

УДК 621.315.592
EDN: RXYAKE

PACS: 81.65.Cf, 81.40.Pq

Влияние условий проволоочной резки и селективного травления на структурное совершенство пластин-подложек CdZnTe 211(B)© Г. П. Малахин¹, А. С. Кондрахин^{1*}, А. А. Трофимов^{1,2}, Д. О. Царегородцев¹,
М. Б. Гришечкин³, М. Ю. Андреева³, А. Н. Кобыш², В. В. Будаев^{1,2}, Ю. С. Михайлова^{1,4}¹ АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

* E-mail: konsa01@gmail.com

² МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия³ АО «Гиредмет», Москва, 111524 Россия⁴ РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, 125047 Россия*Статья поступила в редакцию 9.06.2026; после доработки 29.06.2026; принята к публикации 06.08.2026*

Исследован процесс резки алмазированной проволокой крупноблочных слитков CdZnTe (КЦТ) на пластины. Определены оптимальные технологические режимы, позволяющие увеличить выход пластин из одного слитка до 30 % по сравнению с методом резки диском. Показано, что применение селективного травления после резки обеспечивает визуализацию дислокационной картины и служит надежным методом отбраковки подложечного материала на начальных этапах технологического маршрута.

Ключевые слова: кадмий-цинк-теллур (CdZnTe), полупроводниковый слиток, резка алмазированной проволокой, селективное травление.

DOI: 10.51368/1996-0948-2026-4-60-67

Твердый раствор кадмий-цинк-теллур (CdZnTe, КЦТ) является одним из наиболее востребованных материалов в современной микроэлектронике. Приборные пластины на его основе используются в производстве матричных фотоприемных устройств (МФПУ) ИК диапазона в качестве подложечного материала для эпитаксиальных структур кадмий-ртуть-теллур (HgCdTe, КРТ), а также в детекторах рентгеновского диапазона [1, 2]. Главным недостатком данного материала является его высокая стоимость и малые объемы производства ввиду особенностей выращиваемых слитков КЦТ – таких, как блочность, наличие дислокаций и других структурных несовершенств, а также трудоемкая технология обработки с невысоким выходом годных вследствие малой твердости и высокой хрупкости материала [3]. Увеличение выхода годных на всех этапах производства пластин-

подложек CdZnTe является актуальной задачей, направленной на повышение доступности ИК приборов на основе гетероструктур HgCdTe/CdZnTe.

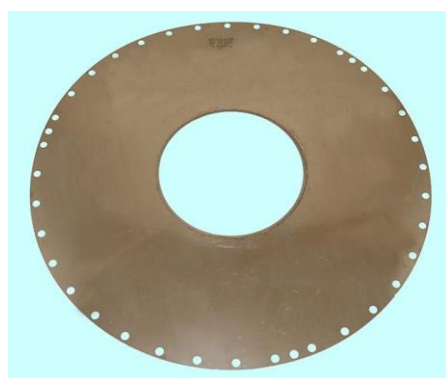
Одной из базовых технологических операций является резка крупноблочного слитка КЦТ на пластины. Наличие структурных особенностей выращиваемых слитков не позволяет производить резку параллельно их основанию как в случае с другими полупроводниковыми материалами, что накладывает ограничения на используемые технологические методы [4]. Наиболее отработанным и часто применяемым для разделения слитков КЦТ на пластины остается резка диском с алмазной внутренней режущей кромкой (АВРК). Режущий инструмент — это металлический диск с центральным отверстием, на кромку которого нанесен абразивный материал на основе алмаза (рис. 1а). Специальным образом закрепленный в барабане и, вращаясь со ско-

ростью 3000–5000 об/мин, такой диск АВРК разрезает слиток со средней скоростью 40–50 мм/мин (рис. 1б). После отрезания очередной пластины механизм возвращает слиток в исходное положение, перемещает его на определенный шаг, и цикл повторяется.

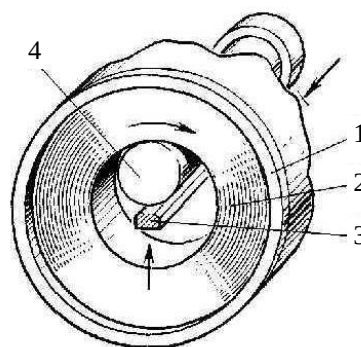
При резке диском АВРК крупноблочного слитка CdZnTe толщина отрезанной пластины-заготовки составляет около 2000 мкм, что обусловлено хрупкостью материала КЦТ. При снижении толщины отрезаемой пластины возрастает риск механического разрушения, что происходит, вероятно, вследствие микробиения диска АВРК при резке. После отрезания пластин от слитка методом дисковой резки на поверхности виден характерный рельеф с «закругленной» морфологией (рис. 2а), а глубина нарушенного приповерхностного

слоя с учетом физико-механических особенностей материала КЦТ составляет около 100 мкм с каждой стороны отрезанной пластины [5]. Исследование типичного профиля поверхности пластины КЦТ, отрезанной с помощью диска АВРК, показывает перепад высот на уровне 25–35 мкм (рис. 2б).

С учетом глубины нарушенного слоя после такой резки на дальнейших технологических операциях от пластины заготовки удаляется с обеих сторон суммарно с обеих сторон не менее 300 мкм. На последующих операциях шлифования/полирования толщина пластины уменьшается до необходимых 900 ± 100 мкм. Таким образом, потери материала только на последующих операциях после резки диском АВРК составляют более половины отрезаемой толщины пластины.



а)

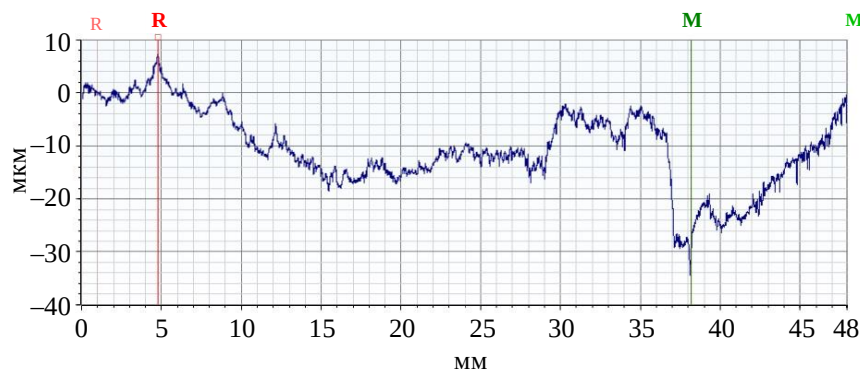


б)

Рис. 1. Диск с алмазной внутренней режущей кромкой и отверстиями по периметру для закрепления (а) и схема резки слитка (б), где 1 – цилиндрический барабан; 2 – диск АВРК; 3 – оправка – держатель; 4 – слиток



а)



б)

Рис. 2. Поверхность пластины CdZnTe после резки диском АВРК: а) – внешний вид пластины; б) – измерение профиля поверхности с помощью контактного профилометра

Следующим поколением в ряду методов резки полупроводниковых слитков на пластины-заготовки является метод проволоочной резки (алмазированной проволокой или с применением дополнительной подачи абразивного материала в зону реза). Основные преимущества такого метода (рис. 3) заключаются в применении проволоки сравнительно меньшего диаметра, чем толщина кромки диска АВРК, что позволяет снизить ширину пропила и, следовательно, потери материала при резке. Также естественное демпфирование за счет гибкости проволоки уменьшает термодинамические нагрузки, что в результате снижает толщину нарушенного слоя, позволяя отрезать пластины меньшей толщины, тем самым увеличивая количество получаемых пластин из одного слитка.

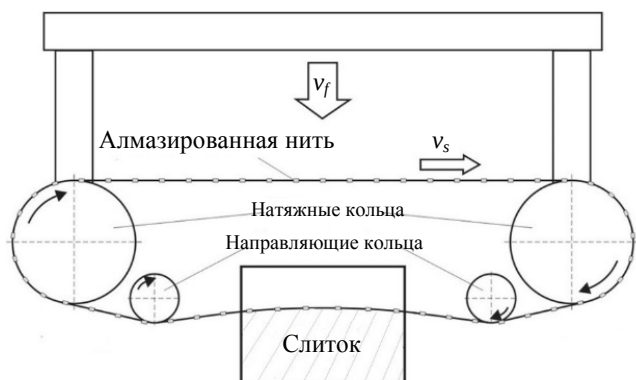
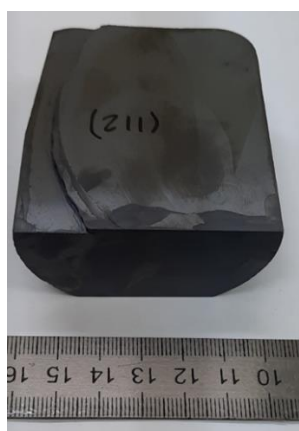


Рис. 3. Принципиальная схема установки проволоочной резки

Однако для получения вышеописанных преимуществ метода резки алмазированной проволокой необходимо определить оптимальные условия технологического процесса (к примеру: скорость подачи слитка, скорость вращения барабана с проволокой, подача охлаждающей жидкости и пр.) с учетом механических и структурных особенностей разрезаемого полупроводникового материала.

Кроме того, одним из аспектов, влияющих на производительность процесса, является закрепление слитка на координатном столике установки. Критериями выбора материала для крепления являются быстрое отвердевание и легкость отклеивания от пластины/слитка, а также удержание формы в процессе резки из-за мелких вибраций и постоянного потока воды.

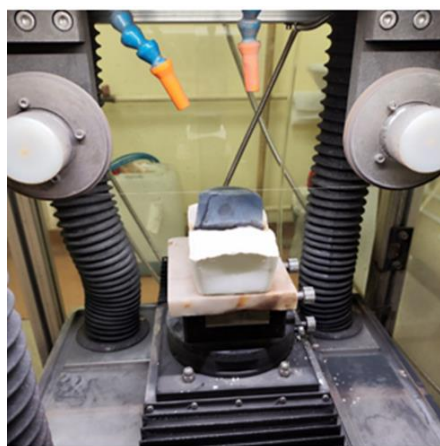
В результате исследований и анализа применения различных удерживающих материалов определены следующие – гипс для создания формы и фиксации образца на координатном столике установки резки и цианоакрилатный клей, наносимый в местах контакта полупроводникового слитка и гипса. Данная комбинация материалов выдерживает воздействие воды как в виде потока, так и при погружении. Это позволило устойчиво закреплять образец на координатном столике установки резки и контролируемо проводить процессы разделения слитка на пластины (рис. 4).



а)



б)



в)

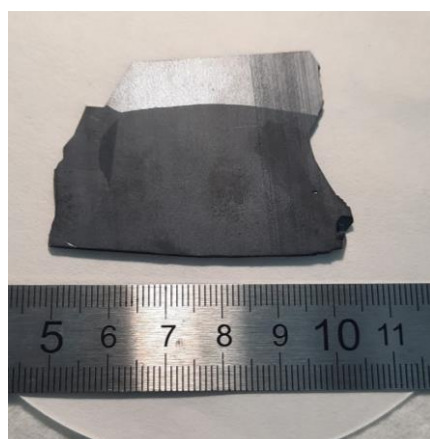
Рис. 4. Крупноблочный слиток CdZnTe: а) – ориентированный в направлении (211); б) – в специальной удерживающей форме; в) – закрепленный на координатном столике установки резки и готовый к разделению на пластины

Применение резки алмазированной проволокой крупноблочного слитка КЦТ позволило снизить толщину отрезаемых пластин вплоть до 1400 мкм без потери механической прочности (рис. 5). Пригодность таких пластин для дальнейших операций шлифования/полирования подтверждена на последующих технологических этапах обработки.

Морфология поверхности пластин КЦТ, отрезанных методом резки алмазированной проволокой, была также исследована методом

контактной профилометрии (рис. 6). Перепад высот составляет менее 20 мкм, что не превышает аналогичный параметр для пластин, отрезанных диском АВРК.

Для оценки глубины приповерхностного нарушенного слоя на пластине КЦТ после резки алмазированной проволокой с применением различных технологических приемов в ходе оптимизации режимов резки проведено исследование боковой грани скола пластины методом сканирующей электронной микроскопии (рис. 7).



а)



б)

Рис. 5. Пластина CdZnTe, отрезанная методом резки алмазированной проволокой:
а) – внешний вид пластины; б) – измерение толщины с помощью цифрового микрометра

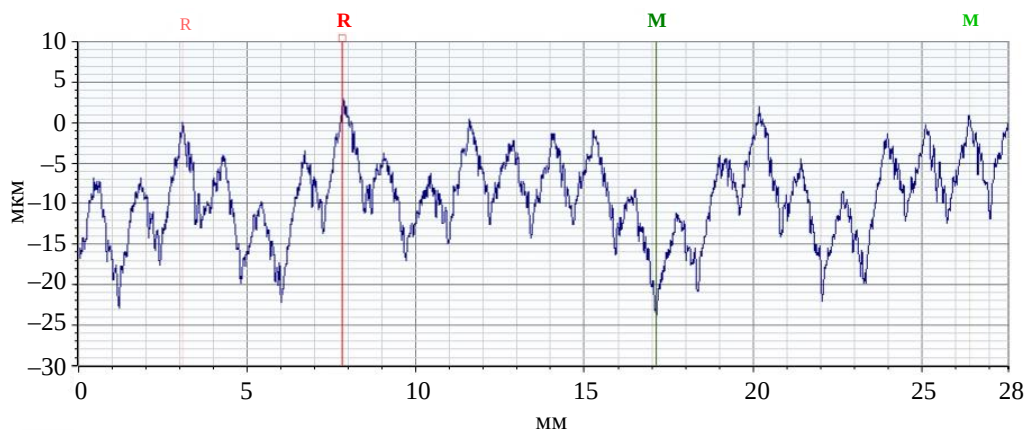


Рис. 6. Профиль поверхности пластины, отрезанной с использованием алмазированной проволоки

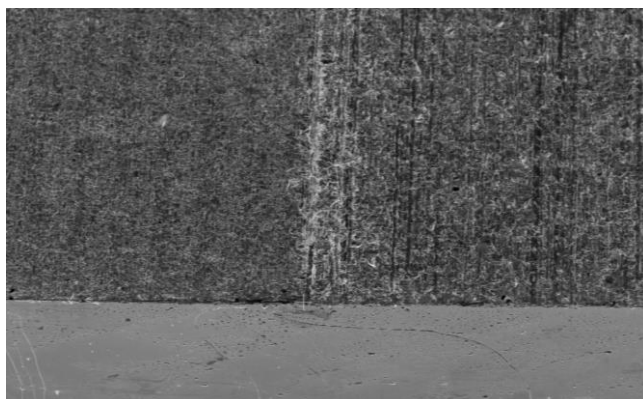
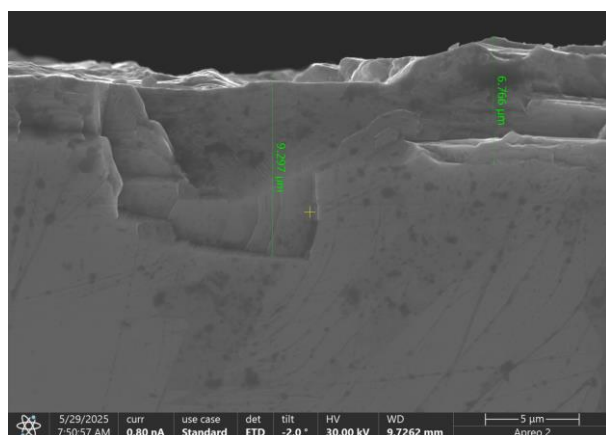


Рис. 7. Общий вид исследуемого фрагмента пластины под углом 40°

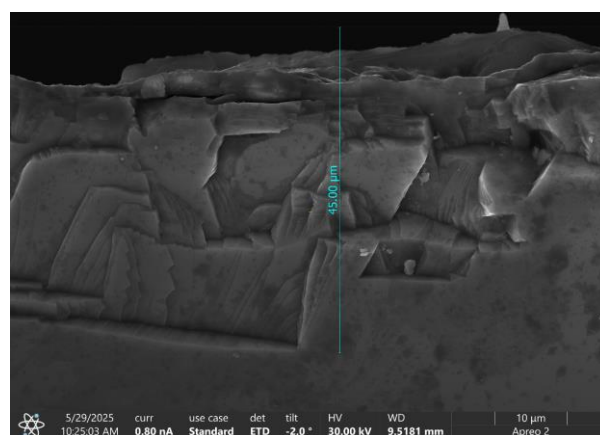
На рис. 7 отчетливо заметна граница раздела участков резки в более оптимальном (слева) и неоптимальном (справа) режиме.

При более детальном рассмотрении приповерхностного повреждённого участка глубина нарушенного слоя определена на уровне

10–15 мкм при оптимальном режиме резки (рис. 8а) и на уровне около 40–50 мкм при неоптимальном режиме (рис. 8б), что подтверждает важность правильного подбора технологических параметров при проведении данной операции.



а)



б)

Рис. 8. Исследование глубины приповерхностного нарушенного слоя пластины КЦТ после резки алмазированной проволокой: а) – участок с оптимальным режимом резки; б) – участок с неоптимальным режимом резки

Таким образом, исследование возможностей применения для разделения крупноблочного слитка КЦТ методом резки алмазированной проволокой и определение условий технологических процессов в ходе исследований позволило снизить как толщину отрезаемых пластин, так и перепад высот профиля пластины и глубину получаемого при этом нарушенного приповерхностного слоя, что в совокупности в сравнении с методом резки диском АВРК снижает общие потери материала и повышает выход годных пластин на этом этапе.

Далее отрезанные пластины проходят исследование дефектной структуры, в ходе которого определяются монокристаллическая область, блочность и/или двойникование на площади пластины, выявляется сторона А/В, а также проводится подсчет плотности дислокаций. Особенности рассматриваемого материала являются выраженная мягкость, низкое критическое напряжение сдвига и небольшая энергия дефектов упаковки, из-за чего во время кристаллизации в процессе роста слитков происходит относительно простая генерация дислокаций [6]. Дислокации в кристаллической решетке материала имеют прямое влияние на качество выращиваемых на

нем эпитаксиальных структур, и если дефекты, полученные при механической обработке на этапах резки и шлифования, могут быть минимизированы на последующих этапах полирования, то ростовые дефекты распространяются на всей глубине материала. Обнаружение несоответствия пластины структурным требованиям на данном этапе производства позволяет осуществить ее своевременную отбраковку, не допуская заведомо непригодные образцы на проведение трудоемких процессов последующей механической и химико-механической обработки, а также эпитаксиального роста, тем самым уменьшая издержки и увеличивая процент выхода годных устройств [7].

Одним из оптимальных методов выявления дислокационной картины в подложках является селективное химическое травление. Кроме дислокаций данная методика позволяет визуализировать двойники и блочную структуру, тем самым помогая выделить монокристаллическую область, а также определить полярность сторон пластины, что немаловажно для проведения будущих ростовых процессов. При разработке селективного травления необходимо учитывать анизотропию свойств кристалла, поэтому травитель подбирается с

учетом кристаллографической ориентации исследуемых пластин. Для выделения дислокационной картины и определения стороны на пластинах ориентации 211(В) использовался раствор Эверсона [8]. Перед проведением процесса селективного травления требуется удаление нарушенного слоя, образовавшегося после разделения слитка на пластины, что достигается проведением химико-механического полирования пластины с обеих сторон.

После селективного травления на пластине визуально проявляется своеобразный рисунок, по которому возможно определение полярности (стороны А/В) монокристаллической области, блоков и двойников (рис. 9). Сторона А приобретает матово-темную окраску вследствие обогащения кадмием (Cd), а сторона В имеет металлический блеск благодаря теллуру (Te).



Рис. 9. Внешний вид пластины CdZnTe 211(В) после селективного травления. Контуром выделена монокристаллическая область на стороне В участка отрезанной пластины

После селективного травления методом оптической микроскопии проводится анализ поверхности пластины в выделенной области на стороне В с целью определения плотности дислокаций. Дислокационные ямки имеют асимметричную форму с четко выраженной остроконечной вершиной (рис. 10), обусловленной отклонением плоскости рассматриваемой кристаллографической ориентации (211) от базовой (111) на $19,5^\circ$, что приводит к анизотропии проекции ямки на поверхность. Ямки, имеющие округлые или неправильные очер-

тания без выраженной вершины, имеют не связанную с дислокациями природу возникновения (например, являются преципитатами теллура или следствием механической обработки), не учитываются при подсчете и при большом влиянии на общую картину могут быть изучены отдельно.



Рис. 10. Типичный вид дислокационной картины монокристаллической области пластины CdZnTe 211(В) после селективного травления

Чтобы корректно оценить значение плотности дислокаций измерение проводится по нескольким равноудаленным полям с последующим вычислением среднего значения. Оптимальное количество полей выбирается в зависимости от размера выделенной области. Краевая зона шириной 2–3 мм исключается из рассмотрения, так как плотность дефектов в ней систематически повышена из-за контакта расплава со стенками тигля в процессе роста кристалла, а периферийные участки подложки, как правило, не используются для формирования активных элементов при изготовлении МФПУ.

Критерием классификации пригодности для эпитаксиального роста HgCdTe при создании приборов ИК-диапазона является значение не более $3 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$ [9, 10]. В ходе исследования был проведен расчет плотности дислокаций на пластинах-подложках, отрезанных рассмотренным в работе методом. Установлено, что образцы соответствуют данному критерию, в результате чего сделан вывод об их пригодности для проведения последующих технологических операций.

Заклучение

Таким образом, применение рассмотренных технологических решений оптимизирует технологический процесс производства пластин CdZnTe (211)B. Разделение крупноблочных слитков КЦТ на пластины при помощи метода резки алмазированной проволокой по сравнению с методом резки с использованием диска АВРК позволяет при сохранении целостности пластин отрезать более тонкие (1400 мкм против 2000 мкм) пластины-заготовки с меньшей глубиной нарушенного слоя, что способствует увеличению количества пластин, получаемых из одного слитка, вплоть до 30 %, а также снижает время последующей обработки.

Селективное травление для выявления пространственной неоднородности распределения дефектов с последующим расчетом плотности дислокаций дает возможность оценить пригодность пластины для дальнейших операций эпитаксиального роста, способствуя ранней отбраковке непригодных образцов, что создаёт основу для воспроизводимой входной аттестации подложек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кульчицкий Н. А., Наумов А., Старцев В. / Электроника: Наука. Технология. Бизнес. 2020. № 6. С. 114.
2. Rogalski A. Infrared Detectors. – USA: CRC Press, 2019.
3. Кульчицкий Н. А., Мельников А. А. / Нано- и микросистемная техника. 2011. № 6. С. 9–16.
4. Ergunt Y., Kabukcuoglu M. P., Balbasi O. B., Yasar B., Kalay Y. E., Parlak M., Turan R. / RAP Conference Proceeding. 2019. Vol. 4. P. 167–171. ISSN 2466-4626 (online).
5. Смирнова Н. А. Разработка технологии изготовления подложек CdZnTe для выращивания гетероструктур CdHgTe/CdZnTe методом жидкофазной эпитаксии: дисс. канд. техн. наук. – М.: ФГУП «Гиредмед», 2007.
6. Попович В. Д. и др. / Физика твердого тела. 2010. Т. 52. Вып. 12. С. 2312–2318.
7. Stolyarova S. et al. / J. Phys. D: Appl. Phys. 2008. Vol. 41. P. 065402.
8. Everson W. J., Ard C. K., Sepich J. L. / Journal of Electronic Material. 1995. Vol. 24. № 5. P. 505–510.
9. Madni I. Characterization of MBE-grown HgCdTe and related II-VI materials for next generation infrared detectors: Thesis for the degree Doctor of Science. – University of Western Australia, 2017.
10. Capper P. Mercury Cadmium Telluride. Growth, properties and applications. – UK: Wiley, 2011.

PACS: 81.65.Cf, 81.40.Pq

The influence of wire cutting and selective etching conditions on the structural perfection of CdZnTe 211(B) substrate wafers

G. P. Malakhin¹, A. S. Kondrakhin^{1*}, A. A. Trofimov^{1,2}, D. O. Tsaregorodtsev¹,
M. B. Grishechkin³, M. Yu. Andreeva³, A. N. Kobysh², V. V. Budaev^{1,2},
and Yu. S. Mihajlova^{1,4}

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

* E-mail: konsa01@gmail.com

² MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

³ Giredmet, JSC, Moscow, 111524 Russia

⁴ Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, 125047 Russia

Received 9.06.2026; revised 29.06.2026; accepted 06.08.2025

The slicing of CdZnTe ingots using diamond wire cutting was investigated. Optimal process conditions were determined, enabling an increase of up to 30 % in the number of wafers obtained from a single ingot compared to the diamond saw cutting method. It is shown that the use of selective etching after slicing allows for the visualization of the dislocation pattern and serves as a reliable method for rejecting substrate material at the early stages of the manufacturing process.

Keywords: cadmium-zinc-telluride (CdZnTe), semiconductor ingot, diamond wire cutting, selective etching.

REFERENCES

1. Kul'chickij N. A., Naumov A., and Starcev V., *Elektronika: Nauka. Tekhnologiya. Biznes*, № 6, 114 (2020) [in Russian].
2. Rogalski A. *Infrared Detectors*. USA, CRC Press, 2019.
3. Kul'chickij N. A. and Mel'nikov A. A., *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, № 6, 9–16 (2011) [in Russian].
4. Ergunt Y., Kabukcuoglu M. P., Balbasi O. B., Yasar B., Kalay Y. E., Parlak M., and Turan R., *RAP Conference Proceeding* **4**, 167–171 (2019), ISSN 2466-4626 (online).
5. Smirnova N. A. *Razrabotka tekhnologii izgotovleniya podlozhek CdZnTe dlya vyrashchivaniya geterostruktur CdHgTe/CdZnTe metodom zhidkofaznoj epitaksii: diss. kand. tekhn. nauk. M., FGUP «Giredmed», 2007* [in Russian].
6. Popovich V. D. et al., *Fizika tverdogo tela* **52** (12), 2312–2318 (2010) [in Russian].
7. Stolyarova S. et al., *J. Phys. D: Appl. Phys.* **41**, 065402 (2008).
8. Everson W. J., Ard C. K., and Sepich J. L., *Journal of Electronic Material* **24** (5), 505–510 (1995).
9. Madni I. *Characterization of MBE-grown HgCdTe and related II-VI materials for next generation infrared detectors: Thesis for the degree Doctor of Science. University of Western Australia, 2017.*
10. Capper P. *Mercury Cadmium Telluride. Growth, properties and applications*. UK, Wiley, 2011.

Об авторах

Малахин Глеб Павлович, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: malaxin2000@mail.ru

Кондрахин Александр Сергеевич, инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: konsa01@gmail.com SPIN-код: 6397-8641, AuthorID: 1302571

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

Царегородцев Денис Олегович, ведущий инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: Deniss.Tsaregorodtsev@yandex.ru

Гришечкин Михаил Борисович, научный сотрудник. РХТУ им. Д.И. Менделеева (125047, Россия, Москва, Миусская площадь, 9, с. 1). E-mail: grimb@mail.ru SPIN-код: 6453-5409, AuthorID: 647814

Андреева Мария Юрьевна, РХТУ им. Д.И. Менделеева (125047, Россия, Москва, Миусская площадь, 9, с. 1). E-mail: mayandreeva@rosatom.ru

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

Будаев В. В., стажер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9); студент, МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА) (119454, Россия, Москва, просп. Вернадского, 78). E-mail: budaev421@gmail.com

Михайлова Ю. С., стажер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9); студент, РХТУ им. Д.И. Менделеева (125047, Россия, Москва, Миусская площадь, 9, с. 1). E-mail: juliamihailova@list.ru