

УДК 621.791.725

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМОПЕРЕДАЧИ ПРИ ПРОШИВКЕ КРЕМНИЕВОЙ ПОДЛОЖКИ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Ланин В.Л.¹, Фам В.Т.¹, Петухов И.Б.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Минск, Республика Беларусь

²ОАО «Планар-СО»

Минск, Республика Беларусь

Технология формирования сквозных отверстий методом лазерной прошивки в кремнии является важным производственным этапом в производстве полупроводников. При этом выбор источника лазерного излучения для проведения технологической операции является сложной задачей, определяемой спецификой воздействия лазерного излучения на данный полупроводник и особенностями технологической задачи. В зависимости от требований различные схемы лазерной обработки состоят из лазерного источника с коллиматором выходного пучка, блока управления лазерным источником, оптической системы фокусировки и отклонения лазерного луча (сканера) и координатной системы по осям X,Y,Z с установленным на ней образцом для обработки. (рисунок 1).

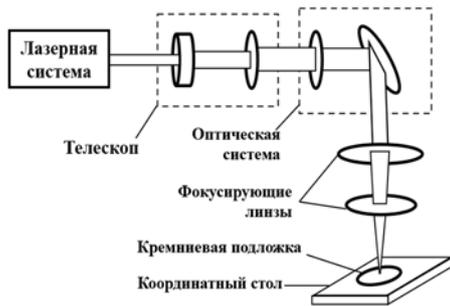


Рисунок 1 – Схема лазерной обработки отверстий в подложке

Наносекундные лазеры с их короткими тепловыми глубинами проникновения в материал подложки и высокими частотами следования импульсов могут обеспечить высокую производительность обработки и значительно уменьшить негативные влияния от высокой тепловой нагрузки и больших температурных градиентов в материале. Преимуществами обработки ультракороткими импульсами лазерного излучения являются отсутствие значительной зоны термического влияния, ударной волны, микротрещин, оплавленных зон и выплесков, теплового повреждения поверхностных слоев материала [1]. Кроме этого, использование лазерного излучения длиной волны 355 нм ультра-фиолетового диапазона позволяет уменьшать диаметр пятна излучения, и следовательно позволяет обрабатывать отверстия диаметром до десятков микрометров.

Для оптимизации процесса производства необходимо промоделировать процесс прошивки

с помощью высокопроизводительного компьютера и соответствующего программного обеспечения. В среде *COMSOL Multiphysics* разработана модель процесса термопередачи при прошивке отверстий в кремниевой подложке толщиной 300 мкм с использованием лазерного излучения в режимах непрерывного и импульсного излучения.

При падении пучка лазерного излучения на поверхность материала часть излучения отражается от нее, а часть проходит вглубь материала, поглощаясь в нем. При моделировании распространение тепловой энергии внутри кремниевой подложки определяется следующим выражением [2]:

$$Q(x, y, z) = Q_0(1-R_c) \cdot \frac{A_c}{\pi r^2} e^{-\left[\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{2r^2}\right]} \cdot e^{-A_c z}, \quad (1)$$

где Q_0 – входная энергия лазера, R_c – коэффициент отражения, A_c – коэффициенты поглощения, r – радиус пятна лазера на поверхности подложки, x_0, y_0 – центр подающего луча лазера. Для упрощения процесса моделирования, R_c и A_c для кремния считаются постоянными и температура плавления $T_{пл-Si} = 1415$ °С.

Для моделирования импульсного лазера используются следующие параметры: мощность лазера P равна 3 Вт, длительность импульса $\tau_i = 15$ нс, диаметр луча 30 мкм, длина волны 355 нм. Импульс имеет колоколообразную форму с полой хвостовой частью (таблица 1). Распределение энергии на поверхности подложки в зоне нагрева описывается гауссовским выражением.

Таблица 1 – Параметры лазерного излучения

Режим работы	Импульсный	Непрерывный
Длина волны излучения λ , нм	355	1064
Диаметр d_0 , мм	0,03	1
Мощность лазерного излучения, Вт	3	30
Длительность импульса τ_i , нс	15	
Частота повторения излучения f_n , кГц	22	–

Моделирование термопрофилей лазерной обработки отверстий в кремниевой пластине с помощью прикладного программного пакета *COMSOL Multiphysics* позволило получить зависимость температуры в пластине от времени воз-

действия лазера (рисунок 2) и ее тепловое распределение на поверхности (рисунок 3).

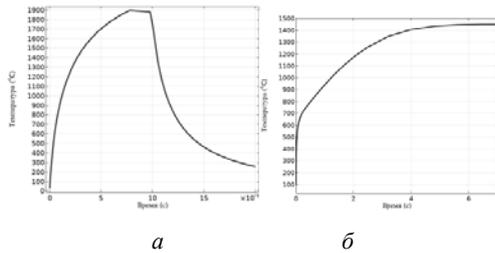


Рисунок 2 – Средняя температура в зоне воздействия импульса (а) и непрерывного лазера (б)

Температура на поверхности пластины, на которую падает лазерное излучение, достигала температуры плавления кремния за 50 с, выделенная пятым контуром от центра (рисунок 3). Таким образом формируется отверстие в виде усеченного конуса с коэффициентом конусообразности более 0,62.

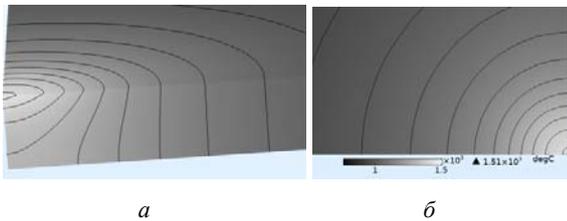


Рисунок 3 – Теплопередача по глубине (а) и на поверхности пластины (б) при использовании непрерывного лазера

В следствие того, что длительность процесса вычисления модели с импульсным лазером сильно зависит от количества импульсов и из-за ограничения шагов вычисления программного обеспечения, проведено моделирование воздействия импульсного лазера с количеством импульсов равным 70. На рисунке 4, а приведена зависимость температуры по толщине подложки от количества импульсов лазера, а на рисунке 4, б – от времени воздействия непрерывного лазера.

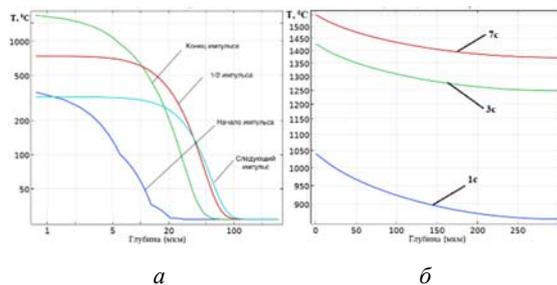


Рисунок 4 – Распределение температуры по толщине подложки импульсного (а) и непрерывного лазеров (б)

В начале воздействия первого пакета импульсов, температура в зоне сфокусированного излучения лазера увеличивается и тепло начинает распространяться внутри пластины. В конце воз-

действия импульса температура на поверхности увеличивается более 1 500 °С, в результате верхний слой подложки расплавляется и удаляется с помощью внешнего обдува, подготавливая зону для поглощения излучения следующего пакета импульсов лазера. В результате моделирования установлено, что температура вне зоны нагрева практически не увеличивается, значит тепло не передается по поверхности подложки (рисунок 5, а). В варианте непрерывного лазера для достижения температуры плавления в зоне нагрева необходимо воздействие лазерным лучом порядка 3 с, при этом практическая температура нагрева составляет около 1 000 °С в области диаметром 20 мм вокруг зоны, формирования отверстия (рисунок 5, б).

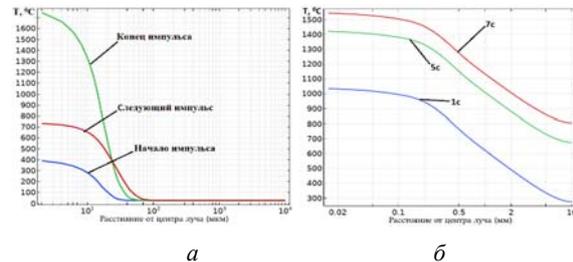


Рисунок 5 – Радиальное распределение температуры в зависимости от количества импульсов

Таким образом, благодаря особенности локального нагрева, использование импульсного лазера дает лучшие результаты защиты поверхности пластины от тепловых эффектов, вызванных локальной высокой температурой. Предполагается, если процесс импульсного разогрева продолжается, то достигается момент, когда зависимость температуры от глубины является практически линейной, которая дает возможность формировать отверстия с формой идеального цилиндра диаметром в несколько десятков микрон.

В результате моделирования сделан вывод, что использование импульсного лазера для обработки отверстий в кремнии дает лучшие результаты тепловой передачи по вертикальной оси, чем с использованием непрерывного излучения лазера. Причем применение лазера с длиной волны 355 нм ультра-фиолетового излучения дает возможность формировать отверстия, диаметр которых в 30 раз меньше тех, которые сформированы непрерывным излучением лазера.

Литература

1. Вакс Е.Д. Практика прецизионной лазерной обработки / Е.Д. Вакс, М.Н. Миленский Л.Г. Сапрыкин. – Москва: Техносфера, 2013. – 696 с.
2. Yang S.T. Comparing the use of mid-infrared versus far-infrared lasers for mitigating damage growth on fused silica // S.T. Yang, M.J. Matthews, S. Elhadj, D. Cooke, G.M. Guss, V.G. Draggoo, P.J. Wegner. Applied Optics. – 2010. – Vol. 49, no. 14. – P. 2606–2616.