаемых активированными импульсной лампой атомами хрома, рассеивается наружу через цилиндрическую поверхность активного элемента, вызывая люминесцентное свечение рубинового кристалла. Некоторая же часть фотонов, движущаяся параллельно оси стержня, вызывает цепную реакцию образования новых фотонов за счет столкновения с находящимися в стержне возбужденными атомами. Возникший поток фотонов многократно отражается от зеркал, напыленных на торцах активного элемента, лавинообразно нарастает при каждом отражении и в конечном счете в форме мощ-

ного монохроматического светового луча вырывается из правого полупрозрачного зеркала. Индуцированный световой луч фокусируется линзой 7 в узкий пучок, обеспечивая необходимую плотность энергии и требуемую температуру в точке на поверхности детали 8 (в нашем случае - резистивной пленки).

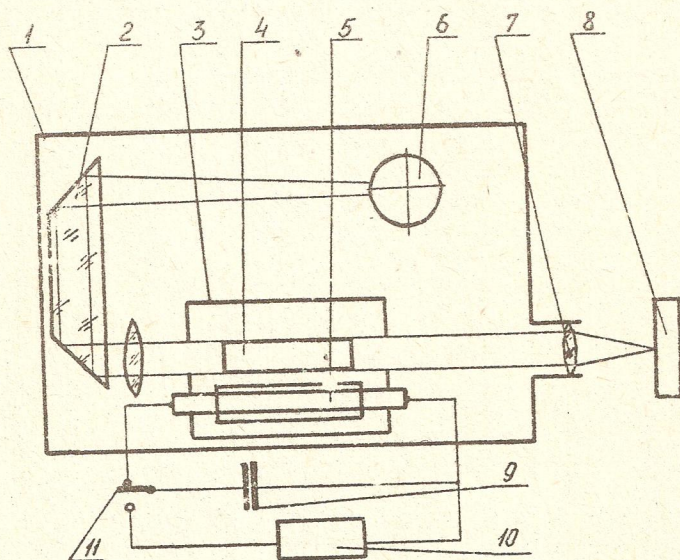


Рис. 2

Для наведения луча на точку, подлежащую воздействию рабочего импульса, используется оптическое устройство из осветителя 6 (рис. 2), призмы двойного преломления 2 и конденсорной линзы, смонтированных в корпусе 1 генератора. Луч света от осветителя проходит оптическое устройство, кристалл рубина, объектив и фокусируется на точку, подлежащую обработке. Таким образом, имитируется направление излучения от кристалла рубина при рабочем импульсе.

Для охлаждения кристалла рубина и импульсной лампы в отражательную камеру 3 подается сжатый воздух. Попадая в полость отражательной камеры, воздух расширяется и понижает температуру внутри камеры. Из камеры воздух уходит внутрь корпуса генератора и затем в атмосферу.

Комплект установки имеет четыре сменных объектива с фокус-

ным расстоянием 50, 40, 20 и 10 мм. В зависимости от применяемого объектива можно сфокусировать параллельный пучок света, излучаемый генератором, в пятно диаметром от 0,25 до 0,05 мм.

Блок питания 6 (рис. 1) обеспечивает установку напряжениями, необходимыми для ее работы.

На передней панели блока питания (БП) размещены:

- киловольтметр для контроля напряжения заряда батареи конденсаторов;
- ключ "Питание" для включения и выключения БП;
- лампочка "БП вкл", красного цвета, сигнализирующая о включении БП в начале зарядки батареи конденсаторов;
- лампочка "Готов" зеленого цвета, сигнализирующая о зарядке блока конденсаторов до установленного напряжения;
- переменное сопротивление "Рег.напр. заряда" для установки напряжения в пределах от 700 до 1000 В;
- клемма для заземления БП;
- кнопка "Пуск" для запуска ОКГ при обработке рабочим импульсом.

Задняя панель БП имеет:

- штепсельный разъем для подачи сетевого напряжения 220 В;
- предохранитель "5А".

Клеммная колодка, смонтированная внутри БП, соединяет БП с блоком конденсаторов и другими узлами установки. БП крепится к столу установки I (рис. 1) винтами.

Стол I (рис. 1) с конденсаторами предназначен для размещения всех узлов установки. Внутри стола смонтирована плата с батареей конденсаторов, в которых запасается энергия, необходимая для разряда импульсной лампы; плата с набором из катушек индуктивности, служащих для увеличения времени разряда импульсной лампы; переключатель длительности импульсов, ручка которого выведена на левую боковую сторону стола.

На лицевой стороне стола справа установлен тумблер "Подсвет" для включения системы подсветки, служащей для наведения луча на участок, подлежащий обработке.

Правее тумблера "Подсвет" расположена кнопка "Пуск", служащая для запуска ОКГ (режим рабочего импульса).

Ниже в нише стола смонтирован тумблер, включающий лампу освещения перед столом, и левее его регулятор яркости этого освещения.

На задней стенке стола расположен штуцер подвода свежего воздуха для охлаждения генератора и клемма "Земля".

Манипулятор (рис. 3) смонтирован на основании I и состоит из предметного столика 7, на котором устанавливается приспособление с подгоняемым резистором; верхней каретки 10 для продольного перемещения столика и нижней каретки 4 для поперечного перемещения столика. На верхней каретке 10 закреплен кронштейн 5, в пазах которого вертикально перемещается столик 7. Вертикальное перемещение обеспечивается зубчатым колесом и рейкой при вращении рукоятки 6. Перемещение верхней и нижней кареток в горизонтальной плоскости осуществляется с помощью микрометрических винтов 8, 2. Величина перемещения определяется по шкалам грубого отсчета и нониусам точного отсчета 9, 3 на микрометрических винтах.

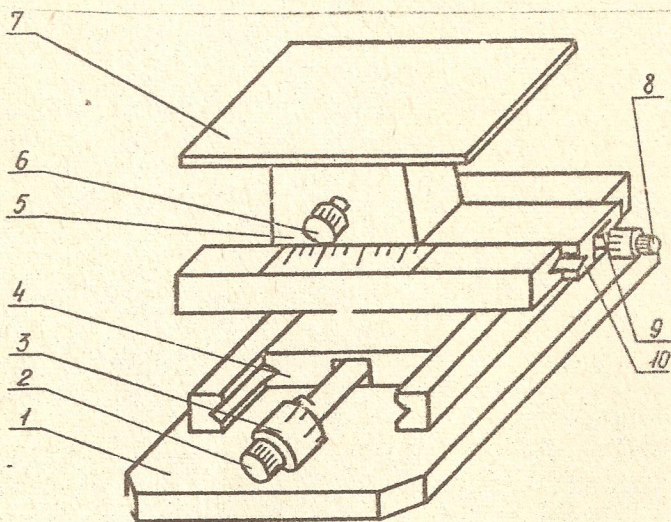


Рис. 3

Общая принципиальная электрическая схема (рис. 4) состоит из элементов блока питания генератора и стола с входящими в него конденсаторами и индуктивностями. Схема работает следующим образом. При включении В1 ("питание" на ВП) сетевое напряжение подается к высоковольтному трансформатору Т1 (загорается красная лампочка Л1 - "ВП вкл."), со вторичной обмотки которого снимается высокое напряжение (1280 В). После выпрямления через ограничительное сопротивление R12 напряжение подается на конденсаторную батарею (С4 - С3), заряжая ее.

Напряжение заряда батареи определяется положением движка потенциометра R10 (БП-"рег.напр.заряда"). В процессе заряда увеличивается напряжение между движком потенциометра R10 и "минусом" батареи конденсаторов. Как только напряжение достигает величины, достаточной для пробоя стабилитрона V6, работает реле P5, контакты которого замыкают цепь питания обмотки реле P1, которое отключает высоковольтный трансформатор T1 от сети. Заряд батареи прекращается. Одновременно реле P3 замыкает цепь зеленой лампочки ("Готов" - БП), которая, загораясь, сигнализирует о готовности батареи конденсаторов для выполнения обработки.

Напряжение заряда измеряется киловольтметром (БП), включенным постоянно.

Через некоторое время из-за разряда батареи через R10 и R8, а также утечки конденсаторов, напряжение между "+" и "-" цепи заряда, уменьшаясь, достигает такой величины, при которой прекращается пробой стабилитрона V6 и реле P5 отключается. Реле P1 и P3 возвращается в исходное состояние, на T1 вновь подается сетевое напряжение и начинается подзаряд батареи конденсаторов до установленного движком потенциометра R10 напряжения. Одновременно с отпусанием реле P3 зеленая лампочка на БП отключается, сигнализируя о неготовности батареи к работе.

Весь процесс повторяется периодически. Напряжение батареи конденсаторов поддерживается в пределах $\pm 5\%$ от установленного потенциометром R10.

При выключении установки или исчезновении напряжения в сети обесточивается реле P2. Нормально замкнутые контакты P2 включают батарею на разряд через R7.

Схема поджига работает следующим образом.

При кратковременном нажатии кнопки "Пуск" (на "БП" или столе) срабатывает электромагнит затвора (ЭМ). Объектив микроскопа закрывается шторкой. При полном закрытии шторки выключает концевой выключатель (БВ) затвора, который замыкает цепь питания реле P4. Срабатывая, контакты реле P4 замыкают цепь первичной обмотки трансформатора поджига, на которую разряжается конденсатор C1. На вторичной обмотке трансформатора возникает высоковольтный поджигающий импульс, подаваемый на корпус импульсной лампы и ионизирующий газ внутри лампы. Внутреннее сопротивление лампы резко уменьшается и происходит

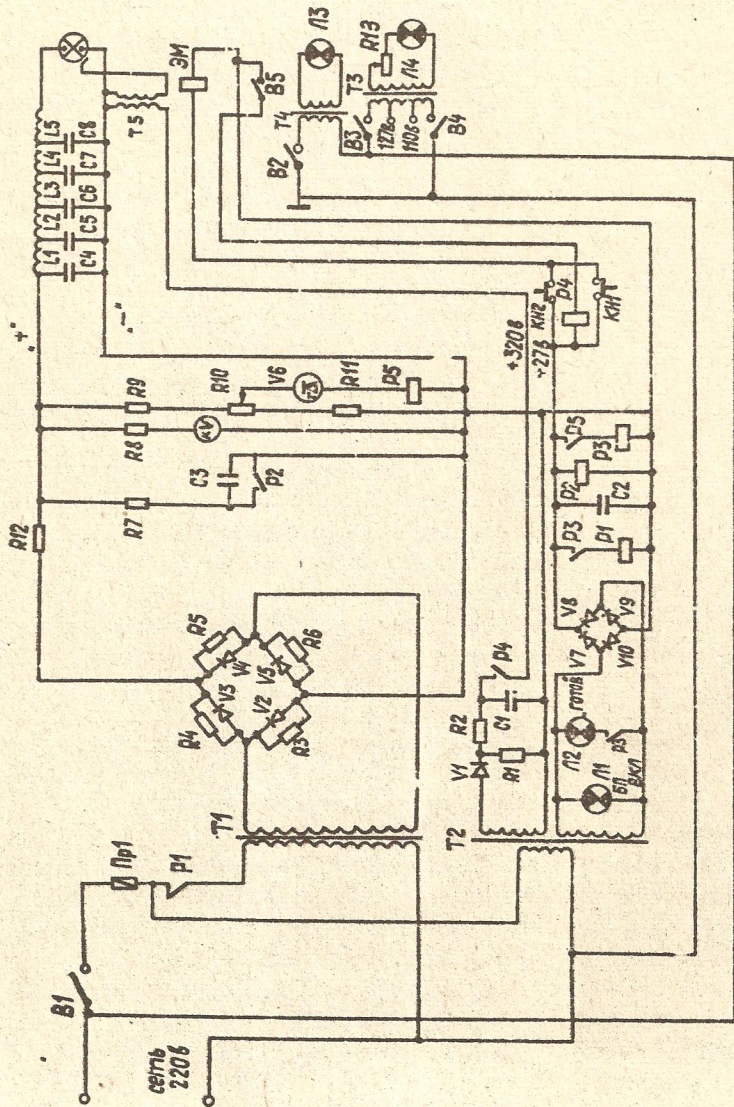


Рис. 4

разряд батареи конденсаторов на импульсную лампу. Разряд батареи приводит к отпусканию реле Р5 и повторяется цикл, аналогичный изложенному для процесса подзаряда конденсаторов.

После возвращения кнопки "Пуск" в исходное состояние отпущается электромагнит затвора (ЭМ), шток открывается, замыкая контактную выключатель и отключая реле Р4. Цепь поджигается вновь готова к работе.

Индуктивности $L_1 - L_5$ увеличивают время разряда конденсаторов и, следовательно, время горения импульсной лампы.

Включение лампы освещения предметного столика и световозвращателя предполагаемого места обработки производится независимо друг от друга и от положения выключателя.

Работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА МИКРОСВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ С КОСВЕННЫМ ИМПУЛЬСНЫМ НАГРЕВОМ ЗОНЫ СВАРКИ

Цель работы: 1. Ознакомиться с физикой явлений при образовании микросварного соединения без плавления материалов.

2. Ознакомиться с оборудованием для выполнения микросварки давлением с косвенным импульсным нагревом.

3. Исследовать влияние различных факторов на технологические характеристики получаемого микросварного соединения.

Задание

1. Ознакомиться с особенностями физических явлений процесса микросварки, устройством и принципом действия установки для микросварки давлением с косвенным импульсным нагревом модели "Контакт-ЗА".

2. Исследовать влияние давления, температуры нагрева, длительности их воздействия на свариваемые материалы и влияние исходных свойств этих материалов на механическую прочность и электропроводность сварного микросоединения.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с содержанием лабораторной работы. Получить у преподавателя вариант задания. Ознакомиться с особенностями физических явлений по теоретической части данных методических указаний, с устройством и принципом действия установки, используя описание установки и руководство по ее эксплуатации. Обратит внимание на правила по технике безопасности при работе на

установке.

2. Пройти собеседование с преподавателем, подтверждающее достаточные знания, для выполнения лабораторной работы.

3. Проверить положение всех управляющих коммутирующих элементов установки. При необходимости привести их в исходное положение согласно описанию.

4. Получив разрешение преподавателя, включить установку в сеть и подготовить ее к работе по заданному варианту.

Выполнив 3-4 микросварных соединения на установке "Контакт-3А" по режимам, заданным преподавателем, измерить прочность полученных соединений на специальном приспособлении. Используя результаты по полученной прочности соединений в экспериментах у всех студентов подгруппы и специальное приложение к работе, заполнить таблицы I-IV^{*}). Определить коэффициенты регрессии и свободный член уравнения (I), коэффициент множественной корреляции и стандартную оценку ошибки. По уравнению регрессии, коэффициентам \bar{R} и \bar{S} произвести анализ технологического процесса микросварки.

Отчет по лабораторной работе

Отчет должен содержать:

- 1) сведения о физике явлений при выполнении микросварного соединения, эскизы основных этапов процесса микросварки;
- 2) описание конструкции и принцип работы установки "Контакт-3А";
- 3) исходные данные, таблицу с результатами измерений прочности полученных микросварных соединений и данными по режимам сварки;
- 4) таблицы расчетов параметров уравнения регрессии, коэффициента корреляции и стандартной ошибки;
- 5) уравнение регрессии с бета-коэффициентами и анализ полученных результатов.

5. Особенности физических явлений при микросварке давлением с косвенным импульсным нагревом (СКИИ)

Удовлетворительная прочность сварного соединения достигается при определенных значениях основных технологических параметров для данной пары материалов, толщины пленки и диаметра проволочного вывода. К основным параметрам режима при микросварке

* На кафедре студентам выдается приложение к работе.

способом СКИН относят: усилие сжатия, длительность выдержки и амплитуду напряжения, подаваемого на инструмент. Изменение прочности соединения (выходная переменная) зависит от изменения значений трех входных переменных (параметров режима). Строгую функциональную зависимость между ними установить трудно, так как все взаимосвязанные величины или некоторые из них подвержены еще воздействию случайных факторов, причем среди них могут быть и общие для нескольких величин.

Сварка давлением с косвенным импульсным нагревом (СКИН) является разновидностью способа сварки давлением с подогревом.

В этом способе в отличие от термокомпрессии инструмент (пуансон) импульсно нагревается проходящим по нему током. Вследствие кратковременности процесса нагрева металлический проводник в месте контакта может нагреваться до более высоких температур, чем при термокомпрессии. Это позволяет приваривать проводники из относительно малопластичных металлов к тонким пленкам на керамических подложках.

Сварка косвенным импульсным нагревом V-образным инструментом была предложена в СССР в 1964 г. Схема сварки этим способом представлена на рис. 5.

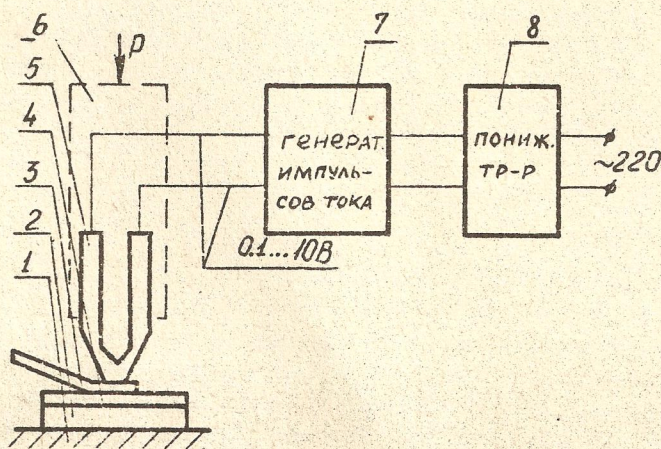


Рис. 5

Процесс сварки V-образным инструментом заключается в следующем. Сначала под необходимым давлением приводятся в соприкосновение инструмент 6, металлический проводник и одна из контактных площадок (3, 4, 2) подложки микросхемы или полупровод-

никового кристалла. Затем через инструмент пропускается импульс тока определенной длительности (от 0,01 до нескольких секунд). Торцовая рабочая часть инструмента нагревается до определенной температуры и за счет теплопередачи осуществляется локальный нагрев проводника. Когда участок проводника нагреется до температуры, при которой сопротивление деформации уменьшится, то под воздействием приложенного усилия сжатия происходит обдвиг проводника и образуется соединение.

Методом СКИ можно сваривать золотые, а также медные и медные проводники диаметром 20-100 мкм с равнообразными металлическими пленочными контактными площадками, напыленными на диэлектрические или полупроводниковые подложки. При правильно подобранном режиме можно обеспечить высокое качество соединений и достаточно хорошую стабильность. Для снижения напряжений в зоне соединения при сварке материалов, чувствительных к термическому удару, сварку V-образным инструментом целесообразно выполнять при общем сопутствующем подогреве свариваемых деталей.

Между технологическими параметрами процесса (усилие сжатия P_t , температура инструмента T_t , которая зависит от силы тока, протекающего по инструменту I_t , и длительности импульса тока t_u), физико-механическими характеристиками процесса образования соединения (температура в зоне контакта T_k , площадь сварной точки (контакта) S_k , давление $P_{св}$, длительность процесса сварки $t_{св}$, конечная деформация ξ , скорость относительной деформации $\dot{\xi}$), характеристиками соединяемых материалов (предел текучести материалов, состояние поверхности и др. $M_{ф.х}$) и физико-механическими свойствами образующегося соединения существует достаточно сложная взаимосвязь (рис. 6).

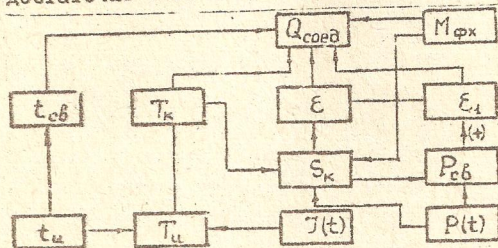


Рис. 6

Исследования кинетики осадки и роста прочности со временем показали, что при СКИ интенсивный рост прочности соединений начи-

нается при деформации проводника, составляющей около 40%. Наиболее быстрый рост прочности наблюдается в том случае, когда в процессе образования соединения интенсифицируется пластическая деформация. При этом необходимо, чтобы конечная деформация, кото-

рая определяет конструктивную прочность соединения, не превышающую определенную величину. Для осуществления сварки с динамическим нагружением можно использовать электромагнитный механизм сжатия.

Одним из основных параметров при СКИН, определяющих воспроизводимость качества сварных соединений, является температура нагрева инструмента, а следовательно, зоны сварного контакта. При сварке импульсно нагреваемым инструментом прецизионное регулирование температуры нагрева инструмента и поддержание постоянной температуры в зоне соединения при равных условиях теплоотдачи возможны только при применении обратной связи по температуре нагрева инструмента или зоны соединения. Это хорошо иллюстрируется характером термических циклов при изменяющейся длительности паузы между импульсами (t_n, t'_n) и импульсном нагреве без автоподстройки (рис. 7 - штриховая линия) и с автоподстройкой по температуре инструмента, измеряемой термопарой (рис. 7 - сплошная линия).

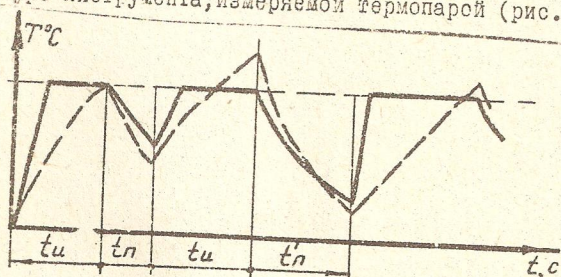


Рис. 7

Высокая точность поддержания температуры нагрева ($\pm 2\%$) и малая инерционность обеспечиваются при нагреве инструмента током с частотой следования импульсов 0,5–1,5 кГц. Устройство автоподстройки позволяет получить высокую точность стабилизации температуры при постоянном импульсном нагреве. Характер деформирования привариваемого проводника в значительной степени определяется геометрией торца рабочего инструмента. Инструмент V-образного типа может изготавливаться из обычных сплавов, жаропрочных сталей или из твердых сплавов. Размеры инструмента должны выбираться такими, чтобы до необходимой температуры нагревалась только рабочая часть контактирующая со свариваемыми элементами. Области оптимальных режимов СКИН для широко применяемых свариваемых материалов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сочетание материалов		Параметры процесса			Оптимальная деформация ϵ , %
проводник	пленка на ситале	T_k , °C	P , кгс/мм ²	t_n , с	
Au, диаметр 24-80 мкм	Au, Al, Cu, Ni	300-500	8-14	0,1-0,5	50-60
Al, диаметр 30-100 мкм	Au, Al	350-550	3-8	0,1-0,5	60-70
Cu, диаметр 30-80 мкм	Au, Cu, Ni	400-650	15-20	0,1-1,0	55-65

Этот способ сварки применяется при монтаже гибридных микросхем для выполнения соединений тонкими проводниками и монтажа навесных элементов, имеющих гибкие выводы.

6. Техническое описание установки "Контакт-3А"

I. Назначение

Установка "Контакт-3А" предназначена для импульсной сварки выводов навесных элементов к контактному площадке гибридных пленочных микросхем и для сварки соединительных микропроводников с внешними выводами корпусов и контактными площадками гибридных пленочных и полупроводниковых микросхем.

2. Технические данные:

- | | |
|--|---------------|
| 1. Количество присоединений в час, шт. | не менее 120 |
| 2. Перемещение рабочих столов микроманипулятора в горизонтальной плоскости, мм | 20x20 |
| 3. Перемещение рабочих столов микроманипулятора в вертикальной плоскости, мм | 10 |
| 4. Передаточное отношение перемещения столов микроманипулятора на грубой ступени | 1 : 20 |
| 5. Передаточное отношение перемещения столов микроманипулятора на точной ступени | 1 : 500 |
| 6. Точность установки координат в горизонтальной плоскости, мм | |
| а) на грубой ступени | не ниже 0,01 |
| б) на точной ступени | не ниже 0,002 |
| 7. Точность установки координат в вертикальной плоскости, мм | не ниже 0,01 |

8. Точность выдержки времени сварочного импульса	0,02 с за 1 с
9. Выдержка времени сварочного импульса, с	0,04 + 3,96
10. Давление инструмента на свариваемые элементы, ч	20 + 150(+10%)
11. Диаметр проволочного вывода (золото, алюминий, медь), мм	20 + 100
12. Потребляемая мощность, Вт	350

3. Конструкция и принцип работы

В установку (рис. 8) входят следующие основные механизмы и детали: монтажный стол I; микроманипулятор с двумя столами — левым 7 и правым 10; механизм нагружения инструмента 6; держатель инструмента 8; механизм подачи проволоки II; стойка 17; микроскоп 9; пульт управления 14; плита 2; пневмопанель 5.

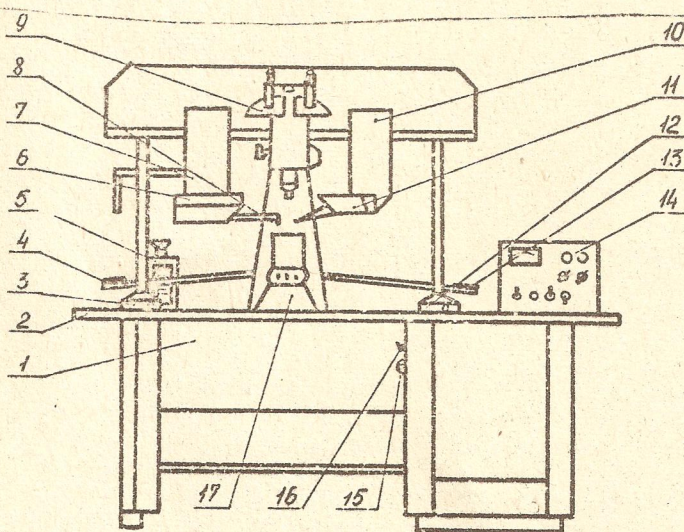


Рис. 8

Монтажный стол I является основанием всей установки и служит для крепления на нем плиты 2 со всеми узлами и механизмами.

Для образования сварного соединения на установке "Контакт-5А" место сварки предварительно совмещается с проволочным выводом и инструментом с одновременным нагружением инструмента определенным давлением, после чего место сварки нагревается за

счет прохождения через инструмент импульса светочного тока.

Объект сварки (например, микросхема) устанавливается и закрепляется на верхней торцевой поверхности стойки 17.

Совмещение с местом сварки проволоки и инструмента осуществляется с помощью двоянного 3-координатного манипулятора рычажного типа.

Перемещение левого рабочего стола 7 с закрепленным в нем держателем инструмента 8 по двум координатам в горизонтальной плоскости производится путем перемещения по поверхности плиты - рукоятки 3; масштаб перемещения при этом равен 1:500. Для "грубого" перемещения держателя инструмента с масштабом 1:20 при перемещении рукоятки 3 по плите 2 следует удерживать в утопленном состоянии кнопку, расположенную на цилиндрической поверхности рукоятки 3.

Перемещение правого рабочего стола 10, содержащего механизм подачи проволоки, по двум координатам в горизонтальной плоскости осуществляется аналогичным образом с помощью рукоятки 12.

Вертикальное перемещение левого рабочего стола 7 осуществляется правой рукояткой 13, а правого рабочего стола 10 левой рукояткой 4. Исходное положение рукояток 4, 13 и соответственно рабочих столов 7 и 10 - верхнее.

Для обеспечения возможности остановок рабочего стола в некотором выбранном положении в конструкции механизма вертикального перемещения предусмотрено тормозное устройство.

Для повышения эффективности совмещения инструмента и проволоки с местом сварки используется микроскоп 9 (типа МБС-2) с осветителем рабочей зоны. Микроскоп прикреплен к левому рабочему столу на специальном кронштейне.

Стойка 17, на верхней торцевой поверхности которой устанавливается микросхема, представляет собой поворотную колонку и может быть повернута относительно плиты 2 на угол от 0 до 355°.

Механизм нагружения инструмента 6 обеспечивает возможность регулирования нагрузки на инструмент в пределах от 20 до 150 г. Регулирование нагрузки на инструмент производится путем перемещения груза вдоль планки-рычага с нанесенными на ней делениями. С достижением заданной нагрузки на инструмент при опускании рукоятки 13 сигнализирует уменьшение яркости лампы подсветки микроскопа.

При нажатии на кнопку, расположенную на верхней плоскости

рукоятки 13, включается реле времени сварки. Одновременно к инструменту подводится постоянное напряжение, вызывающее сварочный ток через инструмент и нагрев последнего. По истечении времени сварки реле времени включает лампу подсветки на полную яркость.

Продолжительность импульса сварочного тока регулируется ступенчато от 0,04 до 3,96 с путем вращения двух переключателей, расположенных на лицевой панели пульта управления 14. Напряжение сварочного тока устанавливается в пределах от 0 до 220 В с помощью автотрансформатора 15, расположенного в средней части монтажного стола 1, и контролируется с помощью вольтметра, расположенного на лицевой панели пульта управления 14. Следует отметить, что включение реле времени сварки возможно только при включенном тумблере "Сварка", расположенном на лицевой панели пульта управления 14. Кроме перечисленных приборов и переключателей лицевая панель пульта управления содержит: тумблер подачи защитного газа в зону сварки, тумблер включения осветительной лампы микроскопа и ручку регулировки яркости лампы, а также лампу индикации, которая загорается при выключении тумблера "Сеть" 16, расположенного в средней части монтажного стола 1.

Механизм подачи проволоки 11 представляет собой корпус, в который устанавливается катушка с проволокой. Конец проволоки, наматываемой на катушке, пропускается между двумя приводными роликами, а затем через отверстие в наконечнике, представляющем собой стеклянную трубку с обуженным концом. Конец проволоки должен выступать из наконечника на 3-7 мм. Управление механизмом подачи проволоки производится с помощью двух кнопок, расположенных на верхней плоскости рукоятки 4. При нажатии левой кнопки проволока выпускается из наконечника на необходимую длину. При нажатии правой кнопки происходит втягивание проволоки обратно.

Кроме вышеперечисленных механизмов и устройств, установка "Г-такт-3А" снабжена устройством для подачи защитного газа в зону сварки и ротаметром (пневмопанель 5) для контроля расхода газа, а также ножницами, предназначенными для отрезки проволочного вывода.

Инструмент, применяемый в установке, представляет собой расщепленный (сдвоенный) стержень с изолирующей пластиной. К инструменту подведены гибкие токопроводящие шины. Установка может комплектоваться также V-образным инструментом для сварки давлением с импульсным косвенным нагревом места сварки.