

Conclusion

The proposed method for evaluation of performances of MIS and modules based on oscillations' simulation with a given frequency spectrum allows us to estimate the variance of the error of a sensor or module in the entire frequency range of operation. The approbation was carried out on the stands for MIS and modules dynamic tests. The experimental studies of the micromechanical SINS was carried out, the maximum RMS of the error of the pitching angles generation was estimated.

The developed method can be used for a wider class of the stands of assignment of the harmonic oscillations. Its use will allow to:

— Reduce the time of evaluation of the characteristics of the sensor with a few days to 15 min, because the error estimation will be conducted simultaneously in the entire frequency range, which is important for mass MIS production;

— Test the sensors and modules taking into the account the spectrum of the input (working) action, which will determine the error of the sensor in an environment closest to the actual operating conditions, which are characterized by the given spectrum. This, in turn, will improve the reliability of the results;

— Reduce the cost of MIS in their batch manufacturing due to possibility of the simultaneous calibration of a batch of the sensors and modules.

In addition, the method can be used to evaluate the static characteristics of the sensor, for example, the scale factor. Thus, setting the oscillation in a frequency spectrum, we can

obtain the information on the amplitude and frequency of oscillations and on the simulated angular velocity and acceleration.

Thus, the application of the method will reduce the evaluation time of the dynamic characteristics and simultaneously to calibrate multiple parameters. This will significantly reduce the time on calibration of MIS and modules their base and, consequently, reduce the cost of the finished product.

This work was supported by the grant of RF for Basic Research #14-08-00308-a.

References

1. www.analog.com/ru/
2. Grjazin D. G., Shadrin Ju. V. Normirovanie parametrov mikromekhanicheskikh giroskopov. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*. 2007. N. 1. P. 17–19 (in Russian).
3. Vinogradov I. M. *Matematicheskaja jenciklopedija* (Encyclopedia of Math). Moscow, Sovetskaya jenciklopedija, 1977 (in Russian).
4. Grjazin D. G., Lychjov D. I., Berdjugin A. V. *Patent RU 2 367 921 C2*; 20.09.09 (in Russian).
5. Chekmarjov A. B. Stend dlya kontrolya chastotnykh kharakteristik mikromekhanicheskikh giroskopov i modulei na ikh osnove. *Materialy dokladov XII konferencii molodyh uchenyh "Navigacija i upravlenie dvizheniem"*. Saint Petersburg. CNII "Elektroprigor", 2010. P. 161–168 (in Russian).
6. Peshekhonorov V. G., Nesenyuk L. P., Gryazin D. G., Nekrasov Ya. A., Evstifeev M. I., Blazhnov B. A., Aksenenko D. V. Inertsial'nye moduli na mikromekhanicheskikh datchikakh. *Razrabotka i rezul'taty ispytanii. Giroskopija i navigacija*. 2008. N. 3 (62). P. 3–12 (in Russian).

УДК 621.961

П. П. Мальцев, д-р техн. наук, проф., директор, **С. В. Редькин**, канд. техн. наук, вед. науч. сотр., **А. С. Скрипниченко**, мл. науч. сотр., **Н. В. Побойкина**, мл. науч. сотр., e-mail: iuhfseras2010@yandex.ru, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники Российской академии наук (ИСВЧПЭ РАН), г. Москва, **М. П. Духновский**, нач. отд., **А. К. Смирнова**, канд. техн. наук, нач. сектора, e-mail: istok220@mail.ru, Акционерное общество "Научно-производственное предприятие "Исток" имени А. И. Шокина" (АО "НПП "Исток" им. Шокина"), г. Фрязино

ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ АЛМАЗНЫХ ПЛАСТИН

Поступила в редакцию 29.12.2014

Рассмотрены способы фрагментирования поликристаллических алмазных пластин. Приведены результаты лазерной резки алмазных пластин по традиционной технологии и технологии, разработанной в ИСВЧПЭ РАН. Показано, что технология ИСВЧПЭ РАН обеспечивает отсутствие каких-либо посторонних углеродных материалов при резке пластин.

Ключевые слова: лазерная резка, поликристаллические алмазные пластины, МРА CVD-метод

Значительные успехи в области CVD-синтеза алмазов позволили разработать промышленную технологию выращивания поликристаллических алмазных слоев на кремниевых пластинах диаметром до 100 мм. Для этих целей наибольшее распростра-

нение получил метод МРА CVD [1]. Уникальные физические свойства алмаза — высокая механическая прочность, максимальная (из всех известных материалов) теплопроводность (20...24 Вт/(см·К) при комнатной температуре), привлекают разра-

ботчиков мощных СВЧ приборов и приборов, работающих в экстремальных условиях [2].

Наиболее очевидным и успешным применением поликристаллических алмазных слоев оказалось их использование в качестве эффективных теплоотводов [3, 4]. При этом одной из проблем в технологии создания прибора, которая окончательно не решена до настоящего времени, является фрагментирование поликристаллических алмазных пластин на "чипы", на которых размещают приборы.

Для решения этой проблемы используют и предварительное профилирование с помощью алмазных дисков, и травление кремниевых пластин перед МРА CVD поликристаллических алмазных слоев [5], и лазерную резку [6].

На наш взгляд, последний метод является наиболее технологичным, однако и он не лишен слабых сторон. Основным, и наиболее важным, недостатком традиционной лазерной резки является выброс материала из области реза и его осаждение на уже сформированные приборные структуры, что абсолютно недопустимо при переходе к топологии приборов с наноразмерами. На рис. 1 представлена схема традиционной лазерной резки.

При традиционной лазерной резке процесс проводится в относительно "чистых" условиях: либо в атмосфере инертных газов, либо обычного воздуха, при атмосферном давлении, иногда с дополнительным локальным обдувом места реза для удаления продуктов лазерной обработки. Все эти приемы уменьшают засорение поверхности приборов, но не решают проблемы кардинальным образом — абсолютного отсутствия на поверхности прибора разрезаемого материала или его модификаций. Именно такая задача нами и решалась в настоящей работе.

Для корректности эксперимента и сравнения методов нами проводилась лазерная резка поликристаллических алмазных пластин по традиционной технологии в воздушной среде при атмосферном давлении, а также разработанная нами лазерная плазмохимическая резка при пониженном давлении [7].

Результаты традиционной лазерной резки представлены на рис. 2 и 3.

Как видно на представленных снимках, по обе стороны реза наблюдается область "засорения" модифицированным материалом разрезаемой пластины. Это углеродные материалы — графит и фуллерены. Кроме того, сами стенки реза оказались покрытыми углеродным материалом (графитом).

Для исключения этого явления нами предложен лазерный плазмохимический метод резки. Суть его заключается в том, что процесс проводят в плазме низкого давления в атмосфере газов, которые в ионизированном состоянии активно взаимодействуют с поверхностью алмаза и переводят его в ле-

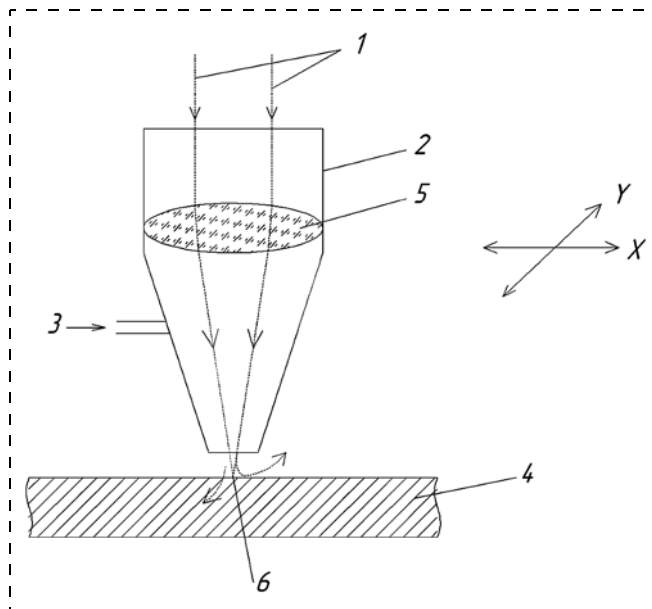


Рис. 1. Схема лазерной плазмохимической резки: 1 — лазерный луч; 2 — защитный кожух режущей головки, совмещенный с объективом; 3 — вспомогательный газ; 4 — разрезаемый объект; 5 — линза; 6 — область расплава

Fig. 1. Scheme of laser plasma chemical cutting: 1 — laser beam; 2 — protective cover of the cutting head, combined with the lens; 3 — auxiliary gas; 4 — object being cut; 5 — lens; 6 — melt area

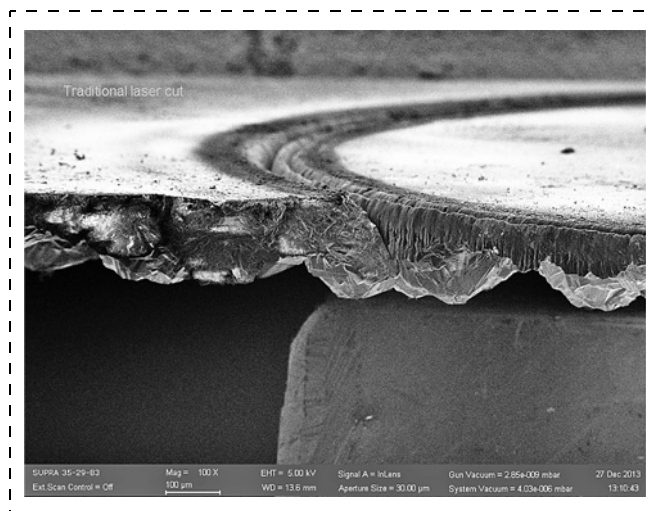
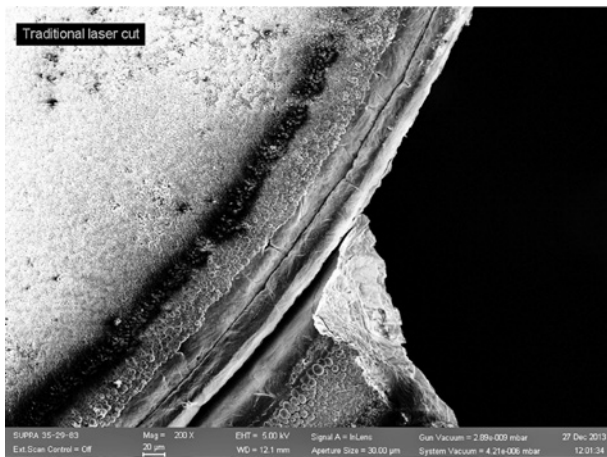


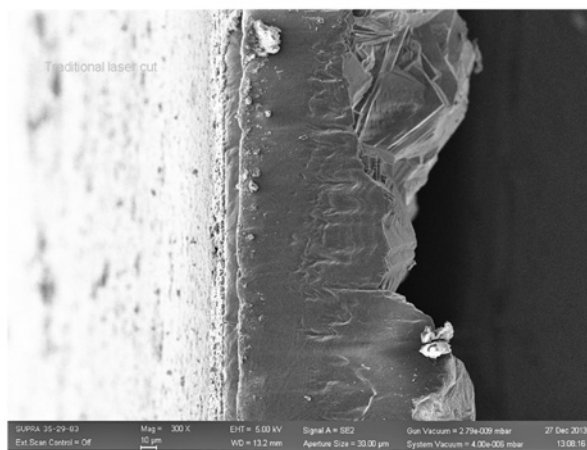
Рис. 2. Результат традиционной лазерной резки

Fig. 2. The result of a traditional laser cutting

тучие соединения, которые эвакуируются из реакционной камеры с помощью вакуумного насоса. Плазма поджигается в фокусе лазерного луча и может перемещаться в нужном направлении по обрабатываемой поверхности либо с помощью оптической системы, либо посредством механического перемещения самого образца относительно локальной плазмы в фокусе лазерного луча. В своих экспериментах (как при атмосферном давлении, так и при низком давлении) мы использовали последний метод. Схема экспериментальной лазерной плазмохимической установки представлена на рис. 4.



a)



b)

Рис. 3. Углеродные материалы на поверхности и стенках реза: a — углеродные материалы на поверхности; b — углеродный материал на стенке реза

Fig. 3. Carbon materials on the surface and walls of a cut: a — on the surface; b — on walls of a cut

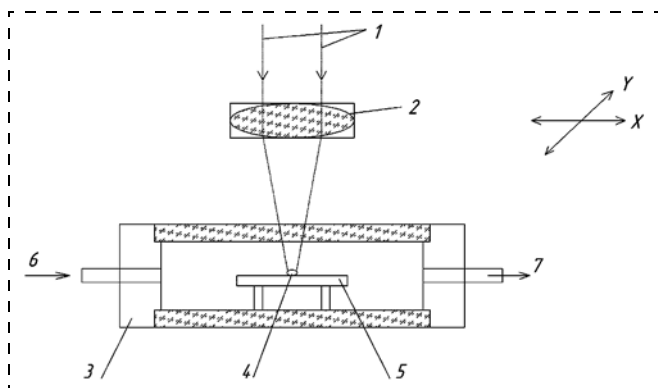


Рис. 4. Схема лазерной плазмохимической установки: 1 — лазерный луч; 2 — объектив; 3 — реактор; 4 — область плазмы; 5 — разрезаемый образец; 6 — реакционные газы; 7 — вакуумная откачка

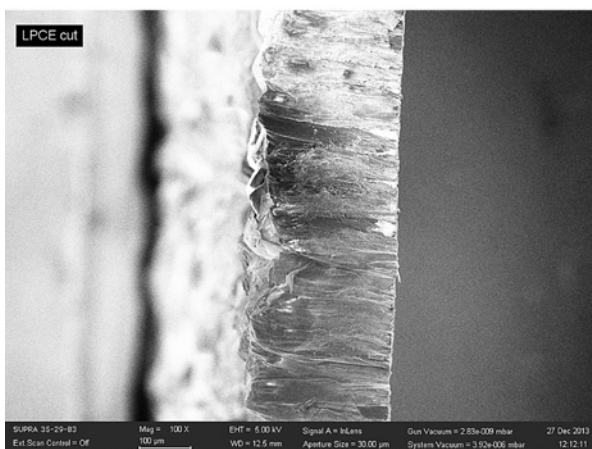
Fig. 4. Scheme of laser plasma chemical installation: 1 — laser beam; 2 — lens; 3 — reactor; 4 — plasma area; 5 — sample being cut; 6 — reaction gases; 7 — vacuum pumping

В экспериментах был использован лазер на парах меди. Основные параметры лазера представлены ниже:

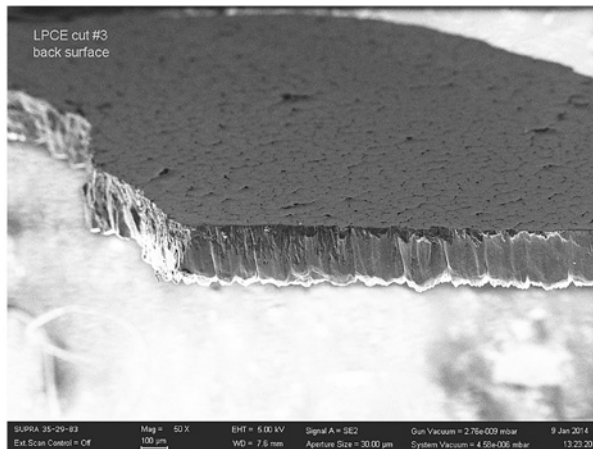
Длина волны	510,6 и 578,2 нм
Частота следования импульсов	10 кГц
Длительность импульсов	20 нс
Средняя мощность излучения в пучке	10 Вт
КПД	1 %
Расходимость пучка	Близкая к дифракционной

Пиковая мощность излучения в импульсе	50 кВт
Диаметр пучка	20 мм
Пятно фокусировки	10 мкм

В качестве плазмообразующей газовой среды была использована известная в традиционной плазмохимии смесь $CF_4 + O_2$, а также смесь $O_2 + Ar$. Аргон добавляли в смесь для облегчения первоначального пробоя.



a)



b)

Рис. 5. Общий вид реза: a — вид с торца; b — рез, слом

Fig. 5. General view of the cut: a — from the face; b — cut, chip

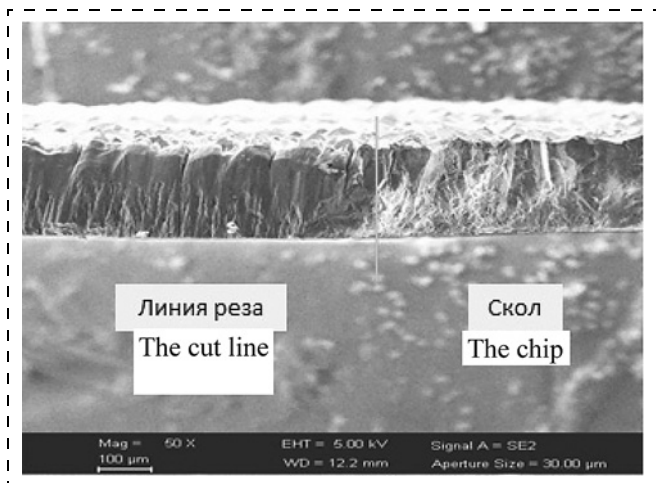


Рис. 6. Кристаллиты поликристаллической алмазной пластины после лазерной плазмохимической резки

Fig. 6. Crystallites of a polycrystalline diamond plate after laser plasma chemical cutting

На рис. 5 и 6 представлены результаты экспериментов по лазерной плазмохимической резке алмазной поликристаллической пластины.

Как видно из представленных рис. 5 и 6, резка по предложенной технологии обеспечивает отсутствие каких-либо посторонних углеродных материалов как на поверхности пластины, так и на торце самого реза. Особенно хорошо это видно на рис. 6, где левая часть образца — это результат лазерной плазмохимической резки, а правая часть — скол пластины. Как видно, они — идентичны, что является неоспоримым доказательством отсутствия модификации поликристаллического алмаза в разработанном нами технологическом процессе — лазерной плазмохимической резки пластин на "чипы".

В настоящей работе все эксперименты проводили на пластинах поликристаллического алмаза, выращенного на оборудовании АО "НПП "Исток" им. Шокина".

Работа выполнена в организации Головного исполнителя ОКТР — ИСВЧПЭ РАН в рамках реализации Постановления Правительства России от 09 апреля 2010 г. № 218, договора № 02.G36.31.0005 от 23 мая 2013 г. между АО "НПП "Исток" им. Шокина" и Минобрнауки России и договора № 33/211-13 от 22 февраля 2013 г. между ИСВЧПЭ РАН и АО "НПП "Исток" им. Шокина".

Список литературы

1. Волков Ю. Я., Стрельницкий В. Е., Ушаков В. А. Синтез алмаза в СВЧ плазме: оборудование, пленки, применение // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 1, № 1. С. 26—45.
2. Глинский И. А., Рубан О. А., Алешин А. Н., Зенченко Н. В., Мельников А. А. Расчет тепловых режимов НЕМТ-транзисторов на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN // Нано- и микросистемная техника. 2014. № 11. С. 43—48.
3. Ланин В., Телеш Е. Алмазные теплоотводы для изделий электроники повышенной мощности // Силовая электроника. 2008. № 3. С. 120—124.
4. Ральченко В., Конов В. CVD-алмазы: применение в электронике // Электроника: наука, технология, бизнес. 2007. № 4. С. 58—67.
5. Патент России RU 2357001. Способ получения изделий из поликристаллического алмаза // Кудряшов О. Ю., Лентьев И. А., Духновский М. П., Федоров Ю. Ю., Ратникова А. К. 2009-05-27. Бюл. № 15.
6. Migulin V. V., Ralchenko V. G., Baik Y.-J. Oxygen-assisted laser cutting and drilling of CVD diamond plates // Lasers in Synthesis, Characterization and Processing of Diamond. Proceedings of SPIE. 1998. V. 3484. P. 175—181.
7. Патент России RU 2537101. Способ прецизионной лазерно-плазмохимической резки пластин // Аристов В. В., Мальцев П. П., Редькин С. В., Скрипниченко А. С., Павлов В. Ю. 27.12.2014. Бюл. № 36.

P. P. Maltsev, D. Sc., Director, **S. V. Redkin**, Ph. D., Leading Researcher, **A. S. Skripnichenko**, Junior Researcher, **N. V. Poboykina**, Junior Researcher, iuhfseras2010@yandex.ru, Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences (IUHFSE RAS), Moscow, **M. P. Doukhovskiy**, Head of Department, **A. K. Smirnova**, Ph. D., Head of Sector, istok220@mail.ru, Istok Research & Production Enterprise named after A. I. Shokin, Fryazino

Technology for Laser Cutting of the Polycrystalline Diamond Plates

The topic of the work is a method for fragmentation of the polycrystalline diamond plates. The work presents the results of laser cutting of the diamond plates by the traditional technology and the technology developed in IUHFSE RAS. It demonstrates that the technology of IUHFSE RAS guarantees absence of any extraneous carbonaceous materials on the cut surface.

Keywords: laser cutting, polycrystalline diamond plates, MPA CVD method

Success with CVD-synthesis of the diamonds has allowed to develop the technology of cultivation of polycrystalline diamond layers on silicon wafers with the diameter of up to 100 mm. MPA CVD method is the most widely used [1]. The unique

properties of a diamond — high mechanical strength, maximal thermal conductivity of all known materials (20—24 W/cm · K at room temperature) — attract the developers of powerful microwave appliances and devices for extreme conditions [2].

Polycrystalline diamond layers found its most obvious use as effective heat sink [3, 4]. Fragmentation of polycrystalline diamond plates on the "chips", on which the instruments are placed, — one of the challenges of construction of such device that was not finally solved. Preliminary profiling using diamond blades, etching of silicon wafers before MPA CVD of polycrystalline diamond layers [5] and laser cutting are used to solve this issue [6].

In our view, the last method is the most technological, but it also has its disadvantageous features. The most important disadvantage of the conventional laser cutting is spitting of material from the cutting place and its deposition on the shaped instrumental structures, which is absolutely unacceptable in the transition to the topology of the devices of nanoscale level. Fig. 1 shows a diagram of a conventional laser cutting.

At conventional laser cutting, the process is performed in a relatively "clean" conditions in an atmosphere of inert gas or ordinary air at atmospheric pressure, sometimes with additional local blowing of the cutting place for removal of the laser treatment products. These techniques reduce littering of surface of the instrument, but not fundamentally solve the problem — the absolute absence of the cut material or its modifications on the device's surface.

The issue was precisely being solved in this paper.

For the correctness and comparison, a laser cutting of polycrystalline diamond plates on traditional technology in air at atmospheric pressure and a laser plasma-chemical cutting under reduced pressure were performed [7]. The results of the traditional laser cutting are presented in figs. 2, 3.

On some images, the littering area by the modified material of the being cut plate was observed on the both sides of the cutting area. It was graphite and fullerenes. In addition, the cut walls themselves were covered by carbon material (graphite).

To avoid this, the laser plasma-chemical method of cutting was proposed. Its essence is in that the process is conducted in a low pressure plasma in the atmosphere of the gases, which in ionized condition actively interact with the surface of the diamond and convert it into the volatile conditions, that are removed from the reaction chamber. The plasma becomes ignited at the focus of the laser beam and can be moved in the right direction along the treated surface using an optical system or by mechanical movement of the sample relatively to a local plasma in the focus of the laser beam. In the experiments (at atmospheric pressure and low pressure) we used the latter method. The scheme of the experimental installation is shown in fig. 4. A laser on copper vapors was used in the above mentioned experiments. The main parameters of the laser are shown below.

Wavelength	510,6 nm and 578,2 nm
Pulse repetition rate	10 kHz
Pulse duration	20 ns
The average radiation power in the beam	10 W
Efficiency	1 %
The beam divergence	Close to the diffraction
Peak power of output radiation pulse	50 kW
The beam diameter.	20 mm
Focus spot.	10 μm

The well-known mixtures in conventional plasma chemistry — $CF_4 + O_2$ and $O_2 + Ar$ were used as the gaseous medium. Argon was added to facilitate the initial breakdown.

Figs. 5, 6 show the results of experiments on laser plasma chemical cutting of the diamond polycrystalline plate. From the pictures you can see that the cutting by the proposed technology ensures the absence of extraneous carbon materials on the surface of the plate and at the end of the cut. This is clearly seen in fig. 6, where the left side of the sample — the result of plasma chemical laser cutting, and the right side — the chip of the plate. As can be seen — they are identical, that conclusively shows the absence of modification of the polycrystalline diamond in the developed technological process of plasma chemical laser cutting plates on the "chips".

In this paper, the experiments were conducted using polycrystalline diamond grown on the equipment of JSC "Research and production corporation "Istok" named after Shokin".

The work was done in the Institute of Super-high-frequency Semiconductor Electronics of the Russian Academy of Sciences (ISHFSE RAS) — the organization — the main executor of the research-development and engineering works under the Decree of the Government of the Russian Federation on April 9, 2010 № 218, the contract № 02.G36.31.0005 on May 23, 2013 between JSC "RPC "Istok" named after Shokin" and the Russian Ministry of Education and Science and the contract № 33/211-13 on February 22, 2013 between ISHFSE RAS and JSC "RPC "Istok" named after Shokin".

References

1. Volkov Ju. Ja., Strel'nickij V. E., Ushakov V. A. Sintez almaza v SVCh plazme: oborudovanie, plenki, primenenie. *Fizika i tehnika poluprovodnikov*. 2013. V. 1, N. 1. P. 26—45.
2. Glinskij I. A., Ruban O. A., Aljoshin A. N., Zenchenko N. V., Mel'nikov A. A. Raschet teplovyh rezhimov HEMT-tranzistorov na osnove geterostruktury AlGaIn/GaN. *Nano- i mikrosistemnaja tehnika*. 2014. N. 11. P. 43—48.
3. Lanin V., Telesh E. Almaznye teplotovody dlja izdelij jelektroniki povyshennoj moshhnosti. *Silovaja jelektronika*. 2008. N. 3. P. 120—124.
4. Ral'chenko V., Konov V. CVD-almazny primenenie v jelektronike. *Jelektronika: nauka, tehnologija, biznes*. 2007. N. 4. P. 58—67.
5. Pat. Rossii RU 23571001. *Sposob poluchenija izdelij iz polikristallicheskogo almaza*. Kudrjashov O. Ju., Leont'ev I. A., Duhnovskij M. P., Fedorov Ju. Ju., Ratnikova A. K. 2009-05-27.
6. Migulin V. V., Ralchenko V. G., Baik Y.-J. Oxygen-assisted laser cutting and drilling of CVD diamond plates. *Lasers in Synthesis, Characterization and Processing of Diamond, Proceedings of SPIE*. 1998. V. 3484. P. 175—181.
7. Pat. Rossii RU 2537102. *Sposob precizionnoj lazerno-plazmohimicheskoj rezki plastin / Aristov V. V., Mal'cev P. P., Red'kin S. V., Skripnichenko A. S., Pavlov V. Ju. Polozhitel'noe reshenie na vydachu patenta ot 08 sentjabrja 2014 g. Po zajavke № 2013137198 ot 08 avgusta 2013 g.*