

УДК 621.383.4/5

Исследование морфологии поверхности полупроводниковых подложек InSb, предназначенных для ИК-фотозлектроники

А.Е. Мирофьянченко, Е.Д. Коротаев, Н.И. Яковлева

Методами атомно-силовой микроскопии, растровой электронной микроскопии и рефлектометрии проведены исследования морфологии поверхности полупроводниковых подложек из высоколегированного антимонида индия (InSb), предназначенных для эпитаксиального выращивания InSb. Изготовлены подложки на основе InSb с атомарно-гладкой поверхностью и малым количеством дефектов, пригодные для выращивания эпитаксиальных слоев InSb.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Ключевые слова: антимонид индия, InSb, средневолновый инфракрасный диапазон, MWIR, инфракрасный, ИК, микроскопия высокого разрешения, фотоприемное устройство, ФПУ.

Введение

Для промышленного производства новых поколений фотоприемных устройств (ФПУ) средневолнового ИК-диапазона спектра наиболее перспективным материалом являются структуры антимонида индия InSb [1–3]. Исследования по эпитаксии InSb развернуты во многих исследовательских центрах и фирмах [4–8], что связано с ростом производства ФПУ на основе данного фоточувствительного материала и дальнейшими перспективами его использования [9].

Для выращивания эпитаксиальных структур InSb используются подложки из высоколегированного InSb, которые по постоянной решетки полностью согласованы с эпитаксиальными слоями, что позволяет существенно снизить темновые токи и шумы [10]. Для изготовления качественных фоточувствительных структур InSb необходимы мероприятия по совершенствованию технологии подготовки поверхности высоколегированных полупроводниковых подложек InSb [11, 12], которые включают термообработку, отжиг в вакууме, низкотемпературные жидкостные методы очистки, ионную обработку и другие технологические операции, улучшающие качество поверхности и удаляющие структурные дефекты.

Термообработка полупроводниковых пластин InSb применяется для удаления адсорбированных поверхностью примесей, разложения поверхностных загрязнений и испарения летучих соединений. Как правило, термообработка проводится в вакуумных и термических установках непосредственно перед процессами эпитаксии

для стабилизации поверхности. Оксидные пленки с поверхности InSb в вакууме удаляются при температурах ~300 °С, перед эпитаксиальным наращиванием слоев их удаляют ионной очисткой атомарным водородом [13–15] или гелием [16, 17]. Эффективность очистки увеличивается с ростом температуры, однако температура обработки образцов ограничена температурой плавления очищаемого материала, которая для антимонида индия составляет 525 °С, или диффузией легирующих примесей. В этих случаях применяют более низкотемпературные процессы очистки, которые включают жидкостные методы. Финишной операцией очистки подложек InSb является отжиг в вакууме для удаления структурных дефектов и улучшения однородности распределения примесей.

Контроль поверхности полупроводниковых пластин InSb является неотъемлемой частью технологического процесса и может проводиться на всех стадиях обработки подложек, включающих термообработку, термический отжиг, ионную очистку и др. К наиболее часто используемым методам контроля относятся методы микроскопии высокого разрешения, а именно: атомно-силовая микроскопия (АСМ), просвечивающая растровая электронная микроскопия (РЭМ), а также рефлектометрия, применение которых позволяет получать исчерпывающую информацию о морфологии поверхности полупроводниковых структур. Разрешающая способность средств контроля должна позволять контролировать нанорельеф поверхности с погрешностью ~1 нм.

Характеризация поверхности полупроводниковой структуры

Методы изучения морфологии поверхности в большинстве случаев основаны на моделировании проходящего через образец, отраженного от поверхности образца или рассеянного на неровностях поверхности образца излучения. Данные измерений связываются с физическими параметрами исследуемой поверхности. Простейшая модель поверхности, представлена на рис. 1.

Мирофьянченко Андрей Евгеньевич, инженер.

Коротаев Евгений Дмитриевич, инженер.

Яковлева Наталья Ивановна, зам. нач. НИЦ.

ОАО «НПО «Орион»».

Россия, 111396, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2

Тел.: (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 10 мая 2014 г.

© Мирофьянченко А.Е., Коротаев Е.Д., Н.И. Яковлева, 2014

Любая реальная поверхность полупроводниковой структуры даже после самой совершенной обработки не является плоской, а представляет собой двумерный рельеф. Он может быть описан непрерывной, однозначно определенной в каждой точке с координатами (x, y) функцией $z(x, y) = h(x, y) - \langle h(x, y) \rangle$, где $h(x, y)$ – отклонение высоты профиля поверхности от усредненной плоскости $\langle h(x, y) \rangle$. Усредненное произведение высот микрорельефа в двух точках, отстоящих одна от другой на расстоянии R , характеризуется функцией $C(R)$:

$$C(R) = \langle Z(R) \cdot Z(0) \rangle,$$

$$R = \sqrt{(x^2 + y^2)},$$

которая описывает пространственную корреляцию высот микрорельефа.

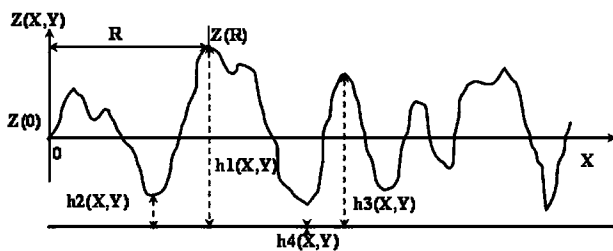


Рис. 1. Модель поверхности.

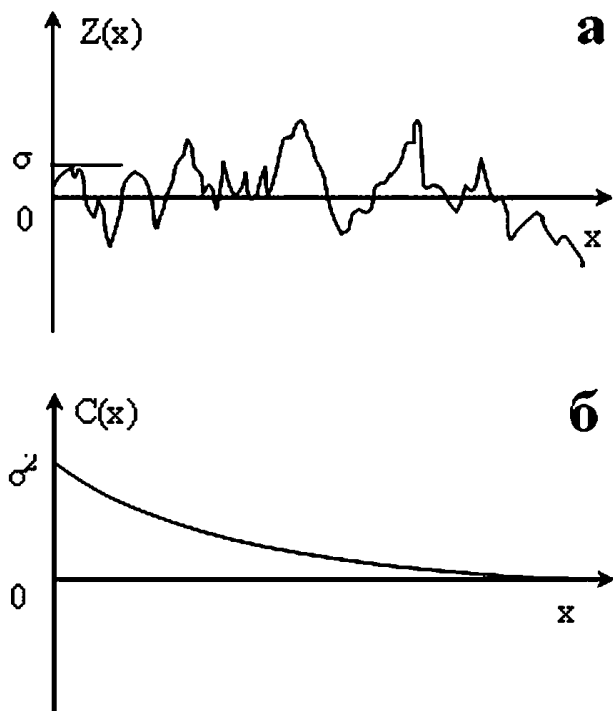


Рис. 2. Профиль (а) и функция корреляции (б) произвольной шероховатой поверхности.

Профиль и общий вид функции корреляции для произвольной шероховатой поверхности показаны на рис. 2.

Для статистически изотропных поверхностей она определяет усредненную по всем направлениям вероятность нахождения точек с одинаковым значением $z(x, y)$ на расстоянии R одна от другой. Функция корреляции представляет также степень отображения системы самой

на себя при произвольных трансляциях (смещениях). В регулярной системе при смещении на расстояния, кратные параметру решетки, она отображает систему саму на себя и имеет вид периодической незатухающей функции. В произвольной системе из-за отсутствия упорядоченности изменения координаты $z(x, y)$ вероятность совпадающих конфигураций монотонно спадает с увеличением смещения (рис. 2, б) и корреляционная функция является монотонно затухающей.

Для обычных поверхностей полупроводниковых структур традиционно предполагается, что неоднородности рельефа поверхности подчиняются распределению Гаусса. В этом случае функция корреляции $C(R)$ зависит от двух основных параметров: среднеквадратичного отклонения высоты профиля от среднего уровня, или среднеквадратичной шероховатости, $\sigma = \langle z(x, y)^2 \rangle^{1/2}$, которая связана с $C(R)$ простым соотношением $C(0) = \sigma^2$, и корреляционной длины ξ , характеризующей скорость спада $C(R)$, и равной расстоянию, на котором $C(R)$ уменьшается в e раз.

Другими важными количественными характеристиками рельефа поверхности являются среднее значение шероховатости и среднеквадратичная разность высот, которая описывается формулой

$$g(R) = \left\langle [z(r) - z(r + R)]^2 \right\rangle_r = 2\sigma^2 - 2C(R)$$

Методология проведения контроля поверхности

В настоящее время микроскопия высокого разрешения широко используется для исследования нанорельефа и морфологии поверхности полупроводниковых подложек, а также тонких слоев, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии.

В основе метода атомно-силовой микроскопии лежит принцип локального взаимодействия, возникающего между зондом и поверхностью исследуемого образца при их взаимном сближении. Для регистрации силового взаимодействия (режим АСМ) между зондом и поверхностью в атомно-силовом микроскопе используются специальные зондовые силовые датчики (кантилеверы) с острым зондом на конце. Длина зонда кантилевера АСМ составляет $\sim 1-2$ мкм, диаметр обычно не превышает 10 нм. Зонд располагается на свободном конце измерительной консоли.

Принцип действия силового датчика АСМ основан на использовании сил атомных связей, действующих между атомами вещества и измерительного зонда. При изменении силы, действующей между поверхностью полупроводниковой пластины и острием зонда, кантилевер отклоняется от положения равновесия, при этом отклонение регистрируется датчиком положения. Чувствительность зонда настолько высока, что позволяет регистрировать силы взаимодействия между отдельными атомами. Преимущество атомно-силового микроскопа по сравнению с оптическим профилометром заключается в наличии системы обратной связи, позволяющей управлять силой взаимодействия между зондом и образцом.

В общем виде зависимость силы межатомного взаимодействия F от расстояния между атомами R описывается уравнением

$$F(R) = -\frac{a}{R^m} + \frac{b}{R^n},$$

где a и b – константы; m и n – показатели степени, которые зависят от сорта атомов и типа химических связей. Для сил Ван-дер-Ваальса, которые используются наиболее часто из некулоновских сил, показатели степени составляют $m = 7, n = 13$. Известно, что реальное взаимодействие зонда с образцом имеет более сложный характер, хотя основное поведение зонда хорошо описывается приведенной зависимостью. Предполагается, что зонд АСМ испытывает притяжение со стороны образца на больших расстояниях и отталкивание на малых.

Наиболее интересным является полуконтактный режим работы АСМ, при котором удается сочетать преимущества контактного и бесконтактного методов исследования поверхности [18–20]. Для работы в полуконтактном режиме используется чувствительная схема регистрации, которая не детектирует изгиб измерительной консоли напрямую, а вызывает вибрацию кантилевера на его окolorезонансной частоте. Изменение расстояния между зондом и образцом приводит к сдвигу резонансной частоты и изменению амплитуды его колебаний. Данный эффект используется для измерения градиента силы, возникающей между зондом и образцом.

В основе методологии работы растрового электронного микроскопа (РЭМ) лежит сканирование поверхности образца сфокусированным электронным пучком и распознавание, возникающих при этом ответных сигналов различной природы. При попадании электронов зонда на поверхность образца (мишени) происходит множество сложных явлений, связанных с передачей энергии электронов пучка исследуемому образцу [21, 22]. В первом приближении, эти явления делятся на две большие группы: упругое рассеяние, связанное с изменением траекторий электронов при малой потере энергии и неупругое рассеяние, обусловленное неупругим взаимодействием с ядрами атомов и связанными электронами.

Упругое рассеяние электронов, как правило, возникает в результате кулоновского взаимодействия электронов с полем ядра – это так называемое Резерфордское рассеяние, и происходит, как правило, на углы порядка десятков

градусов. Неупругое рассеяние электронов в материале образца происходит в результате множества механизмов, например, таких как возбуждение электронного газа решетки (плазмоны), возбуждение электронов проводимости (вторичные электроны, наведенный ток), ионизация внутренних электронных оболочек атома (Оже-электроны и характеристическое рентгеновское излучение), возбуждение тормозного рентгеновского излучения, возбуждение фотонов (катодолуминесценция) и др.

Отраженные или обратнорассеянные электроны образуются в результате однократного упругого рассеивания или в результате многократного рассеивания на малые углы. Получение изображения в обратных электронах представляет собой интерес тем, что эмиссия этих электронов зависит от атомного номера элементов, входящих в состав образца. Участок поверхности образца с более высоким средним атомным номером отражает большее число электронов и его изображение выглядит светлее относительно других участков образца. Применение данного типа взаимодействия включает определение количественного состава приповерхностных слоев и выявление микронеоднородностей в образце по составу.

Топография исследуемого образца формируется, как правило, с помощью вторичных и обратнорассеянных электронов [23]. При этом каждая точка исследуемой поверхности полупроводниковой пластины (подложки), находящейся в вакууме, последовательно облучается электронным пучком, который перемещается построчно с заданным шагом перемещения по осям x и y . Совокупность параллельных строк (растр) дает представление о морфологии поверхности образца.

Исследования морфологии поверхности подложек InSb

В настоящий момент ведущими производителями оптических материалов выпускаются подложки из антимонида индия диаметром до 5 дюймов и низкой плотностью дислокаций. Основными производителями таких подложек являются фирмы Wafer Technology Ltd (Великобритания) [24], Galaxy Compound Semiconductors Inc. (США) [25] и Firebird Technologies Inc (Канада) [26]. В России монокристаллы антимонида индия и подложки из них высокого структурного совершенства производятся в ОАО «Гиредмет» [27]. Параметры подложек ведущих мировых производителей представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры подложек на основе сильнолегированного InSb ведущих мировых производителей

Фирма	Ориентация	Концентрация основных носителей, см ⁻³	Диаметр, дюймов	Плотность дислокаций, см ⁻²
Wafer Technology	(111)	$1 \cdot 10^{17} - 7 \cdot 10^{17}$	2 и 3	<100
Galaxy	(100) и (111)	$1 \cdot 10^{14} - 4 \cdot 10^{18}$	3 и 5	<20
Firebird	(100) и (111)	$1 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{18}$	до 5	<50
Гиредмет	(100) и (111)	$7 \cdot 10^{14} - 1 \cdot 10^{18}$	2	<200

Таблица 2

Наименование параметра	Значение
Диаметр, мм	50,9
Толщина пластины	498±7
Ориентация поверхности, град	(100) ± 0,20
Тип проводимости	Электронный (n)
Концентрация основных носителей заряда (77К), см ⁻³	(1,0–2,1)×10 ¹⁸
Подвижность основных носителей заряда (77К), см ² /В·с	(1,5–2,3)×10 ⁴
Плоскостность рабочей поверхности, мкм	≤ 1,7
Шероховатость рабочей поверхности, Ra, мкм	< 0,01
Основной базовый срез, град	(110) ± 0,29

При выращивании тонких слоев InSb в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии подложки должны обладать

атомарно-гладкими поверхностями. Несмотря на кажущуюся простоту эпитаксиальных слоев InSb/InSb, выращивание на сильнолегированной подложке до сих пор является проблемой. Одним из ключевых факторов является технология подготовки поверхности подложки InSb под эпитаксию. Наиболее известными способами обработки являются химико-механическая полировка [28], очистка в потоке атомарного водорода или гелия. Параметры подложек из высоколегированных пластин InSb, изготовленных ОАО «Гиредмет», представлены в табл. 2.

При исследовании морфологии поверхности площадь подложки (образца) разбивалась на 70 квадратов по 20×20 мкм², в которых проводилось сканирование поверхности методом АСМ. На рис. 3 представлены значения среднеарифметической и среднеквадратичной шероховатости по рабочей поверхности образца оптически прозрачной подложки из InSb.

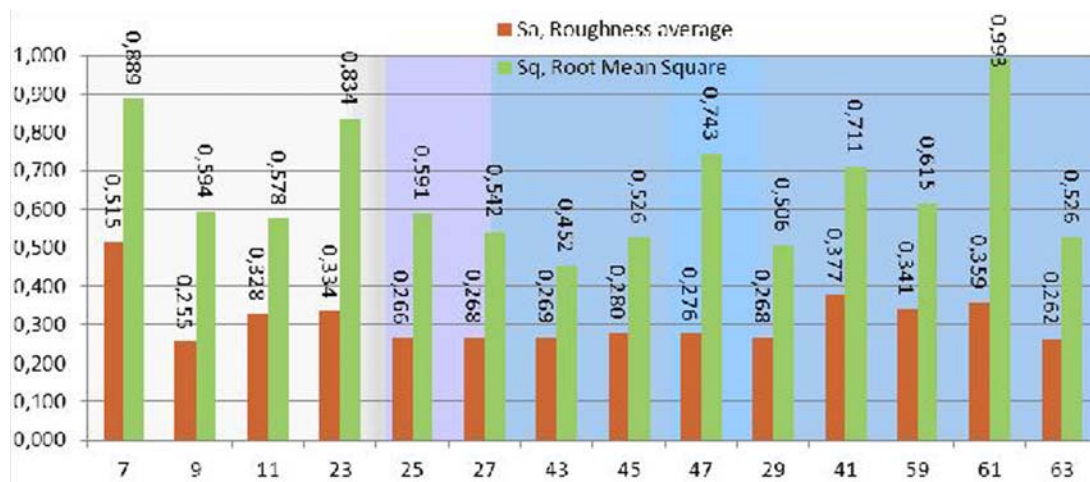


Рис. 3. Гистограмма распределения средних и среднеквадратичных значений шероховатости по поверхности образца оптически прозрачной подложки из InSb.

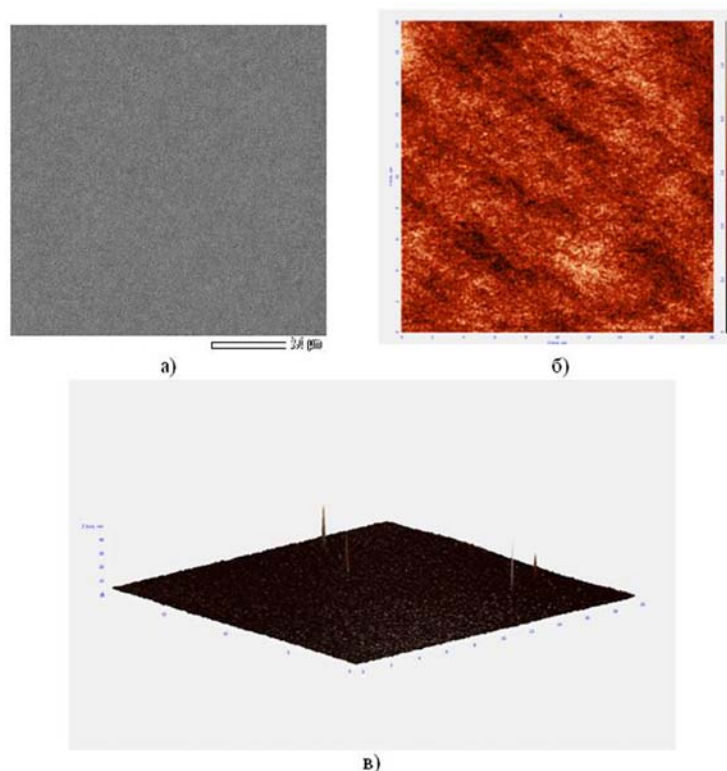
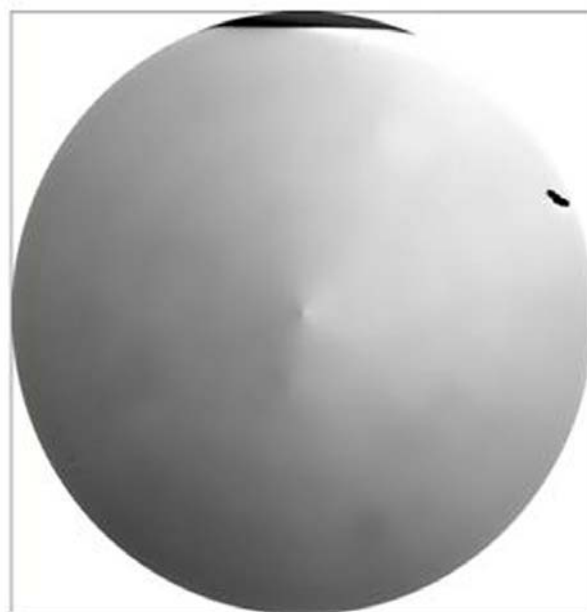


Рис. 4. Фрагменты поверхности подложки из InSb: а) — во вторичных электронах на РЭМ (область сканирования 8x8 мкм); б) — в полуконтактном режиме на АСМ; в) — трехмерное изображение поверхности центра подложки (область сканирования 20x20 мкм).

			119	171			
	32	29	26	27	34	35	
	18	21	23	13	30	23	
46	19	17	18	9	34	24	12
76	7	18	12	17	18	9	23
38	5	12	20	39	10	5	27
	28	16	8	11	13	20	
	36	14	10	16	16	24	
			18	15			

а)



б)

Рис. 5. Результаты исследований распределения дефектов и топография подложки из InSb: а) – карта распределения дефектов; б) – топография поверхности.

Гистограмма показывает, что наношероховатость исследуемого образца была сравнима с лучшими значениями мировых производителей, в центральной области пластины (квадраты 25, 27, 43, 45), величина ее составила 0,2 – 0,6 нм.

На рис. 4 представлены результаты более детальных исследований поверхности полированной подложки из InSb. Измерения проводились методом РЭМ во вторичных электронах (область сканирования 8×8 мкм², рис. 4, а) и АСМ в полуконтактном режиме (область сканирования 20×20 мкм, рис. 4, б, в). Среднеквадратичное значение шероховатости поверхности подложки InSb изменялось в интервале 0,1–2 нм. Это показывает, что исследуемая подложка обладала наноперфорацией.

На рис. 5 представлены результаты исследований распределения дефектов (а) и топографии подложки из InSb (б).

При подсчете дефектов в см² исследуемой подложки без учета небольшой дефектной области в верхней части образца количество дефектов составило ~22 шт./см². Данный показатель свидетельствует, что на исследованных подложках с наноперфорацией можно выращивать эпитаксиальные слои InSb высокого структурного совершенства.

Заключение

Изготовлены и исследованы оптически прозрачные подложки на основе высоколегированного InSb с атомарно-гладкой поверхностью и малым количеством дефектов. В технологии обработки поверхности высоколегированных подложек InSb применялись методы жидкостного травления, которые достигли своего пикового развития, методы сухого травления, которые включали ионно-плазменные и термические методы обработки.

Контроль поверхности полупроводниковых пластин InSb являлся неотъемлемой частью технологического процесса и включал исследования морфологии

поверхности полупроводниковых подложек из высоколегированного антимонида индия (InSb) методами атомно-силовой микроскопии, растровой электронной микроскопии и рефлектометрии. Исследуемые подложки высоколегированного InSb показали высокое качество поверхности со среднеквадратичными значениями шероховатости 0,1-2 нм, что подтверждает их годность для проведения процессов выращивания эпитаксиальных структур InSb.

Литература

1. Болтарь К.О., Власов П.В., Лопухин А.А. и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 6. С. 733.
2. Бурлаков И.Д., Пономаренко В.П., А.М. Филачев А.М. и др. // Прикладная физика. 2007. № 2. С. 43.
3. Дирочка А.И., Корнеева М.Д., Филачев А.М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С.37.
4. Pham H.T., Yoon S.F., Bonning D., et al. // JVST B. 2007. V. 1. P. 11.
5. Ivanov S.V., Boudza A.A., Kutt R.N., et al. // Journal of Crystal Growth. 1995. V. 156. P. 191.
6. Tran T.L., Hatami F., Masselink W.T., et al. // JEM. 2008. V. 37. No. 2. P. 1799.
7. Razeghi M. // Eur. Phys. J. AP. 2003. V. 23. P. 149.
8. Li Z., Liu G., You M., et al. // Jap. J. Appl. Phys. 2008. V. 47. P. 558.
9. Klipstein P., Jacobsohn E., Klin O., et al. // Proc. SPIE. 2003. V. 4820. P. 653.
10. Neshor O. and Klipstein P.C. // Opto-Electronics Review. 2006. V. 14. No. 1. 59.
11. Ashley T., Dean A.B., Elliott C.T., et al. // Electronics Letters. 1988. V. 24. Issue 20. P. 1270.
12. Ashley T., Baker I.M., Burke T.M., et al. // Proc. SPIE. 2000. V. 4280. P. 398.
13. Vangala S.R., Dauplaise H., Santeufemio C., et al. // CS MANTECH Conference. 2007.P. 113.
14. Tessler R., Saguy C., Klin O., et al. // Appl. Phys. Lett. 2006. V. 88. P. 031918.
15. Haworth L., Lu J., Wesrwood D.I., et al. // Applied Surface Science. 2000. V. 166. P. 253.

16. Jaime-Vanaquez M., Stolz A.J., Jacobs R.N., et al. // CS MANTECH Conference. 2008.
17. Martinka M., Jaime-Vanaquez M., Stolz A.J., et al. // JEM. 2007. V. 37. P. 152.
18. Spatz J. P., Sheiko S., Moller M., et al. // Nanotechnology. 1995. No. 6. P.40.
19. Luthi R., Meyer E., Howald L., et al. // J. Vac. Sci. Technol. 1994. V. 3. No. B12. P. 1673.
20. Hartmann U. Theory of Noncontact Force Microscopy/Scanning Tunneling Microscopy III; Theory of STM and Related Scanning Techniques / Eds. R. Wiensdangner and J.-H. Guntherodt. Berlin: Springer (1985).
21. Watt I.M. The Principles and Practice of Electron Microscopy – Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
22. Hall C.E. Introduction to Electron Microscopy, New York: McGraw-Hill, (1966).
23. Бронштейн И.М., Фрайман Б.С. Вторичная электронная эмиссия – Москва: Наука, 1969.
24. Сайт Фирмы Wafer Technology – www.wafertech.co.uk
25. Сайт Фирмы Galaxy Compound Semiconductors – www.galaxy.com
26. Сайт Фирмы Firebird – www.firebird.bc.ca
27. Сайт ООО «Гирмет» – www.girmet.com
28. Vangala S.R., Qian X., Grazesik M., et al. // JVST B. 2006. V. 24. No. 3. P. 1634.

Работа выполнена по гранту Президента Российской Федерации НШ-2787.2014.9

Investigation of the surface morphology InSb substrates by high resolution microscopy methods

A. E. Mirofianchenko, E. D. Korotaev, and N. I. Iakovleva

Orion R&P Association
46/2 Entuziastov highway, 111123, Moscow, Russia,
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received May 10, 2014

The surface morphology of high-alloy InSb substrates have been investigated by high resolution microscopy methods including atomic force, scanning electron microscopy, raster electronic microscopy and reflectometry. The high-alloy InSb substrates with atomic smooth surfaces were intended for growth of InSb epitaxy layers.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

Keywords: substrate, InSb, MWIR, IR, high resolution microscopy, FPA.

References

1. K. O. Boltar, P. V. Vlasov, A. A. Lopukhin, et al., Uspekhi Prikladnoi Fiziki **1**, 733 (2013).
2. I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev, et al., Prikladnaya Fizika, No. 2, 43 (2007).
3. A. I. Dirochka, M. D. Korneeva, and A. M. Filachev, Prikladnaya Fizika, No. 2, 37 (2011).
4. H. T. Pham, S. F. Yoon, D. Bonning, and S. Wicaksono, JVST B. **1**, 11 (2007).
5. S. V. Ivanov, A. A. Boudza, R. N. Kutt, et al., Journal of Crystal Growth **156**, 191 (1995).
6. T. L. Tran, F. Hatami, W. T. Masselink, et al., JEM. **37**, 1799 (2008).
7. M. Razeghi, Eur. Phys. J. AP. **23**, 149 (2003).
8. Z. Li, G. Liu, M. You, et al., Jap. J. Appl. Phys. **47**, 558 (2008).
9. P. Klipstein, E. Jacobsohn, O. Klin, et al., Proc. SPIE **4820**, 653 (2003).
10. O. Neshet, and P. C. Klipstein, Opto-Electronics Review. **14**, 59 (2006).
11. T. Ashley, A. B. Dean, C. T. Elliott, et al., Electronics Letters **24**, 1270 (1988).
12. T. Ashley, I. M. Baker, T. M. Burke, et al., Proc. SPIE **4280**, 398 (2000).
13. S. R. Vangala, H. Dauplaise, C. Santeufemio, et al., in Proc. CS MANTECH Conference (2007), pp. 113-116.
14. R. Tessler, C. Saguy, O. Klin, S. et al., Appl. Phys. Let. **88**, 031918 (2006).
15. L. Haworth, J. Lu, D. I. Wesrwood, et al., Applied Surface Science. **166**, 253 (2000).
16. M. Jaime-Vanaquez, A. J. Stolz, R. N. Jacobs, et al., in Proc. CS MANTECH Conference (2008).
17. M. Martinka, M. Jaime-Vanaquez, A. J. Stolz, et al., JEM. **37**, 152 (2007).
18. J. P. Spatz, S. Sheiko, M. Moller, et al., Nanotechnology, No. 6, 40 (1995).
19. R. Luthi, E. Meyer, L. Howald, et al., J. Vac. Sci. Technol. No. 3, 1673 (1994).
20. U. Hartmann, Theory of Noncontact Force Microscopy/Scanning Tunneling Microscopy III; Theory of STM and Related Scanning Techniques. Eds. R. Wiensdangner and J.-H. Guntherodt. (Berlin: Springer 1985).
21. I. M. Watt, The Principles and Practice of Electron Microscopy (Cambridge University Press, Cambridge, 1985).
22. C. E. Hall, Introduction to Electron Microscopy (New York: McGraw-Hill, 1966).
23. I. M. Bronshtein and B. S. Fraiman, Secondary Electron Emission (nauka, Moscow, 1969) [in Russian].
24. Wafer Technology – www.wafertech.co.uk
25. Galaxy Compound Semiconductors – www.galaxy.com
26. Firebird – www.firebird.bc.ca
27. Giredmet – www.girmet.com
28. S. R. Vangala, X. Qian, M. Grazesik, et al., JVST B. **24**, 1634 (2006).