

Лазерное плазмохимическое травление материалов электронной техники на примере алмаза и сапфира

В. С. Кондратенко, П. П. Мальцев, С. В. Редькин

В работе рассмотрены вопросы лазерного плазмохимического травления материалов электронной техники на примере разделения пластин алмаза и сапфира на кристаллы. В основе разработанного метода лежит физическое явление – оптический пробой в специально подобранных газовых средах, в которых поджигается плазма и производится плазмохимическое травление материалов подложек (пластин) с образованием летучих продуктов химических реакций и их эвакуацией с помощью вакуумной системы. Работы проводились в диапазоне рабочих давлений $1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-1}$ Торр. В качестве рабочих сред использовались фторидные системы: ($SF_6 + O_2$; $CClF_3 + O_2$; F_2 и т. д.), чистый кислород (O_2) и водород (H_2). Обе системы – фторидная и кислородная «работают» хорошо для алмаза. Водородная система предпочтительна для сапфира.

Ключевые слова: лазер, плазма, кристаллы, пластина, плазмохимия, травление.

DOI: 10.51368/1996-0948-2021-1-12-16

Введение

В современной отрасли производства различных приборов микро- и оптоэлектроники одной из важнейших финишных операций является технологическая операция разделения приборных пластин со сформированными структурами на кристаллы (чипы). В настоящее время в промышленности применяются как механические (алмазная дисковая резка), так и термические лазерные методы:

- скрайбирование [1];
- технологии SD резки (Stealth Dicing – невидимая резка), при которой фокусировка

лазерного излучения осуществляется внутри кристалла для создания дефектов с последующим механическим раскалыванием [2];

- лазерное управляемое термораскалывание (ЛУТ) [3, 4];
- иммерсионная лазерная резка [5].

Каждый из перечисленных методов резки имеет свои преимущества, но одновременно свои недостатки и ограничения. В частности, несмотря на рекордные параметры по скорости и чистоте процесса резки метод ЛУТ не может быть применен для резки алмазных подложек из-за высокой теплопроводности алмаза.

Известно широкое применение плазменных (плазмохимических) методов в производстве микроэлектронных приборов [6, 7]. В данной работе предпринята попытка разработки и использования новой разновидности плазмохимического процесса – лазерного плазмохимического процесса, для резки приборных пластин на кристаллы.

Однако, использовать плазмохимический метод напрямую нельзя, так как его составляющей является наличие масок (полимерные, металлические, диэлектрические, многослойные и т. д.). В нашем случае, нано-

Кондратенко Владимир Степанович¹, зав. кафедрой, д.т.н., профессор.

E-mail: vsk1950@mail.ru

Мальцев Петр Павлович¹, зав. лаб., д.т.н., профессор.

E-mail: isvch@isvch.ru

Редькин Сергей Викторович², в.н.с., к.т.н.

E-mail: sergeiredkin@yandex.ru

¹ МИРЭА – Российский технологический университет». Россия, 119454, Москва, проспект Вернадского, 78.

² ИСВЧПЭ РАН – Институт СВЧ полупроводниковой электроники РАН.

Россия, 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр. 5.

Статья поступила в редакцию 22 января 2021 г.

© Кондратенко В. С., Мальцев П. П., Редькин С. В., 2021

снять маски на готовые приборы недопустимо, поскольку их в последующем необходимо удалять, для чего, как правило, используется опять плазменная обработка, которая вносит поверхностные дефекты, диффундирующие внутрь слоёв, что может привести к выходу из строя самого прибора.

Для полноценной реализации плазмохимического процесса травления необходимо пониженное давление и соответствующие ингредиенты газовой среды, чтобы после образования плазмы и протекания химических реакций её компонент с твёрдым телом подложки образовывались летучие продукты этих реакций.

Особенность наших плазмохимических процессов заключается в том, что необходимо создавать локальную плазму. Для эффективного создания локальной плазмы нами было использовано такое физическое явление как оптический пробой, зависящий от давления, потенциала ионизации используемых газовых компонент, энергии связи в кристаллической решетке пластины и т. д. Образование оптического пробоя в рабочей зоне мы осуществляли с помощью лазеров с различной длиной волны. В наших экспериментах плазма образовывалась в фокусе лазерного луча. В основном, диаметр плазменного образования зависит от длины волны используемого лазера, расходимости луча и других параметров. Перемещая локальную плазму в фокусе лазерного луча по поверхности пластины – мы получаем канавки

травления, что нам и требуется для разделения подложки на отдельные кристаллы.

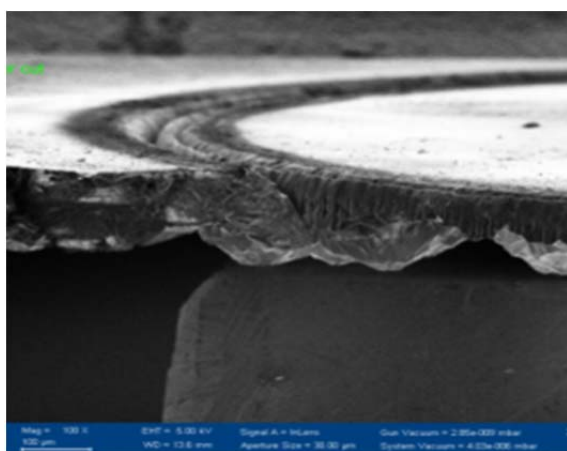
Эксперимент

Эксперименты мы проводили на макетных установках [8] с использованием лазера на парах меди с параметрами:

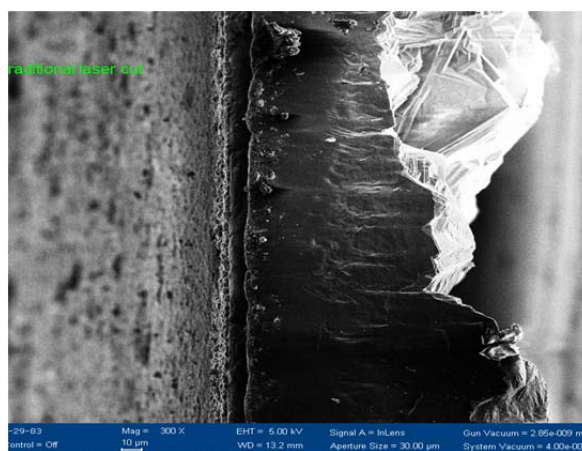
- длины волн: 510,6 нм и 578,2 нм;
- длительность импульса: 20 нс;
- частота следования импульсов: 10 кГц;
- средняя мощность излучения в пучке: 10 Вт;
- КПД: 1 %;
- расходимость пучка: близка к дифракционной;
- пиковая мощность излучения в импульсе: 50 кВт;
- диаметр пятна фокусировки: 10 мкм.

Для корректности, мы сравнивали традиционную лазерную обработку при атмосферных условиях и лазерную плазмохимическую, при неизменных параметрах лазера. Сравнительные результаты экспериментов по обработке пластин из поликристаллического алмаза представлены на рисунках 1, 2.

Как видно (рис. 1, а, б), при традиционной (атмосферной) лазерной резке поликристаллического алмаза происходит его модификация – образуются графит и фуллерены и осуществляется выброс материала на поверхность (грат).



а



б

Рис. 1. Традиционная лазерная резка.

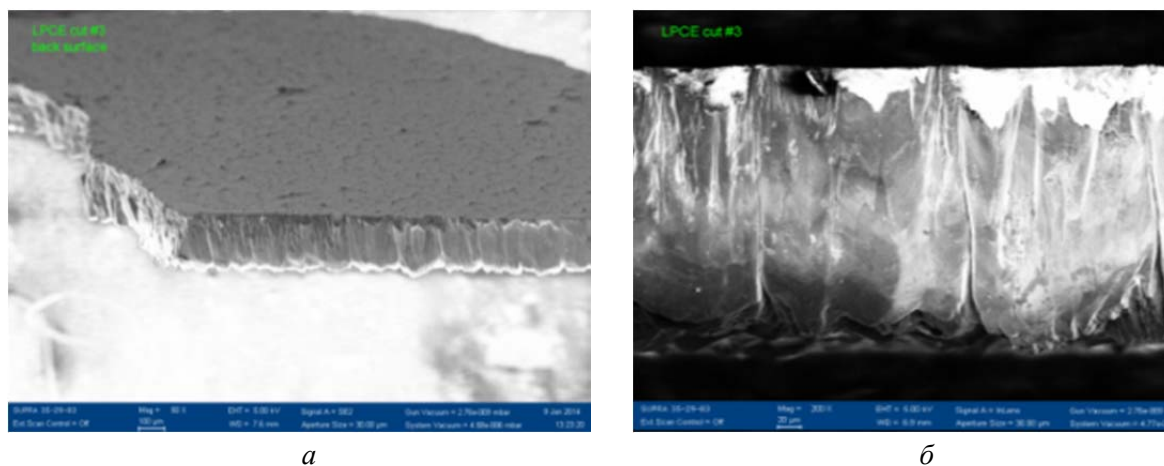


Рис. 2. Лазерная плазмохимическая резка – локальное плазмохимическое травление.

На рисунке 2 представлен результат лазерной плазмохимической «резки» посредством травления материала пластины. Из рисунка видно, что отсутствует выброс материала пластины на её поверхность и его модификация. На рисунке присутствует специально подготовленный нами образец, чтобы в одном оптическом поле были видны и «рез» по лазерной плазмохимической технологии и скол пластины. Скол пластины из поликристаллического алмаза проходит по спайности кристаллитов, а «рез» проходит по самим кристаллитам и представляет собой ровную линию. По внешнему виду кристаллиты на «резе» и сколе абсолютно идентичны. Это говорит о том, что алмаз полностью перешёл в газообразные продукты в результате полноты прохождения химических реакций в образованной в фокусе лазерного луча плазме, т. е. прошёл плазмохимический процесс травления.

Для создания плазмы мы использовали фторидные системы ($\text{SF}_6 + \text{O}_2$; F_2 ; $\text{CClF}_3 + \text{O}_2$ и др.) и чистый кислород (O_2). Обе системы «работают», но с точки зрения экономики и экологии кислород более доступен и более приемлем, так как конечными продуктами химических реакций являются CO и CO_2 , которые летучи при наших условиях. Моноксид углерода или угарный газ (CO) легко переводится в CO_2 , делая её менее агрессивной и безопасной для обслуживающего персонала. Таким образом, мы разработали абсолютно новый технологический процесс разделения пластины на кристаллы без модификации её материала, без выброса материала

пластины на поверхность кристаллов и экологически «чистый».

Следующим материалом, с которым мы проводили исследования по лазерному плазмохимическому травлению, был сапфир (Al_2O_3). Для увеличения степени неравновесности плазмы внутри реактора была размещена ртутная лампа [9]. Использование УФ-излучения обеспечило увеличение концентрации электронов и, тем самым, увеличило степень ионизации плазмы.

Эксперименты с привнесённым внешним источником УФ-излучения для увеличения плотности плазмы, что в свою очередь, интенсифицирует процесс травления (протекания химических реакций) показали необходимость перехода к использованию для разделения пластин из сапфира УФ-лазера. Для дальнейших экспериментов мы использовали УФ-лазер с длиной волны 355 нм, который используется в установке лазерного управляемого термораскалывания МЛП1–1060/355. Нами была модернизирована названная установка. В первую очередь это коснулось оптической системы, был установлен реактор, газовая система, вакуумная система.

В экспериментах с пластинами из сапфира мы соблюдали такие же принципы, что и при обработке пластин из алмаза – все характеристики лазера оставались постоянными, изменялись только условия проведения экспериментов (газовые среды, давление).

На рисунках 3 приведены результаты экспериментов по традиционной лазерной обработке сапфира (при атмосферных условиях) и лазерной плазмохимической обработки.

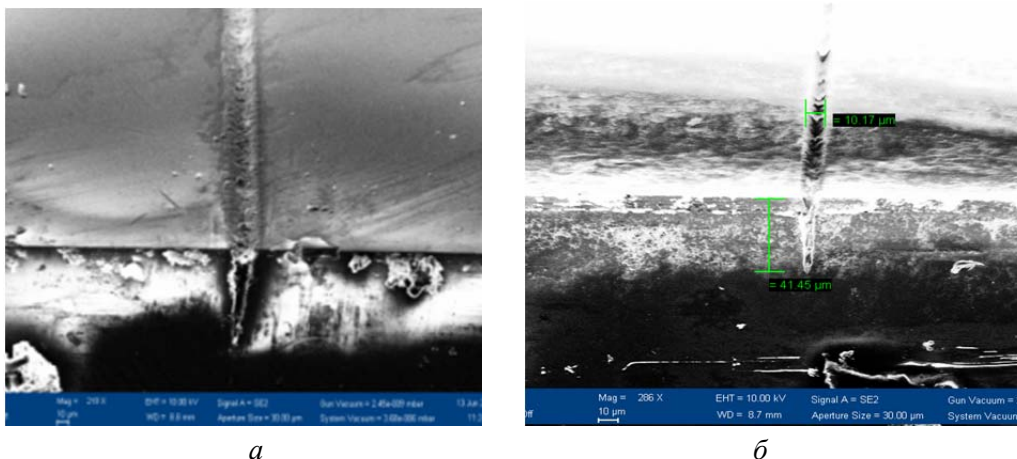


Рис. 3. Результаты традиционной лазерной «резки» сапфира (а) и лазерного плазмохимического травления (б).

Все исследования мы проводили в атмосфере водорода (H₂) при рабочем давлении $1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-1}$ Торр.

Как видно из рис. 3, б локальное лазерное плазмохимическое травление уменьшает ширину «реза» в три раза, грат отсутствует, профиль травления приближается к прямоугольному.

Полученные результаты указывают, что лазерный плазмохимический способ разделения пластин на кристаллы является новым технологическим направлением и может быть использован в технологическом маршруте создания микроэлектронных приборов.

Заключение

1. Разработанный способ локального лазерного плазмохимического травления применительно к разделению пластин алмаза и сапфира на кристаллы обеспечивает:

- отсутствие грата;
- независимость направления «реза» от кристаллографического направления пластин;
- травление не вносит внутренних напряжений в стенки «реза», что бывает при использовании всех известных лазерных термических методов.

2. Разработанный способ разделения пластин на кристаллы является новым технологическим направлением.

3. Разработанный способ разделения пластин на кристаллы возможно применять и к другим материалам.

По результатам проведенных исследований получен патент РФ [10].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 19-07-00683 А.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mingwei Li, Andrew Held. Meeting industry needs with laser micromachining // Solid State Technology. 2003.
2. https://jp.hamamatsu.com/sd/Index_eg.html
3. Патент РФ № 2024441, МКИ³ С03 В 33/02. Способ резки хрупких материалов / Кондратенко В. С.; заявл. № 5030537/33 от 02.04.1992; опубл. 15.12.1994, бюл. № 23.
4. Кондратенко В. С., Кудж С. А. // Стекло и керамика. 2017. № 3. С. 5.
5. Кондратенко В. С., Кадомкин В. В., Лу Хун-Ту, Наумов А. С., Великовский И. Э. // Стекло и керамика. 2020. № 4. С. 3.
6. Плазменная технология в производстве СБИС / Пер. с англ. под ред. Н. Айнспрука, Д. Брауна. – М.: Мир, 1987.
7. Броудай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии / Пер. с англ. – М.: Мир, 1985.
8. Мальцев П. П., Редькин С. В., Скрипниченко А. С., Побойкина Н. В. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2017. Т. 17. № 2. С. 250.
9. Редькин С. В., Скрипниченко А. С., Мальцев П. П., Гамкрелидзе С. А. // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. 2018. Т. 18. № 2. С. 478.
10. Патент № 2731167 РФ: МПК Н01L 21. Способ лазерной плазмохимической резки пластин / Гамкрелидзе С. А., Мальцев П. П., Редькин С. В., Кондратенко В. С., Скрипниченко А. С., Стыран В. В. опубл. 31.08.2020; бюл. № 25.

Laser plasma etching of electronic materials on the example of diamond and sapphire

V. S. Kondratenko¹, P. P. Maltsev¹, and S. V. Redkin²

¹ MIREA – Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia

² ISVCHPE RAS
7 Nagorny proezd., Moscow, 1174105, Russia

Received January 22, 2021

The work addresses the issues of laser plasma etching of electronic materials on the example of the separation of diamond and sapphire plates into crystals. The developed method is based on a physical phenomenon – an optical breakdown in specially selected gas environments in which plasma is set on fire and plasma etching of sub-base materials (plates) with the formation of volatile products of chemical reactions and their evacuation by vacuum system. The work was carried out in the range of working pressures of 1×10^{-3} – 1×10^{-1} Torr. Fluoride systems were used as work environments: (SF_6/O_2 ; $CClF_3/O_2$; F_2 , etc.) and pure oxygen (O_2). Both the system – fluoride and oxygen "work" well. The oxygen system is preferable for economic and environmental reasons.

Keywords: laser, plasma, crystals, plate, plasma chemical, etching.

REFERENCES

1. Mingwei Li, Andrew Held. Meeting industry needs with laser micromachining, Solid State Technology (2003).
2. https://jp.hamamatsu.com/sd/Index_eg.html
3. RF patent № 2024441, IPC⁵ CO3 V 33/02. Method of cutting brittle materials, V. S. Kondratenko; Applied. № 5030537/33 dated 02.04.1992; Publ. 15.12.1994, Bul. № 23.
4. V. S. Kondratenko and S. A. Kudzh, Glass and Ceramics **74** (3–4), 75 (2017).
5. V. S. Kondratenko, V. V. Kadomkin, Hung-Tu Lu, A. S. Naumov, and I. E. Velikovskii, Glass and Ceramics **77** (3–4), 121 (2020).
6. *Plasma technology in the production of ULIC*, Per. from English / Ed. N. Ainspruck, D. Brown (Mir, Moscow, 1987).
7. I. Broday and J. Merey, *Physical foundations of microtechnology*, Per. from English. (Mir, Moscow, 1985).
8. P. P. Maltsev, S. V. Redkin, A. S. Skripnichenko, and N. V. Poboikina, Fundamental problems of electronic instrument making **17** (2), pp. 250 (2017).
9. S. V. Redkin, A. S. Skripnichenko, P. P. Maltsev, and S. A. Gamkrelidze, Fundamental problems of radio-electronic instrument making **18** (2), 478 (2018).
10. Method for laser plasma-chemical cutting of plates. Patent No. 2731167 RF: IPC⁵ H01L 21 // S. A. Gamkrelidze, P. P. Maltsev, S. V. Redkin, V. S. Kondratenko, A. S. Skripnichenko, V. V. Styran, Publ. 31.08.2020. Bul. № 25.