

ПРЕЦИЗИОННАЯ ЛАЗЕРНАЯ ОБРАБОТКА СТРУКТУР ДЛЯ СБОРКИ 2,5D- и 3D-ИНТЕГРИРОВАННЫХ МОДУЛЕЙ

К. т. н. И. Б. Петухов¹, Г. Е. Ретюхин¹, д. т. н. В. Л. Ланин²

¹ОАО «Планар-СО»;

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
Республика Беларусь, г. Минск
retuchov@kbtm.by

Исследованы возможности ультрафиолетового волоконного наносекундного импульсного лазера с длиной волны 355 нм и пиковой энергией в импульсе 10 мкДж для сверления отверстий и скрайбирования (резки) подложек-интерпозеров из различных материалов (кремний, карбид кремния, сапфир, стекло и др.) толщиной до 400 мкм для создания 2,5D- и 3D-интегрированных модулей. Экспериментально установлено, что при достигнутой плотности мощности излучения порядка $13,2 \cdot 10^9$ Вт/см² обеспечивается абляция поверхности на уровне выпаривания материала, что повышает качество обработки при выполнении операций сверления, резки и подгонки полупроводниковых структур.

Ключевые слова: 2,5D- и 3D-интеграция, импульсный волоконный лазер, лазерная абляция материалов, плотность мощности излучения, подложка-интерпозер.

Развитие лазерных технологий обработки материалов, используемых в полупроводниковой промышленности, таких как кремниевые пластины, карбид кремния, сапфир, ниобат лития, тонкое стекло и др., позволяет создавать уникальное оборудование для сборки миниатюрных 2,5D- и 3D-интегрированных изделий электроники. При этом используются технологии лазерного сверления, лазерной пайки, лазерного скрайбирования (резки) и формирования топологии на промежуточных подложках, так называемых интерпозерах. Дополнительными стимулами развития оборудования лазерной обработки является появление широкой номенклатуры волоконных лазеров ультрафиолетового (УФ) и инфракрасного диапазона [1], повышение компактности конструкции источников излучения и упрощения оптической системы в отдельных случаях.

Цель данной работы — повышение качества операций лазерной обработки (сверления, скрайбирования) ультрафиолетовым импульсным низкоэнергетическим наносекундным излучением для сборки 2,5D- и 3D-интегрированных модулей.

Выбор лазерной системы для формирования сквозных отверстий и последующей их металлизации (например, заполнение медью) в полупроводниковых пластинах зависит от технических требований, предъявляемых к лазерной обработке, и физико-механических свойств обрабатываемых материалов. Процессы, протекающие при взаимодействии лазерного излучения с материалами, а следовательно, и результат этого взаимодействия зависят от величины поглощения материала на длине волны лазерного источника, пиковой энергии лазера и длительности воздействия излучения на материал. Независимо от механизма поглощения излучения результирующее увеличение температуры в зоне воздействия приводит к разрушению материала. Эффективность разрушения материала под действием лазерного излучения зависит от плотности мощности и длительности воздействия лазерного излучения. Чем короче длина волны и меньше реальная угловая расходимость, тем лучше можно сфокусировать излучение и обеспечить минимально возможный размер зоны воздействия. Чем короче длительность импульса излучения, тем меньшее тепловое и деформационное влияние на материал вне зоны облучения. Данный эффект определяется физическими процессами, происходящими в материале при поглощении лазерного излучения. Если импульс излучения достаточно короткий, а плотность потока излучения достаточно высока, то малый объем материала может быть расплавлен и испарен до того, как тепло из зоны облучения успеет распространиться в окружающий материал.

Полупроводниковые материалы имеют наибольший коэффициент поглощения в области ближнего УФ-диапазона спектра. В частности, оптический коэффициент поглощения монокристаллического кремния излучения длиной волны $\lambda = 355$ нм составляет $1,1 \cdot 10^6$ см⁻¹ [2].

Выбор источника лазерного излучения основан на использовании таких свойств лазера с $\lambda = 355$ нм, как относительно невысокая пиковая энергия импульсов (порядка 10 мкДж при средней мощности 3 Вт) излучения длительностью 1,5 нс, широкий диапазон регулировки частоты импульсов (10—300 кГц) и возможность фокусировки в пятно малого размера (< 8 мкм), чем достигается необходимая плотность мощности излучения (порядка $13,2 \cdot 10^9$ Вт/см²), при которой происходит испарение материала. В сочетании с программно-управляемым перемещением обрабатываемой пластины по координатам X и Y относительно луча лазера, а также перемещением самого луча гальваносканером, происходит обработка материала по траектории воздействия лазерного луча. Сфокусированное лазерное излучение позволяет не только прошивать микроотверстия в подложках из разнообразных материалов, но и производить их лазерную обработку для формирования пленочных структур (съем участков металлизации по информации, заданной в формате DXF). Установлено, что при этом на границе обработки практически отсутствует термическое воздействие на обрабатываемый материал. Образующиеся при лазерном воздействии мелкодисперсные шлаки не «припекаются» к поверхности обрабатываемых пластин и легко удаляются последующей промывкой или протиркой.

Поскольку лазерная обработка по схеме формирования реза неподвижным лучом имеет ограничения прежде всего по производительности, возможен комбинированный вариант с использованием лазерной обработки путем формирования реза быстрым перемещением луча гальванометрическим сканером с небольшим полем сканирования (обработки) и точными перемещениями пластины.

Результаты сверления отверстий диаметром 40 и 50 мкм в полупроводниковой пластине толщиной 400 мкм показаны на рис. 1 (изображение на просвет в оптическом микроскопе). На рис. 2 показаны результаты сверления отверстия диаметром 50 мкм на аналогичной пластине лазером с длиной волны излучения 532 нм, энергией в импульсе 5 мДж и длительностью импульсов 10 мс. Здесь хорошо видна кольцеобразная зона термического воздействия.

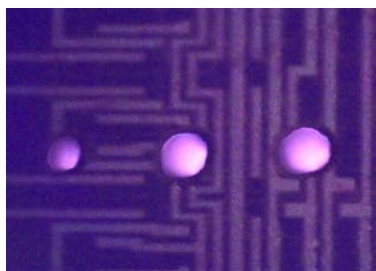


Рис. 1. Сквозные отверстия в кремниевой пластине

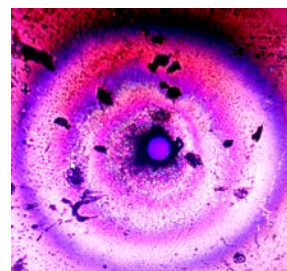


Рис. 2. Кольцеобразная зона термического воздействия

Таким образом, ультрафиолетовый импульсный наносекундный лазер с длиной волны 355 нм с указанными параметрами обеспечивает три вида обработки материалов: сверление, резку, формирование топологии на подложках с минимальным термическим воздействием в зоне обработки, что позволяет использовать его для сборки 2,5D- и 3D-интегрированных изделий электроники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. <https://www.ipgphotonics.com/ru/products>
2. Karnakis D.M. High power single-shot laser ablation of silicon with nanosecond 355 nm. *Applied surface Science*, 2006, vol. 252, iss. 22, p. 7823–7825.

I. B. Petuhov, G. E. Retiuhin, V. L. Lanin

Precision laser processing of structures for assembling 2.5D and 3D integrated modules

The authors study the possibilities of the ultraviolet fiber nanosecond pulse laser with a wavelength of 355 nm and peak pulse energy of 10 μJ for drilling holes and scraping (cutting) on various materials (silicon, sapphire, glass, etc.) with a thickness up to 400 microns to create 2.5D and 3D integrated modules. Experiments have shown that the flux density of $13,2 \cdot 10^9$ W/cm² provides surface ablation at the level of evaporation of the material, which improves the processing quality when performing drilling operations, cutting and fitting semiconductor structures.

Keywords: 2.5D and 3D integration, impulse fiber laser, laser ablation of materials, power flux density of radiation, interposer substrate.