

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

Факультет компьютерного проектирования

Кафедра электронной техники и технологии

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ  
ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

В двух частях  
Часть 1

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

*Рекомендовано УМО по образованию в области  
информатики и радиоэлектроники в качестве пособия для специальности  
1-36 04 01 «Программно-управляемые электронно-оптические системы»*

Минск БГУИР 2020

УДК 621.3.049.77:621.9.048.7(076.5)

ББК 32.844.1я73

Ф50

**А в т о р ы:**

С. В. Бордусов, М. С. Лушакова, С. И. Мадвейко,  
А. А. Костюкевич, Е. В. Телеш

**Р е ц е н з е н т ы:**

кафедра порошковой металлургии, сварки и технологии материалов  
Белорусского национального технического университета  
(протокол №5 от 03.12.2019);

профессор кафедры технологий и организации технического сервиса  
учреждения образования «Белорусский государственный аграрный  
технический университет» доктор физико-математических наук,  
профессор Н. К. Толочко

**Физико-технические** основы разработки технологических модулей  
Ф50 электронно-оптических систем. Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 1 :  
Физико-технические основы процессов электрофизической обработки  
материалов : пособие / С. В. Бордусов [и др.]. – Минск : БГУИР, 2020. –  
63 с. : ил.

ISBN 978-985-543-571-7 (ч. 1).

Содержит лабораторные работы по изучению процессов, оборудования и технологической оснастки ионно-лучевого лужения металлов, удаления фоторезиста в плазме микроволнового разряда, термической обработки ИК-излучением и электроэрозионной обработки материалов электронной техники.

Предназначено для закрепления и углубления теоретических знаний, приобретения практических навыков работы с технологическим оборудованием, специализированной оснасткой и измерительными приборами для производства изделий микроэлектроники.

**УДК 621.3.049.77:621.9.048.7(076.5)**  
**ББК 32.844.1я73**

**ISBN 978-985-543-571-7 (ч. 1)**  
**ISBN 978-985-543-570-0**

© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2020

## СОДЕРЖАНИЕ

### **Лабораторная работа №1**

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ЛУЖЕНИЯ МЕТАЛЛОВ.....4

### **Лабораторная работа №2**

УДАЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА В ПЛАЗМЕ МИКРОВОЛНОВОГО  
РАЗРЯДА.....14

### **Лабораторная работа №3**

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ  
ИНФРАКРАСНЫМ (ИК) ИЗЛУЧЕНИЕМ.....25

### **Лабораторная работа №4**

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА.....48

Библиотека БГУИР

## Лабораторная работа №1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВОГО ЛУЖЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

**Цель работы:** изучить физические процессы, происходящие при взаимодействии ионов с твердыми и жидкими телами; познакомиться с методом ионно-лучевого лужения металлов в вакууме; определить основные характеристики залуженных поверхностей.

#### 1.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Лужение поверхностей металлических деталей необходимо для их последующего соединения между собой, а также для создания защитного слоя, предотвращающего коррозию металла. Лужение осуществляют с помощью специальных сплавов – припоев, которые должны иметь более низкую температуру плавления, чем залуживаемые металлы.

Для образования залуженного слоя на поверхности металла необходимо выполнение комплекса физико-химических и технологических условий:

- удаление оксидов и загрязнений с поверхностей припоя и детали;
- активация поверхностей металла и припоя, нагрев детали и припоя до температуры плавления последнего;
- взаимодействие на границе раздела металл – припой;
- растекание припоя по поверхности детали;
- кристаллизация жидкого припоя.

Органические загрязнения (остатки смазки, масло, жировые пятна) удаляются промывкой деталей в органических растворителях. Активация поверхностей детали и припоя может выполняться как контактными, так и бесконтактными методами нагрева и заключается в сообщении поверхностным атомам металла и жидкого припоя дополнительной энергии. При лужении нагрев металла и расплавление припоя необходимо проводить в условиях, способствующих удалению с поверхности металла оксидной пленки и защите от дальнейшего окисления под действием кислорода воздуха. С этой целью при лужении применяют флюсы, газовые инертные среды, физико-механические способы разрушения оксидной пленки.

Флюсы наносят на залуживаемые детали и припой в порошкообразном, пастообразном или жидком состоянии. Расплавленный флюс растворяет оксидную пленку, что способствует качественному лужению. Однако после процесса лужения необходимо удалять остатки флюса, что не всегда удается. Оставшийся флюс, представляющий собой обычно различные химические соединения, обладает высокой коррозионной активностью, что понижает

надежность изделий. Кроме того, наличие в припое остатков флюса и пузырей воздуха приводит к локальному перегреву силовых электронных компонентов и выходу их из строя. Ультразвуковые [1] и вакуумные [2] способы позволяют исключить применение флюса, однако имеют ряд существенных недостатков: большие температуры и время лужения или пайки, что увеличивает глубину диффузионной зоны; очистка поверхностей припоя и детали не совмещается с операцией лужения или пайки, что приводит к адсорбции загрязнений органического и неорганического происхождения и, как результат, к ухудшению механических, электрических и тепловых характеристик паяных соединений. Поэтому наблюдается тенденция к постепенной замене флюсового способа лужения бесфлюсовым.

Бесфлюсовое лужение проводят в среде инертного газа, в восстанавливающей оксиды атмосфере (в водороде), в вакууме. Оксиды удаляются с помощью абразива, ультразвуковых колебаний, а также путем комбинации этих двух способов (абразивно-кавитационным лужением).

Одним из распространенных способов бесфлюсового лужения является лужение деталей в вакууме или среде инертного газа. При этом на поверхности залуживаемой детали при нагреве не образовывается оксидная пленка, что способствует качественному взаимодействию припоя с поверхностью детали. Но этот способ нельзя применять для лужения металлов, которые склонны к окислению уже при комнатной температуре (алюминия, титана, тантала, ниобия, вольфрама и др.).

Применение водорода в качестве технологической среды при лужении способствует восстановлению естественных оксидов. Недостатками такого способа являются взрывоопасность водорода в смеси с воздухом и большое время лужения.

В 80-е годы XX века для технологических целей пайки начали использовать электронные [3] и ионные потоки. Использование концентрированных потоков энергии в технологии пайки полупроводниковых приборов позволяет обеспечить локальное воздействие на зону нагрева, активировать припой и паяемый материал и интенсифицировать процесс физико-химического взаимодействия при пайке. Для процессов лужения и пайки изделий перспективным направлением является использование низкоэнергетичных ионных потоков. Используя достаточно невысокий вакуум ( $10^{-2}$  Па) и варьируя энергию и плотность потока ионов, можно совмещать процессы подготовки к лужению и пайке с самим процессом пайки и лужения. При этом процессы протекают в контролируемой атмосфере, что позволяет увеличить их чистоту и воспроизводимость и повысить выход годных приборов.

На кафедре ЭТТ разработан новый метод бесфлюсового лужения в вакууме – ионно-лучевое лужение, в котором очистка поверхностей метал-

лической детали и припоя осуществляется путем бомбардировки ускоренными ионами инертных газов [4]. Одним из основных процессов, протекающих при бомбардировке твердых тел ионами, является ионное распыление, т. е. удаление поверхностных атомов твердого тела. Следовательно, это будет способствовать эффективному удалению оксидной пленки и загрязнений. Важной особенностью взаимодействия ионов с твердым телом является то, что более 90 % энергии иона переходит в тепловые колебания атомов твердого тела, т. е. расходуется на разогрев обрабатываемого материала.

Целесообразность использования ионных потоков для технологических процессов определяется тем, что хотя при равном ускоряющем напряжении и равных токах электронный и ионный потоки переносят одинаковую энергию, однако импульс, переносимый каждым ионом, значительно выше импульса, переносимого каждым электроном:

$$\frac{P_i}{P_e} = \frac{M_i}{M_e} \cdot n, \quad (1.1)$$

где  $P_i$  – импульс иона;

$P_e$  – импульс электрона;

$M_i$  – масса иона;

$M_e$  – масса электрона;

$n$  – кратность ионизации.

Так как масса самого легкого иона водорода в 1840 раз больше, чем масса электрона, значит, импульс, переносимый ионами, на два-три порядка превышает импульс, переносимый электронами. При использовании потока многозарядных ионов ( $n > 1$ ) это преимущество ионного потока еще больше увеличивается.

Рассмотрим явления, происходящие при бомбардировке ионами тел в твердой и жидкой фазах.

Одним из основных процессов, протекающих при ионной бомбардировке, является процесс ионного распыления, т. е. выбивание атомов с поверхности твердого тела. Бомбардирующий ион внедряется в материал и на пути своего движения испытывает столкновения с ядрами атомов. Результатом упругих столкновений являются рассеяние бомбардирующих ионов, в том числе их обратное рассеяние из материала; усиление колебаний атомов вокруг своих равновесных положений, что эквивалентно разогреву материала; смещение атомов. В случае когда энергия и импульс бомбардирующего иона в результате упругих столкновений передаются обратно на поверхность, происходит распыление материала.

Процесс распыления часто сопровождается инициированием радиационно-стимулированных реакций. Бомбардировка ионами инертных газов может

вызвать диссоциацию сложных по составу соединений, изменение химического состава поверхностного слоя, стимулированную диффузию, восстановление материала на поверхности из окисленного состояния. Ионная бомбардировка также активирует атомы поверхностного слоя, что способствует протеканию химических реакций между компонентами припоя и обрабатываемых материалов.

Процесс взаимодействия иона с жидким металлом (припоем) характеризуется физическим явлением, известным под названием «ионный ветер». Оно заключается в передаче импульса (количества движения) иона расплавленному припою. Под действием этого импульса может происходить перемещение припоя по поверхности металла.

Схема ионно-лучевого лужения представлена на рис. 1.1.

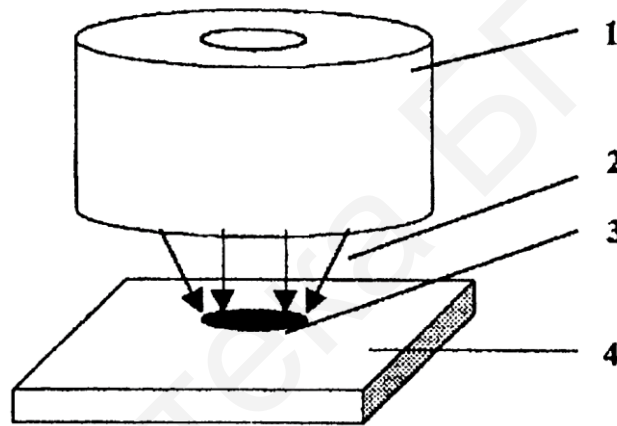


Рис. 1.1. Схема ионно-лучевого лужения:

1 – ионный источник, 2 – пучок ионов, 3 – припой, 4 – деталь

Для лужения используется пучок ионов аргона 2 в виде полного конуса, который под углом в  $60^\circ$  падает на залуживаемую деталь 4. Вследствие того, что из-за конструкции ионного источника 1 траектория ионов имеет некоторое отклонение от продольной оси, возникают условия, приводящие к раскручиванию капли жидкого припоя 3 с центром вращения в точке О (рис. 1.2). Под действием центробежной силы припой будет растекаться по поверхности детали, что увеличит площадь залуживания.

Взаимодействие между расплавленным припоем и основным металлом заключается в образовании металлической связи и взаимной диффузии элементов с преимущественным растворением основного металла в припое. Процесс образования металлической связи связан с явлениями растекания и смачивания.

Растеканием называется движение жидкости (припоя) по поверхности металла, являющееся первой стадией процесса взаимодействия – сближения жидкой и твердой фазы с образованием физической адсорбции. Смачивание является второй стадией взаимодействия, заключающейся в замене межатомных связей в твердой фазе с образованием металлической связи атомов металла и припоя.

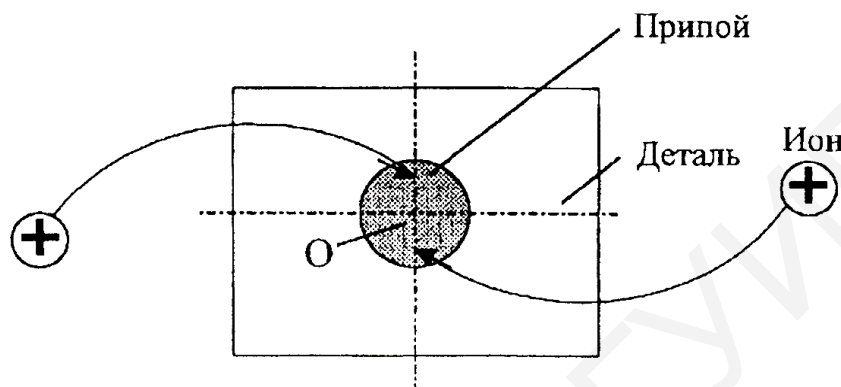


Рис. 1.2. Схема вращения жидкого припоя

Растекание припоя продолжается вплоть до установления равновесия между силами поверхностного натяжения, характеризуемого уравнением

$$\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3} = \sigma_{1,2} \cos \theta, \quad (1.2)$$

где  $\sigma_{1,3}$  – поверхностное натяжение жидкости на границе с твердым телом;

$\sigma_{2,3}$  – поверхностное натяжение жидкости на границе с газовой средой 1;

$\sigma_{1,2}$  – поверхностное натяжение между твердым телом и газовой средой, действующее на каплю по периметру ее основания.

Схема равновесия сил поверхностного натяжения капли припоя на поверхности твердого тела 3 представлена на рис. 1.3.

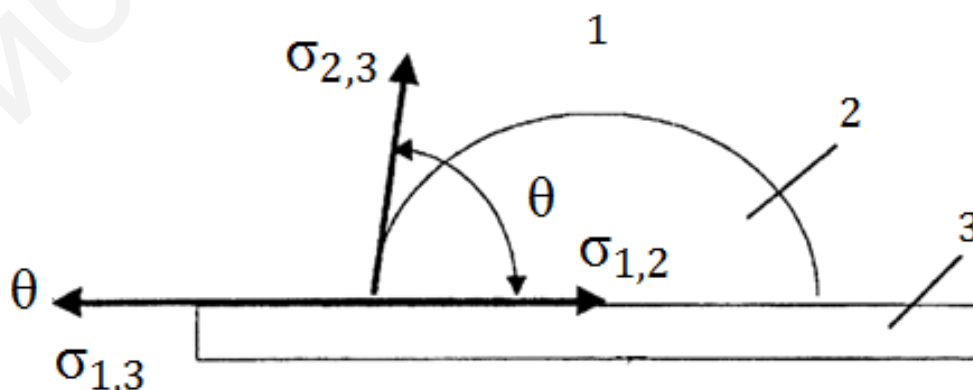


Рис. 1.3. Схема равновесия сил поверхностного натяжения капли припоя на поверхности твердого тела



Косинус угла  $\theta$ , характеризующий смачивающую способность жидкости 2, называется коэффициентом смачивания. Если  $\theta > 90^\circ$ , то припой не смачивает поверхность, при  $\theta = 0$  происходит полное или идеальное смачивание.

Одновременно с образованием металлических связей происходит поверхностная диффузия атомов припоя. Скорость и глубина диффузии зависят от природы металла и припоя, температуры и времени нагрева, механических напряжений в металле. Диффузия позволяет увеличить адгезию слоя припоя к металлу. Растворение же основного металла припоем часто приводит к отрицательным последствиям, т. к. ухудшается смачивание, увеличивается хрупкость слоя припоя.

Проведенные исследования также позволили изучить и кинетику лужения сплавов на основе алюминия. При умеренных режимах ионной очистки и лужения была определена следующая кинетика процесса (рис. 1.4). Через 0,5–1,0 мин происходит расплавление навески припоя и образование сферической капли, через 4,5–5,0 мин – распыление и десорбция оксидов металла в области навески, а также очистка поверхности самой навески. К этому времени образец нагревается до температуры лужения. При выполнении двух условий, а именно отсутствия оксидов и загрязнений в области соприкосновения припоя и металла, а также достаточной температуры происходит быстрое (0,5 с) растекание припоя по поверхности (первичное растекание).

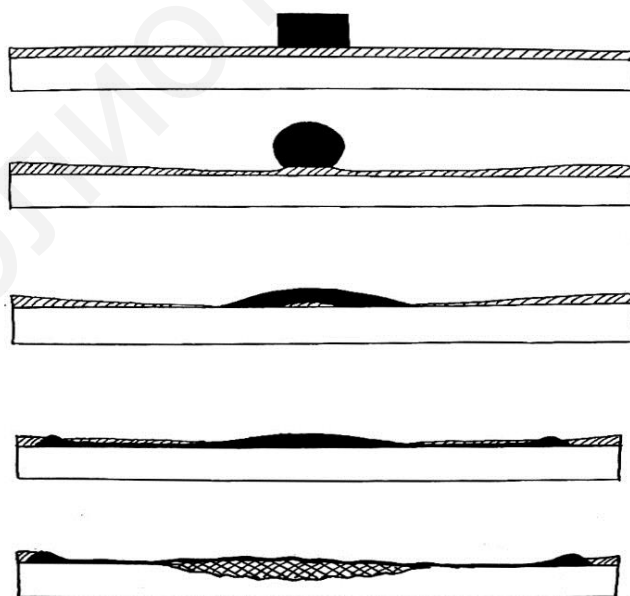


Рис. 1.4. Кинетика ионно-лучевого лужения алюминия и его сплавов

Дальнейшая бомбардировка ионами способствует повышению температуры образца, что приводит к затеканию припоя под тонкую (т. к. часть оксидной пленки уже стравлена) оксидную пленку и быстрое растекание припоя под ней. Припой растекается до тех пор, пока не достигнет достаточно толстой пленки оксида. В этой области поток припоя тормозится. При этом поступающая масса припоя взрывает слой оксида с образованием локальных капель. Таким образом, формируется зона вторичного растекания. Это происходит в течение 0,5–1 мин после начала растекания. В дальнейшем ионная бомбардировка приводит к интенсивному взаимодействию между металлом и припоем, растворению металла в припое, образованию легкоплавкой эвтектики и интерметаллических химических соединений.

Так использование пучка ионов для бесфлюсового лужения металла позволяет совместить очистку поверхностей детали и припоя от оксидов и загрязнений с нагревом детали и навески из припоя. Кроме того, ионный поток активирует поверхности взаимодействующих материалов и раскручивает припой. Ионно-лучевое лужение характеризуется высокой чистотой процесса, повышенной растекаемостью припоя, высокой степенью управляемости и контролируемости процесса. Концентрированные потоки ускоренных ионов, фокусируемых в виде луча на поверхность паяемых деталей, позволяют достичь высоких удельных плотностей мощности нагрева, обеспечивают быстроту и локальность нагрева, точность управления тепловой энергией. Недостатком такого лужения является необходимость вакуума, что ограничивает производительность и возможности групповой пайки.

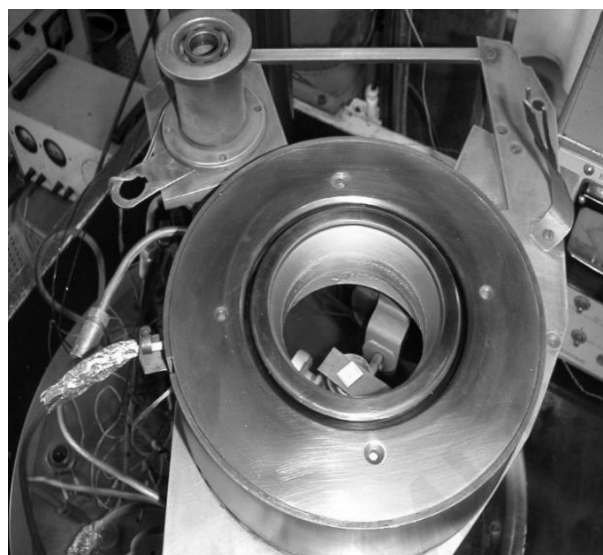
## 1.2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Процесс ионно-лучевого лужения осуществляется на учебной вакуумной установке УРМ 3.279.017, оснащенной ионным источником в виде ускорителя с анодным слоем, который позволяет формировать ионный пучок в виде полого конуса с энергией ионов в пределах 0,3–3 кэВ (рис. 1.5, а). Температура детали измеряется с помощью термопары хромель-копель и цифрового вольтметра В7-27. Для наблюдения за процессом лужения над ионным источником закреплено зеркало. Остаточный вакуум в камере не хуже  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст., рабочий –  $(4-8) \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. Рабочим газом служит аргон высшей очистки. Общий вид подколпачного устройства ионно-лучевой пайки и лужения вместе с обрабатываемой деталью представлен на рис. 1.5, б.

К работе с установкой допускаются лица, имеющие право работы с установками напряжением свыше 1000 В и прошедшие инструктаж по технике безопасности.



а



б

Рис. 1.5. Оборудование для ионно-лучевой пайки и лужения:  
 а – внешний вид вакуумной установки УРМ 3.279.017;  
 б – общий вид устройства ионно-лучевой пайки и лужения

### 1.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы.
2. Получить у лаборанта образец и навеску из припоя.
3. Замерить размеры навески припоя и вычислить площадь ее поверхности.
4. Закрепить термопару на тыльной поверхности образца, опустить колпак и откачать воздух из вакуумной камеры.

5. После достижения вакуума  $5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. напустить рабочий газ, включить ионный источник и снять зависимость температуры образца от времени бомбардировки его ионами. Напряжение анода (энергия ионов) и величина тока ионов на образец задаются преподавателем из табл. 1.1.

Таблица 1.1

Режимы ионно-лучевого лужения

Материал образца	Припой	Режимы очистки		Режимы лужения	
		$U_0$ , кВ	$I_0$ , мА	$U_{л}$ , кВ	$I_{л}$ , мА
Сплав Амц	ПОС-61	1,5	15	3,0	50
Сплав Амг	ПОС-61	1,5	10	2,5	65
Сплав Амц	ПОС-40	2,0	20	3,0	65
Сплав Амг	ПОС-50	1,0	10	3,0	65

6. Развакуумировать камеру и положить навеску припоя в центр образца. Создать вакуум в камере.

7. Произвести ионно-лучевое лужение образца при режимах, заданных преподавателем. Наблюдать за процессом лужения с помощью зеркала. Оценить приблизительно угловую скорость вращения припоя (в об/с).

8. Извлечь образец из камеры. Зарисовать внешний вид залуженной поверхности. Измерить площади залуженных поверхностей и рассчитать коэффициенты первичного и вторичного растекания по формуле

$$K_{p1,2} = \frac{S_{пов1,2}}{S_{п}}, \quad (1.3)$$

где  $S_{пов1,2}$  – площади залуженной поверхности для первичного и вторичного растекания соответственно;

$S_{п}$  – площадь поверхности навески припоя.

9. Визуально оценить угол смачивания образца каплей припоя. Вычислить коэффициент смачивания.

## 1.4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Схема процесса ионно-лучевого лужения.
3. Таблица результатов эксперимента.
4. Графическая зависимость  $T = f(t)$ .
5. Расчеты коэффициентов смачивания и растекания.
6. Рисунок залуженной поверхности.
7. Выводы по работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Каковы условия, необходимые для образования залуженного слоя?
2. Какие методы удаления загрязнений и оксидов вы знаете?
3. Какие существуют способы бесфлюсового лужения деталей?
4. В чем заключается сущность процесса ионно-лучевого лужения?
5. Какие физико-химические процессы происходят при ионно-лучевом лужении металлов?
6. Почему происходит вращение жидкого припоя?
7. Каковы преимущества ионно-лучевого лужения?
8. Каковы параметры, характеризующие качество лужения, и как их определить?
9. Какова кинетика процесса ионно-лучевого лужения?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Lanin, V. L. Ultrasonic Soldering in Electronics / V. L. Lanin // Ultrasonics Sonochemistry. – 2001. – №8.

2. Валев, С. Вакуумная пайка в производстве силовой электроники / С. Валев // Силовая электроника. – 2006. – №3. – С. 104–108.

3. Комов, А. Н. Применение низкоэнергетических электронных пучков в технологии производства полупроводниковых приборов / А. Н. Комов [и др.] // Электронная техника. Сер. 7. – 1982. – Вып. 4 (113). – С. 61–63.

4. Ионно-лучевое лужение и пайка полупроводниковых приборов и элементов РЭА / А. П. Достанко [и др.] // Весці АН Беларусі. – 1993. – №4. – С. 53–57.

Библиотека БГУИР

## Лабораторная работа №2

### УДАЛЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТА В ПЛАЗМЕ МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА

**Цель работы:** изучить физические особенности плазмы микроволнового разряда и их влияние на технологический процесс удаления фоторезистивных покрытий с поверхности подложек интегральных схем.

#### 2.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

При создании любого полупроводникового прибора по общепринятой в настоящее время планарной технологии необходимо проведение 4–10 процессов фотолитографии.

Суть фотолитографической обработки заключается в создании на поверхности кристалла защитного рельефа требуемой конфигурации. Для этой цели на кристалл наносят слой светочувствительного и стойкого к агрессивным факторам фоторезиста. Затем слой фоторезиста подвергают воздействию определенной дозы излучения, чаще всего ультрафиолетового. Между источником излучения и слоем фоторезиста помещают фотошаблон с изображением элементов интегральной схемы (ИС). В результате локального действия излучения свойства фоторезиста изменяются на нужных участках. Последующая операция проявления превращает открытое изображение в рельефное за счет удаления части слоя фоторезиста. Образовавшийся рельеф используется как защитная маска при травлении слоя или нанесении на него каких-либо веществ, чаще всего металлов. Затем слой фоторезиста удаляют.

Высокие требования к состоянию поверхности полупроводникового кристалла, предъявляемые при создании современных дискретных полупроводниковых приборов и ИС, обусловили разработку и внедрение в производство новых процессов удаления фоторезиста с применением газовых сред.

Основные реакции плазмообразующих газов с органическими полимерами можно разделить на два класса:

- первый – прямая реакция активированного газа с полимерной поверхностью (окисление кислородной плазмой, азотирование посредством азотной плазмы, галогенизация и т. д.);
- второй – образование свободных химических радикалов и последующая реакция этих радикалов с материалом, облучаемым плазмой, или с другой средой, которую в дальнейшем можно привести в контакт с поверхностью.

В процессах деструкции и удаления органических фоторезистивных слоев преобладающими являются реакции первого класса.

Эффект удаления фоторезиста, обусловленный реакциями первого класса, в основном связывают с наличием в газовом разряде атомарного кислорода, концентрация которого 20 %. Кроме того, определенную роль в этих процессах играют молекулы кислорода. Весьма существенным фактором, способствующим разложению и последующему удалению остатков пленки, является температура подложки, нагревающейся под воздействием плазменных частиц.

Элементарные реакции, происходящие в кислороде в условиях газового разряда, могут быть подразделены на следующие категории: ионизацию; диссоциативную ионизацию; диссоциативное прилипание; диссоциацию; образование кислорода в метастабильном состоянии; реакции перезарядки; реакции с выделением электронов; рекомбинацию электрон – ион; атомарную рекомбинацию.

Ниже приведены примеры некоторых из этих реакций:

а) ионизация:



б) диссоциативная ионизация:



в) диссоциативное прилипание электрона к молекуле:



г) диссоциация молекулы  $O_2$  на два возбужденных атома кислорода  $O^*$ :



д) образование кислорода в метастабильном состоянии:



Определяющую роль в протекании этих реакций играют электроны, от концентрации и энергии которых зависит и концентрация химически активных частиц плазмы.

Разложение фоторезиста протекает по радикально-цепному механизму. Образующиеся при разложении продукты имеют малый молекулярный вес и улетучиваются. Летучие фракции в объеме реактора, подвергаясь дальнейшему окислению, разлагаются до конечных продуктов:



Внедрение плазмохимического метода удаления фоторезиста в производство интегральных схем потребовало создания специальных высокоэффективных установок, к которым, в частности, относятся установки удаления фоторезиста в плазме микроволнового разряда.

К микроволновому диапазону относятся электромагнитные колебания с частотой 300 МГц и выше. Как правило, промышленные технологические установки, использующие энергию микроволнового излучения, работают на частоте  $(2375 \pm 50)$  МГц в непрерывном режиме. Одной из особенностей рассматриваемого диапазона частот является характер передачи энергии электромагнитных колебаний: энергия распространяется в основном вне проводников, которые либо ограничивают пространство, где распространяется энергия (волноводы, коаксиальные линии), либо задают направление распространения энергии (проводники двухпроводных линий, однопроводная линия передачи).

В диапазоне частот  $(2375 \pm 50)$  МГц для передачи электромагнитной энергии наиболее широко используются волноводы прямоугольного профиля размером сечения  $(72 \times 34)$  мм и  $(90 \times 45)$  мм.

Характерные особенности СВЧ-разрядов состоят в следующем. Коэффициент преобразования электромагнитной энергии в плазму газового разряда для случая микроволнового разряда достигает 90–95 %, в то время как для ВЧ-разряда он обычно составляет 35–40 %. Основная часть электромагнитной энергии передается плазменному электронному облаку, а затем уже в результате столкновения электронов с тяжелыми частицами передается молекулам, атомам, радикалам и ионам. При этом концентрация электронов в плазме газового разряда в общем случае определяется выражением

$$n_e = \frac{P}{\pi R^2 h \sum_j r_j^e [x_j]}, \quad (2.10)$$

где  $P$  – электромагнитная энергия, рассеиваемая в газе в единицу времени;

$R, h$  – соответственно радиус и высота разрядной камеры;

$r_j^e$  – скорость потерь энергии электронами при столкновениях с частицами  $j$ -го сорта;

$[x_j]$  – плотность частиц  $j$ -го сорта.

Основным типом реакции, приводящей к образованию атомного кислорода, является диссоциация молекул кислорода прямым электронным ударом. Скорость диссоциации молекул электронами определяется выражением

$$V_d = n_r n_e \int_{\varepsilon_t}^{\infty} z_e \omega_d(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (2.11)$$

где  $n_r, n_e$  – соответственно число молекул газа и электронов в единице объема;

$\varepsilon_t$  – энергия электрона, необходимая для диссоциации молекулы;

$z_e$  – число столкновений электрона с молекулами газа в единицу времени;

$\omega_d(\varepsilon)$  – вероятность диссоциации молекулы;

$f(\varepsilon)$  – функция распределения электронов по энергиям.



Таким образом, большее поглощение электромагнитной энергии в микроволновом разряде приводит к увеличению концентрации электронов  $n_e$ , как это следует из выражения (2.10), что в свою очередь приводит к увеличению скорости диссоциации молекул газа в соответствии с выражением (2.11).

Так как концентрация химически активных частиц в плазме газового разряда пропорциональна концентрации электронов, то плазма микроволнового разряда пониженного давления отличается более высокой химической активностью по сравнению с разрядами постоянного тока и ВЧ.

Одним из физических эффектов, который в области микроволнового диапазона частот проявляется сильнее, чем для случая электромагнитных ВЧ-колебаний, является скин-эффект, выражающийся в неравномерном поглощении электромагнитной энергии по диаметру разрядной камеры. Толщина скин-слоя, т. е. эффективная глубина проникновения, на которой амплитуда электромагнитной волны уменьшается в  $e$  раз, следующая:

$$\delta = \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma\omega}} = \frac{5,03}{\sqrt{\sigma[\text{Ом}^{-1}\text{см}^{-1}]f[\text{МГц}]}} \text{ см}, \quad (2.12)$$

где  $\sigma$  – электронная проводимость ионизированного газа, определяемая выражением

$$\sigma = \frac{e^2 n_e v_m}{m(\omega^2 + v_m^2)} = 2,82 \cdot 10^{-4} n_e \frac{v_m}{\omega^2 + v_m^2}, \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}, \quad (2.13)$$

где  $n_e$  – концентрация электронов,  $\text{см}^{-3}$ ;

$v_m$  – частота столкновений электронов с тяжелыми частицами,  $\text{с}^{-1}$ ;

$\omega$  – круговая частота поля,  $\text{рад/с}$ .

Физически это означает, что при достаточно высоких концентрации электронов и частоте электромагнитного поля можно практически полностью устранить вихревые токи, наводимые на поверхности обрабатываемых пластин, за счет экранирования переменных электромагнитных полей внешней оболочкой газового разряда.

Электронная плотность  $n_{e \text{ кр}}$ , при которой для данной частоты поля электромагнитная волна не проникает в плазменный объем, отражаясь от нее, называется критической. Она определяется выражением

$$n_{e \text{ кр}} = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2} = 1,24 \cdot 10^4 f^2, \text{ см}^{-3}, \quad (2.14)$$

где  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  – частота поля, МГц.

Так, например, для  $f = 3 \text{ ГГц}$  величина  $n_{e \text{ кр}} = 1,1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . В область плазмы с большей электронной плотностью такая волна не проникает.

В случае если  $n_e \ll n_{e\text{кр}}$ , затухание волны на расстоянии порядка длины волны невелико, и тогда справедлив закон Бугера для потока энергии или интенсивности электромагнитной волны:

$$\frac{dS}{dx} = -\mu_\omega S_0 e^{-\mu_\omega x}, \quad (2.15)$$

где  $S_0$  – плотность потока энергии волны (вектор Пойтинга) на входе в поглощающую среду;

$\mu_\omega$  – коэффициент поглощения (затухания) потока электромагнитной энергии.

Для случая  $n_e < n_{e\text{кр}}$  электромагнитная волна, проникая в глубь плазмы, вызывает дополнительный нагрев материалов с высоким  $\epsilon$  и  $\text{tg}\delta$ , что может являться одним из факторов ускорения процесса плазменной обработки образца.

Как следует из всего вышесказанного, одной из основных характеристик плазмы газового разряда является концентрация электронов. Локальная концентрация электронов  $n_e$  может быть определена с помощью метода электрических зондов, который является одним из старейших в диагностике плазмы.

Одной из разновидностей этого метода является прямое измерение проводимости плазмы исходя из предположения, что в плазме микроволнового разряда основными носителями тока являются электроны, перемещающиеся в случае зондирования за счет постоянной составляющей напряженности внешнего электрического поля ( $> 99\%$ ). В этом случае концентрация электронов определяется непосредственно из измеренной величины плотности электронного тока по формуле

$$n_e = \frac{j_e}{e\mu_e}, \text{ см}^{-3}, \quad (2.16)$$

где  $j_e$  – плотность тока, А/см<sup>2</sup>;

$E$  – напряженность постоянного электрического поля, В/см;

$e$  – заряд электрона, Кл;

$\mu_e$  – подвижность электронов, см<sup>2</sup>с<sup>-1</sup>В<sup>-1</sup>.

Расчет концентрации электронов  $n_e$  по формуле (2.16) проводится в следующей последовательности.

Рассчитывается плотность частиц газа по формуле

$$N_m = 2,687 \cdot 10^{19} \left( \frac{P}{760} \right) \cdot \left( \frac{273}{T} \right), \text{ см}^{-3}, \quad (2.17)$$

где  $P$  – давление газа в реакционной камере, мм рт. ст.;

$T$  – абсолютная температура газа (принимается в расчете равной 293 К).

Эффективная частота соударений электронов с молекулами газа определяется следующим образом:

$$\nu_{\text{эф.т}} = 8,3 \cdot 10^5 \pi a^2 \sqrt{T_e} N_m, \text{с}^{-1}, \quad (2.18)$$

где  $a$  – радиус молекулы плазмообразующего газа, принимаемый равным для кислорода  $1,7 \cdot 10^{-8}$  см, для воздуха –  $1,2 \cdot 10^{-8}$  см, для азота –  $1,75 \cdot 10^{-8}$  см, для углекислого газа –  $2 \cdot 10^{-8}$  см;

$T_e$  – температура электронов в эВ, зависящая от мощности, давления и расхода газа и определяемая в данном случае по графической зависимости, приведенной на рис. 2.1.

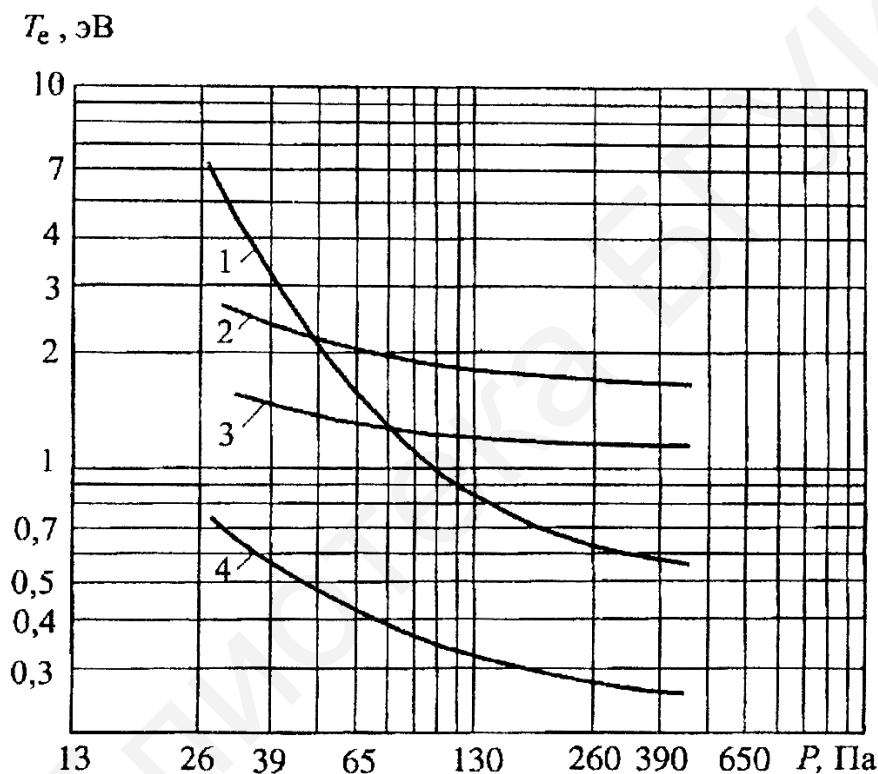


Рис. 2.1. Зависимость температуры электронов  $T_e$  от давления газа в камере:  
1 –  $\text{CO}_2$ ; 2 –  $\text{O}_2$ ; 3 – воздух; 4 –  $\text{N}_2$

Далее рассчитывается подвижность электронов:

$$\mu_e = \frac{e}{m \nu_{\text{эф.т}}} = \frac{1,76 \cdot 10^{15}}{\nu_{\text{эф.т}}}, \text{см}^2 \text{с}^{-1} \text{В}^{-1}. \quad (2.19)$$

По результатам измерений  $E$  и  $j$  и данным расчетов по формулам (2.16–2.19) определяется концентрация электронов  $n_e$  в данной точке разрядного объема.

В случае прохождения электромагнитных волн в плазму ( $n_e < n_{e \text{ кр}}$ ) мощность потерь, рассеиваемая в единице объема полупроводникового или диэлектрического образца в виде тепла, составляет

$$P_{\text{пот}} = 2\pi f E^2 \varepsilon'_r \operatorname{tg} \delta \varepsilon_0, \text{ Вт/м}^3, \quad (2.20)$$

где  $f$  – частота электромагнитных колебаний, Гц;

$E$  – напряженность электромагнитного поля у поверхности образца, В/м;

$\varepsilon'_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость материала, определяемая как отношение

$$\varepsilon'_r = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon_0}, \quad (2.21)$$

где  $\varepsilon'$  – действительная часть диэлектрической проницаемости материала;

$\varepsilon_0$  – электрическая постоянная вакуума, равная  $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м.

В этом случае имеет место более интенсивный нагрев образцов, обладающих высокими диэлектрическими потерями ( $\varepsilon'$  и  $\operatorname{tg} \delta$ ), в результате чего происходит интенсификация протекания плазменных реакций на их поверхности.

## 2.2. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка представляет собой прямоугольную настольную конструкцию на базе микроволновой бытовой печи «Электроника». На лицевой панели расположены органы управления, приборы контроля вакуума, расхода плазмообразующих газов (два канала), времени работы установки и дверь резонаторной камеры, совмещенная с передней крышкой кварцевой разрядной камеры. Элементы управления имеют соответствующие надписи.

Система возбуждения электромагнитного поля выполнена в виде прямоугольного резонатора. Внутри резонаторной прямоугольной камеры перпендикулярно ее коротко замыкающим стенкам установлена кварцевая разрядная камера. Задняя часть разрядной камеры через штуцер подсоединяется к вакуумной системе. Передняя дверца резонатора имеет дроссельную канавку и уплотняет резонатор, с тем чтобы электромагнитная энергия не распространялась по пространству. На тыльной стороне дверцы укреплена крышка разрядной камеры, через которую подводится плазмообразующий газ или смесь газов. Крышка уплотняет камеру для достижения определенного вакуума в реакционном объеме при ее закрывании.

Электромагнитная энергия СВЧ-диапазона (с частотой 2370–2450 МГц) генерируется магнетроном М105 мощностью до 600 Вт, распространяется по прямоугольному волноводу и через окно связи в стенке передается в полость резонатора.

Технологический цикл по обработке подложек (удалению фоторезиста) состоит в следующем. При открытой дверце производится загрузка реактора подложками, установленными в кассете – подложкодержателе. Реактор после этого закрывается крышкой, т. е. дверцей резонатора, откачивается вакуумным насосом до давления 30–60 Па, затем через крышку подложкодержателя, соединенную с газовой магистралью, напускается рабочий газ (кислород) до давления 100–200 Па. Включается генератор СВЧ-колебаний, и в реакторе зажигается плазменный разряд. Между тем одновременно происходит удаление фоторезистивных пленок с поверхности подложек и производится откачка газообразных продуктов реакции. По окончании процесса выполняется отключение генератора, прекращается подача рабочего газа, отключается вакуумный насос, реактор разгерметизируется за счет напуска атмосферного воздуха. Кассета с подложками вынимается из разрядной камеры.

Для проведения физических измерений в разрядную камеру по ее оси введены зонды, представляющие собой плоские электроды из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм и размером 10×10 мм<sup>2</sup> и находящиеся один напротив другого на расстоянии 12 мм.

### 2.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Включение плазменной установки:

а) Проверить исправность заземления.

б) Убедиться, что кожух установки плотно прилегает к корпусу.

в) Закрывать дверь на передней панели установки.

г) Подать тумблером «СЕТЬ-ВКЛ.» электропитание на установку.

д) Включить электропитание вакуумметра *ІЗВІЗ-003* кнопкой 220 В.

е) Включить кнопкой ВАКУУМ-НАСОС ПУСК вакуумный насос. Откачку и степень разряджения в камере контролировать по показанию прибора *ІЗВІЗ-003*. Откачку производить до показания прибора 3 В (соответствует 32 Па).

ж) Установку рабочего давления производить вращением рукоятки натекателя НАТЕКАТЕЛЬ ГАЗ 2. Градуировочная кривая показаний вакуумметра *ІЗВІЗ-003* по воздуху прилагается к данной инструкции.

з) Повернуть маховик механического реле времени установки по часовой стрелке до упора, затем, вращая его против часовой стрелки, установить заданное время горения разряда.

и) Для зажигания разряда нажать кнопку АНОД.

2. Выключение плазменной установки:

а) Для выключения разряда повернуть маховик механического реле времени против часовой стрелки до упора.

б) Перекрыть подачу газа в камеру вращением рукоятки натекателя НАТЕКАТЕЛЬ ГАЗ 2 по часовой стрелке до упора.

в) Отключить вакуумный насос нажатием кнопки ВАКУУМ-НАСОС ОТКЛ. и держать ее 15–20 с, пока камера полностью не разгерметизируется.

г) Отключить электропитание вакуумметра, отжав кнопку  $\overline{220\text{ В}}$ .

д) Отключить электропитание установки, переведя тумблер СЕТЬ в положение ОТКЛ.

3. Работа с зондовым устройством:

а) Схема подачи постоянного напряжения на зонды приведена на рис. 2.2.

б) Подключение источника питания ЭСВ-4 к сети производится тумблером СЕТЬ.

в) Подача постоянного напряжения на зонды производится нажатием кнопки ПУСК на лицевой панели источника ЭСВ-4. Напряжение источника питания фиксировано и равно  $U = 47,2\text{ В}$ .

г) Отсчет величины тока, текущего через плазменный промежуток, проводить по шкале миллиамперметра в единицах, обозначенных на шкале прибора (диапазон измерений 0–5 мА).

д) Выключение зондового устройства производится тумблером СЕТЬ.

*Примечания:*

- площадь электродов зондового устройства –  $S = 1 \times 1\text{ см}^2$ ;
- расстояние между электродами –  $l = 1,2\text{ см}$ ;
- подачу постоянного напряжения на зонды производить после зажигания разряда.

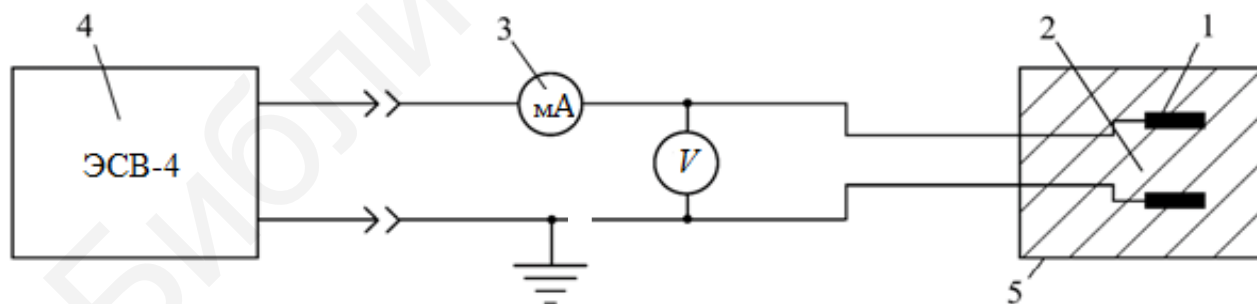


Рис. 2.2. Схема зондового устройства для измерения параметров плазмы:

- 1 – зонды; 2 – плазма; 3 – измерительный прибор, мА;  
4 – источник стабилизированного напряжения ЭСВ-4;  
5 – кварцевая реакционно-разрядная камера

## 2.4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Таблица экспериментальных данных, полученных по результатам зондовых измерений.
4. Графические зависимости:  $n_e = f(P)$ ,  $\delta = f(P)$ .
5. Результаты расчетов  $n_{e\text{ кр}}$ ,  $n_e$  для  $P = 133$  Па,  $P_{\text{пот}}$ .
6. Анализ результатов и выводы по работе.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Назовите основные типы реакций плазмообразующих газов с органическими полимерными пленками.
2. Какие частицы кислородной плазмы играют основную роль в процессе удаления фоторезиста?
3. Опишите основные элементарные процессы, протекающие в плазме газового разряда.
4. От чего зависит концентрация электронов в плазме газового разряда?
5. Какова роль электронов в плазменных процессах?
6. Какой физический смысл скин-эффекта?
7. Что такое критическая концентрация электронов и как она рассчитывается?
8. Какова последовательность измерений и расчетов при определении концентрации электронов  $n_e$  прямым измерением проводимости плазмы?
9. Каково определение мощности электромагнитной волны, теряемой в единице объема полупроводникового или диэлектрического материала в виде тепла?
10. Назовите факторы, обуславливающие более интенсивную обработку в плазме микроволнового разряда по сравнению с высокочастотным разрядом.
11. Опишите механизм трансформации энергии электромагнитной волны в плазму газового разряда.
12. От каких электрофизических параметров разряда зависит скорость диссоциации плазмообразующего газа?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бордусов, С. В. Плазменные СВЧ-технологии в производстве изделий электронной техники / С. В. Бордусов. – Минск : Бестпринт, 2002. – 452 с.

2. Технологии изделий интегральной электроники : учеб. пособие / Л. П. Ануфриев [и др.] ; под общ. ред. А. П. Достанко, Л. И. Гурского. – Минск : Амалфея, 2010. – 536 с.

3. Райзер, Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – 3-е изд., испр. и доп. – Долгопрудный : Изд. дом «Интеллект», 2009. – 736 с.

4. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3 т. Т. 1 / А. П. Достанко [и др.] ; под общ. ред. А. П. Достанко. – Минск : ФУ Аинформ, 2000. – 424 с.

5. Плазменные процессы в производстве изделий электронной техники. В 3 т. Т. 2 / А. П. Достанко [и др.] ; под общ. ред. А. П. Достанко. – Минск : ФУ Аинформ, 2001. – 244 с.

Библиотека БГУИР



## Лабораторная работа №3

### ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ИНФРАКРАСНЫМ (ИК) ИЗЛУЧЕНИЕМ

**Цель работы:** изучить физические основы процессов термической обработки материалов полупроводниковой электроники ИК-излучением, конструктивные особенности устройств ИК-нагрева, провести моделирование и экспериментальное исследование процесса термообработки полупроводниковых пластин.

#### 3.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В последние 30 лет во многих отраслях промышленности все шире распространяется ИК-нагрев, под которым понимается нагрев излучением с определенным, технологически обоснованным спектральным составом, задаваемым в соответствии с оптическими свойствами нагреваемого объекта. Именно специальный выбор спектральной характеристики излучателя, расположенной в ИК-диапазоне длин волн, и позволяет ввести самостоятельное понятие ИК-нагрева, основанное на лучистом теплообмене.

Особенности ИК-нагрева определили следующий ряд его принципиальных технологических и эксплуатационных преимуществ:

1. Высокие скорости нагрева и охлаждения, ограничиваемые практически лишь объектом нагрева. В результате улучшается воспроизводимость температурных режимов, появляется возможность реализации процессов, выполнение которых с применением других видов нагрева затруднительно или практически невозможно, повышается производительность вследствие сокращения длительности переходных процессов нагрева и охлаждения.

2. Высокая степень чистоты проведения процессов, недостижимая при прочих методах нагрева, определяемая относительно низкой температурой стенок реактора и отсутствием футеровки печи, являющейся главным источником загрязнений рабочего объема печи.

3. Возможность избирательного распределения плотности лучистой энергии по глубине нагреваемого объекта или преимущественный нагрев отдельных его элементов.

4. Возможность включения ИК-печи только на время проведения технологических циклов и быстрой переналадки на другие режимы. Это сокращает расходы электроэнергии, количество обслуживающего персонала.

Однако эффективная реализация принципиальных преимуществ требует представления о механизме и термодинамических характеристиках конкретно-

го технологического процесса термообработки и, в первую очередь, согласования спектральных характеристик излучателя с оптическими свойствами нагреваемого объекта и конструктивных элементов печи, соответствия количества и интенсивности подводимой лучистой энергии заданной скорости нагрева и т. д. Кроме того, нужно уметь управлять распределением плотности лучистых потоков, т. е. облученностью нагреваемых объектов, и измерять ее величину.

### 3.1.1. Физические основы процесса нагрева ИК-излучением

Если излучение падает на однородное тело, то часть излучения отражается, а остальная часть проникает внутрь тела. При прохождении через тело излучение может быть поглощено (рис. 3.1.).

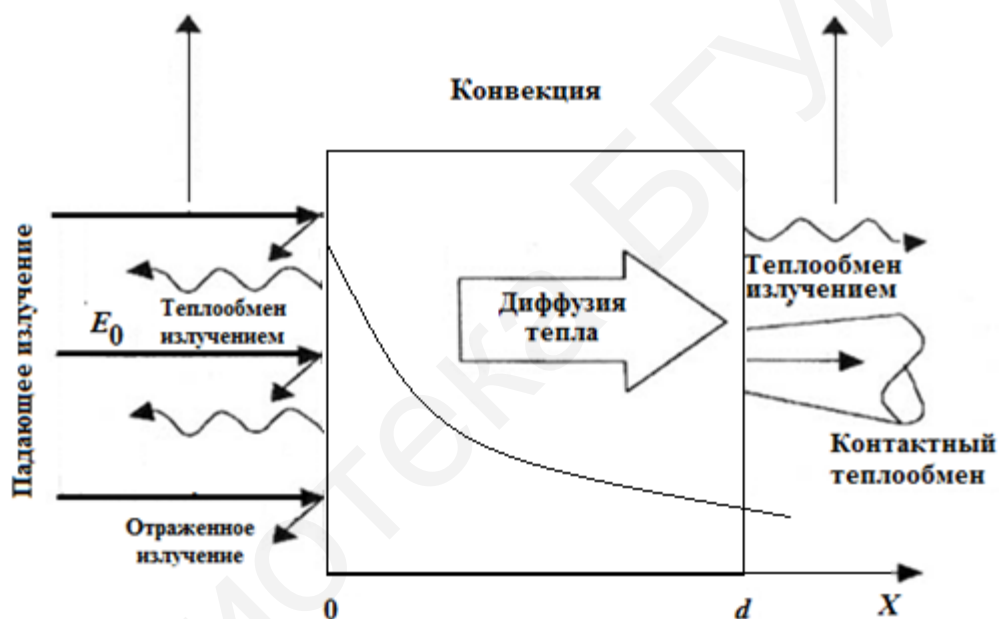


Рис. 3.1. Мгновенный баланс энергии тела

В случае прозрачного для теплового излучения вещества на основе закона сохранения энергии имеем

$$Q_{\text{пад}} = Q_{\text{отр}} + Q_{\text{проп}} + Q_{\text{погл}}, \quad (3.1)$$

где  $Q_{\text{пад}}$  – поток падающей на тело энергии излучения;

$Q_{\text{отр}}$  – поток отраженной от тела энергии излучения;

$Q_{\text{проп}}$  – поток энергии излучения, пропущенный телом;

$Q_{\text{погл}}$  – поток энергии излучения, поглощенной телом.

Поделив все члены (3.1) на  $Q_{\text{пад}}$ , получим

$$1 = \rho + \tau + \alpha, \quad (3.2)$$

где  $\rho$  – отражательная способность тела;

$\tau$  – пропускательная способность тела;

$\alpha$  – поглощательная способность тела.

Таким образом, отражательная, пропускательная и поглощательная способности тела характеризуют распределение излучения после падения на это тело.

Для непрозрачных тел  $\tau = 0$ , и тогда  $\alpha = 1 - \rho$ .

В случае интенсивного воздействия соотношение между компонентами в (3.1) изменяется во времени из-за нагрева образца и изменения его физико-химических свойств, поэтому условие (3.1) имеет смысл мгновенного баланса энергии.

Слой материала, в котором происходит поглощение, действует как мгновенный внутренний источник тепла. Параметры этого источника зависят от спектрально-энергетических характеристик излучения и облучаемого материала, координаты, температуры и времени. Выделенная в слое поглощения энергия диффузно перераспределяется в объеме образца, нагревая его. При этом часть энергии теряется на тепловое излучение  $w_t$  и конвекцию  $w_c$ , а также потребляется на химические реакции и фазовые переходы  $w_r$ .

Потери на тепловое излучение имеют место на поверхности образца и интегрально описываются законом Стефана – Больцмана:

$$w_t = \sigma \varepsilon_e (T^4 - T_s^4), \quad (3.3)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана;

$\varepsilon_e$  – приведенная излучательная способность;

$T_s$  – температура окружающих поверхностей, с которыми осуществляется радиационный теплообмен.

Конвекционные потери тепла пропорциональны разности температур образца  $T$  и окружающей среды  $T_a$ :

$$w_c = \alpha_c (T - T_a), \quad (3.4)$$

где  $\alpha_c$  – коэффициент конвективного теплообмена с окружающей средой.

Внутренние химические реакции и фазовые переходы могут как потреблять тепловую энергию, так и выделять ее. Определяющими здесь являются физико-химическая природа, энергоемкость, температура и количество вещества, участвующего в этих превращениях:

$$w_r = v_r(T) N E_r, \quad (3.5)$$

где  $v_r(T)$  – скорость реакции;

$N$  – концентрация реагирующих компонентов;

$E_r$  – удельная энергия образования новой фазы.

Эффективность влияния различных механизмов потерь на перераспределение поглощенной энергии, а следовательно, и на режим термообработки в значительной степени зависит от продолжительности воздействия излучения.

В качестве критерия для классификации режимов термообработки используется величина диффузионного смещения температурного профиля в образце  $\Delta x$  за время воздействия  $t_p$ :

$$\Delta x = (D \cdot t_p)^{\frac{1}{2}}, \quad (3.6)$$

где  $D$  – температуропроводность материала.

Согласно этому критерию можно выделить три наиболее важных режима термообработки: адиабатический, теплового потока и теплового баланса.

**Адиабатический режим** реализуется при очень коротких импульсах воздействия излучения ( $10^{-11} \text{ с} < t_p < 10^{-6} \text{ с}$ ). Перераспределение поглощенной энергии по глубине меньше толщины слоя поглощения ( $\Delta x < x_a$ ). Температура в слое поглощения мгновенно возрастает, и он плавится. Глубина расплавленной области зависит от плотности поглощенной энергии. Все потери энергии, кроме затрат на фазовые переходы и химические реакции, пренебрежимо малы.

**В режиме теплового потока** (при длительности воздействия излучения  $10^{-6} \text{ с} < t_p < 10^{-2} \text{ с}$ ) область перераспределения поглощенной энергии больше толщины слоя поглощения, но не распространяется на всю толщину образца ( $x_a < \Delta x < d$ ). Возникает градиент температуры по толщине образца. Радиационные потери тепла начинают влиять на распределение температуры в образце. Конвекция по-прежнему играет пренебрежимо малую роль в тепловых процессах. Термообработка в данном режиме может осуществляться как с плавлением поверхностного слоя, так и с сохранением твердой фазы.

**Режим теплового баланса** имеет место, когда длительность воздействия становится достаточной ( $t_p > 10^{-2} \text{ с}$ ) для достижения тепловым фронтом необлучаемой стороны образца ( $\Delta x > d$ ) и установления равномерного (на практике – квазиравномерного) распределения температуры по толщине образца. Все механизмы теплообмена (радиационный, диффузионный, конвективный) влияют на температуру нагреваемого образца. В тепловом балансе различают две стадии: *нестационарный* и *стационарный* тепловой баланс. Нестационарный тепловой баланс является начальной стадией и характеризуется тем, что суммарная мощность тепловых потерь меньше поглощаемой энергии. Температура образца при этом непрерывно возрастает с увеличением длительности экспозиции. Увеличиваются и радиационные потери пропорционально  $T^4$ . В некоторый момент времени по достижении определенной температуры поглощаемая мощность полностью уравнивается потерями и тепловой баланс переходит в стационарную стадию, характеризуемую неизменной во времени температурой образца. Такой режим термообработки принято называть *изотермическим*.

Взаимодействие излучения с твердым телом в спектральном диапазоне от ультрафиолетовой (УФ) до ИК-области происходит на уровне электронной

подсистемы, поскольку ядра атомов слишком тяжелы, чтобы ощутимо участвовать в этом процессе. Энергетические состояния свободных и связанных электронов в твердом теле обуславливают процессы отражения, пропускания и поглощения падающего излучения.

Взаимодействие ИК-излучения со свободными электронами происходит в широком спектральном диапазоне и является определяющим для материалов с высокой концентрацией свободных носителей, в первую очередь для металлов. Под действием падающего излучения свободные электроны увеличивают свою кинетическую энергию. Энергия возбуждения расходуется на собственное излучение (отражение), а также превращается в тепловую энергию решетки при рассеянии возбужденных электронов на атомах облучаемого материала (поглощение). Для полупроводников и диэлектриков, имеющих малую концентрацию свободных носителей, основным механизмом поглощения является поглощение связанными электронами. Схематически эти процессы представлены на рис. 3.2.

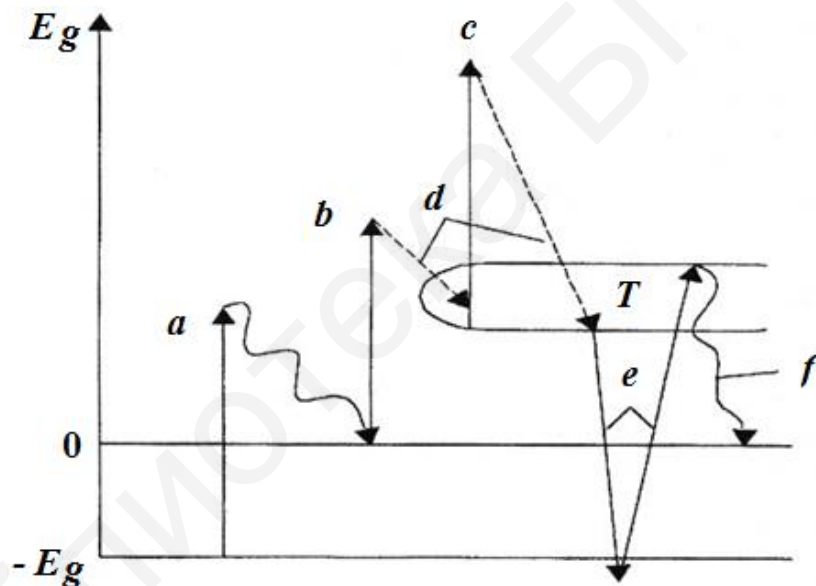


Рис. 3.2. Схема взаимодействия потока ИК-излучения с твердым телом

На рис. 3.2 сплошными вертикальными стрелками показаны наиболее вероятные механизмы поглощения энергии фотона. Межзонное поглощение (переход *a*) для полупроводников является основным. Генерация носителей по этому механизму происходит лишь в том случае, когда энергия возбуждающего фотона больше ширины запрещенной зоны полупроводника. Поглощение лучистой энергии свободными носителями, находящимися у дна зоны проводимости (переход *b*), при низких уровнях возбуждения и низких температурах малó. С ростом температуры или ростом интенсивности падающего излучения концентрация носите-

лей возрастает, и поглощение ими фотонов может стать доминирующим (переход  $c$ ). Каждый из названных механизмов при детальном его описании является достаточно сложным и зависит как от характеристик падающего излучения, так и от химического, структурного и фазового составов облучаемого материала.

Металлы из-за наличия большой плотности свободных электронов характеризуются высоким коэффициентом поглощения во всем спектральном диапазоне. Коэффициент отражения металлов относительно высок в диапазоне длин волн, больших некоторой критической. Для длин волн, меньше критической (в видимой или УФ части спектра), он быстро падает. Для типичного полупроводникового материала – кремния – спектральная зависимость коэффициента поглощения имеет две характерные области. В ИК-диапазоне ( $\lambda > 1$  мкм) поглощение малó из-за незначительного количества свободных носителей. Слабое увеличение поглощения в области ( $\lambda > 6$  мкм) связано с резонансным рассеянием излучения оптическими фононами. В диапазоне длин волн меньших 1 мкм имеет место резкое увеличение коэффициента поглощения, т. к. энергия квантов в этом диапазоне уже достаточна для возбуждения носителей через запрещенную зону. Генерируемые при этом свободные носители обуславливают также и увеличение отражательной способности.

### **3.1.2. Применение устройств ИК-нагрева в производстве электронных приборов**

ИК-нагрев находит все более широкое применение в производстве электронных приборов.

К настоящему моменту с применением ИК-нагрева реализованы следующие технологические процессы при производстве электронных приборов:

1) диффузия фосфора, бора, мышьяка в потоке, импульсная вакуумная диффузия бора, диффузия золота, диффузия бора из «параллельного» источника;

2) газовое травление кремния;

3) термическое окисление кремния, ускоренное гидротермальное окисление и каталитическое окисление кремния;

4) совмещенные двухтемпературные процессы разгонки бора, фосфора и окисления кремния;

5) осаждение диоксида кремния (чистого и легированного) окислением моносилана или пиролизом кремнийорганических соединений, в том числе при разрежении;

- 6) газофазное осаждение нитрида кремния и многослойных структур на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{SiO}_2$ , в том числе при разрежении;
- 7) газофазная эпитаксия кремния, германия, арсенида галлия;
- 8) осаждение поликремния;
- 9) газофазное осаждение  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;
- 10) газофазное осаждение вольфрама, молибдена и алюминия, в том числе в составе многослойной металлизации W-Cr, Au-Mo-Al и др.;
- 11) импульсный отжиг ионно-легированных структур;
- 12) отжиг резистивных слоев на основе керметов;
- 13) сушка и задубливание слоев фоторезиста, в том числе термоциклическая;
- 14) герметизация диодов в стеклянных корпусах и ИС в металлокерамических корпусах;
- 15) нагрев подложек в вакууме перед напылением.

Несмотря на сравнительно малый срок применения лучистого ИК-нагрева в прецизионных термических процессах полупроводникового и микроэлектронного производств, уже создано достаточное количество разнообразных установок ИК-нагрева отражательных ИК-печей.

Термические процессы производства электронной техники обычно проводятся в контролируемой среде, и поэтому обязательными конструктивными элементами большинства отражательных ИК-печей являются:

- 1) источник ИК-излучения;
- 2) система формирования потока излучения;
- 3) реактор, в котором размещаются обрабатываемые образцы;
- 4) подложкодержатель;
- 5) блок питания;
- 6) контрольно-измерительный комплекс;
- 7) система загрузки – выгрузки;
- 8) система охлаждения отражателей.

Наиболее важным элементом конструкции установок является **источник ИК-излучения**. Тип применяемого источника определяет как выбор технических решений для остальных блоков, так и эксплуатационные характеристики и возможности всей установки в целом. Источники излучения должны обеспечивать высокие значения плотности потока излучения и равномерное его распределение по поверхности тела излучения, заданный спектральный состав излучения, стабильность и воспроизводимость энергетических и спектральных характеристик во времени, возможность управления параметрами излучения; высокий коэффициент преобразования электрической энергии в световую и большой срок службы.

Наиболее распространенными и перспективными источниками ИК-излучения являются галогенные лампы накаливания (ГЛН). Конструктивно ГЛН представляют собой осесимметричную систему элементов: моноспиральное цилиндрическое тело накала из вольфрама помещено в трубчатую оболочку из кварцевого стекла. В зависимости от равномерности шага намотки спирали выпускаются ГЛН равномерного излучения по длине тела накала и ГЛН дифференциального излучения, т. е. с неравномерной интенсивностью излучения по длине лампы. Последние применяются для формирования в печах температурных полей нужной конфигурации.

На рис. 3.3 схематично изображены наиболее распространенные в термическом оборудовании конструкции ГЛН.

В конструкциях ГЛН применяются следующие виды цоколей:  $P$  – плоский металлический цоколь,  $R$  – керамический цоколь с осевым контактом,  $K$  – гибкий вывод с кабельным наконечником (см. рис. 3.3).

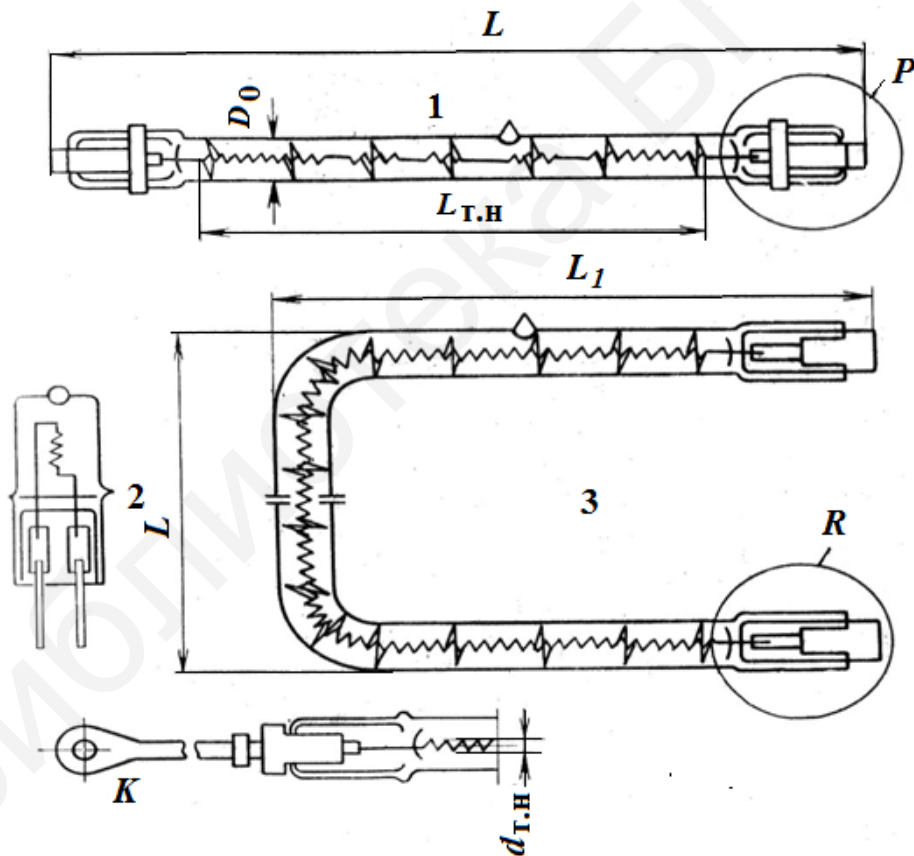


Рис. 3.3. Кварцевые галогенные лампы накаливания:  
1 – линейные; 2 – односторонние; 3 – с отогнутыми концами

**Система формирования потока излучения** определяется применяемым источником излучения и в зависимости от его геометрических размеров и энер-



гетических параметров осуществляет либо фокусировку излучения, либо перераспределение излучения для создания равномерного потока излучения на образец большой площади. Фокусировка излучения обычно производится с помощью отражателей, имеющих поверхность второго рода (эллиптические, параболические и т. д.). При этом для обработки образцов, размеры которых больше сфокусированного луча применяется сканирование луча по поверхности образца. Перераспределение больших равномерных потоков излучения осуществляется также с помощью отражателей специальной формы или плоских отражателей с зеркально отражающей поверхностью. Основным требованием, которому должны удовлетворять системы формирования потоков излучения, является достижение максимального использования энергии излучения источника при максимальной равномерности интенсивности излучения по сечению потока.

**Реактор**, в котором размещаются обрабатываемые образцы, должен иметь оптимальную форму для размещения обрабатываемых образцов, обеспечивать температурную нагрузку, необходимую для проведения термического процесса, а также наличие контролируемой среды.

**Подложкодержатель** служит для фиксации образца в зоне облучения. Для обеспечения максимальной эффективности термообработки необходимо создание оптимальной конструкции подложкодержателя, для того чтобы свести к минимуму передачу тепла от образца и механическое воздействие подложкодержателя на образец, приводящее при высокотемпературной термообработке к появлению размерных дефектов.

**Блок питания** предназначен для обеспечения электрической энергией источника излучения и управления энергетическими параметрами потока излучения.

**Контрольно-измерительный комплекс** управляет режимами термообработки по заданным и измеренным значениям параметров процесса при его протекании.

**Система загрузки – выгрузки** в основном определяет производительность и уровень автоматизации установки в целом.

**Система охлаждения отражателей** является не менее важным элементом установки, потому что в процессе термообработки достигаются довольно большие температуры, что приводит к перегреву отражателей и может привести к отказу всей установки. Система охлаждения обеспечивает нормализацию температуры отражателей.

В зависимости от геометрической формы отражателей и реактора, их взаиморасположения с излучателями наиболее часто применяемые в электронной промышленности отражательные печи прецизионного ИК-нагрева можно классифицировать по пяти основным типам (рис. 3.4):

- 1) тип А – коаксиальный цилиндрический реактор и отражатель с расположением ламп вдоль их образующих;
- 2) тип Б – плоские горизонтальные отражатели, прямоугольный реактор с поперечным расположением основной группы ламп;
- 3) тип В – вертикальный цилиндрический реактор с внешними поперечно расположенными лампами в отражательной камере;
- 4) тип Г – вертикальная отражательная камера, образующая реакционный объем с нагревом пьедестала от ламп, помещенных внутри него;
- 5) тип Д – полуоткрытые нагревательные камеры панельного типа.

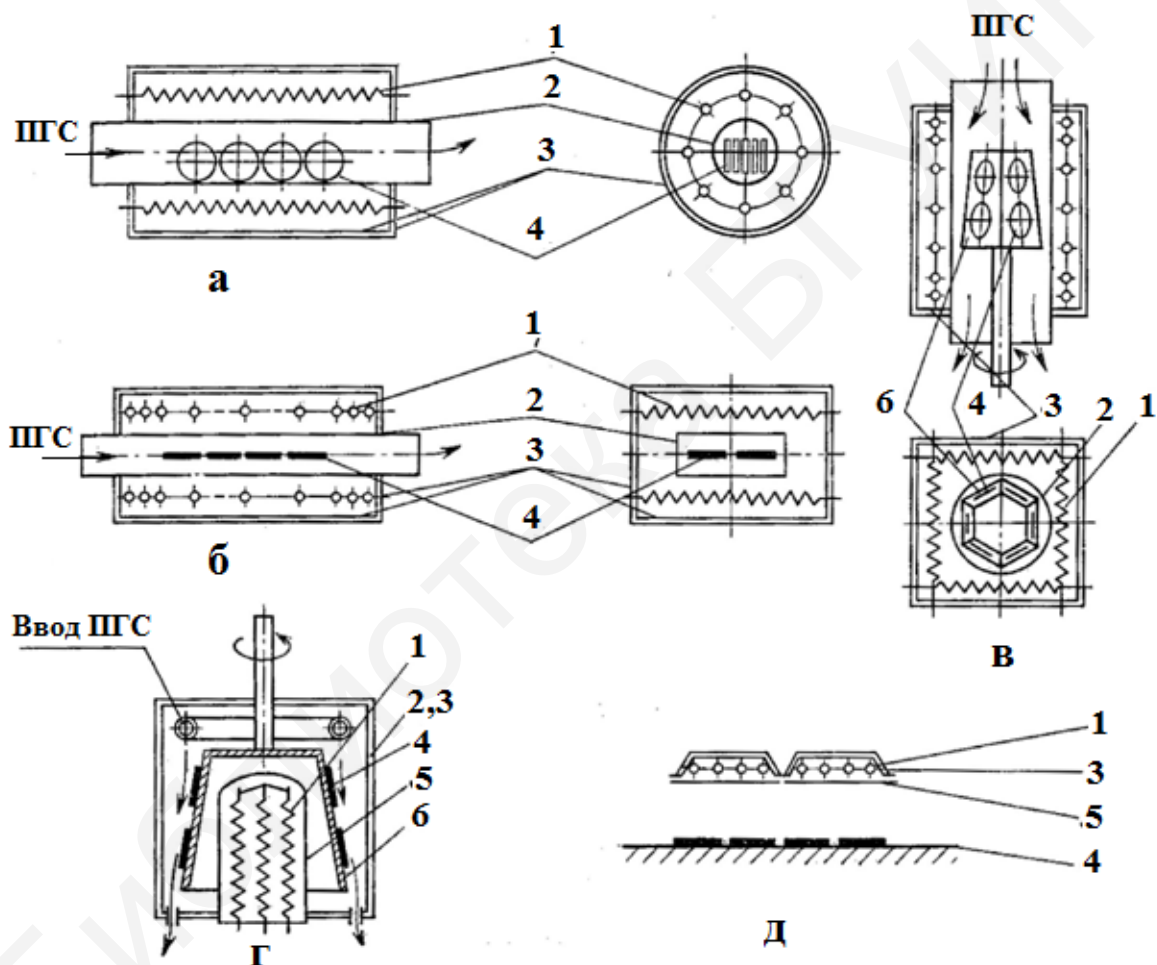


Рис. 3.4. Схемы основных конструктивных типов отражательных ИК-печей прецизионного нагрева:

а – тип А; б – тип Б; в – тип В; г – тип Г; д – тип Д

Здесь 1 – высокотемпературные ИК-излучатели (ГЛН); 2 – кварцевый реактор; 3 – водоохлаждаемые отражатели; 4 – нагреваемые подложки; 5 – лучепрозрачный экран; 6 – пьедестал; ПГС – парогазовая смесь.

Печи с вертикальным реактором (типы В и Г) работают в режиме периодического действия, остальные же (типы А, Б и Д) могут применяться как в режиме периодического действия, так и в режиме непрерывного действия (конвейерные печи).

### 3.2. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

В процессе выполнения лабораторной работы осуществляется экспериментальное исследование температурно-временных режимов термообработки кремниевых пластин на установке МИГ-2С, а также моделирование процесса термообработки кремниевых пластин с помощью программного комплекса *Heater*.

Установка скоростной термообработки МИГ-2С предназначена для индивидуальной термообработки керамических, металлических, полупроводниковых и полимерных подложек в заданном температурно-временном режиме в технологических процессах микроэлектроники в различной газовой среде (воздух, азот, кислород, аргон и др.). Технические характеристики установки приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Характеристики установки МИГ-2С

Наименование параметра	Значение параметра
Максимальный размер обрабатываемых подложек, мм	125×125
Максимальная потребляемая мощность, Вт	24
Напряжение сети, В	380/220+5 %
Регулируемый рабочий диапазон температур, °С	до 1200
Точность поддержания температуры, °С	±10
Рабочий временной интервал, с	1–99
Тип излучателя	Галогенные лампы КГ220-2000-3
Рабочая атмосфера в камере нагрева	Аргон, азот и другие неагрессивные газы
Регулировка подаваемой мощности	Ступенчатая, 999 ступеней

Программный комплекс *Heater* предназначен для моделирования процесса термообработки кремниевых пластин с помощью модульных источников ИК-излучения панельного типа, в которых в качестве первичных излучателей используются трубчатые галогенные лампы накаливания. Комплекс позволяет

рассчитать плотность потока ИК-излучения и температурное поле на поверхности пластины, а также механические напряжения, возникающие в ней при термообработке, в зависимости от конструктивных параметров модульных источников ИК-излучения (типа, количества и шага расположения ГЛН, геометрической формы профиля отражателя и др.) и параметров процесса термообработки (длительность процесса термообработки, напряжение питания ГЛН, расстояние от пластины до осей ГЛН и др.). Результаты расчетов представляются в виде таблиц значений плотности потока излучения, температуры и напряжений в каждой точке на поверхности пластины в зависимости от координат (расстояние от центра пластины по радиусу и угол от нулевого радиуса). Предусмотрено сохранение данных таблиц на диск. При этом создаются два файла: один – с исходными данными для расчетов, другой – с рассчитанными значениями. В программном комплексе имеется модуль трехмерной графики, позволяющий выводить на экран монитора трехмерное изображение рассчитанных величин.

### 3.2.1. Описание установки МИГ-2С

Установка МИГ-2С состоит из технологического блока 1 и блока питания и управления 2, электрически соединенных между собой (рис. 3.5).



Рис. 3.5. Внешний вид установки МИГ-2С

В технологическом блоке размещены верхний 1 и нижний 2 водоохлаждаемые плоские отражатели (рис. 3.6). В нижнем отражателе закреплены трубчатые ГЛН 3. Блок снабжен устройством загрузки обрабатываемых изделий со смонтированной на нем термопарой хромель-алюмель.

Для подачи рабочего газа в камеру на задней панели блока имеется штуцер ГАЗ. Вода подается по последовательной схеме через штуцер ВОДА, расположенный также на задней панели. Система охлаждения отражателей снабжена реле водяного давления, которое не позволяет включить установку без подачи воды.

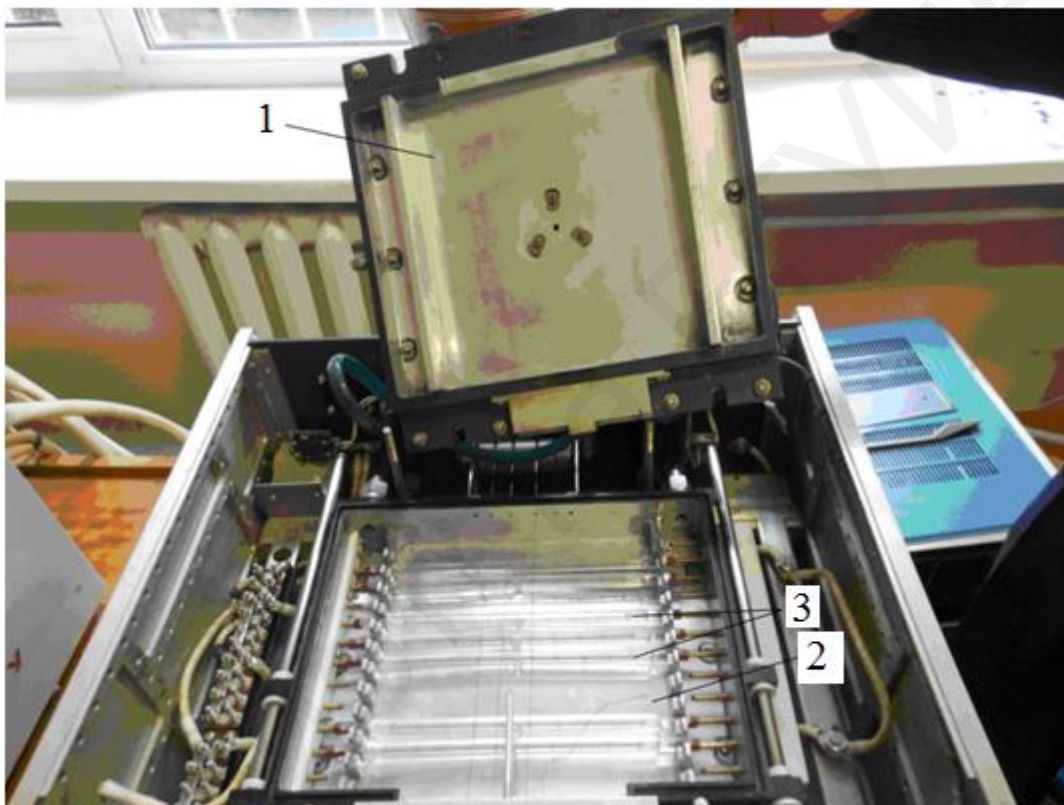


Рис. 3.6. Конструкция технологического блока установки МИГ-2С

Для формирования в рабочей зоне равномерного теплового поля в установке применена схема с отдельным электропитанием трех групп ГЛН от трех фаз переменного тока (рис. 3.7). Питание ламп осуществляется тиристорным регулятором мощности. Работа электрической схемы установки основана на устранении разности напряжений датчика температуры и термопары путем подачи напряжения питания на ГЛН. Мощность источника нагрева автоматически устанавливается при помощи пропорционально-интегрально-дифференциальной схемы регулирования на уровне, необходимом для ликвидации разбаланса указанных напряжений.

Длительность процесса задается с помощью счетчика времени (таймера). Начало длительности процесса отсчитывается с момента нажатия кнопки ПУСК.

Блок питания и управления содержит непосредственно блок питания, состоящий из магнитного пускателя и трех пар тиристоров Т15-100-7, расположенных на радиаторах и кассетницы с платами милливольтметра, стабилизаторов напряжения, компаратора, таймера и регулятора мощности.

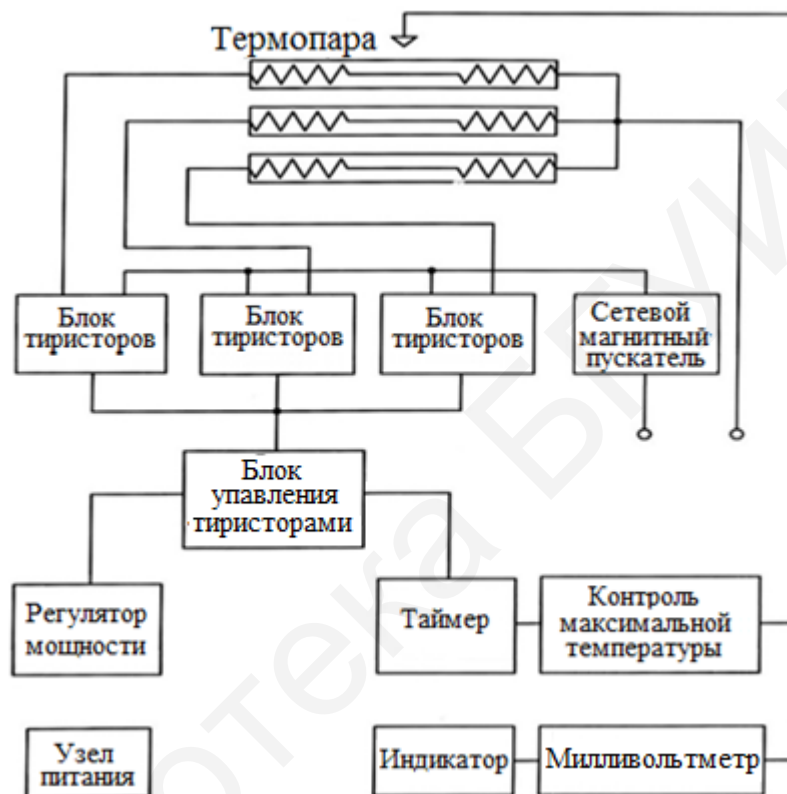


Рис. 3.7. Структурная схема установки МИГ-2С

На передней панели блока питания и управления расположены органы управления и контроля (см. рис. 3.5):

- кнопка СЕТЬ для включения питания установки;
- светодиод СЕТЬ, индицирующий включение питания установки;
- кнопка ПУСК для запуска процесса термообработки;
- кнопка СТОП для экстренной остановки процесса термообработки;
- переключатель ТЕМПЕРАТУРА, задающий значение ЭДС термопары, соответствующее необходимой температуре;
- переключатель ДЛИТЕЛЬНОСТЬ, задающий время термической обработки;
- переключатель МОЩНОСТЬ, задающий подаваемую мощность на галогенные лампы;

- двухразрядный светодиодный индикатор ВРЕМЯ, отображающий текущее время процесса термообработки;
- четырехразрядный светодиодный индикатор ТЕМПЕРАТУРА, отображающий значение ЭДС термопары, соответствующее текущей температуре процесса термообработки;
- светодиод ВРЕМЯ, осуществляющий индикацию достижения заданной длительности процесса термообработки;
- светодиод ТАЙМЕР, осуществляющий индикацию процесса термообработки;
- светодиод ПЕРЕГРЕВ, указывающий, что температура в рабочей камере до начала процесса термообработки выше температуры, заданной на переключателе ТЕМПЕРАТУРА;
- светодиод ТЕМПЕРАТУРА, указывающий, что температура в рабочей камере достигла температуры, заданной на переключателе ТЕМПЕРАТУРА.

### **3.2.2. Методика экспериментального исследования температурно-временных режимов процесса термообработки на установке МИГ-2С**

1. Перед включением установки внимательно изучить техническое описание и инструкцию по эксплуатации.
2. Проверить наличие заземления и его надежность.
3. Открыть подачу воды в установку.
4. Включить кабель питания установки в сеть.
5. Нажать кнопку СЕТЬ.
6. Установить с помощью переключателя ДЛИТЕЛЬНОСТЬ требуемое время термической обработки.
7. Определить по градуировочной характеристике термопары хромель-алюмель (табл. 3.2) значение ЭДС, соответствующее выбранной температуре, и установить это значение с помощью переключателя ТЕМПЕРАТУРА.
8. Установить с помощью программного переключателя МОЩНОСТЬ требуемую мощность нагрева, подводимую к излучателям.
9. Выдвинуть загрузочное устройство. Поместить обрабатываемое изделие (пластину) на держатель.
10. Осторожно задвинуть загрузочное устройство до получения контакта в контактной группе термопары, что можно определить по индикатору на блоке питания и управления.
11. Нажать кнопку ПУСК. При этом начинается процесс термообработки по заданному циклу. При достижении заданной температуры загорается свето-

диод ТЕМПЕРАТУРА и подача напряжения на ГЛН прекращается. Отключение цикла происходит по окончании заданного времени термообработки автоматически, при этом сбрасывается показание таймера и загорается светодиод ВРЕМЯ.

12. Выдвинуть загрузочное устройство, снять обрабатываемую пластину с держателя – установка готова к следующему циклу термообработки.

13. По окончании работы необходимо дождаться охлаждения рабочей камеры до безопасной температуры, отключить установку от сети нажатием кнопки СЕТЬ и отключением кабеля питания от сети, закрыть подачу воды в установку.

Таблица 3.2

Градуировочная характеристика термопары хромель-алюмель

<i>T</i> , °C	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0	0,40	0,80	1,20	1,61	2,02	2,43	2,85	3,26	3,68
100	4,10	4,51	4,92	5,33	5,73	6,13	6,53	6,93	7,33	7,73
200	8,13	8,53	8,93	9,34	9,74	10,15	10,56	10,97	11,38	11,80
300	12,21	12,62	13,04	13,45	13,87	14,20	14,71	15,13	15,55	15,97
400	16,39	16,83	17,25	17,67	18,09	18,51	18,94	19,37	19,79	20,02
500	20,65	21,08	21,50	21,93	22,35	22,78	23,21	23,62	24,06	24,48
600	24,90	25,32	25,75	26,18	26,60	27,03	27,44	27,87	28,29	28,72
700	29,13	29,55	29,97	30,39	30,81	31,22	31,64	32,06	32,47	32,88
800	33,29	33,69	34,10	34,51	34,92	35,33	35,73	36,14	36,53	36,93
900	37,36	37,76	38,16	38,56	38,96	39,35	39,75	40,14	40,53	40,92
1000	41,31	41,70	42,08	42,47	42,86	43,24	43,62	44,00	44,38	44,76
1100	45,14	45,52	45,89	46,27	46,64	47,01	47,38	47,75	48,12	48,48

### 3.2.3. Методика моделирования процесса термообработки кремниевой пластины с использованием программного комплекса *Heater*

1. Загрузить файл *Heater.exe*. При этом на экране монитора появится окно программного комплекса с открытой по умолчанию вкладкой **Исходные данные** (рис. 3.8).

2. В зоне вкладки **Тип лампы** из выпадающего списка окна выбрать необходимый тип ГЛН (рис. 3.9). При этом в соответствующих окнах, расположенных ниже, отобразятся значения параметров ГЛН, используемые при расчете теплового потока.

3. В зоне вкладки **Параметры устройства ИК-нагрева** в соответствующих окнах ввода задать требуемые значения параметров устройства ИК-нагрева (в соответствии с индивидуальным заданием на выполнение лабораторной работы).



4. В зоне вкладки **Динамические параметры** аналогичным образом задать значения времени нагрева, угловой скорости вращения пластины и точности (в соответствии с индивидуальным заданием на выполнение лабораторной работы).

5. В зоне вкладки **График** для первого и второго графиков зависимости температуры от времени нагрева задать координаты точек, для которых будут построены эти графики (в соответствии с индивидуальным заданием на выполнение лабораторной работы).

6. Перейти к вкладке **Тепловой поток**. Нажать кнопку РАСЧЕТ. При этом в таблице отобразятся рассчитанные значения плотности потока ИК-излучения, максимальное, минимальное и среднее значения плотности потока, полярные координаты соответствующих точек на поверхности кремниевой пластины, разность между максимальным и минимальным ( $\max - \min$ ) значениями и величина относительной неравномерности плотности потока ИК-излучения (рис. 3.10). При нажатии кнопки ГРАФИК на экран выводится 3D-график распределения потока ИК-излучения по пластине (рис. 3.11).

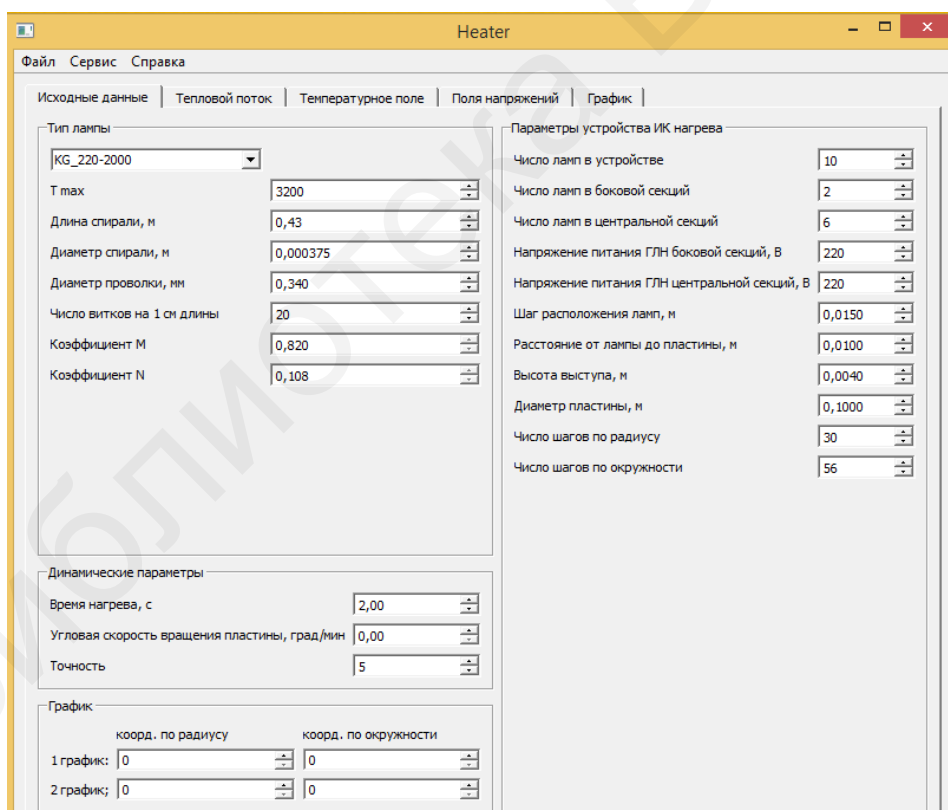


Рис. 3.8. Главное окно программного комплекса *Heater*

Файл Сервис Справка

Исходные данные | Тепловой поток | Температурное поле | Поля напряжений | График

Тип лампы

KG\_220-2000

KG\_220-2000  
 KI\_220-2000-2(3)  
 KI\_220-1300  
 KI\_220-1000-1  
 KI\_220-1000-3(4)  
 диаметр спирали, м

Диаметр проволоки, мм

Число витков на 1 см длины

Коэффициент M

Коэффициент N

3200  
 0,43  
 0,000375  
 0,340  
 20  
 0,820  
 0,108

Параметры устройства ИК нагрева

Число ламп в устройстве

Число ламп в боковой секций

Число ламп в центральной секций

Напряжение питания ГЛН боковой секций, В

Напряжение питания ГЛН центральной секций, В

Шаг расположения ламп, м

Расстояние от лампы до пластины, м

Высота выступа, м

10  
 2  
 6  
 220  
 220  
 0,0150  
 0,0100  
 0,0040

Рис. 3.9. Выбор типа ГЛН

Файл Сервис Справка

Исходные данные | Тепловой поток | Температурное поле | Поля напряжений | График

Расчет температурного потока

	1	2	3	4	5	6	
1	19.625	19.641	19.666	19.698	19.737	19.781	19.826
2	19.641	19.702	19.800	19.927	20.074	20.234	20.396
3	19.667	19.804	20.016	20.285	20.587	20.897	21.194
4	19.703	19.942	20.304	20.742	21.202	23.734	24.254
5	19.750	20.115	20.648	21.251	23.996	24.669	25.174
6	19.806	20.318	21.028	23.907	24.768	25.369	25.661
7	19.871	20.545	23.443	24.558	25.354	25.690	25.582
8	19.946	20.793	23.968	25.105	25.665	25.561	24.958
9	20.029	21.052	24.466	25.494	25.651	25.012	23.959
10	20.121	21.318	24.909	25.685	25.315	24.158	20.965
11	20.220	23.660	25.271	25.656	24.709	21.218	20.211

Расчет

График

Сохранить

Макс. значение: 25.700

Мин. значение: 19.620

Координаты: 5:10  
5:18  
5:38  
5:46  
15:10  
15:18

Координаты: 14:28  
14:56  
15:28  
15:56  
16:28  
16:56

Max-Min: 6.081

Среднее: 22.416

Относительная неравномерность: 0.271

Рис. 3.10. Вкладка Тепловой поток

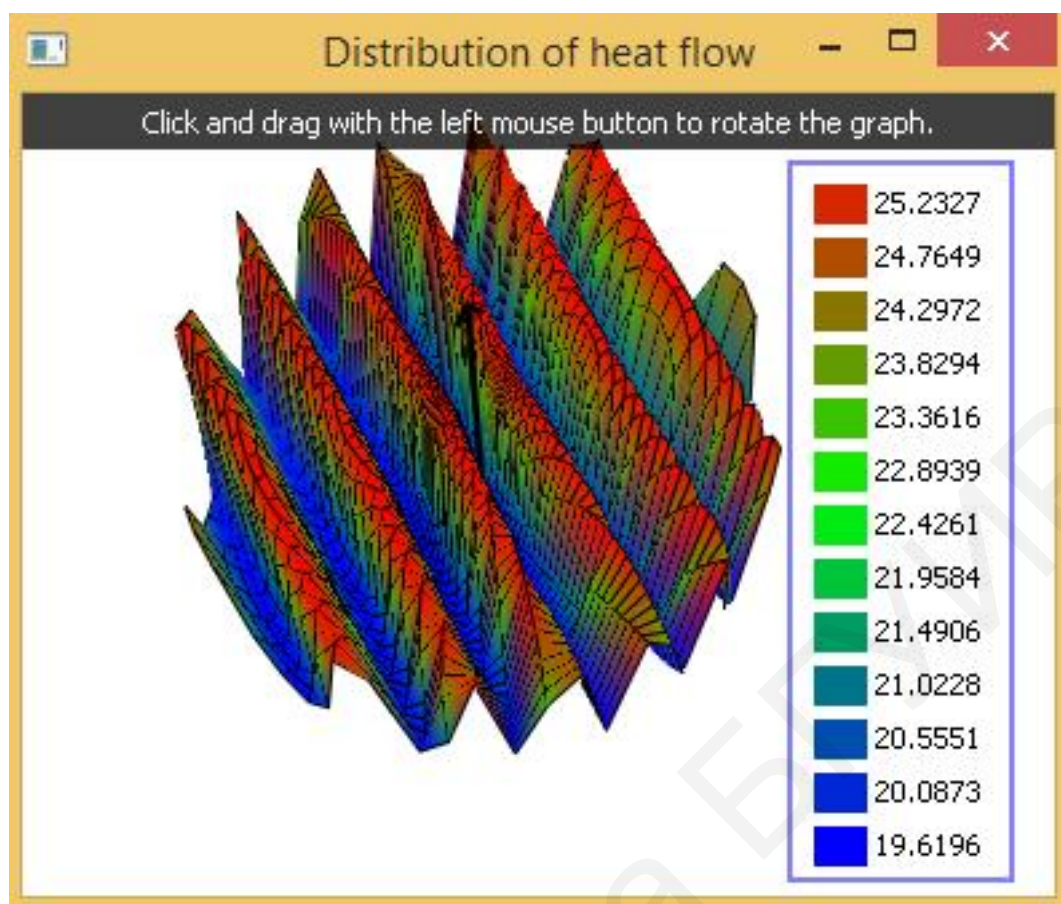


Рис. 3.11. Окно вывода 3D-графика потока ИК-излучения

7. Перейти к вкладке **Температурное поле**. Нажать кнопку РАСЧЕТ. При этом в таблице отобразятся значения температуры в градусах Цельсия в соответствующих точках на поверхности кремниевой пластины, максимальное и минимальное значения температуры и полярные координаты соответствующих точек на поверхности кремниевой пластины, разность между максимальным и минимальным (max – min) значениями, среднее значение и величина относительной неравномерности температуры (рис. 3.12).

При нажатии кнопки ГРАФИК на экран выводится 3D-график распределения температуры по поверхности пластины (рис. 3.13).

8. Перейти к вкладке **График**. Здесь отображаются двумерные графики зависимости температуры от времени нагрева для точек на поверхности пластины, координаты которых были заданы в вкладке **Исходные данные** (рис. 3.14). В правой части вкладки отображаются рассчитанные значения температуры для соответствующих значений времени нагрева.

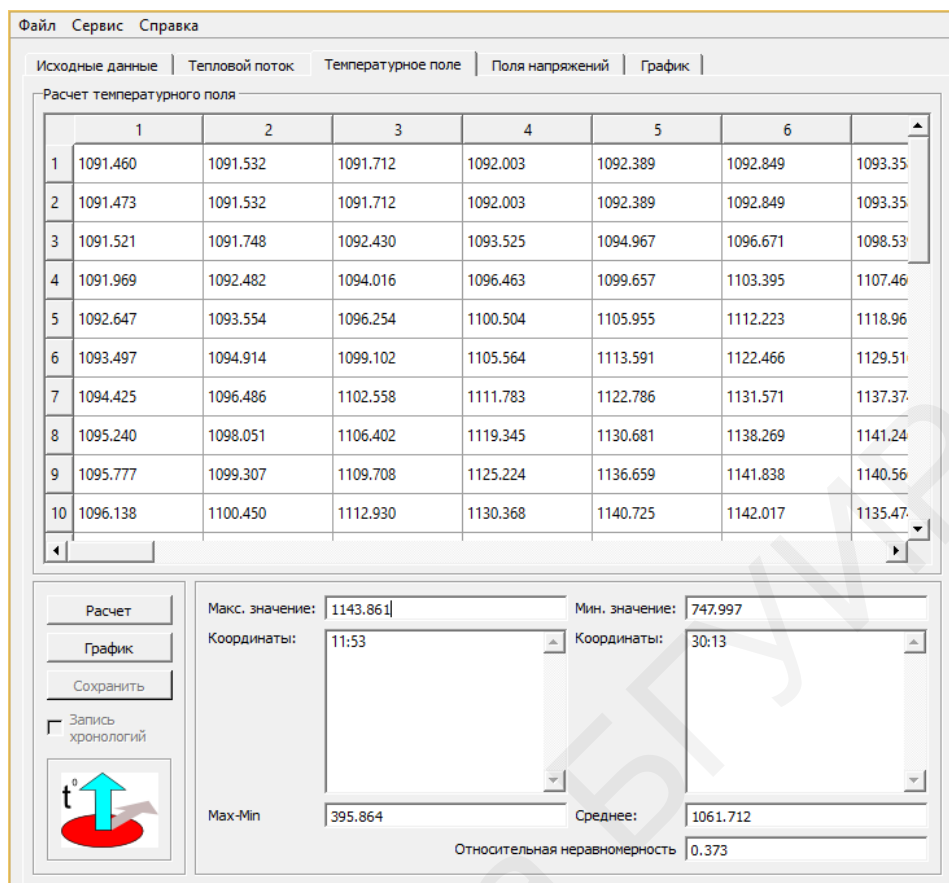


Рис. 3.12. Вкладка Температурное поле

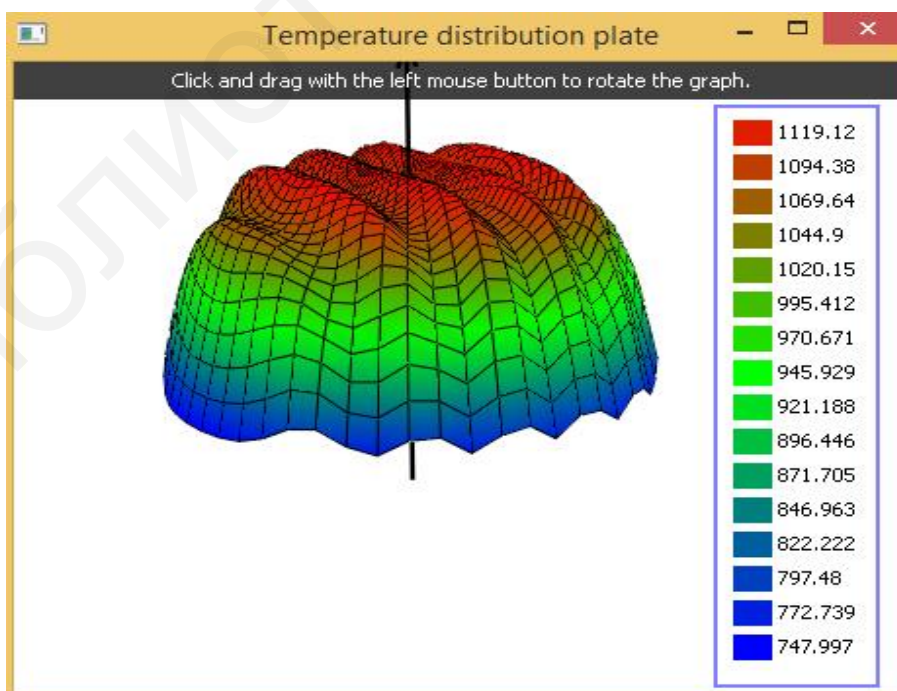


Рис. 3.13. Окно вывода 3D-графика распределения температуры

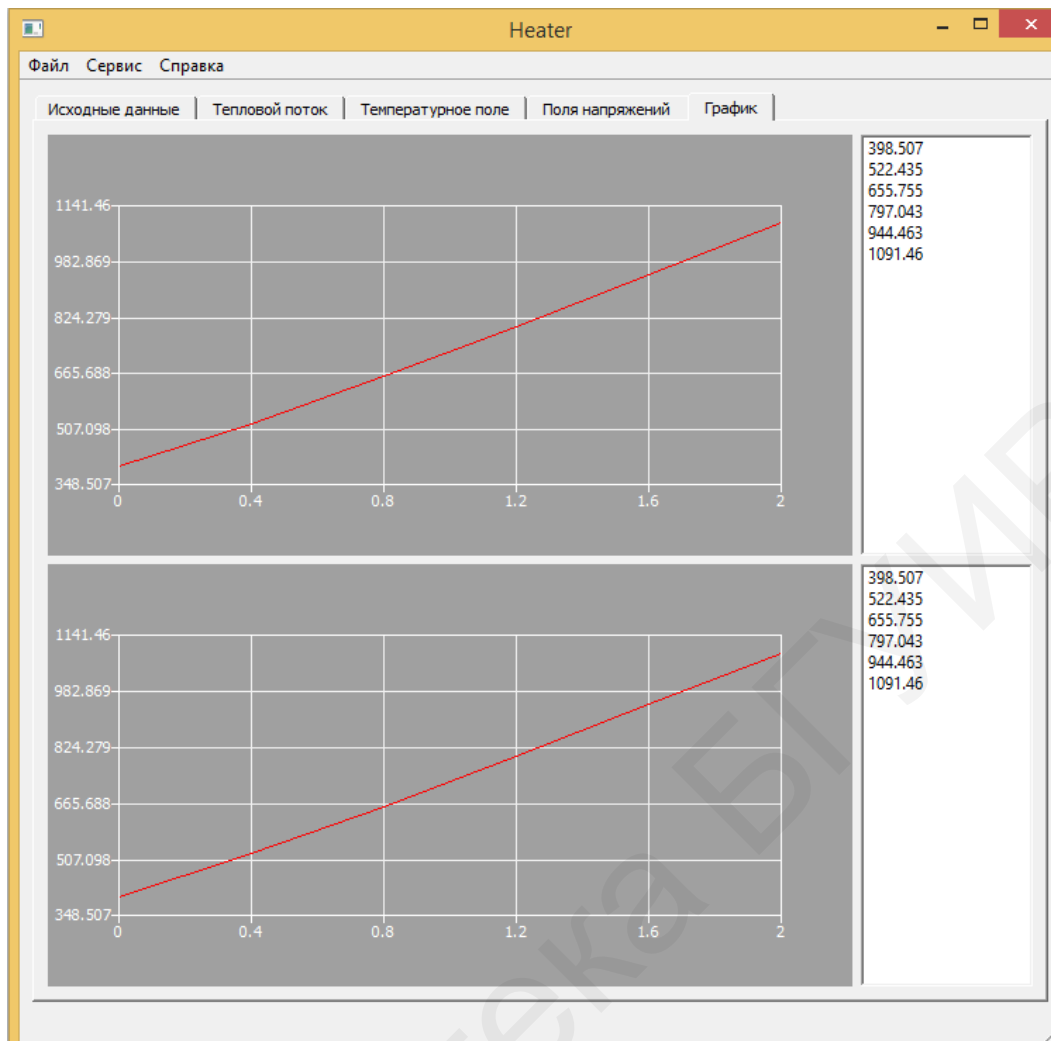


Рис. 3.14. Вкладка **График**

### 3.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Перед началом выполнения работы ознакомиться с правилами техники безопасности и инструкцией по эксплуатации используемого в работе оборудования.
2. Получить у преподавателя индивидуальное задание лабораторной работы.
3. Провести экспериментальное исследование зависимости температуры кремниевой пластины от времени нагрева в соответствии с индивидуальным заданием на стадии нагрева и остывания. В процессе нагрева и остывания пластины фиксировать показания индикатора **ТЕМПЕРАТУРА** через каждые 10 с.
4. Определить по снятым зависимостям скорости нагрева и остывания объекта на различных этапах термообработки.
5. Провести моделирование процесса нагрева кремниевой пластины с использованием программного комплекса *Heater* в соответствии с индивиду-

альным заданием. Сравнить расчетные результаты с экспериментальными.

6. Оформить отчет по работе.

### 3.4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Таблицы результатов экспериментальных исследований.
4. Графические экспериментальные и расчетные зависимости температуры от времени нагрева.
5. Выводы по работе.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Дайте характеристику теплового излучения.
2. Дайте характеристику отражательной, поглощательной и пропускательной способностям твердого тела.
3. Каков механизм взаимодействия ИК-излучения с металлами?
4. Каков механизм взаимодействия ИК-излучения с полупроводниковыми материалами?
5. Чем определяется изменение температуры твердого тела во времени при воздействии на него ИК-излучения?
6. Какими величинами определяется максимально достижимая температура объекта при ИК-нагреве?
7. Дайте характеристику областей применения ИК-нагрева в электронной промышленности.
8. Каковы особенности применения ИК-нагрева в производстве изделий электронной техники?
9. Приведите краткую характеристику основных конструктивных типов отражательных ИК-печей.
10. Перечислите основные конструктивные элементы большинства отражательных ИК-печей.
11. Для чего предназначена установка МИГ-2С?
12. Какие блоки входят в состав установки МИГ-2С?
13. Дайте характеристику основного назначения блоков установки МИГ-2С.
14. Для чего предназначен программный комплекс *Heater*?
15. Изложите методику моделирования процесса термообработки кремневых пластин с помощью программного комплекса *Heater*.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Физические основы быстрой термообработки. Отжиг поликристаллического кремния, диэлектрических пленок, очистка поверхности и эпитаксия / В. А. Пилипенко [и др.]. – Минск : БГУ, 2002. – 131 с.
2. Лабунов, В. А. Импульсная термообработка материалов полупроводниковой электроники некогерентным светом / В. А. Лабунов, В. Е. Борисенко, В. В. Грибковский // Зарубежная электронная техника. – 1983. – №1(259).
3. Борисенко, В. Е. Твердофазные процессы в полупроводниках при импульсном нагреве / В. Е. Борисенко ; под. ред. В. А. Лабунова. – Минск : Наука і тэхніка, 1992. – 248 с.
4. Пилипенко, В. А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В. А. Пилипенко. – Минск : Изд. центр БГУ, 2004. – 531 с.
5. Технологии, оборудование и системы управления в электронном машиностроении. Машиностроение. Энциклопедия / Ю. В. Панфилов [и др.]. – М. : Машиностроение. – 2005. – 744 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

**Цель работы:** ознакомиться с физической природой различных видов электроэрозионной обработки материалов; изучить размерные (формообразующие) и неразмерные (упрочняюще-чистовые отделочные) операции электроэрозионной обработки; исследовать процесс электроискрового упрочнения конструкционных материалов с применением метода планирования эксперимента, получить регрессионное уравнение, связывающее твердость обработанной поверхности с параметрами электроискрового разряда.

### 4.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Электроэрозионная обработка является одним из методов электрофизико-химической и комбинированной обработки (ЭФХКО), основанной на непосредственном использовании тепловой энергии электрического тока. Она ведется импульсами электрического тока и имеет как размерные (формообразующие), так и неразмерные (упрочняюще-чистовые) операции. Формообразующие операции ведутся по схеме, представленной на рис. 4.1.

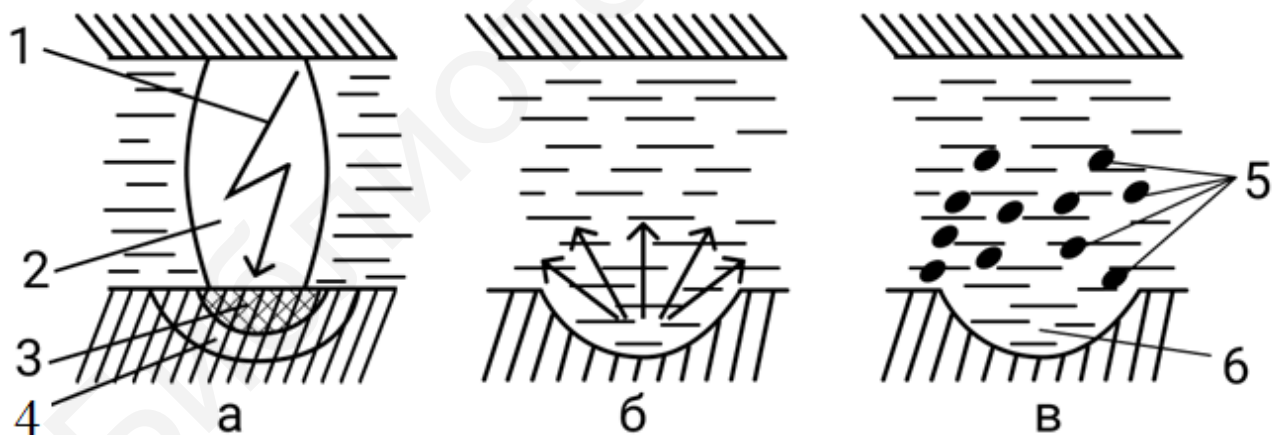


Рис. 4.1. Схема размерной электроэрозионной обработки по стадиям:  
а – прохождение импульса электрического тока; б – выброс материала;  
в – стационарный процесс

Здесь 1 – газовая полость; 2 – канал проводимости; 3 – зона испарения; 4 – зона плавления; 5, 6 – гранулы застывшего металла (шлам).



Формообразующая электроэрозионная обработка основана на эффекте расплавления и испарения микропорций материала под тепловым воздействием импульсов электрической энергии, которая выделяется в канале электрического разряда между поверхностью обрабатываемой детали и электродом-инструментом, погруженными в жидкую непроводящую среду. Следующие друг за другом импульсные разряды определенной длительности и формы производят выплавление и испарение микропорций металла.

Электроэрозионная обработка может осуществляться профилированным или непрофилированным электродом-инструментом (ЭИ).

В первом случае размеры и форма рабочих частей ЭИ определяются в соответствии с заданной поверхностью изготавливаемой детали.

Во втором случае ЭИ имеет простейшую конфигурацию (проволока, диск или стержень), а его размеры лишь частично связаны с размерами электрода-детали.

Для создания периодических разрядов к электродам (электроду-детали и электроду-инструменту) подводится электроэнергия такой мощности, что создается напряжение на электродах, равное напряжению пробоя межэлектродного промежутка. Чтобы процесс обработки не прерывался, межэлектродный промежуток должен быть постоянным. Для этого в электроэрозионных станках предусмотрено устройство, автоматически перемещающее электрод-инструмент к обрабатываемой детали по мере снятия материала электрода-детали.

Электрическая эрозия более интенсивно проявляется при заполнении межэлектродного пространства жидким диэлектриком (дистиллированной водой, маслами, керосином и др.). Исследования показали, что в момент разряда в канале пробоя диэлектрика возникает температура порядка 40 000 К, а на поверхностях электродов – до 10 000 К. Канал разряда образуется между выступами на электродах, лежащих на кратчайшем расстоянии друг от друга. Следующий разряд возникает уже в другом месте, где точки на электродах оказываются ближайшими друг к другу.

При сильном разогревании в результате прохождения электрического тока поверхность электродов оплавляется и частично превращается в газ. Газ выплескивается из лунки жидкий металл, который попадает в диэлектрик, охлаждается и затвердевает в виде шариков. Образующиеся при этом газы, металлические частицы, продукты окисления делают процесс неустойчивым. Для его стабилизации в ванне создают поток жидкого диэлектрика, который выносит образующиеся продукты эрозии из разрядного промежутка.

Чем меньше межэлектродный промежуток, тем меньше пробивное напряжение. Оптимальный промежуток в масляном диэлектрике равен примерно 76 мкм. Производительность и точность обработки, шероховатость получаемой поверхности зависят от многих факторов, но важнейшими являются энер-

гия и длительность разряда, форма инструмента, материал детали, инструмента и межэлектродного промежутка, взаимное расположение и размеры детали и инструмента.

Чем короче разряд и больше его мощность, тем больше энергии сконцентрировано в объеме разряда и тем выше температура и интенсивность съема металла. Длительный, большой мощности разряд имеет дуговой характер – при нем производительность резко возрастает, но катод разрушается сильнее. Продолжительность интервалов между импульсами тока должна быть такой, чтобы обеспечивалось удаление из межэлектродного промежутка газовых пузырьков, продуктов эрозии и ионов, препятствующих последующему разряду.

При определенных режимах обработки можно добиться того, что эрозия одного из электродов будет значительно больше, чем другого. Это явление называют полярным эффектом. Если материал электродов одинаков, то при импульсах малой и средней продолжительности большая эрозия будет у анода, при импульсах большей длительности – у катода.

Процесс электрической эрозии не зависит от механических свойств материалов (прочности, твердости, вязкости), а определяется их теплофизическими характеристиками. В зависимости от времени расплавления данного объема металла определяются эрозионная стойкость и обрабатываемость различных материалов по критерию Палатника:

$$П = C_p \cdot \lambda \cdot \rho \cdot T_{пл}, \quad (4.1)$$

где  $C_p$  – теплоемкость при постоянном давлении;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$\rho$  – плотность;

$T_{пл}$  – температура плавления материала.

Разрушение материала электрода происходит при переводе его в жидкое состояние. Чем больше значение критерия  $П$ , тем при равных условиях обработки выше электроэрозионная стойкость и ниже обрабатываемость.

Вид электроэрозионной обработки определяется характеристиками разряда. Классификация методов электроэрозионной обработки приведена на рис. 4.2.



Рис. 4.2. Виды электроэрозионной обработки

Особенности электроискровой обработки: длительность импульсов 10–200 мкс при частоте 2–5 кГц; прямая полярность (электрод-инструмент подключается к отрицательному полюсу источника тока); возможность создания режимов обработки от черновых (производительность 100–500 мм/мин при шероховатости поверхности  $R_z$ , равной 160–180) до чистовых (производительность 0,01–0,1 мм/мин при шероховатости поверхности  $R_z$ , равной 1,6–6,3); образование на поверхности детали тонкого дефектного слоя; большой износ электродов-инструментов (до 50–1000 % объема обработанного материала); возможность механизации и автоматизации процесса.

Применяют электроискровую обработку для получения точных деталей с высоким качеством поверхности. Для обеспечения требуемых физико-механических свойств необходима последующая абразивная обработка поверхности. Электроискровую обработку используют для изготовления и ремонта матриц штампов из закаленных сталей и твердых сплавов, получения отверстий диаметром до 0,1 мм и извлечения сломанного инструмента (метчиков, сверл и др.) из деталей.

В зависимости от технологических потребностей различают жесткие (грубые, обдирочные, черновые), средние (чистовые, сглаживающие) и мягкие (тонкие, отделочные) режимы обработки. Под режимами понимают сочетание энергии импульсов, их длительности и напряжения на электродах, при котором происходит пробой.

Так как на практике осуществить контроль за этими величинами трудно, то пользуются другими электрическими параметрами: частотой следования им-

пульсов, длительностью, напряжением и силой тока в импульсе (при использовании импульсных генераторов); емкостью конденсаторов, величиной зарядного тока, напряжением на электродах (при использовании релаксационных схем).

Недостатком электроискровой обработки является невысокая стойкость электрода-инструмента. Износ инструмента приводит к изменению размеров обрабатываемой поверхности. Поэтому одним инструментом обрабатывают 5–10 деталей. При сложной форме инструмента изготовление его длительно и дорого, а установка на электроэрозионном станке требует высоких навыков, т. к. незначительный перекос приводит к большому искажению формы обрабатываемой поверхности.

Инструмент должен быть электропроводным, эрозиостойким, легко и просто обрабатываться. Чаще всего для обработки сталей и твердых сплавов при электроискровой обработке для инструмента выбирают латунь, медь, алюминий; при электроимпульсной – графит, латунь и др. Для уменьшения износа инструмента применяют обработку непрофилированным инструментом, тонкой натянутой проволокой, непрерывно перематывающейся с одной катушки на другую. В обрабатываемой детали предварительно прошивают отверстие, чтобы в него ввести тонкую проволоку диаметром 0,1–0,3 мм. Деталь получает движение по копиру, заданной программе или используется ручное управление.

Электроимпульсная обработка аналогична электроискровой, но для нее характерны применение обратной полярности (электрод-инструмент соединен с положительным полюсом источника тока) и длительность импульсов 0,5–10 мс. Производительность при электроимпульсной обработке высокая (от 5000 до 15 000 мм/мин), точность низкая, шероховатость  $R_z$ , равная 40–80, достигаемая при самых мягких режимах. Износ инструмента, особенно графитового, незначителен (0,1–0,5 % от объема снятого материала). Станки работают при низком напряжении (25–30 В) и большом токе (50–500 А). Источники электрического тока – машинные генераторы импульсов низкой и средней частоты (400–3000 Гц).

Этот метод применяют для снятия больших объемов материала и получения отверстий сложной формы в матрицах и других деталях из легированных сталей и сплавов. На черновых операциях он производительнее обработки резанием, но требует дополнительной чистовой обработки.

Высокочастотная электроэрозионная обработка – наиболее производительный и точный метод чистовой обработки, позволяющий получать поверхности с шероховатостью  $R_z$ , равной 0,8–1,6, без последующей доводки. При съеме металла в пределах 15–20 мм/мин обеспечивается шероховатость  $R_z$ , равная 6,3–10, в пределах 3–10 мм/мин – 0,8–3,2. Колебания размеров обработанных поверхностей получают в пределах 1–3 мкм.

Высокочастотную электроэрозионную обработку производят на обычных электроэрозионных станках, оснащенных специальными приставками-генераторами, и применяют для обработки твердосплавных пуансонов и матриц штампов, пресс-форм, литевых форм и других деталей.

Электроконтактная обработка отличается тем, что импульсы электрической энергии генерируются в результате взаимного перемещения электродов или за счет прерывания электрического разряда при прокачке жидкости под давлением. Ее проводят на постоянном и переменном токе на воздухе или в жидкости при значительных токах (до 500 А) и напряжении холостого хода источников питания 20–40 В.

Электроконтактным методом производят полустовое точение тел вращения, чистовую резку, прошивание цилиндрических и фасонных отверстий и объемных полостей, фрезерование, шлифование и др. Метод особенно эффективен при обработке заготовок из труднообрабатываемых сталей и сплавов, монокристаллов, материалов с высокими теплофизическими свойствами. Электроконтактную обработку применяют, как правило, на заготовительных операциях и на операциях черновой обработки заготовок с большими припусками.

В табл. 4.1 приводятся основные технологические операции, проводимые с помощью электроэрозионной обработки.

Важным преимуществом электроэрозионной обработки является то, что при определенных условиях резко повышаются прочностные характеристики поверхности обрабатываемых деталей. Растут жаростойкость и эрозионная стойкость поверхностного слоя изделий. Эти особенности метода используют для повышения износостойкости режущего инструмента, штампов, пресс-форм, кокилей и других изделий.

При электроэрозионном упрочнении применяют обратную полярность (заготовка является катодом, инструмент – анодом). Обработку производят в газовой ( $Ar$ ,  $N_2$ ) и ряде случаев воздушной среде и, как правило, с вибрацией электрода. Технологическое оборудование, с помощью которого осуществляется процесс упрочнения, малогабаритное и простое в эксплуатации.

Электроэрозионный способ нанесения покрытий имеет следующие достоинства: обеспечивается большая прочность сцепления покрытия с материалом основы; покрываемые поверхности не требуют предварительной подготовки – возможно нанесение не только металлов и сплавов, но и их композиций; на локальных участках обрабатываемой поверхности можно проводить сложные микрометаллургические процессы (табл. 4.2).

Таблица 4.1

Виды работ, выполняемых на электроэрозионных станках, и их эффективность по сравнению с обычной механической обработкой

Выполняемая работа	Эффективность
Обработка сложного профиля ручьев кованых штампов	Сокращение трудоемкости до двух раз; уменьшение слесарных работ на 30–40 %; экономия материала
Обработка формирующих полостей сложных литевых форм	Сокращение трудоемкости на 20–30 %; повышение стойкости за счет применения более стойких материалов
Обработка матриц и пуансонов вытяжных штампов	Сокращение трудоемкости в 1,5–2 раза; уменьшение объема слесарных работ на 40–50 %
Многоинструментальная прошивка фасонных отверстий в матрицах вырубных штампов	Сокращение трудоемкости в 1–2 раза; повышение точности
Прошивка отверстий в матрицах стальных серийных штампов	Устранение ручных работ; повышение точности
Профилирование пуансонов по профилю матрицы штампов	Сокращение слесарных работ, в том числе по образованию зазоров
Обработка фасонных полостей высадочного инструмента	Снижение трудоемкости в 2–5 раз
Прошивка фасонных отверстий в матрицах для прессования	Сокращение трудоемкости в 2 раза
Обработка объемных деталей сложной формы из труднообрабатываемых материалов	Снижение трудоемкости в 2–5 раз; сокращение расходов на режущий инструмент и производственные площади
Прошивка отверстий сложного профиля в труднообрабатываемых материалах	Сокращение трудоемкости в 2–5 раз; снижение расхода режущего инструмента
Прошивка щелевидных отверстий в закаленных сталях и труднообрабатываемых материалах	Сокращение трудоемкости до 5 раз; получение конструктивных решений
Многоинструментальная прошивка решеток, сит и других деталей	Снижение трудоемкости в 3–10 раз; уменьшение износа инструмента
Изготовление сеток электровакуумных приборов	Возможность создания новых приборов
Изготовление тонких пластинчатых деталей (пружин, мембран)	Снижение трудоемкости; возможность создания новых приборов
Прошивка отверстий диаметром до 0,5 мм	Снижение трудоемкости; уменьшение износа инструмента
Гравирование и клеймение	Повышение качества и снижения трудоемкости
Обработка для создания особых свойств поверхностного слоя	Повышение износостойкости, качества и эксплуатационных свойств
Исправление и усовершенствование конструкций; извлечение сломанных инструментов	Устранение брака, возможность внесения исправлений в конструкцию деталей

Физико-химические процессы, протекающие в поверхностном слое заготовок при электроэрозионном упрочнении

Упрочняемый материал	Процесс	
	наименование	особенности
Высокоуглеродистая и высоколегированная сталь	Сверхскоростная закалка	Кратковременный нагрев до высокой температуры и мгновенное охлаждение нагретых и расплавленных участков массой холодного металла
Инструментальная сталь	Азотирование	Диссоциация атмосферного азота в разряде с образованием атомарного азота. Соединение азота с элементами поверхностного слоя и образование нитридов
Малоуглеродистая и слаболегированная сталь	Цементирование	Растворение в расплавленном и высоконагретом металле углерода, элементов или окружающей среды с образованием карбидов железа, хрома, титана и др.
Сталь	Обогащение легирующими элементами	Контактный перенос материала электрода на заготовку при соприкосновении их под давлением, в расплавленном состоянии и газовая диффузия

Сущность электроэрозионного упрочнения состоит в том, что при электроискровом разряде в газовой (в ряде случаев в воздушной) среде происходит полярный перенос материала электрода-инструмента на заготовку. Перенесенный материал электрода легирует металл заготовки и, химически соединяясь с диссоциированным атомарным азотом воздуха, углеродом и материалом заготовки, образует диффузионный, износоустойчивый упрочненный поверхностный слой. При этом в слое возникают сложные химические соединения, высокостойкие нитриды и карбонитриды, а также закалочные структуры. При обычных мощностях упрочнения толщина слоя покрытия может составлять 0,003–0,2 мм. При высокой мощности упрочнения можно получать глубину слоя до 0,5–1,5 мм с микротвердостью 50–60 МПа и выше. Различают чистовую обработку, которая соответствует высоким напряжениям и небольшим значениям токов короткого замыкания (до 20 А), и грубую (глубокое легирование) при низких напряжениях (50–60 В) и токах короткого замыкания свыше 20 А.

Формирование импульсов тока, подводимых к электродам электроэрозионного станка, производится с помощью генераторов импульсов, которые можно разделить на два класса: зависимые (их еще называют релаксационные) и независимые.

К первым относятся такие генераторы, в которых создание импульсов напряжения и тока осуществляется при участии межэлектродного промежутка.

В независимых генераторах электрические импульсы формируются в самом генераторе и подводятся к межэлектродному промежутку.

Релаксационные генераторы используют при электроискровой обработке, независимые – при электроимпульсной.

На рис. 4.3, а приведена схема выходного каскада релаксационного  $RC$ -генератора. Такой генератор получил широкое распространение вследствие простоты и надежности. Накопительный конденсатор  $C$  заряжается от источника постоянного тока напряжением 100–200 В через токоограничительный резистор  $R$ . Межэлектродный промежуток включен параллельно конденсатору. По мере заряда конденсатора напряжение на его обкладках и между электродами эрозионного промежутка увеличивается. При достижении пробивного напряжения  $U_{пр}$  (рис. 4.3, б) происходит пробой межэлектродного промежутка, и запасенная в накопительном конденсаторе энергия выделяется в виде короткого импульса большой мощности, вызывая эрозию электродов. При разряде конденсатора напряжение между электродом-деталью 1 и электродом-инструментом 2 уменьшается до значения, при котором разряд между электродами прекращается. Сопротивление межэлектродного промежутка резко увеличивается, ток быстро уменьшается до нуля. Межэлектродный промежуток восстанавливает свои диэлектрические свойства, начинается зарядка накопительного конденсатора.

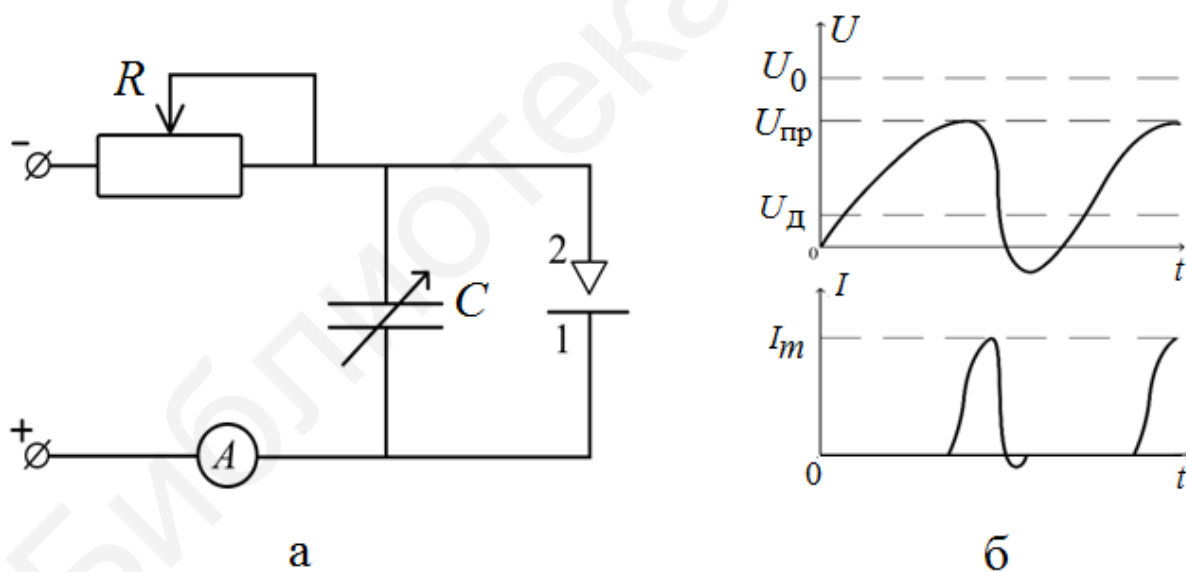


Рис. 4.3. Схема проведения электроискровой обработки с использованием релаксационного  $RC$ -генератора:  
 а – электрическая схема выходного каскада  $RC$ -генератора;  
 б – эюры напряжения ( $U$ ) и тока ( $I$ ) на электродах в межэлектродном пространстве



Далее процесс повторяется с частотой, зависящей от параметров схемы, расстояния между электродами и качества межэлектродного диэлектрика. Изменяя величину токоограничивающего резистора, можно изменять частоту следования импульсов и энергию, передаваемую в межэлектродный промежуток. Частоту импульсов можно определить по следующей формуле:

$$f = (2,3 \cdot R \cdot C \cdot \lg \frac{U_0}{U_0 - U_{пр}})^{-1}, \quad (4.2)$$

где  $R$  – сопротивление резистора, Ом;

$C$  – емкость конденсатора, Ф;

$U_0$  – напряжение источника тока, В;

$U_{пр}$  – величина напряжения пробоя, В.

Энергию заряженного конденсатора, основная часть которой выделяется в межэлектродном промежутке, определяют по формуле

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U_{пр}^2. \quad (4.3)$$

При некотором критическом сопротивлении резистора паузы между отдельными импульсами исчезают и разряд из искрового переходит в дуговой. При этом между напряжениями источника питания, пробоя и горения дуги  $U_D$  должно соблюдаться соотношение  $U_0 > U_{пр} > U_D$ . На практике принимают  $U_{пр} = 0,72U_0$ .

К недостаткам  $RC$ -генератора следует отнести низкий КПД (около 35 %), наличие больших пауз между импульсами (скважность 10–100), влияние состояния межэлектродной среды на характеристики электрических импульсов.

## 4.2. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

При составлении программы экспериментальных исследований и для обработки опытных данных используется метод планирования эксперимента. Он дает возможность не только сократить объем опытных данных за счет проведения исследования по заранее намеченному плану, но и получить экспериментальную зависимость (регрессионное уравнение), описывающую поведение заданной величины как функции нескольких переменных (факторов). Такая зависимость позволяет описать весь экспериментальный материал и в пределах изменения исследованных параметров получать дополнительную информацию путем интерполяции. Важным является и то, что можно исследовать функцию многих переменных, раздельное влияние которых не удастся выделить обычным путем.

В общем случае уравнение регрессии записывают в виде

$$y = b_0 + \sum_i b_i x_i + \sum_{ij} b_{ij} x_i x_j + \sum_{ijk} b_{ijk} x_i x_j x_k + \dots, \quad (4.4)$$

где  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijk}$  – постоянные числовые коэффициенты уравнения регрессии;  
 $x_i, x_j, x_k$  – независимые переменные (факторы).

Без учета членов второго порядка и для случая двух независимых переменных уравнение регрессии примет вид

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2. \quad (4.5)$$

В исследованиях технологических процессов широкое распространение получил метод полного факторного эксперимента. Для построения уравнения регрессии в соответствии с этим методом составляется матрица планирования путем перебора значений независимых переменных при условии, что в каждом отдельном опыте их значения не будут повторяться.

Для упрощения расчетов коэффициентов уравнения регрессии переходят от натуральных значений переменных (факторов) к кодированным значениям. Интервалы варьирования факторов выбирают равными единице. Тогда основному уровню фактора будет соответствовать 0, а верхнему и нижнему уровням – +1 и –1 соответственно. Переход от натуральных значений факторов к безразмерным осуществляется по формуле

$$x_i = \frac{Q_i - Q_{i0}}{\lambda_i}, \quad (4.6)$$

где  $Q_i$  – натуральное значение независимой переменной (фактора);

$Q_{i0}$  – нулевой уровень фактора, который выбирается в середине размаха варьирования переменной;

$\lambda_i$  – шаг варьирования.

Для двухфакторного эксперимента с двумя независимыми переменными, варьлируемыми на двух уровнях, матрица планирования дана в табл. 4.3. Такое планирование называют полным факторным экспериментом типа  $2^2$  (в общем случае –  $2^b$ , где показатель степени указывает на число независимых переменных, а основание 2 – на число уровней, на которых варьировались переменные). В матрице планирования, кроме независимых переменных, добавлены еще столбцы «фиктивной» переменной  $x_0$  для оценки свободного члена  $b_0$  и переменной  $x_1x_2$  для определения нелинейного члена  $b_{12}$ .

По результатам параллельных измерений для каждого опыта определяют среднее значение выходного параметра:

$$\bar{y}_i = \sum_{j=1}^m \frac{y_j}{m}, \quad (4.7)$$

где  $y_j$  – значение выходного параметра, полученное по результатам параллельных измерений;

$m$  – число параллельных измерений.

Матрица планирования двухфакторного эксперимента

Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1 x_2$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$\bar{y}_i$
1	+	-	-	+	$y_{11}$	$y_{21}$	$y_{31}$	$\bar{y}_1$
2	+	+	-	-	$y_{12}$	$y_{22}$	$y_{32}$	$\bar{y}_2$
3	+	-	+	-	$y_{13}$	$y_{23}$	$y_{33}$	$\bar{y}_3$
4	+	+	+	+	$y_{14}$	$y_{24}$	$y_{34}$	$\bar{y}_4$

В каждой точке плана рассчитывают дисперсию результатов опыта:

$$\sigma^2(\bar{y}_i) = \sum_{j=1}^m \frac{(y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{(m-1)}, \quad (4.8)$$

где  $y_{ij}$  – значение выходного параметра в матрице планирования.

Числовые значения коэффициентов уравнения регрессии определяются по формулам

$$b_0 = \sum_{i=1}^N \frac{\bar{y}_i}{N}, \quad (4.9)$$

$$b_1 = \sum_{i=1}^N \frac{x_{1i} \bar{y}_i}{N}, \quad b_2 = \sum_{i=1}^N \frac{x_{2i} \bar{y}_i}{N}, \quad (4.10)$$

$$b_{12} = \sum_{i=1}^N \frac{x_{1i} x_{2i} \bar{y}_i}{N}, \quad (4.11)$$

где  $N$  – число опытов (для двухфакторного эксперимента  $N = 4$ ).

Значимость коэффициента уравнения регрессии оценивается по критерию Стьюдента, для чего определяется ошибка эксперимента:

$$\sigma^2(y) = \frac{1}{m \cdot N} \sum_{i=1}^N \sigma^2(\bar{y}_i), \quad (4.12)$$

а также оценивается дисперсия коэффициентов уравнения регрессии:

$$\sigma^2(b_0) = \sigma^2(b_1) = \sigma^2(b_2) = \sigma^2(b_{12}) = \frac{\sigma^2(y)}{N} \quad (4.13)$$

и вычисляются коэффициенты Стьюдента для каждого коэффициента уравнения регрессии:

$$t_i = \frac{|b_i|}{\sqrt{\sigma^2(b_i)}}. \quad (4.14)$$

Коэффициент уравнения регрессии считается значимым, если вычисленное значение  $t_i$  превышает табличное критическое значение ( $t_i > t_{кр}$ ) для доверительной вероятности 0,95 и числа степеней свободы:

$$f = N(m - 1) = 8. \quad (4.15)$$

В противном случае коэффициент считается незначимым, и соответствующий член уравнения регрессии исключается без пересчета остальных коэффициентов. Критическое значение критерия Стьюдента для двухфакторного эксперимента составляет  $t_{кр} = 2,306$  (для трехфакторного при  $f = 16$   $t_{кр} = 2,120$ ).

Адекватность полученного уравнения регрессии проверяется по критерию Фишера, величина которого следующая:

$$F_p = \frac{\sigma_{ост}^2}{\sigma^2(y)}. \quad (4.16)$$

Остаточная дисперсия определяется выражением

$$\sigma_{ост}^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(\bar{y}_i - \hat{y}_i)^2}{(N - \alpha)}, \quad (4.17)$$

где  $\hat{y}_i$  – значение выходного параметра, найденного из уравнения регрессии с учетом значимости коэффициентов;

$\alpha$  – число независимых параметров.

Уравнение регрессии признается адекватным, если расчетное значение критерия Фишера меньше критического значения ( $F_p < F_{кр}$ ).  $F_{кр}$  определяется по таблицам математической статистики в зависимости от выбранного уровня значимости и числа степеней свободы. Для двухфакторного эксперимента  $F_{кр} = 224,6$  и соответствует уровню значимости  $K = 0,95$  и числу степеней свободы:  $f_1 = N - \alpha = 2$  и  $f_2 = m - 1$  (для трехфакторного эксперимента при  $f_1 = 5$  и  $f_2 = 2$ ,  $F_{кр} = 19,3$ ).

Если найденное уравнение регрессии оказалось неадекватным, то необходимо сузить интервалы варьирования независимых переменных, центр плана перенести в точку с наилучшими результатами выходного параметра или увеличить число параллельных измерений и все эксперименты повторить.

### 4.3. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

1. Электроэрозионная установка «Элитрон-22».
2. Прибор для измерения твердости модели ТП-2.
3. Микроскоп инструментальный модели МИМ-7.

Установка «Элитрон-22» предназначена для электроискрового легирования поверхностей режущего инструмента штамповой оснастки и др. Потребляемая мощность – не более 0,4 кВА. Частота вибрации легирующего электрода – 100 Гц. Размах виброперемещений легирующего электрода регулируется в пределах 0,05–0,3 мм. Амплитудное значение напряжения на накопительных конденсаторах можно менять от 15 до 90 В, рабочий ток – от 0,5 до 2,8 А. Производительность установки – до 5,0 см<sup>2</sup>/мин. Толщина наносимого слоя по наибо-

лее выступающим частям – 0,01–0,12 мм. Высота микронеровностей профиля покрытия – 16–80 мкм.

В состав установки «Элитрон-22» входят электронный блок для питания обмотки вибратора, контроля и управления техпроцессом и вибратор для коммутирования разрядной цепи вибрирующим электродом-инструментом.

#### 4.4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с описанием лабораторной работы, приборами и оборудованием.
2. Пользуясь табл. 4.4, составить матрицу планирования эксперимента в соответствии с заданием.
3. Представить матрицу планирования преподавателю и после ее проверки получить у инженера необходимое количество образцов.
4. Измерить твердость образцов в трех точках по всей обрабатываемой поверхности и усреднить результат.
5. Включить электроэрозионную установку. Провести обработку образцов согласно матрице планирования. После каждого опыта замерить твердость обработанной поверхности в трех точках.
6. Проконтролировать поверхность образцов на инструментальном микроскопе и зарисовать характерный рельеф поверхности.
7. Получить регрессионное уравнение электроискровой обработки в соответствии с изложенной выше методикой, используя для этого программу для ПЭВМ PFE.
8. Рассчитать и построить на основе регрессионного уравнения зависимости твердости слоев от силы тока и количества нанесенных слоев.
9. Оформить отчет по лабораторной работе.

Таблица 4.4

Варианты математического планирования экспериментов при исследовании электроискрового упрочнения

Номер варианта	Технологический фактор	Нулевой уровень $Q_0$	Шаг варьирования $\lambda$	Уровень факторов	
				$Q_0 - \lambda$	$Q_0 + \lambda$
1	$I, A$	1	0,2	0,8	1,2
	$n$	2	1	1	3
2	$I, A$	1	0,2	0,8	1,2
	$n$	3	1	2	4
3	$I, A$	1	0,2	0,8	1,2
	$n$	4	1	3	5

## 4.5. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Цель работы.
2. Краткие сведения из теории.
3. Матрица планирования эксперимента с экспериментальными данными.
4. Уравнение регрессии с учетом проверки значимости коэффициентов.
5. Графические зависимости.
6. Выводы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

1. Перечислите виды электроэрозионной обработки.
2. Изложите физическую сущность формообразующей электроэрозионной обработки.
3. Изложите особенности электроискровой обработки.
4. Изложите особенности электроимпульсной обработки.
5. Изложите особенности электроконтактной обработки.
6. Изложите физическую сущность электроэрозионной упрочняющей обработки.
7. Приведите схему электроискровой обработки с использованием релаксационного *RC*-генератора.
8. Какими факторами определяется частота следования импульсов при электроискровой обработке?

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Киселев, М. Г. Электрофизические и электрохимические способы обработки материалов : учеб. пособие / М. Г. Киселев, Ж. А. Мрочек, А. В. Дроздов. – М. : ИНФРА-М, 2014. – 389 с.
2. Технология конструкционных материалов : учебник для вузов / А. М. Дальский [и др.] ; под ред. А. М. Дальского. – М. : Машиностроение, 2005. – 512 с.
3. Машиностроение : энциклопедия. В 40 т. Т. III-3 : Технология изготовления деталей машин / А. Г. Суслов [и др.] ; под ред. А. Г. Сулова. – М. : Машиностроение, 2000. – 840 с.
4. Наумов, А. А. Эффективное управление экспериментом / А. А. Наумов, В. В. Сенич. – Новосибирск : ОФСЕТ, 2003. – 254 с.
5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. / А. М. Дальский [и др.] ; под ред. А. М. Дальского. – М. : Машиностроение, 2006. – Т. 1 – 912 с. ; Т. 2 – 944 с.

*Учебное издание*

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ  
ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

В двух частях  
Часть 1

**Бордусов** Сергей Валентинович  
**Лушакова** Мария Сергеевна  
**Мадвейко** Сергей Игоревич и др.

**ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ  
ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ**

**ПОСОБИЕ**

Редактор *Е. В. Иванюшина*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоя*

Подписано в печать 22.09.2020. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Гаймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 3,84. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 30 экз. Заказ 95.

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