

УДК 621.373.826.002

УСТАНОВКА ЛАЗЕРНОГО ГЕТТЕРИРОВАНИЯ КРЕМНИЕВЫХ ПЛАСТИНД.В. ВЕЧЕР¹, В.А. ПИЛИПЕНКО², В.А. ГОРУШКО², В.С. СЯКЕРСКИЙ³, Т.В. ПЕТЛИЦКАЯ²¹НПО "Интеграл"
пл. Казинца, Минск, 220108, Беларусь,²"Белмикрoанализ" НТЦ "Белмикросистемы" "Завод полупроводниковых приборов"
Корженевского 12, Минск, 220064, Беларусь,³НТЦ "Белмикросистемы" "Завод полупроводниковых приборов"
Корженевского 12, Минск, 220064, Беларусь*Поступила в редакцию 30 января 2006*

Представлены результаты по разработке установки лазерного геттерирования кремниевых пластин большого диаметра. Приведены данные по выбору источника излучения, разработке системы сканирования и контроля за процессом лазерной обработки, а также обоснованию режима лазерного воздействия с целью геттерирования точечных дефектов и загрязняющих примесей.

Ключевые слова: лазер, геттерирование, сканирование, контроль.

Введение

В настоящее время для обработки полупроводниковых материалов с целью придания им различных свойств и создания интегральных микросхем (ИМС) широкое применение находят лазеры. Установки на их основе состоят из четырех основных узлов [1, 2]:

лазера с источником питания, обеспечивающего длительность импульса 10–600 нс, плотность энергии 1,5–3,0 Дж/см² и длину волны 0,2–1,06 мкм;

системы сканирования кремниевой пластины, дающие возможность дискретного перемещения лазерного луча в пределах не менее 20 % его диаметра как в одной строке, так и между ними, минимального колебания скорости при сканировании, сохранения угла падения луча на обрабатываемую поверхность, близкого к 90°;

оптической системы, формирующей лазерное пятно с необходимой плотностью энергии и распределением интенсивности в нем, электронной системой управления и контроля процесса лазерной обработки;

механизма загрузки-выгрузки пластин, обеспечивающего подачу пластин в зону обработки и их последующее перемещение из данной зоны.

Наиболее полно вышеперечисленным требованиям отвечают лазерные скрайберы, например ЭМ-220, который и был выбран для создания установки лазерного геттерирования. С этой целью была проведена доработка всех выше указанных узлов. Рассмотрим их более подробно, начиная с выбора источника излучения.

Выбор источника излучения

При выборе источника излучения учитывалось, что для повышения эффективности процесса лазерной обработки необходимо использовать длины волн, обеспечивающие их максимальное поглощение в кремнии. Поскольку кремний в спектральном диапазоне 1,2–9,0 мкм имеет низкий коэффициент поглощения, а при длинах волн более 9,0 мкм он сильно зависит от удельного сопротивления кремния, то для обеспечения эффективности лазерной обработки требуется использовать излучение с длиной волны менее 1,2 мкм. Однако необходимо учесть резкое возрастание коэффициента поглощения кремния для $\lambda > 0,7$ мкм в случае наличия на его поверхности тонкого расплавленного слоя, который может быть создан при облучении поверхности кремния излучением с длиной волны менее 0,7 мкм. Такой подход может быть реализован при лазерной обработке поверхности сразу двумя длинами волн, например, за счет частичного преобразования основной гармоники излучения во вторую путем удвоения ее частоты.

Сравнительный анализ характеристик различных типов лазеров, обеспечивающих излучение с длиной волны ~ 1 мкм, показал, что наиболее подходящими для целей геттерирования являются: в импульсном режиме АИГ: Nd⁺-лазер с непрерывной накачкой и акустической модуляцией добротности ЛТИ-502, обеспечивающий генерацию на длине волны 1,06 мкм с частотой следования импульсов 10 кГц при средней мощности излучения 16 Вт; в непрерывном режиме генерации АИГ: Nd⁺-лазер ЛТН-102 с выходной мощностью 120 Вт, генерирующий на длине волны 1,06 мкм.

Важным преимуществом АИГ: Nd⁺-лазера является низкий порог генерации, позволяющий использовать лампы с низкой энергией накачки. Другим достоинством таких лазеров является высокая теплопроводность граната, позволяющая эксплуатировать их с частотой следования импульсов от десятков герц до десятков килогерц.

Таким образом, в качестве источника излучения для установки лазерного геттерирования кремниевых пластин был выбран АИГ: Nd⁺-лазер, реализующий как импульсный, так и непрерывный режим генерации.

Система сканирования

В качестве системы сканирования для установки лазерного геттерирования используется координатный стол на базе шагового двигателя с неподвижным лазерным лучом, сфокусированным на поверхность обрабатываемой пластины. Поскольку в лазерном скрайбере такой подход реализован, то одним из основных моментов при ее модернизации являлось получение максимально возможной скорости сканирования для достижения высокой производительности. С этой целью проведем расчет зависимости производительности обработки кремниевых пластин от параметров лазерного излучения и параметров двигателя (скорости и ускорения).

Максимальная скорость сканирования описывается выражением

$$V = f_n d_d (1 - k), \quad (1)$$

где V — максимальная скорость сканирования; f_n — частота повторения импульсов; d_d — диаметр сфокусированного лазерного луча на поверхности пластины; k — коэффициент перекрытия лазерных лучей от двух последовательных импульсов.

Тогда для $f_n = 10$ кГц, $d_d = 0,1 - 0,2$ мм и $k = 0,5$ скорость сканирования должна находиться в пределах 500–1000 мм/с.

Время одного прохождения (t') будет складываться из двух составляющих: времени, необходимого для торможения двигателя за периферией пластины и последующего разгона (t_1), и времени, необходимого для прохождения пластины с постоянной скоростью (t_2)

$$t' = t_1 + t_2 = 2V/a_y + D_d/V, \quad (2)$$

где a_y — ускорение двигателя; D_d — диаметр пластины.

Как следует из (2), время обработки сложным образом зависит от скорости и ускорения двигателя. Продифференцировав (2) по скорости, легко установить зависимость, при которой время сканирования минимально:

$$2/a_y - D_d/V^2 = 0, \quad (3)$$

откуда

$$V|_{t=\min} = [(D_d a_y)/2]^{1/2}. \quad (4)$$

Расчет зависимости времени обработки от ее скорости при различных ускорениях, проведенный согласно (2) и (4) (рис. 1), показал, что для каждого ускорения существует такая скорость, при которой время одного прохода, а значит, и общее время обработки минимально.

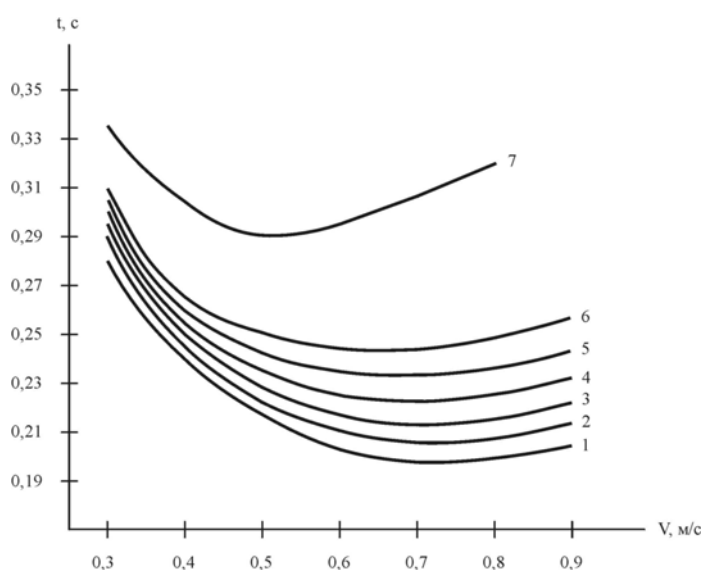


Рис. 1. Зависимость времени прохождения лазерного луча по диаметру пластины $\varnothing 76$ мм от скорости сканирования при различных ускорениях двигателя: 1 — 15; 2 — 14; 3 — 13; 4 — 12; 5 — 11; 6 — 10; 7 — 7 м/с²

Для получения максимального ускорения индуктора, который в установке лазерного геттерирования служит для размещения на нем обрабатываемой пластины, необходимо уменьшить его массу. С этой целью с индуктора был удален механизм перемещения пластины вокруг своей оси, который при геттерировании не задействуется, а механизм перемещения по оси z был перенесен на механизм фокусировки. Все это позволило уменьшить массу индуктора в 1,5 раза и тем самым увеличить его ускорение до 15 м/с² без увеличения тягового усилия двигателя. При таком ускорении оптимальная скорость сканирования повышается до 75 см/с, соответственно возрастает и производительность системы сканирования. В этом случае за один час можно провести обработку до

40 пластин диаметром 100 мм, при условии отсутствия перекрытия между соседними полосами сканирования. При использовании дополнительного сканирования с использованием колебаний поворотного зеркала производительность может быть увеличена в 2 раза.

Система контроля за процессом геттерирования

Для проведения процесса геттерирования кремниевых пластин в требуемом технологическом режиме необходимо осуществлять контроль и управление потоком энергии. В случае лазерного излучения управление плотностью потока энергии в зоне обработки на поверхности кремниевой пластины можно осуществлять путем его фокусировки или дефокусировки в данной зоне. Это позволяет легко перейти от режима обработки обеспечивающего испарение кремния, при плотностях потока $>10^8$ Вт/см², к режиму плавления при плотностях $<10^8$ Вт/см². Если для режима испарения не существует жестких рамок по плотности потока и такой режим очень просто получить, задав плотность мощности в зоне обработки значительно выше пороговой, то для реализации режима плавления без испарения существует узкий диапазон плотностей мощности.

Одним из простейших методов контроля за появлением жидкой фазы кремния и началом его разрушения может явиться контроль за интенсивностью диффузно рассеянного излучения от поверхности кремниевой пластины в зоне воздействия лазерного луча.

Для разработки такого метода контроля была исследована интенсивность рассеянного излучения, которая измерялась фотоэлектрическим преобразователем. Сигнал,

пропорциональный амплитуде, регистрировался на запоминающем осциллографе. Характерная кривая изменения интенсивности диффузно рассеянного излучения в зависимости от степени дефокусировки объективов приведена на рис. 2. Участки на кривой A-B и F-G определяют диапазон плотностей мощности излучения, обеспечивающих при облучении кремния его нагрев, плавление и последующую эпитаксиальную рекристаллизацию поверхностного слоя. При увеличении плотности мощности излучения в зоне воздействия происходит испарение кремния, сопровождающееся увеличением интенсивности рассеянного излучения. В точках C и E интенсивность рассеянного излучения максимальна, а в точке D, где фокус линзы совпадает с поверхностью кремниевой пластины — минимальна.

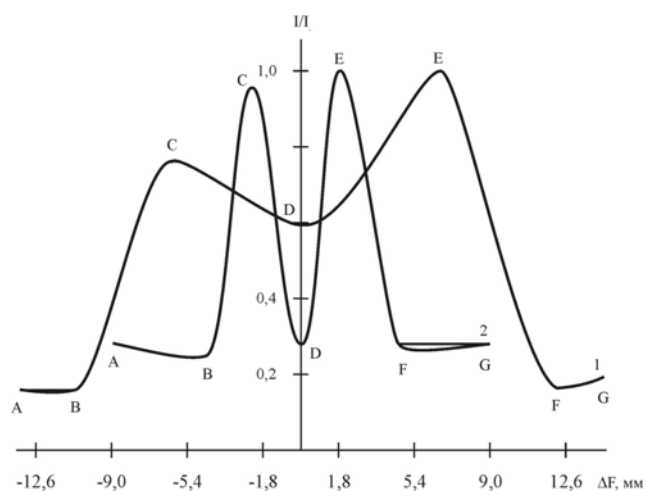


Рис. 2. Изменение интенсивности диффузно рассеянного излучения от степени фокусировки объектива на поверхность пластины: 1 — $F=100$ мм; 2 — $F=50$ мм

плотности мощности лазерного излучения в зоне обработки, т.е. при совпадении поверхности обрабатываемой пластины с перемычкой каустики фокусирующего объектива. Максимальная плотность мощности излучения в зоне обработки имеет место при использовании объектива с фокусным расстоянием 50 мм (по оценке она составляет $1,2 \cdot 10^9$ Вт/см²), которая в 4 раза больше, чем для объектива с $F=100$ мм. При этом ход данных зависимостей не зависит от типа кремниевых пластин, что также подтверждает выдвинутое предположение о природе данного явления.

Данный метод позволяет по анализу рассеянного излучения регулировать начало не только эрозии, но и плавления поверхностного слоя. Для этого необходимо провести осциллографирование формы импульса рассеянного излучения. В момент начала плавления форма импульса рассеянного излучения искажается и на ней появляется ступенька, обусловленная увеличением коэффициента отражения поверхности при ее плавлении.

Изучение формы импульса рассеянного излучения в зависимости от степени фокусировки объектива показало, что скачок коэффициента отражения при пороговой и выше плотности мощности потока излучения может наблюдаться как на возрастающем, так и спадающем участках лазерного импульса. В случае, если данный скачок коэффициента отражения располагается на возрастающей ветви импульса рассеянного излучения, то можно говорить о сопровождении процесса плавления эрозией поверхности в области обработки. Пороги плотности мощности потока излучения, при которых начинаются разрушение поверхности и плавление, отличаются друг от друга на 20–30%. Эффективность плавления зависит от характера распространения его фронта при воздействии лазерного импульса, причем должно выполняться условие, гарантирующее отсутствие эрозии поверхности. Существует предельная глубина проникновения фронта плавления в условиях отсутствия испарения поверхности. Для этого необходим точный выбор параметров сфокусированного излучения и их поддержание в течение всего процесса обработки.

Таким образом, измерение интенсивности рассеянного излучения в зоне обработки при воздействии сфокусированного лазерного излучения позволяет судить о процессах плавления

Такой ход зависимости можно объяснить следующим образом. При увеличении плотности мощности лазерного излучения поверхность расплава перегревается настолько, что над ней образуется эрозионное облако, состоящее из ионизированных частиц испаренного вещества, которые вызывают дополнительное рассеяние падающего излучения. Дальнейшее увеличение плотности мощности приводит к переходу эрозионной плазмы в плазму окружающего образец воздуха. При этом плазма начинает экранировать поверхность фотоприемника, регистрирующего

рассеянное излучение. Максимальная экранировка соответствует наиболее плотной плазме при максимальной

поверхности кремния и его последующей эрозии. Это дало возможность создать систему управления этими процессами путем изменения плотности мощности падающего излучения за счет фокусировки системы до получения характерного минимума интенсивности рассеянного излучения.

Основные особенности разработанной установки

При модернизации установки лазерного скрайбирования с целью использования ее для процесса лазерного геттерирования решался ряд проблем, связанных с технологическими особенностями, как процесса лазерной обработки, так и изготовления ИМС.

Создание геттерирующего слоя с использованием лазерного излучения, в отличие от процесса скрайбирования, предусматривает обработку нерабочей стороны пластины. В это время ее рабочая сторона обращена вниз и находится в непосредственном контакте с металлической поверхностью предметного столика. Поскольку пластина крепится к столику с использованием вакуума, то в процессе обработки образующаяся кремниевая пыль "всасывается" под рабочую сторону, в результате чего она оказывается сильно запыленной мелкой кремниевой пылью. Для устранения этого явления был разработан и изготовлен специальный предметный столик, который во время обработки кремниевой пластины создавал вокруг нее так называемый "воздушный стакан". В результате вся кремниевая пыль, образующаяся при эрозии поверхности кремниевой пластины, подхватывалась выходящим потоком воздуха и попадала в специальное отсасывающее устройство. Это позволяло минимизировать запыленность рабочей стороны пластины кремниевой пылью.

Для исключения механического повреждения рабочей поверхности пластины при автоматической загрузке, выгрузке и движении по тракту использовалась воздушная подушка.

С целью обеспечения равномерности лазерной обработки по всей площади пластины была разработана специальная электрическая схема, которая осуществляла подачу импульсов модуляции на акустический затвор лазера только на участках перемещения стола с постоянной скоростью, а на участках торможения и разгона лазер автоматически отключался. Это позволило исключить попадание лазерного излучения на край кремниевой пластины и прилегающую поверхность предметного стола.

Для исключения влияния разнотолщинности пластин на процесс лазерной обработки в установку введен емкостной датчик высоты, который контролирует расстояние между пластиной и фокальной плоскостью объектива с точностью 10 мкм. В случае расфокусировки микропроцессор автоматически исключает разницу в толщине между пластинами, а также по площади самой пластины и совмещает ее с фокальной плоскостью. Блок-схема и общий вид установки приведены на рис. 3, 4.

Следует отметить, что в результате несложных переделок можно вместо импульсного лазера ЛТИ-502 установить лазер с непрерывной генерацией излучения ЛТН-102. В результате такой замены, возможно проводить обработку пластин в режиме, когда время существования расплава кремния значительно выше, чем при обработке лазерными импульсами наносекундной длительности.

Таким образом, разработанная установка лазерного геттерирования на базе лазерного скрайбера ЭМ-220 удовлетворяет всем требованиям,

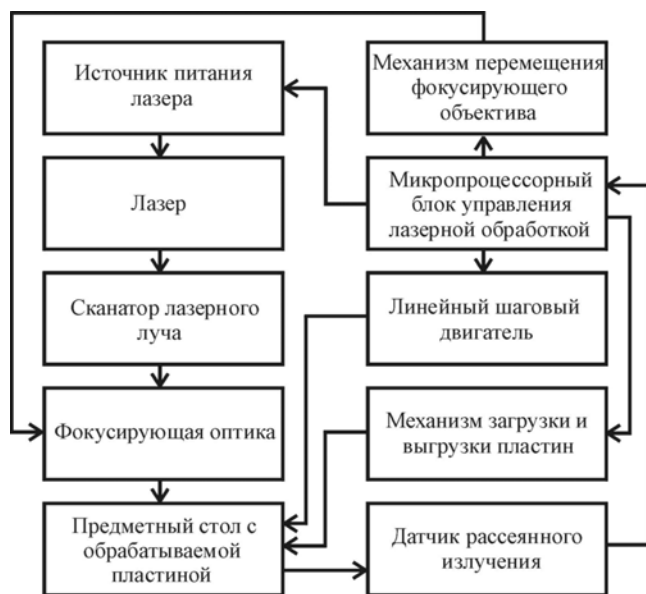


Рис. 3 Блок-схема установки лазерного геттерирования кремниевых пластин

предъявляемым к установкам данного класса как по прецизионности и равномерности обработки, так и по производительности. Она позволяет автоматически обрабатывать кремниевые пластины диаметром до 100 мм с производительностью от 40 до 80 пластин в час при использовании дополнительного сканирования поворотным зеркалом.



Рис. 4. Общий вид установки лазерного геттерирования кремниевых пластин

LASER GETTERING UNIT FOR SILICON WAFERS

D.V. VECHER, V.A. PILIPENKO, V.A. GORUSHKO, V.S. SYAKERSKY, T.A. PETLITSKAYA

Abstract

The results are offered on the design development of the laser gettering unit for the large diameter wafers. The data are provided on choice selection of the radiation source, development of the scan and control system for the laser treatment processing, as well as substantiation of the laser effect mode for the purpose of the point defects and impurities gettering.

Литература

1. Судник П.И., Стержанов Н.И., Пилипенко В.А., Солонинко А.А. // Проблемы создания и применения в народном хозяйстве лазерной и оптико-электронной техники: Материалы Республиканской науч.-техн. конф. Ч. 2. 1982. С. 48–49.
2. Пилипенко В.А., Стержанов Н.И., Горушко В.А. Чигирь Г.Г. и др. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1984. Т. 7. С. 113.