

УДК 621.315.5:621.383

Влияние параметров быстрого отжига на ВАХ фотодиодов на основе ГЭС GaN/AlGaN

М.В. Седнев, Д.В. Смирнов, В.Е. Степанюк

В данной работе исследовано влияние параметров быстрого термического отжига (БТО) в вакууме или инертной среде на вольт-амперные характеристики, сформированных травлением ионами Ar^+ , фотодиодов на основе ГЭС GaN/AlGaN. Целью работы являлся подбор оптимальных параметров отжига фотодиодных структур GaN/AlGaN с соответствующими параметрами вольт-амперных характеристик: дифференциальные сопротивления диодов и контактов при нулевом смещении R_0 , R_k .

PACS: 07.57.Kp, 85.60.Dw

Ключевые слова: фотодиод, термический отжиг, гетероэпитаксиальные структуры, УФ диапазон.

Введение

Фотодиоды (ФД) на основе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) GaN/AlGaN в последнее время находят все более широкое применение в области детектирования излучения ультрафиолетового (УФ) диапазона спектра [1–7]. В то же время совершенствуется технология изготовления с целью улучшения параметров и повышения надежности диодов [8]. Отдельное внимание уделяется формированию хорошо воспроизводимых низкоомных металлических контактов [9–13].

В данной работе исследовано влияние параметров быстрого термического отжига (БТО) в вакууме или инертной среде на вольт-амперные характеристики, сформированных травлением ионами Ar^+ фотодиодов на основе ГЭС GaN/AlGaN. При этом целью работы являлся подбор оптимальных параметров отжига фотодиодных структур GaN/AlGaN с соответствующими параметрами вольт-амперных характеристик: дифференциальные сопротивления диодов и контактов при нулевом смещении R_0 , R_k .

Экспериментальные исследования

В исследовании были использованы образцы матричных фоточувствительных элементов (МФЧЭ) формата 320×256 элементов с шагом 30 мкм, сформированных на основе видимо-слепых (ВС) и солнечно-слепых (СС) $p-i-n$ УФ фотодиодных ГЭС GaN/AlGaN, выращенных на оптически прозрачных сапфировых подложках методами МОС-гидридной и молекулярно-лучевой эпитаксии [8].

Выбранная архитектура на основе гетероструктуры из AlGaN/GaN состояла из:

– прозрачной в УФ диапазоне спектра сапфировой подложки;

– буферного слоя AlN для уменьшения плотности дислокаций в последующих слоях структуры;

– высоколегированного фильтрующего, уменьшающего плотность дефектов слоя AlGaN n^+ -типа проводимости, состав которого зависел от выбранного типа ФПУ (солнечно-слепой диапазон – $Al_{0.64}Ga_{0.36}N$; видимо-слепой диапазон – $Al_{0.23}Ga_{0.77}N$) и к которому формировался n -контакт. Данный слой имеет ширину запрещенной зоны большую по сравнению с поглощающим слоем, для того чтобы фотоны могли достигать рабочего фоточувствительного слоя, не поглощаясь в нем. Состав фильтрующего слоя определяет коротковолновую границу спектральной чувствительности;

– поглощающего слоя (солнечно-слепой диапазон – $Al_{0.45}Ga_{0.55}N$; видимо-слепой диапазон – GaN) собственного типа проводимости с шириной запрещенной зоны, обеспечивающей эффективное поглощение излучения в заданном спектральном диапазоне, состав которого определял длинноволновую границу спектральной чувствительности;

– фотодиодного слоя $Al_{0.45}Ga_{0.55}N$ /GaN p -типа проводимости;

– высоколегированного слоя GaN p^+ -типа проводимости, к которому формировался p -контакт.

Технология изготовления ультрафиолетового фотоприемного модуля формата 320×256 элементов на основе гетероэпитаксиальных структур AlGaN представляла собой совокупность большого числа технологических операций, оптимальная организация которых имела большое значение для производства изделия формата 320×256 элементов. Наиболее критическими технологическими операциями изготовления ФПУ являлись:

– прецизионное формирование мезаструктур в ГЭС AlGaN;

– пассивация поверхности $p-i-n$ -областей, подвергнутых бомбардировке ионами Ar^+ при формировании мезадиодов;

– формирование омических контактов к областям p - и n -типов проводимости;

– измерение сверхмалых значений темнового тока;

Для изготовления МФЧЭ использовалась мезатехнология, включающая прецизионное ионно-лучевое травление структуры и последовательное напыление слоев

Седнев Михаил Васильевич, начальник участка
Смирнов Дмитрий Валентинович, инженер
Степанюк Владимир Евгеньевич, начальник участка
ОАО «НПО «Орион».
Россия, 111123, Москва, ш. Энтузиастов, 46/2.
Телефон: 495-3739400.
E-mail: orion@orion-ir.ru

металлических контактов к p - и n -областям. Для «залечивания» дефектов, возникающих на поверхности p - i - n -областей под действием бомбардировки ионами при формировании мезодиодов, проводился отжиг.

Отжиг матриц фотодиодов с контактами выполнялся на установке инфракрасного светового отжига с водородным и азотным модулями. Нагрев осуществляется 18-ю инфракрасными галогеновыми лампами по 1 кВт,

расположенными сверху и снизу рабочей камеры. Рабочая камера изготовлена из кварцевого стекла со встроенной системой подачи и отвода газа. Лоток изготовлен тоже из кварцевого стекла. Рабочие температуры – от 50 °С до 650 °С. Скорость нагрева – до 75 град/с, скорость охлаждения – до 3 град/с (от 600 °С до 400 °С), скорость охлаждения – до 0,5 град/с (от 400 °С до 100 °С). Рабочие газы: N_2 , H_2 , Ar и другие неагрессивные газы.

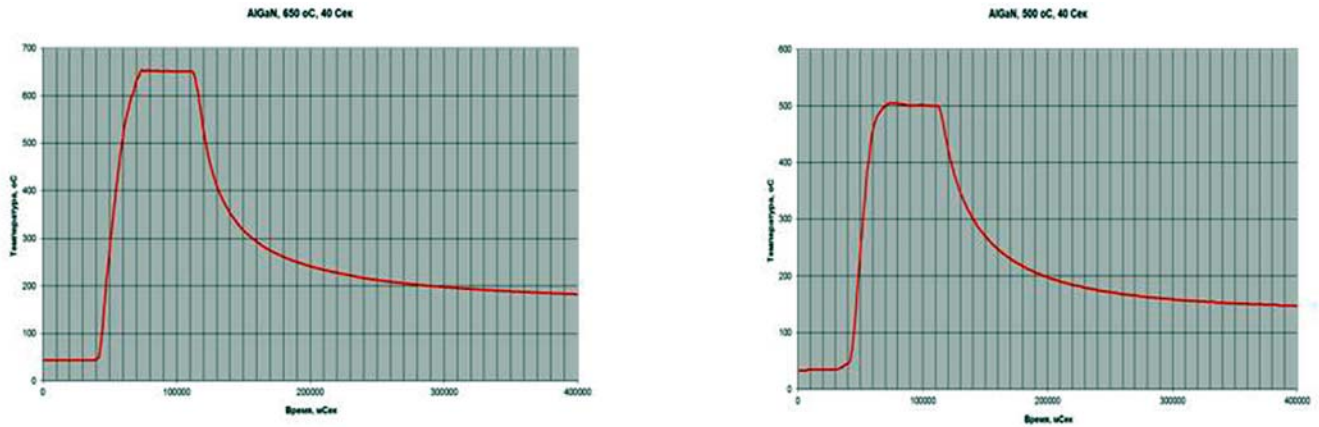


Рис. 1. Типичные термограммы.

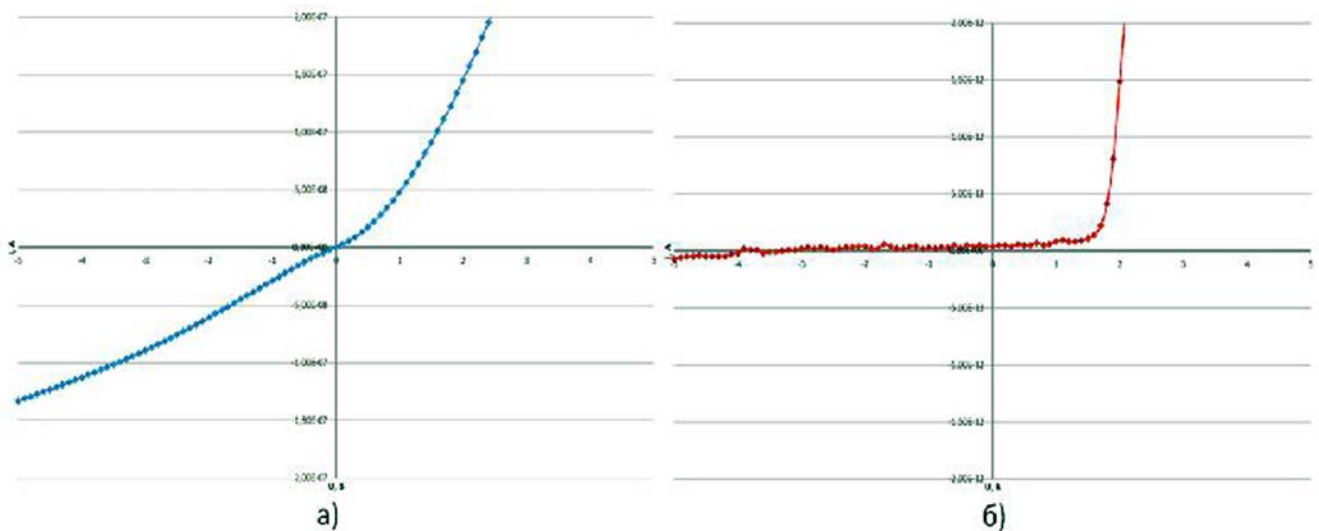


Рис. 2. Типичные ВАХ элементов матрицы BC V-1914(3): а) без термической обработки; б) после БТО (600 °С, 40 с, N_2).

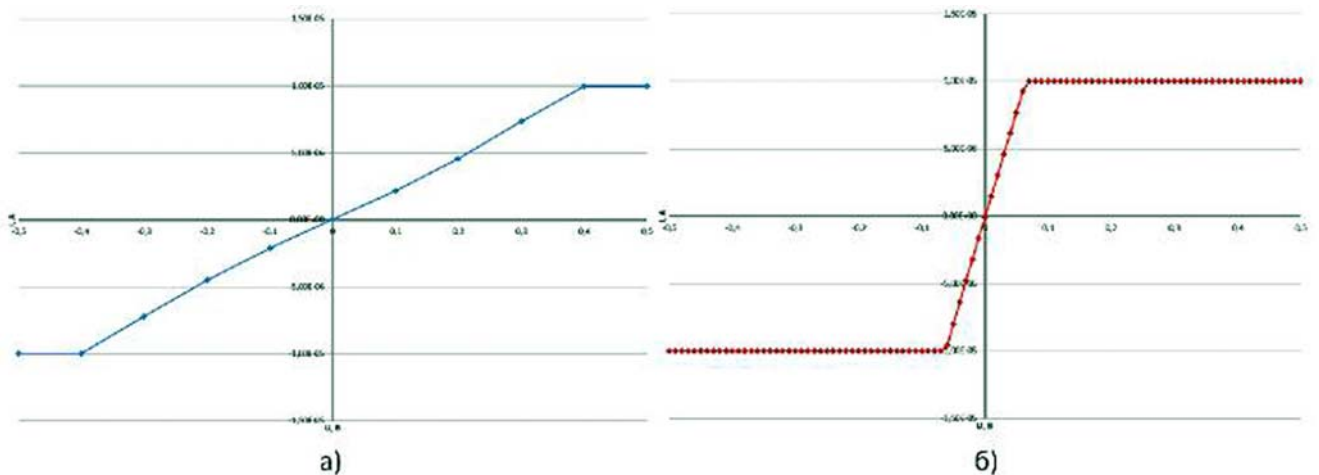


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики металлических контактов к p^+ -области. Измерения выполнены в диапазоне токов менее 1,0 мкА.

Таблица

Влияние параметров быстрого термического отжига(БТО) на дифференциальное сопротивление фотодиодных структур GaN/AlGaN и сопротивление контактов к n и p областям

№ образца, структура, нм	Тип металлизации	Время отжига, с	Температура отжига, °С	Раб.среда и ост. давление, Па	R ₀ , Ом	R _к , Ом
BC V-1639(2)-1 A p ⁺ GaN(250) p-GaN(300) i-GaN(300) n-Al _{0.25} Ga _{0.75} N(600)	p ⁺ : Ni-Au (300-100 Å) n ⁺ : Ti-Al-Mo-Au (300-1500-1000-1000 Å)	Без отжига	---	---	2.5×10 ¹⁰	p ⁺ : 1.25×10 ⁷ n ⁺ : 3.0×10 ⁴
		400	400	N ₂	1.5×10 ¹¹	p ⁺ : 2.3×10 ¹⁰ n ⁺ : 1.75×10 ⁴
		500	500	N ₂	1.0×10 ¹³	n ⁺ : 2.0×10 ⁴
		600	600	N ₂	2.5×10 ¹³	n ⁺ : 4.0×10 ³
		40	650	N ₂	1.0×10 ¹³	n ⁺ : 2.0×10 ³
CC 831-5 p ⁺ -GaN(250) pi-Al _{0.45} Ga _{0.55} N(225) ni-Al _{0.45} Ga _{0.55} N(215) n ⁺ -Al _{0.65} Ga _{0.35} N(520)	p ⁺ : Ni-Au (300-100 Å) n ⁺ : ---	Без отжига	---	---	3.0×10 ¹¹	---
		120	600	Вакуум, 1×10 ⁻³	2.5×10 ¹²	---
BC V-1639(2)-2 p ⁺ GaN(250) p-GaN(300) i-GaN(300) n-Al _{0.25} Ga _{0.75} N(600)	p ⁺ : Ni-Au (300-100 Å) n ⁺ : ---	Без отжига	---	---	3.0×10 ¹¹	p ⁺ : 1.25×10 ¹³
		60	600	Вакуум, 1×10 ⁻³	2.0×10 ¹³	p ⁺ : 2.0×10 ¹¹
BC V-1639(2)-1B p ⁺ GaN(250) p-GaN(300) i-GaN(300) n-Al _{0.25} Ga _{0.75} N(600)	p ⁺ : Ni-Au (300-100 Å) n ⁺ : Ti-Al-Mo-Au (300-1500-1000-1000 Å)	Без отжига	---	---	2.5×10 ¹⁰	p ⁺ : 1.25×10 ⁷ n ⁺ : 3.0×10 ⁴
		40	600	Вакуум, 1×10 ⁻³	1.0×10 ¹³	---
BC V-1639-3 p ⁺ GaN(250) p-GaN(300) i-GaN(300) n-Al _{0.25} Ga _{0.75} N(600)	p ⁺ : Ni-Au (300-100 Å) n ⁺ : Ti-Al-Mo-Ni-Au (300-1500-500-500-1000 Å)	Без отжига	---	---	5.6×10 ⁷	n ⁺ : 6.0×10 ⁴
		40	600	N ₂	3.75×10 ¹³	n ⁺ : 1.0×10 ⁴
BC V-1914(1) p ⁺ GaN(220) p-GaN(330) i-GaN(300) n-Al _{0.25} Ga _{0.75} N(820)	p ⁺ : Ni-Au (300-100 Å) n ⁺ : Ti-Al-Mo-Ni-Au (300-1500-1000-500-1000 Å)	Без отжига	---	---	8.0×10 ⁹	n ⁺ : 1.0×10 ³
		40	600	N ₂	2.0×10 ¹³	n ⁺ : 2.0×10 ⁴
BC V-1914(3) p ⁺ GaN(220) p-GaN(330) i-GaN(300) n-Al _{0.25} Ga _{0.75} N(820)	p ⁺ : Ni-Au (300-100 Å)	Без отжига	---	---	4.2×10 ⁷	n ⁺ : 5.0×10 ⁴
		40	600	N ₂	5.0×10 ¹³	n ⁺ : 6.7×10 ³
CC V-1893-2 p ⁺ -GaN(290) p-Al _{0.45} Ga _{0.55} N(200) i-Al _{0.45} Ga _{0.55} N(200) n-Al _{0.65} Ga _{0.35} N(710)	p ⁺ : Ni-Au (300-100 Å) n ⁺ : Va-Al-Ni-Au (300-1000-300-1000 Å)	Без отжига	---	---	5.0×10 ¹³	n ⁺ : 2.5×10 ¹⁰
		180	600	Вакуум, 1×10 ⁻³	2.5×10 ¹³	n ⁺ : 6.0×10 ³

Температура отжига варьировалась в пределах от 400 до 650 °С. Время отжига составляло 40, 60, 120 и 180 секунд. Типичные термограммы представлены на рис. 1. Исследуемые образцы устанавливались на подложках из

кремниевых пластин толщиной 380 мкм для более равномерного нагрева снизу со стороны оптически прозрачного материала AlGaIn. Отжиг осуществлялся в атмосфере азота N₂ чистой 99,999% и скоростью потока 2 л/с.

Отжиг в вакууме осуществлялся при остаточном давлении $\sim 1 \cdot 10^{-3}$ Па на установке термического напыления. Образцы устанавливались непосредственно в резистивно нагреваемый элемент. Скорость роста температуры на образцах контролировалась термопарой и составляла 2 град/с.

Измерения вольт-амперных характеристик проводились до и после процесса отжига исследуемых образцов на зондовой установке, разработанной для измерений параметров полупроводниковых структур, обеспечивающей измерение тока до 10^{-13} А.

В ходе исследований проводилось варьирование параметров отжига: температуры, времени и рабочей среды. На некоторых образцах отжиг проводился без формирования металлизации к n^+ -области. Структура исследуемых образцов и результаты исследований параметров ВАХ представлены в таблице.

Как видно из таблицы, после отжига дифференциальное сопротивление диодов возрастает на несколько порядков. Наибольший эффект был обнаружен на структурах с архитектурой для видимо-слепого диапазона.

Типичные вольт-амперные характеристики фотодиодов и металлических контактов до и после отжига представлены на рис. 2 и 3.

Заключение

Проведено исследование влияния параметров (температуры, времени и рабочей среды) быстрого отжига на ВАХ фотодиодов на основе ГЭС GaN/AlGaIn. Выбраны оптимальные параметры БТО для исследуемых фотодиодных структур.

Показана эффективность быстрого отжига для пассивации поверхности $p-i-n$ -областей, подвергнутых бомбардировке ионами Ag^+ при формировании мезодиодов.

Оптимальными параметрами отжига для получения фотодиодов с большим дифференциальным сопротивлением и напряжением пробоя, а также малым сопротивлением омических контактов являются: $T = 600$ °С, $t = 40$ с, рабочая среда – N_2 .

Лучшие мезаструктуры фотодиодов размером 25×25 мкм после термической обработки имели сопротивление при нулевом смещении $> 3,0 \cdot 10^{13}$ Ом и темновые токи $< 10^{-13}$ А. Сопротивление металлических омических контактов к n^+ -области составляло 10^3 – 10^4 Ом.

Литература

1. Филачев А.М., Таубкин И.И., Трищенко М.А. Твердотельная фотоэлектроника. Фотодиоды. – М.: Физматкнига, 2011.
2. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. // ФТП. 2003. Т. 37. № 9. С. 1025.
3. Han J., Waldrip K.E., Lee S.R., Figiel J.J., et al. // Applied Physics Letters. 2001. V. 78. No. 1. P. 67.
4. McClintock R., Yasan A., Mayes K., et al. // Applied Physics Letters. 2004. V. 84. No. 8. P. 1248.
5. Long J.P., Varadaraajan S., Matthews J., et al. // Opto-Electron. Rev. 2002. V. 10. No. 4. P. 251.
6. Khan M. Asif, Shatalov M., Maruska H.P., et al. // Journal of Applied Physics. 2005. V. 44. No. 10. P. 7191.
7. Reine M. B., Hairston A., Lamarre P., et al. // Proc. SPIE V. 6119.
8. Болтарь К.О., Бурлаков И.Д., Яковлева Н.И., и др. // Успехи прикладной физики. 2013. Т. 1. № 3. С. 344.
9. Boratynski B., Macherzynski W., Drozdziel A., et al. // Journal of Electrical Engineering. 2009. V. 60. No. 5. P. 273.
10. Chary I., Borisov B., Kuryatkov V., et al. // Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 2009. V. 1108. P. 1108-A09-30.
11. Kim K. H., Jeon Ch. M., Oh S. H., et. al. // Phys. Stat. Sol. 2002. No. 1. P. 223.
12. Feng Q., Li L. M., Hao Y., et al. // Solid State Electronics. 2009. V. 53. P. 955.
13. Lan Y.L., Lin H.C., Liu H.H., et al. // Proc. SPIE. V. 7216. P. 72162P.

Current–voltage characteristics of AlGaIn photodiodes after rapid annealing

M. V. Sednev, D. V. Smirnov, and V.G. Stepanyuk

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

Received March 15, 2014

Current-voltage characteristics of photodiodes based on GaN/AlGaIn, differential resistance of diodes and contacts at zero bias after rapid thermal annealing (RTA) has been investigated. 320x256 photodiodes arrays with a pitch of 30 microns formed on the basis of visible-blind (VB) and solar-blind (SB) p-i-n UV photodiode GaN/AlGaIn heteroepitaxial structures, MOCVD and MBE grown on optically transparent sapphire substrates have been used in the study.

PACS: 07.57.Kp, 85.60 Dw

Keywords: photodiode, thermal annealing, heteroepitaxial structures, UV range.

References

1. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *Solid-State Photoelectronics. Photodiodes*. (Fizmatkniga, Moscow, 2011) [in Russian].
2. T. V. Blank and Yu. A. Goldberg, *Semiconductors* **37**, 1025 (2003).
3. J. Han, K. E. Waldrip, S.R. Lee, et al., *Applied Physics Letters* **78**, 67 (2001).
4. R. McClintock, A. Yasan, K. Mayes, et al., *Applied Physics Letters* **84**, 1248 (2004).
5. J. P. Long, S. Varadaraajan, J. Matthews, et al., *Opto-Electron. Rev.* **10**, 251 (2002).
6. Khan M. Asif, M. Shatalov, H. P. Maruska, et al., *Journal of Applied Physics* **44**, 7191 (2005).
7. M. B. Reine, A. Hairston, P. Lamarre, et al., *Proc. SPIE* **6119**.
8. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, N. I. Yakovleva, et al., *Uspekhi Prikladnoi Fiziki* **1**, 344 (2013).
9. B. Boratynski, W. Macherzynski, A. Drozdziel, et al., *Journal of Electrical Engineering* **60**, 273 (2009).
10. I. Chary, B. Borisov, V. Kuryatkov, et al., *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.* **1108**, 1108-A09-30 (2009).
11. K. H. Kim, Ch. M. Jeon, S. H. Oh, et al., *Phys. Stat. Sol.*, No. 1, 223 (2002).
12. Q. Feng, L. M. Li, Y. Hao, et al., *Solid State Electronics* **53**, 955 (2009).
13. Y.L. Lan, H. C. Lin, H. H. Liu, et al., *Proc. SPIE.* **7216**, 72162P.