

Лазерная обработка поверхности карбида кремния

Г. А. Гусаков¹⁾, С. В. Корякин¹⁾, Г. В. Шаронов¹⁾, О. В. Королик²⁾,
С. А. Шарко³⁾, С. С. Нагалюк⁴⁾

¹⁾ *Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Беларусь,
e-mail: gga68@rambler.ru*

²⁾ *Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь*

³⁾ *Научно-практический центр по материаловедению НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

⁴⁾ *Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия*

Исследованы процессы взаимодействия излучения импульсного волоконного лазера с длиной волны $\lambda = 1,07$ мкм с поверхностью карбида кремния. Показана возможность лазерной полировки карбида кремния без повреждения структуры поверхностного слоя. Данная технология представляет интерес для получения подложек из карбида кремния с атомно-гладкой поверхностью для изделий оптоэлектроники.

Ключевые слова: карбид кремния, полировка, импульсный волоконный лазер

Laser Treatment of Surface of Silicon Carbide

G. A. Gusakov¹⁾, S. V. Koryakin¹⁾, G. V. Sharonov¹⁾, O. V. Korolik²⁾,
S. A. Sharko³⁾, S. S. Nagaljuk⁴⁾

¹⁾ *A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of Belarusian State University,
Minsk, Belarus, e-mail: gga68@rambler.ru*

²⁾ *Belarusian State University, Minsk, Belarus*

³⁾ *Scientific and Practical Center for Materials Science of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus*

⁴⁾ *Ioffe Physical-Engineering Institute of the RAS, Saint Petersburg, Russia*

The interaction of pulsed fiber laser radiation with a wavelength of $\lambda = 1.07$ μm with a silicon carbide surface was studied. The possibility of laser polishing of silicon carbide without damaging the surface layer structure was demonstrated. This technology is of interest for producing silicon carbide with atomically smooth surfaces for optoelectronic devices.

Keywords: silicon carbide, polishing, pulsed fiber laser

Введение

Карбид кремния (SiC) является широко используемым представителем широкозонных полупроводниковых материалов третьего поколения. В настоящее время устройства на основе карбида кремния находят применение в электронике, фотонике, аэрокосмической промышленности и при производстве различных микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1–3]. Однако дальнейшее расширение областей применения SiC требует совершенствования технологии обработки его поверхности. Благодаря высокой твердости и химической инертности карбид кремния с трудом поддается обработке. Наиболее распространенный процесс полировки карбида кремния включает в себя предварительную механическую шлифовку поверхности подложек и финишную химико-механическую полировку, которая используется для получения гладких, бездефектных поверхностей [4]. Однако процесс сверхточной полировки монокристаллических SiC-подложек сложен и дорог. При

этом качество полировки зависит от множества параметров, что значительно усложняет процесс обработки. В настоящее время ведется активный поиск альтернативных методов прецизионной обработки поверхности карбида кремния. Одним из наиболее перспективных методов является лазерная обработка, которая позволяет добиться эффективной и высокоточной обработки различных микроструктур [5, 6]. Показано [7], что лазерная обработка карбида кремния улучшает обрабатываемость его поверхности и значительно увеличивает скорость удаления материала. Однако эта обработка может легко приводить к термическим повреждениям поверхности, а также к химическому разложению приповерхностного слоя. Таким образом, проблема разработки режимов неповреждающей лазерной полировки поверхности карбида кремния является весьма актуальной.

1. Материалы и методы исследования

Для исследований нами выбраны неполированные пластины (заготовки) карбида кремния политипа 4H-SiC (Hornay Material Technology, Китай). Предварительная механическая и химико-механическая полировка поверхности проводилась на лабораторной установке на базе полировального станка METAPOL 1000X (Китай). Для предварительной алмазно-абразивной полировки поверхности пластин использовались водные суспензии алмазных микропорошков марок ACM 10/7, ACM 3/2 и ACM 2/1. На этапе чистовой химико-механической полировки использовалась коллоидная суспензия диоксида кремния ULTRA-SOL17 (SiO₂ с размером частиц 50...70 нм, с удельным весом 1,24...1,26 г/см³, pH = 9,3...9,7.)

Финишная лазерная обработка поверхности подложек производилась на воздухе при помощи экспериментальной установки на основе импульсного волоконного лазера Raycus RFL-P50QB/A5/130/3 с модуляцией добротности и сканирующего гальванометра (рис. 1).

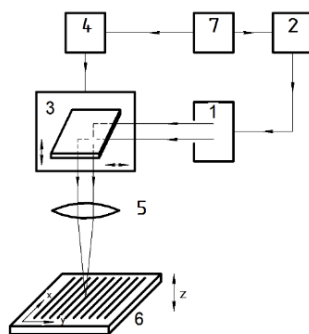


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки по лазерному полированию поверхности НРНТ–алмазных подложек:

- 1 – волоконный лазер; 2 – блок питания и управления; 3 – сканирующий гальванометр; 4 – контроллер; 5 – оптический блок; 6 – технологическая оснастка для закрепления и перемещения подложки по оси Z; 7 – персональный компьютер

Волоконный лазер с длиной волны 1,07 мкм имел длительность импульса порядка 200 нс при частоте следования 30 – 60 кГц. Средняя мощность лазерного излучения варьировалась в диапазоне 0,5–50 Вт. Скорость сканирования лазерного луча могла изменяться в диапазоне от 5 до 1500 мм/с при шаге сканирования от 100 мкм до 1 мкм.

Для исследования структуры и морфологии поверхности использовались методы оптической и Рамановской микроскопии, а также атомно-силовой микроскопии (АСМ). Оптические изображения поверхности и спектры КР регистрировались с помощью сканирующего конфокального Рамановского микроскопа Nanofinder High End (LOTIS ТП, Беларусь) при возбуждении излучением твердотельного лазера с длиной волны 532 нм. Для минимизации разогрева образца использовалась мощность лазерного излучения 200 мкВт при диаметре пятна на поверхности образца $\sim 0,8$ мкм (средняя плотность мощности $\sim 4 \cdot 10^4$ Вт/см²). Время накопления составляло 30 с. АСМ исследования проводились на сканирующем зондовом микроскопе NanoEducator (NT-MDT, Россия).

2. Результаты и обсуждение

Известно, что параметры лазера и режимы сканирования влияют на эффективность лазерной обработки поверхности. Для оптимизации параметров сканирования нами была проведена серия экспериментов на кремниевых подложках. В этих экспериментах проводилось однократное сканирование поверхности образца. При этом варьировались шаг и скорость сканирования лазерного луча по поверхности подложки, а также частота следования лазерных импульсов. Морфология поверхности подложки после лазерного воздействия контролировалась при помощи оптической микроскопии. В результате было установлено, что при частоте следования ЛИ $\nu = 60$ кГц, шаге сканирования – 1 мкм и скорости сканирования $\nu = 300$ мм/с можно добиться равномерной полировки по всей обрабатываемой поверхности. В последующих экспериментах эти параметры фиксировались и варьировалась только мощность лазерного излучения.

На рис. 2 приведены результаты обработки поверхности карбида кремния лазерным пучком мощностью $P = 5$ Вт. В результате лазерного воздействия произошли существенные изменения морфологии и структуры поверхности.

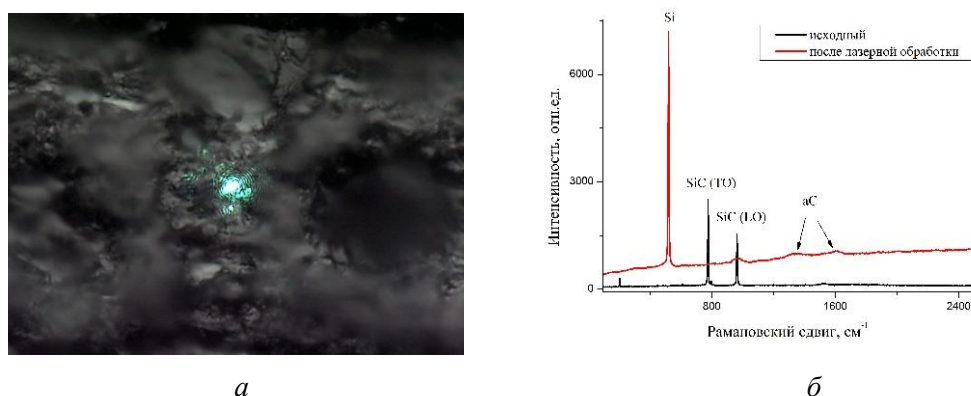


Рис. 2. Результаты обработки поверхности карбида кремния лазерным пучком ($P = 5$ Вт; $\nu = 60$ кГц; $\nu = 300$ мм/с; шаг сканирования – 1 мкм):
а – оптическая микрофотография; б – спектры комбинационного рассеяния

В спектрах комбинационного рассеяния (КР) света исходного образца наблюдаются узкие линии поперечного и продольного оптических фононов в решетке карбида кремния. Положение этих линий (776 и 964 см⁻¹) соответствует политутипу 4Н [8]. В результате лазерной обработки линии карбида кремния полностью исчезают. Взамен регистрируются линии кремния (519,5 см⁻¹) и аморфного углерода (1350 см⁻¹)

и 1590 см^{-1}). Отсюда следует, что при такой мощности лазерного излучения происходит разложение поверхностного слоя карбида кремния.

В следующей серии экспериментов постепенно снижалась мощность лазерного излучения. Было установлено, что при мощности лазерного излучения 2,5 Вт в оптический микроскоп не наблюдаются изменения морфологии поверхности подложки даже после 30-тикратного прохода лазерного луча. Результаты исследования методом КР структуры поверхностного слоя карбида кремния после лазерной обработки при $P = 2,5\text{ Вт}$ приведены на рис. 3. Видно, что после 5 проходов лазерного луча по поверхности подложки спектр КР полностью идентичен спектру исходного образца, что говорит об отсутствии изменений структуры карбида кремния. После 30 проходов также не наблюдается изменения положения и формы линий КР карбида кремния, однако появляется слабая полоса люминесценции с максимумом $\sim 1750\text{ см}^{-1}$ (585 нм). Эта люминесценция, по-видимому, связана с вакансиями углерода в решетке карбида кремния [9], и ее возникновение свидетельствует о начале окисления поверхности образца.

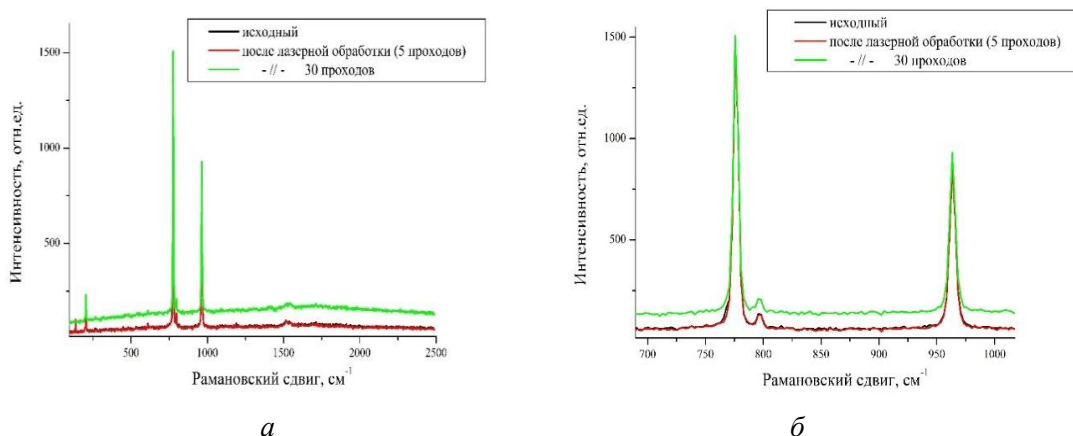


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния поверхности карбида кремния до и после обработки лазерным пучком ($P = 2,5\text{ Вт}$; $\nu = 60\text{ кГц}$; $v = 300\text{ мм/с}$; шаг сканирования – 1 мкм):
а – общий спектр; б – линии оптических фононов в решетке SiC

На рис. 4 представлены результаты исследования морфологии поверхности подложек из карбида кремния до и после лазерной обработки методом АСМ (СЗМ). Видно, что поверхность исходной подложки (рис. 4, а) содержит царапины глубиной до 30 нм. Эти царапины образовались на стадии алмазно-абразивной обработки, не были полностью удалены в ходе последующей химико-механической полировки. Параметры шероховатости для исходной подложки составляют $R_a = 2,8\text{ нм}$ и $R_q = 3,8\text{ нм}$. В результате лазерной обработки наблюдается заметное сглаживание рельефа поверхности. Параметры шероховатости уменьшаются до значений $R_a = 1,8\text{ нм}$ и $R_q = 2,3\text{ нм}$. Однако, следы царапин сохраняются, хотя их глубина и уменьшается примерно в 3 раза. Таким образом, для получения атомно-гладкой поверхности карбида кремния необходима оптимизация параметров лазерной обработки. По-видимому, также необходимо доработать режимы предварительной алмазно-абразивной обработки. Тем не менее, необходимо отметить, что

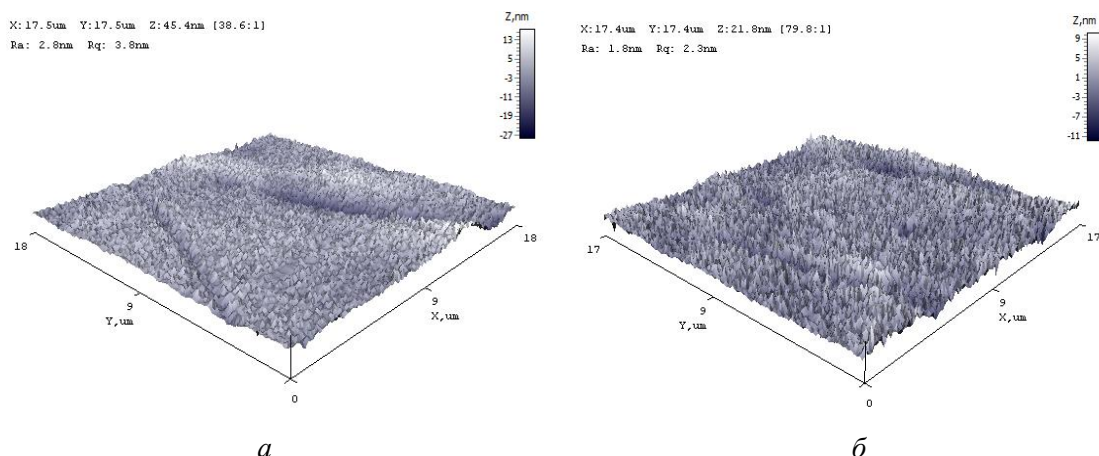


Рис. 4. Трёхмерные АСМ- изображения поверхности карбида кремния:
а – до обработки; *б* – после 30-тикратной обработки лазерным пучком ($P = 2,5$ Вт; $\nu = 60$ кГц; $v = 300$ мм/с; шаг сканирования – 1 мкм). Поле сканирования 18х18 мкм

полученные нами параметры шероховатости поверхности подложек после лазерной обработки значительно лучше полученных в работе [6], где при схожей геометрии эксперимента была получена шероховатость карбида кремния $R_a \sim 80$ нм.

Заключение

В результате проведенных исследований показана возможность лазерной полировки поверхности карбида кремния без повреждения структуры поверхностного слоя. Лазерная обработка значительно быстрее и проще традиционной химико-механической полировки, и, потенциально, может заменить ее на стадии финишной обработки подложек из карбида кремния для изделий оптоэлектроники.

Библиографические ссылки

1. A review of manufacturing technologies for silicon carbide super junction devices / R. Tian [et al.] // J. Semicond. 2021. Vol. 42. P. 061801.
2. Sheng K. A recent review on silicon carbide power devices technologies / K. Sheng, N. Ren, H.Y. Xu // Proc. CSEE. 2020. Vol. 40. P. 1741–1748.
3. Sarro P. M. Silicon carbide as a new MEMS technology // Sens. Actuators. 2000. Vol. 82. P. 210–218.
4. Research status and development trend of silicon carbide single crystal substrate machining technology / X. Zhang [et al.] // J. MUC. 2021. Vol. 30. P. 5–12.
5. Surface quality evaluation of single crystal 4H-SiC wafer machined by hybrid laser-waterjet: Comparing with laser machining / S. Feng [et al.] // Mater. Sci. Semicond. Process. 2019. Vol. 93. P. 238–251.
6. Parameter Optimization of RB-SiC Polishing by Femtosecond Laser / T. Yang [et al.] // Materials. 2023. Vol. 16. P. 1582.
7. A Review of Femtosecond Laser Processing of Silicon Carbide / Q. Wang [et al.] // Micromachines. 2024. Vol. 15. P. 639.
8. A Raman Spectroscopy Study of Individual SiC Nanowires / M. Bechelany [et al.] // Adv. Funct. Mater. 2007. Vol. 17. P. 939–943.
9. Левин В. И. Люминесценция карбида кремния в связи с отклонениями от стехиометрии / В. И. Левин, Ю. М. Таиров, В. Ф. Цветков // Физика и техника полупроводников. 1984. Т. 18, № 7. С. 1194–1198.