

УДК 621.315.5

Влияние плазмохимической обработки на электрические свойства фотодиодов на основе гетероструктур InGaAsP/InP

Д.С. Андреев, А.К. Будтолаева, О.В. Огнева, И.В. Чинарева

Исследовано воздействие на поверхность р-п-переходов на основе гетероструктур InGaAs/InP, изготовленных по мезотехнологии, плазмы хладона-14. В ходе экспериментов варьировались составы газовой смеси, температура и время плазмохимической обработки. Оценивался уровень темнового тока р-п-перехода, а также состояние приповерхностного слоя р-п-перехода (структурное совершенство, оптические параметры, состав) до и после обработки.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: InGaAs, мезоструктура, темновой ток, плазмохимическая обработка, пассивация поверхности.

Введение

Фотоприемники (ФП) на основе гетероструктур InGaAs/InP являются одними из наиболее перспективных в настоящее время изделий для оптико-электронных систем, работающих в диапазоне длин волн 1,0–1,6 мкм [1–3]. Их основное преимущество – малые темновые токи и шумы. В [4–6] такие ФП использовались как элемент матричного фотоприемного устройства формата 320×256. Фоточувствительный элемент (ФЧЭ) матрицы создавался по мезотехнологии, что решало проблему взаимосвязи между элементами. Однако в настоящее время величина темнового тока мезоструктур на основе InGaAs/InP на порядок выше, чем в планарных структурах.

Основной причиной высокого уровня темновых токов можно считать утечки по поверхности меза-структур, обусловленные, согласно [7], высокой химической активностью гетероструктур, которая ведет к адсорбции на поверхности ряда элементов (в первую очередь, углерода и кислорода) и синтезу на ней окислов элементов А^{III} и В^V, которые входят в состав слоев структуры, а также проводящих кислотных ионов, т.е. остатков после предыдущих химических обработок. Эта проблема требует разработки многоступенчатой технологии очистки и пассивации локальных мезаструктур.

Данная работа посвящена совершенствованию методов плазмохимической обработки мезаструктур.

Плазмохимический метод пассивации поверхности мезаструктур

Поверхность мезаструктур на основе InGaAs/InP пассивируют, используя следующие методы:

Андреев Дмитрий Сергеевич, вед. инженер.
Будтолаева Анна Константиновна, инженер.
Огнева Ольга Викторовна, главн. специалист.
Чинарева Инна Викторовна, вед. инженер.
ОАО «НПО «Орион».
Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2.
Тел.: (495) 672-20-31. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 15 мая 2014 г.
© Андреев Д.С., Будтолаева А.К., Огнева О.В.,
Чинарева И.В., 2014

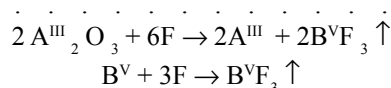
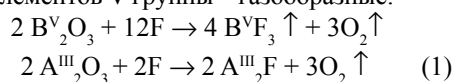
– химический – в органических и неорганических веществах [8];

– электрохимический – анодное окисление поверхности с последующим удалением пленки анодного окисла [9];

– плазмохимический – обработка в плазме O₂ [7].

Основные эксперименты в настоящей работе ставились по применению плазмохимического метода пассивации поверхности мезаструктур. Нас привлекли высокая чистота и воспроизводимость такого процесса, а также совместимость с другими операциями «сухой» технологии, а именно, нанесением диэлектрических и контактных слоев. В ходе экспериментов использовалась плазма хладона-14 (CF₄).

В соответствии с представленными ниже упрощенными уравнениями реакций, плазмохимическая обработка (ПХО) поверхности соединений А^{III}В^V в атмосфере CF₄ должна привести к образованию фторидов фосфора, мышьяка, галлия и индия; причем, согласно [10], фториды элементов III группы – твердые продукты, а фториды элементов V группы – газообразные:



В результате на обработанной поверхности должен образовываться рыхлый слой соединений А^{III}F, а элементы V группы удаляются с поверхности за счет образования легколетучих соединений.

Исходя из вышеизложенного, основной эксперимент ставился по обработке поверхности мезаструктур в плазме хладона-14. Плазмохимическая обработка (ПХО) проводилась в реакторах планарного типа. Мощность разряда, его частота, температура и время ПХО варьировались в ходе экспериментов.

Для экспериментов использовались мезаструктуры с р-п-переходами диаметром 200 мкм, сформированными диффузией Zn и выделенными в растворе HCl:HNO₃:CH₃COOH:H₂O₂ (в дальнейшем – мезадиоды).

Таблица

Зависимость темновых токов p - n -переходов от режимов ПХО в атмосфере CF_4

Режим обработки в плазме CF_4		Мощность разряда [Вт]	Темновой ток при $U = 10$ В [нА]		
T [°C]	t [час]		Миним. значение	Типичн. значение	Максим. значение
50	1	250	80	400	1500
50	1	200	20	800	800
90	0,5	300	0,3	1 – 5	20
90	0,5	250	0,3	5 – 10	30 – 40
90	0,5	200	0,3	1 - 5	50
120	0,1	300	0,3	2 – 5	10
120	0,1	250	0,3	1 – 5	20
120	0,1	200	0,3	10 – 15	20
150	0,1	200	50	100	500
150	0,5	200	100	300	1000

Величина темнового тока I_m мезодиодов до и после ПХО контролировалась при напряжении смещения $U = 10$ В. Состояние поверхности p - n -перехода до и после ПХО исследовалось с помощью эллипсометрии (определение оптических параметров приповерхностных слоев), электронографии (контроль дефектности приповерхностного слоя), Оже-спектроскопии (анализ элементного состава поверхности).

Результаты измерений величины I_m мезодиодов в зависимости от режимов ПХО поверхности p - n -переходов представлены в таблице.

Установлено, что оптимальный диапазон температур ПХО в атмосфере CF_4 – 90–120 °С, время выдержки в CF_4 – 0,1–0,5 часов. При температуре процесса более 120 °С и (или) времени ПХО более 0,5 часа наблюдалось растравливание поверхности p - n -перехода, приводившее к увеличению I_m .

Величина мощности мало влияла на равномерность процесса ПХО, однако она сказывалась на скорости удаления элемента V группы и окислов. Минимальные значения темнового тока p - n -переходов наблюдались при мощности разряда 100–200 Вт (см. таблицу). При этом время ПХО не превышало 0,1 часа. Однако при обработке в разряде мощностью > 100 Вт происходило резкое возрастание концентрации носителей заряда в приповерх-

ностном слое структуры до значения $(1-2) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. После травливания с поверхности слоя толщиной 0,05–0,06 мкм концентрация носителей заряда становилась равной $(0,1-1) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, что соответствовало уровню концентрации носителей заряда в исходных гетероструктурах (рис. 1).

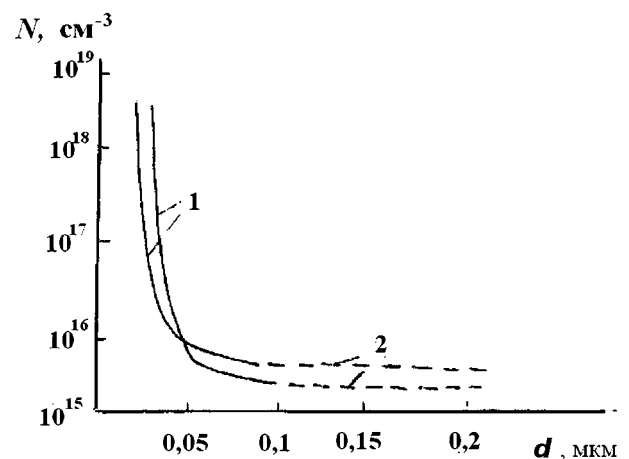


Рис. 1. Распределение концентрации носителей заряда в приповерхностном слое гетероструктуры $InGaAs/InP$: 1 – непосредственно после плазмохимической обработки, 2 – после удаления нарушенного слоя.

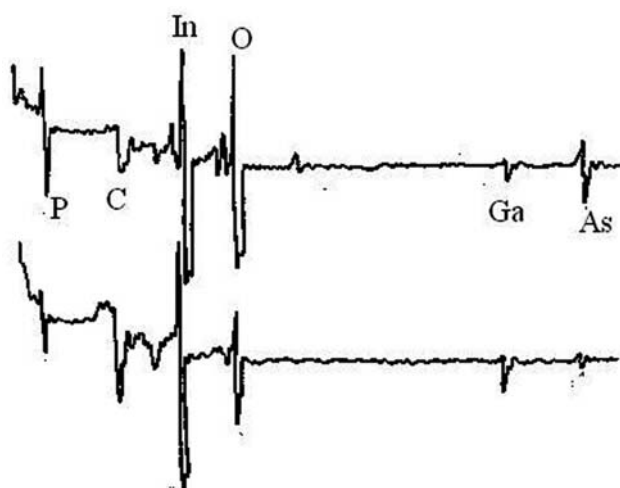


Рис. 2. Оже-спектры поверхности p - n -перехода до (вверху) и после (внизу) обработки в плазме CF_4 .

Возможно, увеличение поверхностной концентрации носителей заряда связано с образованием на поверхности радиационных дефектов при воздействии плазменного разряда мощностью более 100 Вт. Электронографические исследования поверхности InP, прошедшей ПХО в разряде такой мощности, показали присутствие на поверхности матового фона, связанного с нарушением ее монокристалличности [11]. Кроме того, после ПХО в разряде мощностью более 100 Вт наблюдались изменения эллипсометрических параметров поверхности и, которые составляли соответственно 23° и $1^\circ 20'$.

Нами не установлено влияние образующегося нарушенного слоя на величину темнового тока. Однако наличие на поверхности p - n -перехода такого слоя может приводить к нестабильности вольт-амперных характеристик ФП при длительной работе в условиях повышенных температур.

При уменьшении мощности разряда до 100 Вт толщина слоя с повышенной концентрацией носителей заряда не превышала 0,01 мкм.

Частота разряда влияла на анизотропию процесса ПХО. Согласно [12], снижение частоты приводило к росту энергии бомбардирующих радикалов. В результате уменьшалось рассеяние последних и, как следствие, повышалась анизотропия процесса. Во избежание нарушения линейных размеров выделенных мезадиодов при ПХО за счет горизонтального подтравливания поверхности, частота разряда была уменьшена до 100 кГц.

При этом подбор частоты проводился одновременно с подбором давления в реакционной зоне, т.к. при низких давлениях трудно поддерживать низкочастотный заряд. В нашем случае давление в рабочей камере – $0,7 \cdot 10^2$ Па.

Справедливость уравнений (1) подтверждалась отсутствием в Оже-спектрах поверхности p - n -перехода, обработанной в плазме CF_4 , элементов V группы, а также существенным уменьшением, по сравнению с исходным, содержанием кислорода (рис. 2).

Заключение

Таким образом, при ПХО поверхности мезаструктур на основе InGaAs/InP в атмосфере CF_4 при $T = 90$ – 120 °C в течение 0,1–0,5 часа разлагаются проводящие окислы элементов V группы и связываются свободные элементы V группы с образованием летучих (откачиваемых) фторидов этих элементов и кислорода. Одновременно окислы элементов III группы также преобразуются во фториды с выделением кислорода. Эта технология обработки позволяет обеспечить остаточную величину темнового тока p - n -переходов на уровне $1,5 \cdot 10^{-6}$ А/см².

Литература

1. Корнеева М.Д., Пономаренко В.П., Филачев А.М. // Прикладная физика. 2011. № 2. С. 47.
2. Forrest S.R., Leheny R.F., Nahory R.E. et al. // Applied Physics Letters. 1980. V. 37. P. 322.
3. Olsen G.H., Joshi A.M., Mason S.M., et al. // Proc. SPIE. 1989. V. 1157. P. 276.
4. Болтарь К.О., Чинарева И.В., Лопухин А.А. и др. // Прикладная физика. 2013. № 5. С. 10.
5. Андреев Д.С., Гришина Т.Н., Залетаев Н.Б. и др. // Прикладная физика. 2012. № 4.
6. Андреев Д.С., Болтарь К.О., Власов П.В. и др. // Прикладная физика. 2014. № 1. С. 47.
7. Capasso F., Williams G. // Journal of Electrochemical Society. 1982. V. 129. P. 821.
8. Bonner W., Camlibel I., VanViert L., et al. // Journal of Electrochemical Society. 1982. V. 129. P. 447.
9. Capasso F., Logan R. // Electronics Letters. 1980. V. 16. P. 241.
10. Справочник химика. Т.2. Основные свойства неорганических и органических соединений / Под ред. Б.Никольского. – М.: Химия. 1964.
11. Абрамов А.А., Киселева Т.В., Прокофьев А.В. и др. // Вопросы оборонной техники. 1987. Сер. 11. Вып. 3 (109). С. 46.
12. Данилин Б.С. // Электронная техника. 1983. Сер. Материалы. Вып. 9 (182). С. 3.

Influence of plasma-chemical processing on the electrical features of InGaAsP/InP photodiodes

D. S. Andreev, A. K. Budtolaeva, O. V. Ogneva, and I. V. Chinareva

Influence of plasma-chemical processing on the electrical features of InGaAsP/InP photodiodes has been investigated in this work.

PACS: 85.60.-q

Keywords: InGaAs, mesa structure, dark current, plasma-chemical processing, surface passivation.

References

1. M. D. Korneeva, V. P. Ponomarenko, and A. M. Filachev, *Prikladnaya Fizika*, No. 2, 47 (2011).
2. S. R. Forrest, R. F. Lehenym R. E. Nahory, et al., *Applied Physics Letters* **37**, 322 (1980).
3. G. H. Olsen, A. M. Joshi, S. M. Mason, et al., *Proc. SPIE* **1157**, 276 (1989).
4. K. O. Boltar, I. V. Chinareva, A. A. Iopukhin, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 5, 10 (2013).
5. D. S. Andreev, T. N. Grishina, N. B. Zaletaev, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 4, 47 (2012).
6. D. S. Andreev, K. O. Boltar, P. V. Vlasov, et al., *Prikladnaya Fizika*, No. 1, 47 (2014).
7. F. Capasso and G. Williams, *Journal of Electrochemical Society* **129**, 821 (1982).
8. W. Bonner, I. Camlibel, L. VanViert, et al., *Journal of Electrochemical Society* **129**, 447 (1982).
9. F. Capasso and R. Logan, *Electronics Letters* **16**, 241 (1980).
10. *Hand Book of a Chemist, Vol. 2*. Ed. by B. Nikolsky (Khimiya, Moscow, 1964) [in Russian].
11. A. A. Abramov, T. V. Kiseleva, et al., *Voprosy Oboron. Tekhn. Ser. 11*, No.3 (109), 46 (1987).
12. B. S. Danilin, *Elektron. Tekhn. Ser. Materially. No.9* (182), 3 (1983).