

УДК 621.383:621.315.5

Исследование кривизны поверхности гетероэпитаксиальных структур InP/InGaAs, Al₂O₃/Al_xGa_{1-x}N

Ю. П. Шаронов, Э. А. Макарова, М. В. Седнев, М. А. Ладугин, И. В. Яроцкая

В работе представлены результаты исследований кривизны поверхности пластин с гетероэпитаксиальными структурами (ГЭС) AlGaN и InGaAs, выращенными методами МОС гидридной и молекулярно-лучевой эпитаксии, а также матриц фотоприемников, изготовленных на основе выше обозначенных ГЭС. Показано, что в процессе роста функциональных слоев пластины изгибаются. Так пластины с функциональными слоями InGaAs на подложке InP имеют вогнутый вид. Тогда как пластины с функциональными слоями AlGaN на сапфировой подложке имеют выпуклый вид со стороны ГЭС. В процессах роста функциональных слоев Al_xGa_{1-x}N на сапфировой подложке возникают растягивающие напряжения. Для процессов роста функциональных слоев In_xGa_{1-x}As на подложке из фосфида индия характерны растягивающие напряжения. Величина прогиба пластин зависит как от способа выращивания, так и от толщин функциональных слоев ГЭС. Величина прогиба структур диаметром 52 мм в зависимости от способа выращивания и толщин слоев лежит в пределах 7—60 мкм. Измерения профиля кривизны изготовленных матричных фоточувствительных элементов на основе InGaAs и AlGaN формата 320×256 с шагом 30 мкм показали, что величина прогиба на матрицах h_1 не превышает 1,0±2,5 мкм. Величина прогиба на матрицах определяется исходной кривизной поверхности пластин.

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

Ключевые слова: гетероэпитаксиальная структура, ГЭС, AlGaN, InGaAs, кривизна поверхности.

Введение

Актуальной задачей является создание матричных фотоприемных устройств (МФПУ) мегапиксельного формата ультрафиолетового и ближнего инфракрасного диапазонов спектра на эпитаксиальных слоях Al_xGa_{1-x}N на сапфировой подложке и In_xGa_{1-x}As на подложке из фосфида индия [1—9].

При выращивании гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) возникают механические напряжения из-за несопадений постоянных решеток подложки и функциональных слоев [3], в результате чего пластина может изменять форму и становиться как выпуклой, так и вогнутой в зависимости от величины и знака напряжений (рис. 1).

Кривизна пластин с ГЭС может оказать существенное влияние на качество фотолитографических процессов, проводимых на пластинах. В частности, прилипание пластины к фотошаблону и искажение фотолитографического рисунка. Из-за недостаточной плоскостности фоточувствительной матрицы возникают дополнительные трудности при выполнении гибридной схемы считывания [10, 11].

Целью данной работы являлось исследование кривизны поверхности пластин с гетероэпитаксиальными структурами AlGaN и InGaAs, выращенными методами МОС гидридной и молекулярно-лучевой эпитаксии, а также матриц фотоприемников, изготовленных на основе вышеобозначенных ГЭС.

Шаронов Юрий Павлович, ведущий инженер-технолог¹.

Макарова Элина Алексеевна, инженер¹.

Седнев Михаил Васильевич, начальник участка¹.

Ладугин Максим Анатольевич, начальник отдела².

Яроцкая Ирина Валентиновна, научный сотрудник².

¹ АО НПО «Орион».

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

Тел. 8 (499) 374-48-60.

E-mail: orion@orion-ir.ru

² АО «НИИ «Полус» им. М. Ф. Стельмаха».

Россия, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1.

Тел. 8 (495) 330-03-65.

E-mail: bereg@niipolyus.ru

Статья поступила в редакцию 5 октября 2016 г.

© Шаронов Ю. П., Макарова Э. А., Седнев М. В., Ладугин М. А., Яроцкая И. В., 2016

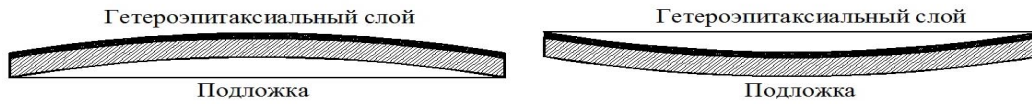


Рис. 1. Виды поверхности пластин после выращивания гетероэпитаксиальных слоев.

Результаты исследования

Измерения кривизны поверхности пластин проводились на длине до 50 мм контактным профилометром Dektak-XT с точностью 50 Å.

Исследования гетероэпитаксиальных структур InGaAs на подложке фосфида индия показали, что они имеют вогнутый вид со стороны гетероэпитаксиального слоя. Типичная профилограмма поверхности ГЭС с поглощающим слоем InGaAs, измеренная по диаметру пластины, представлена на рис. 2.

Пластины ГЭС на сапфире с функциональными слоями AlGaIn, наоборот, обладают выпуклостью со стороны эпитаксиального слоя.

Подробные результаты измерения профилей пластин на подложках фосфида индия и сапфира с различными функциональными слоями представ-

лены в табл. 1 и 2. Как видно из таблиц толщины и состав функциональных слоев ГЭС, а также способ их выращивания существенно влияют на величину прогиба пластины h .

Как видно из приведенных в табл. 1 данных, кривизна поверхности h ГЭС с различными функциональными слоями на подложке InP имеет значения 17÷44 мкм. По-видимому, более значительный вклад в величину суммарного напряжения дают слои AlInAs, а увеличение толщин слоев InP и In_{0,53}GaAs менее значительно.

На пластинах с ГЭС Al_xGa_{1-x}N на сапфире, как видно из табл. 2, наименьшую кривизну имеют пластины, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии. В то же время можно видеть, что с увеличением суммарной толщины функциональных слоев Al_xGa_{1-x}N возрастает кривизна поверхности (h) с 7 до 60 мкм.

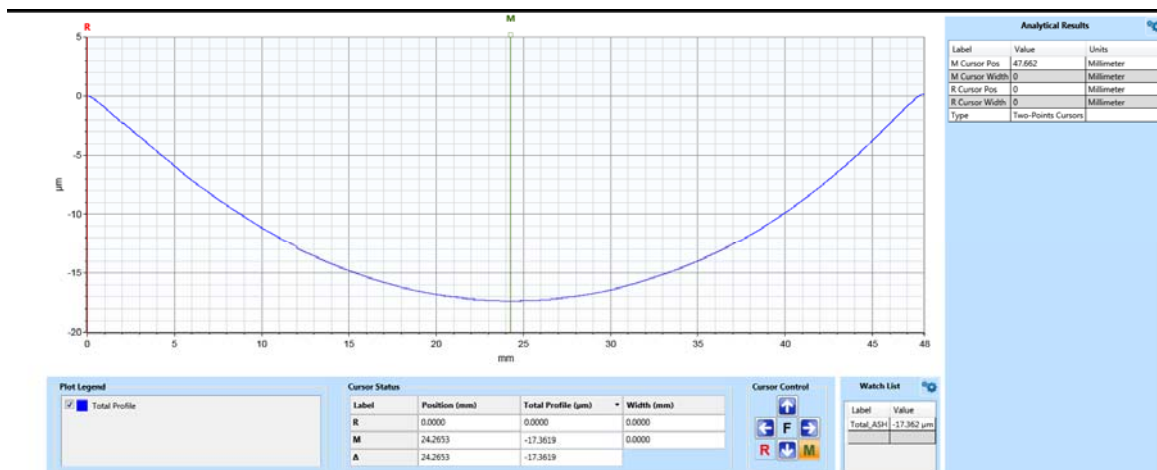


Рис. 2. Фото с экрана профилометра Dektak-XT. Профиль поверхности пластины v-2190-1.

Таблица 1

ГЭС на подложке InP

№ ГЭС	v-2104-2		v-2190-1		V-1588	
	Состав и толщина слоев ГЭС, нм					
	p^+ In _{0,53} Ga _{0,47} As:Zn	190	p^+ In _{0,53} Ga _{0,47} As:Zn	53	n InP n In _{0,53} Ga _{0,47} As InP буфер	2700 3810
	p -AlInAs	370	p InGaAs	105		
	AlGaInAs	70	AlInAs	105		
	In _{0,53} Ga _{0,47} As	1600	p AlInAs	5,3		
	AlGaInAs	70	i AlGaInAs	53		
	p -AlInAs	100	n^+ -In _{0,53} Ga _{0,47} As	5,3		
	i -AlInAs	150	n -In _{0,53} Ga _{0,47} As	2100		
	n -AlInAs	150	InP буфер	320		
	InP буфер	200				
Суммарная толщина, нм	2900		2750		6510	
Параметр, характеризующий кривизну поверхности на базе 48 мм, вогнутость h , мкм	44		17,4		19	
Метод выращивания	MOCVD		MOCVD		MOCVD	

Таблица 2

ГЭС $Al_xGa_{1-x}N$ на сапфире

№ ГЭС	V-1914-2		№ 899		V-1463-1	
Состав и толщина слоев ГЭС, нм	p^+GaN - $pGaN$ - $iGaN$ $nAl_{0,25}Ga_{0,75}N$ буфер сверхрешетка $AlN/AlGaN$ - AlN $Al_{0,45}Ga_{0,55}N$ $Al_{0,6}Ga_{0,4}N$	220 330 300 820 1400 400 100 150	p^+GaN - $pGaN$ - $iGaN$ $nAl_{0,28}Ga_{0,78}N$ буфер AlN	200 260 260 335 250	p^+GaN - $iInGaN$ - $nAlGaN$ буфер $AlN/AlGaN$	130 120 600 2000
Суммарная толщина, нм	3720		1305		2850	
Параметр, характеризующий кривизну поверхности на базе 48 мм, выпуклость h , мкм	50		7,4		60	
Метод выращивания	MOCVD		МЛЭ		MOCVD	

Изогнутую поверхность круглой пластины диаметром D можно принять за поверхность второго порядка, ее кривизна (величина прогиба h) квадратично зависит от линейных размеров и распределения внутренних напряжений в ГЭС. В случае однородного распределения внутренних напряжений в ГЭС можно ожидать образование сферической формы радиуса R на поверхности пластины. В этом случае величина прогиба пластины $h \approx D^2 / 2R$. После разделения пластины резкой на матрицы с линейными размерами $m \times l$ радиус кривизны поверхности не изменяется, так как сохраняется однородность распределения внутренних напряжений в ГЭС на единицу площади. В то же время на длине матрицы l уменьшается величина прогиба h_1 пропорциональна отношению l^2/D^2 . Таким образом, матрицы фоточувствительных элементов формата 320×256 элементов с размерами около 10 мм, изготовленные на двухдюймовой пластине с кривизной $h = 50$ мкм, будут иметь кривизну около 3,0 мкм. Измерения профиля кривизны изготовленных матричных фоточувствительных элементов на основе InGaAs и AlGaN формата 320×256 с шагом 30 мкм показали, что величина прогиба на матрицах h_1 не превышает 1,0÷2,5 мкм и определяется исходной кривизной поверхности пластины.

Заключение

В работе проведены исследования кривизны поверхности пластин с гетероэпитаксиальными слоями AlGaN и InGaAs, выращенных методами МОС гидридной и молекулярно-лучевой эпитаксии, а также матриц фотоприемников, изготовленных на их основе.

В процессах роста функциональных слоев $Al_xGa_{1-x}N$ на сапфировой подложке возникают растягивающие напряжения. Для роста функциональных слоев $In_xGa_{1-x}As$ на подложке из фосфида индия характерны растягивающие напряжения.

Измерения профиля кривизны изготовленных матричных фоточувствительных элементов на основе InGaAs и AlGaN формата 320×256 с шагом 30 мкм показали, что величина прогиба на матрицах h_1 не превышает 1,0÷2,5 мкм и определяется исходной кривизной поверхности пластины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Филачев А. М., Таубкин И. И., Тришенков М. А. Твердотельная фотозлектроника. Физические основы: учебное пособие для вузов. — Издательство Москов. физ.-технич. института, 2007.
2. Седнев М. В., Болтарь К. О., Шаронов Ю. П., Лопухин А. А. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 51.
3. *Nadis Morkoc*. Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. Vol. 2: Materials Properties, Physics and Growth. — WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008.
4. Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Яковлева Н. И., Седнев М. В., Кравченко Н. В., Смирнов Д. В., Иродов Н. А. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 344.
5. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Седнев М. В., Яковлева Н. И. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 2. С. 200.
6. Болтарь К. О., Смирнов Д. В., Савостин А. В., Шаронов Ю. П., Киселева Л. В. Патент РФ № 2530458 от 13. 08. 2014.
7. Малин Г. В., Гилинский А. М., Мансуров В. Г., Протасов Д. Ю., Шестаков А. К., Якимов Е. Б., Журавлев К. С. // ЖТФ. Т. 85. Вып. 4. С. 67.
8. Ермаков О. Н. Гетероструктуры $In_{1-x}Ga_xN$ и тонкопленочные полимерные структуры как перспективные среды полимерно-твердотельной оптоэлектроники. / IX Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (С-Пб, 2015)
9. Онушкин Г., Николаев А., Фомин А., Ледеяев О., Черенков А., Калинина Е., Никитина И., Дмитриев В. AlGaN эпитаксиальные слои для ультрафиолетовых фотодетекторов / IX Всероссийская конференция «Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы» (С-Пб, 2015).
10. Болтарь К. О., Смирнов Д. В., Савостин А. В., Шаронов Ю. П., Киселева Л. В. Заявка на патент РФ № 2013118764 от 24.04.13.
11. Болтарь К. О., Яковлева Н. И., Кравченко Н. В., Седнев М. В., Никонов А. В., Тришенков М. А. // Прикладная физика. 2013. № 6. С. 61.

Investigation of a surface curvature of the heteroepitaxial structures InP/InGaAs, Al₂O₃/Al_xGa_{1-x}N

J. P. Sharonov¹, E. A. Makarova¹, M. V. Sednev¹, M. A. Ladugin², and I. V. Yarotskaya²

¹ Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² M. F. Stelmakh Research Institute «Polyus»
3 Vvedenskogo str., Moscow, 117342, Russia
E-mail: bereg@niipolyus.ru

Received October 5, 2016

Consideration is given to researches of a surface curvature for plates with the heteroepitaxial Al_xGa_{1-x}N layers on sapphire and heteroepitaxial In_xGa_{1-x}As layers on indium phosphed. It is shown that cultivation of the heteroepitaxial Al_xGa_{1-x}N layers on sapphire leads to formation of stretching stresses, and the heteroepitaxial In_xGa_{1-x}As layers on indium phosphed to compressing. It leads to a curvature of a surface of plates with heteroepitaxial layers In_xGa_{1-x}As from 17 to 44 microns and from 7 to 60 microns of layers Al_xGa_{1-x}N.

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

Keywords: heteroepitaxial structure, AlGaN, InGaAs, surface curvature.

REFERENCES

1. A. M. Filachev, I. I. Taublin, and M. A. Trishenkov, *Solid State Photoelectronics* (MFTI, Moscow, 2007) [in Russian].
2. M. V. Sednev, K. O. Boltar, Yu. P. Sharonov, and A. A. Lopukhin, *Prikl. Fiz.*, No. 4, 51 (2014).
3. Hadis Morkoc. *Handbook of Nitride Semiconductors and Devices. Vol. 2: Materials Properties, Physics and Growth.* (WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008).
4. I. D. Burlakov, K. O. Boltar, N. I. Iakovleva, M. V. Sednev, N. V. Kravchenko, D. V. Smirnov, and N. A. Irodov, *Usp. Prikl. Fiz.* **1**, 344 (2013).
5. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, M. V. Sednev, and N. I. Iakovleva, *Usp. Prikl. Fiz.* **1**, 200 (2013).
6. K. O. Boltar, D. V. Smirnov, A. V. Savostin, Yu. P. Sharonov, and L. V. Kiseleva, RF Patent No. 2530458, August 13, 2014.
7. G. V. Malin, A. M. Gilinskii, V. G. Mansurov, D. Yu. Protasov, A. K. Shestakov, E. B. Yakimov, and K. S. Zhuravlev, *Tech. Phys.* **85** (4), 67.
8. O. N. Ermakov, in *Proc.IX All-Russian Conf. Nitride Ga, In, Al — Structures Devices* (SPb, 2015).
9. G. Onushkin, A. Nikolaev, A. Fomin, et al., in *Proc.IX All-Russian Conf. Nitride Ga, In, Al — Structures Devices* (SPb, 2015).
10. K. O. Boltar, D. V. Smirnov, A. V. Savostin, Yu. P. Sharonov, and L. V. Kiseleva, RF Patent Application No. 2013118764, April 24, 2013.
11. K. O. Boltar, N. I. Iakovleva, N. V. Kravchenko, M. V. Sednev, A. V. Nikonov, and M. A. Trishenkov, *Prikl. Fiz.*, No. 6, 61 (2013).