

УДК 621.315.592
EDN: QROEJA

PACS: 81.

Возможности планетарной схемы обработки для группового шлифования и полирования пластин InSb и матричных модулей© В. А. Улькаров^{1*}, А. А. Трофимов^{1,2}, Н. А. Саркисов¹, В. О. Кузин¹, К. Ю. Арбузов¹,
И. Д. Размахнин¹, А. Н. Кобыш², Р. Ю. Козлов^{3,4}, М. С. Нестюркин^{3,4}¹ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: ulkarov@yandex.ru

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия³ АО «Гиредмет», Москва, 111524 Россия⁴ НИТУ «МИСИС», Москва, 119049 Россия

Статья поступила в редакцию 5.03.2026; после доработки 20.03.2026; принята к публикации 27.04.2026
Шифр научной специальности: 2.2.2; 2.2.3

В работе предложена групповая обработка по планетарной схеме, разработаны конструкторско-технологические решения, и проведен ряд процессов для пластин InSb и матричных модулей. По результатам измерений показана возможность увеличения производительности труда и выхода годных в единицу времени при одновременном снижении материальных затрат.

Ключевые слова: планетарная схема обработки, шлифование и полирование, InSb, матричный модуль.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-2-60-66

Фоточувствительный материал антимонид индия (InSb) является одним из основных в промышленно-ориентированном производстве матричных фотодетекторов средневолнового ИК-диапазона и фотоприемных устройств на их основе, серийно выпускаемых различными отечественными предприятиями [1].

Технология изготовления таких приборов является хорошо отработанной, однако в ходе серийного производства изделий одним из ключевых аспектов наравне с повышением производительности при сохранении качества продукта и воспроизводимости результата является стремление сократить издержки и трудоемкость, что побуждает искать новые пути решения и модернизировать отдельные процессы технологического маршрута. При операциях одностороннего шлифования и полирования, как правило, применяется орбитальная схема обработки с поштучной загрузкой. Переход на планетарную схему потенциально представляется оптимальным решением, од-

нако, требует высокой точности и конструктивной модернизации оборудования. В настоящей работе исследовались отдельные операции на этапе обработки материала с целью установления возможности их оптимизации для увеличения производительности.

Обработка пластин объемного InSb производится поштучно методом свободного абразива и включает шлифование с обеих сторон последовательно абразивными суспензиями с различным размером зерна [2, 3]. После шлифования пластины с каждой стороны подвергаются полированию. Схематично порядок обработки представлен на рис. 1.

Прирост производительности при сокращении затрат на применяемые расходные материалы обеспечивают групповые методы обработки [4]. Для реализации групповой обработки в приведенной на рис. 1 схеме на операции приклеивания пластин InSb предложено использовать диск-носитель максимально возможного диаметра (112 мм), с которым

позволяет работать имеющееся оборудование и оснастка для шлифования и полирования.

Зная текущий диаметр обрабатываемых пластин (50,8 мм) и применяя решение двумерной задачи упаковки («упаковка кругов в

круге»), полученное в 2014 г. Э. Спехтом [5] и рассмотренное отечественными авторами [6], выявлено, что диск-носитель диаметром 112 мм вмещает 3 пластины InSb диаметром 50,8 мм (рис. 2).

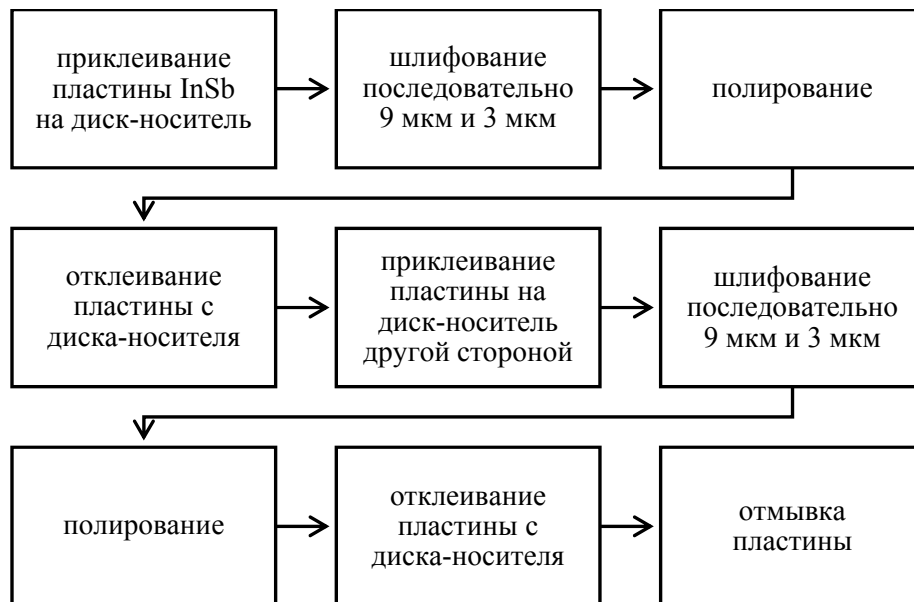


Рис. 1. Схема процесса обработки пластин InSb на этапе шлифования и полирования

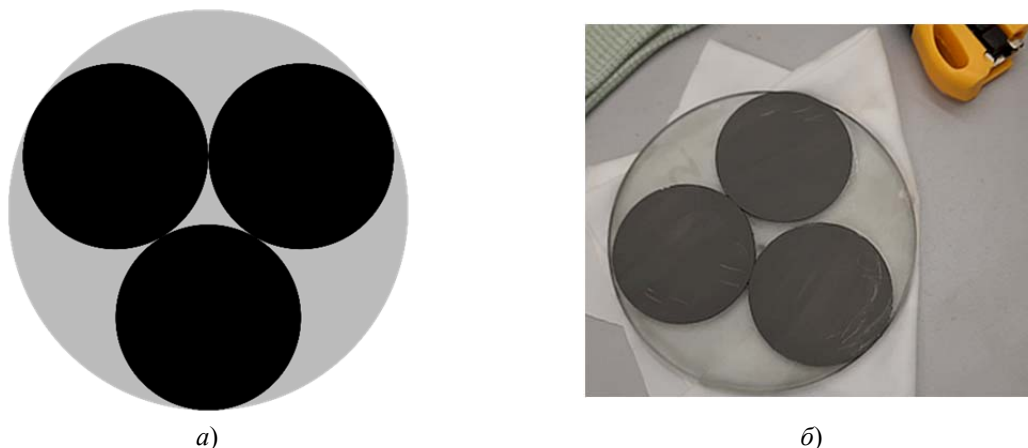


Рис. 2. Иллюстрация решения двумерной задачи упаковки для диска-носителя диаметром 112 мм и пластин InSb диаметром 50,8 мм (а) и фото приклеенных на диск-носитель пластин InSb (б)

Для оценки жизнеспособности предложенного решения групповая обработка пластин производилась шлифованием с применением стандартной оснастки. Использовался абразив Al_2O_3 с размерностью зерна 3 мкм, разведенный в деионизованной воде. Общая нагрузка на образцы составила 1,35 кг (23 г/см^2), скорость вращения шлифовальной плиты задана на уровне 15 об/мин, время обработки составило 10 мин. Профиль поверхности шлифовальной плиты (диаметр 300 мм)

задан выпуклой линзой +3 мкм для компенсации разницы съема материала в центральной части диска-носителя и по краям, обусловленной разницей угловых скоростей при шлифовании, поскольку в данной модели обработки с применением трех пластин на одном диске-носителе пластины InSb расположены вплотную друг к другу. Измерения толщины пластин выполнялись на бесконтактном измерителе толщины NCG-2 Logitech (Шотландия), как представлено на рис. 3.

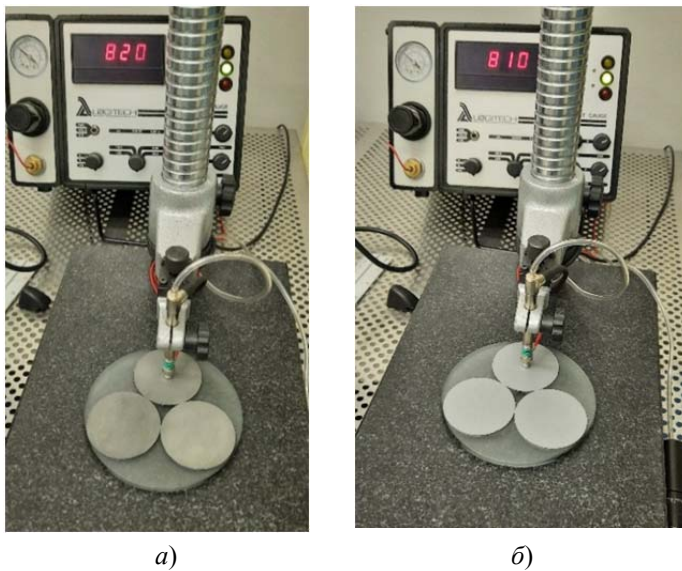


Рис. 3. Одновременная обработка шлифованием трех пластин InSb диаметром 50,8 мм на стеклянном диске-носителе диаметром 112 мм:
а) – измерения толщины до обработки;
б) – измерения толщины после обработки

Результаты обработки и измерений толщины до и после обработки, а также схема измерений по нескольким точкам на каждой пластине представлены в таблице 1.

Плоскостность обработанных поверхностей пластин InSb измерялась контактным методом на профилометре DektakXT Bruker (Германия) на диаметре 49 мм (рис. 4).

Анализируя результаты измерений, заметно, что отклонения от плоскостности не превышают 0,5 мкм. Можно заметить незначительный завал на 0,25 мкм, вероятно обусловленный недостаточной выпуклостью профиля шлифовальной плиты, выбранной для обработки в ходе подготовки оснастки. Тем не менее, результаты находятся в допустимом диапазоне отклонений, которые в настоящее время применяются при поштучной обработке пластин (до 3 мкм).

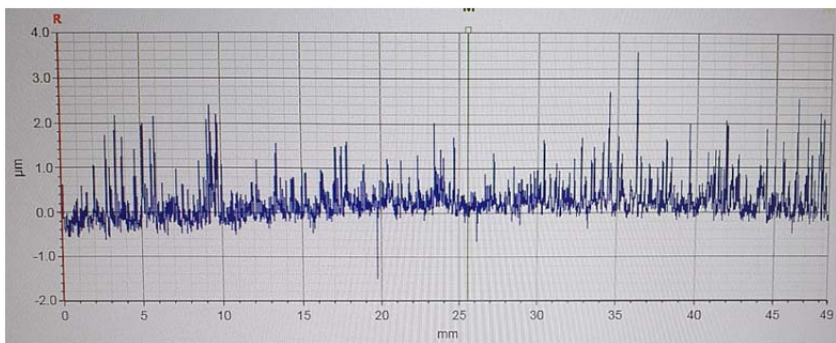
Таким образом, предложенное решение групповой обработки пластин InSb в серийном производстве матричных фотодетекторов средневолнового ИК-диапазона показывает возможность его применения для оптимизации процесса.

После шлифования и полирования пластины InSb подвергаются ряду последующих операций в технологическом маршруте, направленных на формирование матричных фоточувствительных элементов и их стыковку с кремниевой интегральной схемой считывания (БИС). Готовые матричные фоточувствительные модули поступают на утонение, которое является сложным технологическим процессом, необходимым для улучшения пространственного разрешения и повышения квантовой эффективности фотоприемного устройства.

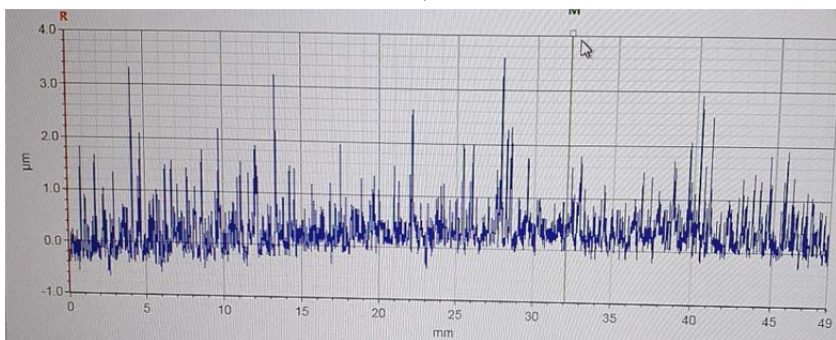
Таблица 1

Результаты измерений толщины пластин до и после шлифования (мкм)

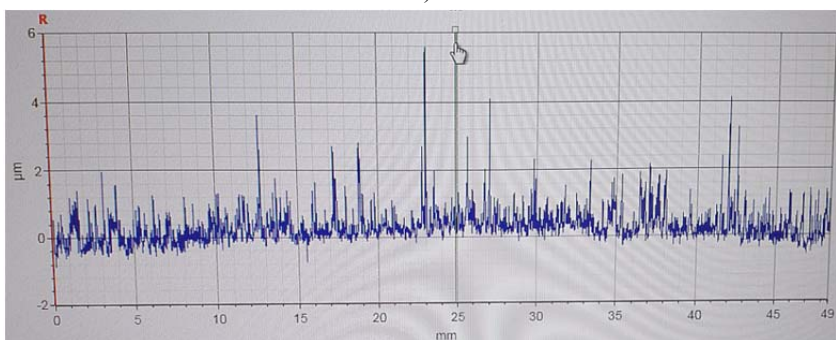
Номер образца	Точка измерений	A	B	C	D	E	Расположение точек измерения на каждом образце
		9	до	817	819	822	
	после	809	809	810	809	810	
10	до	816	817	821	818	818	
	после	808	808	810	810	809	
11	до	817	816	819	819	818	
	после	808	808	810	808	809	



a)



б)



в)

Рис. 4. Результаты измерений плоскостности обработанных поверхностей пластин InSb: а) – образец № 9; б) – образец № 10; в) – образец № 11

В настоящее время на участке шлифования и полирования утонение модуля производится также поштучно [7]. Для реализации возможности обработки групповым методом (одновременно по 3 фоточувствительных мо-

дуля) разработано конструкторско-технологическое решение, изготовлен макет новой детали, и модифицирована оснастка полировального оборудования (рис. 5).



a)



б)



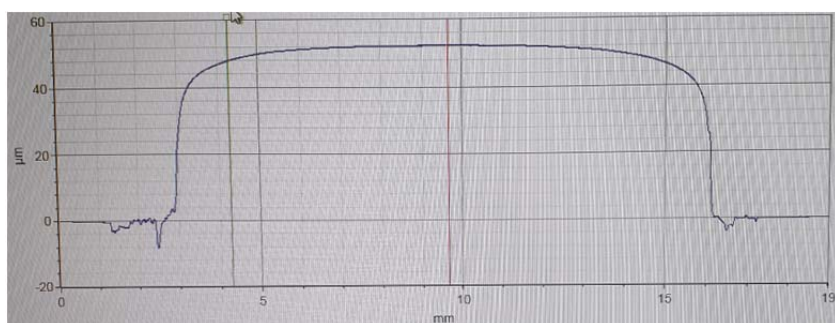
в)

Рис. 5. Оснастка для установки полирования: а) – внешний вид; б) – стандартная вакуумная часть оснастки; в) – модификация оснастки добавлением макета новой детали вакуумной части

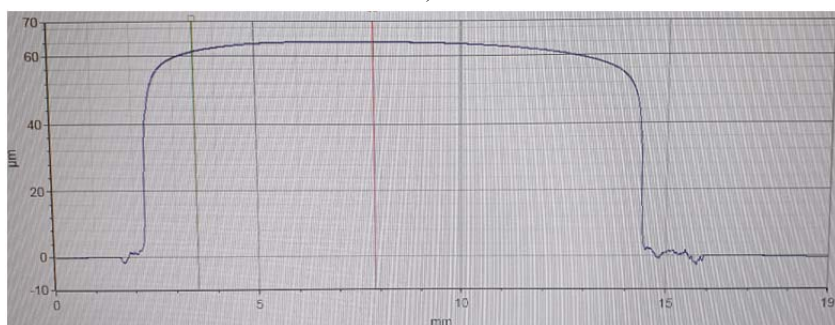
Макет новой детали сопряжен определенным образом со стандартной оснасткой для полирования так, чтобы обеспечивалась максимальная плоскостность поверхности, что является важным фактором последующей групповой обработки фоточувствительных модулей. Режимы и прочие параметры обработки, описанные в работе [7], не менялись, кроме отключения возвратно-поступательного перемещения оснастки по полировальному полотну в ходе обработки. Такое перемещение при поштучном полировании позволяет добиться лучших результатов плоскостности поверхности обрабатываемого образца. В случае же групповой обработки полирование происходит по планетарной схеме, которая обеспечивает повышение качественных характеристик поверхности при финишной обработке, высокую точность и равномерный съем материала вследствие совершения каждым фото-

чувствительным модулем сложного пространственного движения [8, 9].

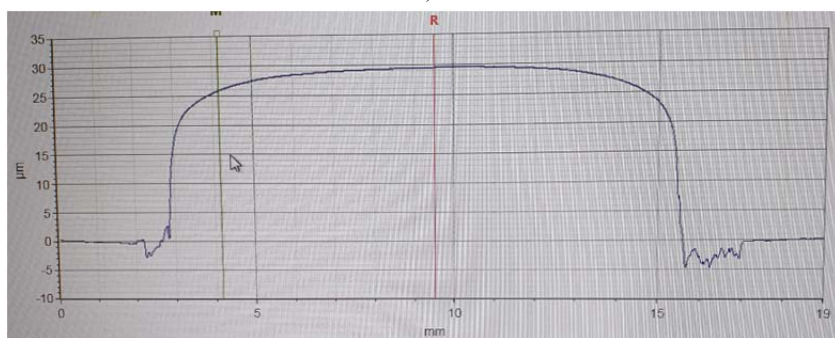
В результате экспериментальной групповой обработки фоточувствительных модулей утонение производилось до толщины 30–60 мкм, после обработки результаты измерений плоскостности поверхностей модулей, полученные на профилометре DektakXT Bruker (Германия), представлены на рис. 6. Данные показывают, что отклонения от плоскостности на целевом расстоянии (выделено вертикальными зеленой и красной линиями) не превышают 2–3 мкм. Разница в толщинах обработанных модулей обусловлена разницей толщин специальных держателей для модулей, изготовленных из лейкосапфира. Эти держатели требуют доведения до единого размера толщин, что обеспечит равномерное удаление материала со всех модулей в едином процессе.



а)



б)



в)

Рис. 6. Результаты измерений плоскостности поверхностей фоточувствительных модулей InSb, состыкованных с кремниевой интегральной схемой считывания, после групповой обработки: а) – образец № 4536; б) – образец № 4571; в) – образец № 4573

Таким образом, в результате проведенных исследований, направленных на повышение эффективности промышленно-ориентированного производства матричных фотодетекторов средневолнового ИК-диапазона, предложены и апробированы решения для групповой обработки пластин InSb и фоточувствительных модулей. Установлено, что качество изделий, полученных при обработке групповым способом, по ряду параметров не уступает аналогичному при поштучной обработке. При этом возможно увеличение производительности труда и выхода годных в единицу времени при одновременном снижении затрат на расходные материалы.

Вместе с тем остаются еще некоторые нерешенные задачи в рамках настоящего исследования, а именно:

– проведение полного процесса обработки пластин InSb, включая снятие материала с обеих сторон пластины, а также полирования;

– подготовка специальных держателей для модулей, изготовленных из лейкосапфира и имеющих одинаковую толщину;

– проведение полного процесса обработки модулей на новых специальных держателях;

– проведение серии процессов как обработки пластин, так и обработки модулей с целью достижения воспроизводимости результатов;

– внедрение полученных и обоснованных решений в серийное производство.

Несмотря на ряд нерешенных задач, авторы считают целесообразным продолжить

дальнейшее исследование с целью достижения положительных результатов в интересах промышленного производства отечественных матричных фоточувствительных элементов и фотоприемных устройств на их основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бурлаков И. Д., Старцев В. В. / Материалы XXVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: АО «НПО «Орион», 2024. С. 24–27.

2. Трофимов А. А., Козлов Р. Ю., Кривобок В. С., Лопатин В. В., Улькаров В. А., Молодцова Е. В., Павлов П. В., Павлова О. С., Косякова А. М., Комаровский Н. Ю., Нестюркин М. С., Клековкин А. В., Минаев И. И., Ерошенко В. В., Атрашков А. С., Ковин Я. А. / Прикладная физика. 2024. № 5. С. 46–56.

3. Улькаров В. А., Трофимов А. А., Павлова О. С., Новиков И. В., Саркисов Н. А., Кузин В. О. / Успехи прикладной физики. 2024. Т. 12. № 5. С. 456–464.

4. Козлов Р. Ю., Трофимов А. А., Молодцова Е. В., Абрамова Е. Н., Павлов П. В., Павлова О. С., Нестюркин М. С., Щеников Н. В. / Приборы. 2024. № 12. С. 32.

5. Specht E. The best known packings of equal circles in a circle (complete up to $N = 2600$).

6. Казаков А. Л., Лебедев П. Д. / Вычислительные методы и программирование. 2015. Т. 16. С. 307–317.

7. Мирофьянченко Е. В., Мирофьянченко А. Е., Попов В. С. / Прикладная физика. 2020. № 2. С. 46–52.

8. Зверовицков В. З., Зотов Е. В. / Известия МГТУ «МАМИ». 2009. № 2 (8). С. 209–213.

9. Артемов И. И., Зверовицков А. Е., Мартынов А. Н. / Известия высших учебных заведений. Поволжский регион, Технические науки. Машиностроение и машиноведение. 2013. № 4 (28). С. 199–211.

10. Болтарь К. О., Власов П. В., Ерошенко В. В., Лопухин А. А. / Прикладная физика. 2014. № 4. С. 45–50.

11. Babu S. V. Advanced in chemical mechanical planarization (CMP). – Woodhead Publishing, 2016.

PACS: 81.

Possibilities of a planetary machining scheme for group grinding and polishing of InSb wafers and matrix modules

V. A. Ul'karov^{1*}, A. A. Trofimov^{1,2}, N. A. Sarkisov¹, V. O. Kuzin¹, K. Yu. Arbuzov¹, I. D. Razmahnin¹, A. N. Kobyshev², R. Yu. Kozlov^{3,4}, and M. S. Nestyurkin^{3,4}

¹ RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

* E-mail: ulkarov@yandex.ru

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

³ Giredmet, JSC, Moscow, 111524 Russia

⁴ University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049 Russia

Received 5.03.2026; revised 20.03.2026; accepted 27.04.2026

During serial production, one of the key aspects, along with increasing productivity while maintaining product quality and reproducibility, is the desire to reduce costs and labor intensity.

Single-sided lapping and polishing operations typically use an orbital machining system with individual loading. Switching to a planetary system potentially offers the optimal solution; however, it requires high precision and a significant upgrade in equipment design. This paper proposes a planetary scheme of lapping and polishing, develops design and technological solutions, and conducts a series of processes on InSb wafers and matrix modules. Measurement results demonstrate the potential for increased labor productivity and yield while simultaneously reducing material costs.

Keywords: planetary lapping and polishing, photodetector array, lapping and polishing, InSb.

REFERENCES

1. Burlakov I. D. and Startsev V. V. *Materialy XXVII Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii po fotoelektronike i priboram nochnogo videniya*. Moscow: RD&P Center ORION, JSC, 2024, pp. 24–27 [in Russian].
2. Trofimov A. A., Kozlov R. Yu., Krivobok V. S., Lopatin V. V., Ul'karov V. A., Molodcova E. V., Pavlov P. V., Pavlova O. S., Kosyakova A. M., Komarovskij N. Yu., Nestyurkin M. S., Klekovkin A. V., Minaev I. I., Eroshenkov V. V., Atrashkov A. S., and Kovin Ya. A., *Applied Physics*, № 5, 46–56 (2024) [in Russian].
3. Ul'karov V. A., Trofimov A. A., Pavlova O. S., Novikov I. V., Sarkisov N. A., and Kuzin V. O., *Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **12** (5), 456–464 (2024) [in Russian].
4. Kozlov R. Yu., Trofimov A. A., Molodcova E. V., Abramova E. N., Pavlov P. V., Pavlova O. S., Nestyurkin M. S., and Shchenikov N. V., *Pribory*, № 12, 32 (2024) [in Russian].
5. Specht E. The best known packings of equal circles in a circle (complete up to $N = 2600$).
6. Kazakov A. L. and Lebedev P. D., *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye* **16**, 307–317 (2015) [in Russian].
7. Mirofyanchenko E. V., Mirofyanchenko A. E., and Popov V. S., *Applied Physics*, № 2, 46–52 (2020) [in Russian].
8. Zverovshchikov V. Z. and Zotov E. V., *Izvestiya MGTU «MAMI»*, № 2 (8), 209–213 (2009) [in Russian].
9. Artemov I. I., Zverovshchikov A. E., and Martynov A. N., *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Povolzhskij region, Tekhnicheskie nauki. Mashinostroeniye i mashinovedeniye*, № 4 (28), 199–211 (2013).
10. Boltar' K. O., Vlasov P. V., Eroshenkov V. V., and Lopuhin A. A., *Applied Physics*, № 4, 45–50 (2014) [in Russian].
11. Babu S. V. *Advanced in chemical mechanical planarization (CMP)*. Woodhead Publishing, 2016.

Об авторах

Улькаров Вадим Айратович, к.т.н., ведущий инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: ulkarov@yandex.ru

Трофимов Александр Александрович, к.т.н., доцент, начальник отдела развития материалов, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9); МИРЭА – Российский технологический университет (ПТУ МИРЭА) (119454, Россия, Москва, просп. Вернадского, 78). E-mail: aa-trofimov@yandex.ru SPIN-код: 3716-5536, AuthorID: 818356

Саркисов Никита Андреевич, инженер 2 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: nsarkisov@mail.ru

Кузин Владислав Олегович, инженер 2 кат., АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9).

Арбузов Кирилл Юрьевич, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9).

Размахнин Иван Дмитриевич, инженер 2 кат. АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9).

Кобыш Алина Николаевна, к.т.н., заведующая кафедрой оптико-электронных приборов и систем, МИРЭА – Российский технологический университет (ПТУ МИРЭА) (119454, Россия, Москва, просп. Вернадского, 78). E-mail: kobysh@mirea.ru SPIN-код: 8836-0683, AuthorID: 514026

Козлов Роман Юрьевич, начальник лаборатории, АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» имени Н. П. Сагина» (111524, Россия, Москва, Электродная ул., д. 2, стр. 1), НИТУ «МИСИС» (119049, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1). E-mail: RYKozlov@rosatom.ru SPIN-код: 7324-5403, AuthorID: 1302882

Нестюркин Михаил Сергеевич, руководитель направления, АО «Гиредмет» имени Н. П. Сагина (111524, Россия, Москва, ул. Электродная, 2/1); НИТУ «МИСИС» (119049, Россия, Москва, Ленинский проспект, д. 4, стр. 1).