

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ РЕЛАКСАЦИИ В БАРЬЕРНЫХ СЛОЯХ ГЕТЕРОСТРУКТУР AlGaN/GaN МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ ВОЛЬТ-ФАРАДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

© 2016 г. Н.Е. ИВАНОВА, О.А. РУБАН, Н.В. ЗЕНЧЕНКО, С.С. АРУТЮНЯН

Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники
Российской академии наук, г. Москва,
Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов
Российской академии наук, г. Черноголовка
e-mail: isvch@isvch.ru, arutyunyanspartak@gmail.com

Введение

В настоящей работе определялись степени релаксации напряжения в барьерных слоях в барьерном слое AlGaN/GaN гетероструктур, на основе измерений вольт-фарадных характеристик, GaN-HEMT. Образцы были выращены на подложках Al₂O₃ методом осаждения металлоорганических соединений из газообразной фазы. Для всех исследуемых HEMT-структур были проведены вольт-фарадные измерения, для этого были созданы двухзатворные HEMT. Из измеренных вольт-фарадных характеристик было получено значение поляризации P_{exp} внутри каждой HEMT-структуры. С помощью анализа вольт-фарадных характеристик были обнаружены электронные ловушки. По модифицированной модели Амбахера были рассчитаны значения спонтанной P_{sp} и пьезоэлектрической P_{pz} поляризаций. Используя значения P_{exp} , P_{sp} и P_{pz} , для каждой HEMT-структуры было определено значение степени релаксации напряжения R в барьерном слое. Таким образом, была показана возможность применения вольт-фарадных характеристик для оценки качества кристаллической структуры барьерного слоя в AlGaN/GaN гетероструктуре.

Цели работы

Транзисторы с высокой подвижностью электронов HEMT (High-electron-mobility transistor) на основе широкозонных гетероструктур AlGaN/GaN широко применяются в мощных приемо-передающих СВЧ-устройствах с рабочими частотами свыше 8 ГГц [1]. В основе HEMT лежит гетероструктура с двумерным электронным газом в квантовой яме.

Для моделирования и последующего изготовления СВЧ приборов на основе GaN HEMT необходимо иметь комплексное представление о гетероструктуре: состояние слоев, образующих квантовую яму, наличие электронных ловушек и концентрация 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 несогласованием кристаллических решеток, возникает пьезоэлектрическая поляризация P_{pz} [4, 5]. В итоге на границе раздела AlGaN/GaN возникает суммарная поляризация P_{sum} , которая приводит к возникновению встроенного электрического поля. Данное поле вызывает накопление зарядов в квантовой яме, образуя двумерный электронный газ.

Для измерения параметров полупроводниковых материалов в настоящее время используется большое количество разнообразных методов. Одним из них является метод вольт-фарадных характеристик. Одной из отличительных черт этих методов является то, что исследуется не монолитный полупроводник, а структура на основе

полупроводника, обладающая емкостью: металл–полупроводник, металл–диэлектрик–полупроводник (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 был использован метод измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ).

Целью настоящей работы является разработка способа для проведения анализа качества барьерных слоев гетероструктуры с помощью ВФХ.

Экспериментальная часть

Исследовались гетероструктуры AlGaIn/GaN, выращенные на подложках Al₂O₃ методом осаждения металлорганических соединений из газообразной фазы (МОС-гидридной эпитаксии). Для усиления пьезоэффекта был использован слой AlN толщиной 7 Å, период кристаллической решетки *a* этого слоя меньше чем у GaN и AlGaIn (*a*GaN=3,16 Å и *a*AlN= 3,11 Å соответственно). В исследуемых гетероструктурах была сформирована квантовая яма с треугольным потенциальным профилем на гетерогранице AlN/GaN.

Исследуемые гетероструктуры различались толщиной и составом барьерного слоя. В гетероструктуре образца 2 был сформирован барьерный слой Al_{0.29}Ga_{0.71}N толщиной 24 нм, а в гетероструктуре образца 1 был сформирован барьерный слой Al_{0.32}Ga_{0.68}N толщиной 14 нм. Вследствие меньшей толщины барьерного слоя образец 1 имел меньшую подзатворную емкость, что позволяет получить более высокий диапазон рабочих частот.

Для проведения вольт-фарадных измерений на поверхности исследуемых гетероструктур были созданы тестовые двухзатворные транзисторы. Использование подобной топологии позволяет производить измерение ВФХ.

Снятие ВФХ проводилось с помощью прибора Hewlett-Packard Precision LCR Meter. При измерениях использовались омический контакт (сток) и контакт Шоттки (затвор).

Результаты и их обсуждения

Распределения концентрации носителей заряда *N* от расстояния от поверхности образца *x* (рис. 1), рассчитывалось на основе снятых вольт-фарадных характеристик с помощью стандартной процедуры дифференцирования:

$$N(x) = \frac{C^3}{e\epsilon\epsilon_0 S^2} \frac{dU}{dC} \quad (1)$$

где *e* – заряд электрона, ϵ – диэлектрическая проницаемость, ϵ_0 – диэлектрическая постоянная, *C* – измеренная емкость, *S* – площадь контакта Шоттки.

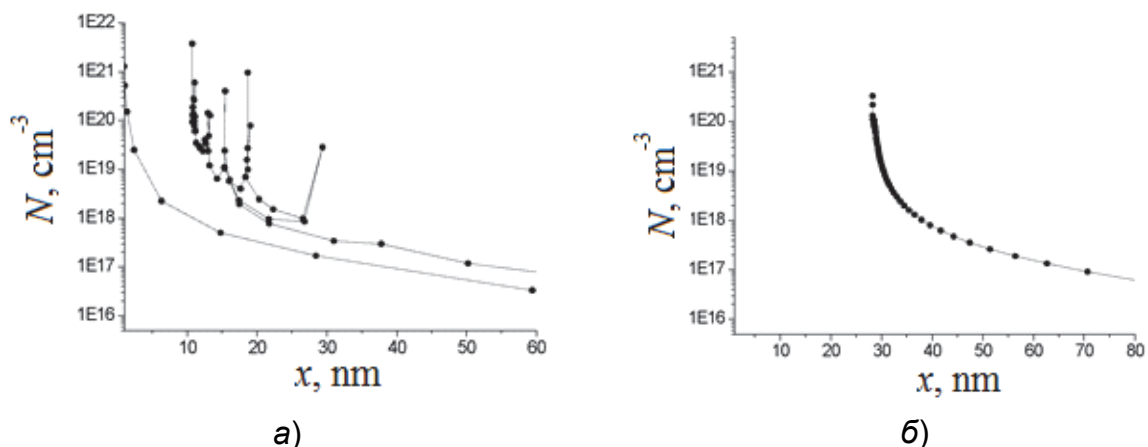


Рис. 1. Графики распределения электронной плотности в гетероструктурах для образца 1 (а) и для образца 2 (б).

Из рис. 1, а, видно, что в отличие от образца 2, в образце 1 пики, соответствующие не только квантовой яме, но и заряженным ловушкам, причем концентрация носителей заряда в данных ловушках достигает значений сравнимых с квантовой ямой. Это говорит о том, что в барьерном слое присутствуют ловушки для электронов.

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

$$P_{exp} = -(\epsilon - 1)\epsilon_0 \frac{dU}{dx} \quad (2)$$

Для расчета пьезоэлектрической составляющей поляризации была модифицирована модель Амбахера путем замены полностью упруго деформированного слоя GaN, выращенного на релаксированном слое AlGaN, на полностью упруго деформированный слой AlN, выращенный на релаксированном слое GaN. Результатом этого 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 P_{pz} проводился по следующему выражению:

$$P_{pz} = 2 \frac{a - a_0}{a_0} (e_{31} - e_{33} \frac{C_{13}}{C_{33}}) \quad (3)$$

где a_0 – значение решетки для GaN, a – значение решетки для AlN, e_{31} , e_{33} – пьезомодули AlN, C_{13} , C_{33} – коэффициенты упругой жесткости AlN.

Пьезоэлектрическая составляющая поляризации будет соответствовать полностью упруго деформированному барьерному слою. Степень релаксации была определена из отношения значений пьезоэлектрических составляющих поляризации, определенных из эксперимента, через измерение вольт-фарадных характеристик, и из модифицированной модели Амбахера, согласно следующему выражению:

$$R = (1 - \frac{P_{exp} - P_{sp}}{P_{pz}}) * 100\% \quad (4)$$

Результаты расчетов, приведенные в табл. 1, показали, 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} , что говорит об отсутствии пьезоэлектрической компоненты в данном образце вследствие высокой степени релаксации R , что объясняется протеканием процесса пластической деформации. Так как на распределении электронной плотности в барьерных слоях (рис. 1, а) присутствуют ловушки то можно предположить, что ими являются заряженные дислокационные линии. Из данных представленных в табл. 1, можно сделать вывод, что в образце 2 барьерные слои пластически деформированы, так как экспериментальное значение поляризации совпадает с рассчитанной по модифицированной модели Амбахера, что приводит к тому, что ловушки не образуются, что видно из распределения электронной плотности (рис. 1, б).

Таблица 1

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

№ образца	P_{exp} , Кл/м ²	P_{sp} , Кл/м ²	P_{pz} , Кл/м ²	R , %
1	-0,095	-0,09	-0,052	90
2	-0,105			71
3	-0,119			44

Заключение

Предложенный метод позволяет определить необходимые для создания монолитной интегральной схемы (МИС) параметры. В случае использования ртутного зонда, предложенный метод применим в качестве входного контроля пластин для уточнения расчетной модели при создании МИС, в результате чего увеличивая выход годных элементов и уменьшая расход дорогостоящих материалов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (соглашение о предоставлении субсидии № 14.607.21.0124, уникальный идентификатор проекта RFMEFI60715X0124).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев П.П., Федоров Ю.В., Галиев Р.Р., Михайлович С.В., Гнатюк Д.Л. Нитридные приборы миллиметрового диапазона // Наноиндустрия, №3, 49, 2014, 47с.
2. Ambacher O. Growth and applications of Group III-nitrides // Journal of Physics D: Applied Physics, 31, 1998, p2653 – 2710.
3. 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.
4. Bernardini F. et al. Spontaneous polarization and piezoelectric constants of III-V nitrides // Phys. Rev. B. 1997. V. 56. P. R10 024– R10 027.
5. Bernardini F. et al. Macroscopic polarization and band offsets at nitride heterojunctions // Phys. Rev. B. 1998. V. 57. P. R9427– R9430.
6. Zoroddu A. 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).