

Повышение эффективности формирования переходных отверстий в кремниевых подложках посредством комбинированного инфракрасного и лазерного нагрева

А.И. Лаппо

Одним из перспективных технологических решений для реализации многокристальных модулей является создание трёхмерных модулей. Особенность этой технологии заключается в том, что компоненты собираются не только горизонтально, но и вертикально. Для создания трёхмерных структур по технологии TSV необходимо формирования переходных отверстий в слоях кремниевых подложек. Применение комбинированного инфракрасного и лазерного нагрева для операции прошивки отверстий в кремневых пластинах позволяет снизить время процесса 1,4–2 раза при незначительном увеличении конусности, порядка 5 % при нагреве до 200 °С.

Ключевые слова: 3D структура, TSV, лазер, лазерное излучение, инфракрасный нагрев, средне-волновом диапазоне, эксперимент, прошивка отверстий.

One of the promising technological solutions for the implementation of multi-chip modules is the creation of three-dimensional modules. The peculiarity of this technology is that the components are assembled not only horizontally, but also vertically. To create three-dimensional structures using TSV technology, it is necessary to form transition holes in the layers of silicon substrates. The use of combined infrared and laser heating for the operation of stitching holes in silicon wafers reduces the process time by 1,4–2 times with a slight increase in taper, about 5 % when heated to 200 °C.

Keywords: 3D structure, TSV, laser, laser radiation, infrared heating, mid-wave range, experiment, hole stitching.

Введение. Современные электронные модули, созданные по технологии 3D, позволяют объединить множество микросхем, использующих различные технологии, в одном корпусе. Это позволяет создавать компактные устройства с широким функционалом и доступной ценой. Одним из современных подходов к созданию 3D-модулей является технология TSV (Through Silicon Vias – сквозные отверстия в кремнии) [1], [2].

Благодаря высокой плотности энергии лазерного излучения можно быстро нагревать материалы до высоких температур, включая температуру плавления и испарения. Это позволяет использовать лазерное излучение для создания монтажных переходных отверстий в кремниевых подложках.

Применение лазерного излучения для технологических операций без контакта с материалом имеет ряд преимуществ, таких как точное следование технологическим режимам и контроль объёма подводимой энергии. Высокая энергетическая плотность лазерного излучения позволяет быстро нагревать материалы до высоких температур, включая температуру испарения. Это позволяет использовать одно и то же оборудование для различных операций по обработке изделий [3].

Инфракрасное излучение в среднем диапазоне имеет длину волны 1,5–10 мкм, характеризуется низкой чувствительностью к цвету нагреваемых деталей, плотность мощности излучения составляет 30 Вт/см². Применение его в процессе лазерной прошивки потенциально позволит сократить время операции [4].

Технология создания точечных отверстий далека от идеала, поэтому получаемые отверстия имеют форму конуса. Величина этого конуса определяется разницей между диаметрами отверстий и толщиной подложки.

Разработка макета исследования формирования переходных отверстий в кремниевой пластине методом комбинированного лазерного и инфракрасного нагрева. Для получения экспериментальных данных разработана методика (рисунок 1). Лазерная установка генерирует лазерный луч, который попадает на кремниевую пластину 4 и формирует отверстие 2, световое излучение 7, проходящее через формируемое отверстие, попадает на фоторезистор 8. В эксперименте с инфракрасным нагревом 6 кремниевой пластины 4 перед началом формирования отверстия 3 производится нагрев пластины нагревателем 5 до заданной температуры. Контроль температуры на поверхности кремниевой пластины осуществляется термопарой 3 [5].

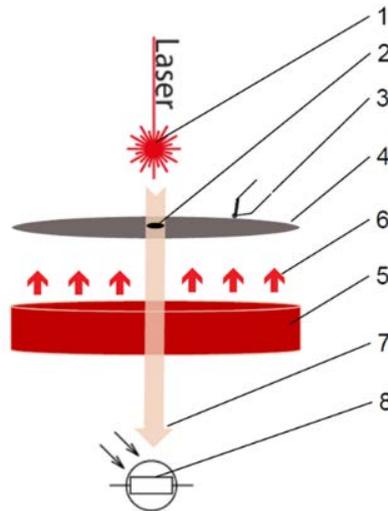


Рисунок 1 – Схема процесса формирования переходных отверстий комбинированным инфракрасным и лазерным нагревом

Для контроля хода эксперимента разработано устройство на базе микроконтроллера, функциональная схема представлена на рисунке 2. Микроконтроллер на чипе ATmega328P считывает показания с фоторезистора и с термопары (подключается через преобразователь сигнала термопары MAX6675), состояние системы отображается на ЖКИ экране, запись результатов производится на карту памяти.

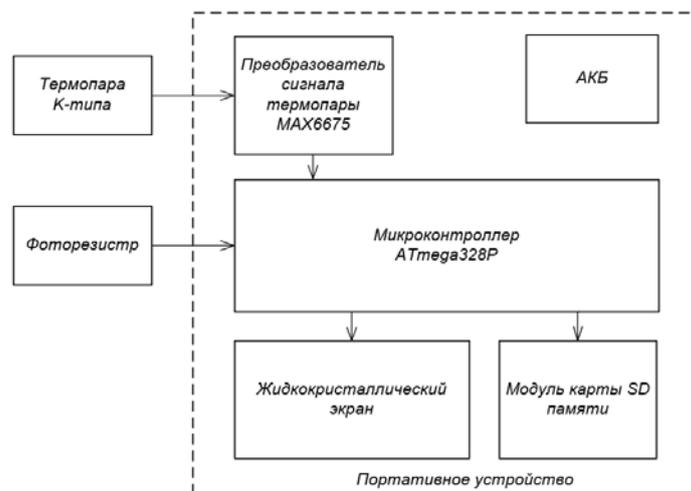


Рисунок 2 – Схема аппаратно-программного комплекса для получения скорости формирования отверстий и снятия температуры кремневой пластины

На дисплей выводится информация о текущем режиме работы микроконтроллерного устройства, температура с поверхности кремниевой пластины T , уровень яркости R в процентах от максимально возможной измеряемой яркости. На карту памяти записывается та же информация с интервалом 10 мс.

Формирования переходных отверстий в кремниевой пластине комбинированного лазерного и инфракрасного нагрева. Первым этапом при создании 3D-модуля по технологии TSV является формирование сквозного отверстия для реализации контактного соединения между слоями модуля и подложкой. Основные технологические параметры формируемых отверстий – диаметр отверстия, отклонение от формы (конусность, наплыв и др.). Контролируемые параметры технологического процесса: мощность и продолжительность импульса лазера (контролируется с пульта управления лазерной установки), продолжительность операции (контролируется вручную), температура кремниевой пластины [6], [7].

При создании 3D-модуля по технологии TSV требуется формирование сквозного отверстия для реализации контактного соединения между слоями модуля и подложкой. Основные технологические параметры формируемых отверстий: диаметр отверстия, отклонение от формы: конусность, образование наплывов. Контролируемые параметры технологического процесса: мощность и продолжительность импульса лазера (контролируется с пульта управления лазерной установки), продолжительность операции (контролируется вручную), температура кремниевой пластины.

Для определения оптимальных параметров операции прошивки отверстий необходимо провести ряд экспериментов. Для получения экспериментальных данных использовалась лазерная установка Yue ming SMA0604-B-A [8], мощность лазера была установлена на 75 Вт. Для контроля хода эксперимента применялось разработанное устройство на базе микроконтроллера на чипе ATmega328P. Для контроля прошивки отверстия записывалась следующая информация: продолжительность операции, температура с поверхности кремниевой пластины, данные о яркости с двух датчиков.

Для заключения об эффективности обработки необходимо учитывать влияние начальной температуры на конусообразность отверстий. Конусообразность C – это отношение разности диаметров отверстий к толщине подложки, вычисляется по следующей формуле [9]:

$$C = \frac{D_{вх} - D_{вых}}{h}, \quad (1)$$

где C – конусообразность; $D_{вых}$ – выходной диаметр отверстия; $D_{вх}$ – входной диаметр отверстия; h – толщина материала.

Конусообразность является универсальным параметром для оценки качества полученного отверстия в полупроводниковых материалах. Создание отверстия с заданным значением C является серьезной технической задачей. Кроме того, снижение конусообразности отверстий увеличивает сложность процесса.

Результаты исследования. Эксперимент был проделан без предварительного нагрева ИК излучением и с нагревом до температур 100 °С, 150 °С, 200 °С и 250 °С. С помощью термомпары снималась информация о нагреве кремниевой пластины на расстоянии 5 мм от зоны воздействия. Результаты эксперимента сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты эксперимента по прошивке отверстий

Опыт	Максимальная температура на кремниевой пластине, °С	Время прошивки, с
без нагрева	144	9,7
нагрев 100 °С	165	7,4
нагрев 150 °С	180	6,1
нагрев 200 °С	235	4,8
нагрев 250 °С	281	5,1

Кремневые пластины с сформированными отверстиями визуально оценены под микроскопом Планар МИКРО 200-01 под 200-кратным увеличением. В программном комплексе AutoScan 3 Studio были измерены диаметры отверстий с каждой стороны для определения конусности. Результаты эксперимента сведены в таблицу 2.

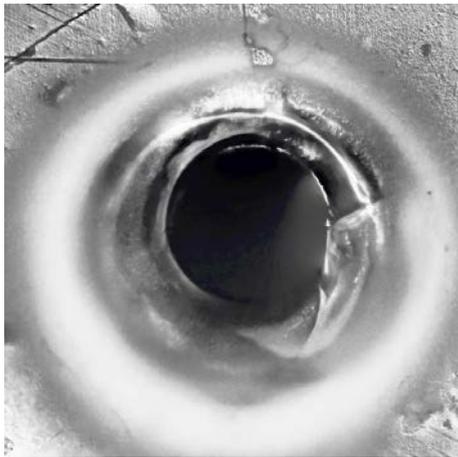
Таблица 2 – Результаты эксперимента, исследование конусности

Опыт	Диаметр, сторона А, мкм	Диаметр, сторона Б, мкм	Конусность
без нагрева	183	144	0,20
нагрев 100 °С	175	129	0,23

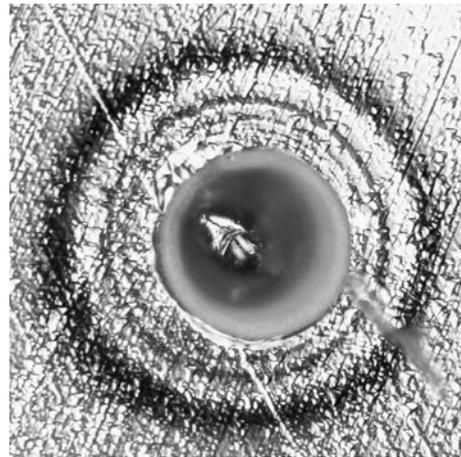
Окончание таблицы 2

нагрев 150 °С	170	125	0,23
нагрев 200 °С	162	120	0,21
нагрев 250 °С	154	108	0,23

Результаты формирования переходных отверстий, полученных посредством только лазерного нагрева, представлены на рисунке 3. Сторона, на которую напрямую оказывалось воздействие лазерного нагрева (рисунке 3, а), видны образования наплывов, диаметр отверстия 183 мкм. Рисунок 3, б – обратная сторона, диаметр отверстия 144 мкм, отчетливо видны поля, вызванные перегревом.



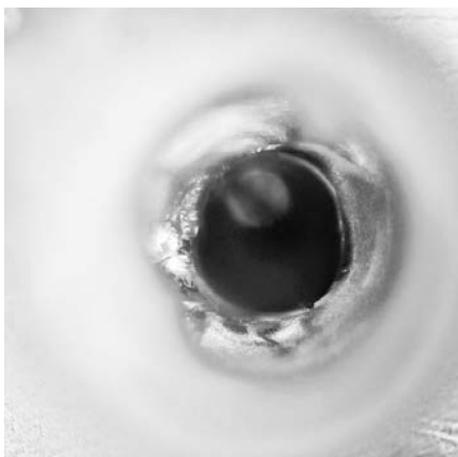
а)



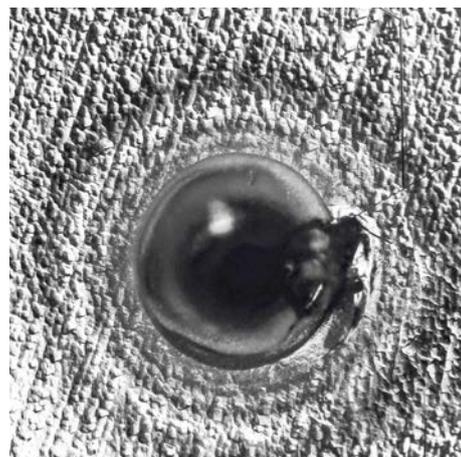
б)

Рисунок 3 – Форма отверстий, полученных только лазерным нагревом

При формировании переходного отверстия с температурой предварительного нагрева инфракрасным излучением, составляющей 200 °С. На рисунке 4а показана сторона, которая подвергалась непосредственному воздействию лазерного нагрева. На ней видны наплывы, а диаметр отверстия составляет 162 мкм. На рисунке 4б показана обратная сторона. Диаметр отверстия здесь составляет 120 мкм. Также видны поля, образовавшиеся в результате перегрева.



а)



б)

Рисунок 4 – Форма полученных отверстий с применением предварительного ИК нагрева до 200 °С

При визуальном сравнении формы полей локального перегрева вокруг формируемого отверстия в кремневой пластине, полученного как без предварительного нагрева, так и с предварительным равномерным нагревом до 200 °С, заметен характерный ровный круговой радужный рисунок, диаметр составил 462–487 мкм, различия лишь в более контрастном рисунке для отверстия без предварительного нагрева, что может свидетельствовать о большей термической нагрузке.

Заключение. Проведенные исследования показали, что применение комбинированного лазерного и инфракрасного нагрева для операции прошивки отверстий в кремневых пластинах позволяет снизить время процесса 1,4– раза, при незначительном увеличении конусности, порядка 5 % при нагреве до 200 °С, следовательно, применение предварительно нагрева позволяет получить отверстия с меньшими затратами энергии и времени.

Литература

1. Through Silicon Via – TSV Technology [Electronic resource] // Micralyne. – Access mode : <https://www.micralyne.com/technology-platforms/through-silicon-via>. – Date of access : 17.09.2024.
2. Мухина, Е. 3D-сборка : технология сквозных отверстий в кремнии / Е. Мухина, П. Бушта // Электроника, Наука, Технология, Бизнес. – 2009. № 2. – С. 92–93.
3. Ланин, В. Л. Технология и оборудование сборки и монтажа электронных средств / В. Л. Ланин, В. А. Емельянов, И. Б. Петухов. – Минск : Беларуская навука, 2022. – 512 с.
4. Зворыкин, Д. Б. Применение лучистого инфракрасного нагрева в электронной промышленности / Д. Б. Зворыкин, Ю. Н. Прохоров. – М. : Энергия, 1980. – 176 с.
5. Лаппо, А. И. Автоматизированный контроль процесса формирования переходных отверстий в кремниевых подложках посредством лазерного и инфракрасного нагрева / А. И. Лаппо // Электронные системы и технологии : сб. матер. 57-й науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, 19–23 апреля 2021 г. / редкол.: Д. В. Лихачевский [и др.]. – Минск : БГУИР, 2021. – С 204–207.
6. Ланин, В. Л. Формирование отверстий в кремниевой подложке 3D-электронного модуля лазерным излучением / В. Л. Ланин, В. Т. Фам, А. И. Лаппо // Доклады БГУИР. – 2021. – Т. 19, № 3. – С. 58–65.
7. Лаппо, А. И. Исследование процесса лазерной прошивки отверстий в кремнии при формировании 3d структур / А. И. Лаппо, В. Л. Ланин, А. П. Первенецкий // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения «INTERMATIC-2018» : матер. Междунар. науч.-технич. конф., Москва, 19–23 ноября 2018 г. / МИРЭА – Российский технологический университет. – М., 2018. – С. 392–395.
8. Лазерный станок Yueming CMA0604-B-A 65-75 ватт, характеристики [Электронный ресурс] // Gipertec. – Режим доступа : <https://gipertec.ru/products/lazernii-standok-yueming-cma0604ba>. – Дата доступа : 17.09.2024.
9. Прахт, В. А. Моделирование тепловых и электромагнитных процессов в электротехнических установках / В. А. Прахт, В. А. Дмитриевский, Ф. Н. Сарапулов. – М. : ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. – 560 с.