

УДК 621.315.592.2:546.28

РОБОТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА БЫСТРОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

В.А. СОЛОДУХА¹, В.А. ПИЛИПЕНКО¹, В.П. ЯКОВЛЕВ²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Республика Беларусь

²ООО «Перспективные инновационные технологии», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 23 января 2019

Аннотация. Приведены конструктивные особенности автоматической установки быстрой термической обработки кремниевых пластин диаметром 100 мм. Для нагрева в установке используются галогенные лампы с вольфрамовой спиралью КГТ 220-2000-3 в количестве 12 штук, которые обеспечивают нагрев пластины до 1200 °С со скоростью набора температуры 10–150 °С/с в течение 0,1–600 с. Предусмотрен процесс отжига как в вакууме, так и в различных газовых средах. Производительность установки с учетом загрузки пластины, создания вакуума в камере, напуска в камеру требуемого газа, термообработки по заданной программе и выгрузки составляет ≤ 60 пл./ч.

Ключевые слова: камера отжига, длительность импульса, кремниевая пластина, равномерность нагрева.

Abstract. The design specific features of the rapid thermal treatment automated unit for silicon wafers with the diameter of 100 mm are described. For preheating the unit uses the halogen lamps with a tungsten spiral of KGT 220-2000-3 in the quantity of 12 pieces, which ensure the wafer heating up to 1200 °C with the temperature build-up rate of 10–150 °C/s during 0.1–600 s. The annealing process is envisaged both in vacuum and in the various gaseous media. The production capacity of the unit with consideration of the wafer loading, creation of vacuum in the chamber, inflow into the chamber of the required gas, thermal treatment as per the preset program and the unloading process is ≤ 60 wafers/hour.

Key words: Annealing chamber, pulse duration, silicon wafer, heating uniformity.

Doklady BGUIR. 2019, Vol. 122, No. 4, pp. 92-97
Rapid thermal treatment robotics unit
for creation of electronic equipment devices
V.A. Saladukha, V.A. Pilipenko, V.P. Yakovlev

Введение

Автоматизация технологических процессов – одно из главных направлений, определяющих научно-технический уровень развития промышленности во всех ее отраслях. Наиболее актуально это направление для производств, специализирующихся на выпуске полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, где требуется применение высокотехнологичного и производительного оборудования, использование профессионально подготовленных кадров и решение задач по внедрению комплексной автоматизации всего технологического цикла при выпуске особо сложной продукции. Существенным звеном в производстве микросхем является технология быстрой термической обработки (БТО) кремниевых пластин и применяемое для этого оборудование [1–4]. Следует отметить, что в 80–90-е годы прошлого столетия лидерство в создании установок БТО захватили зарубежные фирмы США, Германии, Японии и Франции. Были разработаны и произведены установки различного назначения, в том числе для исследовательских целей, лабораторного применения и промышленного использования. Фирмы США AG Associates, Varian Extrion, Veeco/Kokusai получили большую известность как производители промышленных установок

с высокой степенью автоматизации отдельных операций техпроцесса отжига кремниевых пластин. Многофункциональными возможностями обладают и установки БТО европейских производителей, таких как АЕТ Addax (Франция), Elektrische Anlagen GmbH+Co (ФРГ). В отечественной практике роботизированных установок БТО (далее – РУБТО) не разрабатывалось.

Целью настоящей работы явилась разработка роботизированной установки быстрой термической обработки для создания изделий электронной техники.

Конструктивное исполнение роботизированной установки БТО

Конструкция установки выполнена в виде трех основных модулей: реактора, робототехнического комплекса и системы управления. Наиболее критичным с точки зрения качества получаемых после отжига структур является реакторный модуль установки, который состоит из блока нагрева, камеры отжига (рис. 1) и затвора (рис. 2), обеспечивающего автоматическое открытие и закрытие камеры при загрузке и выгрузке обрабатываемой пластины. Ключевую роль в данном модуле играет камера отжига. Ее конструкция определяется условиями проведения процесса отжига и должна обеспечивать не только равномерный нагрев обрабатываемой пластины, но и ее обработку в вакууме и различных газовых средах, как инертных, так и агрессивных (азот, аммиак, хлористый водород, аргон, кислород, формовочный газ).

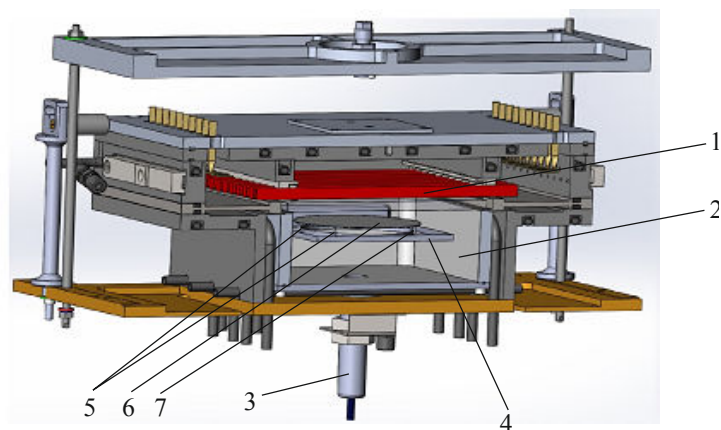


Рис. 1. Реактор установки быстрой термообработки: 1 – блок нагрева, 2 – камера отжига, 3 – пирометр, 4 – поддон, 5 – кварцевые опоры, 6 – термопара, 7 – кремниевая пластина

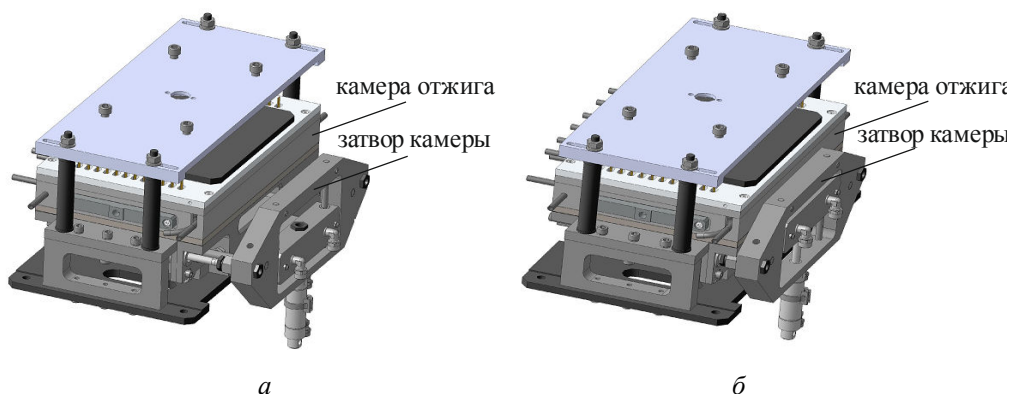


Рис. 2. Вид камеры отжига с открытым и закрытым затвором: а – затвор в открытом состоянии, б – затвор в закрытом состоянии

Стенки камеры, изготовленные из полированного (до 14 кл.) алюминиевого сплава АМг-6 с высоким коэффициентом отражения в широком спектральном диапазоне от 0,4 до 4 мкм, позволяют максимально использовать световое излучение ламп для нагрева образца. С целью защиты полированных поверхностей стенок камеры от используемых газов на них наносится тонкий слой (5,0–8,0 мкм) кварцевого покрытия.

С целью исключения перегрева стенок камеры предусматривается их водоохлаждение, что дает возможность исключить загрязнение образца неконтролируемыми примесями в процессе обработки. Блок нагрева отделен от камеры отжига кварцевым стеклом, что позволяет исключить повреждение галогенных ламп в процессе отжига в различных газовых средах. В качестве источников излучения используются галогенные лампы с вольфрамовой спиралью КГТ 220-2000-3 в количестве 12 штук, обеспечивающие нагрев кремниевых пластин и формируемых на их поверхности слоев до температуры 1200 °С. Данные лампы обладают высокими энергетическими и эксплуатационными характеристиками со спектром излучения от 0,95–2,00 мкм с максимумом в области 1 мкм, который соответствует наибольшему отражению от стенок камеры отжига. Для достижения кремниевой пластиной при быстрой термообработке вышеуказанных температур плотность мощности светового потока должна составлять 20–45 Вт/см², а длительность импульса 3,6–9,0 с. При этом необходимо, чтобы длина тела накала галогенной лампы приблизительно равнялась диаметру обрабатываемой пластины 100 мм. В целом нагреватель представляет собой систему, состоящую из 12 линейных трубчатых кварцевых галогенных инфракрасных ламп с естественным воздушным охлаждением, разбитую на 3 зоны (4 лампы в зоне) с раздельным электропитанием. Для обеспечения равномерности нагрева кремниевых пластин геометрические размеры камеры были выбраны в соответствии с данными, приведенными в работе [5] – ширина 160 мм, высота 80 мм, расстояние между центрами соседних ламп 11 мм, а от ламп до пластины 30 мм. Это обеспечивает разброс светового потока по площади пластины диаметром 100 мм, составляющий 2,8 % и позволяет достичь неравномерности температуры по пластине 0,4 % при ее нагреве до 1200 °С.

Для установки и базирования пластины, а также минимизации от нее теплоотвода в процессе отжига в камере предусмотрены три опоры. Две из них выполнены в виде кварцевых игл, а одна представляет собой термопару. Данные опоры установлены на специальном кварцевом стекле – поддоне. В нижней части камеры отжига в днище сделано окно, закрытое кварцевым стеклом, предназначенное для текущего контроля температуры кремниевой пластины с помощью пирометрической аппаратуры. Это позволяет достичь поддержания температуры с точностью до 0,1 % от задаваемой величины при ее неравномерности по площади пластины 0,4 % (не более ±5 °С при $T = 1200$ °С).

Автоматическое открытие/закрытие камеры отжига при загрузке и выгрузке обрабатываемой пластины осуществляется с помощью специального приспособления (затвора), приводимого в действие пневматическим приводом (рис. 2). Это обеспечивает нужное усилие прижима крышки к контуру окна в стенке камеры, которое через уплотнительные элементы позволяет надежно герметизировать швы сопрягаемых поверхностей. Для обеспечения равномерности охлаждения стенок камеры в крышке затвора предусмотрены каналы циркуляции воды, функционирующие в общей системе водоохлаждения установки.

Для перемещения и ориентации пластины относительно базового среза в установке используется робототехнический комплекс, включающий робот-манипулятор и устройство центрирования и ориентации (выравниватель). Робот-манипулятор представляет собой роботизированную руку, состоящую из четырех частей: подложкодержателя, кисти, предплечья и плеча. Подложкодержатель представляет собой инструмент с окварцованной поверхностью, имеющий 4 вакуумные присоски для захвата пластины как с тыльной, так и рабочей стороны в зоне не более 3 мм от ее края. Конструкция манипулятора имеет 4 степени свободы и позволяет перемещать пластину диаметром 100 мм до 130 мм по вертикали и до 215 мм по горизонтали с возможностью ее поворота на 180°

Выравниватель обеспечивает центрирование и ориентацию кремниевой пластины по определению ее эксцентриситета и положения базового среза с использованием ПЗС-линейки типа TOSHIBA 1304. Полный цикл центрирования и ориентирования составляет не более 5 с.

Данный комплекс работает по схеме:

- извлечение пластины из подающей кассеты;
- ориентация пластины по базовому срезу;
- загрузка пластины в камеру установки быстрой термообработки;

- выгрузка пластины после быстрой термообработки из камеры;
- установка пластины на пост охлаждения;
- загрузка пластины в приёмную кассету;
- остановка работы загрузчика после загрузки последней пластины в приемную кассету и переход установки в исходное состояние.

Время выполнения полного цикла обработки одной пластины не более 45 с.

Для иллюстрации работы установки на рис. 3 приведено изображение состояния роботизированного комплекса и камеры отжига с затвором при загрузке в нее полупроводниковой пластины.

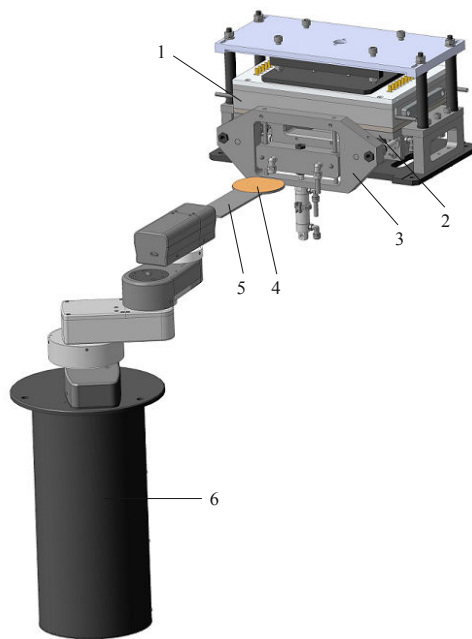


Рис. 3. Загрузка полупроводниковой пластины роботизированным комплексом в камеру отжига установки быстрой термообработки: 1 – блок нагрева, 2 – камера отжига, 3 – затвор, 4 – полупроводниковая пластина, 5 – подложкодержатель, 6 – робот-манипулятор

С целью создания в камере необходимой газовой среды установка обеспечена модулем подготовки и подачи через общий коллектор следующих газов:

- азот (N_2) – 10 л/мин;
- аммиак (NH_3) – 5 л/мин;
- хлористый водород (HCl) – 0,2 л/мин;
- аргон (Ar) – 10 л/мин;
- кислород (O_2) – 10 л/мин;
- формовочный газ (10% H_2 и 90% Ar) – 10 л/мин.

Кроме того, установка имеет возможность проведения обработки в вакууме за счет наличия в ней безмасленного средства откачки до 1,33 Па со скоростью не более 0,02 Па/с.

Текущий контроль температуры отжигаемой пластины осуществляется с помощью пирометра «Термоскоп-600-1С» и платино-родиевой термопары ТП-0188/2-1-ПП(S), расположенных по центру и по краю пластины (в нерабочей её части на расстоянии 3,0 мм) соответственно. Для обеспечения надежности и получения достоверных результатов при измерении температуры реализована двухшаговая технология настройки модулей контроля:

- оценка и регулирование равномерности излучения ламп нагрева КГТ;
- калибровка пирометра в установке БТО.

Все управление процессом нагрева и охлаждения полупроводниковых структур осуществляется с помощью компьютерной системы, обеспечивающей:

- программирование необходимого шага, длительности шага, состояния вкл/выкл дискретных выходов (вкл/выкл насоса, вакуумного затвора, клапанов), аналоговых входов (расход газов, температура, скорость нагрева), сохранение программы (программ);
- работу в автоматическом режиме;
- работу с помощью управляющего компьютера;

- индикацию состояния установки на мнемосхеме на экране дисплея;
- возможность работы в ручном (пошаговом) режиме через управляющий компьютер.

В целом установка позволяет проводить термообработку кремниевых пластин диаметром 100 мм в диапазоне температур 100÷1200 °С с дискретностью ее набора 1,0 °С. Скорость нагрева до заданной температуры регулируется от 10 до 150 °С/с с дискретностью до 5 °С/с, а длительность светового импульса изменяется от 0,1 до 100 с с дискретностью 0,1 с.

С помощью ПИД-регулятора имеется возможность пошагово программировать процесс быстрой термообработки, а именно, задавать рост температуры с требуемой скоростью до заданного значения и выдерживать ее в течение 0÷600 с, т.е. обеспечивать создание температурных полок. В ходе одного цикла нагрева можно формировать до шести температурных полок.

Общий вид разработанной установки представлен на рис. 4, а ее основные технические характеристики приведены в таблице.

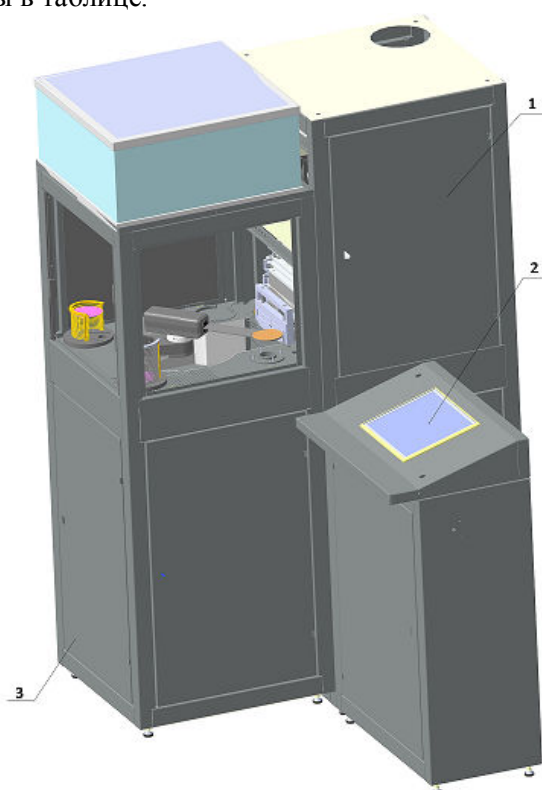


Рис. 4. Общий вид установки быстрой термообработки:
1 – стойка реактора, 2 – стойка управления, 3 – стойка робота-манипулятора

Основные характеристики установки быстрой термообработки

Наименование параметра	Единица измерения	Значение параметра
Количество одновременно обрабатываемых пластин	шт.	1
Количество галогенных ламп в секции	шт.	12
Диаметр обрабатываемых пластин	мм	100
Загрузка кассетная. Количество пластин	шт.	25
Кинематическая производительность	пл./ч	не менее 60
Диапазон нагрева	°С	100–1200
Скорость нагрева	°С/с	10–150
Длительность импульса	с	0,1–600
Дискретность задания скорости нагрева	°С/с	5
Количество температурных полочек	шт.	6
Длительность выдержки на температурной полочке	с	0–600
Точность поддержания температуры	%	0,1
Предельный вакуум	Па	1,33
Скорость откачки	Па/с	0,02
Количество каналов газовой системы (N ₂ , NH ₃ , HCl, Ar, O ₂ , формовочный газ)	шт.	6
Электропитание трехфазное	В	400

Заключение

Разработана автоматическая установка поштучной быстрой термообработки кремниевых пластин диаметром 100 мм световыми импульсами длительностью от 0,1 до 600 с как в контролируемой среде (N_2 , NH_3 , HCl , Ar , O_2 формовочный газ 10 % H_2 и 90 % Ar), так и в вакууме ($\sim 1,33$ Па), обеспечивающая нагрев до 1200 °С со скоростью набора температуры 10–150 °С/с при неравномерности нагрева по площади пластины 0,4 %. Производительность установки с учетом загрузки пластины, создания вакуума в камере, напуска в камеру требуемого газа, термообработки по заданной программе и выгрузки составляет ≤ 60 пл./ч.

Список литературы

1. Оборудование для импульсной термообработки материалов полупроводниковой электроники интенсивным некогерентным светом / В.Е. Борисенко [и др.] // Зарубежная электронная техника. 1985. № 6. С. 45–65.
2. Hebb J., Shajii A., Flynn M. Furnace-based rapid thermal proc // Solid State Technology. 2000. № 10. P. 155–164.
3. Оборудование для быстрой термообработки (БТО) в технологии создания СБИС / Я.И. Точицкий [и др.] // Вестник БГУ. Сер. 1. 2000. № 1 С. 33–37.
4. Установка импульсного отжига кремниевых пластин / Л.Д. Буйко [и др.] // Электронная техника. Сер. 7. 1986. Вып. 6. С.41–43.
5. Оценка равномерности облучения полупроводниковых пластин в камере установки БТО / В.А. Пилипенко [и др.] // Вестник БГУ. Сер. 1. 2013. № 1. С. 34–37.

References

1. Equipment for the pulse thermal treatment of materials of the semiconductor electronics with the intense non-coherent light / V.E. Borisenko [i dr.] // Zarubezhnaja jelektronnaja tehnika. 1985. № 6. S. 45–65.
2. Hebb J., Shajii A., Flynn M. Furnace-based rapid thermal proc // Solid State Technology. 2000. № 10. P. 155–164.
3. Equipment of the rapid thermal treatment in the technology of VLSI creation / Ja.I. Tochickij [i dr.] // Vestnik BGU. Ser. 1. 2000. № 1 S. 33–37.
4. Unit for the pulse annealing of the silicon wafers / L.D. Bujko [i dr.] // Jelektronnaja tehnika. Ser. 7. 1986. Вып. 6. S. 41–43.
5. Evaluation of the irradiation uniformity of the semiconductor wafers in the chamber of the rapid thermal treatment unit / V.A. Pilipenko [i dr.] // Vestnik BGU. Ser. 1. 2013. № 1. S. 34–37.

Сведения об авторах

Солодуха В.А., к.т.н., генеральный директор ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, член-корреспондент НАН Беларуси, заместитель директора по научному развитию ГЦ «Белмикрoанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Яковлев В.П., к.т.н., директор ООО «Перспективные инновационные технологии».

Information about the authors

Saladukha V.A., PhD, general manager of JSC «INTEGRAL» – holding managing company «INTEGRAL».

Pilipenko U.A., D.Sci, professor, corresponding member of the National academy of sciences of Belarus, deputy director of science development of state center «Belmicroanalysis» of JSC «INTEGRAL» – holding managing company «INTEGRAL».

Yakovlev V.P., PhD, head of LLC «Prospective innovation technologies».

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Казинца, 121А
ОАО «ИНТЕГРАЛ» –
управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
тел. +375-17-212-37-41;
e-mail: office@bms.by
Пилипенко Владимир Александрович.

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kazintsa st., 121A
JSC «INTEGRAL» –
holding managing company «INTEGRAL»
tel. +375-17-212-37-41;
e-mail: office@bms.by
Pilipenko Uladzimir Aleksandrovich