

УДК 621.315.5:621.3.049.77

## Пассивация и защита поверхности фотодиодов на основе $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y/\text{InP}$ пленкой нитрида кремния

Д. С. Андреев, А. К. Будтолаев, О. В. Огнева, М. А. Трищенко, И. В. Чинарева

*В статье обсуждается методика пассивации и защиты поверхности  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  с помощью обработки в плазме  $\text{CF}_4$  и  $\text{N}_2$  и осаждения пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  плазмохимическим методом при температурах не более  $200^\circ\text{C}$ . Разработанная технология обеспечивает получение и стабилизацию плотности темнового тока при  $U = 10\text{ В}$  на уровне  $10^{-5}—10^{-6}\text{ А/см}^2$ , а также плотность микропор  $0—20\text{ см}^2$  при диэлектрической прочности  $10^7\text{ В/см}$ .*

PACS: 85.60.-q

*Ключевые слова:* диэлектрические покрытия, темновой ток, нитрид кремния, плазмохимическая обработка, плотность микропор.

### Введение

Выбору оптимального пассивирующего и защитного покрытия поверхности  $p-n$ -перехода в соединениях  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  посвящен ряд зарубежных и отечественных работ [1—3]. Интерес к проблеме связан с интенсивными разработками фотодиодов (ФД), фотодиодных матриц и фотоприемных устройств с монолитной интеграцией  $\text{rip-ФД}$ , полевого транзистора и волновода на основе указанных соединений для систем обнаружения лазерного излучения, а также волоконно-оптических систем передачи информации, работающих в спектральном диапазоне  $0,9—1,7\text{ мкм}$ .

Существует два аспекта проблемы разработки диэлектрического покрытия для таких ФД:

- необходимость разработки метода пассивации и защиты поверхности  $p-n$ -переходов, выделенных по мезотехнологии, обеспечивающего сохранение плотности темнового тока  $j_T$  на уровне  $10^{-6}—10^{-8}\text{ А/см}^2$ ;
- необходимость разработки метода маскирования поверхности соединений  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  при проведении локальной диффузии (имплантации)

донорных и акцепторных примесей по планарной технологии и последующей защиты полученного перехода.

В качестве пассивационно-защитных покрытий для приборов на основе  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  наиболее широкое распространение получили полиамидные пленки [4], осаждаемые химическим методом, а также пленки нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [5, 6] и диоксида кремния  $\text{SiO}_2$  [7], осаждаемые плазмохимическим методом при  $T \leq 300^\circ\text{C}$ . Выбор температуры осаждения ограничен низкими температурами испарения мышьяка и фосфора из соединений  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ . С точки зрения промышленного использования, наиболее перспективной представляется пленка  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Основные преимущества этого диэлектрика:

- соответствие соединениям  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  по величине коэффициента термического расширения [5];
- малое содержание кислорода в пленках  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , препятствующее образованию на поверхности  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  проводящих окислов типа  $\text{In}_2\text{O}_3$  [7];
- высокая стойкость к радиационным воздействиям [8];
- высокая непроницаемость по отношению наиболее часто используемым диффузантам —  $\text{Cd}$ ,  $\text{Zn}$  и их соединениям [7, 8].

Однако пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , осаждаемые на поверхности соединений  $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ , имеют, как правило, довольно высокую плотность сквозных микропор  $100\text{ см}^2$  [9], что ограничивает возможность их использования в технологии изготовления фотодиодов. Кроме того, в экспериментах по защите поверхности мезодиодов на основе  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y/\text{InP}$  пленкой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [10] наблюдалось увеличение темнового тока  $p-n$ -перехода после нанесения пленки.

Андреев Дмитрий Сергеевич, вед. инженер.  
Будтолаев Андрей Константинович, вед. инженер.  
Огнева Ольга Викторовна, главный специалист.  
Чинарева Инна Викторовна, вед. инженер.  
ОАО «НПО «Орион».  
Россия, 111123, Москва, шоссе Энтузиастов, 46/2.  
Тел. 8 (495) 672-20-31. E-mail: orion@orion-ir.ru  
Трищенко Михаил Алексеевич, профессор.  
Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики (МГТУ МИРЭА).  
Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78.

Статья поступила в редакцию 21 ноября 2014 г.

© Андреев Д. С., Будтолаев А. К., Огнева О. В., Чинарева И. В., Трищенко М. А., 2015

Целью данной работы было исследование возможности пассивации и защиты поверхности мезодиодов на основе  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  пленкой  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , осажденной при  $T \leq 200$  °С, с предварительной обработкой защищаемой поверхности  $\text{CF}_4$  и  $\text{N}_2$ , а также определение взаимосвязи между режимом такой обработки и качеством пленки.

### Методика эксперимента

Исследования проводились в два этапа. На первом этапе устанавливался оптимальный режим плазмохимической обработки (ПХО) поверхности  $p$ - $n$ -перехода в атмосфере  $\text{CF}_4$ , обеспечивающий минимизацию и стабилизацию поверхностной составляющей темнового тока  $I_T$ . Эта часть работы является продолжением исследований, начатых в [11].

На втором этапе изучались возможности уменьшения плотности микропор и увеличение прочности пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , наносимой низкотемпературным плазмохимическим методом.

Для экспериментов использовались гетероструктуры  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  с  $p$ - $n$ -переходами, сформированными диффузией  $\text{Cd}$  из паровой фазы в кварцевой ампуле и выделенными по мезотехнологии в травителе  $\text{NBV} : \text{H}_3\text{PO}_4 : \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  (в дальнейшем — “мезафотодиоды”) [12].

ПХО проводилась в атмосфере  $\text{CF}_4$  в реакторах двух типов: цилиндрическом и планарном, причем при обработке в планарном реакторе использовалось принудительное охлаждение пластин до  $T = 20$  °С. Давление газа в реакционной камере — 0,5 мм рт. ст., частота ускоряющего переменного напряжения на электродах — 13,56 МГц. Температура и время ПХО, а также мощность разряда варьировались в ходе эксперимента.

Величина темнового тока  $I_T$  мезафотодиодов (меза-ФД) контролировалась до и после ПХО при фиксированном напряжении 10 В.

После ПХО в  $\text{CF}_4$  поверхность меза-ФД защищалась пленкой  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , осажденной плазмохимическим методом в атмосфере моносилана  $\text{SiH}_4$  и азота  $\text{N}_2$  при  $T \leq 200$  °С. Частота ускоряющего напряжения в процессе осаждения  $\text{Si}_3\text{N}_4$  — 5,28 МГц, мощность разряда — 200 Вт. Соотношение реакционных газов и время процесса выбиралось таким образом, чтобы обеспечить толщину получаемых пленок 0,17—0,2 мкм, где коэффициент преломления 1,9—2,1, коэффициент отражения излучения с длиной волны  $\lambda = 1,3$  мкм — 3—7 %.

Первоначально пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  осаждались на поверхность  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  непосредственно после обработки последней в плазме  $\text{CF}_4$ . При этом пленки имели плотность микропор  $300 \text{ см}^{-2}$  и диэлектрическую прочность  $E_{np} \leq 5 \times 10^4$  —  $1 \times 10^5$  В/см. Для повышения диэлектрической прочности и

уменьшения пористости  $\text{Si}_3\text{N}_4$  была введена дополнительная обработка защищаемой поверхности: на первом этапе работы путем отжига в вакууме (не ниже  $10^{-5}$  мм рт.ст.); на втором этапе — путем сочетания вакуумного отжига с ПХО в плазме азота. Дополнительная обработка и осаждение пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  проводились в одном вакуумном объеме, а процессы ПХО в плазме  $\text{N}_2$  и собственно осаждение  $\text{Si}_3\text{N}_4$  — при непрерывно горящем разряде мощностью 200 Вт. Температура и время этапов дополнительной обработки варьировались в ходе экспериментов. В ряде опытов осаждение пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  с дополнительной обработкой поверхности проводилось без предварительной ПХО в атмосфере  $\text{CF}_4$ . Состояние поверхности гетероструктур, обработанной плазмохимическим методом, исследовалось с помощью эллипсометрии (контроль толщины окисных и диэлектрических пленок), электронографии (контроль дефектности приповерхностного слоя) и Оже-спектроскопии (контроль присутствия на поверхности С и О). Плотность микропор пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  контролировалась методом электрографии, диэлектрическая прочность — по вольтамперным характеристикам МДП-структур, полученных напылением золотых контактов на исследуемую пленку. Кроме того, на меза-ФД после вскрытия в пленке  $\text{Si}_3\text{N}_4$  контактных окон контролировалась величина  $I_T$  при напряжении 10 В. Вскрытие окон проводилось стандартным фотолитографическим способом с использованием плазмохимического травления в смеси  $\text{CF}_4 + 10\% \text{ O}_2$ .

### Результаты эксперимента и их обсуждение

Результаты измерения величин  $I_T$  меза-ФД в зависимости от режимов предварительной обработки поверхности в плазме  $\text{CF}_4$  представлены в табл. 1.

Установлено, что оптимальный диапазон температур ПХО составляет 90—100 °С, время выдержки 0,1—0,5 часа. При температуре процесса больше 120 °С и (или) времени обработки больше 0,5 часа наблюдалось растравливание поверхности  $p$ - $n$ -перехода, приводящее к увеличению  $I_T$ .

Эффективность ПХО повышалась при использовании планарного реактора, о чем свидетельствует высокая равномерность изменения  $I_T$  различных меза-ФД на пластине. Неравномерность изменения  $I_T$  различных мезадиодов после ПХО в цилиндрическом реакторе может быть связана со следующими факторами, а именно 1) неодинаковым нагревом различных частей пластины и разных пластин в кассете; 2) неравномерной концентрацией активных радикалов, которая характерна для реактора такого типа [13].

Таблица 1

Режим обработки в плазме CF <sub>4</sub>		Мощность разряда [Вт]	Темновой ток $I_T$ при $U = 10$ В [нА]			Процент кристаллов с типичным значением $I_T$
$T$ [°C]	$t$ [час]		Минимальный	Типичный	Максимальный	
50	1	250	80	400	1500	70
50	1	200	200	800	800	80
90	0,5	300	0,5	3—5	20	90
90	0,5	250	0,5	5—10	30—40	80
120	0,1	300	0,5	2—5	10	80
120	0,1	250	0,5	2—5	30	80
120	0,1	200	0,5	10—15	60	70
150	0,1	200	50	100	500	60
150	0,5	200	100	300	1000	50

Скорость удаления поверхностных примесей пропорциональна подводимой ВЧ-мощности [13]. В нашем случае минимальные значения  $I_T$  меза-ФД наблюдались при мощности разряда 250—300 Вт (см. табл. 1).

Зависимость  $I_T$  меза-ФД от режимов ПХО в атмосфере CF<sub>4</sub> представлена в табл. 1.

Однако, электронографические исследования поверхности In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub>, прошедшей ПХО с мощностью разряда более 200 Вт, показали присутствие на поверхности матового фона, связанного с нарушением ее монокристалличности [14]. Последнее подтверждается также изменением после ПХО при такой мощности эллипсометрических параметров поверхности  $\Delta$  и  $\psi$ . Эти измене-

ния составляют 23° и 1°20', соответственно. Нами не установлено влияние образующегося после ПХО нарушенного слоя на величину  $I_T$ . Однако наличие такого слоя на поверхности  $p$ - $n$ -перехода может привести к нестабильности ВАХ при длительной работе прибора в условиях повышенных температур (более 60 °C). Таким образом, ПХО поверхности In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub> в атмосфере CF<sub>4</sub> целесообразно проводить в планарном реакторе при температуре 90—120 °C и мощности разряда 200 Вт в течение 0,1—0,5 часа.

Результаты измерений параметров пленки Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, а также величины  $I_T$  защищенных ею меза-ФД в зависимости от режимов предобработки поверхности In<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>As<sub>1-y</sub>P<sub>y</sub> представлены в табл. 2.

Таблица 2

№ образца	Обработка в плазме CF <sub>4</sub>	Отжиг в вакууме		Обработка в плазме N <sub>2</sub>		Толщина окислов [Å]	Характеристики Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>		Темновой ток $I_T$ при $U = 10$ В [нА]			Процент кристаллов с типичным значением $I_T$
		$T$ [°C]	$t$ [час]	$T$ [°C]	$t$ [час]		$E_{np}$ [В/см]	Nd [см <sup>-2</sup> ]	Минимальный	Типичный	Максимальный	
1	проводилась	—	—	—	—	60—65	(6—9)×10 <sup>5</sup>	500	0,5	10—15	60—80	70
2	проводилась	100	1,5	—	—	40—46	(1—2)×10 <sup>6</sup>	50—70	0,5	10—15	60—80	70
3	проводилась	110	1	—	—	40—42	(1—2)×10 <sup>6</sup>	50—70	0,5	10—15	60—80	70
4	не проводилась	110	1	—	—	42—46	(6—8)×10 <sup>5</sup>	100	30	50—70	200	50
5	проводилась	80	1,5	—	—	52—55	(6—9)×10 <sup>5</sup>	100	0,5	10—15	60—80	70
6	проводилась	150	1	—	—	40—46	(1—2)×10 <sup>6</sup>	50—60	20	60—80	150	80
7	проводилась	100	1,5	200	10	24—26	(9—10)×10 <sup>6</sup>	0—20	50	70—100	200	80
8	проводилась	100	1,5	100	40	30—36	(4—6)×10 <sup>6</sup>	50—100	0,5	10—15	60	80
9	не проводилась	100	1,5	100	40	24—30	(0,9—2)×10 <sup>6</sup>	300	30	50—70	200	50

Из приведенных данных следует, что ПХО в атмосфере  $\text{CF}_4$  является необходимым, но не достаточным условием стабилизации  $I_T$  и обеспечения минимальной плотности микропор защитной пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . На основе литературных данных о способах создания пленок  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на поверхности GaAs и InP [7, 15, 16] нами были предложены и опробованы следующие дополнительные меры улучшения параметров пленок:

- отжиг поверхности  $p$ – $n$ -перехода в вакууме;
- ПХО поверхности  $p$ – $n$ -перехода в атмосфере  $\text{N}_2$ .

Как известно [15], вакуумный отжиг позволяет устранить водяные пары, адсорбированные внутренней поверхностью камеры, а также остатки кислотных соединений, образующихся на поверхности  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  после выдержки на воздухе. Последний фактор особенно важен в связи с высокой активностью поверхности  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  после воздействия плазмы [8], а также тем, что ПХО в  $\text{CF}_4$  и осаждение пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  проводятся в различных вакуумных камерах.

Последующая обработка в плазме  $\text{N}_2$  была введена с целью:

- улучшить стехиометрию поверхности  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ , нарушенную в ПХО в плазме  $\text{CF}_4$  [8];
- уменьшить толщину собственного окисла на поверхности  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  [9] и снизить вероятность протекания ионных токов утечки по окисной пленке [15];
- понизить содержание углерода на поверхности InGaAsP по сравнению с уровнем, создаваемым ПХО в  $\text{CF}_4$  [17];
- привести к образованию на поверхности пленки широкозонного диэлектрика (In,Ga)/N, являющегося оптимальным промежуточным слоем между  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  и  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [18].

Первое и третье положение уже доказано нами экспериментально в предыдущей работе [11].

В настоящей работе после ПХО в  $\text{N}_2$  мы наблюдали уменьшение толщины собственного окисла на поверхности  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  от 52—55 Å до 25—30 Å. Эллипсометрические измерения подтвердили присутствие на поверхности  $\text{Si}_3\text{N}_4$  после ПХО в  $\text{N}_2$  в течение 20—30 мин пленки диэлектрика толщиной 25—35 Å с коэффициентом преломления 1,8—2,18, что соответствует коэффициенту преломления (In,Ga)/N [19].

Плотность и диэлектрическая прочность пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  увеличивалась при повышении температуры обработки поверхности в плазме  $\text{N}_2$ . Однако использование таких пленок в мезотехнологии нецелесообразно: при температуре обработки поверхности в плазме  $\text{N}_2$  при 200 °C возрастает уровень поверхностного тока (в некоторых случа-

ях на порядок). Возможно, это связано с появлением на поверхности InGaAsP (после обработки в плазме  $\text{N}_2$  при температуре 200 °C и мощности более 200 Вт) нарушенного слоя толщиной около 100 Å.

Для предотвращения возрастания  $I_T$  меза-ФД температура ПХО в  $\text{N}_2$  была снижена до 100 °C, а время выдержки, соответственно, увеличено с 10 до 30—40 мин. Такой режим привел к ухудшению сплошности пленки (плотность микропор увеличилась до 50—100 см<sup>-2</sup>), однако величина  $I_T$  сохранилась на уровне, обеспеченном предварительной обработкой в плазме  $\text{CF}_4$  (табл. 2). Адгезия пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  к поверхности  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  при этом не ухудшилась.

Для предварительной оценки эффективности предлагаемой системы обработки было проведено исследование стабильности темновых токов меза-ФД на основе  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ /InP с защитной пленкой, сформированной по описанной методике в диапазоне температур 20—120 °C. Эксперимент показал, что пленка  $\text{Si}_3\text{N}_4$  обеспечивает сохранение  $I_T$  при напряжении  $U = 10$  В на уровне 0,5—5 нА (плотность темнового тока 10<sup>-5</sup>—10<sup>-6</sup> А/см<sup>2</sup>) при  $T = 20$  °C в течение трех лет, при  $T = 75$  °C — в течение 500 часов; при  $T = 120$  °C — в течение 50 час. Более длительные эксперименты при повышенных температурах не проводились.

## Заключение

Разработана технология пассивации и защиты поверхности меза-ФД на основе гетероструктур  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ /InP, включающая обработку поверхности в плазме  $\text{CF}_4$ , отжиг в вакууме, обработку в плазме  $\text{N}_2$  с последующим осаждением пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при температуре не более 200 °C плазмохимическим методом. Технология обеспечивает получение и стабилизацию плотности темнового тока при  $U = 10$  В на уровне 10<sup>-5</sup>—10<sup>-6</sup> А/см<sup>2</sup>.

Одновременно разработана методика получения пленки  $\text{Si}_3\text{N}_4$  на поверхности  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  с плотностью микропор 0—20 см<sup>-2</sup> при диэлектрической прочности 10<sup>7</sup> В/см, перспективной для использования в качестве маскирующего покрытия при изготовлении ФД на основе указанных структур.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Д. С., Гришина Т. Н., Залетаев Н. Б. и др. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 86.
2. Болтарь К. О., Лопухин А. А., Чинарева И. В. и др. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 10.
3. Андреев Д. С., Болтарь К. О., Власов П. В. и др. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 47.
4. Kuhara Y., Terauchi H., Nishizawa H. // Journal of Lightwave Technology. 1986. V. LT-4. No. 7. P. 933.

5. Susa N., Kanbe H., Ando H., Ohmachi Y. // Japanese Journal of Applied Physics. 1980. V. 19. No. 11. P. L675.
6. Burrus C., Dentai A., Lee T. // Electronics Letters. 1979. V. 15. No. 20. P. 655.
7. Antell G. // Electronics Letters. 1984. V. 20. No. 22. P. 919.
8. Пичугин И. Г., Таиров Ю. М. Технология полупроводниковых приборов. — М.: Высшая школа. 1984.
9. Chang R. // J. Vac. Sci. Technol. 1983. V. B1. No. 4. P. 935.
10. Андреев В. М., Гореленок А. Т., Жингарев М. З. и др. // Физика и техника полупроводников. 1985. Т. 19. № 4. С. 668.
11. Андреев Д. С., Будтолаева А. К., Огнева О. В. и др. // Прикладная физика. 2014. № 3. С. 79.
12. Андреев Д. С., Гришина Т. Н., Мищенко Т. Н. и др. // Прикладная физика. 2014. № 4. С. 90.
13. Данилин Б. С. // Электронная техника. Сер. Материалы. 1983. № 9 (182) С. 3.
14. Абрамов А. А., Киселева Т. В., Прокофьев А. В. и др. // Вопросы оборонной техники. 1987. Сер. 11. № 3 (109). С. 46.
15. Агаларзаде П. С., Петрин А. И., Изидинов С. О. Основы конструирования и технологии обработки поверхности  $p$ - $n$ -перехода. — М.: Сов. радио. 1978.
16. Bayraktaroglu B. // Japanese Journal of Applied Physics. 1981. V. 52. No. 5. P. 3515.
17. Абрамов А. А., Борискина Л. В., Бояринцев П. К. и др. // Вопросы оборонной техники. 1985. Сер. 11. № 4. С. 24.
18. Capasso F., Williams G. // Journal of Electrochemical Society. 1982. V. 129. No. 4. P. 821.
19. Cardona M., Shaklee K., Pollak F. // Physical Revue. 1967. V. 154. No. 3. P. 696.

## Passivation and protection of a surface of photodiodes based on $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y/\text{InP}$ by the silicon-nitride film

D. S. Andreev<sup>1</sup>, A. K. Budtolaev<sup>1</sup>, O. V. Ogneva<sup>1</sup>, M. A. Trishenkov<sup>2</sup>, and I. V. Chinareva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Orion R&P Association Inc.  
46/2 Enthusiasts highway, 111123, Moscow, Russia  
E-mail: orion@orion-ir.ru

<sup>2</sup>Moscow State Technical University of Radio Engineering, Electronics and Automation  
78 Vernadsky av., Moscow, 119454, Russia

Received November 21, 2014

*The article considers the method of  $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_{1-y}\text{P}_y$  surface passivation and protection by its treatment in  $\text{CF}_4$  and  $\text{N}_2$  plasma and  $\text{Si}_3\text{N}_4$  film deposition using the plasma-chemical method at temperatures not exceeding 200 °C. The technology developed provides for obtaining and stabilization of dark current density at  $U = 10$  V at the level of  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>, as well as 0—20 cm<sup>-2</sup> density of microvoids with  $10^7$  V/cm dielectric strength.*

PACS: 85.60.-q

**Keywords:** dielectric film, dark current, plasma-chemical method, silicon-nitride film, density of microvoids.

### REFERENCES

1. D. S. Andreev, T. N. Grishina, N. B. Zaletaev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 86 (2012).
2. K. O. Boltar, A. A. Lopukhin, I. V. Chinareva, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 10 (2013).
3. D. S. Andreev, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 47 (2014).
4. Y. Kuhara, H. Terauchi, and H. Nishizawa, *Journal of Lightwave Technology* **LT-4**, 933 (1986).
5. N. Susa, H. Kanbe, H. Ando, et al., *Japanese Journal of Applied Physics* **19**, L675 (1980).
6. C. Burrus, A. Dentai, and T. Lee, *Electronics Letters* **15**, 655 (1979).
7. G. Antell, *Electronics Letters* **20**, 919 (1984).
8. I. G. Pichugin and Yu. M. Tairov, *Technology of Semiconductor Devices* (Vysshaya Shkola, Moscow, 1984) [in Russian].
9. R. Chang, *J. Vac. Sci. Technol.* **B1**, 935 (1983).
10. V. M. Andreev, A. T. Gorelenok, M. Z. Zhigarev, et al., *Semiconductors* **19**, 668 (1985).
11. D. S. Andreev, A. K. Budtolaeva, O. V. Ogneva, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 3, 79 (2014).
12. D. S. Andreev, T. N. Grishina, T. N. Mishchenkova, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 90 (2014).
13. B. S. Danilin, *Elektronnaya Tekhnika. Ser. Materials*, No. 9 (182), 3 (1983).
14. A. A. Abramov, T. V. Kiseleva, A. V. Prokof'ev, et al., *Voprosy Oboron. Tekhn.*, Ser. 11, No. 3 (109). 46 (1987).
15. P. S. Agalarzade, A. I. Petrin, and S. O. Izidinov, *Foundation of Designing and Technology for Treatment of Surface of the  $p$ - $n$ -Junction* (Sov. Radio, Moscow, 1978) [in Russian].
16. B. Bayraktaroglu, *Japanese Journal of Applied Physics* **52**, 3515 (1981).
17. A. A. Abramov, L. V. Boriskina, P. K. Boyarintsev, et al., *Voprosy Oboron. Tekhn.*, Ser. 11, No. 4, 46 (1985).
18. F. Capasso and G. Williams, *Journal of Electrochemical Society* **129**, 821 (1982).
19. M. Cardona, K. Shaklee, and F. Pollak, *Physical Revue* **154**, 696 (1967).