

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ В КРЕМНИИ И КЕРАМИКЕ



В.Л. Ланин
Профессор кафедры
электронной техники и
технологии, доктор
технических наук



Н.Д. Чан
Магистрант кафедры
электронной техники
и технологии

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь
E-mail: ylanin@bsuir.by, nhandattran94@gmail.com

В.Л. Ланин

Профессор кафедры электронной техники и технологии. Имеет 30 летний опыт работы в области технологии сборки и монтажа электронной аппаратуры. Автор 10 монографий в данной области исследований.

Н.Д. Чан

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники в 2018. Магистрант кафедры электронной техники и технологии. Проводит научные исследования по технологии лазерной прошивки отверстий в кремниевых и керамических подложках.

Аннотация. В процессе лазерной импульсной обработки при формировании отверстий в кремнии и керамике, время нагрева и скорость сверления отверстий с использованием лазерных импульсов длительностью микро-, нано и пикосекунды рассчитаны при разных значениях интенсивности этих импульсов. Определение требуемой интенсивности лазерного луча в процессе лазерного формирования отверстий позволяет оптимизировать процесс.

Ключевые слова: лазерная импульсная обработка, формирование отверстий, кремний, керамика, микро-, нано-, пикосекунды, интенсивность лазерного луча.

В настоящее время наметилась тенденция к созданию на первом этапе освоения производства 2,5 D-устройств, содержащих несколько кристаллов, объединяемых с помощью промежуточной монтажной пластины (*interposer*). Такая монтажная пластина из кремния с вертикальными сквозными отверстиями и медными контактными столбиками позволяет присоединять микросхемы с малым шагом на печатные платы с большим шагом проводников. В промежуточные кремниевые пластины могут быть встроены как пассивные компоненты (развязывающие конденсаторы, индуктивности), так и активные (стабилизаторы, транзисторы) (рисунок 1).

По плотности выводов кремниевая промежуточная монтажная пластина в 20 раз превосходит керамические платы, используемые для монтажа электронных компонентов. С помощью кремниевой промежуточной платы с TSV-соединениями, выполненными с 65-нм топологическими нормами, удалось получить больше соединений между кристаллами FPGA (свыше 10 тыс.), чем в системе в корпусе [1]. Таким образом, важное достоинство

2,5D-технологии – сокращение межсоединений микросхем и экономия потребляемой энергии.

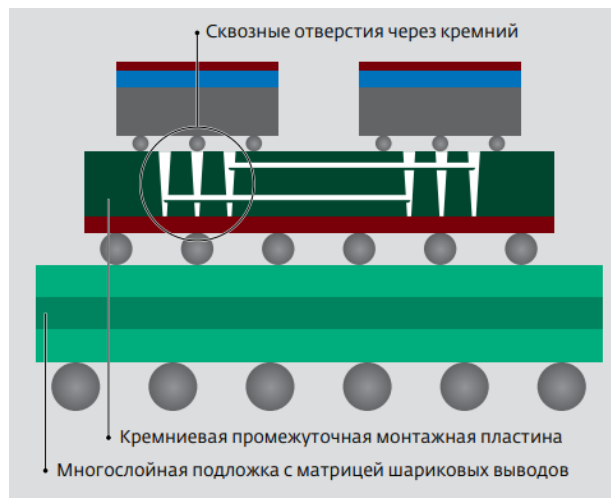
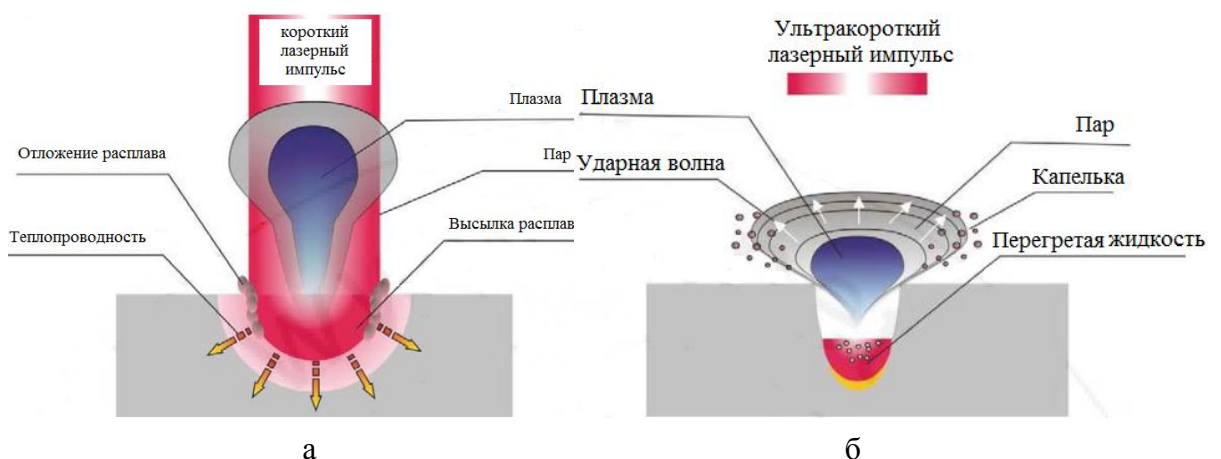


Рисунок 1 – Структура 2,5D-устройства с промежуточной монтажной пластиной

Лазерное формирование отверстий – это процесс удаления материала, который имеет два основных механизма удаления материала из зоны взаимодействия пучка и последующего распространения фронта луча в объем материала. К ним относятся [3]:

- испарение расплава (для бурения с высокой мощностью или коротким импульсом),
- выброс расплава под действием силы отдачи, вызванной испарением (резка, сварка и сверление).

Для коротких лазерных импульсов в микро- и наносекундном диапазоне в процессе абляции преобладают теплопроводность, плавление, испарение и образование плазмы (рис. 2, а). Для ультракоротких пикосекундных лазерных импульсов и связанных с этим коротких периодов времени эти классические описания взаимодействия пучка с веществом теряют свою актуальность (рисунок 2, б).



а – классическое, б – сверхбыстрое

Рисунок 2 – Взаимодействие лазерного пучка с веществом

Мощность лазерного излучения определяется по формуле [3]:

$$P = \frac{E}{\tau_0}, \quad (1)$$

где E – лазерная энергия, τ_0 – длительность импульса.

Интенсивность лазерного луча зависит от мощности и его радиуса :

$$I_0 = \frac{P}{\pi r^2}, \quad (2)$$

где r – радиус лазерного луча.

Температура внутри материала определяется как [3]:

$$T = T_0 + \frac{2I_0}{K} \left(\frac{kt}{\pi} \right)^{1/2} e^{-\frac{z^2}{4kt}} - \frac{I_0 z}{K} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{z}{2(kt)^{1/2}} \right), \quad (3)$$

$$k = \frac{K}{\rho C}, \quad (4)$$

где T_0 – температура окружающей среды, K – теплопроводность, z – осевая координата, k – температуропроводность, ρ – плотность, C – теплоемкость.

Распределение температуры действительно при условии, что $(kt)^{1/2} < w$, что может быть достигнуто либо за счет слабой диффузии, либо за счет короткого времени сверления. Время, в течение которого поверхность материала достигает температуры фазового перехода твердое вещество-жидкость, может быть получены следующим:

$$T_m - T_0 = \frac{2I_0}{K} \left(\frac{kt}{\pi} \right)^{1/2}, \quad (5)$$

где T_m – температура плавления.

Продолжительность стадии нагрева рассчитывается по формуле [3]:

$$t_h = \frac{\pi}{k} \left(\frac{K(T_m - T_0)}{2I_0} \right)^2, \quad (6)$$

Скорость сверления отверстий зависит от интенсивности луча и параметров материала:

$$v = \frac{I_0}{\rho [L_m + C(T_m - T_0)]}, \quad (7)$$

где L_m – скрытая теплота плавления.

Моделирование зависимостей параметров процесса формирования отверстий от интенсивности лазерного луча выполнено на кремнии и керамике, характеристики которых приведены в таблице 1. Экспериментальные параметры прикладных лазерных систем показаны в таблице 2 [4].

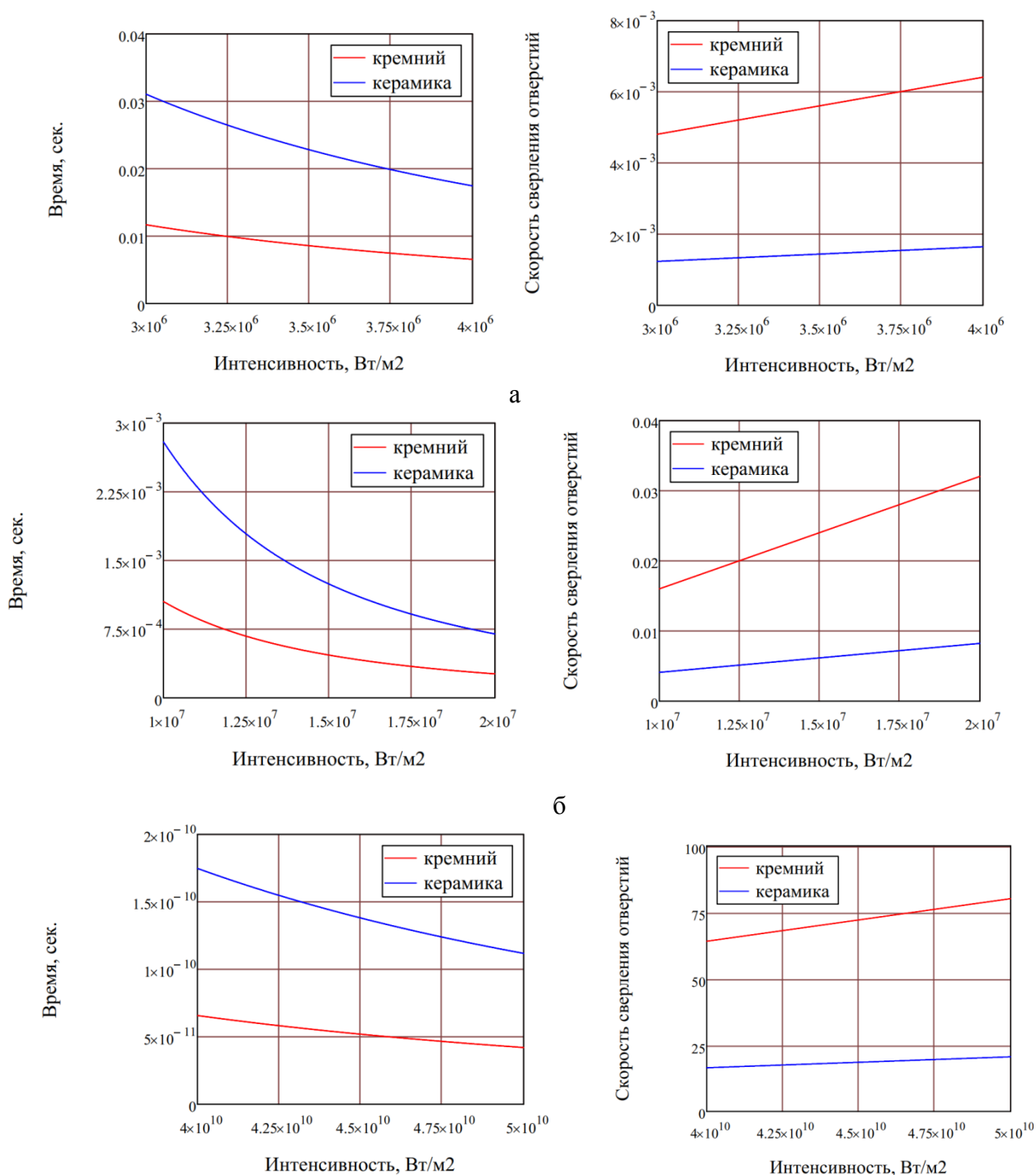
Таблица 1 – Характеристики кремнии и керамики

Свойства	Кремний	Керамика
Теплопроводность K , Втм ⁻¹ К ⁻¹	43	28
Плотность ρ , кгм ³	2300	3900
Теплоемкость C , кДжкг ⁻¹ К ⁻¹	0.7	0.78
Скрытая теплота плавления L_m , Дж/кг	2.73×10^5	6.2×10^5
Температура плавления T , К	1683	2345

Таблица 2 – Лазерные системы

Свойства	Микросекундная	Наносекундная	Пикосекундная
Длина волны λ , нм	1064	532	1064
Длительность импульсов t_0	80 мкс	60 нс	10 пс
Импульсная энергия E , мДж	90	280	150

Результаты моделирования процесса лазерной импульсной обработки при формировании отверстий в кремнии и керамике показаны на рисунке 3.



а – микросекундная, б – наносекундная, в – пикосекундная

Рисунок 3 – Зависимости продолжительности этапа нагрева и скорости сверления отверстий от интенсивности лазерных импульсов

Время нагрева и лазерного сверления уменьшается при увеличении интенсивности лазерных импульсов, особенно при воздействии импульсов пикосекундной и наносекундной длительности. Скорость процесса сверления увеличивается при увеличении интенсивности лазерных импульсов и это увеличение значительно при воздействии импульса пикосекундной длительности. При воздействии импульсов нано- и микросекундной длительности различие меньше. Это различие, которое возникает в параметрах процесса лазерного сверления, обусловлено разной длины волны импульса и длительности, и соответственно разными энергиями, которая играет главную роль при обработке неметаллических материалов подложек [5].

При сравнении обрабатываемых материалов: кремния и керамики с точки зрения воздействия лазерных импульсов на них, установлено, что время стадии нагрева и время процесса лазерного сверления меньше в кремнии, в то время как скорость процесса сверления увеличивается в керамическом материале, что объясняется различными тепловыми свойствами материала (теплопроводность, плотность, удельная теплоемкость и температура плавления).

Список литературы

- [1]. Юдинцев В. Трехмерная кремниевая технология // ЭЛЕКТРОНИКА, НАУКА, ТЕХНОЛОГИЯ. БИЗНЕС.– 2011.– № 5 (00111). – С. 96–103.
- [2]. König, J. Fundamentals and industrial applications of ultrashort pulsed lasers at Bosch / J. König, T. Bauer. – San Fransisco, 2011. – P. 7925–7932.
- [3]. Ikhlas, J. M.. Theoretical Study of Drilling Process Materials By Laser Pulses / J.M. Ikhlas // International Journal of Science and Research, 2015. – Volume 4, Issue 1. – P. 1448–1449.
- [4]. Chichkov, B.N.. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids / B.N. Chichkov [and ets.] // Appl. Phys. A. – 1996. – P. 109–115.
- [5]. Ланин, В.Л. Лазерное формирование отверстий в кремниевых подложках 3D электронных модулей / В.Л. Ланин, С.А. Волк, А.П. Первенецкий // Технологии в электронной промышленности. – 2018.– № 2. – С. 65–67.

OPTIMIZATION OF LASER PULSE PROCESSING WHEN FORMING HOLES IN SILICON AND CERAMICS

V.L. LANIN

*Doctor of Engineering Sciences
Professor of department of the
electronic equipment and
technology of the BSUIR*

Tr. N. DAT

*Master student
of department of the
electronic equipment and
technology of the BSUIR*

Belarus State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

E-mail: vlanin@bsuir.by, nhandattran94@gmail.com

Abstract. In laser pulse process when forming holes in silicon and ceramics, the heating stage time and the drilling velocity using laser pulse (micro-, nano-, picoseconds) have been calculated at different values of intensity of these pulse. Determination of the effect of laser beam intensity in laser holes formation process allows to optimize the process.

Key words: laser pulse processing, hole formation, silicon, ceramics, micro-, nano-, picoseconds, laser beam intensity.