

УДК 621.315.592  
EDN: VABRKA

PACS: 81.10-h

**Управление качеством полупроводниковых монокристаллов  
на основе анализа данных производственного контроля**© Н. Ю. Комаровский<sup>1,2,\*</sup>, С. Н. Князев<sup>1</sup>, А. А. Трофимов<sup>3</sup>, Е. А. Савиных<sup>2</sup>,  
Э. А. Соколовская<sup>2</sup>, А. В. Кудря<sup>2</sup><sup>1</sup>АО «Гиредмет», Москва, 111524 Россия

\* E-mail: nickkomarovskiy@mail.ru

<sup>2</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, 119049 Россия<sup>3</sup>АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

Статья поступила в редакцию 5.11.2025; после доработки 14.11.2025; принята к публикации 11.12.2025

Шифр научной специальности: 2.2.3, 2.6.1

**Проведен анализ данных контроля легированных теллуром монокристаллов GaAs, выращенных методом Чохральского. Оценка соответствия распределения параметров материала и процесса выращивания монокристаллов GaAs нормальному распределению Гаусса проведена в соответствии с критериями асимметрии и Смирнова. Характеристика степени зависимости в системе «параметры материала-параметры процесса» оценивалась на основе градации величин парного коэффициента корреляции ( $|r_{xy}| \in 0,013-0,420$ ). Между фактическими и прогнозируемыми результатами наблюдалось существенное расхождение, коэффициент корреляции  $R$  варьировался в диапазоне 0,23–0,47. Показано, что для получения высокой подвижности свободных носителей заряда при низкой плотности структурных дефектов ( $N_d < 1,8 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ ) необходимо обеспечить конвективное перемешивание расплава при плоском фронте кристаллизации.**

**Ключевые слова:** метод Чохральского,  $A^{III}B^V$ , GaAs, анализ баз данных производственного контроля, статистика.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-6-14-20

**Введение**

Монокристаллический арсенид галлия (GaAs) является одним из наиболее перспективных и востребованных полупроводниковых материалов [1]. С увеличением спроса на полупроводниковые монокристаллы GaAs повышаются требования к их качеству.

Ранее, на примере монокристаллов InSb, легированных Te, показано [2], что за счет выбора эффективного режима выращивания монокристаллов можно оптимизировать электрофизические и структурные свойства материала.

В процессе роста монокристаллов с помощью цифровых электронных средств кон-

троля проводилась промежуточная оценка структурных, электрофизических и ростовых параметров, что позволило получить массивы данных, соответствующие выбранному режиму выращивания. Сравнивая полученные данные в различных режимах и условиях технологического процесса, выявлялись критические факторы технологии, определяющие качество выпускаемой продукции [3, 4].

Под ретроспективным анализом понимается пассивный эксперимент в  $K$ -мерном пространстве параметров производственного процесса ( $\xi_k$ ) или, другими словами, сквозной анализ технологии – от исходного материала до конечного продукта [5]. Эффективность такого подхода конкурирует с активным экс-

периментом (поиск зависимости качества материала  $\gamma$  от  $\xi_k$ , в пределах поля допуска  $[\xi_k^{\min}; \xi_k^{\max}]$ , по отклику  $\delta\gamma_i$ ), при этом различный порядок материальных затрат определяет интерес к анализу информации и закономерностей из больших массивов данных (так называемые «раскопки» данных (data mining)) [6].

Целью настоящей работы явилось разработка методики управления качеством полупроводниковых монокристаллов путем поиска критических факторов технологии выращивания монокристаллов GaAs методом Чохральского с жидкостной герметизацией расплава на основе ретроспективного анализа баз данных производственного контроля.

### Объект исследования

Объектом исследования в работе являлась база данных производственного контроля штатной технологии выращивания монокристаллов GaAs методом Чохральского с жидкостной герметизацией расплава (LEC) в кристаллографическом направлении [100]. База данных представляла собой матрицу, количество строк в которой соответствовало количеству выращенных монокристаллов (168 штук), а число столбцов – числу фиксируемых параметров процесса ( $V_3, V_T$  – скорости перемещения затравки и тигля;  $W_3, W_T$  – скорости вращения затравки и тигля с расплавом;  $T_{\text{он}}, I_{\text{фн}}$  – температура основного нагревателя и ток на фоновом) и материала (плотность дислокаций и подвижность свободных носителей –  $N_{\text{дн}}$  и  $\mu$ ).

В соответствии с принятым регламентом аттестация качества проводилась на пластинах, отрезанных перпендикулярно направлению выращивания от начала и конца монокристалла [7]. Величина градиента электрофизических параметров (концентрации свободных носителей заряда (КСНЗ)) была оценена оптическим методом по спектрам отражения в дальней и средней инфракрасной областях [8].

Процедура анализа баз данных производственного контроля включала в себя построение корреляционных и регрессионных моделей, гистограмм, разрядность ( $k$ ) которых определялась минимумом среднеквадратичного отклонения найденного распределения от истинного, что достигается при  $k \approx N^{1/3}$ , где  $N$  – объем экспериментальной выборки [9]. Вид

распределений значений параметров технологии и продукта оценивали по величинам коэффициентов асимметрии  $A_s$  и эксцесса  $E_s$  соответствие нормальном виду распределения – по критерию согласия Смирнова, степень связи между двумя переменными  $\gamma_i$  и  $\xi_k$  на основе парного коэффициента корреляции  $|r_{xy}|$  – по шкале Чеддока [10].

### Результаты и их обсуждение

Корреляционный анализ показал, что в парах «технологические факторы-параметры качества», согласно [11], теснота взаимосвязи слабая ( $|r_{xy}| < 0,3$ ), исключая влияние  $V_T, T_{\text{он}}, W_T$ , на плотность дислокаций в начале (0,37, 0,41, 0,42, соответственно) и  $I_{\text{фн}}$  (-0,32) на подвижность свободных носителей заряда в конце монокристалла, что соответствовало умеренной силе связи. Такой результат может быть следствием совместного влияния температурных и динамических параметров на уровень качества и брака, что обычно описывают уравнением линейной регрессии  $\gamma_i(\xi_k)$  [12]. Прогноз плотности дислокаций ( $N_d$ ) и подвижности свободных носителей заряда ( $\mu$ ) относительно температурных и динамических параметров процесса выращивания монокристалла GaAs –  $W_T, V_T, W_3, V_3, T_{\text{он}}, I_{\text{фн}}$  в рамках регрессионной модели выявил высокое расхождение фактических и прогнозируемых результатов (рис. 1) – коэффициент корреляции  $R$  варьировался в диапазоне 0,23–0,47.

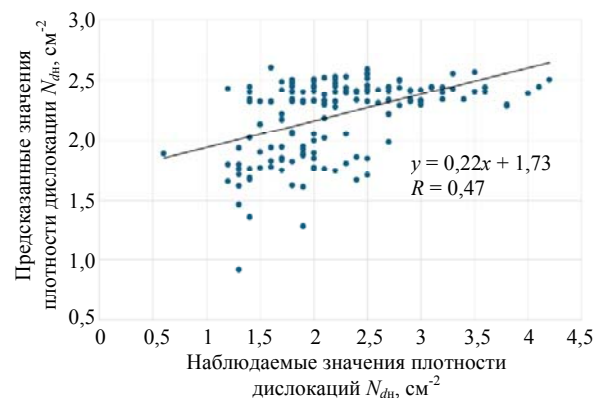


Рис. 1. Соответствие наблюдаемых и предсказанных значений плотности дислокаций

Одним из условий выполнения регрессии является соответствие вида распределения управляющих параметров нормальному зако-

ну. Однако в нашем случае, распределения значений  $W_3$  и  $T_{\text{он}}$  являются бимодальными и имеют две выраженные моды в интервалах 988–1078; 1257–1347 °С и 11,6–12,6; 14,8–15,8 об/мин (рис. 2). Для распределения значений  $V_3$ ,  $V_T$  была характерна левосторонняя асимметрия  $A_s$  (-5,4 и -2,86) при остром его пике ( $E_s = 46,99$  и  $15,62$ ), тогда как для величин  $W_T$ ,  $I_{\text{фн}}$  – правосторонняя (1,26 и 0,87) и значения коэффициента эксцесса  $E_s$  (1,11 и 0,87), соответственно. Аналогичная ситуация наблю-

дается и при анализе распределения значений показателей качества монокристалла GaAs: значения коэффициентов асимметрии и эксцесса для  $\mu$  и  $N_{\text{д}}$  составили 1,31–2,06 и 0,39–0,70; 11,67–14,26 и -0,33–0,34, соответственно. И если для характеристики качества для  $N_{\text{дк}}$  гипотеза о нормально распределении не отвергается (при  $A_s = 0,39 < A_{\text{скр}} = 0,48$ , с риском  $\alpha < 0,01$  [12]), это прежде всего отражает симметричность распределения значений, но не всегда – соответствие нормальному закону.

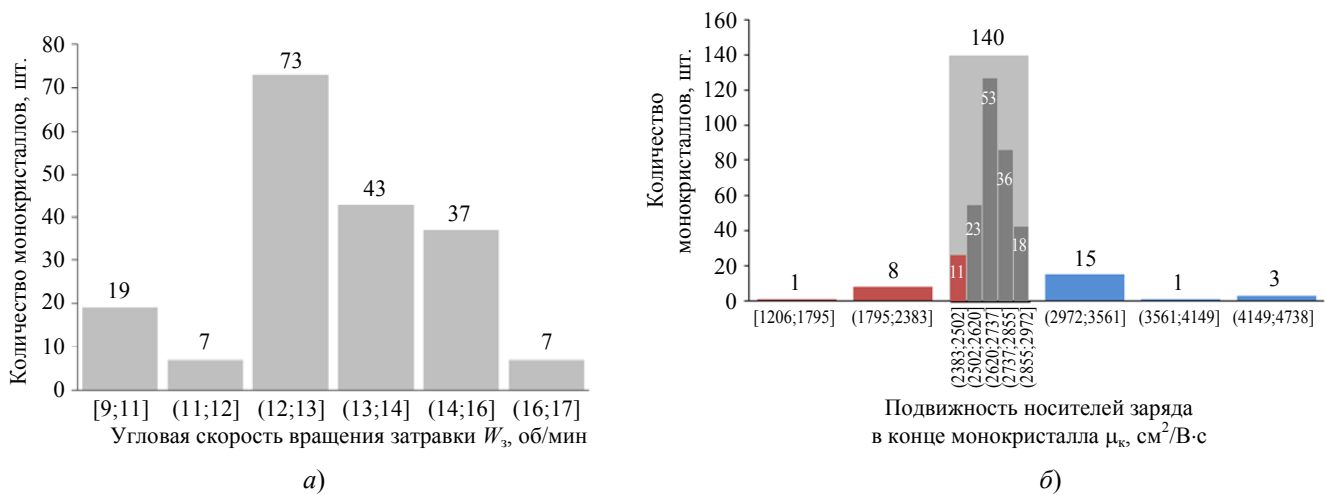


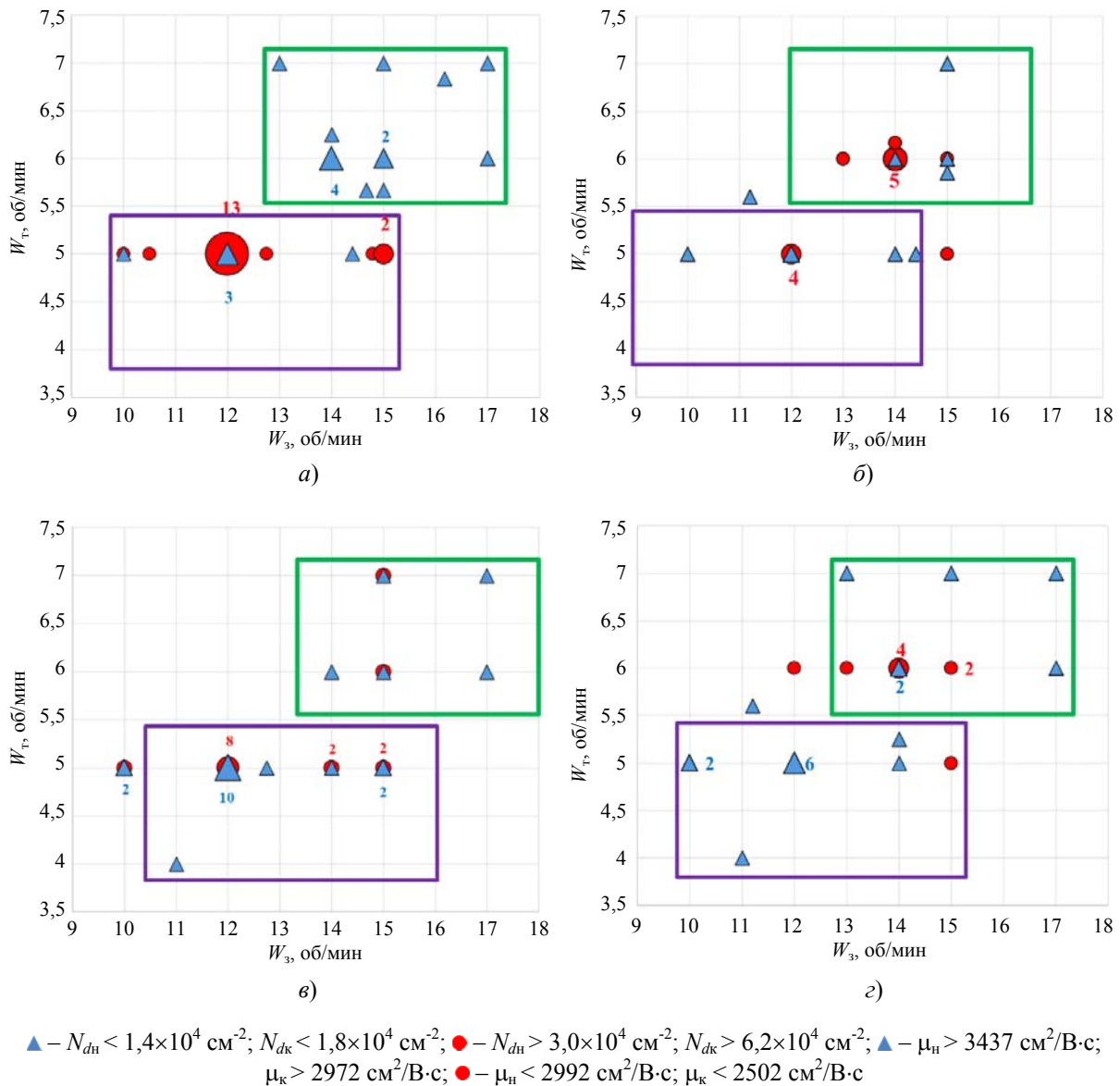
Рис. 2. Гистограммы распределений скорости вращения тигля (а), а также подвижности свободных носителей заряда в конце (б) монокристалла GaAs

В нашем случае применение непараметрического критерия Смирнова показало, что распределение значений плотности дислокаций в конце монокристаллов GaAs подчиняется нормальному закону –  $t_{\text{ксп}} = 0,1$  при  $t_{\text{табл}} = 1,36$   $\alpha = 0,05$ . В этой связи может быть полезно определение влияния технологических параметров на качество продукции, оцениваемой по совокупности значений её характеристик на верхнем и нижнем пределах их распределений (хвосты соответствующих гистограмм распределения (рис. 2б) [5].

Оценку совместного влияния параметров процесса на предельные значения характеристик качества материала проводили на основе поиска и разделения «плотных» облаков точек при отображении зависимости  $\gamma_i(\xi_k)$  на разные плоскости  $\xi_k$ – $\xi_m$ . При выборе оптимальной плоскости  $\xi_k$ – $\xi_m$  учитывали действующие физические закономерности. В частности, что для снижения уровня напряжений и улучшения дислокационной структуры GaAs необхо-

димо снижение неоднородности теплового поля (снижение осевого  $\nabla T_o \downarrow$  и радиального  $\nabla T_r \downarrow$  градиентов температур), — спрямление фронта кристаллизации. К более плоскому фронту кристаллизации и ярко выраженной огранке монокристалла приводит также повышение скорости вращения затравки  $W_3$  и снижение скорости вращения тигля  $W_T$  [13], что подтверждает отображение зависимости  $\gamma_i(\xi_k)$  на плоскость  $W_3$ – $W_T$  (рис. 3).

Установлено, что в диапазоне скоростей вращения  $W_3 = 13$ – $17$  и  $W_T = 5,5$ – $7$  об/мин возможно получить низкий уровень плотности дислокаций в начале монокристалла, при практически нулевой вероятности получения высокой плотности дефектов кристаллической решетки ( $N_{\text{дк}} > 3,0 \text{ см}^{-2}$ ). Однако получить при этом низкую плотность дислокаций в конце монокристалла ( $N_{\text{дк}} \leq 1,8 \text{ см}^{-2}$ ) с риском  $\alpha = 0,29$ , удалось только лишь при максимальной скорости вращения кристалла  $W_3 = 17$  об/мин, что также обеспечило и высокую подвижность свободных носителей в конце монокристалла.



**Рис. 3.** Совместное влияние скоростей вращения тигля с расплавом  $W_m$  и заправки  $W_3$  на плотность дислокаций ( $N_d$ ) и подвижность свободных носителей заряда ( $\mu$ ) в начале (а, б) и в конце (в, г) монокристалла GaAs, соответственно

Установлено, что при  $W_3 = 13$  об/мин и  $W_T = 5$  об/мин в конце монокристалла с риском  $\alpha = 0,25$  формируется канальная неоднородность (facet effect – эффект грани), выраженная в виде отдельных сегментов на его периферии. Область обогащенной теллуrom, из-за активного захвата его атомов плоскостями  $\{111\}$ , не являлась существенной в масштабах пластины и составляла  $\sim 4 \text{ мм}^2$  при размахе значений КСНЗ  $\sim 0,7 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , что, однако может снизить сопротивление материала хрупкому разрушению – снижению вязкости разрушения (величины  $K_{IC}$ ) [14]

Для тех процессов, где не соблюдались выявленные закономерности, проводился последовательный поштучный анализ траекторий

технологии, который позволил в ряде случаев выделить причины, этого. На этой основе была сформирована блок-схема сценариев прохождения технологического процесса выращивания GaAs с оценкой риска получения продукции с приемлемым уровнем качества (рис. 4).

Наличие такой блок-схемы позволяет оптимизировать прохождение технологического процесса – ограничивая, в частности, диапазоны изменения тех или иных технологических параметров. Так, например, снижение скорости вращения тигля с расплавом ниже 5 об/мин закономерно (за счет снижения его конвективного перемешивания), привело к увеличению количества структурных несовершенств и снижению подвижности свобод-

ных носителей заряд. Скомпенсировать влияние такого возмущения на подвижность свободных носителей  $\mu_n$  оказалось возможным за счет установления следующих температурных и динамических условий –  $T_{он} > 1000$  °С,  $I_{фн} > 90$  А,  $W_3 > 14$  об/мин, а на  $\mu_k N_{dk}$  при скорости вращения затравки  $< 15$  об/мин. В свою очередь, эффект, связанный с повышением плот-

ности дислокаций  $N_{dk}$  при пониженной скорости вращения затравки ( $W_3 < 17$  об/мин) был нивелирован изменением величины соотношения  $T_{он}/I_{фн}$  с 10,69 до 10,58 °С/А, например, за счет повышения тока на фоновом нагревателе, что вероятно связано с изменением осевого радиального градиента на фронте кристаллизации [15].

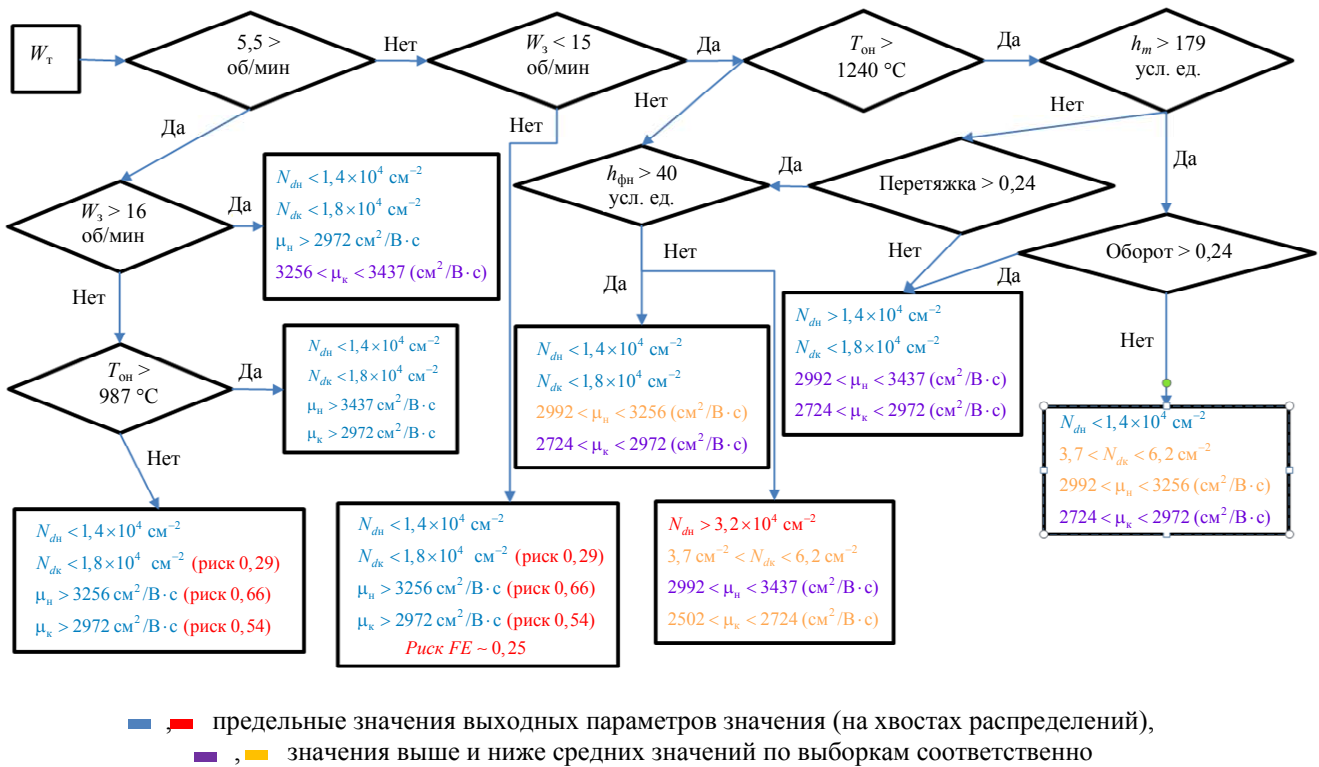


Рис. 4. Фрагмент блок-схемы сценариев прохождения процесса выращивания GaAs

Установлено также, что обеспечить предельный уровень качества монокристаллов GaAs ( $N_{дн} < 1,4 \times 10^4$  см<sup>-2</sup>;  $N_{dk} < 1,8 \times 10^4$  см<sup>-2</sup>;  $\mu_n > 3437$  см<sup>2</sup>/В·с;  $\mu_k > 2972$  см<sup>2</sup>/В·с) становится возможным при следующем сочетании параметров процесса выращивания:  $W_T > 6$  об/мин,  $W_3 < 16$  об/мин,  $T_{он} > 987$ ,  $I_{фн} > 90$  А.

**Выводы**

1. Установлено, что распределение значений параметров технологии выращивания монокристаллов GaAs методом Чохральского и его продукта не подчиняется нормальному закону, исключая распределение значений плотности дислокаций в конце монокристалла GaAs – экспериментальные значения критерия Смирнова  $t_{эксп} = 0,1$  при  $t_{табл} = 1,36$  и уровне риска  $\alpha = 0,05$ . Коэффициенты асимметрии и

экссесса экспериментальных выборок изменялись в диапазонах  $-0,95-46,99$  и  $-5,44-0,87$ , соответственно.

2. Корреляционный анализ показал, что в системе «входные – выходные параметры» наблюдается низкая теснота связи по шкале Чеддока  $|r_{xy}| = 0,0125-0,298$ , исключая влияние скорости движения  $V_T$  и вращения тигля  $W_T$ , а также температуры основного нагревателя  $T_{он}$ , на плотность дислокаций и тока на фоновом нагревателе  $I_{фн}$  на подвижность свободных носителей заряда для которых характерна умеренная теснота связи –  $|r_{xy}| = 0,37, 0,41, 0,42$  и  $0,32$ , соответственно.

4. Между фактическими и прогнозируемыми, в рамках регрессионной модели, результатами наблюдалось существенное расхождение (коэффициент корреляции  $R$  варьировался в диапазоне  $0,23-0,47$ ). Это свя-

зано как с отклонением вида распределения значений параметров материала и процесса от нормального закона, так и с в связи с наличием неучтенных данных о прохождении технологического процесса.

5. Подтверждена эффективность приемов когнитивной графики [4, 16, 17] для выявления критических параметров технологии (и зон их риска в пределах поля допуска), что было использовано при составлении блок-схемы сценариев прохождения процесса выращивания монокристаллов GaAs. Её наличие – основа для корректировки технологии выращивания с целью повышения качества монокристаллов GaAs.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маянов Е., Гасанов А., Князев С., Наумов А. / Электроника: наука, технология, бизнес. 2018. № 2. С. 172–184. doi: 10.22184/1992-4178.2018.173.2.172.184
2. Komarovskiy N. Y., Parkhomenko Y. N., Molodtsova E. V. et al. / Russ Microelectron. 2024. Vol. 53. P. 827–834. <https://doi.org/10.1134/S1063739724701038>
3. Мачиев А. В. / Инновационная наука. 2021. № 12-2. С. 41–44.
4. Босов Е. В. Оценка возможности повышения эффективности ретроспективного анализа массивов данных производственного контроля процесса и продукта для задач управления качеством металлопродукции: Автореф. дисс. канд. техн. наук. – М.: МИСИС, 2025.

5. Кудря А. В., Соколовская Э. А. / Качество и жизнь. 2017. № 1. С. 27–35.
6. Налимов В. В. Теория эксперимента. – М.: Наука, 1971.
7. Book of semi standards 0600 – USA California – 2000, p. 4837
8. Комаровский Н. Ю. и др. / Прикладная физика. 2023. № 6. С. 54. doi: 10.51368/1996-0948-2023-6-54-59
9. Ченцов Н. Н. Статистические решающие правила и оптимальные выводы. – М., 1972.
10. Орлов А. А., Орлов А. И. / Контроллинг. 2024. № 4. С. 30
11. Эддоус М., Стэнсфилд Р. Методы принятия решений / Пер. с англ. под ред. член-корр. РАН И. И. Елисейевой. – М.: Аудит, ЮНИТИ, 1997.
12. Мельниченко А. С. Анализ данных в материаловедении. Часть 2. Регрессионный анализ. – М.: Издательский Дом МИ-СиС, 2014.
13. Faiez R., Asadian M. / Journal of crystal growth. 2009. Vol. 311. № 3. P. 688–694.
14. Богданова В. А. и др. / Физика твердого тела. 2008. Т. 50. № 2. С. 236.
15. Faiez R., Najafi F., Rezaei Y. / Intern. J. of Computational Eng. Res. 2015
16. Чебанов С. В. Когнитивная графика как способ изображения идей // МЕТОД: Московский ежегодник трудов из обществоведческих дисциплин: сб. науч. тр. / РАН. ИНИОН. Центр перспект. методологий социал. и гуманит. исслед.; ред. кол.: Ильин М. В. (гл. ред.) и др. – М., 2020. Вып. 10: Вслед за Декартом. Идеальная чистота и материальная основа мышления, познания и научных методов. С. 309–376. Режим доступа: <http://www.doi.org/10.31249/metod/2020.10.16>
17. Кудря А. В., Соколовская Э. А., Траченко В. А., Коротнева К. В. / Вектор науки ТГУ. 2013. № 3. С. 202–204.

PACS: 81.10-h

## On the possibility of quality control of semiconductor single crystals based on retrospective analysis of production control databases

N. Y. Komarovskiy<sup>1,2,\*</sup>, S. N. Knyazev<sup>2</sup>, A. A. Trofimov<sup>3</sup>, E. A. Savinykh<sup>2</sup>,  
E. A. Sokolovskaya<sup>1</sup>, and A. V. Kudrya<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Sazhin Giredmet JSC, Moscow, 111524 Russia

\* E-mail: [nickkomarovskiy@mail.ru](mailto:nickkomarovskiy@mail.ru)

<sup>2</sup> University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049 Russia

<sup>3</sup> RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

Received 5.11.2025; revised 14.11.2025; accepted 11.12.2025

*A retrospective analysis of a production control database for growing tellurium-doped GaAs single crystals using the Czochralski method was conducted. The asymmetry and Smirnov criteria were used to evaluate the normal distribution of material and process parameters. The strength of the relationship between material parameters and process parameters was assessed using the gradation of the paired correlation coefficient  $|r_{xy}| \in 0.013–0.420$ ). A significant discrepan-*

*cy was observed between the actual and predicted results within the regression model (the correlation coefficient  $R$  varied in the range of 0.23–0.47). Using cognitive graphics techniques, it was shown that convective mixing of the melt with a flat crystallization front is necessary to achieve high free carrier mobility at a low density of structural defects ( $N_d < 1.8 \times 10^4 \text{ cm}^{-2}$ ).*

**Keywords:** Czochralski method, III–V, GaAs, retrospective analysis of industrial control databases, cognitive graphics techniques, statistics.

## REFERENCES

1. Mayanov E., Gasanov A., Knyazev S. and Naumov A., *E'lektronika: nauka, texnologiya, biznes*, № 2, 172–184 (2018). doi: 10.22184/1992-4178.2018.173.2.172.184
2. Komarovskiy N. Y., Parkhomenko Y. N., Molodtsova E. V. et al., *Russ Microelectron* **53**, 827–834 (2024). <https://doi.org/10.1134/S1063739724701038>
3. Machiev A. V., *Innovative Science*, № 12-2, 41–44 (2021).
4. Bosov E. V. Evaluation of the possibility of increasing the efficiency of retrospective analysis of industrial process and product control data arrays for metal product quality management tasks: dissertation abstract, MISIS, 2025.
5. Kudrya A. V. and Sokolovskaya E. A., *Kachestvo i zhizn'*, № 1, 27–35 (2017).
6. Nalimov V. V. *Teoriya eksperimenta*. Moscow, Nauka, 1971.
7. Book of semi standards 0600 – USA California – 2000 p.4837
8. Komarovskiy N. Yu. et al., *Applied Physics*, № 6, 54 (2023) [in Russian]. doi: 10.51368/1996-0948-2023-6-54-59
9. Chentsov N. N. *Statistical decision rules and optimal inferences*. Moscow, 1972.
10. Orlov A. A. and Orlov A. I., *Kontrolling*, № 4, 30 (2024).
11. Eddowes M. and Stansfield R. *Methods of decision-making / Translated from English under the editorship of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences Eliseeva I. I.* Moscow: Audit, UNITY, 1997.
12. Melnichenko A. S. *Data Analysis in Materials Science. Part 2. Regression Analysis*. Moscow, Izdatel'skiy Dom MISiS, 2014.
13. Faiez R. and Asadian M., *Journal of crystal growth* **311** (3), 688–694 (2009).
14. Bogdanova V. A. et al., *Fizika tverdogo tela* **50** (2), 236 (2008).
15. Faiez R., Najafi F. and Rezaei Y., *Intern. J. of Computational Eng. Res.* 2015
16. Chebanov S. V. *Cognitive graphics as a way of depicting ideas // METHOD: Moscow yearbook of works from social science disciplines: Sat. of scientific works / RAS. INION. Center for advanced methodologies in social and humanit. research; ed. team: Ilyin M. V. (editor-in-chief) and others. Moscow, 2020. Iss. 10: Following Descartes. Ideal purity and material basis of thinking, cognition, and scientific methods, pp. 309–376. Access mode: <http://www.doi.org/10.31249/metod/2020.10.16>*
17. Kudrya A. V., Sokolovskaya E. A., Trachenko V. A., and Korotneva K. V., *Vector of Science TSU*, № 3, 202–204 (2013).

## Об авторах

**Комаровский Никита Юрьевич**, руководитель направления лаборатории высокотемпературных полупроводниковых соединений  $A^{III}B^V$ , АО «Гиредмет» (111524, Россия, Москва, ул. Электродная, д. 2, стр. 1). Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1). E-mail: nickkomarovskiy@mail.ru, NYKomarovsky@rosatom.ru <https://orcid.org/0000-0002-7869-7886>, Scopus Author ID 58510893300, Web of Science Researcher ID NRX-9045-2025, SPIN-код: 9642-8920

**Князев Станислав Николаевич**, к.т.н., начальник лаборатории, АО «Гиредмет» (111524, Россия, Москва, ул. Электродная, д. 2, стр. 1).

**Трофимов Александр Александрович**, к.т.н., заместитель начальника серийного производства, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: aa-trofimov@yandex.ru SPIN-код: 3716-5536, AuthorID: 818356

**Савиных Екатерина Александровна**, студент, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1). E-mail: swa.ekaterina@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0005-0748-7629>

**Соколовская Элина Александровна**, к.т.н., доцент кафедры металловедения и физики прочности, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1). E-mail: sokolovskaya@misis.ru ORCID 0000-0001-9381-9223, Web of Science Researcher ID AAM-6419-2021, Scopus Author ID 15077468100, SPIN-код: 2633-6344, AuthorID: 185426

**Кудря Александр Викторович**, д.т.н., профессор, заместитель заведующего кафедрой металловедения и физики прочности, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1). E-mail: AVKudrya@misis.ru ORCID: 0000-0002-0339-2391, Web of Science Researcher ID GWZ-8579-2022, Scopus Author ID 6603628218, SPIN-код: 6497-2109, AuthorID: 11030