

Исследование структуры и свойств Structure and properties research

**Физические методы
исследования и контроля**

**Physical methods
of research and monitoring**

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-7-32-39>

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРИТЕРИЯ МОРФОЛОГИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ ЯМОК ТРАВЛЕНИЯ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ InSb, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ЧОХРАЛЬСКОГО В КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОМ НАПРАВЛЕНИИ [111] И ЛЕГИРОВАННЫХ ТЕЛЛУРОМ

© **Никита Юрьевич Комаровский^{1,2*}, Евгений Олегович Журавлев^{1,2},
Елена Владимировна Молодцова¹, Александр Викторович Кудря²,
Роман Юрьевич Козлов^{1,2}, Александр Георгиевич Белов¹,
Светлана Сергеевна Кормилицина^{1,2}**

¹ Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности «Гиредмет», Россия, 111524, Москва, ул. Электродная, д. 2, стр. 1; *e-mail: nickkomarovskiy@mail.ru

² НИТУ «МИСиС», Россия, 119049, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1.

*Статья поступила 30 ноября 2023 г. Поступила после доработки 6 февраля 2024 г.
Принята к публикации 29 апреля 2024 г.*

Для оценки структурного совершенства (плотности дислокаций) монокристаллов в производственных условиях используют метод избирательного травления в связи с его высокой информативностью и достаточно низкой трудоемкостью. Однако в зависимости от выбора типа нормативной документации трактовка получаемых данных может быть различной. В работе представлены результаты определения критерия морфологической классификации ямок травления с использованием цифровой обработки изображений. Анализировали монокристаллы InSb (111), выращенные методом Чохральского и легированные теллуром. Методом последовательного избирательного травления установлено, что островершинные ямки на поверхности InSb (111) вне зависимости от их размера с большой вероятностью имеют дислокационную природу. В свою очередь скопления ямок «правильной» формы, исчезающие в ходе повторного травления, вероятно, возникают в местах выхода на поверхность точечных дефектов и не связаны с образованием барьеров Ломер – Коттрелла или иных дислокационных скоплений. На основе анализа поля яркости предложен критерий дифференцирования ямок травления путем определения величины средней интенсивности пикселей. Полученные результаты могут быть использованы при изготовлении структур для матричных и линейных фотоприемников, а также оптимизации технологических параметров процесса роста монокристаллов по методу Чохральского.

Ключевые слова: метод Чохральского; антимонид индия; плотность дислокаций; метод избирательного травления.

DETERMINATION OF THE CRITERION FOR THE MORPHOLOGICAL CLASSIFICATION OF ETCHING PITS FORMED IN InSb SINGLE CRYSTALS GROWN BY THE CZOCHRALSKI METHOD IN THE CRYSTALLOGRAPHIC DIRECTION [111] AND DOPED WITH TELLURIUM

© **Nikita Yu. Komarovskiy^{1,2*} Evgeny O. Zhuravlev^{1,2} Elena V. Molodtsova,¹ Aleksandr V. Kudrya,² Roman Yu. Kozlov,^{1,2} Aleksandr G. Belov,¹ Svetlana S. Kormilitsina^{1,2}**

¹ Federal State Research and Development Institute of Rare Metal Industry (Giredmet JSC), 2, str. 1, ul. Elektrodnaya, Moscow, 111524, Russia; *e-mail: nickkomarovskiy@mail.ru

² National University of Science and Technology “MISIS”, 4, str. 1, Leninsky prosp., Moscow, 119049, Russia.

Received November 30, 2023. Revised February 6, 2024. Accepted April 29, 2024.

The method of selective etching is used to assess the structural imperfection (dislocation density) of single crystals in production conditions due to high informativity and rather low labor consumption. However, the interpretation of the data obtained may differ depending on the choice of the type of regulatory documentation. We present the results of determining the criterion of morphological classification of etch pits using digital image processing. InSb (111) single crystals grown by the Czochralski method and doped with tellurium were analyzed. It was found by the method of sequential selective etching that the island-shaped pits on the surface of InSb (111), are highly likely to be dislocation in nature, regardless of their size. In turn, the clusters of pits of “regular” shape, disappearing in the course of repeated etching, probably arise in the places where point defects come to the surface and are not associated with the formation of Lomer-Cottrell barriers or other dislocation clusters. A criterion for differentiation of etching pits by determining the value of the average pixel intensity is proposed on the basis of brightness field analysis. The results obtained can be used in manufacturing structures for matrix and linear photodetectors, as well as in optimizing process parameters of the single crystal growth by the Czochralski method.

Keywords: Czochralski method; indium antimonide; dislocation density; selective etching method.

Введение

Монокристаллический антимоид индия (InSb) для модернизации методики избирательного травления был выбран неслучайно. Помимо того, что InSb — один из наиболее востребованных материалов при производстве линейных и матричных фотоприемников, он также является малодислокационным и обладает сопоставимой плотностью ямок травления ($N_{\text{я}} \sim 1 \cdot 10^2 - 6 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2}$) с плотностью, наблюдаемой в монокристаллах группы $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$, выращенных методом вертикально направленной кристаллизации (ВНК) [1 – 4].

Оценку качества монокристаллов в производственных условиях проводят с применением избирательного травления (световой микроскопии), поскольку метод имеет низкую трудоемкость в сочетании с высокой информативностью. Помимо определения наличия в кристалле дефектов той или иной природы (ламелей, двойников и пр.), данный подход позволяет оценить плотность дислокаций — ключевой параметр, во многом определяющий качество готовой продукции [5, 6].

Как известно, в местах выхода дислокаций на поверхность кристалла скорость протекания химической реакции выше, чем скорость химической полировки поверхности. Это обуславливает возникновение ямок травления, имеющих характерную огранку по кристаллографическим плоскостям, обладающим наибольшей ретикулярной плотностью [7, 8]. Кроме того, образование ямки травления имеет вероятностный характер и зависит от множества факторов: подбора травителя, природы атмосфер Коттрелла, угла между линией дислокации и поверхностью и др. Так как достоверно определить величину вероятности расчетным путем не представляется возможным, при работе с экспериментальными данными необходимо принимать ряд допущений, что ведет к погрешности измерений плотности дислокаций.

Заметим, что на данный момент государственные стандарты, которые регламентировали бы трактовку результатов исследований при работе с полупроводниковыми соединениями $A^{\text{III}}B^{\text{V}}$, не приняты. Четкие критерии разделения фигур травления на дислокационные и недислокационные не сформулированы, поэтому в процессе измерений приходится полагаться, в первую очередь, на эмпирическую оценку геометрических параметров фигур травления — их размеры и глубину (островершинность).

В случае международной стандартизации наибольшее распространение получила величина плотности ямок травления без морфологической классификации (etch pit density), что при работе с кристаллически высокосоввершенными слитками (плотность дислокации $< 10^3 \text{ см}^{-2}$), выращенными методом ВНК, позволяет получать достаточно объективную информацию о структуре образца [9]. Однако для монокристаллов, выращенных по методу Чохральского, объективность такого подхода значительно ниже, что связано с высокой плотностью структурных дефектов (плотность дислокации $< 10^5 \text{ см}^{-2}$).

Цель работы — определение критерия морфологической классификации ямок травления с использованием цифровой обработки изображений.

Материалы, методика, оборудование

Исследовали монокристаллические пластины InSb, отрезанные от слитков, выращенных методом Чохральского в направлении [111] и легированных теллуром (пат. 2482228 РФ) (число свободных носителей заряда $n = (2 - 5) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, 77 К) [10]. Резку образцов осуществляли алмазным диском с внутренней режущей кромкой на станке «Алмаз-6» (скорость вращения диска — 600 об./мин, скорость подачи кристалла — 2 мм/мин, диаметр пластин $\geq 55 \text{ мм}$, толщина — 1,5 мм).

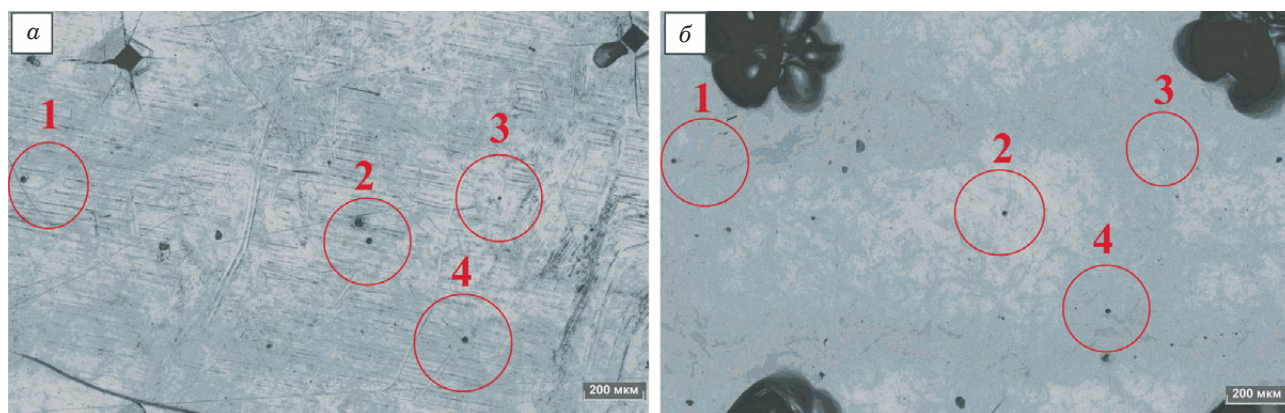


Рис. 1. Фигуры травления на поверхности InSb (111) при одной (а) и двух (б) процедурах травления (1 – 4 — островершинные ямки травления)

Fig. 1. Etching figures on the surface of InSb (111) obtained in one (a) and two (b) etching procedures (1 – 4 — deep etch pits)

Поверхность пластин для световой цифровой микроскопии готовили путем шлифования, полирования и химического травления. Контролируемые поверхности пластин шлифовали абразивным материалом (М-10 или М-7) с небольшим добавлением воды на стекле до получения матовой поверхности без трещин, сколов и визуально различимых царапин. Для удаления остаточного нарушенного слоя после механической обработки образцов использовали полирующий травитель СР-4, селективный для монокристаллов с кристаллографической ориентацией {111} [11 – 13]. Цифровую обработку изображений проводили в программном пакете ImageJ [14].

Исследуемые участки отмечали отпечатками индентора на установке Tukon 1102. Установка работала по методу Виккерса (индентор в виде алмазной пирамиды) при нагрузке 50 г ($\times 50$) [15].

Обсуждение результатов

Эксперимент с последовательным травлением дает возможность ввести физически обоснованный критерий классификации фигур травления. В случае если после двух последовательных процедур избирательного травления ямка травления сохраняется на поверхности пластины, то ее можно считать дислокационной [16].

На рис. 1 представлены микрофотографии ямок на поверхности InSb (111) после одной и двух последовательных процедур травления. Предварительно ямки травления классифицировали следующим образом:

островершинные и островершинные размером значительно меньше среднего (площадь менее 30 мкм^2);

ямки с плоским дном и менее четко выраженном контуром;

скопление ямок, обусловленное выходом на поверхность точечных дефектов.

Видно, что в ходе травления островершинные ямки сохраняются на поверхности пластины, несмотря на существенное растворение InSb (толщина пластины уменьшается на 100 – 150 мкм). При этом геометрические размеры островершинных фигур травления принципиально не меняются (исключая фигуру 3, площадь которой уменьшилась на 20 % — с 107 до 85 мкм^2). Из этого следует, что размерный критерий, обозначенный в методике измерения плотности дислокаций (ТУ 1775-330/0-0198396-11), не объективен, и его не следует рассматривать в отрыве от глубины фигуры травления.

На рис. 2 представлена реконструкция дна ямки, построенная на основе анализа поля яркости исследуемых участков изображения.

Заметим, что реконструированные профили дна ямок не отражают реальную глубину ямки и позволяют провести лишь сравнительный анализ. Определение геометрических размеров фигур травления — задача отдельного исследования, возможным подходом к решению которой может стать применение атомно-силовой микроскопии [17].

Помимо непосредственной реконструкции профиля, с помощью анализа поля яркости можно ввести воспроизводимый критерий классификации фигур травления на основе среднего значения относительной интенсивности яркости отдельных пикселей, принадлежащих дислокационной ямке. Отметим, что изображения представлены в оттенках серого (отдельные пиксели хранят дискретные значения $\in [0; 255]$, где 0 — черный, 255 — белый цвет) [18].

В таблице представлены статистические параметры выборки относительной интенсивности яркости пикселей для ямок травления различной

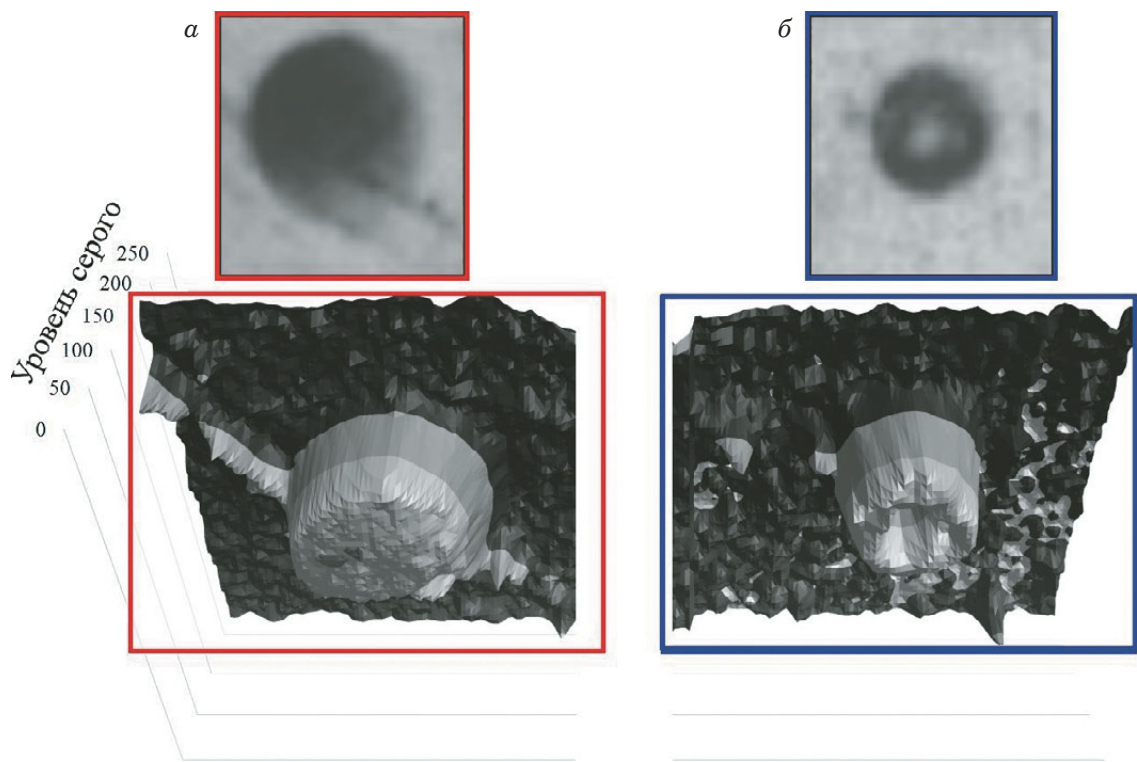


Рис. 2. Модель дна островершинной ямки (а) и ямки с плоским дном (б)
Fig. 2. Model of the bottom of a deep pit (a) and a flat-bottomed pit (b)

морфологии, включая средние значения относительной интенсивности.

Получили, что для пластины InSb (Te) ямки со средней относительной интенсивностью яркости пикселей менее 85 классифицируются как островершинные и с большой вероятностью имеют дислокационную природу.

В общем виде процесс формирования дислокационной ямки определяется результирующим вектором скоростей травления, от которого зависит движение элементарных ступеней растворения. Можно резюмировать, что в процессе роста по методу Чохральского возможно движение дислокаций как по механизму скольжения, так и по механизму переползания [19, 20]. Это не позволяет выбрать какого-либо единого положения дислокационных линий относительно поверхности монокристалла для построения модели образования ямки травления.

На рис. 3 приведена схема образования ямки травления на дислокациях, расположенных под различными углами к поверхности пластины.

Главный критерий разделения ямок на дислокационные и образованные точечными дефектами — их глубина, определяемая визуально (ГОСТ 16153–80). Наиболее вероятно, глубина ямки травления непосредственно определяется протяженностью линейного дефекта.

Данный критерий был доработан и перенесен в актуальную на сегодняшний день нормативную документацию (ТУ 1775-330/0-0198396-11). При подсчете учитываются только глубокие (дислокационные) ямки, исключая ямки с плоским дном и занимающие промежуточное положение (блюдообразные), а также ямки, размер которых существенно меньше дислокационных. К микродефектам относят те из них, размер которых значительно меньше среднего.

Обосновать этот критерий можно путем сравнения микрофотографий структуры монокри-

Статистические параметры выборок относительной интенсивности яркости пикселей для ямок травления различной морфологии
Statistical parameters of samplings of the relative pixel brightness intensity for etch pits of various morphology

Ямки травления	Среднее значение относительной интенсивности	Объем выборки, ед.	Коэффициент асимметрии	Экссесс
Островершинные	80,2 ± 4,8	22	–0,496	0,190
С плоским дном	101,8 ± 10,4	21	0,649	–0,419

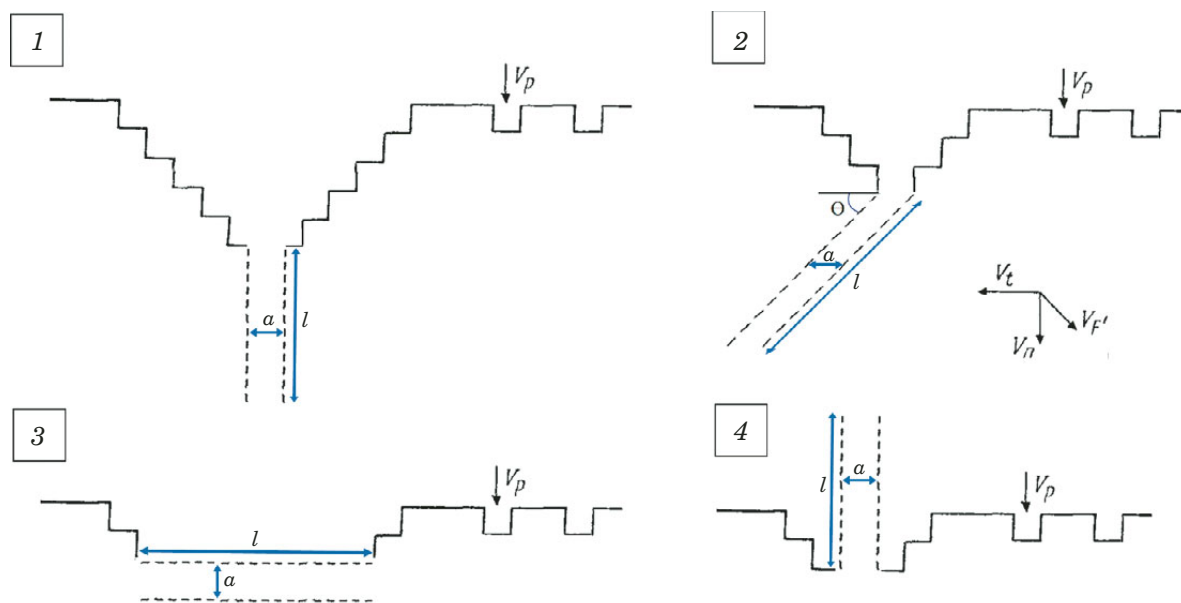


Рис. 3. Схема образования ямки травления на дислокациях, расположенных под различными углами к поверхности пластины: 1, 2 — линия дислокации перпендикулярна и лежит под углом θ к поверхности; 3 — дислокация лежит в плоскости поверхности; 4 — в плоскости шлифа лежит лишь часть дислокации (l , a — длина и ширина дислокации; V_F — результирующая скорость травления в месте выхода дислокации на поверхность; V_p — скорость травления поверхности без структурных дефектов)

Fig. 3. A scheme of the etch pit formation on dislocations located at different angles to the surface of the plate: 1, 2 — dislocation line is perpendicular and lies at an angle θ to the surface; 3 — dislocation lies in the surface plane; 4 — only part of the dislocation lies in the plane of the slot (l , a — the length and width of the dislocation; V_F — resultant etching rate at the site of the dislocation exit to the surface; V_p — the rate on etching surface without structural defects)

сталла после процедур последовательного травления. Поскольку поперечный размер точечных дефектов много меньше изменения толщины пластины в ходе химической полировки, ямки травления, возникающие в местах их выхода на поверхность пластины, должны исчезнуть с поверхности шлифа [13].

Вместе с тем наклон линии дислокации, помимо вероятности возникновения ямки, может определять и ее геометрию. Так, ямки с плоским дном, предположительно, могут образовываться в местах залегания продольных плоскости шлифа дислокаций и в местах, где линия дислокации пересекалась плоскостью реза, и, соответственно, ее длина существенно уменьшилась. В свою очередь блюдцеобразные ямки, занимающие промежуточное положение между дислокационными и пустыми (ТУ 1775-330/0-0198396-11), вероятно, могут возникать в местах выхода дислокаций под некоторым углом θ к поверхности.

Кроме того, нельзя однозначно утверждать, что все дислокации в монокристалле одного размера. Доказать или опровергнуть это утверждение затруднительно. Оценить линейные размеры дефектов можно лишь посредством микроскопии высокого разрешения, которая дает возможность исследовать локальную область, но не позволяет оценить размер хаотично расположенных дислокаций, двигавшихся по механизму переползания

в процессе роста и термической обработки монокристалла [21].

С точки зрения диффузионной теории процесс образования ямки травления обусловлен в первую очередь градиентом концентрации (Δc) реагентов химической реакции или, другими словами, градиентом химического потенциала ($\Delta \mu$). На величину $\Delta \mu$, помимо числа разветвленных связей, оказывает влияние ансамбль точечных дефектов [1], тогда размер ямки (x) лимитируется диффузией и описывается следующим выражением:

$$x = \sqrt{2D\tau},$$

где D — коэффициент диффузии; τ — время протекания химической реакции.

На основе диффузионной теории можно сделать предположение, что идентичные по геометрии и положению дислокации, но имеющие отличные друг от друга атмосферы Коттрелла, могут формировать ямки различного размера и морфологии (рис. 4).

Оценить состав ансамбля точечных дефектов вдоль линии дислокации и точечных дефектов вне ее достаточно сложно. Можно утверждать, что дислокации — сток точечных дефектов, которыми могут выступать атомы внедрения и замещения и неравновесные вакансии [19, 22]. Диффузионные процессы, активируемые, в частно-

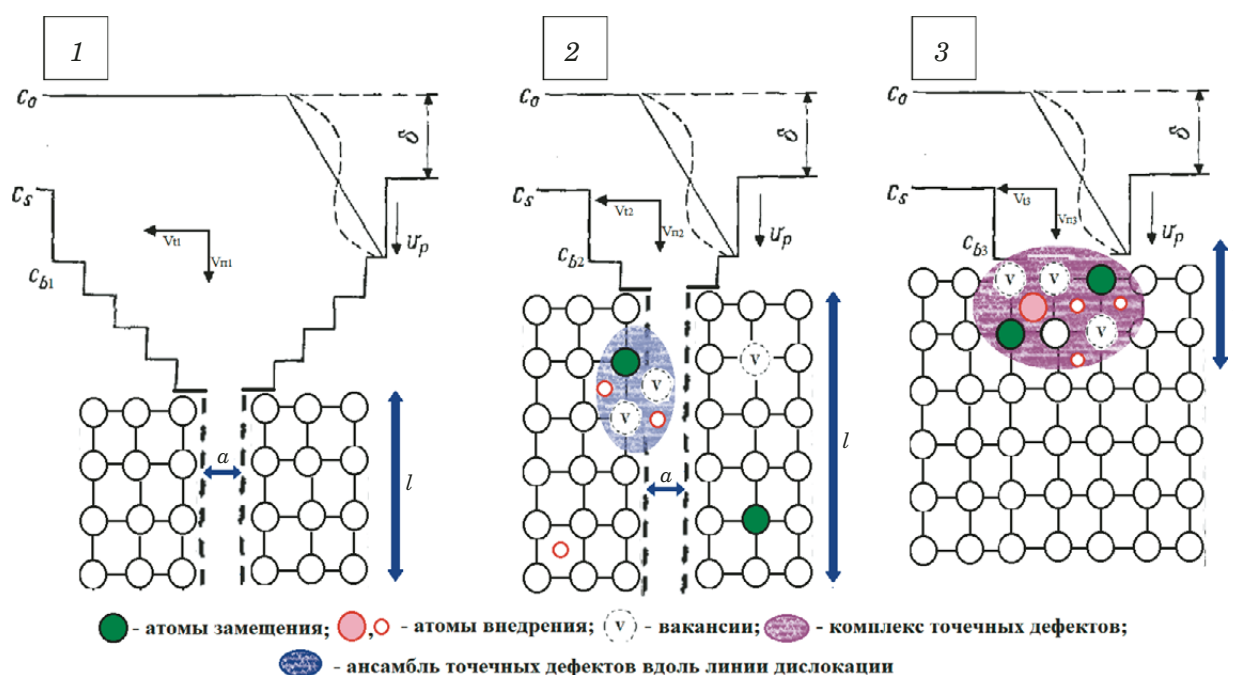


Рис. 4. Формирование ямки травления в месте выхода на поверхность пластины дислокации без атмосферы Коттрелла (1), дислокации с ансамблем точечных дефектов (2), комплекса точечных дефектов (3) (l , a — длина и ширина дислокации; C_0 , C_S , C_b — концентрации реагентов химической реакции в травителе, реагентов на поверхности монокристалла и в месте выхода дефектов; δ — диффузионный путь)

Fig. 4. Formation of the etching pit at the site of the dislocation plate exit to surface without the Cottrell atmosphere (1), dislocation with an ensemble of point defects (2), a complex of point defects (3) (l , a — the length and width of the dislocation; C_0 , C_S , C_b — concentrations of reagents of the chemical reaction in the etcher, reagents on the surface of a single crystal and in the exit sites of defects; δ — diffusion rout)

сти, постростовой термической обработкой, в свою очередь, значительно увеличивают вероятность формирования ансамбля точечных дефектов различной природы вдоль дислокационной линии. Возможна также и обратная картина — образование дислокаций в процессе роста InSb в местах активного захвата примесных атомов плоскостями с определенной кристаллографической ориентацией и, как следствие, возникновение атмосфер Коттрелла [20].

Можно предположить, что вариант дислокации без атмосферы Коттрелла (см. рис. 4) наименее вероятен. Следовательно, в случае реального монокристалла вдоль линии дислокаций формируется ансамбль точечных дефектов, влияние которого на градиент химического потенциала (и на морфологию ямки травления) оценить сложно, так как природу и количественное соотношение точечных дефектов в таком кластере определить пока не представляется возможным.

Очевидно, что не связанные с дислокациями кластеры точечных дефектов в ходе избирательного травления формируют ямки меньшего, чем дислокационные, размера. Отметим, что геометрические размеры фигур травления однозначным критерием классификации ямок по природе их формирования быть не могут, поскольку они, помимо типа дефекта, вышедшего на поверх-

ность пластины, определяются многими факторами: расположением дефекта относительно поверхности, ретикулярной плотностью и др.

Учитывая вышесказанное, классифицировать фигуры травления с плоским дном на данный момент не представляется возможным в силу того, что они, согласно теоретической модели, могут образовываться на менее протяженных дислокациях и на комплексах точечных несовершенств. Их исчезновение на поверхности пластины после повторного травления может быть связано с кинетикой химической реакции, в ходе которой толщина образца может уменьшаться на 100 – 150 мкм за каждые 5 – 8 с, а следовательно, часть структурных дефектов может уходить в раствор вместе с растворенным материалом. В свою очередь снижение времени реакции (менее 5 с) не позволяет получить на поверхности пластины отчетливые контуры ямок.

Заметим, что зарождающиеся при высоких температурах дислокации могут перемещаться по механизмам переползания и скольжения. Это не позволяет постулировать какое-либо определенное их расположение относительно поверхности пластины и, следовательно, вероятность формирования видимой в световой микроскоп фигуры травления и особенности ее геометрии. Однозначные данные по средней протяженности

дислокационных линий в монокристаллах InSb также отсутствуют, что вносит дополнительную неопределенность.

Фигуры травления, контур которых состоит из большого числа мелких ямок правильной формы (см. рис. 1), с высокой вероятностью формируются в местах выхода на поверхность точечных дефектов, что хорошо согласуется с теоретической моделью. Действительно, так как плотность линейных дефектов очень мала, вероятностью соответствия подобного скопления ямок барьеру Ломер – Коттрелла можно пренебречь. Кроме того, в случае такого скопления дислокации могут принадлежать разным плоскостям скольжения и, соответственно, формировать разные по своей морфологии ямки, которые с некой вероятностью должны сохраняться в ходе процедуры последовательного травления, чего в эксперименте замечено не было.

Заключение

Таким образом, исследования микрофотографий, полученных в результате последовательного избирательного травления, показали, что островершинные ямки, выявляемые на поверхности монокристаллического InSb (111) Те, могут быть классифицированы как дислокационные. Анализ поля яркости панорамных изображений позволяет ввести критерий классификации фигур травления путем определения средней относительной интенсивности (I_{cp}) яркости пикселей в области ямки. Для островершинных ямок, сохранившихся на поверхности экспериментальной пластины антимонида индия в ходе двух последовательных процедур травления, $I_{cp} < 85$. Выявлено также, что фигуры травления с контуром из однотипных ямок правильной формы образуются в местах выхода на поверхность точечных дефектов. Классифицировать фигуры травления с плоским дном на данный момент не представляется возможным, поскольку они могут формироваться как на менее протяженных дислокациях, так и на комплексах точечных несовершенств.

Финансирование

Работа финансировалась за счет средств бюджета института (учреждения, организации). Дополнительные гранты на проведение или руководство данным исследованием не привлекались.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комаровский Н. Ю., Молодцова Е. В., Белов А. Г. и др. Исследование монокристаллов антимонида индия, полученных модернизированным методом Чохральского в различных кристаллографических направлениях / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 8. С. 38 – 46. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-8-38-46
2. Kim H., Zimmerman A., Beyerlein J., Hunter A. Phase field modeling of dislocations and obstacles in InSb / Journal of Applied Physics. 2022. Vol. 132. N 2. DOI: 10.1063/5.0092285
3. Shen G., Zhao Y., Sun J., et al. A Comparison of Defects Between InAs Single Crystals Grown by LEC and VGF Methods / J. Electron. Mater. 2020. Vol. 49. P. 5104 – 5109. DOI: 10.1007/s11664-020-08073-2
4. Козлов Р. Ю., Кормилицина С. С., Молодцова Е. В., Журавлев Е. О. Выращивание монокристаллов антимонида индия диаметром 100 мм модифицированным методом Чохральского / Известия вузов. Материалы электронной техники. 2021. Т. 24. № 3. С. 190 – 198. DOI: 10.17073/1609-3577-2021-3-190-198
5. Yang J., Lu W., Duan M., et al. VGF growth of high quality InAs single crystals with low dislocation density / Journal of Crystal Growth. 2020. Vol. 531. P. 125350. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.125350
6. Kumar A., Kedjar B., Su Y., et al. Atomic-level calculations and experimental study of dislocations in InSb / Journal of Applied Physics. 2020. Vol. 127. N 13. P. 5104. DOI: 10.1063/1.5139285
7. Бублик В. Т., Кожитов Л. В., Кондратенко Т. Т. Рентгеноструктурный анализ непланарных автоэпитаксиальных слоев кремния / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. Т. 74. № 12. С. 9 – 10.
8. Li M., Qiu Y., Liu G., et al. Distribution of dislocations in GaSb and InSb epilayers grown on GaAs (001) vicinal substrates / Journal of Applied Physics. 2009. Vol. 105. N 9. P. 2 – 5. DOI: 10.1063/1.3115450
9. Venables J. D., Broudy R. M. Dislocations and selective etch pits in InSb / Journal of Applied Physics. 1958. Vol. 29. N 7. P. 1025 – 1028. DOI: 10.1063/1.1723356
10. Ежлов В. С., Мильвидская А. Г., Молодцова Е. В. и др. Исследование свойств крупногабаритных монокристаллов антимонида индия, выращенных методом Чохральского в кристаллографическом направлении [100] / Известия вузов. Материалы электронной техники. 2015. № 2. С. 13 – 17.
11. Комаровский Н. Ю., Молодцова Е. В., Трофимов А. А. и др. Исследование зависимости прочностных характеристик монокристаллического InSb от кристаллографической ориентации и условий роста / Прикладная физика. 2023. № 3. С. 63. DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-63-72
12. Горин С. Н. Травление полупроводников. — М.: Мир, 1965.
13. Сангвал К. Травление кристаллов: теория, эксперимент, практика / Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 483 с.
14. Хрипушин В. В., Мокшина Н. Я., Пахомова О. А. Оценка качества порошковых материалов для 3D-печати на основе полиамида-12 / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 5. С. 36 – 40. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-5-36-40
15. Матюнин В. М., Терентьев В. Ф., Марченков А. Ю., Слизов А. К. Методика определения твердости и других механических свойств тонколистовой трип-стали индентированием / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017. Т. 83. № 7. С. 49 – 53.
16. Меженный М. В., Мильвидский М. Г., Резник В. Я. Особенности генерации дислокаций от внутренних источников в термообработанных бездислокационных пластинах кремния при воздействии внешних нагрузок / Известия вузов. Материалы электронной техники. 2007. № 1. С. 11 – 15.
17. Кравчук К. С., Меженный М. В., Югова Т. Г. Определение типов дислокаций и их плотности в эпитаксиальных слоях GaN различной толщины с помощью методов оптической и атомно-силовой микроскопии / Кристаллография. 2012. Т. 57. № 2. С. 325.

18. Соколовская Э. А. О воспроизводимости результатов измерений структур и изломов с использованием компьютеризированных процедур / Вопросы материаловедения. 2013. № 4. С. 143 – 153.
19. Горелик С. С., Дашевский М. Я. Материаловедение полупроводников и диэлектриков. — М.: Металлургия, 1988. — 575 с.
20. Мильвидский М. Г., Освенский В. Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. — М.: Металлургия, 1984. — 256 с.
21. Knyazev S. N., Kudrya A. V., Komarovskiy N. Yu., et al. Methods of dislocation structure characterization in $A^{III}B^V$ semiconductor single crystals / Modern Electronic Materials. 2022. Vol. 8. N 4. P. 131 – 140. DOI: 10.3897/j.moem.8.4.99385
22. Чередов В. Н., Петраков А. П. Определение ориентации внутренних линейных дефектов в изотропных оптических кристаллах / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2019. Т. 85. № 2. С. 29 – 32. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-2-29-32
9. Venables J. D., Broudy R. M. Dislocations and selective etch pits in InSb / Journal of Applied Physics. 1958. Vol. 29. N 7. P. 1025 – 1028. DOI: 10.1063/1.1723356
10. Ezhlov V. S., Milvidskaya A. G., Molodtsova E. V., et al. Investigation of properties of large-sized single crystals of indium antimonide grown by the Czochralski method in the crystallographic direction [100] / Izv. Vuzov. Mater. Elektron. Tekhn. 2015. N 2. P. 13 – 17 [in Russian].
11. Komarovskiy N. Yu., Molodtsova E. V., Trofimov A. A., et al. Study of dependence of strength characteristics of single-crystal InSb on crystallographic orientation and growth conditions / Applied Physics. 2023. N 3. P. 63 [in Russian]. DOI: 10.51368/1996-0948-2023-3-63-72
12. Gorin S. N. Semiconductor etching. — Moscow: Mir, 1965 [in Russian].
13. Sangval K. Crystal etching: Theory, Experiment, Practice. — Moscow: Mir, 1990. — 483 p [in Russian].
14. Khrpushin V. V., Mokshina N. Ya., Pakhomova O. A. A method for assessing the quality of powder materials for 3D printing based on polyamide-12 / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2018. Vol. 84. N 5. P. 36 – 40 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-5-36-40
15. Matyunin V. M., Terentyev V. F., Marchenkov A. Yu., Slizov A. K. Determination of Hardness and Other Mechanical Properties of Thin-sheet Trip Steels by Indentation / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2017. Vol. 83. N 7. P. 49 – 53 [in Russian].
16. Mezheny M. V., Milvidsky M. G., Reznik V. Ya. Peculiarities of dislocation generation from internal sources in heat-treated dislocation-free silicon wafers under the influence of external loads / Izv. Vuzov. Mater. Elektron. Tekhn. 2007. N 1. P. 11 – 15 [in Russian].
17. Kravchuk K. S., Mezheny M. V., Yugova T. G. Determination of the types and densities of dislocations in GaN epitaxial layers of different thicknesses by optical and atomic force microscopy / Kristallografiya. 2012. Vol. 57. N 2. P. 325 [in Russian].
18. Sokolovskaya E. A. On the reproducibility of the results of measurements of structures and fractures using computerised procedures / Vopr. Materialoved. 2013. N 4. P. 143 – 153 [in Russian].
19. Gorelik S. S., Dashevskiy M. Ya. Materials science of semiconductors and dielectrics. — Moscow: Metallurgiya, 1988. — 575 p. [in Russian].
20. Milvidsky M. G., Osvensky V. B. Structural defects in semiconductor single crystals. — Moscow: Metallurgiya, 1984. — 256 p. [in Russian].
21. Knyazev S. N., Kudrya A. V., Komarovskiy N. Yu., et al. Methods of dislocation structure characterization in $A^{III}B^V$ semiconductor single crystals / Modern Electronic Materials. 2022. Vol. 8. N 4. P. 131 – 140. DOI: 10.3897/j.moem.8.4.99385
22. Cheredov V. N., Petrakov A. E. Determination of the orientation of internal linear defects in isotropic optical crystals / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2019. Vol. 85. N 2. P. 29 – 32 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-2-29-32

REFERENCES

1. Komarovskiy N. Yu., Molodtsova E. V., Belov A. G., et al. Study of indium antimonide single crystals obtained by the modernized Chochralsky method in several crystallographic directions / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2023. Vol. 89. N 8. P. 38 – 46 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-8-38-46
2. Kim H., Zimmerman A., Beyerlein J., Hunter A. Phase field modeling of dislocations and obstacles in InSb / Journal of Applied Physics. 2022. Vol. 132. N 2. DOI: 10.1063/5.0092285
3. Shen G., Zhao Y., Sun J., et al. A Comparison of Defects Between InAs Single Crystals Grown by LEC and VGF Methods / J. Electron. Mater. 2020. Vol. 49. P. 5104 – 5109. DOI: 10.1007/s11664-020-08073-2
4. Kozlov R. Yu., Kormilitsina S. S., Molodtsova E. V., Zhuravlev E. O. Growing indium antimonide single crystals with a diameter of 100 mm by the modified Chochralsky method / Izv. Vuzov. Mater. Elektron. Tekhn. 2021. Vol. 24. N 3. P. 190 – 198 [in Russian]. DOI: 10.17073/1609-3577-2021-3-190-198
5. Yang J., Lu W., Duan M., et al. VGF growth of high quality InAs single crystals with low dislocation density / Journal of Crystal Growth. 2020. Vol. 531. P. 125350. DOI: 10.1016/j.jcrysgro.2019.125350
6. Kumar A., Kedjar B., Su Y., et al. Atomic-level calculations and experimental study of dislocations in InSb / Journal of Applied Physics. 2020. Vol. 127. N 13. P. 5104. DOI: 10.1063/1.5139285
7. Bublik V. T., Kozhitov L. V., Kondratenko T. T. X-ray diffraction analysis of non-planar autoepitaxial silicon layers / Industr. Lab. Mater. Diagn. 2008. Vol. 74. N 12. P. 9 – 10 [in Russian].
8. Li M., Qiu Y., Liu G., et al. Distribution of dislocations in GaSb and InSb epilayers grown on GaAs (001) vicinal substrates / Journal of Applied Physics. 2009. Vol. 105. N 9. P. 2 – 5. DOI: 10.1063/1.3115450