

УДК 531.717.81::535.312

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-22-28

EDN: MСJPHH

PACS: 68.47.Fg, 78.20.Ci, 68.37.Ps

**Анализ отражающих свойств поверхности эпитаксиальных плёнок на основе GaAs***Е. А. Бекалдиев, С. С. Пушкарёв, Е. А. Климов, М. О. Можяева*

Экспериментально найдена корреляция между коэффициентом зеркального отражения света от поверхности эпитаксиальных плёнок InGaAs с малым средним содержанием In и среднеквадратичной шероховатостью их поверхности. Коэффициент зеркального отражения был определён с помощью глоссметра, морфология поверхности была измерена методом атомно-силовой микроскопии. Плёнки были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с различными ориентациями поверхности: (100), (110), (111)A.

Ключевые слова: атомно-силовая микроскопия, молекулярно-лучевая эпитаксия, GaAs, среднеквадратичная шероховатость, коэффициент отражения.

Введение

Под блеском поверхности понимается оптическая характеристика, показывающая соотношение между интенсивностями света, зеркально отраженного от поверхности, и света, рассеянного во все стороны – диффузного отражения, а также поглощённого поверхностью. Блеск измеряется с помощью глоссметра и

однозначно связан с коэффициентом зеркального отражения света от данной поверхности R . Коэффициент отражения поперечно поляризованного и продольно поляризованного света от гладкой границы раздела воздух/диэлектрик описывается формулами Френеля [1]:

$$R_s = \left(\frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \right)^2 \quad (1)$$

$$R_p = \left(\frac{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_2 + n_2 \cos \theta_1} \right)^2$$

где θ_1 – угол падения, θ_2 – угол преломления, n_1 и n_2 – показатели преломления воздуха и диэлектрика, соответственно. Отражение неполяризованного света описывается усреднённым коэффициентом отражения:

$$R = \frac{R_s + R_p}{2} \quad (2)$$

Идеально гладкая поверхность арсенида галлия GaAs при показателе преломления $n = 4,15 \pm 0,04$ обладала бы коэффициентом отражения неполяризованного излучения $R_{\text{GaAs}} = (37,4 \pm 0,5) \%$ и $(36,9 \pm 0,4) \%$ при углах падения света 20° и 60° , соответственно (выбор данного значения показателя преломления GaAs будет обоснован в разделе 2).

Бекалдиев Евгений Артурович¹, студент.

E-mail: bekaldiev.e.a@edu.mirea.ru

Пушкарёв Сергей Сергеевич^{1,2}, доцент, в.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: pushkarev@mirea.ru

Климов Евгений Александрович^{2,3}, в.н.с., нач. участка³, к.ф.-м.н.

E-mail: klimov_evgeniy@mail.ru

Можяева Мария Олеговна³, инженер 2-й кат.

E-mail: mozhaevam.o.eoso-1-14@mail.ru

¹ МИРЭА – Российский технологический университет.

Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

² Федеральное государственное автономное научное учреждение Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В. Г. Мокерова Российской академии наук.

Россия, 117105, Москва, Нагорный проезд, 7, стр. 5.

³ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Статья поступила в редакцию 5.06.2023

После доработки 21.06.2023

Принята к публикации 30.06.2023

© Бекалдиев Е. А., Пушкарёв С. С., Климов Е. А., Можяева М. О., 2023

Однако коэффициент отражения света от реальной поверхности GaAs уменьшается вследствие её шероховатости, так как неровности поверхности вызывают диффузное рассеивание света, тем самым уменьшая интенсивность зеркально отражённого света.

Эпитаксиальные плёнки на основе GaAs обладают зеркальной поверхностью с малыми значениями среднеквадратичной шероховатости – до 20 нм. Такую шероховатость можно измерить методом атомно-силовой микроскопии. Кроме того, малая шероховатость поверхности может быть определена методом рассеяния монохроматического светового излучения с угловым разрешением (angle-resolved light scattering) [2].

Цель настоящей работы заключается в выявлении корреляции между микроскопической шероховатостью поверхности эпитаксиальных плёнок на основе GaAs и значением её блеска. Выявленная корреляция позволит оценивать шероховатость поверхности по значению блеска, измеряемому глоссметром. Это позволило бы, в каком-то смысле, заменить дорогой и сложный атомно-силовой микроскоп на стадии проведения некоторых технологических операций гораздо более простым глоссметром и тем самым сократить время измерений при экспресс-анализе качества эпитаксиальных плёнок или пластин на основе полупроводниковых соединений A^3B^5 и A^2B^6 . Так, например, при одностороннем шлифовании и полировании свободным абразивом полупроводниковая пластина, как правило, за-

крепляется на специальной оснастке (диске-носителе) при помощи низкотемпературного клеящего адгезида, что затрудняет проведение межоперационной оценки шероховатости обрабатываемой пластины ввиду невозможности её снятия с диска-носителя до окончания всех требуемых операций. Поэтому оценка шероховатости полированной поверхности пластины непосредственно на диске-носителе представляет интерес и является актуальной задачей.

Образцы и методы исследования

Исследуемые образцы были выращены в ИСВЧПЭ РАН на установке молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) ЦНА-24 на полупроводниковых подложках GaAs с кристаллографическими ориентациями поверхностей (100), (110) и (111)A. Особенности дизайна образцов приведены в таблице 1. Арсенид галлия, выращенный при пониженной температуре 200–240 °С относительно стандартных температур роста 480–500 °С, в англоязычной литературе называется «low-temperature-grown» GaAs и обозначается LTG-GaAs. Обозначение $\{GaAs/In_{0,2}Ga_{0,8}As\} \times 10$ показывает 10-периодную сверхрешётку, состоящую из чередующихся тонких слоёв GaAs и $In_{0,2}Ga_{0,8}As$. Из таблицы видно, что все исследуемые образцы в среднем состоят главным образом из арсенида галлия; лишь в одном образце № 456-(100) среднее содержание InAs сравнимо с GaAs.

Таблица 1

Особенности дизайна исследуемых образцов

Образец №	Ориентация подложки GaAs	Состав	Толщина		
102-(110)	(110)	$\{GaAs/In_{0,2}Ga_{0,8}As\} \times 10$	$\{100 \text{ нм}/10 \text{ нм}\} \times 10$		
102-(111)A	(111)A				
103-(110)	(110)	$\{GaAs/In_{0,1}Ga_{0,9}As\} \times 10$	$\{85 \text{ нм}/25 \text{ нм}\} \times 10$		
104-(111)A	(111)A				
105-(100)	(100)	$\{GaAs/In_{0,2}Ga_{0,8}As\} \times 10$	$\{100 \text{ нм}/10 \text{ нм}\} \times 10$		
106-(100)	(100)				
107-(111)A	(111)A	$\{GaAs/In_{0,1}Ga_{0,9}As\} \times 10$	$\{85 \text{ нм}/25 \text{ нм}\} \times 10$		
108-(111)A	(111)A				
109-(110)	(110)	LTG-GaAs	1 мкм		
109-(111)A	(111)A				
110-(110)	(110)				
110-(111)A	(111)A				
111-(110)	(110)				
111-(111)A	(111)A				
112-(100)	(100)				
113-(100)	(100)				
456-(100)	(100)			$\{GaAs/InAs\} \times 10$	$\{6 \text{ нм}/4 \text{ нм}\} \times 150$

Исследование морфологии поверхности образцов выполнялось методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) на микроскопе NT-MTD Ntegra Maximus в контактном режиме, площадь сканирования 30×30 мкм.

Блеск поверхности образцов определялся с помощью высокоточного трёхугольного глосметра YG268 (Shenzhen 3nh Technology Co., Ltd, China). Значения блеска данный прибор выдаёт в произвольных единицах, называемых единицами блеска (gloss units, GU). В связи с небольшими доступными размерами образцов, а также зеркальностью их поверхности измерения выполнялись при углах падения светового луча 20° и 60° . Площадь образца, с которой глосметр собирает отражённый сигнал, для этих углов падения луча составляет $0,6$ и $1,2$ см², соответственно. Угол падения луча 85° , обычно используемый для матовых поверхностей и требующий значительной анализируемой площади образца, не применялся. Приборная погрешность данного глосметра согласно паспорту составляет 3 GU; это значение обычно для приборов такого класса [3]. Образцы размещались на столике, позволяющем установить плоскость образца параллельно плоскости глосметра и предохраняющем хрупкие образцы от повреждения. Калибровка показала, что столик систематически уменьшает значение блеска на 5,8 % для угла 60° и на 1,1 % для угла 20° .

Поскольку излучение, используемое в глосметре, не является монохроматичным, расчёт коэффициента отражения для идеально гладкой пластины GaAs по формулам Френеля требует предварительного расчёта эффективного показателя преломления как средневзвешенного значения показателей преломления GaAs на каждой длине волны $n(\lambda)$ [4, 5] с учётом распределения интенсивности излучения глосметра по длинам волн $I(\lambda)$:

$$n_{\text{eff}} = \frac{\int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} n(\lambda) I(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_{\text{min}}}^{\lambda_{\text{max}}} I(\lambda) d\lambda}. \quad (3)$$

Световой луч в глосметре YG268 создаётся белым светодиодом, спектр его излучения был измерен спектрометром OHSP-350IR (НОРООСКОЛО) и оказался вполне типичным. Вычисления дают значение эффективного показателя преломления GaAs $n_{\text{eff}} = 4,15 \pm 0,04$.

Так как средняя мольная доля индия в исследуемых образцах не превышает $x = 0,02$ (за исключением образца 456-(100)), то с целью тестирования шероховатости поверхности коэффициенты отражения реальных образцов можно сравнивать с коэффициентом отражения идеально гладкой пластины чистого GaAs, при этом ошибка не будет превышать нескольких процентов. Что касается образца 456-(100) со значительной средней мольной долей индия $x = 0,4$, то для него эффективный показатель преломления, рассчитанный на основе дисперсии показателя преломления для смеси 60 % GaAs и 40 % InAs [6], составил $n_{\text{eff}} = 4,12 \pm 0,05$. Видим, что это значение мало отличается от n_{eff} для GaAs, следовательно, шероховатость образца 456-(100) можно оценивать так же, как и шероховатость остальных образцов.

Результаты и обсуждение

Значения блеска образцов, измеренные с помощью глосметра YG268, использовались для вычисления коэффициента отражения образцов. Эталонный образец с блеском $G_0 = 100$ GU входит в комплект глосметра и представляет собой плоскопараллельную пластинку из чёрного стекла с показателем преломления $n = 1,567$. Для эталонного образца с использованием формул Френеля было вычислено значение коэффициента отражения $R_0 = 4,91$ % и 10,01 % при углах 20° и 60° соответственно.

Далее, коэффициент зеркального отражения образца R , соответствующий измеренному значению блеска G , определялся согласно пропорции

$$R = \frac{G}{G_0} \cdot R_0. \quad (4)$$

Значения коэффициента отражения света от поверхности исследуемых образцов приведены в таблице 2. В большинстве случаев увеличение угла падения света приводит к небольшому уменьшению коэффициента отражения в соответствии с формулами (1), (2). Указанная закономерность нарушается для образцов с повышенной матовостью.

Экстраполяция графика (рис. 1а) к нулевой шероховатости даёт коэффициент отражения от идеально гладкой пластины арсени-

да галлия $R_{\text{GaAs}} = 41,0\%$ и $37,2\%$ при углах падения света 20° и 60° , соответственно. Значения R_{GaAs} заметно превышают значения, предварительно рассчитанные по $n_{\text{eff}} = 4,15 \pm 0,04$. Возможная причина может заключаться в неучтённой погрешности измеренного спектра светодиода, в неизвестной спектральной чувствительности фотоприёмника глоссметра, но более вероятное объяснение – в отражении света, проникшего внутрь образца, от гетерограниц между слоями GaAs и InGaAs. Из таблицы 2 видно, что наибольшие значения коэффициента отражения получены для образцов 102-(110), 102-(111)A, 105-(100), 106-(100), которые представляют собой многослойные гетероструктуры $\{\text{GaAs/InGaAs}\} \times 10$ с малой шероховатостью поверхности.

С помощью программного обеспечения атомно-силового микроскопа NT-MTD Ntegra MaxImus были определены следующие параметры рельефа поверхности образцов [7, 8].

S_{max} , S_{min} – высота самой высокой вершины или самой глубокой впадины на поверхности образца (здесь и далее высота – вертикальная координата профиля поверхности образца относительно средней плоскости профиля поверхности);

S_y – разница высот глубочайшей впадины и высочайшей вершины на поверхности образца

S_a – среднее арифметическое значение высоты;

S_q – среднее квадратичное значение высоты;

S_{sk} – коэффициент асимметрии высоты;

S_{ku} – коэффициент эксцесса высоты;

S_{10z} – сумма высот пяти глубочайших впадин и пяти высочайших вершин на поверхности образца;

S_{sc} – средняя главная кривизна локальных максимумов поверхности;

S_{dq} – среднеквадратичный локальный градиент (наклон) поверхности;

S_{dq6} – среднее квадратическое значение наклона по семи точкам;

S_{dr} – процент увеличения площади поверхности относительно плоскости такого же размера.

Из всех перечисленных параметров шероховатости со значением блеска поверхности коррелируют следующие четыре величины: S_a , S_q , S_{sc} , S_{dq} . Значения этих параметров шероховатости приведены в таблице 2. Визуально корреляция показана на рис. 1–3.

Таблица 2

Коэффициент зеркального отражения R для исследуемых образцов, среднеарифметическая шероховатость, среднеквадратичная шероховатость, средняя главная кривизна локальных максимумов поверхности, средний наклон поверхности

Образец №	$R, \%$		$S_a, \text{нм}$	$S_q, \text{нм}$	$S_{sc}, \text{мкм}^{-1}$	S_{dq}
	$\alpha = 20^\circ$	$\alpha = 60^\circ$				
102-(110)	$39,5 \pm 0,2$	$36,2 \pm 0,3$	2,639	3,365	0,179	0,0225
102-(111)A	$38,9 \pm 0,2$	$35,8 \pm 0,3$	3,857	8,234	0,380	0,0586
103-(110)	$33,5 \pm 0,3$	$33,6 \pm 0,3$	9,571	13,664	0,591	0,108
104-(111)A	$33,3 \pm 0,2$	$32,3 \pm 0,3$	17,808	25,790	1,029	0,176
105-(100)	$39,2 \pm 0,2$	$35,6 \pm 0,3$	1,193	1,534	0,101	0,0101
106-(100)	$39,0 \pm 0,2$	$35,3 \pm 0,3$	1,131	1,864	0,157	0,0163
107-(111)A	$25,7 \pm 0,2$	$26,9 \pm 0,3$	16,482	20,849	2,589	0,224
108-(111)A	$24,8 \pm 0,2$	$26,5 \pm 0,3$	18,115	22,910	3,225	0,255
109-(110)	$31,1 \pm 0,2$	$30,6 \pm 0,3$	10,581	13,363	2,629	0,192
109-(111)A	$29,9 \pm 0,2$	$29,8 \pm 0,3$	6,743	8,540	1,958	0,130
110-(110)	$31,5 \pm 0,2$	$30,9 \pm 0,3$	10,512	13,151	2,292	0,179
110-(111)A	$30,1 \pm 0,2$	$29,9 \pm 0,3$	5,592	7,155	1,733	0,112
111-(110)	$31,8 \pm 0,3$	$31,2 \pm 0,3$	4,982	6,302	1,255	0,0861
111-(111)A	$31,0 \pm 0,4$	$30,4 \pm 0,4$	5,330	6,769	1,664	0,107
112-(100)	$33,9 \pm 0,2$	$32,2 \pm 0,3$	3,484	4,441	0,976	0,0639
113-(100)	$32,2 \pm 0,2$	$31,2 \pm 0,3$	4,657	5,870	1,364	0,0872
456-(100)	$27,8 \pm 0,2$	$29,4 \pm 0,3$	14,661	18,297	2,953	0,240

Отметим, что на рисунках 1а, 1б точка для образца 104-(111)А сильно отклоняется от общего тренда (обозначена пустым кружком). Это объясняется значительной неоднородностью шероховатости поверхности данного образца. В дальнейшем при анализе корреляций образец 104-(111)А был исключён из рассмотрения.

Как известно, при эпитаксиальном росте соединений (Al,Ga,In)As на подложках GaAs с ориентациями (110) и (111)А в общем случае сложнее получить зеркально гладкую поверхность плёнок, чем на подложках GaAs со

стандартной ориентацией (100), поскольку диапазон допустимых параметров роста более узкий [9]. Однако из рисунков 1а, 1б видно, что при росте исследуемых структур на подложках (100) и (110) были получены достаточно гладкие поверхности эпислоёв со сравнимыми значениями среднеквадратичной шероховатости в диапазоне 1,5–3,4 нм, что объясняется оптимально выбранными параметрами роста: температурой подложки, скоростью роста и соотношением потоков элементов V и III групп.

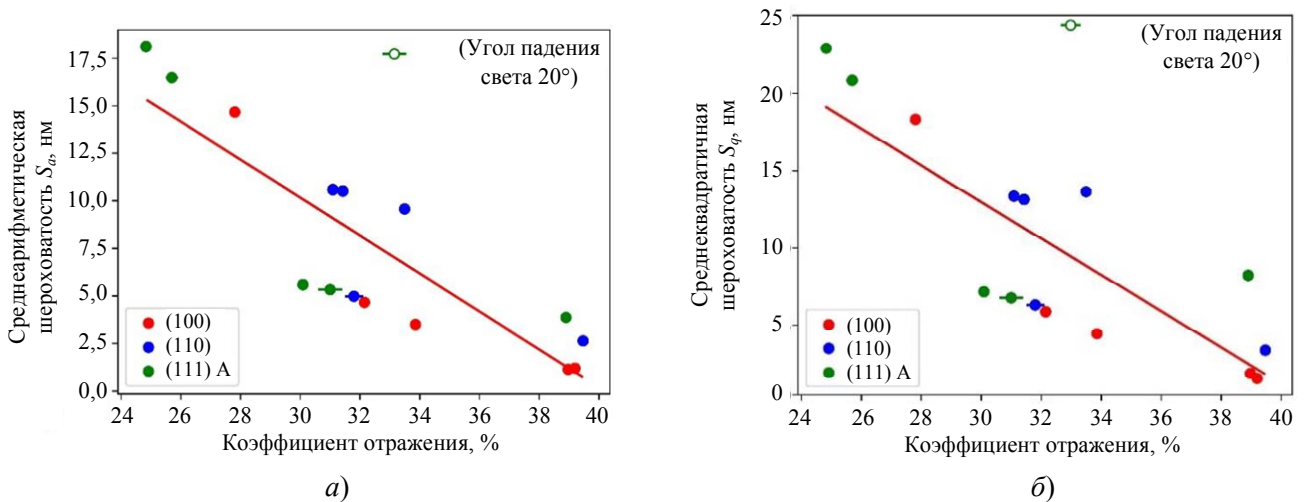


Рис. 1. Корреляция между коэффициентом зеркального отражения и средней арифметической шероховатостью поверхности (а), среднеквадратичной шероховатостью поверхности (б) исследуемых образцов

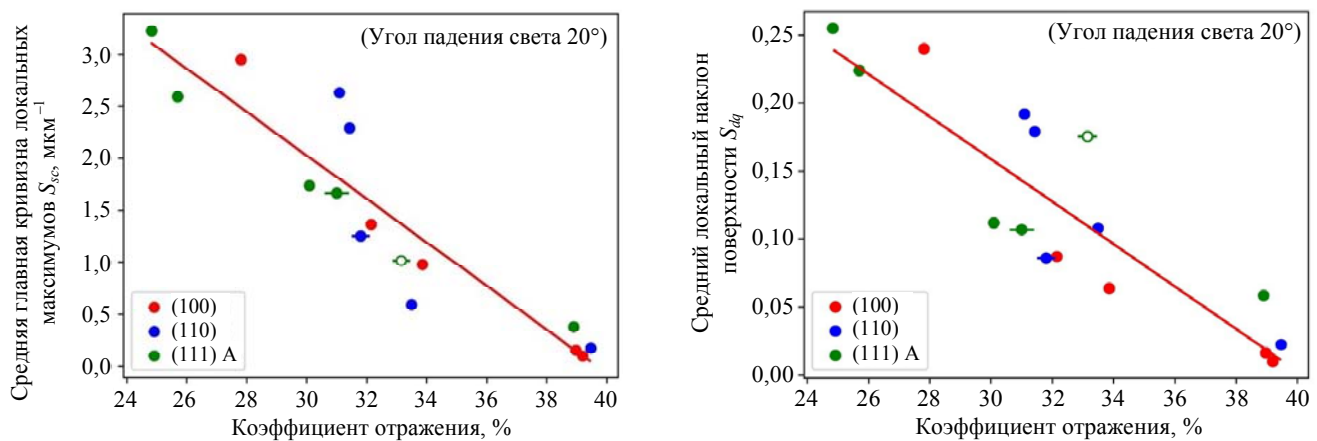


Рис. 2. Корреляция между коэффициентом зеркального отражения и средней главной кривизной локальных максимумов поверхности исследуемых образцов

Рис. 3. Корреляция между коэффициентом зеркального отражения и средним локальным наклоном поверхности исследуемых образцов

Заключение

В настоящей работе найдена корреляция между коэффициентом зеркального отражения света от поверхности эпитаксиальных

плёнок InGaAs с малым средним содержанием In и параметрами морфологии их поверхности: средней и среднеквадратичной шероховатостью, кривизной локальных максимумов, средним локальным наклоном. Данные пара-

метры морфологии поверхности характеризуют её шероховатость и взаимозависимы, основным и наиболее часто используемым параметром среди них считается среднеквадратичная шероховатость. Были использованы образцы, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs с различными ориентациями поверхности: (100), (110), (111)А. В диапазоне значений коэффициента зеркального отражения $R = 24\text{--}40\%$ и среднеквадратичной шероховатости поверхности $S_q = 1,5\text{--}22,9$ нм корреляцию между этими параметрами можно аппроксимировать линейной зависимостью, и значение S_q можно в дальнейшем оценивать по формулам

$$\begin{aligned} S_q(R) &= (47 - 1,14 \cdot R \pm 4) \text{ нм} \\ &\text{(угол падения } 20^\circ); \\ S_q(R) &= (62 - 1,66 \cdot R \pm 4) \text{ нм} \\ &\text{(угол падения } 60^\circ); \end{aligned} \quad (5)$$

что позволит упростить и ускорить процесс измерения качества эпитаксиальных плёнок на основе GaAs. Выявлено, что измерения блеска при угле падения как 20° , так и 60° позволяют оценить шероховатость поверхности с одинаковой точностью.

Кроме того, показано, что такие параметры морфологии поверхности, как коэффициент асимметрии шероховатости и коэффициент эксцесса шероховатости, не коррелируют с блеском поверхности.

Данная работа в части выращивания образцов была поддержана грантом РФФ № 22-19-00656,
<https://rscf.ru/project/22-19-00656/>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландсберг Г. С. Оптика. Учеб. пособие: Для вузов. Изд. 6, стереот. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.
2. Zhanaveskin M. L., Grishchenko Yu. V., Tolstikhina A. L., Asadchikov V. E., Roshchin B. S., Azarova V. V. / Proc. SPIE. 2006. Vol. 6260. P. 62601. doi: 10.1117/12.683482
3. Tiecheng Li, Lei Lai, Dejin Yin, Muyao Ji, Fangsheng Lin, Leibing Shi, Ming Xia, Yi Fu. / Proc. SPIE. 2017. Vol. 10460. P. 104601A. doi: 10.1117/12.2284968
4. Papatryfonos K., Angelova T., Brimont A., Reid B., Guldin S., Smith P. R., Tang M., Li K., Seeds A. J., Liu H., Selviah D. R. / AIP Advances. 2021. Vol. 11. P. 025327. doi: 10.1063/5.0039631
5. Jellison Jr. G. E. / Opt. Mat. 1992. Vol. 1. P. 151–160. doi: 10.1016/0925-3467(92)90022-F
6. Aspnes D. E., Studna A. A. / Physical Review B. 1983. Vol. 27. P. 985–1009. doi: 10.1103/PhysRevB.27.985
7. Толстихина А. Л. Атомно-силовая микроскопия кристаллов и плёнок со сложной морфологией поверхности, дисс. д-ра физ.-мат. наук. – М.: Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, 2013.
8. Захарова Н. В. / Решетневские чтения. – Красноярск, 2015. Т. 1. С. 458–459.
9. Takano Y., Lopez M., Torihata T., Ikei T., Kanaya Y., Pak K., Yonezu H. / J. Cryst. Growth. 1991. Vol. 111. P. 216–220. doi: 10.1016/0022-0248(91)90974-A

Surface gloss analysis of GaAs-based epitaxial films

*E. A. Bekaldiev*¹, *S. S. Pushkarev*^{1,2}, *E. A. Klimov*^{2,3} and *M. O. Mozhaeva*³

¹ MIREA – Russian Technological University
78 Vernadsky Ave., 119454, Moscow, Russia
E-mail: pushkarev@mirea.ru

² Mokerov Institute of Ultra High Frequency Semiconductor Electronics
of Russian Academy of Sciences
Bd. 5, 7 Nagornyi proezd, 117105, Moscow, Russia

³ Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

Received 5.06.2023; revised 21.06.2023; accepted 30.06.2023

A correlation between the coefficient of specular light reflection from the surface of InGaAs epitaxial films with low In average content and the root-mean-square roughness of their surface was found. The specular reflection coefficient was determined using a glossmeter, and the surface morphology was measured by atomic force microscopy. The films under investigation were grown by molecular beam epitaxy on GaAs substrates with different surface orientations: (100), (110), (111)A.

Keywords: atomic-force microscopy, molecular-beam epitaxy, GaAs, root-mean-square roughness, reflection coefficient.

DOI: 10.51368/1996-0948-2023-4-22-28

REFERENCES

1. Landsberg G. S., Optics, Moscow, FIZMATLIT, 2003.
2. Zaveskin M. L., Grishchenko Yu. V., Tolstikhina A. L., Asadchikov V. E., Roshchin B. S. and Azarova V. V., Proc. SPIE **6260**, 62601 (2006). doi: 10.1117/12.683482
3. Tiecheng Li, Lei Lai, Dejin Yin, Muyao Ji, Fangsheng Lin, Leibing Shi, Ming Xia and Yi Fu, Proc. SPIE **10460**, 104601A (2017). doi: 10.1117/12.2284968
4. Papatryfonos K., Angelova T., Brimont A., Reid B., Guldin S., Smith P. R., Tang M., Li K., Seeds A. J., Liu H. and Selviah D. R., AIP Advances **11**, 025327 (2021). doi: 10.1063/5.0039631
5. Jellison Jr. G. E., Opt. Mat. **1**, 151–160 (1992). doi: 10.1016/0925-3467(92)90022-F
6. Aspnes D. E. and Studna A. A., Physical Review B **27**, 985–1009 (1983). doi: 10.1103/PhysRevB.27.985
7. Tolstikhina A. L. Atomic-force microscopy of crystals with complex surface morphology: diss. candidate of physical and mathematical sciences, Moscow, Shubnikov Institute of Crystallography RAS, 2013.
8. Zakharova N. V., Reshetnev Readings **1**, 458–459 (2015).
9. Takano Y., Lopez M., Torihata T., Ikei T., Kanaya Y., Pak K. and Yonezu H., J. Cryst. Growth **111**, 216–220 (1991). doi: 10.1016/0022-0248(91)90974-A