

УДК 621.315.592
EDN: WYBJPZ

PACS: 81.65.Cf, 81.40.Pq.

Моделирование деформации пластины InSb диаметром 50,8 мм при обработке методом одностороннего шлифования свободным абразивом*В. А. Улькаров, А. А. Трофимов, Н. И. Яковлева, О. С. Павлова, И. В. Новиков, Н. А. Саркисов, В. О. Кузин, Кощавцев Н. Ф., Егоров А. В.*

Исследуется моделирование деформации пластин InSb диаметром 50,8 мм, возникающей при шлифовании и полировании односторонним методом. Прогнозирование прогиба пластины положительно сказывается на разработке схемы процесса и позволяет корректировать технологические условия для достижения требуемых параметров BOW и WARP пластины для соответствия требованиям молекулярно-лучевой эпитаксии. Показано, что обработка подложек InSb с учетом предложенной модели позволяет достигать требуемых геометрических параметров пластины с точностью до 1 мкм.

Ключевые слова: InSb, ИК приборы, шлифование и полирование, прогиб пластины.

DOI: 10.51368/2307-4469-2024-12-5-456-464

Введение

Контроль плоскостности полупроводниковых пластин является важным аспектом в

Улькаров Вадим Айратович¹, инженер 2 кат.
Трофимов Александр Александрович^{1,2}, зам. нач. серийного производства, к.т.н., доцент.
E-mail: aa-trofimov@yandex.ru
Яковлева Наталья Ивановна¹, гл.н.с., д.т.н.
Павлова Олеся Сергеевна³, н.с.
Новиков Иван Валерьевич¹, инженер-технолог.
Саркисов Никита Андреевич¹, инженер 2 кат.
Кузин Владислав Олегович¹, инженер.
Кощавцев Николай Федорович¹, гл. спец., д.т.н., профессор
Егоров Александр Васильевич¹, уч. секр., к.т.н.

¹ АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

² МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА).
Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

³ АО «Гиредмет» имени Н. П. Сажина.
Россия, 111524, Москва, ул. Электродная, 2/1.

Статья поступила в редакцию 30.09.2024
После доработки 16.10.2024
Принята к публикации 21.10.2024
Шифр научной специальности: 1.3.11

© Улькаров В. А., Трофимов А. А., Яковлева Н. И., Павлова О. С., Новиков И. В., Саркисов Н. А., Кузин В. О., Кощавцев Н. В., Егоров А. В., 2024

производстве приборов микроэлектроники. Отклонения от плоскостности оказывают негативное влияние на характеристики однородности эпитаксиальных слоев на пластине, синтезируемых методами газофазной и молекулярно-лучевой эпитаксии, а также снижают точность последующей литографической обработки. Это приводит к снижению выхода годных приборов, изготавливаемых на таких пластинах [1, 2].

Оценка отклонения от плоскостности также позволяет контролировать процессы механической и химико-механической обработки полупроводниковых пластин, в ходе которых неизбежно происходит деформация пластины, и корректировать технологические условия для достижения требуемых геометрических параметров пластин. На этапе химико-механического полирования одна из задач заключается в сохранении хорошей плоскостности пластины, достигнутой на предыдущих этапах обработки. Здесь мониторинг отклонения от плоскостности является важным для управления процессом полирования, поскольку часто при химико-механическом полировании края пластины обрабатываются сильнее, чем центр [1].

Параметрами, характеризующими отклонение от плоскостности пластины, являются разнотолщинность (TTV) и величина кривизны или отклонения от идеально плоской поверхности (BOW, WARP). TTV означает общую вариацию толщины и относится к вариации толщины пластины по ее поверхности. BOW или изгиб относится к форме поверхности пластины по ее диаметру. WARP описывает отклонение поверхности пластины от идеальной плоскостности в любой области. Это относится к искажению поверхности пластины из-за различных напряжений, таких как термические напряжения или механические силы. Надлежащий мониторинг и контроль этих параметров во время процесса производства пластин имеют решающее значение для создания полупроводниковых приборов с высокими эксплуатационными характеристиками и высоким выходом годных [3].

Отмечается, что прогиб пластины может стать причиной деградации однородности приборов или привести к ошибкам в фотолитографии [4]. Контроль разнотолщинности пластины с точностью до 1 мкм может осуществляться с применением относительно доступных и недорогих контрольно-измерительных приборов. Как правило, этот параметр оценивается в ходе межоперационного контроля количества удаленного материала пластины на различных этапах обработки. Для качественной и количественной оценки параметра величины кривизны пластины или отклонения от идеально плоской поверхности требуются более сложные инструменты измерений, основанные на оптической интерференции. Использование метода на основе интерференции позволяет не только повысить точность измерений, но и провести полную характеристику пластины с пространственным разрешением лучше 1 мкм, что обеспечивает существенно более полную характеристику пластины [3]. Однако, такие средства измерений являются специализированными и ограничено представлены в научно-исследовательских лабораториях и на малых производствах.

В последнее время прогибу пластин уделяется пристальное внимание. Данная характеристика пластины зависит от материала пластины, наличия или отсутствия различных

слоев на пластине (полупроводниковых, металлических, диэлектрических), а также от диаметра и толщины пластины. При проведении технологических операций обработки пластины, прогиб может также изменяться [5]. В зарубежных работах особое внимание уделяется таким характеристикам пластины как разнотолщинность, прогиб, шероховатость поверхности и механическая напряженность [6]. Представленные в зарубежной литературе данные о величине прогиба после одностороннего шлифования обратной стороны пластины наглядно свидетельствуют о деформациях пластины, возникающих после обработки [7]: так для пластин кремния диаметром 200 мм деформация составила 56 мкм при конечной толщине пластины 725 мкм и уже 1286 мкм при конечной толщине пластины 273 мкм. Таким образом, понимание прогнозируемого поведения полупроводниковой пластины в части геометрических параметров прогиба при операциях удаления материала с поверхности является важным фактором, нацеленным на повышение выхода годных полированных пластин и понимание схемы процесса подготовки поверхности пластины для молекулярно-лучевых процессов.

Материалы и методы

Антимонид индия (InSb) представляет значительный интерес для изготовления на его основе полупроводниковых приборов, широко используется в качестве элементной базы для создания фотоэлектронных устройств и приемников ИК-излучения, работающих в спектральном диапазоне 3–5 мкм, и является наиболее востребованным для производства матричных односпектральных фотоприемников, предназначенных для применения в инфракрасных головках самонаведения 3-го поколения с мгновенным способом пеленгования источников излучения двигателей летательных аппаратов с длиной волны 4–5 мкм ($T = 500\text{--}900\text{ K}$) и надежной селекцией при постановке помех пиротехническими генераторами ИК-излучения тепловых ложных целей [8–11]. Это обуславливает его стратегическую важность и придает актуальность научно-техническим разработкам, направлен-

ным на повышение качества самого материала InSb, полированных пластин из него и эксплуатационных характеристик приборов на его основе. Одним из путей улучшения характеристик ИК-приборов на основе InSb является переход от объемного материала к эпитаксиальному, для чего требуются подложки с высоким качеством подготовки поверхности, пригодном для синтеза фоточувствительных слоев методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

В ходе этапов шлифования и полирования пластины методом односторонней обработки свободным абразивом геометрические параметры прогиба и коробления пластины невозможно измерить, вследствие того, что обрабатываемая пластина приклеена к диску-носителю. Отсутствие контроля деформации пластины существенно повышает риск недостижения требуемых геометрических параметров (как правило, менее 5 мкм для пластин диаметром 50,8 мм) и способно нивелировать трудозатраты на обработку пластин монокристаллического антимонида индия. Для обеспечения высокого выхода годных продукции в рамках настоящей работы предлагается основанная на математических расчетах методика, позволяющая с точностью до 1 мкм оценить степень деформации пластины монокристаллического антимонида индия в ходе одностороннего шлифования свободным абразивом в зависимости от количества удаленного материала.

В ходе одностороннего шлифования свободным абразивом влияние на степень деформации пластины монокристаллического InSb оказывает количество удаленного материала, что выражается в изменении радиуса кривизны пластины при уменьшении ее толщины. Зависимость радиуса кривизны подложки толщиной h_s (R), на которую нанесена упруго напряжённая пленка толщиной h_f , описывается формулой Стоуни [12]:

$$\sigma_f h_f = \left(\frac{E_s}{1 - \nu_s} \right) \cdot \frac{h_s^2}{6R}, \quad (1)$$

где E_s – модуль упругости (или иначе модуль Юнга) материала пластины, ν – коэффициент

Пуассона материала пластины, σ_f – упругое напряжение плёнки. Индекс «s» обозначает подложку-пластину («substrate»), а индекс «f» – плёнку («film»).

Формула Стоуни справедлива, если пластина гораздо толще нанесённой на неё плёнки ($h_f \ll h_s$). В ходе механической обработки пластины монокристаллического антимонида индия методом одностороннего шлифования пластина приклеивается на специальный прецизионно подготовленный диск-носитель посредством клеящего адгезива, в качестве которого, как правило, выступают различные типы составов на основе воска. Приклеивание осуществляется с применением специального оборудования, и, таким образом, толщина клеящего адгезива между диском-носителем и приклеиваемой пластиной обеспечивается на уровне около 5 мкм. Значения модуля Юнга и коэффициента Пуассона для пластины InSb выбираются в соответствии с кристаллографической ориентацией пластины, поскольку вследствие анизотропии кристаллической структуры, очевидно, что деформация пластин с различной кристаллографической ориентацией будет отличаться. Для величины прогиба пластины Δz (разница между максимальной и минимальной высотой пластины) используем следующее выражение [13]:

$$\Delta z = \frac{d^2}{8 \cdot R} \quad (2)$$

где d – диаметр пластины. Используя значения [14, 15], приведённые в таблице, и формулы (1) и (2) получим график зависимости величины прогиба пластины Δz от её толщины h_s (рис. 1).

Таблица

Значения, используемые для моделирования прогиба подложки

Величина	Значение
$E_{\text{InSb [100]}}$	40,9 ГПа
$\nu_{\text{InSb [100]}}$	0,35
h_f	5 мкм
d	50 мм
σ_f (восковой адгезив)	61,4 МПа

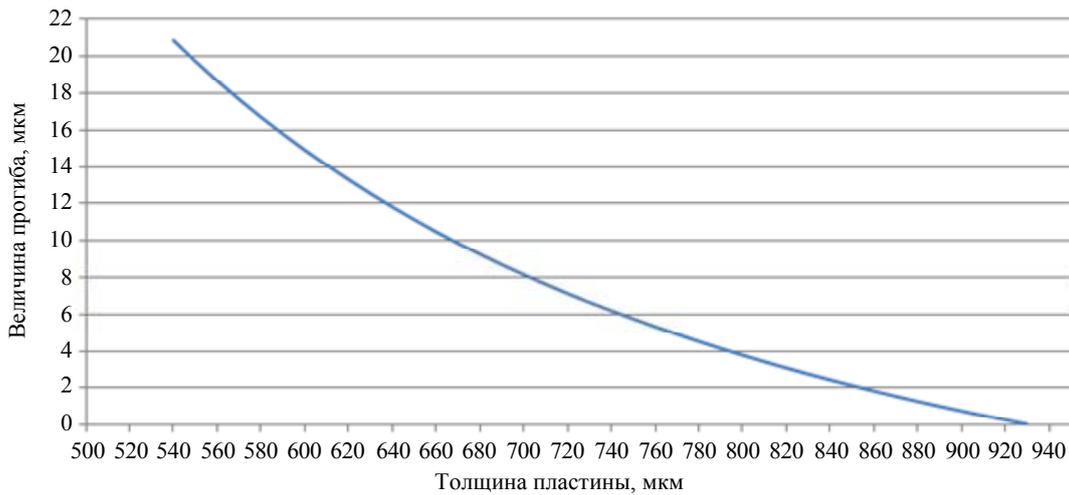


Рис. 1. Рассчитанная зависимость деформации (величины прогиба) пластины *InSb* Ø 50 мм от количества удаленного материала в ходе механической обработки

Модель расчета величины прогиба пластины *InSb* от количества удаленного материала в ходе механической обработки сравнивалась с измерениями реальной величины прогиба, проведенными на одной из пластин, обработанных в ходе маршрута изготовления ИК МФПУ на основе объемного *InSb*, схема которого представлена на рисунке 2.

Из схемы видно, что пластина *InSb* диаметром 50,8 мм в ходе обработки для изготовления ИК МФПУ обрабатывается с двух сторон неравномерно. С обратной стороны удаляется 80 мкм материала, а с лицевой стороны удаляется существенно больше, что неизбежно приведет к деформации пластины и нарушению плоскостности.

Предположим, что деформация пластины, обусловленная в ходе удаления 80 мкм материала на этапе обработки обратной стороны пластины частично компенсируется в ходе удаления аналогичного количества материала на начальном этапе обработки лицевой стороны пластины. Тогда, в случае удаления материала с лицевой стороны пластины, скомпен-

сированные 80 мкм — это толщина пластины: $850 - 80 = 770$ мкм.

То есть, принимая во внимание допущенное предположение о частичной компенсации прогиба пластины в результате удаления равного количества материала с обеих сторон пластины, получается, что на прогиб оказывает влияние нескомпенсированная часть удаленного материала с лицевой стороны пластины при снижении толщины с 770 мкм до толщины 610 мкм. Согласно графику расчетной модели степени деформации пластины, величина прогиба при уменьшении толщины пластины с 770 мкм до 610 мкм составляет 9,1 мкм как разница между расчетными значениями прогибов при 610 мкм и 770 мкм.

Экспериментальные измерения проводились на пластине монокристаллического антимониды индия Ø 50,8 мм и кристаллографической ориентации [100] после достижения толщины 610 мкм по схеме на рисунке 2 в рамках серийного производства МФПУ средневолнового ИК-диапазона в АО «НПО «Орион». Результаты измерений приведены на рисунке 3.

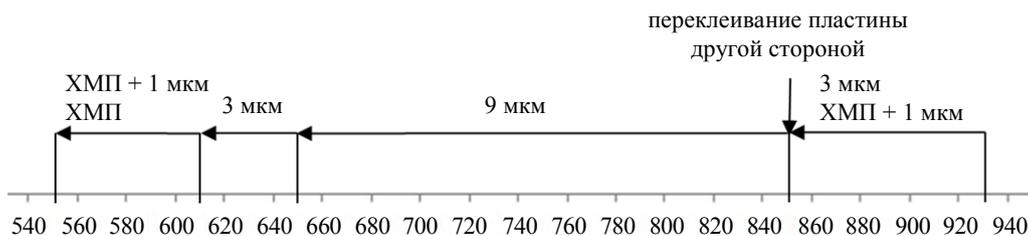


Рис. 2. Схема последовательности обработки пластин *InSb* при производстве ИК МФПУ

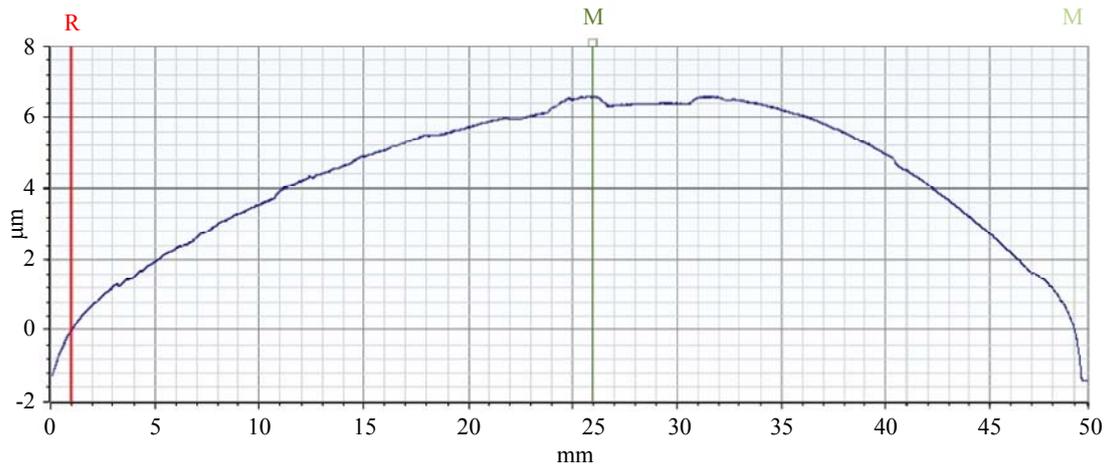


Рис. 3. Экспериментально измеренная величина прогиба пластины монокристаллического антимонида индия после механической обработки схеме на рис. 2. Величина прогиба составляет 8,05 мкм на измеренном диаметре 50 мм

Отличие расчетной величины прогиба от реальной составляет: $9,10 - 8,05 = 1,05$ мкм. Несовпадение обусловлено, во-первых, тем, что представленная расчетная модель учитывает общее снижение толщины пластины без учета удаления материала с применением суспензий с различной величиной размера зерна абразива. В ходе последовательного снижения величины зерна абразива в ходе начала обработки суспензиями с меньшим зерном абразива прежде всего удаляется нарушенный слой, возникший при обработке более крупнозернистыми суспензиями. Этот нарушенный слой, как правило, более податлив в обработке, что меняет условия процесса механического воздействия на начальном этапе. Во-вторых, присутствует некая погрешность измерения, проведенного с помощью контактного профилометра. Несмотря на это, измеренная величина прогиба совпадает с расчетной с точностью до 1 мкм, что ввиду необходимости

достижения величины прогиба на уровне < 5 мкм является вполне приемлемой точностью и позволяет прогнозировать конечную величину прогиба при разработке схемы процесса подготовки поверхности пластины InSb.

Для компенсации возникающих деформаций прогиба необходимо удалить равное количество материала с обратной и лицевой стороны – то есть по 140 мкм с каждой из сторон. Следовательно, разрабатываемая схема процесса может быть изображена следующим образом (рис. 4). В качестве компенсации в данном случае принимается однотипная обработка шлифованием однотипными суспензиями со снятием одинакового количества материала. Расчетная финальная деформация величины прогиба после завершения операций полирования в таком случае составит разницу между теоретическими величинами прогиба на толщинах 650 мкм и 610 мкм: $14,08 - 11,15 = 2,93$ мкм.

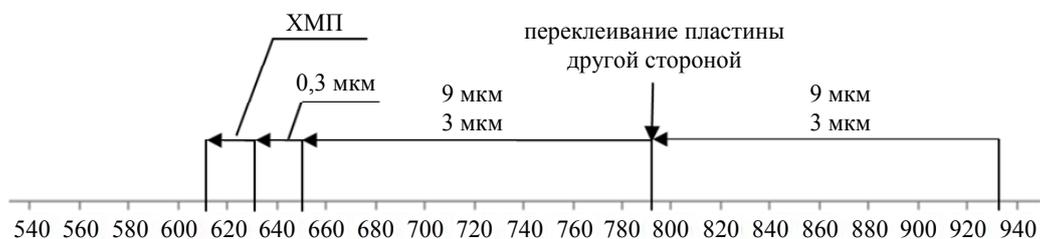


Рис. 4. Схема процесса подготовки поверхности InSb для МЛЭ

После обработки пластины до толщины 650 мкм по схеме, представленной на рисунке 4, проведены измерения методом контактной профилометрии (рис. 5). Перепад по про-

филю на длине равной диаметру пластины не превышает 0,5 мкм, что подтверждает гипотезу о компенсации деформации при удалении равного количества материала с обеих сторон

пластины в ходе последовательной обработки обратной и лицевой сторон.

После полирования пластины InSb от толщины 650 мкм до толщины ≈ 610 мкм измерения прогиба пластины и отклонения от идеальной плоскости проведены с помощью системы оптической метрологии FRT MicroProf200 в АО «Гиредмет» на отклеенной от диска-носителя и отмытой пластине (рис. 6).

Как видно на рисунке 6 толщина пластины находится на уровне 606–607 мкм, разнотолщинность (TTV) составляет 4,64 мкм, неплоскостность пластины составляет 3,31 мкм. Согласно разработанной модели расчета де-

формация пластины с учетом компенсации после обработки по схеме на рисунке 4 ожидалась на уровне 2,93 мкм. Некоторое расхождение с реальной измеренной величиной деформации 3,31 мкм вполне объясняется тем, что в расчетах учитывалась конечная толщина пластины 610 мкм, а реальная полученная толщина составила, согласно измерениям, 605–606 мкм. Разница в толщине пластины обусловлена толщиной клеящего адгезива, измерение толщины 610 мкм производилось на пластине, приклеенной на диск-носитель, измерение толщины на FRT MicroProf200 производилось на отклеенной и отмытой пластине.

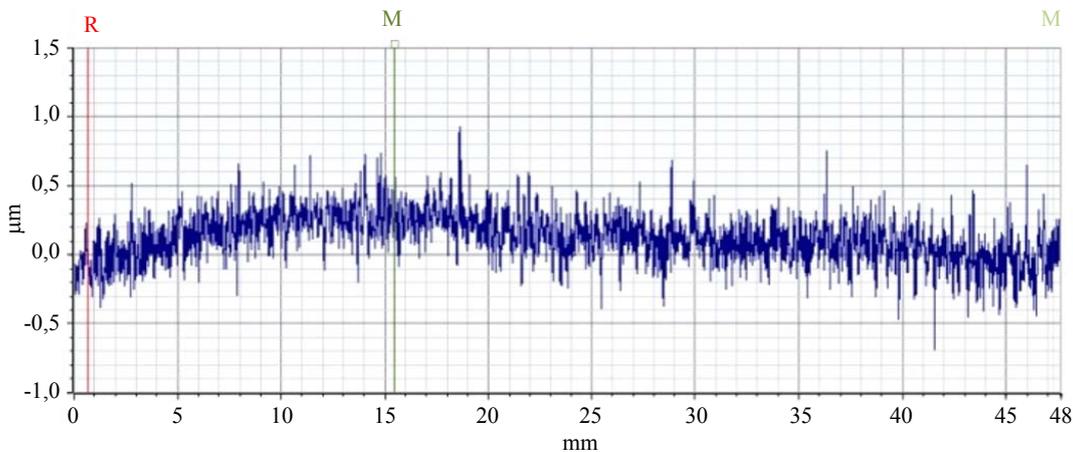


Рис. 5. Профиль пластины InSb на толщине 650 мкм после шлифования абразивной суспензией с размером частиц 3 мкм.

Task: Full sample inspection map (1/5)		Results			
Wafer ID	Die	Wafer thickness	Center thickness	TTV	TIR
1	D:0	607,800 um	606,881 um	4,646 um	4,167 um
Task: Full sample inspection map (2/5)		Results			
Wafer ID	Die	TIR95	FPD	Wafer warp	Wafer sori
1	D:0	2,737 um	-2,680 um	3,313 um	2,328 um
Task: Full sample inspection map (3/5)		Results			
Wafer ID	Die	Bow BF	Warp Front Side	LTIR	LTIR(avr)
1	D:0	0,844 um	3,271 um	3,096 um	1,860 um
Task: Full sample inspection map (4/5)		Results			
Wafer ID	Die	LTIR(min)	LTV	LTV(avr)	LTV(min)
1	D:0	0,745 um	3,569 um	1,969 um	0,868 um

Рис. 6. Измерение геометрических характеристик пластины InSb, обработанной по схеме на рис. 4

Заключение

На основе математических расчетов степени деформации пластины монокристаллического антимонида индия в ходе одностороннего шлифования и полирования свободным абразивом с учетом кристаллографической ориентации пластины предложена мо-

дель, позволяющая с точностью до 1 мкм оценить величину прогиба пластины в результате обработки, что обеспечивает контролируемую подготовку пластин и повышает выход годных.

С учетом разработанной модели и прогнозирования степени деформации пластины разработана схема процесса подготовки поверхности монокристаллического антимонида

индия методом одностороннего шлифования и полирования, включающая необходимые операции с технологическими условиями, направленные на достижение прецизионного результата, с получением геометрических параметров (TTV, BOW, WARP) полированной пластины диаметром 50,8 мм на уровне менее 5 мкм.

По разработанной с учетом представленной модели схеме процесса произведена обработка пластин InSb методом одностороннего шлифования и полирования с применением модифицированного для работы в условиях агрессивных полирующих травителей оборудования. Получены полированные подложки InSb диаметром 50,8 мм с достижением геометрических параметров (TTV, BOW, WARP) на уровне менее 5 мкм и с морфологией поверхности и субнаношероховатым рельефом на уровне Ra = 0,28 нм, пригодными для проведения процессов синтеза эпитаксиальных слоев методом молекулярно-лучевой эпитаксии, что подтверждено успешной технологической апробацией в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН [16–19].

ЛИТЕРАТУРА

1. Diebold A. C., Goodall R. K. / Proceedings of the IEEE 1999 International Interconnect Technology Conference (Cat. № 99EX247). – San Francisco, CA, USA, 1999. P. 77–79. doi: 10.1109/IITC.1999.787083.
2. Chiang T., Guo S., Cheng W., Cheng C., Kuo Y., Liu C., Sung C. / Proceedings of the 10th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'24). – Barcelona, Spain, 2024. Paper № ICMIE 114. doi: 10.11159/icmie24.114
3. Dunn T., Lee C., Tronolone M., Shorey A. / 2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference. – San Diego, CA, USA, 2012. P. 1239–1244. doi: 10.1109/ECTC.2012.6248993
4. Wang Bin, Qu Yu-xuan, Hu Shi-gang, Tang Zhi-jun, Li Jin, Hu Ying-lu. / Hindawi Publishing Corporation, Advances in Condensed Matter Physics. 2013. Article ID 465498.
5. Yiqing Y., Zhongwei H., Wenshan W., Huan Z., Jing L., Xipeng X. / The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020. Vol. 108. P. 997–1006. doi: 10.1007/s00170-019-04592-3
6. Dunn Tom, Lee Chris, Tronolone Mark, Shorey Aric. / Electronic Components and Technology Conference (ECTC). 2012. IEEE 62nd.
7. Bristow Thomas / SEMANTECH Workshop on 3D Interconnect Metrology. San Francisco, USA, 2012. P. 22.
8. Rogalski A. / Progress in Quantum Electronics. 2012. P. 342.
9. [Электронный ресурс] / URL: <http://www.scd.co.il/>; (SCD Semiconductor Devices. Israel).
10. Douglas P., McDaniel L., Lee R. Integrated Focal Plane Array Programs by DARPA (англ.). – Arlington, VA: System Planning Corporation. 1980.
11. Петров В. / Зарубежное военное обозрение: ежемесячный военно-практический журнал Министерства обороны Союза ССР. – М.: «Красная звезда», 5 января 1984. № 1. С. 36–41.
12. Janssen G. C. A. M., Abdalla M. M., van Keulen F., Pujada B. R., van Venrooy B. / Thin Solid Films. 2009. Vol. 517. № 6. P. 1858–1867.
13. Громошвик А. И. Расчет круглых пластин. Методические указания. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2011.
14. DeSain J., Brady B., Metzler K., Curtiss T., Albright T. / 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2009. – Denver, Colorado. Published Online: 14 Jun 2012. <https://doi.org/10.2514/6.2009-5115>
15. Indium antimonide: Mechanical properties, elastic constants, lattice vibrations. <https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/InSb/mechanic.html>
16. 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., Ерошенков В. В., Атрашков А. С., Ковин Я. А. / Прикладная физика. 2024. № 5. С. 47.
17. Трофимов А. А., Козлов Р. Ю., Кривобок В. С., 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., Ерошенков В. В., Атрашков А. С., Ковин Я. А. / Сборник докладов конференции «Перспективные материалы и технологии» ИПТИП РТУ МИРЭА. – М.: РТУ МИРЭА, 2024. Т. 1. С. 102–116.
18. Трофимов А. А., Козлов Р. Ю., Кривобок В. С., 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., Ерошенков В. В., Атрашков А. С., Ковин Я. А. / 15-я Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники. – М.: НИЯУ МИФИ, 2024. С. 123–126.
19. Трофимов А. А., Козлов Р. Ю., Кривобок В. С., 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., Ерошенков В. В., Атрашков А. С., Ковин Я. А. / Материалы XXVII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – М.: АО «НПО «Орион», 2024. С. 197–200.

Simulation of deformation of 2" InSb substrate during processing by single-sided lapping with a free abrasive

V. A. Ul'karov¹, A. A. Trofimov^{1,2}, N. I. Iakovleva¹, O. S. Pavlova³, I. V. Novikov¹,
N. A. Sarkisov¹, V. O. Kuzin¹, N. F. Koschavtsev¹ and A. V. Egorov¹

¹ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia
E-mail: aa-trofimov@yandex.ru

² MIREA – Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., Moscow, 119454, Russia

³ Giredmet, JSC
Bd. 1, 2 Elektrodnyaya st., Moscow, 111524, Russia

Received 30.09.2024; revised 16.10.2024; accepted 21.10.2024

The modeling of deformation of 2" InSb wafers by one-sided lapping and polishing is studied. Prediction of wafer deflection has a positive effect on the development of the process scheme and allows adjusting the process conditions to achieve the required BOW and WARP parameters of the wafer to meet the requirements of molecular beam epitaxy. It is shown that the processing of InSb substrates taking into account the proposed model allows achieving the required geometric parameters of the wafer with an accuracy of up to 1 μm.

Keywords: InSb, IR FPA, lapping&polishing, BOW, WARP.

REFERENCES

1. Diebold C. and Goodall R. K. Proceedings of the IEEE 1999 International Interconnect Technology Conference (Cat. № 99EX247). San Francisco, CA, USA, 1999, pp. 77–79, doi: 10.1109/IITC.1999.787083.
2. Chiang T., Guo S., Cheng W., Cheng C., Kuo Y., Liu C. and Sung C. Proceedings of the 10th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering (MCM'24). Barcelona, Spain, 2024. Paper № ICMIE 114. doi: 10.11159/icmie24.114
3. Dunn T., Lee C., Tronolone M. and Shorey A. 2012 IEEE 62nd Electronic Components and Technology Conference. San Diego, CA, USA, 2012, pp. 1239–1244, doi: 10.1109/ECTC.2012.6248993
4. Wang Bin, Qu Yu-xuan, Hu Shi-gang, Tang Zhi-jun, Li Jin, Hu Ying-lu, Hindawi Publishing Corporation, Advances in Condensed Matter Physics, Article ID 465498 (2013).
5. Yiqing Y., Zhongwei H., Wenshan W., Huan Z., Jing L. and Xipeng X., The International Journal of Advanced Manufacturing Technology **108**, 997–1006 (2020). doi: 10.1007/s00170-019-04592-3
6. Dunn Tom, Lee Chris, Tronolone Mark and Shorey Aric. Electronic Components and Technology Conference (ECTC), 2012. IEEE 62nd.
7. Bristow Thomas. SEMANTECH Workshop on 3D Interconnect Metrology. San Francisco, USA, 2012, p. 22.
8. Rogalski A. Progress in Quantum Electronics, 2012.
9. URL: <http://www.scd.co.il>; (SCD Semiconductor Devices. Israel).
10. Douglas P., McDaniel L. and Lee R. Integrated Focal Plane Array Programs by DARPA (англ.), Arlington, VA: System Planning Corporation, 1980.
11. Petrov V., Zarubejnoe voennoe obozrenie, № 1, 36–41 (1984) [in Russian].
12. Janssen G. C. A. M., Abdalla M. M., van Keulen F., Pujada B. R. and van Venrooy B., Thin Solid Films **517** (6), 1858–1867 (2009).
13. Gromovik A. I. Raschet kruglykh plastin, Omsk, Metodicheskie ukazaniya, 2011 [in Russian].
14. DeSain J., Brady B., Metzler K., Curtiss T. and Albright T. 45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion

Conference & Exhibit, 2009, Denver, Colorado. Published Online: 14 Jun 2012 <https://doi.org/10.2514/6.2009-5115>

15. Indium antimonide: Mechanical properties, elastic constants, lattice vibrations. <https://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/InSb/mechanic.html>

16. Trofimov A. A., Kozlov R. Yu., Krivobok V. S., Lopatin V. V., Ulkarov V. A., Molodtsova E. V., Pavlov P. V., Pavlova O. S., Kosyakova A. M., Komarovsky N. Yu., Nestyurkin M. S., Klekovkin A. V., Minaev I. I., Eroshenkov V. V., Atrashkov A. S., Kovin Ya. A., Applied Physics, № 5, 47 (2024) [in Russian].

17. Trofimov A. A., Kozlov R. Yu., Krivobok V. S., Lopatin V. V., Ulkarov V. A., Molodtsova E. V., Pavlov P. V., Pavlova O. S., Kosyakova A. M., Komarovsky N. Yu., Nestyurkin M. S., Klekovkin A. V., Minaev I. I., Eroshenkov V. V., Atrashkov A. S., Kovin Ya. A. Collection of reports of the conference "Perspektivnye Materialy i Tekhnologii" RTU MIREA, 2024. Vol. 1, pp. 102–116 [in Russian].

18. Trofimov A. A., Kozlov R. Yu., Krivobok V. S., Lopatin V. V., Ulkarov V. A., Molodtsova E. V., Pavlov P. V., Pavlova O. S., Kosyakova A. M., Komarovsky N. Yu., Nestyurkin M. S., Klekovkin A. V., Minaev I. I., Eroshenkov V. V., Atrashkov A. S. and Kovin Ya. A. 15th International Scientific and Practical Conference on Physics and Technology of Nanoheterostructure Microwave Electronics. National Research Nuclear University MEPhI, 2024, pp. 123–126 [in Russian].

19. Trofimov A. A., Kozlov R. Yu., Krivobok V. S., Lopatin V. V., Ulkarov V. A., Molodtsova E. V., Pavlov P. V., Pavlova O. S., Kosyakova A. M., Komarovsky N. Yu., Nestyurkin M. S., Klekovkin A. V., Minaev I. I., Eroshenkov V. V., Atrashkov A. S. and Kovin Ya. A. Proceedings of the XXVII International Scientific and Technical Conference on Photoelectronics and Night Vision Devices, Moscow, JSC NPO Orion, 2024, pp. 197–200 [in Russian].