

СОЗДАНИЕ ВАКУУМНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКОГО НАПЫЛЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

Магкоев Р.Т.

г. Владикавказ, МБОУ СОШ № 26, 9 класс

Научный руководитель: Радченко Т.И., г. Владикавказ, учитель физики, Почётный работник общего образования РФ, Заслуженный учитель РСО – Алании, МБОУ СОШ № 26

Данная статья является реферативным изложением основной работы. Полный текст научной работы, приложения, иллюстрации и иные дополнительные материалы доступны на сайте II Международного конкурса научно-исследовательских и творческих работ учащихся «Старт в науке» по ссылке: <https://www.school-science.ru/2017/11/27669>.

Цель данного проекта – включение в работу по созданию вакуумной установки для термического напыления плёнок из различных материалов на подложки. В производстве полупроводниковых компонентов активно используется технология термического нанесения плёнок в вакууме. Конечно, выбранная тема очень объёмна. Поэтому она разбита на отдельные подпроблемы, которые будут решаться поэтапно в течение нескольких лет.

Задача этого учебного года – ознакомиться с основными необходимыми теоретическими вопросами, а также разработать и изготовить блок питания для будущей установки, учитывая технические требования, необходимые для обеспечения работы изделия в строго определённом режиме. Установка должна позволять изучить основы вакуумной техники, процессы испарения и конденсации материалов в вакууме, процесс зародышеобразования и рост плёнок. Кроме того, планируется исследование структурных свойств получаемых образцов.

Объект исследования – блок питания для вакуумной установки. **Предмет исследования** – технические характеристики блока питания, позволяющие проводить на создаваемой установке плавление и испарение различных материалов. **Гипотеза** – возможность создания низковольтного блока питания (с большой силой тока для испарения материалов посредством джоулева тепла) с плавной регулировкой мощности, подводимой к нагревателю. **Методы работы** – предварительное изучение теоретического материала, проведение экспериментов и расчётов с целью теоретического обоснования вопросов, относящихся непосредственно к конструкторской деятельности.

Изготовление действующих моделей, тестирование их работы и внесение необходимых корректировок.

Новизна работы – создание авторской модели блока питания, предназначенного для изготавливаемой вакуумной установки для термического напыления плёнок, что актуально для изучения основ производства микроэлектроники.

Перспективы проекта

При создании малогабаритной вакуумной установки для термического напыления плёнок задачей является создание: блока питания установки (первый год), вакуумной магистрали и опорной плиты с тоководами (второй год) и напыление плёнок (третий год).

Используемые теоретические сведения из физики

Внутренняя энергия – кинетическая энергия (энергия движения) всех молекул, из которых состоит тело, и **потенциальная энергия их взаимодействия**.

Теплопередача – процесс изменения внутренней энергии без совершения работы над телом или самим телом. Виды теплопередачи: теплопроводность, конвекция (горячее вверх, холодное вниз), излучение.

Теплопроводность – явление передачи внутренней энергии от одной части тела к другой или от одного тела к другому при их непосредственном контакте.

Количество теплоты Q – энергия, которую получает или теряет тело при теплопередаче. Единица измерения количества теплоты в системе СИ – Дж (джоуль). Вне-системная единица количества теплоты – калория. $1 \text{ кал} \approx 4,2 \text{ Дж}$.

Удельная теплоемкость c , Дж/(кг/°C) – физическая величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо передать или забрать у тела массой 1 кг для повышения или понижения его температуры на 1°C .

Плавление – переход вещества из твердого состояния в жидкое. **Кристаллизация (отвердевание)** – переход вещества из жидкого состояния в твердое. **Температура плавления** – температура, при которой ве-

щество плавится. **Температура кристаллизации (отвердевания)** – температура, при которой вещество кристаллизуется (отвердевает). (Пока процессы для кристаллического тела не завершатся, температура не меняется.)

Удельная теплота плавления λ , Дж/кг – физическая величина, показывающая какое количество теплоты необходимо сообщить кристаллическому телу массой 1 кг, чтобы при температуре плавления полностью перевести его в жидкое состояние.

Парообразование – явление превращения жидкости в пар. Это – испарение и кипение. **Испарение** – парообразование, происходящее с поверхности жидкости. Идёт при любой температуре. **Конденсация** – явление превращения пара в жидкость.

Удельная теплота парообразования L , Дж/кг – физическая величина, показывающая, какое количество теплоты необходимо, чтобы обратить жидкость массой 1 кг в парообразное состояние без изменения температуры [1]. (Когда жидкость кипит, её температура не меняется.)

Сублимация – переход твёрдого вещества с газообразное состояние.

В таблице 1 представлены сравнительные характеристики для агрегатных состояний вещества с учётом изменения внутренней энергии. На графике 1 представлены показания термометра при нагревании, плавлении, охлаждении и кристаллизации вещества.

Формулы и соответствующие им тепловые процессы:

- нагревание, охлаждение $Q = c m (t_2 - t_1)$;
- плавление, кристаллизация $Q = \lambda m$;
- парообразование, конденсация $Q = L m$.

Электрический ток – упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц. В металлах это – свободные электроны. Направление тока условились считать **от плюса к минусу**.

Сила тока I (А – ампер) равна отношению электрического заряда q , прошедшего через поперечное сечение проводника, ко времени его прохождения t : $I = q/t$.

(Электрическое) напряжение U (В – вольт) показывает, какую работу совершает электрическое поле при перемещении единичного положительного заряда из одной точки в другую: $U = A/q$.

Закон Ома. Сила тока в участке цепи прямо пропорциональна напряжению на концах этого проводника и обратно пропорциональна его сопротивлению: $I = U/R$.

Сопротивление определяется по формуле

$$R = \frac{\rho \ell}{S},$$

где ρ – **удельное сопротивление проводника** (физическая величина, которая определяет сопротивление проводника из данного вещества длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м²), ℓ – длина проводника, S – площадь его поперечного сечения.

Зависимость удельного сопротивления проводника от температуры: $\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$, где ρ_0 – удельное сопротивление проводника при 0 °С, t – температура в °С, α – температурный коэффициент сопротивления.

Работа электрического тока A (Дж – джоуль) на участке цепи равна произведению напряжения на концах этого участка на силу тока и на время, в течение которого совершалась работа. $A = IUt$.

Закон Джоуля – Ленца. Количество теплоты, выделяемой проводником с током, равно произведению квадрата силы тока I , сопротивления R и времени t :

$$Q = I^2 R t.$$

Итак,

$$Q = A = Iut = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t.$$

Электрическая мощность P (Вт – ватт) это работа электрического тока в единицу времени [1].

$$P = A/t = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

При включении блока в сеть 220 В выключателем SA1 напряжение через предохранитель FU1 поступает в первичную обмотку силового трансформатора и на вспомогательный блок питания А1.

Трансформатор установлен в корпус блока и там же радиаторы силовых полупроводников. Вспомогательный блок нужен для обеспечения стабильным напряжением 12 В не зависящем от колебаний напряжения на выходе силовой части вентиляторов охлаждения, цифрового вольтметра и генератора ШИМ.

ШИМ – широтно – импульсная модуляция. Она даёт возможность плавно регулировать температуру испарителя.

Предохранитель FU1 выполняет одновременно две защитные функции: срабатывает при коротком замыкании в силовом трансформаторе и вспомогательном блоке питания, а также срабатывает при коротком замыкании на выходе блока, при котором в первичной цепи развивается достаточная сила тока для перегорания предохранителя. Такая конструкция позволила отказаться от мощного предохранителя на выходе блока. Сила тока, которую выдерживает электроника без разрушения в несколько раз больше силы тока, которую может от-

дать трансформатор во вторичную обмотку даже в режиме короткого замыкания. Такая особенность конструкции повышает надежность блока и его живучесть в нештатных аварийных ситуациях.

С вторичной обмотки напряжением 16 В с отводом от середины (две полуобмотки по 8 В) трансформатора Т1 с максимальной силой тока 110 А (трансформатор взят от источника бесперебойного питания ИРРОН BACK POWER 800) напряжение поступает на выпрямитель состоящий из 5 штук включенных параллельно диодов Шоттки SBL60D40 (60 А, 40 В), далее на фильтр питания состоящий из 8 штук электролитических конденсаторов 1000 мФ X 25В.

Полученное выпрямленное и отфильтрованное напряжение около 10 В через блок из 9 штук токоуравнивающих резисторов, объединенных в группы по 3 штуки, включенных параллельно подается на стоки полевых транзисторов ШИМ регулятора выходного напряжения.

Транзисторы IRFZ 3713 (30 В, 250 А, 300Вт) в количестве 5 штук включены параллельно через токоуравнивающие резисторы, которые компенсируют разброс технических параметров различных экземпляров транзисторов. Таким образом, параллельное включение большого количества силовых полупроводниковых приборов позволяет увеличить рабочую силу тока, равномерно распределить мощность и более эффективно отводить неизбежно образующееся при работе тепло.

Выходные силовые проводники сечением 16 мм² подключаются внутри блока к «плюсу» напрямую, а «минус» к истокам полевых транзисторов. На выходе блока устанавливается второй фильтр питания состоящий из 8 штук электролитических конденсаторов 1000 мФ x 25 В.

На передней панели установлен цифровой вольтметр, показывающий напряжение на выходе блока. Два вентилятора охлаждения, объединенные в единый блок предназначены для создания принудительной

циркуляции воздуха через внутреннее пространство блока и отвода тепла в окружающую среду.

Теоретические расчёты получаемой мощности

1. Использовать $P = I^2 R$, $R = \frac{\rho \ell}{S}$, и $\rho = \rho_0$

($1 + \alpha t$) нельзя, при т.к. при 2500 °С третья зависимость не применима (нужно из математики понятие «ряды»). Кроме того расплавленный напыляемый металл уменьшает сопротивление участка с испарителем.

Возьмём $P = IU$. Используем средние значения I и U. $P = 50\text{А} \cdot 5\text{В} = 250\text{Вт}$.

2. Требуемая мощность. $P = Q/t$. Для алюминия Al, меди Cu, серебра Ag

$$Q = cm\Delta t + \lambda m + c_1 m \Delta t_1 +$$

$$+ Lm = m(c\Delta t + \lambda + c_1 \Delta t_1 + L).$$

Испаряемая масса 0,3 г.

$Q \approx 830\text{ Дж}$. Время $t = 20\text{ с}$. $P = 41,5\text{ Вт}$.

Заключение

Результатом данного проекта стало создание блока питания вакуумной установки, предназначенной для термического напыления плёнок из различных материалов. Параметры блока разрабатывались с учётом требований, необходимых для плавления и испарения материалов за счёт использования джоулевого тепла, выделяющегося при прохождении электрического тока по материалу проводящей лодочки – испарителя из тугоплавких металлов вольфрам, тантал, молибден, а также по самому веществу, если оно является проводником электрического тока. Создание установки является актуальной задачей, так как малогабаритная модель предназначается для лабораторных и учебных целей. Планируется, используя различные режимы напыления, получение осаждённых слоёв с толщинами от нанометров до сотен микрометров.