

Доминирующие факторы лазерного геттерирования кремниевых пластин

© Ю.И. Бокхан^{*†}, В.С. Каменков⁺, Н.К. Толочко[•]

^{*} Витебский государственный университет им. П.М. Машерова, 210038 Витебск, Белоруссия

⁺ НПДРДУП „Спектркомплекс“, 210038 Витебск, Белоруссия

[•] Белорусский государственный аграрно-технический университет, 220056 Минск, Белоруссия

(Получена 6 марта 2014 г. Принята к печати 16 июня 2014 г.)

Экспериментально исследовано лазерное геттерирование кремниевых пластин. Рассмотрены типичные параметры процесса геттерирования. Проведены микроскопические исследования обработанных лазерным излучением поверхностей кремниевых пластин. При воздействии лазерного излучения на кремниевые полупроводниковые пластины в процессе геттерирования была выделена группа факторов, определяющих условия взаимодействия лазерного луча с поверхностью кремниевой пластины и влияющих на конечный результат обработки. Определены главные факторы, определяющие эффективность геттерирования. Установлены ограничения получения требуемого значения емкости геттерного слоя на поверхностях с недостаточной чистотой поверхности, например, шлифованной или „матовой“.

1. Введение

К числу перспективных технологий производства изделий электронной техники, получивших развитие в последние годы, относится лазерное геттерирование кремниевых полупроводниковых пластин, приводящее к созданию на нерабочей стороне пластин дефектов, способных собирать загрязнения (примеси металлов) и тем самым обеспечивать более высокое качество рабочей стороны, на которой формируется интегральная микросхема [1–4]. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований доминирующих факторов процесса лазерного геттерирования кремниевых пластин, в которых использована методика оценки эффективности создаваемого геттерного слоя по удельной плотности значений его дефектности.

При разработке процесса геттерирования, в частности, при выборе режимов обработки кремниевых пластин, необходимо знание основных закономерностей и взаимосвязи параметров, определяющих эффективность процесса. Для операций лазерной обработки кремниевых пластин совокупность параметров, характеризующих рассматриваемый процесс, можно условно разделить на две группы: задающие параметры, характеризующие лазерную обработку, и показатели эффективности, численно характеризующиеся свойствами создаваемого „нарушенного слоя“ и относительным улучшением качества структуры рабочей стороны кремниевых пластин. Среди параметров, определяющих лазерное излучение, можно выделить энергетические, пространственно-временные и оптические.

К энергетическим параметрам относятся: мощность излучения P_p — для лазеров непрерывного действия;

энергия в импульсе W_p — для лазеров импульсно-периодического действия.

К пространственно-временным параметрам относятся: время нагрева материала t_H — для лазеров непрерывного действия; длительность импульса τ_p и частота следования импульсов F_p — для импульсных лазеров.

К оптическим параметрам инструмента обработки (лазера) относятся: длина волны излучения λ ; диаметр луча на поверхности обработки d .

К оптическим параметрам материала обработки (кремниевой пластины) относятся: коэффициент отражения R ; показатель поверхностного поглощения α ; показатель объемного поглощения ν .

К показателям эффективности процесса геттерирования относятся: удельная емкость геттерного слоя ψ ; время жизни неосновных носителей t_0 .

К параметрам процесса обработки поверхности пластин относятся: шаг обработки кремниевых пластин h_0 ; скорость перемещения пластин под лазерным лучом V_l .

Таким образом, процесс лазерного геттерирования характеризуется довольно многочисленным набором факторов, зачастую зависящих друг от друга. Поэтому произвести точный расчет, отражающий влияние всех факторов, не представляется возможным даже с привлечением ПЭВМ.

2. Цель работы

Для разработки технологического процесса геттерирования кремниевых пластин чрезвычайно важно представлять степень влияния и вид основных закономерностей, качественно характеризующих режимы и результаты лазерной обработки пластин. Получить необходимые закономерности технологии лазерного геттерирования

[†] E-mail: bokhan@vsu.by; yuibokhan@gmail.com

возможно пока только экспериментальным путем, анализируя получаемые результаты, создавая и уточняя физическую модель процесса.

Поэтому целью настоящего исследования является экспериментальное определение оптимальных режимов обработки кремниевых пластин лазерным излучением с заданными параметрами.

3. Экспериментальные результаты

Показатели процесса геттерирования во многом определяются той долей энергии (мощности) излучения, выходящего из лазера, которая была полезно потрачена (т.е. вызвала собственно изменение структуры поверхности) в зоне обработки. Эта доля, определяемая коэффициентом полезного действия процесса η_0 , зависит, во-первых, от той части лазерного излучения, которая достигает поверхности материала пластины и поглощается ее поверхностным слоем (эффективный КПД процесса η_{eff}), и, во-вторых, от той части излучения, поглощенного материалом пластины, которая идет непосредственно на расплавление (термический КПД процесса η_t). В итоге это можно описать следующим уравнением: $\eta_0 = \eta_{\text{eff}} \eta_t$. Обозначив мощность излучения, выходящего из лазера как P_0 , а мощность излучения, достигшего поверхности обрабатываемой пластины как P_{surf} можно записать: $P_0 = P_{\text{surf}} + P_p$, где P_p — мощность, характеризующая потери при передаче излучения от лазера к материалу. В свою очередь $P_{\text{surf}} = P_{\text{melt}} + P_p$, где P_{melt} — часть мощности излучения, расходуемая на расплавление материала поверхности пластины; P_s — мощность, характеризующая потери в материале пластины.

Потери при передаче излучения от лазера к материалу P_p определяются в основном потерями в оптическом тракте и частью мощности, отраженной от поверхности материала кремниевой пластины P_r . Потери внутри материала складываются из потерь за счет теплопроводности P_{tp} (зависящих от теплофизических свойств материала кремния), потерь за счет объемного поглощения P_d и потерь за счет сквозного прохождения лазерного излучения через толщину кремниевой пластины P_{Si} (за счет частичной „прозрачности“ материала кремниевой пластины для длины волны лазера $\lambda = 1.06$ мкм).

Одним из определяющих (доминирующих) факторов в процессе создания геттерного слоя на поверхности кремниевой пластины является оптимальное сочетание значений мощности лазерного луча и диаметра этого луча (пучка) на поверхности пластины. Указанный фактор энергетически характеризуется плотностью энергии в пучке $W_{\text{уд}}$. При проведении исследований процессов лазерного геттерирования важно организовать контроль состояния поверхности пластин после лазерного облучения. Прежде всего необходимо обеспечить оперативный контроль результатов лазерной обработки поверхности кремниевых пластин. Для указанных

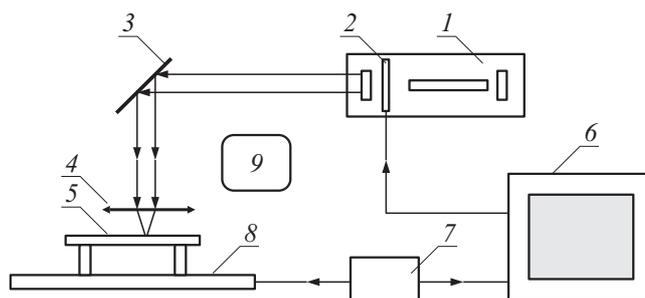


Рис. 1. Установка для исследования взаимодействия лазерного излучения с кремниевыми пластинами.

целей применялся оптический контроль методами компьютерной микроскопии с использованием комплекса „Контраст-2005 ИМС“, адаптированного под задачи лазерного геттерирования и имеющего максимальную разрешающую способность не хуже 0.3 мкм.

Автоматизированный исследовательский комплекс, на котором проводились экспериментальные работы, представлен на рис. 1. Лазер 1, содержащий затвор 2, с помощью поворотного зеркала 3 и объектива 4 энергия излучения передается поверхности пластины 5. Компьютер 6 через блок управления 7 задает перемещение двухкоординатного стола 8 с пластиной по заданным координатам. Температурные измерения проводились с помощью пирометра 9. Для обработки пластин применялся твердотельный лазер типа ЛТН-102 с непрерывным излучением. Указанный лазер имеет длину волны излучения $\lambda = 1.06$ мкм и максимальную мощность излучения около 120 Вт. Время облучения пластины определялось скоростью сканирования координатной системы и в указанном эксперименте находилось в пределах 1 мс. Для фиксации максимальной температуры поверхности пластины под пятном лазерного луча применялся пирометр типа IR-Q фирмы „China“ с пределами измерения от 200 до 2000°C, быстродействием не более 1 мс и погрешностью не хуже 1% в диапазоне 600–1500°C. Принудительное охлаждение обдувом пластин в процессе их обработки лазерным лучом не проводилось.

На рис. 2 приведены кривые, качественно характеризующие взаимосвязь плотности энергии в лазерном пучке и степень структурных изменений, получаемых на поверхностном слое кремниевой пластины. Величина h (по горизонтали) отражает ширину зоны нагрева поверхности пластины в направлении, перпендикулярном направлению сканирования лазерным лучом кремниевой пластины. Вершины кривых I-IV совпадают с шириной зоны нагрева (поперек движения луча) под лазерным лучом. Характер распределения (спада) температуры нагрева поверхности пластины при удалении от оси лазерного луча (центра нагрева) в поперечном направлении получен путем математического моделирования процесса нагрева при сканировании лазерным лучом.

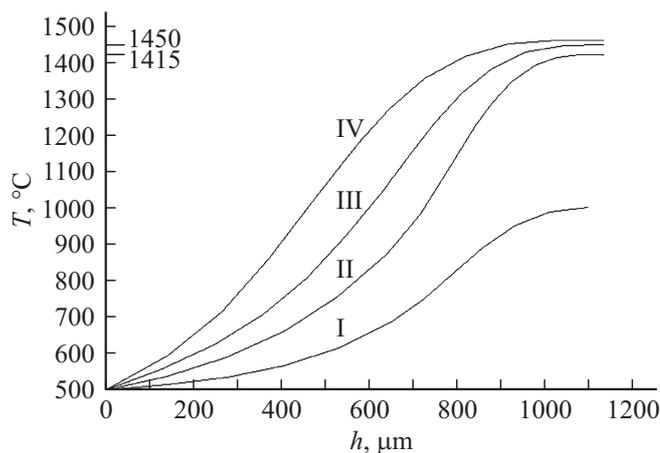


Рис. 2. Кривые, качественно характеризующие степень структурных изменений поверхности кремниевых пластин для четырех режимов плотности энергии в пучке вдоль дорожек сканирования: I — 7, II — 14, III — 20, IV — 26 Дж/см².

На основании анализа полученных кривых I-IV производилось определение и выбор шага сканирования для конкретного режима плотности мощности излучения.

Из рассмотрения указанных зависимостей следует, что количественным изменениям плотности энергии соответствуют достаточно выраженные изменения структуры поверхности кремниевой пластины. Таким образом, путем изменения плотности энергии может осуществляться управление процессом геттерирования по этому фактору.

Авторами был проведен анализ и сравнение полученных результатов с приведенными в работе [1] описаниями получаемых структурных изменений на поверхности кремниевых пластин при их обработке лазерным излучением с примерно сопоставимыми значениями плотности мощности. Характерные изменения поверхности („нарушенный слой“), полученные при сопоставимых значениях плотности мощности, практически совпадают с описаниями „нарушенного слоя“, приведенными в работе [1] для каждого из рассмотренных режимов плотности мощности излучения.

При воздействии лазерного излучения на кремниевые полупроводниковые пластины в целях осуществления процесса геттерирования была выделена группа факторов, определяющих условия взаимодействия лазерного луча с поверхностью кремниевой пластины и влияющих на конечный результат обработки. К указанной группе относятся факторы, связанные с теплофизическими свойствами материала: теплопроводность; теплоемкость; температуры плавления, испарения, фазовых переходов; плотность; удельная энергия плавления; коэффициент отражения; показатель поглощения.

Следующим важным фактором, существенно влияющим на процесс геттерирования, является показатель чистоты поверхности обрабатываемой стороны кремниевой пластины. Этот показатель определяется стадией

процесса изготовления полупроводниковых приборов, на которой производится лазерная обработка кремниевых пластин, имеющих различную степень шероховатости (чистоты) поверхности, соответствующую требованиям конкретной стадии [1,5].

В зависимости от значений совокупности рассматриваемых факторов лазерная обработка (геттерирование) кремниевых пластин позволяет получать различные степени модификации поверхности пластин, а также различные значения емкости создаваемого „геттерного“ слоя на пластинах. Для определения степени влияния этого фактора на количественные результаты процесса геттерирования были исследованы кремниевые пластины с кристаллографической ориентацией типа „111“, имеющие различную степень шероховатости (чистоты) поверхности для лазерной обработки (нерабочая сторона пластин). Исследования проводились на трех партиях пластин марки 100 КДБ 10 ориентации „111“. Первая партия кремниевых пластин имела с оптической точки зрения „матовую“ поверхность — после шлифовки. Вторая партия пластин имела „полузеркальную“ поверхность — после алмазной полировки. Третья партия пластин имела практически „зеркальную“ поверхность — после химико-механической полировки.

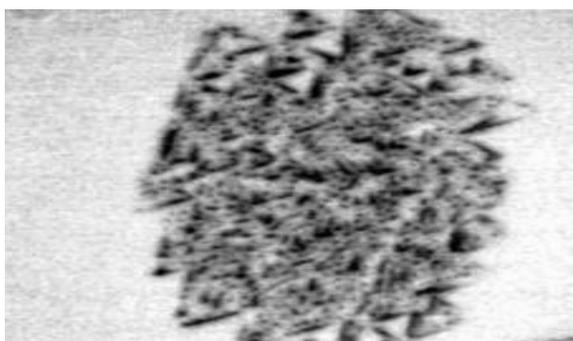
4. Обсуждение

Проведенный анализ результатов лазерной обработки кремниевых пластин, имеющих различные показатели чистоты исходной обрабатываемой поверхности, позволил установить следующее.

1. Геттерный слой, созданный в результате лазерной обработки на нерабочих поверхностях третьей партии пластин („зеркальная“ поверхность), имеет самые высокие показатели по емкости „геттера“ и равномерности геттерного слоя вдоль дорожки нагрева. Показатели по емкости геттерного слоя находятся на уровне около $1 \cdot 10^6$ см⁻², что с большим запасом решает задачу создания геттерного слоя с требуемым значением его емкости — не менее $2.6 \cdot 10^5$ см⁻². Внешний вид создаваемого геттерного слоя (вдоль „дорожки“ нагрева) для рассматриваемой партии кремниевых пластин приведен на рис. 3.

2. Геттерный слой, созданный в результате лазерной обработки на нерабочих поверхностях второй партии пластин („полузеркальная“ поверхность), имеет хорошие показатели по емкости „геттера“ и равномерности геттерного слоя вдоль дорожки нагрева. Показатели по емкости геттерного слоя находятся на уровне около $3 \cdot 10^5$ см⁻², что практически решает задачу создания геттерного слоя с требуемым значением его емкости — не менее $2.6 \cdot 10^5$ см⁻². Внешний вид создаваемого геттерного слоя (вдоль „дорожки“ нагрева) для рассматриваемой партии кремниевых пластин приведен на рис. 4.

3. Геттерный слой, созданный в результате лазерной обработки на нерабочих поверхностях первой партии



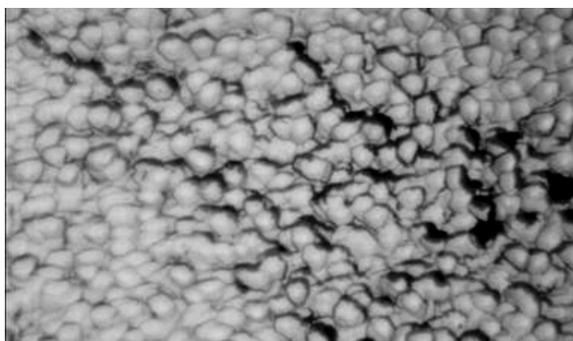
5 μm

Рис. 3. Изображение внешнего вида геттерного слоя, полученного под воздействием сканирующего лазерного луча на „зеркальной“ поверхности кремниевой пластины из третьей партии.



5 μm

Рис. 4. Изображение внешнего вида геттерного слоя, полученного под воздействием сканирующего лазерного луча на „полужеркальной“ поверхности кремниевой пластины из второй партии.



5 μm

Рис. 5. Изображение внешнего вида геттерного слоя, полученного под воздействием сканирующего лазерного луча на „матовой“ поверхности кремниевой пластины из первой партии.

пластин („матовая“ поверхность), имеет умеренные показатели по емкости „геттера“ и равномерности геттерного слоя вдоль дорожки нагрева. Показатели по емкости геттерного слоя находятся на уровне около $5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$, что несколько ниже требуемого значения — не менее $2.6 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$. Внешний вид создаваемого геттерного слоя (вдоль „дорожки“ нагрева) для рассматриваемой партии кремниевых пластин приведен на рис. 5.

5. Заключение

Проведенные микроскопические исследования обработанных лазерным излучением поверхностей трех партий кремниевых пластин, а также сопоставление и предварительный анализ всех полученных экспериментальных данных позволили сделать следующие заключения.

1. Поверхность кремниевых пластин с ориентацией „111“, с оптической точки зрения характеризующаяся как „зеркальная“, обладает свойствами высокого поверхностного поглощения лазерного излучения с хорошей равномерностью создаваемого геттерного слоя вдоль дорожек нагрева. За счет указанных свойств создание требуемого геттерного слоя происходит при самых малых (по сравнению с другими партиями) уровнях лазерного излучения.

2. Поверхность кремниевых пластин с ориентацией „111“, с оптической точки зрения характеризующаяся как „полужеркальная“, обладает свойствами достаточно большего поверхностного поглощения лазерного излучения с удовлетворительной неравномерностью создаваемого геттерного слоя вдоль дорожек нагрева. За счет указанных свойств создание требуемого геттерного слоя происходит при средних (по сравнению с другими партиями) уровнях лазерного излучения.

3. Поверхность кремниевых пластин с ориентацией „111“, с оптической точки зрения характеризующаяся как „матовая“, обладает свойствами локального поверхностного поглощения лазерного излучения с большой неравномерностью создаваемого геттерного слоя вдоль дорожек нагрева. За счет указанных свойств создание требуемого геттерного слоя происходит при самых больших (по сравнению с другими партиями) уровнях лазерного излучения. Применение более высоких уровней энергии для такого вида кремниевых пластин приводит к появлению высоких напряжений и образованию микротрещин.

Из рассмотрения полученных результатов следует, что состояние обрабатываемой лазером поверхности кремниевой пластины является еще одним доминирующим фактором, ограничивающим получение емкости создаваемого геттерного слоя выше определенных значений (порогов). Установленные ограничения являются одним из основных препятствий получения требуемого значения емкости геттерного слоя на поверхностях с недостаточной чистотой поверхности, например, шлифованной или „матовой“.

Список литературы

- [1] В.А. Лабунюв, И.Л. Баранов, В.П. Бондаренко, А.М. Дорофеев. Современные методы геттерирования в полупроводниковой электронике. Зарубеж. электрон. техн. М., ЦНИИ „Электроника“, 1983, № 11 (270) с. 3.
- [2] С.В. Оболенский. Матер. XXXI Междунар. конф. „Физика взаимодействия заряженных частиц с кристаллами“, Москва, 26–28 мая 2001 (М., МГУ, 2001) с. 152.
- [3] В.Н. Черняев. *Физико-химические процессы в технологии РЭА* (М., Высш. шк., 1987).
- [4] В.С. Каменков, В.И. Семашко, Н.К. Толочко. *Вестн. ВГУ*, № 3 (57), 42 (2010).
- [5] О.Д. Парфенов. *Технология микросхем* (М., Высш. шк., 1989).

Редактор Т.А. Полянская

Dominating factors of a laser gettering of silicon sheets

Yu.I. Bokhan*, V.S. Kamenkov⁺, N.K. Tolochko[•]

* Vitebsk State University,
210038 Vitebsk, Belarus

⁺ SPDNPUP „Spektrkompleks“,
210038 Vitebsk, Belarus

[•] Belarus State Agrarian-Technical University,
220056 Minsk, Belarus

Abstract In work, it is experimentally investigated laser gettering silicon plates. Typical parameters of process gettering are considered. The conducted microscopic researches of the surfaces of silicon plates processed by laser radiation. At influence of laser radiation, the group of the factors defining conditions of interaction of a laser beam with a surface of a silicon plate and influencing the result of processing has been allocated for silicon semiconductor plates in process of gettering. The primary factors defining efficiency of gettering are defined. Restrictions of reception of demanded value of capacity gettering a layer on surfaces with insufficient cleanliness of a surface, for example, polishing or „matte“ are established.