

# Лазерное формирование отверстий в кремниевых подложках электронных 3D-модулей

В статье рассматривается технология формирования отверстий в кремниевых подложках воздействием лазерного излучения.

**Владимир Ланин**

vlanin@bsuir.by

**Сергей Волк**

s\_volk@lotis-tii.com

**Артем Первенецкий**

**Введение**

Современная электроника интенсивно осваивает производство 3D электронных модулей, способных интегрировать несколько кристаллов на основе различных технологий в многоуровневый корпус. Конструкции 3D-модулей на кремниевой подложке обеспечивают электрические межсоединения микросхем с наружными выводами, а также теплоотвод и защиту от окружающей среды [1]. Одним из перспективных направлений производства 3D-модулей является технология TSV (Through Silicon Vias — сквозные отверстия в кремнии). Суть технологии TSV — в формировании переходных отверстий в кремниевых чипах (реактивным ионным травлением, лазерной абляцией и т. п.). Переходные отверстия заполняются проводящим материалом — поликремнием или металлом (медь, золото, вольфрам и др.), в результате образуются вертикальные проводники, связывающие кристаллы в стекле. Создание отверстий необходимого диаметра с соответствующим уровнем качества методами сверления или травления крайне затруднительно при малом диаметре отверстия (0,1–0,3 мм).

Лазерная обработка подложки — один из перспективных методов формирования отверстий в неметаллических материалах. При воздействии лазерного излучения на подложку происходит образование отверстия за счет плавления и испарения материала. Основным методом прошивки отверстий считается многоимпульсная обработка, при которой отверстие растет в глубину постепенно, за счет послойного испарения материала каждым импульсом. При воздействии лазерного излучения на поверхность материала сначала происходит испарение и ионизация поверхностных примесей и загрязнений. Далее излучение поглощается основным материалом, он плавится, испаряется, а пары ионизируются. Давление паров способствует выплескиванию расплава и образованию отверстия.

Микрообработка материалов лазерным излучением предъявляет требования к таким параметрам источника излучения, как длина волны  $\lambda$ , угловая расходимость  $\theta$  и длительность импульса. Зона воз-

действия, определяемая минимальными размерами лазерного пучка  $d$  в фокусе объектива, связана с длиной волны излучения соотношением:

$$d = 1,22 \lambda (f/D)M^2, \quad (1)$$

где  $f$  — фокусное расстояние объектива;  $D$  — диаметр несфокусированного лазерного пучка;  $M^2$  — коэффициент, характеризующий отличие реального лазерного пучка от идеального гауссова пучка, имеющего минимальную дифракционную расходимость:

$$M^2 \sim D \times \theta. \quad (2)$$

Таким образом, чем короче длина волны и меньше угловая расходимость, тем больше возможностей сфокусировать излучение и обеспечить минимально возможный размер зоны воздействия. Для более длинных импульсов величина зоны термического влияния равна:

$$\delta = 2(a\tau_n)^{1/2}, \quad (3)$$

где  $a$  — коэффициент температуропроводности, зависящий от теплофизических свойств материала.

Пикосекундные лазеры с их короткими тепловыми глубинами проникновения в материал подложки и высокими частотами следования импульсов обеспечивают высокую производительность обработки и значительно уменьшают пагубные влияния от большой тепловой нагрузки и 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 [2].

**Лазерные генераторы компании LOTIS**

В 1992 году группой ведущих специалистов Института физики Академии наук Белоруссии



Таблица. Основные параметры лазера LS 2151

Параметр	Гарантированное значение	
Длина волны генерации, нм	1064, 532, 355, 266, 213	
Энергия импульса, мДж	1064 нм	75
	532 нм	35
	355 нм	15
	266 нм	15
	213 нм	3
Длительность импульса, пс	70–80	
Частота повторения импульсов, Гц	15	
Расходимость $\theta$ , мрад	0,4	
Диаметр выходного пучка, мм	$\leq 9$	
Нестабильность энергии, %	1064 нм	2,5
	532 нм	3,5
	355 нм	4
	266 нм	10
Размеры (Д×Ш×В), мм	Излучатель	650×345×143
	Блок питания	512×485×177
	Система охлаждения	542×485×266
	Блок управления	512×485×133
Потребление электроэнергии, В·А	1200	
Электропитание	(220 ± 20) В, 10 А, 50 Гц	

Рис. 1. Пикосекундный лазер модели LS-2151

была создана компания «ЛОТИС» («Лазеры-Оптика-Технологии и Системы») для реализации своего опыта в области лазерной техники, электроники и оптики. С самого начала своего существования «ЛОТИС» взял курс на создание продукции, удовлетворяющей жестким требованиям западных стандартов. В 1996-м «ЛОТИС» и японская фирма Tokyo Instruments Inc. основали совместное предприятие «ЛОТИС ТИИ». Обе компании объединили свои усилия по разработке и поставке лазерных продуктов на мировой рынок. Основное направление деятельности совместного предприятия «ЛОТИС ТИИ» осталось прежним: разработка и изготовление лазерных приборов и систем для широкого ряда научных и промышленных применений. Наличие в «ЛОТИС ТИИ» квалифицированных технических специалистов обеспечивает полный цикл создания лазерных приборов: начиная с научных исследований и постановки задачи, разработки лазерных технологий, проведения оптических расчетов и выпуска конструкторской документации на оптические, механические и электронные компоненты и заканчивая изготовлением, поставкой и сервисным обслуживанием выпускаемого оборудования. Благодаря сервисным возможностям и инвестициям Tokyo Instruments Inc. был разработан ряд новых приборов, соответствующих высоким требованиям международного рынка.

Со дня своего основания СП «ЛОТИС ТИИ» сосредоточило усилия на удовлетворении нужд потребителя в мировой лазерной и оптической индустрии. СП «ЛОТИС ТИИ» разрабатывает и продвигает на мировой рынок решения для применения лазеров в науке и промышленности. Лазеры и лазерные системы «ЛОТИС ТИИ» эксплуатируются более чем в 30 странах мира, в том числе в Японии, США, Китае, России и других.

Пикосекундный LS-2151 — полностью твердотельный лазер с активной синхронизацией мод МОРА-конфигурации: задающий одномодовый генератор (МО), мощный двухпро-

ходный усилитель (РА) (рис. 1). Основные достоинства лазера [3]:

- раздельное управление уровнем накачки задающего генератора и усилителя в едином блоке;
- автономная система охлаждения с теплообменником «вода-воздух»;
- термостабилизация электрооптических элементов, синхронизатора мод и кристалла второй гармоники;
- одномодовый задающий генератор с формированием импульса при «предгенерации» (prelasing), стабилизированной цепью обратной связи;
- встроенный генератор второй гармоники (SH);
- встроенные фотодатчики задающего генератора, усилителя и генератора второй гармоники с индикацией энергии в окне управляющей программы.

Лазер может поставляться с генераторами третьей и четвертой гармоник (HG-T, HG-F, HG-TF), а также с автокоррелятором для настройки и измерения длительности импульса. Основные технические параметры лазера LS 2151 приведены в таблице.

Управление лазером осуществляется от персонального компьютера через RS-232- или

USB-интерфейс. Программное обеспечение позволяет не только управлять работой лазера, но и проводить полную диагностику как технических параметров системы управления, так и выходных параметров лазерной генерации. Высокая стабильность выходных параметров обеспечивается системой управления добротностью резонатора задающего генератора, которая осуществляет синхронизацию мод при «предгенерации», стабилизированной петлей отрицательной обратной связи, и разгрузку резонатора с выводом из него одиночного импульса.

Все события в лазере синхронизируются многоканальным таймером с фазовой привязкой к сигналу опорного генератора, управляющего синхронизатором мод и сохраняющего внутреннее время лазерной системы в единицах периода обхода резонатора (10 нс).

Это открывает новые возможности для синхронизации внешних устройств:

- выходной TTL-синхроимпульс с регулируемым (шаг регулировки — 1 нс) опережением либо запаздыванием по отношению к оптическому импульсу в диапазоне  $\pm 120$  мкс, при нестабильности задержки не более  $\pm 200$  пс (рис. 2);

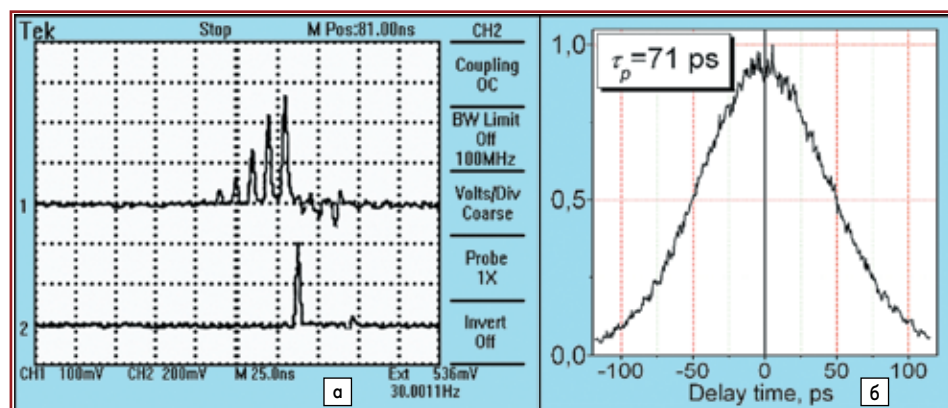
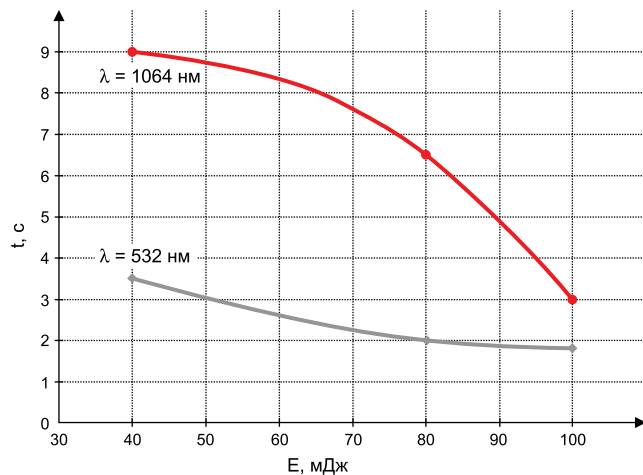
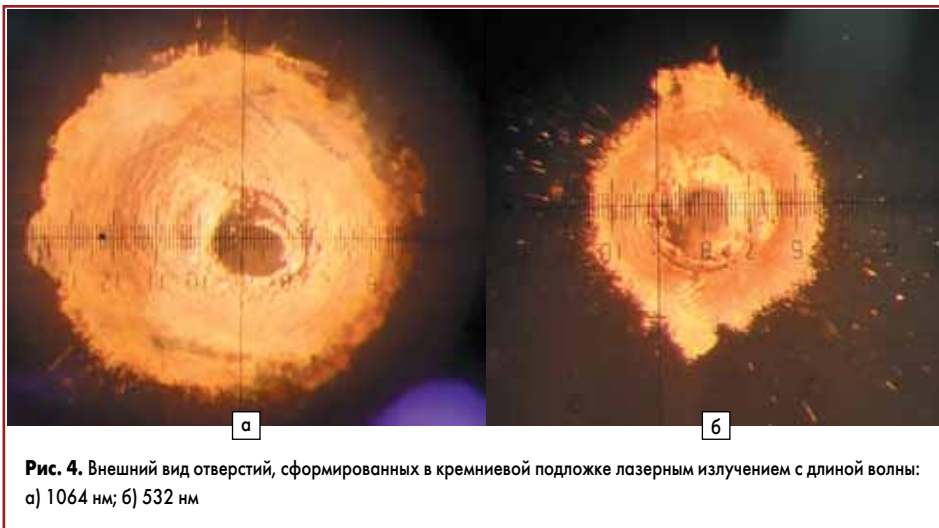


Рис. 2. а) Осциллограммы внутрирезонаторного цуга (луч 1), выходного импульса (луч 2); б) автокорреляционная функция выходного импульса задающего генератора



**Рис. 3.** Зависимости времени прошивки отверстия от энергии и длины волны лазерного излучения



**Рис. 4.** Внешний вид отверстий, сформированных в кремниевой подложке лазерным излучением с длиной волны: а) 1064 нм; б) 532 нм

- запуск лазера внешним импульсом с задержкой оптического импульса на 110–140 мкс при нестабильности задержки  $\pm 10$  нс;
- возможность синхронизации двух лазеров LS-2151 с точностью взаимной привязки выходных оптических импульсов  $\pm 15$  пс.

### Лазерная прошивка отверстий в кремниевых подложках

Для лазерной прошивки отверстий в кремниевой подложке толщиной 200 мкм использовалась Nd:YAG-лазерная установка LS 2151

компании LOTIS TII с длинами волн 1,06 мкм и 532 нм. Обработка отверстий проводилась при диаметре пятна излучения  $d_{\text{пл}} = 0,1$  мм, длительности импульсов 80 пс и частоте импульсов 15 Гц.

Для контроля мощности лазерного излучения использованы сенсоры и измерители мощности излучения LabMax-Тор компании COHERENT [4], обеспечивающие контроль излучения с длиной волны 190 нм – 12 мкм, измерения мощности от нВт до кВт, энергии от нДж до Дж при частоте импульсов до 10 кГц. Данные анализировались на персональном

компьютере через последовательные соединения USB и RS-232. Погрешность измерения мощности — не хуже 0,1%. LabMax-Тор напрямую совместим с большинством когерентных тепловых, пирозлектрических и полупроводниковых датчиков и отображает положение луча для быстрой и точной настройки.

Получена экспериментальная зависимость длительности обработки кремниевой пластины от энергии и длины волны лазерного излучения (рис. 3).

Анализ зависимости показывает, что применение пикосекундного лазера с длиной волны 532 нм более эффективно, поскольку почти в 2 раза сокращается время обработки, улучшается качество формируемого отверстия в кремниевой подложке, зона термического влияния (рис. 4) уменьшается на 30–40%.

Многоимпульсная обработка позволяет получать отверстия серий коротких импульсов, период следования которых значительно больше времени остывания материала. Для кремния, обладающего большей теплопроводностью, необходимо увеличить частоту импульсов и время обработки в сравнении с поликором в 4 раза [5]. Предварительный нагрев кремниевой пластины до +230 °С разрешает получать отверстия с меньшими затратами энергии и времени.

### Заключение

Микрообработка лазерным излучением с длиной волны 1064 нм и наносекундного диапазона длительности импульса характеризуется значительной дефектной зоной, образующейся за счет слабого поглощения излучения материалами подложек. Пикосекундные лазеры с их короткими тепловыми глубинами проникновения и высокими частотами следования импульсов позволяют достичь высокой производительности и значительно ограничивают тепловую нагрузку на обрабатываемый материал. Для оптимизации параметров лазерной микрообработки материалов необходимо иметь в составе лазерной установки встроенные фотодатчики задающего генератора, усилителя и генератора второй гармоники с индикацией энергии в окне управляющей программы.

### Литература

1. Ваньков В. 3D-модули на основе кремниевых коммутационных плат / В. Ваньков, Н. Комков // Электроника. Наука. Технология. Бизнес, 2017. № 10.
2. Вакс Е. Д., Миленский М. Н., Сапрыкин Л. Г. Практика прецизионной лазерной обработки. М.: Техносфера, 2013.
3. Компания LOTIS-TII. [www.lotis-tii.com](http://www.lotis-tii.com)
4. Компания COHERENT. [www.coherent.com/](http://www.coherent.com/)
5. Ланин В. Л., Лаппо А. И., Первенецкий А. П. Исследование процесса лазерной прошивки отверстий в кремнии при формировании 3D-структур. Материалы международной научно-технической конференции 19–23 ноября 2018. INTERMATIC-2018. Часть 2. М.: РТУ МИРЭА, 2018.