

УДК 621.315

Влияние технологических параметров при многопроволочной резке слитков GaAs на поверхностные характеристики пластин

© 2023 г. Д. А. Подгорный¹, М. С. Нестюркин^{1,2,✉}, Н. Ю. Комаровский^{1,2}

¹ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»,
Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация*

² *АО «Государственный научно–исследовательский и проектный институт
редкометаллической промышленности «Гиредмет»,
Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: mnestyurkin@mail.ru

Аннотация. Механическая обработка полупроводниковых монокристаллических слитков является одним из ключевых этапов в производстве пластин GaAs. Основной вопрос для получения качественных пластин — определение оптимальных параметров механической обработки, которое заключается в выявлении зависимостей качества поверхности подложек после резки от задаваемых при этом технологическом процессе параметров. Технология получения полированных полупроводниковых пластин (подложек) у практически всех полупроводниковых материалов схожая и имеет в своем различии только ряд отличительных черт, связанных с механическими и структурными особенностями отдельных материалов. Механическая обработка является первым после роста кристалла этапом, при котором необходимо соблюдать и совершенствовать множество технологических параметров для получения качественной готовой продукции. В технологическом процессе обработки полупроводника необходимо в первую очередь разделить кристалл на пластины со схожими поверхностными характеристиками. От качества этого разделения зависит то, какие пластины получатся в конечном итоге и насколько они будут пригодны как подложки для производства приборов при массовом производстве. Исследование влияния параметров резки на структуру нарушенного слоя и основных геометрических параметров пластин позволяет выявить оптимальные параметры механической резки и диапазон отклонений, возможный для получения пластин схожего качества для дальнейшей обработки.

Ключевые слова: полупроводниковые монокристаллы, материалы электроники, многопроволочная резка, технологические параметры, параметры поверхности, полупроводниковые подложки, растровый электронный микроскоп

Для цитирования: Подгорный Д.А., Нестюркин М.С., Комаровский Н.Ю. Влияние технологических параметров при многопроволочной резке слитков GaAs на поверхностные характеристики пластин. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2023; 26(2): 101—109. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-2-101-109>

Influence of technological parameters during multiwire cutting of GaAs ingots on the surface characteristics of the plates

D. A. Podgorny¹, M. S. Nestyurkin^{1,2,✉}, N. Yu. Komarovskiy^{1,2}

¹ *National University of Science and Technology “MISIS”,
4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation*

² *Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC),
2–1 Elektrodnaya Str., Moscow 111524, Russian Federation*

✉ *Corresponding author: mnestyurkin@mail.ru*

Abstract. Mechanical processing of semiconductor monocrystalline ingots is one of the key stages in the production of GaAs wafers. The main issue for obtaining high-quality plates is to determine the optimal parameters of machining and is to identify the dependencies of the surface quality of the substrates after cutting on the parameters set in this technological process. Technology for the production of polished semiconductor wafers (substrates) almost all semiconductor materials have a similar and has in its difference only a number of distinctive features related to the mechanical and structural features of individual materials. Mechanical processing is the first stage after crystal growth, in which it is necessary to observe and improve many technological parameters to obtain high-quality finished products. In the technological process of semiconductor processing, it is necessary first of all to divide the crystal into plates with similar surface characteristics. The quality of this separation determines which plates will eventually turn out and how suitable they will be as substrates for the production of devices in mass production. The study of the influence of cutting parameters on the structure of the disturbed layer and the basic geometric parameters of the plates allows us to identify the optimal parameters of mechanical cutting and to identify the range of deviations possible to obtain plates of similar quality for further processing.

Keywords: semiconductor single crystals, electronics materials, multiwire cutting, technological parameters, surface parameters, semiconductor substrates, scanning electron microscope

For citation: Podgorny D.A., Nestyurkin M.S., Komarovskiy N.Yu. Influence of technological parameters during multiwire cutting of GaAs ingots on the surface characteristics of the plates. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(2): 101–109. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-2-101-109>

Введение

Арсенид галлия является одним из основных полупроводниковых материалов для производства востребованных приборов для твердотельной электроники. Обладая уникальными для полупроводниковых материалов параметрами (ширина запрещенной зоны 1,424 эВ, эффективная масса электронов $0,067m_e$, подвижность электронов $8500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, подвижность дырок $400 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$ [1]), он является третьим по распространенности полупроводниковым материалом, используемым для создания полупроводниковых пластин. Арсенид галлия (GaAs) отличается от самых распространенных полупроводников (Si и Ge) более высокой подвижностью электронов, большей шириной запрещенной зоны, высокой радиационной стойкостью; устройства на основе подложек GaAs выдерживают работу на высоких частотах с бо-

лее низкими коэффициентами шумов [2]. Поэтому возникает необходимость производства полупроводниковых подложек GaAs класса *epi-ready* с качественными поверхностными параметрами [3].

Производство *epi-ready* подложек связано с механической обработкой монокристаллов и от уровня обработки монокристалла зависит то, какого качества подложки поступят для последующего создания функциональных структур. Для улучшения процесса обработки кристаллов необходимо проводить исследования на каждом этапе обработки.

Критическим этапом механической обработки монокристаллов является их разделение на пластины (резка). Существует множество различных способов проведения данной операции, но основными являются дисковая и многопроволочная резка.

Способ многопроволочной резки заключается в перемотке проволоки с подающей стороны на при-

нимающую по системе роликовых подшипников с добавлением абразивного материала. Кристалл подается в область резки. Весь процесс происходит при определенных параметрах, изменяя которые можно добиться оптимальных результатов (например, увеличив скорость резки и не ухудшив при этом качество получаемых пластин) [1].

При дисковой резке кристалл подается в область реза (вращающийся диск с внутренней режущей алмазной кромкой) с заданными параметрами. Сам способ разделения кристалла на пластины менее удобный, чем многопроволочная резка и более старей.

В пластинах после резки формируется нарушенный слой, также в результате релаксации напряжений возникают геометрические деформации пластин. В зависимости от способа резки и их параметров данные характеристики имеют свойство меняться. Вследствие этого, получаемые при многопроволочной резке пластины обладают лучшими поверхностными характеристиками, чем при дисковой. Однако для улучшения данных характеристик при многопроволочной резке необходимы исследования зависимостей поверхностных параметров от задаваемых при проведении процессов режимов.

Таким образом, необходимо провести анализ влияния условия резки на структуру поверхности полупроводниковых пластин GaAs, а также определить оптимальные параметры резки слитка GaAs для выявления оптимальных режимов обработки материала [4].

Методы оценки состояния поверхности

Метод измерения поверхностных параметров.

Для выявления параметров поверхности пластин (характеристики нарушенного слоя и геометрические параметры пластин) используется установка контроля поверхности «Микропроф». Принцип измерения установки основан на оптическом эффекте хроматической аберрации. Фактически установка измеряет показатель преломления, зависящий от

длины волны. Исследуемый образец освещается сфокусированным пучком белого света. Пассивная линза с большой хроматической аберрацией рассеивает луч белого света вертикально в различные цветовые фокусные точки, и, как следствие, высоты. Сфокусированный луч встречается с поверхностью и хорошо отражается, попадает в миниатюрный спектрометр через ту же линзу, при этом несфокусированные компоненты пучка не отражаются и отсеиваются [5]. Для определения топографии поверхности необходимо измерить расстояние между датчиком и образцом (учитывая и в дальнейшем вычитая рабочее расстояние). Расстояние от измеряемой поверхности до датчика различное, вследствие чего, а также в результате описанного выше явления, получается набор измерений в разных точках образца с различными длинами волн (цветом) отраженного луча. Благодаря такому различию получается измерить поверхностные параметры образца и получить его топографическую картину поверхности с высокой точностью. Основными параметрами поверхности пластины (рис. 1) являются TTV (*Total Thickness Variation*) — разнотолщинность — разность между максимальным и минимальным значением; TIR (*Total Indicated Reading*) — максимальные отклонения поверхности вверх и вниз от базовой (фокальной) плоскости; WARP (коробление пластины) — разность максимального и минимального отклонения срединной поверхности пластины в свободном состоянии от базовой поверхности; BOW (прогиб пластины) — расстояние между поверхностью и плоскостью прилегания в центре в свободном состоянии от базовой поверхности [6].

Метод измерения шероховатости и волнистости. Для измерения шероховатости и волнистости используется контактный профилометр, основой измерения которого является датчик с иглой. Благодаря своему устройству на установке можно измерить такие поверхностные параметры, как шероховатость и волнистость [7]. По данным параметрам можно судить о структуре исследуемой поверхности.

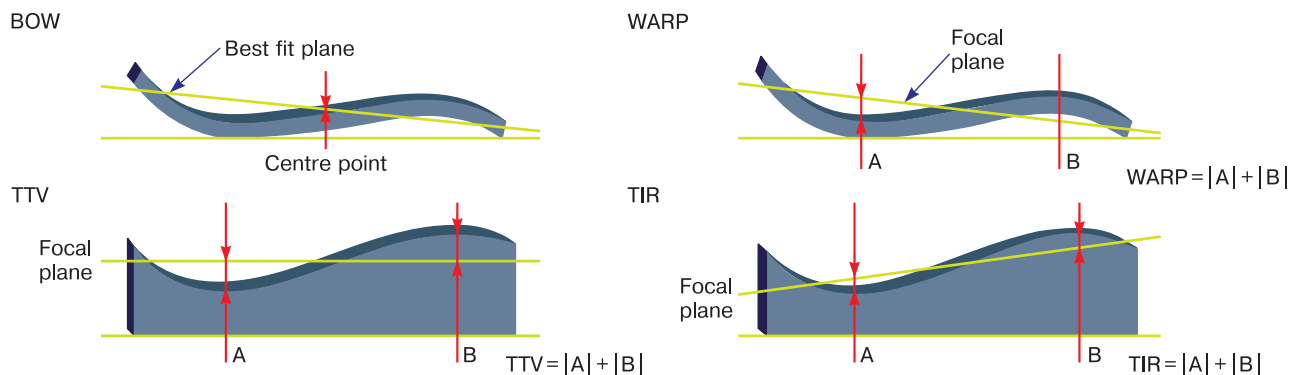


Рис. 1. Значение поверхностных параметров [6]

Fig. 1. The value of surface parameters [6]

Суть проведения измерения параметров заключается в перемещении по поверхности исследуемого образца щупа в виде иглы с задаваемой скоростью и регистрации изменений ее положения, и далее построения профиля поверхности образца по этим измерениям [8—12]. После построения профиля можно проанализировать такие параметры, как крайнее верхнее и нижнее значение, среднее, среднеквадратичное значение шероховатости и волнистости. Применение контактного профилометра обусловлено высокой точностью этого способа измерения (рис. 2). Эта точность достигается за счет возможности измерения толщины наконечника щупа, тем самым уменьшая контактную площадь с поверхностью и увеличивая точность построения профиля [13].

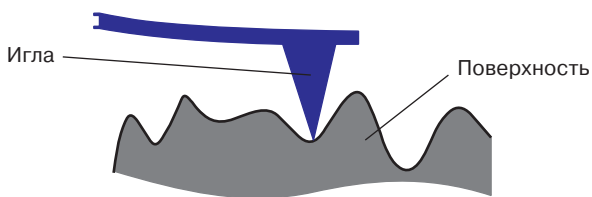


Рис. 2. Схематическое представление способа измерения поверхности [13]

Fig. 2. Schematic representation of the surface measurement method [13]

Измеряемый параметр шероховатости представляет собой характеристику неровностей поверхности с небольшими шагами определенной длины [14—17]. По этому параметру можно судить о структуре поверхностного слоя полупроводниковых пластин и рассчитывать степень дальнейшей обработки и возможность использования измеренных пластин в изготовлении готовых приборов.

Волнистость же в свою очередь характеризует совокупность повторяющихся неровностей поверхности, у которых расстояния между смежными возвышенностями или впадинами превышают базовую длину [18, 19].

Метод сканирующей электронной микроскопии. Электронный микроскоп — необходимый прибор в исследованиях поверхностей материалов и их структуры. Его особенностью является возможность получать изображение исследуемых объектов при увеличении до 10^6 раз. При обработке полупроводникового кристалла на поверхности пластины появляется нарушенный слой, имеющий свою структуру (рис. 3). При исследовании пластин на СЭМ получается измерить трещиноватый слой [20].

Сканирующий электронный микроскоп в исследовании пластин необходим для получения картин

структуры поверхности и оценки глубины трещиноватого слоя. Это становится возможным при анализе торцевого скола пластины. Для этого были подготовлены образцы, закрепленные в рабочей зоне микроскопа сколотыми торцами вверх. Таким образом становится возможным получить крупное изображение структуры скола, на котором является различимым трещиноватый слой. Это позволяет измерить и оценить зависимость глубины трещиноватого слоя при разных режимах резки [21—24].

Образцы и методы их исследования

В качестве экспериментальных образцов использовались 4 монокристалла GaAs, легированные теллуром, выращенные методом Чохральского из-под слоя жидкого флюса с кристаллографической ориентацией оси (100) [25, 26]. Концентрация основных носителей заряда $(3—7) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, плотностью дислокаций не более $1,0 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$ и

Таблица 1 / Table 1

Характеристика измененных параметров при резке различных образцов кристалла GaAs Characteristics of the changed parameters when cutting various samples of the GaAs crystal

Номер образца	Измененный параметр	Числовое значение
1	Скорость перемещения рабочего стола	6 мм/ч
2	Скорость перемещения рабочего стола	8 мм/ч
3	Скорость перемещения рабочего стола	10 мм/ч
4	Угол и частота качания шпинделя	2° ; 500 °/мин

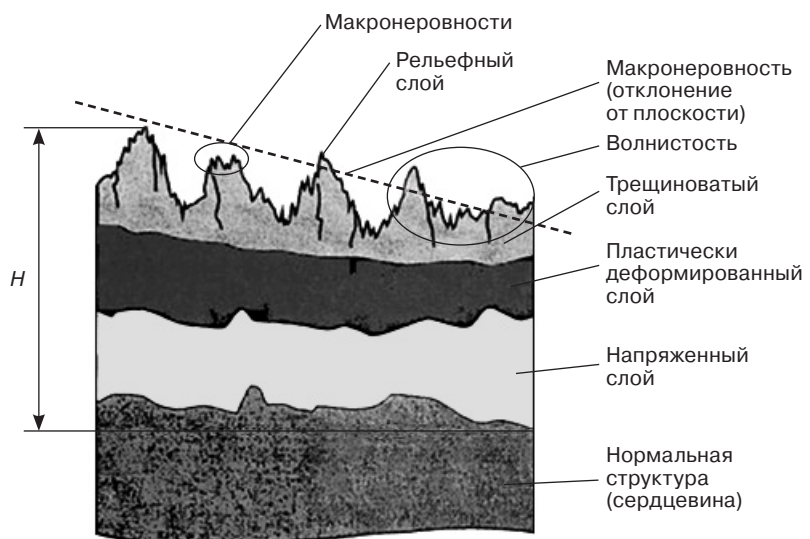


Рис. 3. Структура трещиноватого слоя [20]

Fig. 3. Structure of the fractured layer [20]

подвижностью основных носителей заряда 4500—5000 см²/(В·с). Разделение образцов из монокристаллов на пластины производилось на установке проволочной резки с изменением таких технологических параметров, как скорость перемещения рабочего стола, угол и частота качания шпинделя в соответствии с табл. 1. Предполагается, что изменение этих параметров будет наиболее показательным для определения дальнейшего вектора развития в области улучшения поверхностных характеристик пластин.

Результаты измерения параметров поверхности образцов GaAs

Результаты, полученные при измерении параметров поверхности образцов GaAs (TTV, BOW, WARP, TIR), представлены в табл. 2.

Проанализировав значения параметров, представленных в табл. 2, можно выявить область, в которую входят значения для образцов 1—3. Значения в этой области отличаются небольшим расхождением и находятся в области допустимых значений, что делает пластины в проведенных процессах пригодными для дальнейших технических процессов. Однако значение параметра TIR для образца 4 сильно отличается от остальных, что свидетельствует об отрицательном влиянии изменения угла и частоты качания шпинделя на процесс.

На рис. 4 прослеживается тенденция к увеличению параметра WARP для образцов 1—3 с уменьшением скорости подачи рабочего стола, которое становится критическим для образца 1 и делает пластины, полученные в ходе проведения данного процесса резки, непригодными для дальнейшего использования. При процессе с изменением угла и частоты качания шпинделя также получаются непригодные для дальнейшего использования пластины.

Согласно рис. 5, прогиб пластины растет при снижении скорости подачи рабочего стола и увеличении угла и частоты качания шпинделя. Излишне высокий прогиб пластины усложняет процесс последующей шлифовки и полировки. На рис. 5 видно, что процесс изменения прогиба пластин, проведенный при скорости подачи рабочего стола в 10 мм/ч, является самым оптимальным режимом в рамках параметра BOW.

Таблица 2 / Table 2

Параметры поверхности образцов GaAs при различных режимах резки
Surface parameters of GaAs samples under different cutting modes

Параметр	Номер образца (режим резки)			
	1 (6 мм/ч)	2 (8 мм/ч)	3 (10 мм/ч)	4 (2° и 500 °/мин)
TTV, мкм	2,246	5,404	3,010	4,655
TIR, мкм	2,041	2,980	2,588	4,258
WARP, мкм	10,551	9,699	4,483	20,808
BOW, мкм	-3,598	-2,990	-1,800	-8,384

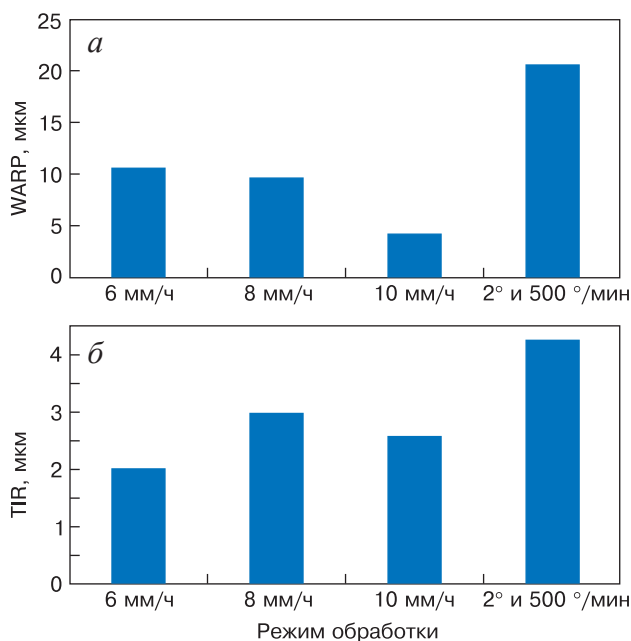


Рис. 4. Зависимость параметров WARP (а) и TIR (б) от режимов резки

Fig. 4. Dependence of WARP (a) and TIR (б) parameters on cutting modes

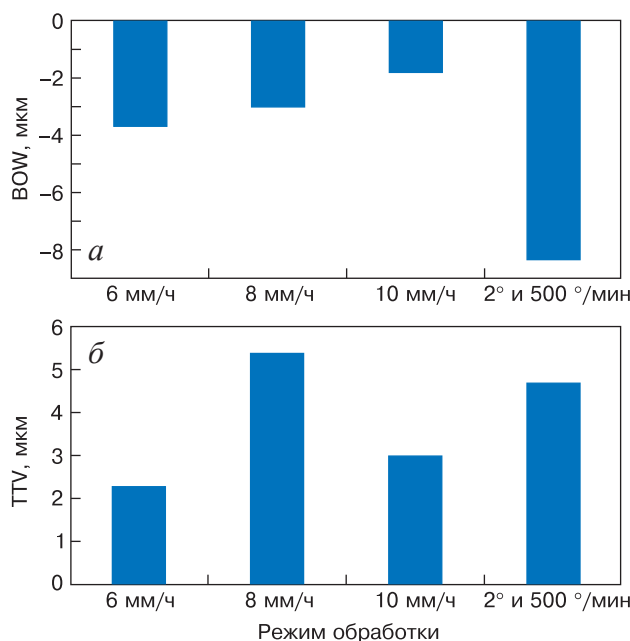


Рис. 5. Зависимость параметров BOW (а) и TTV (б) от режимов резки

Fig. 5. Dependence of parameters BOW (a) and TTV (б) on cutting modes

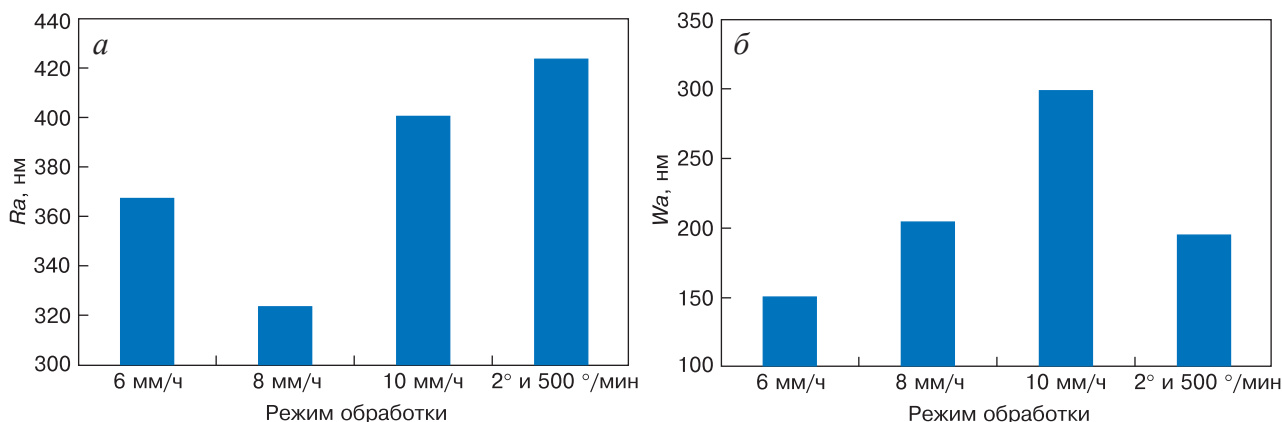


Рис. 6. Зависимость параметров Ra (а) и Wa (б) от режимов резки
 Fig. 6. Dependence of parameters Ra (a) and Wa (б) on cutting modes

В соответствии с графиками, представленными на рис. 4 и 5, были выявлены зависимости параметров поверхностей от режима обработки полупроводникового монокристалла.

Таблица 3 / Table 3

Результаты измерения шероховатости и волнистости

При анализе результатов измерения шероховатости и волнистости пластин на контактном профилометре при разных режимах резки была определена их зависимость от способа обработки. Так, измерения шероховатости Ra и волнистости Wa показали, что самая низкая шероховатость получается при режиме 8 мм/ч, а высокая — 2° и 500 °/мин, средние показатели данного параметра имеют пластины при режимах резки 6 и 10 мм/ч.

По полученным данным (табл. 3) были построены графики зависимости параметров шероховатости и волнистости (рис. 6). Из рис. 6 возможно отследить тенденцию изменения шероховатости от режима резки. Минимальное значение волнистости было получено на поверхности пластин, резанных при 6 мм/ч, максимальное при 10 мм/ч. На рис. 6 хорошо видна тенденция уменьшения волнистости пластин при снижении скорости резки и возрастании этой волнистости при увеличении угла и частоты качания до 2° и 500 °/мин.

Шероховатость и волнистость для образцов монокристалла GaAs при различных режимах резки

Roughness and waviness for GaAs single crystal samples under different cutting modes

Номер образца (режим резки)	Ra, нм	Wa, нм
1 (6 мм/ч)	368	145
2 (8 мм/ч)	323	206
3 (10 мм/ч)	401	299
4 (2° и 500 °/мин)	423	194

Таблица 4 / Table 4

Глубина нарушенного слоя для различных образцов монокристалла GaAs при различных режимах резки

Depth of the damaged layer for different GaAs single crystal samples under different cutting modes

Номер образца (режим резки)	Глубина нарушенного слоя, мкм
1 (6 мм/ч)	4,144
2 (8 мм/ч)	5,513
3 (10 мм/ч)	4,404
4 (2° и 500 °/мин)	6,619

с незначительным отличием обладают кристаллы, обработанные при скорости подачи рабочего стола в 6 и 10 мм/ч.

Результаты измерения трещиноватого слоя

Измерение глубины трещиноватого слоя проводилось на сканирующем электронном микроскопе. Снимки сколов пластин GaAs представлены на рис. 7. По полученным измерениям (табл. 4) определена глубина трещиноватого слоя.

Зависимость глубины нарушенного слоя от параметров многопроволочной резки следующая: наибольшее значение наблюдается при угле качания 2° и частоте качания 500°/мин. Наименьшими значениями глубины нарушенного слоя

Заключение

В результате анализа структуры поверхности и геометрии пластин GaAs, полученных методом проволочной резки слитков GaAs, выращенных в

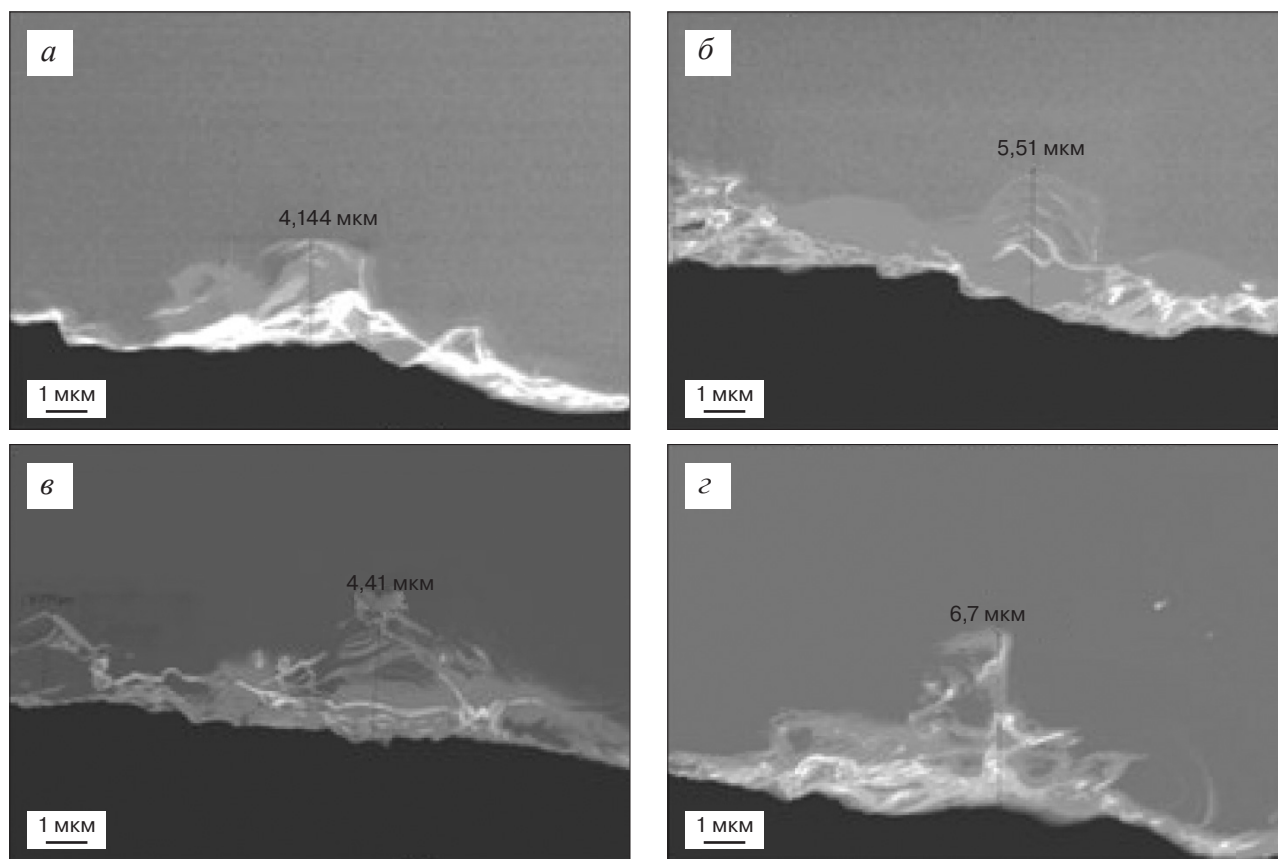


Рис. 7. Зависимость глубины трещиноватого слоя от режимов резки:

а — снимок торца пластины порезанной при 6 мм/ч; б — 8 мм/ч; в — 10 мм/ч; г — 2° и 500°/мин

Fig. 7. Dependence of the depth of the fractured layer on the cutting modes:

(a) snapshot of the end face of a plate cut at 6 mm/h; (б) 8 mm/h; (в) 10 mm/h; (г) 2 deg and 500 deg/min

направлении (100) при различных условиях резки (скорость подачи стола, качание шпинделя) методом оптической интерферометрии выявлены некоторые режимы резки, влияющие на геометрию пластин. При снижении скорости подачи стола с 10 до 6 мм/ч при одинаковом качании шпинделя параметры WARP (коробление) и BOW (прогиб) увеличиваются с 4,4 до 10,5 мкм и с $-1,8$ до $-3,6$ мкм соответственно, максимальные значения параметров TIR (максимальные отклонения) 2,9 мкм и TTV (разнотолщинность) 5,4 мкм наблюдаются при 8 мм/ч.

Исследования волнистости пластин с помощью профилографа показали, что минимальное значение наблюдается при скорости подачи стола 6 мм/ч — 145 нм, а шероховатости при 8 мм/ч — 320 нм. Анализ глубины трещиноватого слоя показал, что максимальное значение наблюдается при 8 мм/ч — 5,5 мкм.

Исследование влияния угла качания выявило, что при его увеличении с $0,5^\circ$ и частоты качания шпинделя с 250 °/мин до 2° и 500 °/мин соответственно при скорости подачи стола 8 мм/ч морфология поверхности ухудшается по всем параметрам оптической интерферометрии, а шероховатость — до 425 нм.

Библиографический список

1. Маянов Е., Гасанов А., Князев С., Наумов А. Тенденции развития рынка монокристаллов GaAs. *ЭЛЕКТРОНИКА: наука, технология, бизнес*. 2018; (2(173)): 172—184. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2018.173.2.172.184>
2. Goldstein J.I., Newbury D.E., Michael J.R., Ritchie N.W.M., Scott J.H.J., Joy D.C. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. N.Y.: Springer; 2018. 554 p.
3. Маянов Е., Пархоменко Ю., Наумов А. Краеугольный кремний: промышленное полупроводниковое материаловедение в России. *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес*. 2017; (4(164)): 98—104. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2017.164.4.98.104>
4. Парфентьева И.Б., Пугачев Б.В., Павлов В.Ф., Козлова Ю.П., Князев С.Н., Югова Т.Г. Особенности формирования дислокационной структуры в монокристаллах арсенида галлия, полученных методом Чохральского. *Кристаллография*. 2017; 62(2): 259—263. <https://doi.org/10.7868/S0023476117020205>
5. Кульчицкий Н.А., Маянов Е.П., Наумов А.В. Арсенид галлия и приборы нано-, микро- и оптоэлектроники на его основе. *Нано- и микросистемная техника*. 2017; 19(4): 207—211. <https://doi.org/10.17587/nmst.19.207-214>
6. Zulehner W. Historical overview of silicon crystal pulling development. 12 p. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921510799004274> (дата обращения: 26.01.2023).
7. Uecker R. The historical development of Czochralski method. *Journal of Crystal Growth*. 2014; 401(99): 7—25. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2013.11.095>

8. Наумов А.В. Метод создания мира. К 100-летию открытия метода Чохральского и 60-летию получения первого кристалла германия в России. *ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес*. 2016; (9(159)): 157—167.

9. Леговичев Б.Н. О развитии производства материалов для электроники. В сб.: *II Междунар. науч.-практ. конф. «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение», посвященная памяти академика Н.П. Сажина. РедМет-2022. 23–25 ноября, Москва*. М.: РедМет; 2022. 138 с.

10. Князев С.Н., Югова Т.Г. Проблемы роста структурно-совершенных монокристаллов арсенида галлия методом Чохральского. В сб.: *Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение. РедМет-2021. Сажинские чтения. 9–10 декабря, 2021, Москва*. М.: РедМет; 2021. С. 37.

11. Переломова Н.В., Тагиева М.М. Кристаллофизика. М.: Издательский Дом НИТУ «МИСиС»; 2013. 408 с.

12. Шалимова К.В. Физика полупроводников. СПб.: Лань; 2010. 390 с.

13. Левченко Д.С., Теплова Т.Б., Югова Т.Г. Исследование дислокационной структуры монокристаллов арсенида галлия, используемых для создания приборов сверхскоростной микроэлектроники. В сб.: *Материалы II Междунар. науч.-практ. конф. «Экономика и практический менеджмент в России и за рубежом». Коломна, 30 апреля 2015*. Коломна: Коломенский ин-т (фил.) ФГБОУ ВПО «Московский гос. машиностроительный ун-т (МАМИ)»; 2015. С. 135—137.

14. Случинская И.А. Основы материаловедения и технологии полупроводников. М.: Мир; 2002. 376 с.

15. Авров Д.Д., Лебедев А.О., Таиров Ю.М. Основные дефекты в слитках и эпитаксиальных слоях карбида кремния I. Дислокационная структура и морфологические дефекты. *Известия высших учебных заведений. Электроника*. 2015; 2(03): 225—238.

16. Косушкин В.Г., Кожитов Л.В., Кожитов С.Л. Состояние и проблемы выращивания монокристаллов полупроводников высокой однородности. *Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технология*. 2013; (1): 10—22.

17. Кудря А.В., Соколовская Э.А., Скородумов С.В., Траченко В.А., Папина К.Б. Возможности цифровой световой микроскопии для объективной аттестации качества металлопродукции. *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2018; (4(754)): 15—23.

18. Суворов Э.В. Физические основы экспериментальных методов исследования реальной структуры кристаллов. Черноголовка: ИФТТ РАН; 2021. 209 с.

19. Комаровский Н.Ю., Ющук В.В., Биндюг Д.В., Богембаев Н.Р. Исследование градиента распределения дефектов в монокристаллических пластинах кремния и арсенида галлия с помощью рентгеновской топографии. *Международный научно-исследовательский журнал*. 2021; (4-1(106)): 26—31. <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.106.4.004>

20. Князев С.Н., Комаровский Н.Ю., Чупраков В.А., Ющук В.В. Влияние технологических параметров на структурное совершенство монокристаллического арсенида галлия. В сб.: *Междунар. науч. конф. «Современные материалы и передовые производственные технологии» (СМПТТ-2021). Санкт-Петербург, 21–23 сентября 2021*. СПб.: ФГОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»; 2021. С. 218—220.

21. Виглин Н.А., Грибов И.В., Цвелиховская В.М., Патраков Е.И. Очистка от оксидов поверхности пластин полупроводника InSb для создания латеральных спиновых клапанов. *Физика и техника полупроводников*. 2019; 53(2): 277—280. <https://doi.org/10.21883/FTR.2019.02.47113.8906>

22. Файнштейн С.М. Обработка поверхности полупроводниковых приборов. М.; Ленинград: Энергия; 1966. 256 с.

23. Левченко И.В., Стратийчук И.Б., Томашик В.Н., Малачич Г.П., Корчевой А.А. Особенности химического полирования кристаллов InAs, GaAs, InSb и GaSb в растворах $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-HBr-CH}_2(\text{OH})\text{CH}_2(\text{OH})$. *Вопросы химии и химических технологий*. 2017; (2(111)): 29—35.

24. Маслов А.А. Технология и конструкции полупроводниковых приборов. М.: Энергия; 1970. 296 с.

25. Самойлов А.М., Беленко С.В., Сирадзе Б.А., Тореев А.С., Донцов А.И., Филонова И.В. Плотность дислокаций в пленках PbTe, выращенных на подложках Si (100) и BaF_2 (100) модифицированным методом «горячей стенки». *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2013; 15(3): 322—331.

26. Суслов А.А., Чижик С.А. Сканирующие зондовые микроскопы (обзор). *Материалы, технологии, инструменты*. 1997; (3): 78—89. URL: <http://microtm.com/download/mti-spmreview.pdf>

References

1. Mayanov E., Hasanov A., Knyazev S. GaAs Monocrystals' market trends. *ELECTRONICS: Science, Technology, and Business*. 2018; (2(173)): 172—184. (In Russ.). <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2018.173.2.172.184>

2. Goldstein J.I., Newbury D.E., Michael J.R., Ritchie N.W.M., Scott J.H.J., Joy D.C. Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis. N.Y.: Springer; 2018. 554 p.

3. Mayanov E., Parkhomenko Y., Naumov A. Fundamental silicon: industrial semiconductor materials science in Russia. *ELECTRONICS: Science, Technology, and Business*. 2017; (4(164)): 98—104. (In Russ.). <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2017.164.4.98.104>

4. Parfenteva I.B., Pugachev B.V., Pavlov V.F., Knyazev C.N., Yugova T.G., Kozlova Y.P. Specific features of the formation of dislocation structure in gallium arsenide single crystals obtained by the Czochralski method. *Crystallography Reports*. 2017; 62(2): 275—278. <https://doi.org/10.1134/S1063774517020201>

5. Kulchitskiy N.A., Mayanov E.P., Naumov A.V. Gallium arsenide: the basic material of microwave electronics. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsys-*

tems Technology. 2017; 19(4): 207—211. (In Russ.). <https://doi.org/10.17587/nmst.19.207-214>

6. Zulehner W. Historical overview of silicon crystal pulling development. 12 p. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921510799004274> (accessed on 26.01.2023).

7. Uecker R. The historical development of Czochralski method. *Journal of Crystal Growth*. 2014; 401(99): 7—25. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2013.11.095>

8. Naumov A. The method of creation of the world. On the 100th anniversary of Czochralski method development and the 60th anniversary of the first germanium crystal growth in Russia. *ELECTRONICS: Science, Technology, and Business*. 2016; (9(159)): 157—167. (In Russ.)

9. Levonovich B.N. On the development of the production of materials for electronics. Moscow: REDMet; 2022. 138 p. In: *II Inter. Scient.-pract. conf. "Rare metals and materials based on them: technologies, properties and applications", dedicated to the memory of Academician N.P. Sazhin. RareMet-2022. November 23–25, Moscow*. Moscow: RareMet; 2022. (In Russ.)

10. Knyazev S.N., Yugova T.G. Problems of growth of structurally perfect single crystals of gallium arsenide by the Czochralski method. In: *Rare metals and materials based on them: technologies, properties and applications. RareMe-2021. Sazhinsky readings. December 9–10, 2021, Moscow*. Moscow: RareMe; 2021. P. 37. (In Russ.)
11. Perelomova N.V., Tagieva M.M. crystal physics. Moscow: Izdatel'skii Dom NITU "MISI"; 2013. 408 p. (In Russ.)
12. Shalimova K.V. Physics of semiconductors. St. Petersburg: Lan'; 2010. 390 p. (In Russ.)
13. Levchenko D.S., Teplova T.B., Yugova T.G. Investigation of the dislocation structure of gallium arsenide single crystals used to create devices for ultrahigh-speed microelectronics. In: *Proceed. of II Inter. Scient.–pract. conf. "Economics and practical management in Russia and abroad". Kolomna, April 30, 2015*. Kolomna: Kolomenskii un-t (fil.) FGBOU VPO «Moskovskii gos. mashinostroitel'nyi un-t (MAMI)»; 2015. P. 135–137. (In Russ.)
14. Sluchinskaya I.A. Fundamentals of materials science and semiconductor technology. Moscow: Mir; 2012. 376 p. (In Russ.)
15. Avrov D.D., Lebedev A.O., Tairov Yu.M. Main defects in ingots and epitaxial layers of silicon carbide. I. Dislocation structure and morphological defects. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Elektronika = Proceedings of Universities. Electronics*. 2015; 20(3): 225–238. (In Russ.)
16. Kosushkin V.G., Kozhitov L.V., Kozhitov S.L. State and growing problem of high uniformity semiconductor single crystals. *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2013; (1): 10–22. (In Russ.)
17. Kudrya A.V., Sokolovskaya E.A., Skorodumov S.V., Trachenko V.A., Papina K.B. Possibilities of digital optical microscopy for objective certification of the quality of metalware. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*. 2018; (4(754)): 15–23. (In Russ.)
18. Suvorov E.V. Physical foundations of experimental methods for studying the real structure of crystals. Chernogolovka: IFTT RAN; 2021. 209 p. (In Russ.)
19. Komarovskiy N.Yu., Yushchuk V.V., Bindyug D.V., Bogembaev N.R. Investigation of the defect distribution gradient in single-crystal silicon and gallium arsenide plates using X-ray topography. *Mezhdunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal = International Research Journal*. 2021; (4–1(106)): 26–31. (In Russ.). <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.106.4.004>
20. Knyazev S.N., Komarovskiy N.Yu., Chuprakov V.A., Yushchuk V.V. Influence of technological parameters on the structural perfection of single-crystal gallium arsenide. In: *Inter. scient. conf. "Modern materials and advanced production technologies" (SMPPT-2021). St. Petersburg, September 21–23, 2021*. St. Petersburg: FGOU VO "Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo"; 2021. P. 218–220. (In Russ.)
21. Viglin N.A., Gribov I.V., Tselikhovskaya V.M., Patrakov E.I. Oxide removal from the InSb plate surface to produce lateral spin valves. *Semiconductors*. 2019; 53(2): 264–267. <https://doi.org/10.1134/S1063782619020258>
22. Fainshtein S.M. Semiconductor surface treatment. Moscow; Leningrad: Energiya; 1966. 256 p. (In Russ.)
23. Levchenko I.V., Stratiyuchuk I.B., Tomashyk V.N., Malanych G.P., Korchovyi A.A. Features of the chemical polishing of InAs, GaAs, InSb and GaSb crystals in the $(\text{NH}_4)_2\text{Cr}_2\text{O}_7\text{-HBr-CH}_2(\text{OH})\text{CH}_2(\text{OH})$ solutions. *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii = Issues of Chemistry and Chemical Technology*. 2017; (2(111)): 29–35. (In Russ.)
24. Maslov A.A. Technology and design of semiconductor devices. Moscow: Energiya; 1970. 296 p. (In Russ.)
25. Samoylov A.M., Belenko S.V., Siradze B.A., Toreev A.S., Dontsov A.I., Filonova I.V. The dislocation density in PbTe films on Si (100) and BaF₂ (100) substrates prepared by modified "Hot wall" technique. *Kondensirovannye sredy i mezhfaznyye granitsy = Condensed Matter and Interphases*. 2013; 15(3): 322–331. (In Russ.)
26. Suslov A.A., Chizhik S.A. Scanning probe microscopes (overview). *Materialy, tekhnologii, instrument*. 1997; (3): 78–89. (In Russ.). URL: <http://microtm.com/download/mti-spmreview.pdf>

Информация об авторах / Information about the authors

Подгорный Дмитрий Андреевич — канд. физ.–мат. наук, доцент кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8237-0608>; e-mail: podgorny_d@isis.ru

Нестюркин Михаил Сергеевич — магистр, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; научный сотрудник, АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-6735-5058>; e-mail: mnestyurkin@mail.ru

Комаровский Никита Юрьевич — аспирант, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Ленинский просп., д. 4, стр. 1, Москва, 119049, Российская Федерация; стажер-исследователь, АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Электродная ул., д. 2, стр. 1, Москва, 111524, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7869-7886>; e-mail: nickkomarovskiy@mail.ru

Dmitry A. Podgorny — Cand. Sci. (Phys.–Math.), Associate Professor, Department of Materials Science of Semiconductors and Dielectrics, National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8237-0608>; e-mail: podgorny_d@isis.ru

Mikhail S. Nestyurkin — Master, National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; Researcher, Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2–1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6735-5058>; e-mail: mnestyurkin@mail.ru

Nikita Yu. Komarovskiy — Postgraduate Student, National University of Science and Technology "MISIS", 4–1 Leninsky Ave., Moscow 119049, Russian Federation; Trainee Researcher, Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2–1 Elektrodnyaya Str., Moscow 111524, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7869-7886>; e-mail: nickkomarovskiy@mail.ru

Поступила в редакцию 05.04.2023; поступила после доработки 25.06.2023; принята к публикации 04.07.2023
Received 5 April 2023; Revised 25 June 2023; Accepted 4 July 2023