

Влияние энергии ионов при воздействии азотной плазмы на постоянные токи насыщения НЕМТ-транзисторов на основе нитридов III группы

Н. А. Андрианов, П. А. Панкратьев, А. С. Смирнов

В работе изучалось воздействие плазменной обработки в среде азота на DC-характеристики НЕМТ-транзисторов. Показано, что падение токов насыщения транзистора в результате плазменной обработки высокоэнергетичными ионами может быть связано с образованием на поверхности GaN cap-слоя транзисторной структуры зарядовых рассеивающих центров, которые приводят к кулоновскому рассеянию носителей в 2DEG канале, что приводит к падению тока насыщения приборов.

Ключевые слова: азотная плазма, плазменная обработка, НЕМТ, AlGaIn/GaN, RFEA.

Ссылка: Андрианов Н. А., Панкратьев П. А., Смирнов А. С. // Прикладная физика. 2018. № 5. С. 82.

Reference: N. A. Andrianov, P. A. Pankratiev, and A. S. Smirnov, Prikl. Fiz., No. 5, 82 (2018).

Введение

Гетеропереходы на основе нитридов III группы открывают возможности для создания нового поколения мощных высокочастотных полевых транзисторов [1], способных работать в условиях высоких температур и агрессивных сред [2]. Но технология производства транзисторов с высокой подвижностью электронов (т. н. НЕМТ-транзисторов) на основе AlGaIn/GaN сопряжена с рядом сложностей. В частности, пассивация диэлектриком является одной из ключевых проблем для получения мощного AlGaIn/GaN НЕМТ-транзистора [3]. Известно, что предварительная плазменная обработка поверхности GaN cap-слоя перед процессом нанесения диэлектрической пленки играет важную роль в активации поверхности и улучшении адгезии этой диэлектрической пленки, оказывая существенное воздействие на электрофизические характеристики прибора [4].

Целью данной работы являлось исследование особенностей воздействия плазменной пре-

добработки поверхности GaN cap-слоя AlGaIn/GaN НЕМТ-транзистора в емкостном газовом разряде азота (N_2) перед PECVD-осаждением (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) диэлектрической пленки SiN_x . При этом в ходе работы с помощью энергоанализатора производилось измерение спектров энергий ионов, бомбардирующих подложку во время такой плазменной обработки.

Эксперимент

Для анализа воздействий разряда в азоте на постоянные (DC) токи насыщения в экспериментах использовались НЕМТ-гетероструктуры AlGaIn/GaN с верхним cap-слоем GaN толщиной 20 \AA , выращенные на подложках SiC методом МВЕ (Molecular Beam Epitaxy). На структурах были сформированы омические контакты и мезаизоляция. Предварительно были измерены вольт-амперные характеристики (ВАХ) на специальных тестовых элементах с целью определения величин токов насыщения $I_{ис}$. Затем, исследуемые образцы поочередно помещались в установку PECVD, где обрабатывались в азотной плазме. Плазменная обработка осуществлялась при фиксированных параметрах: время обработки – 1 мин; температура столика – $100 \text{ }^\circ\text{C}$; поток азота – $400 \text{ см}^3/\text{мин}$; давление – 600 мТорр . Варьированию подвергались частота ВЧ-генератора и мощность, вкладываемая в разряд.

Эксперимент по измерению спектра энергии ионов в газовом разряде азота проводился на установке, аналогичной той, что использовалась ранее для исследования воздействия плазмы на НЕМТ-

Андрианов Николай Александрович¹, старший инженер-технолог.

Панкратьев Павел Александрович², студент.

Смирнов Александр Сергеевич², профессор, д.ф.-м.н.

¹ АО «Светлана Рост».

Россия, 194156, Санкт-Петербург, пр. Энгельса, 27.

E-mail: andrianov.nickolai@gmail.com

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого.

Россия, 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

Статья поступила в редакцию 17 мая 2017 г.

© Андрианов Н. А., Панкратьев П. А., Смирнов А. С., 2018

структуры. Но в данной установке была предусмотрена камера с дифференциальной откачкой, которая была соединена с поверхностью анода реактора установки. В данной камере с дифференциальной откачкой находился энергоанализатор, предназначенный для измерения спектра энергии ионов, бомбардирующих поверхность анода. Подробное устройство энергоанализатора и принцип его работы можно найти в работах [5, 6]. В эксперименте давление в камере и вкладываемая в разряд мощность фиксировались и равнялись 200 мТорр и 40 Вт соответственно. Варьированию подвергалась частота плазменного ВЧ-генератора (440 кГц, 1,76 МГц, 13,56 МГц).

Результаты и их обсуждение

Ток насыщения $I_{ИС}$ НЕМТ-транзистора определяет мощность конечного прибора и является одним из ключевых параметров транзистора. Анализ изменения токов насыщения показал, что уменьшение частоты ВЧ-генератора с 13,56 МГц до 100 кГц приводит к катастрофическому падению тока насыщения, а именно, в пять раз (см. рис. 1). Плазменная обработка на частоте ге-

нератора 13,56 МГц при ВЧ-мощности на уровне 100 Вт практически не влияет на величину тока насыщения (рис. 2, а). При этом, увеличение мощности ВЧ-разряда в два раза вызывает уменьшение тока насыщения на величину порядка 20 % (рис. 2, б).

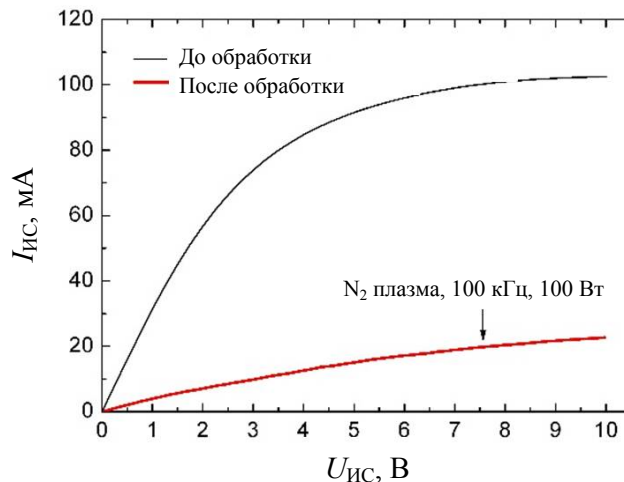


Рис. 1. Изменение токов насыщения после плазменной обработки в среде N_2 на частоте 100 кГц и при мощности 100 Вт.

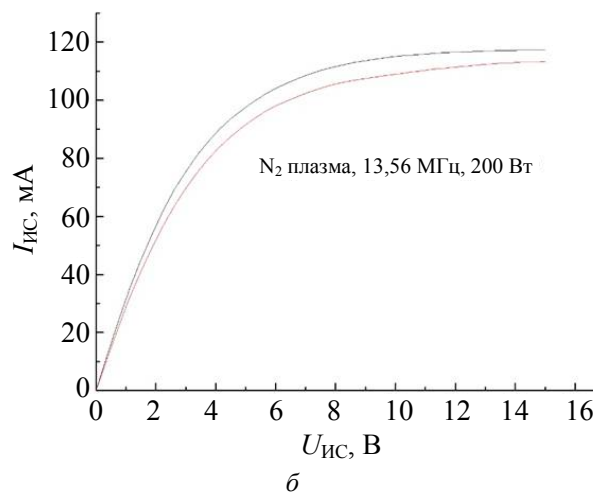
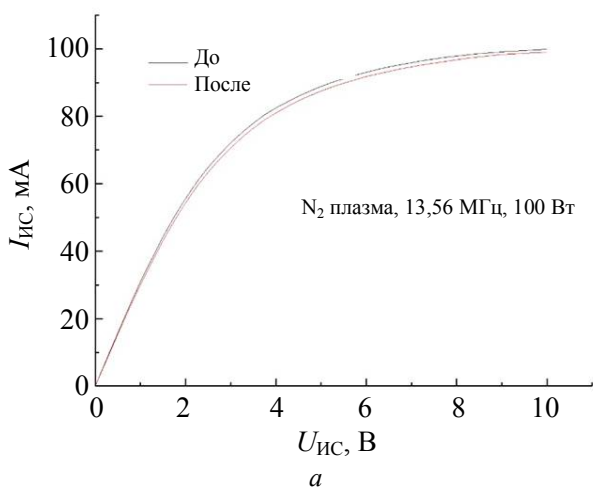


Рис. 2. Изменение токов насыщения после плазменной обработки в среде N_2 на частоте 13,56 МГц и мощности 100 Вт (а) и 200 Вт (б).

Наблюдаемые изменения тока насыщения требуют выяснения механизма воздействия плазмы и поиска путей решения проблемы падения тока насыщения, вызванного плазменной обработкой. Для создания рабочих гипотез были дополнительно измерены спектры оптического излучения из плазмы. Такой анализ показал наличие как в низкочастотном разряде (100 кГц), так и в случае высокой мощности (200 Вт) в высокочастотном

разряде (13,56 МГц) высокой интенсивности линии на длине волны 391,4 нм (рис. 3), которая обусловлена ионами N_2^+ [7]. Из-за отсутствия других отличительных черт низкочастотного или мощного разряда именно эта особенность связывается в работе с деградацией токов насыщения прибора.

Представляется, что такое изменение интенсивности линии связано с увеличением доли ионов N_2^+ в плазме разряда [8].

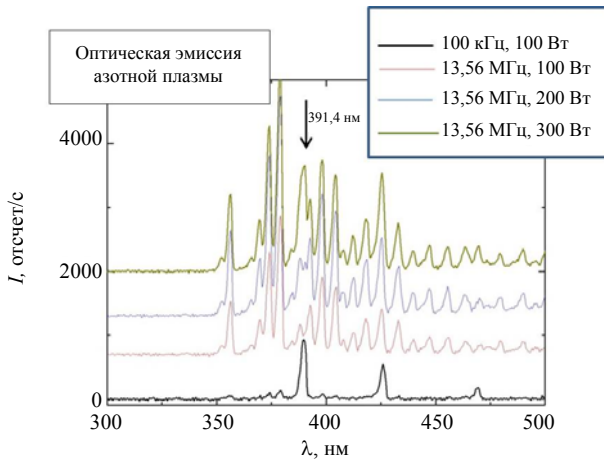


Рис. 3. Спектр оптической эмиссии азотной плазмы на частотах разряда 100 кГц и 13,56 МГц.

Функции распределения ионов по энергиям, измеренные с помощью энергоанализатора, приведены на рис. (рис. 4).

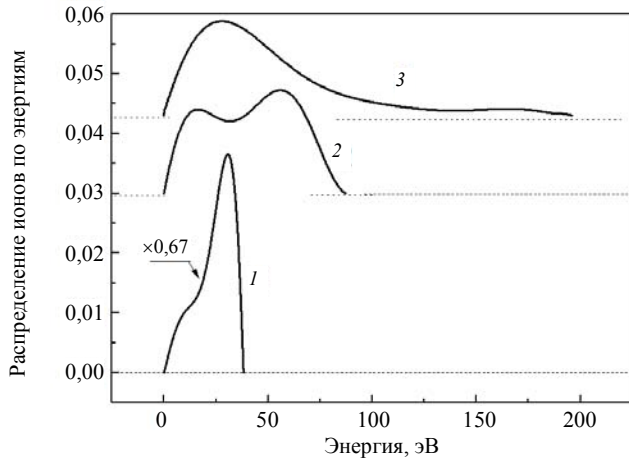


Рис. 4. Энергетический спектр ионов в разряде N_2 при давлении 200 мТорр, мощности генератора 40 Вт. Частота плазменного генератора: 1 – 13,56 МГц; 2 – 1,76 МГц; 3 – 440 кГц.

Как показано на рис. 4, в разряде на частоте 13,56 МГц максимальная энергия ионов не превышает значения $E_{\max} = 40$ эВ. Напротив, с понижением частоты возникает высокоэнергичная

часть спектра, и при частоте генератора 440 кГц энергии ионов могут достигать 200 эВ. Необходимо подчеркнуть, что бомбардировка высокоэнергетичными ионами N_2^+ , которая приводит к деградации токов насыщения транзисторов, не связана с физическим ионным распылением, так как за один час обработки образцов GaN в N_2 -плазме не было обнаружено детектируемых следов травления.

Для объяснения причин падения токов насыщения в результате бомбардировки высокоэнергетичными молекулярными ионами N_2^+ была подготовлена тестовая НЕМТ-структура, идентичная той, что использовалась для оценки величины падений токов насыщения. Данная структура была разделена на четыре образца, на которых были произведены измерения подвижности и концентрации носителей в 2DEG канале стандартным методом Ван дер Пау. Подвижность и концентрация носителей на образцах составляли $1100 \text{ см}^2/(\text{В с})$ и $1,3 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Результаты плазменной обработки в газовом разряде в среде N_2 на частоте 100 кГц, в течение 5, 10, 20 и 60 секунд приведены в таблице. Можно видеть, что при увеличении времени плазменной обработки происходит существенное падение подвижности двумерных электронов. Так, увеличение времени обработки с 5 до 10 секунд приводит к падению подвижности почти в два раза, хотя концентрация электронов при этом изменяется не более чем на 10 %. Тем не менее, увеличение времени плазменной обработки приводит также и к уменьшению концентрации электронов в канале транзистора.

Падение токов насыщения транзисторных НЕМТ-структур можно объяснить уменьшением подвижности носителей в канале транзистора, поскольку именно подвижность определяет величину тока насыщения НЕМТ [9, 10]. Описанный ранее режим плазменной обработки не приводит к распылению и травлению структуры AlGaIn/GaN, а энергии ионов недостаточны для проникновения глубже, чем на несколько монослоев.

Таблица

Изменение подвижности и концентрации носителей в НЕМТ-структуре в результате плазменной обработки в газовом разряде в среде N_2 на частоте 100 кГц

Образец	Длительность обработки, с	Подвижность, $\text{см}^2/(\text{В с})$	Концентрация, см^{-3}
1	None	1100	$1,3 \times 10^{13}$
2	5	1000	$1,2 \times 10^{13}$
3	10	580	$1,1 \times 10^{13}$
4	20	460	$1,0 \times 10^{13}$
5	60	105	$1,2 \times 10^{12}$

Заключение

В работе показано, что падение токов насыщения транзистора в результате плазменной обработки высокоэнергетичными ионами типа N_2^+ может быть связано с образованием на поверхности GaN *cap*-слоя транзисторной структуры зарядовых рассеивающих центров, которые приводят к кулоновскому рассеянию носителей в 2DEG канале, что и приводит к падению тока насыщения приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mishra U. K., Parikh P., Wu Y. // Proceedings of the IEEE. 2002. Т. 90. P. 1022.

2. Tilak V., Motacha K., Sandvik P. // Phys. Stat. Sol. C. 2005. Vol. 2. No. 7. P. 2555.

3. Green B. M., Chu K. K., Chumbers E. M. et al. // IEEE Electron Device Letters. 2000. Vol. 21. No. 6. P. 268.

4. Romero M.-F., Jimenez A. et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2012. Vol. 59. No. 2. P. 374.

5. Смирнов А. С., Уставщиков А. Ю., Фролов К. С. // ЖТФ. 1995. Т. 65. Вып. 8. С. 38.

6. Кобелев А. А., Андрианов Н. А., Хилькевич Е. М., Черноизюмская Т. В., Смирнов А. С. // Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 6. С. 608.

7. Zhang L., Zhao S., Meng X. // Plasma science and technology. 2008. Vol. 10. No. 4. P. 455.

8. Андрианов Н. А., Вознюк Е. В., Кокин С. В. Нитриды галлия, индия и алюминия – структуры и приборы. – М.: 2015.

9. Зи С. // Физика полупроводниковых приборов. 1981. С. 450.

10. Linkohr S., Pletschen W., Polyakov V. et al. // Phys. Stat. Solidi C. 2012. Vol. 9. No. 3–4. P. 1096.

PACS: 85.30.De, 85.30.Tv, 84.30.Jc

Influence of ion energy when exposed to nitrogen plasma on the constant saturation currents of HEMT transistors based on group III nitrides

N. A. Andrianov^{1,2}, P. A. Pankratiev², and A. S. Smirnov²

¹ Svetlana Rost, JSC

27 Engels av., Saint-Petersburg, 194156, Russia

E-mail: andrianov.nickolai@gmail.com

² Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University

29 Politekhnikeskaya str., Saint-Petersburg, 195251, Russia

Received May 31, 2018

The effect of plasma treatment in the N_2 medium on the HEMT characteristics was studied. It is shown that the drop in saturation currents of a transistor as a result of plasma processing by high-energy ions can be associated with the formation of a transistor structure of charge scattering centers on the GaN surface of the cap layer, which lead to Coulomb scattering of carriers in the 2DEG channel, which leads to a drop in the saturation current of the devices.

Keywords: N_2 plasma, plasma treatment, HEMT, AlGaIn/GaN, RFEA.

REFERENCES

1. U. K. Mishra, P. Parikh, and Y. Wu. Proceedings of the IEEE. **90**, 1022 (2002).

2. V. Tilak, K. Motacha., and P. Sandvik. Phys. Stat. Sol. C. **2** (7), 2555 (2005).

3. B. M. Green, K. K. Chu, E. M. Chumbers et al. IEEE Electron Device Letters. **21** (6), 268 (2000).

4. M. F. Romero, A. Jimenez et al. IEEE Transactions on Electron Devices. **59** (2), 374 (2012).

5. A. S. Smirnov, A. Yu. Ustavshikov, and K. S. Frolov. Technical Physics. **65** (8), 38 (1995).

6. A. A. Koblelev, N. A. Andrianov, E. M. Hilkevich, T. V. Chernoisumskaya, and A. S. Smirnov. Usp. Prikl. Fiz. **5** (6), 608 (2017).

7. L. Zhang, S. Zhao, and X. Meng. Plasma science and technology. **10** (4), 455 (2008).

8. N. A. Andrianov, E. V. Voznuk, and S. V. Kokin. GaN, InN and AlN – structures and devices 10. 136 (2015).

9. S. Sze. Physics of semiconductor devices. 450 (1981).

10. S. Linkohr, W. Pletschen, V. Polyakov et al. Phys. Stat. Solidi C. **9** (3–4), 1096 (2012).