

УДК 621.315.592
EDN: OZGTGX

PACS: 81.10-h

Моделирование параметров режима многопроволочной резки, обеспечивающего высокое качество поверхности пластин InSb (100)© М. С. Нестюркин^{1,2*}, Д. А. Подгорный², Е. В. Молодцова¹, Н. Ю. Комаровский^{1,2}¹АО «Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет» им. Н. П. Сажина», Москва, 111524 Россия

* E-mail: mnestyurkin@mail.ru

²НИТУ «МИСИС», Москва, 119049 РоссияСтатья поступила в редакцию 13.03.2026; после доработки 27.04.2026; принята к публикации 06.08.2026
Шифр научной специальности: 2.2.2; 2.2.3

Изучался вопрос расчёта условий проволочной резки и определения лимитирующих параметров для движения рабочего стола как одного из факторов, влияющих на параметры поверхности – такие, как прогиб пластины (BOW) и коробление пластины (WARP). Экспериментальная работа проводилась с определением необходимых для сегментирования участков поперечного среза монокристалла InSb, для каждого из которых был проведен расчёт скорости резки. Показано практическое подтверждение теоретических расчётов с эффективным изменением параметров поверхности.

Ключевые слова: $A^{III}B^V$, InSb, проволочная резка, оптическая профилометрия, параметры проволочной резки, расчёт скорости рабочего стола.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-4-68-76

Введение

Соединения $A^{III}B^V$ в настоящее время являются основным материалом для изготовления матричных фотоприёмных устройств (МФПУ) [1], которые создаются по технологии эпитаксиального роста слоев, что требует высокого качества поверхности подложек. Получение пластин $A^{III}B^V$ класса «epi-ready» – одна из основных задач для развития микроэлектроники [2]. Технология получения МФПУ (матричных фотоприёмных устройств) состоит из множества этапов, одним из которых является механическая обработка монокристаллов, включающая в себя такие основные переделы, как разделение монокристаллов на пластины, их последующая шлифовка и процессы химико-механической полировки. Поэтому повышение качества используемых пластин требует оптимизации режимов обработки на каждом этапе их изготовления. Раз-

деление монокристаллов на пластины происходит посредством проволочной резки. Этому процессу уделяют незначительное внимание, но он имеет существенное влияние на поверхностные параметры прогиба пластины (BOW) и коробления пластины (WARP) уже готовых «epi-ready» пластин. Данный технологический передел во многом определяет качество будущей продукции. Это является причиной, по которой многопроволочная резка требует дополнительного анализа её влияния на качественные характеристики пластин.

В предыдущей работе [3] были выявлены основные параметры поверхности пластины, которые для готовой продукции во многом закладываются на этапе многопроволочной резки (прогиб пластины (BOW) и коробление пластины (WARP)). Эти параметры имеют свойство как увеличиваться, так и уменьшаться в зависимости от заданных характеристик процесса обработки. Для выявления

степени значимости параметров поверхности были отобраны пластины после резки, шлифовки и полировки, а также отслежена тенденция к их изменению с каждым технологическим процессом.

Главной особенностью в обработке InSb является то, что эти монокристаллы имеют значительные напряжения в объеме монокристаллического материала. При механической обработке InSb возникает нарушенный слой – больший, чем в Si и GaAs. Это требует удаления значительного слоя в процессе шлифовки и последующей полировке. «Щадящие» режимы резки позволят уменьшить структурно нарушенный поверхностный слой, что приведет к экономии материала при получении «Epi-ready» пластин.

Основная технология механической обработки InSb подразумевает использование многопроволочной резки с постоянной скоростью подачи рабочего стола, но из анализа статьи [4] возникает предположение, что с изменением ширины реза образца изменяется как биение проволоки, так и значение величины силы воздействия проволоки на образец, равномерное распределение которой по отношению к увеличению или уменьшению ширины разрезаемого образца положительно скажется на параметрах поверхности. Данное предполо-

жение возникает из-за утверждений в статье о том, что шероховатость поверхности пластины, нарезанной проволочной резкой, обычно неоднородна, что может создавать проблемы при последующей шлифовке и полировке. Также параметрические исследования, приведенные в статье [4] показывают, что вибрационное смещение проволоки уменьшается с увеличением расстояния контакта проволоки с разрезаемым кристаллом.

Эксперимент

В работе [5] предложена модель, в которую были внесены некоторые поправки с учетом условий резки InSb. Во время резки на кристалл InSb воздействует проволока, имеющая натяжение T (рис. 1). Во время процесса она отклоняется на определенный угол α и прикладывает к образцу суммарную силу $F_{\text{сумм}}$. По направлению (Y) сила действия $F_{\text{сумм}}$ равна силе противодействия $F_{\text{сумм}}^K$, поскольку сила, с которой проволока действует на кристалл InSb равна силе, с которой кристалл действует на проволоку [6]. Таким образом:

$$F_{\text{сумм}}^K = F_{\text{сумм}} = 2T \sin \alpha. \quad (1)$$

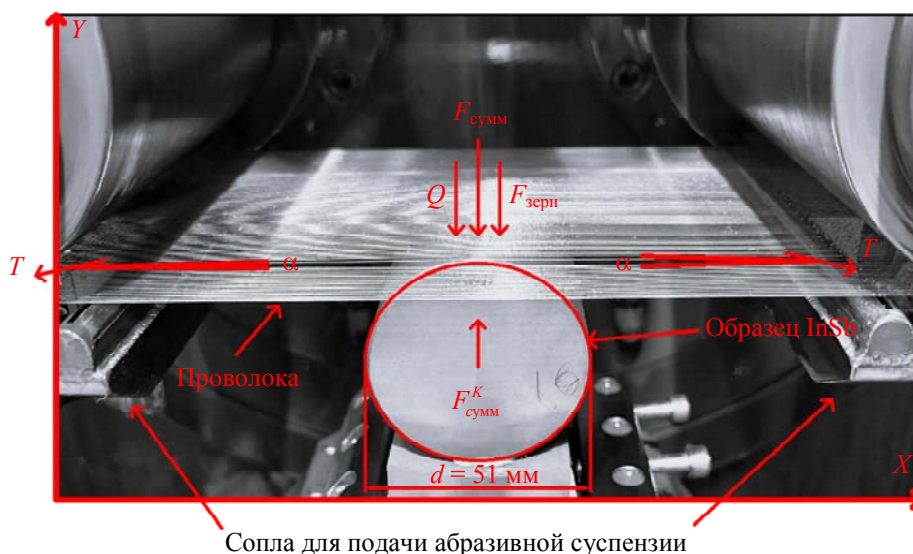


Рис. 1. Общий вид разрезаемого образца InSb

Сила воздействия проволоки на кристалл $F_{\text{сумм}}^K$ не прикладывается к кристаллу точечно,

а распределена на всю ширину реза – L' . Обозначим данное распределение как – Q . Таким образом, получим выражение:

$$Q = \frac{F_{\text{сумм}}}{L'} = \frac{2T \sin \alpha}{L'}. \quad (2)$$

Кроме того, существует сила, которая прикладывается к каждому абразивному зерну, которое попадает в зону резки. Данная сила может быть рассчитана, если разделить общую приложенную силу $F_{\text{сумм}}$ на количество абразивных зерен в зоне реза. Для расчёта количества абразивных частиц (N) необходимо ширину реза кристалла InSb (L') разделить на расстояние между абразивными частицами ($L_{\text{част}}$).

$$N = L' / L_{\text{част}}. \quad (3)$$

Силу, приложенную к одному абразивному зерну, $F_{\text{зерн}}$ получим путем деления общей приложенной силы $F_{\text{сумм}}$ на количество абразивных зерен (N), находящихся на всей длине реза:

$$F_{\text{зерн}} = \frac{F_{\text{сумм}}}{N} = \frac{2T \sin \alpha}{L_{\text{част}}} \times L'. \quad (4)$$

Картина приложенных сил ($F_{\text{сумм}}^K$, $F_{\text{сумм}}$, $F_{\text{зерн}}$) в реальном процессе (рис. 1) также представлена в виде векторного изображения на рисунке 2.

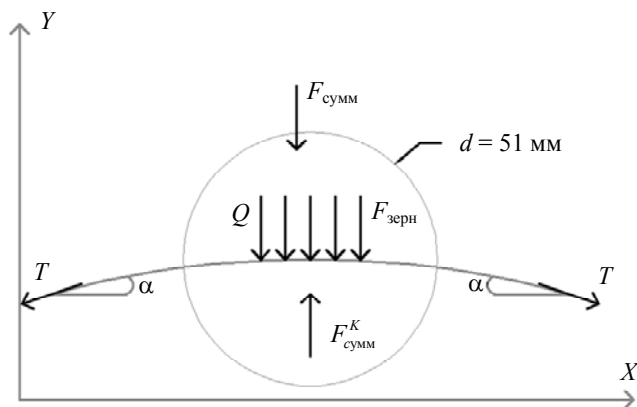


Рис. 2. Векторное представление сил, действующих при проволочной резке на разрезаемый образец InSb

В круглой форме сечения монокристалла InSb ширина реза L' не постоянна и изменяет-

ся по мере прорезания кристалла. Подаваемый поток суспензии в зону резки имеет постоянное значение, следовательно, в область проволочной резки попадает одинаковое число абразивных частиц, а значит, расстояние между абразивными частицами $L_{\text{част}}$ можно принять за неизменяющуюся величину (const). В таком случае распределение общей силы, действующей на кристалл $F_{\text{сумм}}$ зависит от ширины реза монокристалла InSb. При условии того, что стандартная скорость резки (скорость подачи рабочего стола $V_{\text{ст}}$) постоянна и равна 8 мм/ч, получим, что из-за непостоянной ширины реза монокристалла InSb круглой формы сечения сила воздействия проволоки на монокристалл также непостоянна, что приводит к образованию качественных различий в топологии поверхности резанной пластины (рис. 3а). Данные различия проявляются в виде 5 областей неоднородности поверхности резанной пластины InSb при измерении её топологии с помощью комплекса оптической профилометрии Microprof (рис. 4). Данный комплекс позволяет получать картины поверхности пластины и измерять её поверхностные характеристики (разнотолщинность пластины (TTV), прогиб пластины (BOW), коробление пластины (WARP), величина отклонения от базовой плоскости (TIR) и т. д.).

Для уравнивания силы воздействия проволоки на монокристалл и нивелирования данных 5 областей предлагается сделать резку блочной, рассчитав и задав для каждого из блоков свою скорость резки. Для этого произведено деление сечения кристалла InSb диаметром 51 мм на 20 блоков. Таким образом, высота каждого блока составит 2,55 мм (рис. 3б).

Каждый из блоков имеет ограниченную его сектором ширину реза, находящуюся сверху и снизу блока. Ширина реза для начала каждого из блоков указана в таблице 1. При анализе топологии поверхности пластины после резки было получено, что на пластине InSb диаметром 51 мм 5 участков неоднородности совпадают с номерами секторов, представленных в таблице (табл. 2).

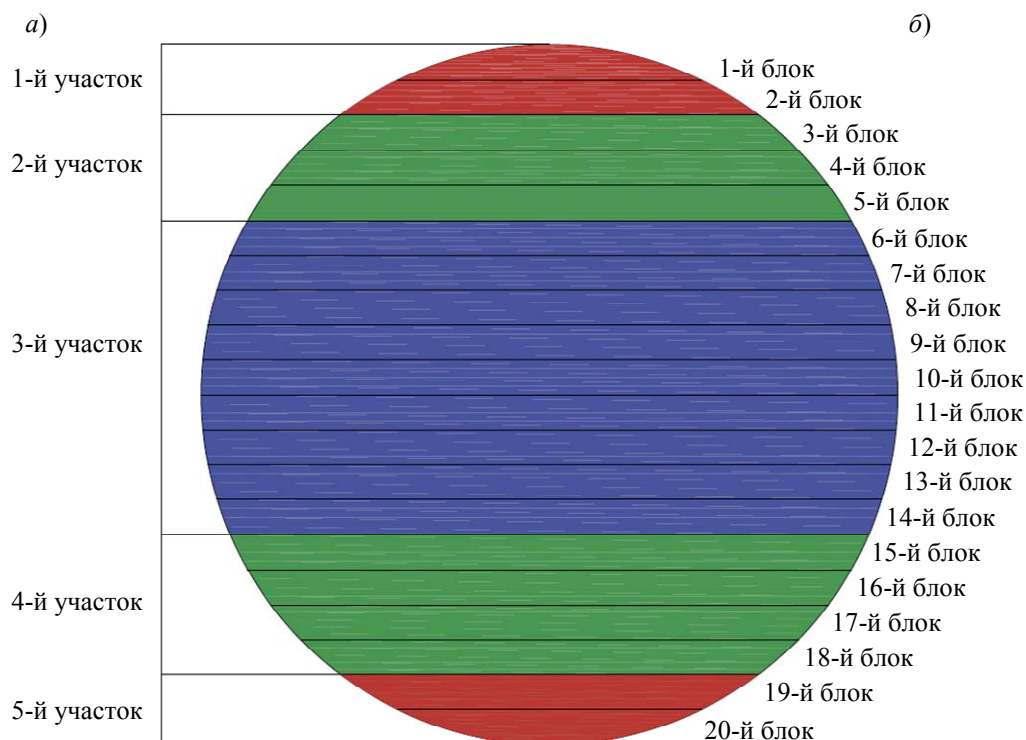


Рис. 3. Схематическое представление отрезаемой пластины InSb 2'' с разбивкой:
а) на участки неоднородности, полученные в результате измерения поверхности
отрезанной пластины с помощью оптической профилометрии,
отрезаемой с постоянной скоростью резки $V_{cm} = 8$ мм/ч;
б) на 20 блоков, для каждого из которых необходимо рассчитать своё значение ширины
и скорости резки. Высота каждого блока: 2,55 мм

Таблица 1

Основные переменные при проведении расчёта и их значение

$V_{ст} = 8$ мм/ч	— стандартная постоянная скорость подачи рабочего стола (мм/ч)
$V_{бл}$	— скорость резки, рассчитанная для каждого из 20-ти блоков (мм/ч). Для блоков № 1, 20 скорость резки принимается равной 8 мм/ч
T	— значение натяжения проволоки (Н)
α	— угол прогиба проволоки (градусы)
$F_{сумм}$	— суммарная сила, которую прикладывает проволока к разрезаемому образцу (Н)
$F_{сумм}^K$	— сила, с которой кристалл действует на проволоку (Н)
L'	— ширина реза монокристалла (общая ширина контакта между проволокой и кристаллом InSb) (мм)
Q	— распределение силы воздействия проволоки на кристалл на единицу ширины реза (Н/мм)
$F_{зерн}$	— сила, прикладываемая к одному абразивному зерну (Н)
N	— количество абразивных частиц (шт.)
$L_{част}$	— расстояние между абразивными частицами (мм)
n	— порядковый номер блока, в расчётной формуле n изменяется последовательно от 1 до 18
l_n	— n -значение ширины начала блока
k	— коэффициент соотношения среднего значения ширины n блока к среднему значению ширины $n + 1$ блока

Таблица 2
Результаты измерения ширины начала
каждого блока

№ участка неоднородности	№ блока резки (n)	Ширина начала блока (l_n) (мм)
1	1	0,00
1	2	22,23
2	3	30,60
2	4	36,42
2	5	40,80
3	6	44,17
3	7	46,74
3	8	48,65
3	9	49,97
3	10	50,74
3	11	51,00
3	12	50,74
3	13	49,97
3	14	48,65
4	15	46,74
4	16	44,17
4	17	40,80
4	18	36,42
5	19	30,60
5	20	22,23

Для каждого блока необходимо определить параметры процесса резки, а именно ско-

рости подачи рабочего стола для равномерного распределения суммарной силы $F_{\text{сумм}}$, которую прикладывает проволока к разрезаемому монокристаллу InSb. Это можно сделать, определив среднее значение ширины реза для каждого блока, затем, рассчитав коэффициент соотношения среднего значения ширины блока n к среднему значению ширины блока $n + 1$, для того, чтобы определить соотношение блоков друг к другу. Затем значение данного коэффициента необходимо поочередно умножить на каждое последовательное значение скорости стола. Тогда $V_{\text{бл}}$ будет определяться как:

$$V_{\text{бл}} = V_{\text{бл-1}} \times \frac{\frac{(l_n + l_{n+1})}{2}}{\frac{(l_{n+1} + l_{n+2})}{2}}, \quad (5)$$

где n принимает величину от 1 до 18, а $V_{\text{бл-1}}$ начинается с 8 мм/ч для первого значения расчёта. Данный параметр выбран как начальное значение скорости подачи стола, поскольку является постоянным для скорости резки (скорости подачи рабочего стола) в первоначальном процессе, с которым сравнивается процесс, изменённый на основании расчётов (табл. 3).

Таблица 3
Расчёт скорости резки для каждого блока в процессе, изменённом на основании расчётов

№ блока резки (n)	Ширина начала блока (l_n) (мм)	Среднее значение ширины реза для каждого блока (мм)	Коэффициент k	Рассчитанная скорость резки для каждого блока $V_{\text{бл}}$ (мм/ч)
1	0,00	11,12	1,00	8,00
2	22,23	26,42	0,79	7,98
3	30,60	33,51	0,87	6,31
4	36,42	38,61	0,91	5,47
5	40,80	42,48	0,93	4,97
6	44,17	45,45	0,95	4,65
7	46,74	47,70	0,97	4,43
8	48,65	49,31	0,98	4,29
9	49,97	50,36	0,99	4,20
10	50,74	50,87	1,00	4,15
11	51,00	50,87	1,01	4,15
12	50,74	50,36	1,02	4,20
13	49,97	49,31	1,03	4,29
14	48,65	47,70	1,05	4,43
15	46,74	45,45	1,07	4,65
16	44,17	42,48	1,10	4,97
17	40,80	38,61	1,15	5,47
18	36,42	33,51	1,27	6,31

Окончание табл. 3

№ блока резки (n)	Ширина начала блока (l_n) (мм)	Среднее значение ширины реза для каждого блока (мм)	Коэффициент k	Рассчитанная скорость резки для каждого блока $V_{\text{бл}}$ (мм/ч)
19	30,60	26,42	1,27	7,98
20	22,23	11,12	1,00	8,00

Примечание: k – коэффициент соотношения среднего значения ширины блока n к среднему значению ширины блока $n + 1$, где n – порядковый номер блока. Коэффициент $k = 1$ для блоков № 1, 20 т. к. для них изначально принимается скорость резки = 8 мм/ч. Для блока № 10 коэффициент $k = 1$, поскольку соотношение среднего значения ширины реза для блока № 10 к блоку № 11 равно 1. Коэффициент k имеет увеличивающееся до 1 значение от блока № 2 до блока № 10, так как ширина блока n по отношению к блоку $n + 1$ меньше и последовательно увеличивается в указанном диапазоне. Коэффициент k имеет значение больше 1 с блока № 11 до блока № 19, поскольку ширина блока n по отношению к блоку $n + 1$ больше и последовательно уменьшается в указанном диапазоне.

Результаты и их обсуждение

Для проведения эксперимента применяли станок проволоочной резки Takatori, использующий в качестве режущего инструмента свободный абразив (абразивная суспензия, состоящая из масла и порошка карбида кремния SiC). Были проведены 2 процесса проволоочной резки монокристаллов InSb, выращенных методом Чохральского при одинаковых технологических параметрах, диаметром 51 мм: первый с постоянной скоростью резки [7] (скорость подачи рабочего стола $V_{\text{ст}} = 8$ мм/ч),

а второй – со скоростью резки, рассчитанной для каждого блока монокристалла InSb ($V_{\text{бл}}$) (табл. 3). После первого процесса резки было получено 50 пластин, после второго процесса – 47. Толщина отрезаемой пластины составила ≈ 1 мм. После резки каждого из экспериментальных образцов была проведена съёмка топографии поверхности [8] всех пластин InSb. Разброс поверхностных параметров измеренных пластин находился в диапазоне 3–5 %. На рисунке 4 представлена типичная картина съёмки поверхности образцов для каждого из проведенных процессов.

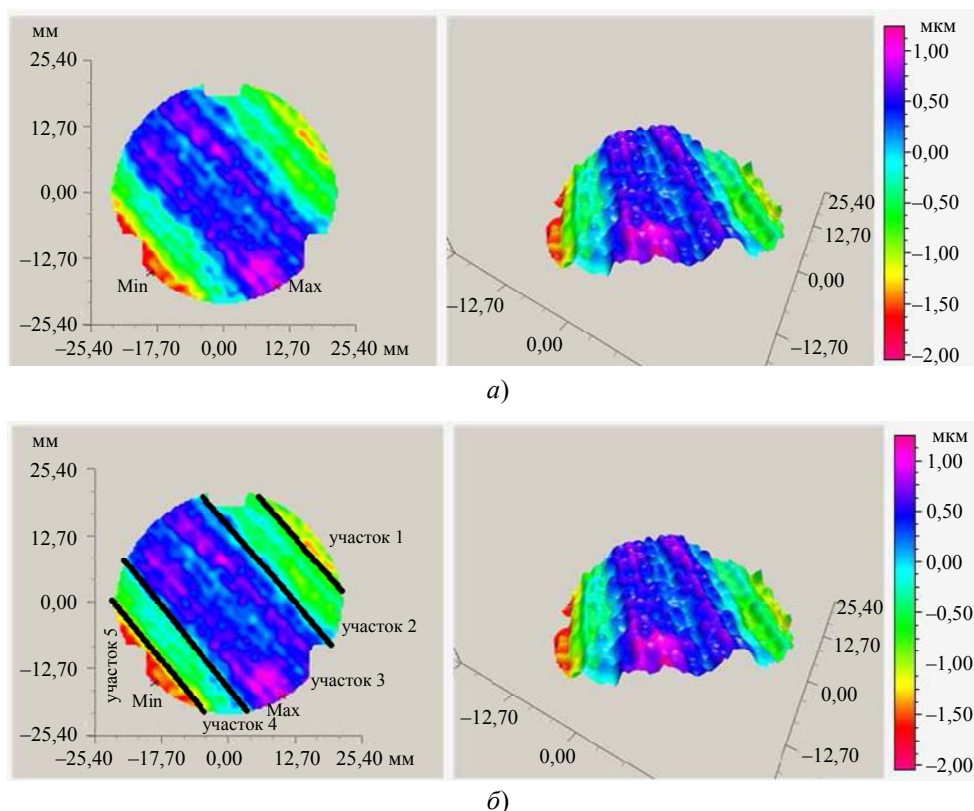


Рис. 4. Картина топографии поверхности пластины InSb, порезанной с постоянной скоростью резки $V_{\text{ст}} = 8$ мм/ч: а) исходная съёмка топографии поверхности; б) схематичное представление разбивки пластины на секторы с отличающимся качеством поверхности

На данной картине виден отчётливый прогиб пластины. По топографии поверхности пластину можно разделить на 5 участков неоднородности, границы которых обозначены на рисунке разными цветами. Границы участков были измерены и хорошо совпадают с предложенными на рисунке 3 схемой.

Рассчитанные скорости проволочной резки (табл. 3) были внесены в программу процесса резки для каждого из 20-ти блоков, после этого проведен процесс резки монокри-

сталла InSb с последующим снятием топографии поверхности полученной пластины. Результат данного измерения представлен на рисунке 5.

На данной топографической картине прогиб пластины выражен неявно. По топографии отчётливо видимых 5 областей неоднородности, по сравнению с представленными на рисунке 4, не выявлено. Измерения поверхностных параметров [9] для обоих процессов резки представлены в таблице 4.

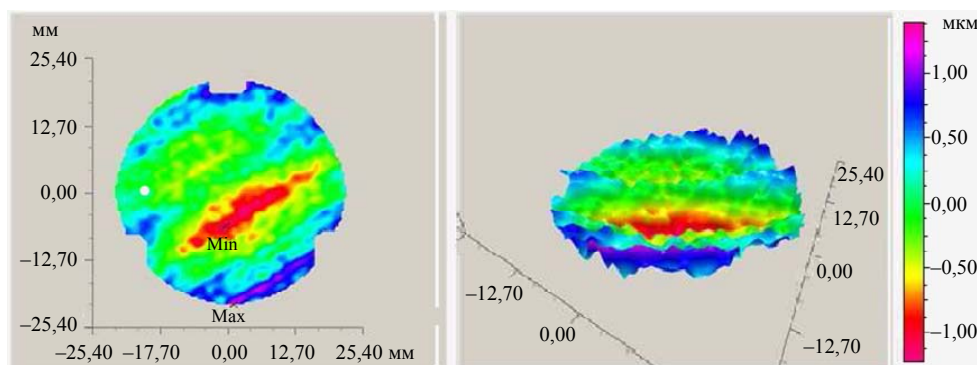


Рис. 5. Картина топографии поверхности пластины InSb, порезанной с расчётной переменной скорости резки

Таблица 4

Измерение поверхностных параметров [10] для процесса резки, проведенного с постоянной скоростью $V_{ст} = 8$ мм/ч, и для процесса резки, проведенного с расчётной для каждого из 20-ти блоков скоростью резки

	Величина измерения параметров поверхности (мкм)				
	TTV	TIR	FPD	WARP	BOW
InSb с постоянной скоростью $V_{ст} = 8$ мм/ч	3,189	2,196	1,409	3,284	0,85
InSb с расчётной скоростью	2,942	2,618	1,378	2,605	0,642

Сокращения в таблице обозначают: разнотолщинность пластины (TTV), прогиб пластины (BOW), коробление пластины (WARP), величина отклонения от базовой плоскости (TIR), максимальное расстояние от поверхности до базовой плоскости (FPD). Значения измеренных параметров приведены в мкм.

По результатам измерения параметров поверхности (табл. 4) видно, что переход от постоянной скорости резки к делению процесса проволочной резки на 20 блоков и последующему расчёту скоростей резки для каждого из них дает изменение поверхностных параметров. По значимости полученные поверхностные параметры можно разделить на более приоритетные и менее приоритетные. Приоритетность параметров была получена в результате выявления тех значений, которые можно существенно изменить на последующих операциях обработки (шлифовки и полировки), и тех, которые закладываются на опе-

рации проволочной резки и на последующих этапах изготовления изменяются незначительно. Так, к приоритетным параметрам относятся прогиб пластины (BOW) и коробление пластины (WARP). В результате эксперимента параметр прогиб пластины (BOW) уменьшился на 25 %; параметр коробление пластины (WARP) уменьшился на 21 %. При этом изменение остальных параметров составило: разнотолщинность пластины (TTV): –8 % – величина отклонения от базовой плоскости (TIR): +19 % – максимальное расстояние от поверхности до базовой плоскости (FPD): –2 %.

Выводы

1. Установлена положительная динамика изменения поверхностных параметров разрезаемой пластины. Показано, что с изменением ширины реза образца изменяется величина силы воздействия проволоки на образец. Определено, что равномерное распределение силы воздействия проволоки на образец по отношению к увеличению или уменьшению ширины разрезаемого образца положительно сказывается на параметрах поверхности, что подтверждается как расчётной, так и практической составляющей работы.

2. Положительная динамика изменения параметров поверхности пластины заключается в основном в существенном изменении прогиба пластины (BOW) и коробления пластины (WARP). Изменение параметров разнотолщинность пластины (TTV) и максимальное расстояние от поверхности до базовой плоскости (FPD) незначительно. Увеличение параметра величина отклонения от базовой плоскости (TIR) также можно назвать незначительным, поскольку существует возможность корректировать его на последующих этапах механической обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринченко Л. Я., Пономаренко В. П., Филачев А. М. / Прикладная физика. 2009. № 2. С. 57–64.
2. Козлов Р. Ю. и др. / Материалы XXVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – Москва, АО «НПО «Орион», 2024. С. 204–206. <https://doi.org/10.51368/978-5-94836-696-8-2024-204>.
3. Нестюркин М. С. и др. / Сборник тезисов конференции «микроэлектроника 2024». 2024. С. 921.
4. Hu L., Kao I. / Journal of Sound and Vibration. 2005. Vol. 283. P. 589–620.
5. Egemen T. / Gazi University Journal of Science GU J Sci. 2011. Vol. 24 (2). P. 291–297.
6. Kao Imin, Chung Chunhui / Wafer Manufacturing: Generalized Processes and Flow. 2021. <https://doi.org/10.1002/9781118696224.ch2>.
7. Подгорный Д. А., Нестюркин М. С. и др. / Материалы электронной техники. 2023. № 26 (2). С. 101–109. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-2-101-109>. EDN: PMDJIV.
8. Тихонов Д. А., Нестюркин М. С. и др. / Наноиндустрия. 2025. С. 594–597. ISSN: 1993-8578. eISSN: 2687-0282
9. ASTM Standard F1530 2002 Standard test method for measuring flatness, thickness, and thickness variation on silicon wafers by automated noncontact scanning (withdrawn 2003) ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.
10. ASTM Standard F1390 2002 Standard test method for measuring warp on silicon wafers by automated noncontact scanning (withdrawn 2003) ASTM International, West Conshohocken, PA. www.astm.org.

PACS: 81.10-h

Modeling the parameters of the multi-wire cutting mode, ensuring high surface quality of InSb (100) wafers

M. S. Nestyurkin^{1,2*}, D. A. Podgorny², E. V. Molodtsova¹, and N. Y. Komarovskiy^{1,2}

¹ Sazhin Giredmet JSC, Moscow, 111524 Russia

* E-mail: mnestyurkin@mail.ru

² University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049 Russia

Received 13.03.2026; revised 27.04.2026; accepted 06.08.2026

The surface preparation processes for InSb plates of the "Epi-ready" class include a number of machining processes that significantly affect the quality of the final products. One of these processes is wire cutting of single crystals. In this study, the issue of calculating the conditions of wire cutting and determining the limiting parameters for the movement of the desktop, as one of the factors affecting the BOW and WARP plates, was studied. The experimental work was carried out to determine the cross-sectional sections of the InSb single crystal required for

segmentation, and the cutting speed was calculated for each of them. The practical confirmation of theoretical calculations with an effective change in surface parameters is shown.

Keywords: $A^{III}B^V$, InSb, wire cutting, optical profilometry, wire cutting parameters, calculation of worktable speed.

REFERENCES

1. Grinchenko L. Ya., Ponomarenko V. P., and Filachev A. M., Applied Physics, № 2, 57–64 (2009) [in Russian].
2. Kozlov R. Yu. et al. Proceedings of the XXVII Scientific and Technical International Conference on Photovoltaics and Night Vision Devices. Moscow: NPO Orion Joint Stock Company, 2024, pp. 204–206. <https://doi.org/10.51368/978-5-94836-696-8-2024-204>.
3. Nestyurkin M. S. et al. Collection of abstracts of the conference "Microelectronics 2024". 2024, p. 921.
4. Hu L. and Kao I., Journal of Sound and Vibration **283**, 589–620 (2005).
5. Egemen T., Gazi University Scientific Journal GU J Sci. **24** (2), 291–297 (2011).
6. Kao Yiming and Chung Chunhui. Waffle production: general processes and technological scheme. 2021. <https://doi.org/10.1002/9781118696224.ch2>.
7. Podgorny D. A., Nestyurkin M. S. et al., Materials of electronic technology, № 26 (2), 101–109 (2023). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-2-101-109>. EDN: PMDJIV.
8. Tikhonov D. A., Nestyurkin M. S. et al., Nanotechnology, 594–597 (2025). ISSN: 1993-8578. eISSN: 2687-0282
9. ASTM F1530 2002 standard, Standard Test Method for measuring flatness, thickness and thickness variation of silicon wafers using automatic contactless scanning (withdrawn in 2003) ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania. www.astm.org.
10. ASTM F1390 2002 Standard, a standard test method for measuring Deformation of silicon wafers using Automatic Contactless Scanning (withdrawn in 2003) by ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania. www.astm.org.

Об авторах

Нестюркин Михаил Сергеевич, руководитель направления лаборатории низкотемпературных полупроводниковых соединений группы $A^{III}B^V$, АО Гиредмет» (111524, Россия, Москва, ул. Электродная, д. 2, стр. 1); аспирант кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков НИТУ «МИСИС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1). E-mail: mnestyurkin@mail.ru SPIN-код: 1217-6079, AuthorID: 1341074, ORCID: 0000-0001-6735-5058

Подгорный Дмитрий Андреевич, к.ф.-м.н., заместитель директора института новых материалов и нанотехнологий, доцент кафедры материаловедения полупроводников и диэлектриков НИТУ «МИСИС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1). E-mail: m2314956@edu.misis.ru SPIN-код: 8678-9585, РИНЦ AuthorID: 32809, ORCID: 0000-0002-8237-0608, Web of Science ResearcherID: M-9747-2018, Scopus AuthorID: 6507870934

Молодцова Елена Владимировна, к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории низкотемпературных полупроводниковых соединений группы $A^{III}B^V$, АО Гиредмет» (111524, Россия, Москва, ул. Электродная, д. 2, стр. 1).

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, NYKomarovskiy@rosatom.ru SPIN-код: 9642-8920, <https://orcid.org/0000-0002-7869-7886>, Scopus Author ID 58510893300, Web of Science Researcher ID NRX-9045-2025