МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА. ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 536.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ В ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВОЙ ЯМОЙ AlGaN/GaN МЕТОДОМ ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

О.А. Рубан[@], аспирант П.П. Мальцев, д.т.н., профессор

Кафедра наноэлектроники Физико-технологического института МИРЭА, Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, 119454 Россия [®]Автор для переписки, e-mail: myx.05@mail.ru

На основе измерений вольт-фарадных характеристик GaN-HEMT в настоящей работе определены степени релаксации напряжения в барьерном слое AlGaN/GaN гетероструктур. Образцы выращены на подложках Al₂O₃ методом осаждения металлорганических соединений из газообразной фазы. С целью проведения вольт-фарадных измерений для всех исследуемых HEMT-структур созданы двухзатворные HEMT. Из измеренных вольт-фарадных характеристик получено значение поляризации $P_{\rm exp}$ внутри каждой HEMT-структуры. На основании анализа вольт-фарадных характеристик обнаружены электронные ловушки. По модифицированной модели Амбахера рассчитаны значения спонтанной $P_{\rm sp}$ и пьезоэлектрической $P_{\rm pz}$ поляризаций. Полученные значения $P_{\rm exp}$, $P_{\rm sp}$ и $P_{\rm pz}$ для каждой HEMT-структуры позволили определить значение степени релаксации напряжения R в барьерном слое. Показана возможность применения вольт-фарадных характеристик для оценки качества кристаллической структуры барьерного слоя в AlGaN/GaN-гетероструктуре.

Ключевые слова: наноструктуры, нитрид галия, вольт-фарадные характеристики, пьезоэффект.

INVESTIGATION OF POLARIZATION IN HETEROSTRUCTURES WITH THE QUANTUM WELL AIGaN / GaN USING CAPACITANCE-VOLTAGE CHARACTERISTICS

O.A. Ruban[@], P.P. Maltsev

Moscow Technological University (MIREA), Moscow, 119454 Russia [®]Corresponding author e-mail: myx.05@mail.ru

In the present study, the degree of relaxation of tension in the barrier layer of heterostructures AlGaN / GaN on the basis of measurements of the capacitance-voltage characteristics GaN-HEMT is determined. Samples were grown on Al_2O_3 substrates by deposition of organometallic compounds from a gaseous phase. In order to conduct capacitance-voltage measurements, dualgate HEMT were created for all these tested HEMT-structures. From the measured capacitance-

voltage characteristics, the P_{exp} polarization value within each HEMT-structure was obtained. By analyzing the capacitance-voltage characteristics, electron traps were found. According to the modified model by Ambacher, spontaneous P_{sp} values and piezoelectric polarization P_{pz} were calculated. Obtained values P_{exp} , P_{sp} and P_{pz} for each HEMT-structure allowed to determine the value of the relaxation degree of tension *R* in the barrier layer. Thus, the possibility of application of the capacity-voltage characteristics for evaluating the quality of the crystal structure of the barrier layer in the heterostructure AlGaN / GaN is shown.

Keywords: nanostructures, gallium nitride, capacitance-voltage characteristics, piezoelectric effect.

Введение

Транзисторы с высокой подвижностью электронов HEMT (*High-electron-mobility transistor*) на основе широкозонных гетероструктур AlGaN/GaN широко применяются в мощных приемо-передающих CBЧ-устройствах с рабочими частотами свыше 8 ГГц [1]. В основе НЕМТ лежит гетероструктура с двухмерным электронным газом в квантовой яме. Для моделирования и последующего изготовления CBЧ-приборов на основе GaN-HEMT необходимо иметь комплексное представление о гетероструктуре: состоянии слоев, образующих квантовую яму, наличии электронных ловушек и концентрации электронов в канальном слое. В гетероструктурах AlGaN/GaN полярная природа соединений GaN и AlGaN приводит к их спонтанной поляризации P_{sp} [2, 3]. Кроме того, из-за растягивающих латеральных напряжений на границе раздела AlGaN/GaN, вызванных рассогласованием кристаллических решеток, возникает пьезоэлектрическая поляризация P_{sum} которая приводит к возникновению встроенного электрического поля. Данное поле вызывает накопление зарядов в квантовой яме, образуя двумерный электронный газ.

В настоящее время используется множество разнообразных методов измерения параметров полупроводниковых материалов и среди них – методы вольт-фарадных характеристик. Обращает на себя внимание отличительная черта данных методов, в которых исследуется не монолитный полупроводник, а структура на основе полупроводника, обладающая емкостью: металл–полупроводник, металл–диэлектрик–полупроводника, обладающая емкостью: металл–полупроводник, металл–диэлектрик–полупроводника (МДП-структура) или *p*–*n*-переход. С их помощью проводят измерения концентрации легирующих примесей, глубоких уровней и их характеристик, генерационного времени неравновесных носителей заряда, плотности поверхностных состояний и их распределения по энергиям [6, 7]. В настоящей работе использован метод измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ).

Предметом настоящей статьи является разработка способа проведения анализа качества барьерных слоев гетероструктуры с помощью ВФХ.

Экспериментальная часть

Исследуемые гетероструктуры AlGaN/GaN выращивали на подложках Al_2O_3 методом осаждения металлорганических соединений из газообразной фазы (МОС-гидридная эпитаксия). Для усиления пьезоэффекта использовали слой AlN толщиной 7 Å, период кристаллической решетки а этого слоя меньше, чем у GaN и AlGaN (*a* для GaN = 3.16 Å и *a* для AlN = 3.11 Å, соответственно [7]). В исследуемых гетероструктурах сформирована квантовая яма с треугольным потенциальным профилем на гетерогранице AlN/GaN. Зонная диаграмма гетероструктуры с треугольной квантовой ямой представлена на рис. 1.



Рис. 1. Зонная диаграмма HEMT AlGaN/GaN; на выносе показано направление пьезоэлектрической поляризации в слое AlN.

Необходимо отметить, что исследуемые гетероструктуры различались толщиной и составом барьерного слоя. В гетероструктуре образца **2** сформирован барьерный слой $Al_{0.29}Ga_{0.71}N$ толщиной 24 нм, а в гетероструктуре образца **1** – барьерный слой $Al_{0.32}Ga_{0.68}N$ толщиной 14 нм. Вследствие меньшей толщины барьерного слоя образец 1 имеет меньшую подзатворную емкость, что позволяет получить более высокий диапазон рабочих частот. Конструкция исследованных гетероструктур схематически представлена на рис. 2.

		1	GaN	1.8 nm	
Al _{0.32} Ga _{0.68} N	14 nm		Al _{0.29} Ga _{0.71} N	24 nm	
AIN	0.7 nm				
			AlN	0.7 nm	
GaN	2.6 µm	4	GaN	2.5 µm	
Al ₂ O ₃ substarate		Al ₂ O ₃ substarate			
a			б б		

Рис. 2. Схема слоев и толщина гетероструктур исследуемых образцов: а – образец 1; б – образец 2.

Для проведения вольт-фарадных измерений на поверхности исследуемых гетероструктур создавали тестовые двухзатворные транзисторы. Топология и фотографические изображения тестовых транзисторов показаны на рис. 3.

Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) снимали на приборе Hewlett-Packard Precision LCR Меter, США. В ходе измерений использовали омический контакт (сток) и контакт Шоттки (затвор). Исследование поляризации в гетероструктурах с квантовой ямой AlGaN/GaN методом вольт-фарадных характеристик





Результаты и их обсуждение

Измеренные нами ВФХ показаны на рис. 4.



Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики для образца 1 (а) и для образца 2 (б).

Полученные кривые позволили с помощью стандартной процедуры дифференцирования [9] рассчитать распределение концентрации носителей заряда N в зависимости от расстояния от поверхности образца x (рис. 5):

$$N(x) = \frac{C^3}{e\varepsilon\varepsilon_0 S^2} \frac{dU}{dC},$$

где *е* – заряд электрона;

- е диэлектрическая проницаемость;
- ε₀ диэлектрическая постоянная;
- C измеренная емкость;
- *S* площадь контакта Шоттки.

Из рис. 5а видно, что в образце 1, в отличие от образца 2, обнаружены пики, соответствующие не только квантовой яме, но и заряженным ловушкам, причем концентрация носителей заряда в данных ловушках достигает значений, сравнимых с квантовой ямой.

(1)



Рис. 5. Распределение электронной плотности в гетероструктурах для образцов 1 (а) и 2 (б).

Это свидетельствует о том, что в барьерном слое присутствуют ловушки для электронов.

Для определения экспериментального значения поляризации P_{exp} использовали следующее выражение:

$$P_{exp} = -(\varepsilon - 1)\varepsilon_0 \frac{dU}{dx}$$

Чтобы рассчитать пьезоэлектрическую составляющую поляризации, мы модифицировали модель Амбахера [10] путем замены полностью упруго деформированного слоя GaN, выращенного на релаксированном слое AlGaN, на полностью упруго деформированный слой AlN, выращенный на релаксированном слое GaN, так как в исследуемых гетероструктурах была сформирована треугольная квантовая яма, а не прямоугольная, как в модели Амбахера. Результатом модификации известной модели является совпадение направлений пьезоэлектрической и спонтанной составляющих поляризации. Суммарная поляризация, являющаяся суперпозицией составляющих, создает поле, приводящее к возникновению электронов в квантовой яме. Расчет пьезоэлектрической составляющей *Р*_{nz} осуществляли по следующей формуле:

$$P_{pz} = 2\frac{a - a_0}{a_0}(e_{31} - e_{33}\frac{C_{13}}{C_{33}})$$

(3)

(2)

где a_0 – значение решетки для GaN;

а – значение решетки для AlN;

 e_{31}, e_{33} – пьезомодули AlN;

С₁₃, С₃₃ – коэффициенты упругой жесткости AlN.

Пьезоэлектрическая составляющая поляризации будет соответствовать полностью упруго деформированному барьерному слою.

Степень релаксации R определяли из отношения значений пьезоэлектрических со-

Исследование поляризации в гетероструктурах с квантовой ямой AlGaN/GaN методом вольт-фарадных характеристик

ставляющих поляризации, определенных из эксперимента через измерение вольт-фарадных характеристик, и из модифицированной модели Амбахера, согласно следующему выражению:

(4)

$$R = (1 - \frac{P_{exp} - P_{sp}}{P_{pz}}) \cdot 100\%,$$

Результаты приведены в таблице. Видно, что для образца 2 определенное из эксперимента значение поляризации P_{exp} совпадает с рассчитанным суммарным значением поляризации P_{sum} . Это объясняется тем, что барьерный слой имеет низкую степень релаксации. В образце $1 P_{exp}$ совпадает со значением для спонтанной поляризации P_{sp} [14, 15], что указывает на отсутствие пьезоэлектрической компоненты в данном образце вследствие высокой степени релаксации R, обусловленной протеканием процесса пластической деформации. Так как на распределении электронной плотности в барьерных слоях присутствуют ловушки (рис. 5а), можно предположить, что ими являются заряженные дислокационные линии [11–13]. Из данных, представленных в таблице, следует вывод, что в образце 2 барьерные слои пластически деформированы, поскольку экспериментальное значение поляризации совпадет с рассчитанным по модифицированной модели Амбахера. При этом ловушки не образуются, что видно из распределения электронной плотности (рис. 56).

Поляризации и степени релаксации в исследованных НЕМТ-структурах: полученная из эксперимента P_{exp} , спонтанная P_{sp} , пьезоэлектрическая P_{pz} поляризации и степень релаксации напряжения R

No official	Р _{ехр} , Кл/м ²		D 0/		
л⊍ооразца		Р _{рг} , Кл/м²	<i>P</i> _{sp} , Кл/м²	<i>P</i> _{sum} , Кл/м²	π, %
	-0.095	-0.052	-0.09	-0.142	90.4
2	-0ю138				7.7

Заключение

1. В результате расчета профиля концентрации электронов, основанном на измерении ВФХ, обнаружены электронные ловушки, природу которых можно интерпретировать как заряженные дислокационные линии в барьерном слое образца 1. Установлено отсутствие заряженных дислокационных линий в образце 2.

2. Расчет поляризации на основании экспериментальных данных и модифицированной модели Амбахера позволил определить степень релаксации барьерных слоев в исследуемых гетероструктурах.

Предложенный метод ВФХ обеспечивает возможность определения необходимых для создания монолитной интегральной схемы (МИС) параметров. В случае использования ртутного зонда метод ВФХ применим в качестве входного контроля пластин для уточнения расчетной модели при создании МИС, в результате увеличивается выход годных элементов и уменьшается расход дорогостоящих материалов.

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ, проект № 16-32-00552 «Исследование электрофизических и кристаллографических свойств гетероструктур AIGaN/GaN для мощных CBЧ-транзисторов».

Литература:

1. Федоров Ю.В. Широкозонные гетероструктуры (Al,Ga,In)N и приборы на их основе для миллиметрового диапазона длин волн // ЭЛЕКТРОНИКА: наука, технология, бизнес. 2011. Т. 2 (00108). С. 92–107.

2. Bernardini F., Fiorentini V., Vanderbilt D. Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides // Phys. Rev. B. 1997. V. 56. P. R10 024– R10 027.

3. Bernardini F., Fiorentini V. Macroscopic polarization and band offsets at nitride heterojunctions // Phys. Rev. B. 1998. V. 57. P. R9427–R9430.

4. Zoroddu A., Bernardini F., Ruggerone P., Fiorentini V. First-principles prediction of structure, energetics, formation enthalpy, elastic constants, polarization, and piezoelectric constants of AlN, GaN, and InN: comparison of local and gradient-corrected density-functional theory // Phys. Rev. B. 2001. V. 64. P. 045208(6).

5. Fiorentini V., Bernardini F., Sala F.D., Carlo A.D., Lugli. P. Effects of macroscopic polarization in III-V nitride multiple quantum wells // Phys. Rev. B. 1999. V. 60. P. 8849–8858.

6. Иванов П.А., Потапов А.С., Николаев А.Е., Лундин В.В., Сахаров А.В., Цацульников А.Ф., Афанасьев А.В., Романов А.А., Осачев Е.В. Вольт-фарадные характеристики МДП структур (Al/Ti)/Al2O3/n-GaN // Физика и техника полупроводников. 2015. Т. 49. № 8. С. 1061–1064.

7. Супрядкина И.А., Абгарян К.К., Бажанов Д.И., Мутигуллин И.В. Исследование поляризаций нитридных соединений (Al,Ga,AlGa)N и зарядовой плотности различных интерфейсов на их основе // Физика и техника полупроводников. 2013. Т. 47. № 12. С. 1647–1652.

8. Стрельченко С.С., Лебедев В.В. Соединения А³В⁵. М.: Металлургия, 1984. С. 121.

9. Смирнов В.И. Неразрушающие методы контроля параметров полупроводниковых материалов и структур. Ульяновск: УлТУ, 2012. 75 с.

10. Ambacher O. Growth and applications of Group III-nitrides // J. Phys. D. 1998. V. 31. P. 2653–2710.

11. Тяпунина Н.А., Белозерова Э.П. Заряженные дислокации и свойства щелочногалоидных кристаллов // Успехи физических наук. 1988. Т. 156. С. 683–717.

12. Алексеев А.Н., Петров С.И., Красовицкий Д.М., Чалый В.П., Мамаев В.В., Сидоров В.Г. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. Т. 9 (158). С. 24–32.

13. Алексеев А.Н., Петров С.И., Красовицкий Д.М., Чалый В.П. // Физика и техника полупроводников. 2012. Т. 46. Вып. 11. С. 1460–1463.

14. King-Smith R.D., Vanderbilt D. Theory of polarization of crystalline solids // Phys. Rev. 1993. V. B 47. P. 1651–1654.

15. Polarization Effects in Semiconductors. From Ab Initio Theory to Device Applications / Ed. C. Wood and D. Jena. USA: Springer, 2008. 515 p.