

ЛАЗЕРНОЕ ТРАВЛЕНИЕ МЕТАЛЛОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВ КАК АЛЬТЕРНАТИВА ХИМИЧЕСКОМУ ТРАВЛЕНИЮ

В.Ю. Железнов, Т.В. Малинский, В.Е. Рогалин, Ю.В. Хомич, С.А. Филин
*Институт электрофизики и электроэнергетики РАН,
Дворцовая наб. 18, Санкт-Петербург 191186, Россия,
vyuzheleznov@ieeras.ru, tmalinsky@yandex.ru, ykhomich@yandex.ru,
v-rogalin@mail.ru, safilin@mail.ru*

Ввиду экологических проблем с химическими травителями ведутся активные исследования альтернативных методов выявления дефектов в полупроводниках и металлах. В работе рассматривается экологически безопасный метод «сухого» лазерного травления. Успешно использован Nd:YAG лазер (третья гармоника, длина волны $\lambda = 355$ нм, длительность импульса $\tau = 10$ нс, частота $f = 100$ Гц, размер пятна 100-200 мкм). Он был апробирован при выявлении дислокаций в монокристаллах германия, а также для визуализации границ зерен в бескислородной меди и сплавах - Cu-Cr, Cu-Zr, Cu-Cr-Zr, и латуни. Результат получен в режиме оптопластического эффекта (плотность энергии импульса $We \sim 0.1-1.0$ Дж/см²).

Ключевые слова: экология; лазерное травление; модификация поверхности; химическое травление; наносекундный УФ лазер; германий; сплавы меди.

LASER ETCHING OF METALS AND SEMICONDUCTORS AS AN ALTERNATIVE TO CHEMICAL ETCHING

V.Yu. Zheleznov, T.V. Malinskiy, Yu.V. Khomich, V.E. Rogalin, S.A. Filin
*Institute of Electric Physics and Electric Power Engineering, RAS,
18 Dvortsovaya Quay, 191186 St. Petersburg, Russia,
vyuzheleznov@ieeras.ru, tmalinsky@yandex.ru, ykhomich@yandex.ru,
v-rogalin@mail.ru, safilin@mail.ru*

In view of ecological problems with chemical etchants, there is active research into alternative methods for detecting defects in semiconductors and metals. The paper considers an environmentally relatively safe method of "dry" laser etching. A Nd:YAG laser was successfully used (third harmonic, wavelength $\lambda = 355$ nm, pulse duration $\tau = 10$ ns, frequency $f = 100$ Hz, spot size 100-200 μm). The frequency-pulse radiation of the laser was scanned over the surface of the sample along a raster trajectory ("snake") in accordance with the program specified by the computer. Neighboring spots overlapped by 98%. Each sector was exposed to ~ 30 laser pulses. Laser etching was implemented to detect dislocations in polished n-type germanium single crystals (crystallographic plane {111}), as well as to visualize grain boundaries in oxygen-free copper and its alloys - Cu-Cr, Cu-Zr, Cu-Cr-Zr, and brass. The result was obtained in the optoplastic effect mode (at the pulse energy density $We \sim 0.1-1.0$ J/cm²). Such surface treatment showed intense thermomechanical processes in the near-surface layer of the samples heated to premelting temperatures. Sharp heating and rapid cooling markedly affected the behavior of structural defects. Before and after exposure, the surface structure of the samples was studied using a Zygo NewView 7300 multibeam optical profilometer and a JSM-7001F JEOL scanning electron microscope (SEM). Laser etching, in addition to ecological attractiveness, has a number of technical advantages, namely: high efficiency; no need to make images for research; the ability to take measurements on an unused area of finished details. To obtain such data in a metallographic laboratory, it is sufficient to have a microscope and a commercially available Nd:YAG laser or another laser with similar characteristics.

Keywords: ecology; laser etching; surface modification; chemical etching; nanosecond UV laser; germanium; copper alloys.

Введение

В последнее время экологические проблемы стали одной из важнейших тем научных разработок. В металлургии и электронной промышленности активно

применяется химическое травление. В настоящее время это общепринятый метод выявления структурных дефектов полупроводников и металлов. Данные о дефектах - важная характеристика материала, ко-

торая указывается в паспорте на выпускаемую продукцию.

Работа с химическими реактивами и их последующая утилизация является непростой и дорогостоящей задачей. Это особенно заметно в связи с постоянно ужесточающимися экологическими требованиями. Поэтому сейчас ведутся активные исследования альтернативных методов выявления дефектов в полупроводниках и металлах.

Известна обработка материалов лазерными импульсами [1] с целью модификации поверхности. Существует наиболее используемый абляционный режим обработки. При воздействии наносекундных УФ импульсов он проявляется при $We \geq 1$ Дж/см² [2] и характерен появлением оптического пробоя воздуха вблизи поверхности образца, сопровождаемым плавлением и испарением материала при заметном кратерообразовании.

Более интересным представляется оптикопластический эффект. Он недавно обнаружен [3], проявляется при $We \sim 0.1-1.0$ Дж/см². Сейчас эффект активно исследуется, так как в этом случае еще в конденсированном состоянии в кристаллической структуре происходят интенсивные процессы преобразования дефектов.

В данной работе сообщается о некоторых экспериментах по исследованию оптикопластического эффекта, представляющих определенный интерес для экологии. Обнаружен режим лазерного травления. Выявлены дислокации в монокристаллах германия и визуализированы границы зерен в заготовках из сплавов меди.

Методика эксперимента

Исследовались полированные монокристаллы германия n-типа (кристаллографическая плоскость {111}), а также полированные образцы бескислородной меди и ее сплавов - Cu-Cr, Cu-Zr, Cu-Cr-Zr, и латуни. Воздействовали на эти материалы сканирующими потоками излучения Nd:YAG лазера (третья гармоника, длина волны $\lambda = 355$ нм, длительность импульса $\tau = 10$ нс,

частота $f = 100$ Гц, размер пятна 100-200 мкм, $We \sim 0.1-1.0$ Дж/см²).

В неподвижном луче образец перемещался по растровой траектории ("змейка") по заданной компьютером программе. Перекрытие соседних пятен - 98 %. Каждый участок подвергался воздействию ~ 30 лазерных импульсов.

До и после воздействия структура поверхности образцов исследовалась при помощи профилометра Zygo NewView 7300 и растрового электронного микроскопа (РЭМ) JSM-7001F, JEOL. Более подробно методика изложена в [3-7].

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 показана поверхность монокристалла Ge {111} после лазерного воздействия ($We = 1.14$ Дж/см²) [8]. Аналогичные результаты были получены на монокристаллах Si [9].

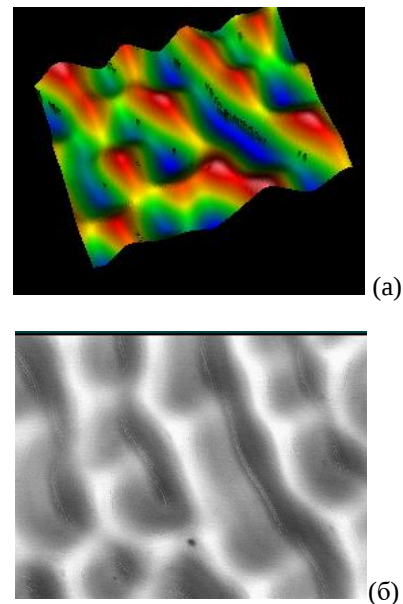


Рис. 1. Поверхность монокристалла Ge {111} после воздействия ($We = 0.6$ Дж/см²): а — трехмерное изображение; б — оптическая микрофотография; (Zygo NewView 7300)

Такая обработка поверхности проявила интенсивные термомеханические процессы в нагретом до предплавильных температур приповерхностном слое образцов. Резкий нагрев и стремительное охлаждение заметно повлияли на поведение структурных дефектов. В монокристаллах Ge

выявлена дислокационная структура. Полученные ямки травления идентичны выявляемым при химическом травлении.

Границы зерен, проявившиеся на полированной поверхности сплава Cu-Cr после воздействия 30 импульсов с $We \sim 0.6$ Дж/см² показаны на микрофотографии (рис. 2). Аналогичные результаты получены как на меди, так и на других исследованных сплавах.

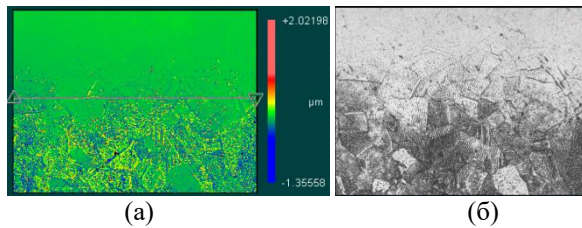


Рис. 2. Край облученной зоны образца Cu-Cr, $We \sim 0.6$ Дж/см², а) профиль поверхности, б) микрофотография (Zygo NewView 7300)

Заключение

Для получения подобных данных в металлографической лаборатории достаточно иметь микроскоп и серийно выпускаемый Nd:YAG лазер или другой, имеющий подобные характеристики. Его желательные параметры: третья гармоника, длина волны $\lambda = 355$ нм, длительность импульса ~ 10 нс, частота 10-100 Гц, энергия несколько мДж. Использование УФ диапазона желательно, так как большинство металлов в этом диапазоне теряют значительную долю отражательной способности [3].

Энергетический диапазон, в котором наблюдается эффект лазерного травления, весьма узок, и поэтому требуется тщательное соблюдение требуемых параметров излучения. Для каждого материала они должны уточняться.

Лазерное травление, помимо экологической привлекательности, имеет ряд технических преимуществ, а именно:

- высокая оперативность;
- отсутствие необходимости изготовления образцов для измерений;
- возможность проводить измерения на неиспользуемом участке готовых деталей.

Благодарности

Работа выполнена в рамках государственного задания по научной деятельности № 75-03-2022-056 с использованием ресурсов ЦКП ТвГУ. Авторы признательны Ивановой А.И. и Каплунову И.А. за результаты электронно-микроскопического анализа.

Библиографические ссылки

1. Хомич В.Ю., Шмаков В.А. Механизмы и модели прямого лазерного наноструктурирования материалов. *Успехи физических наук* 2015; 185(5): 489-499.
2. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. Москва: Наука; 1970. 272 с.
3. Малинский Т.В., Рогалин В.Е. Предпороговые эффекты при воздействии ультрафиолетовых лазерных импульсов на медь и ее сплавы. *Журнал технической физики* 2022; 92(2): 268-273.
4. Железнов В.Ю., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Рогалин В.Е., Филин С.А., Хомич Ю.В., и др. Способ получения микроструктур на поверхности полупроводника. Патент РФ 2756777 С1, 05.10.2021. Заявка № 2020143471 от 28.12.2020.
5. Железнов В.Ю., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Рогалин В.Е., Филин С.А., Хомич Ю.В., и др. Способ обработки поверхности цветного металла путем формирования микрорельефа. Патент РФ № 2764777 С1, 21.01.2022, Заявка: 2021101647, 26.01.2021.
6. Kaplunov Ivan, Malinskiy Taras, Mikolutskiy Sergey, Rogalin Vladimir, Khomich Yuriy, Zheleznov Vladislav, et al. Features of Brass Processing with Powerful Ultraviolet Lasers of Nanosecond Duration. *Materials Science Forum* 2022; 1049: 11-17.
7. Khomich Yu V, Malinskiy T V, Mikolutskiy S I, Rogalin V E, Yamshchikov V A, Kaplunov I A, et al. Powerful ultraviolet laser pulse impact on polished metals and semiconductors. *Journal of Physics: Conference Series* 2020; 1697: 012254.
8. Железнов В.Ю., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Рогалин В.Е., Филин С.А., Хомич Ю.В., и др. Лазерное травление германия. *Письма в Журнал технической физики* 2021; 47(14): 18-20.
9. Железнов В.Ю., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Рогалин В.Е., Филин С.А., Хомич Ю.В., и др. Модификация поверхности германия при воздействии излучения наносекундного ультрафиолетового лазера. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники* 2020; 23(3):203-212