

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНОЙ РЕЛАКСАЦИИ В НЕМТ НА ОСНОВЕ НИТРИД-ГАЛЛИЕВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУР НА ИХ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

¹Алёшин А. Н., ¹Рубан О. А., ²Табачкова Н. Ю.

¹ФГАНУ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН, г. Москва, Россия, E-mail: mux.05@mail.ru

²Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва, Россия

В работе представлены исследования электро-физических и структурных свойств транзисторов с высокой подвижностью электронов (НЕМТ - High electron mobility transistor) на основе широкозонных гетероструктур, состоящих из барьерного слоя постоянного состава $\text{Al}_{0,32}\text{Ga}_{0,68}\text{N}$ с тонкой вставкой из AlN с толщиной 0,7 нм и толстого буферного слоя GaN (~ 1,5 мкм) (рис. 1а). В основе исследуемых гетероструктур лежит квантовая яма с двумерным электронным газом с треугольным профилем потенциала. Такая квантовая яма (КЯ) формируется за счет наличия потенциального барьера и сил электростатического потенциала. Зонная диаграмма и пространственное распределение концентрации электронов $N(z)$ в КЯ гетероструктуры показаны на рис. 1б.

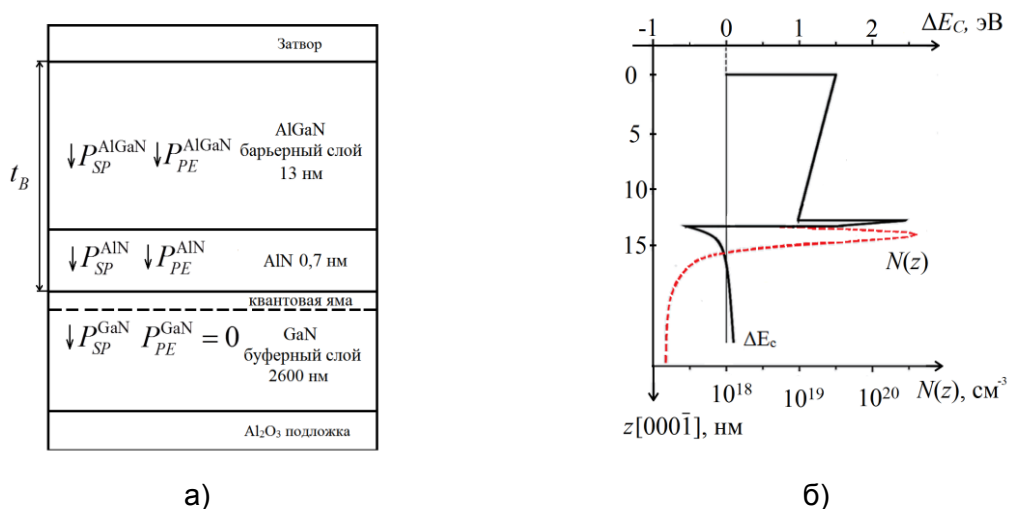


Рисунок 1 – Исследуемые гетероструктуры: а) схема строения гетероструктуры и векторы поляризации в слоях гетероструктуры, б) дно зоны проводимости $\Delta E_c(z)$ и пространственное распределение концентрации электронов $N(z)$ в КЯ гетероструктуры. Символами P_{SP} и P_{PE} обозначены вектора спонтанной и пьезоэлектрической поляризации соответственно

Цель работы состояла в выявлении связи между кристаллическим совершенством барьерного слоя в AlGaN в нитрид-галлиевых гетероструктурах и частотными характеристиками НЕМТ на их основе с помощью измерения вольт-фарадных характеристик (ВФХ).

По результатам измерений ВФХ двух десятков образцов были выявлены две группы гетероструктур с резко отличающимися характеристиками. Характерные зависимости ВФХ для этих групп приведены на рис. 2. Образцы в первой группе имели монотонные ВФХ (рис. 2а), а у образцов второй группы наблюдается N -образная зависимость на ВФХ (рис. 2б).

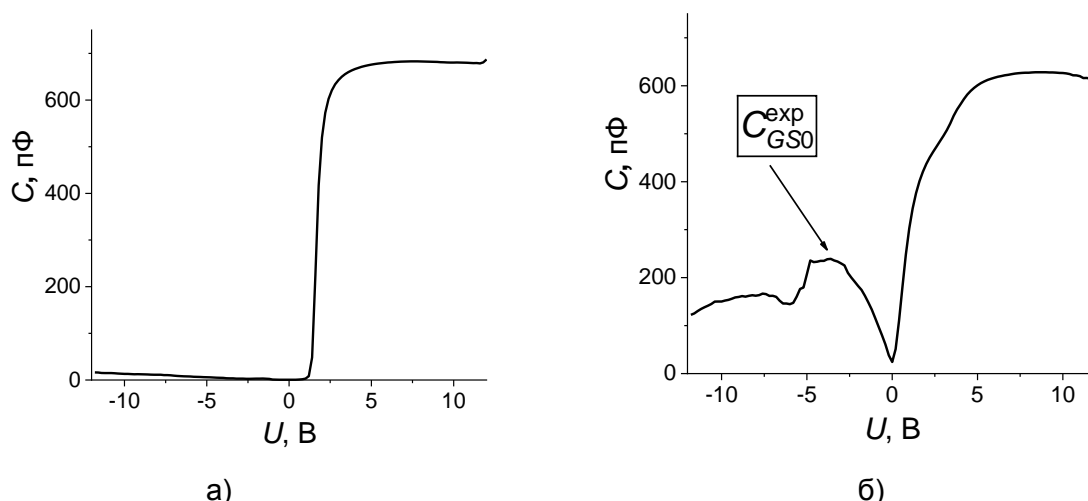


Рисунок 2 – ВФХ гетероструктур AlGaIn/GaN с тонкой вставкой AlN для образцов 2226(а) и 27(б). Символом U обозначено приложенное напряжение смещения, а C – измеряемая емкость

На рис. 3 показаны пространственные распределения концентрации электронов $N(z)$ для образцов 2226 (из первой группы) и 27 (из второй группы). В отличие от образца 2226 у образца 27 в барьерном слое видны дополнительные концентрационные всплески. Это связано с присутствием заряженных ловушек, которые создают область пространственного заряда и увеличивает подзатворную емкость НЕМТ. На ВФХ это выражается в виде локального максимума в области отрицательных напряжений смещения, что позволяет по его величине определить экспериментальное значение удельной подзатворной емкости C_{GS0}^{exp} .

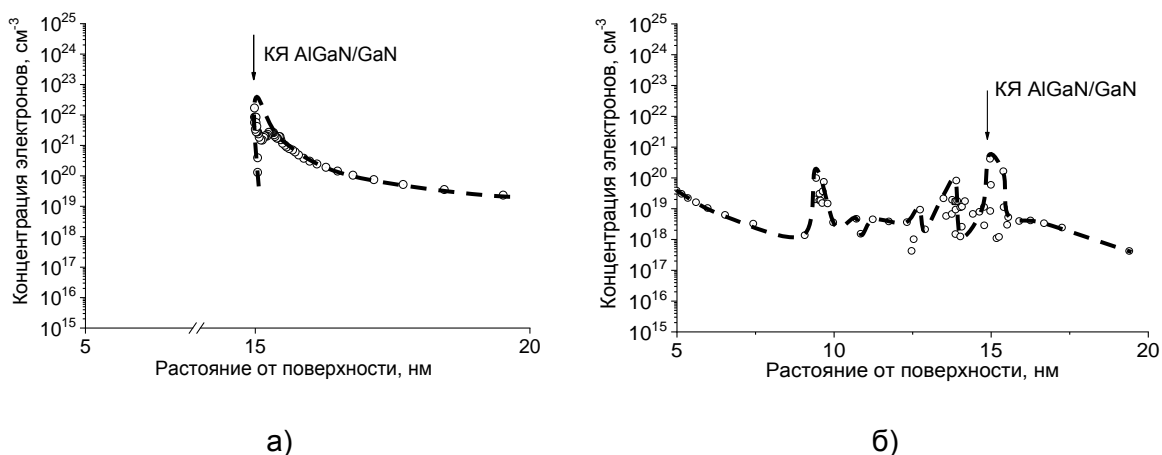


Рисунок 3 – Пространственные распределения концентрации электронов $N(z)$, соответствующие направлению $[000\bar{1}]$ для образцов 2226(а) и 27(б). Точками показаны экспериментальные данные.

Примем за критерий кристаллического совершенства барьерного слоя его степень структурной релаксации R^B , которую можно выразить следующим образом:

$$R^B = \left(1 - \frac{P_{exp} - P_{SP}}{P_{PE}}\right) * 100\% \quad (1)$$

где, P_{exp} – определенное из эксперимента значение поляризации (из ВФХ).

Проведенное электронномикроскопическое исследование образца №2226 показало что дислокации несоответствия располагаться исключительно в области интерфейса подложка/буфер GaN, а прорастающие дислокации полностью тормозятся в буферном слое. Из рис. 4 видно, что барьерный слой AlGaIn полностью когерентен нижележащему буферному слою, что совпадает с рассчитанной из ВФХ степенью структурной релаксации барьерного слоя (~ 0%).

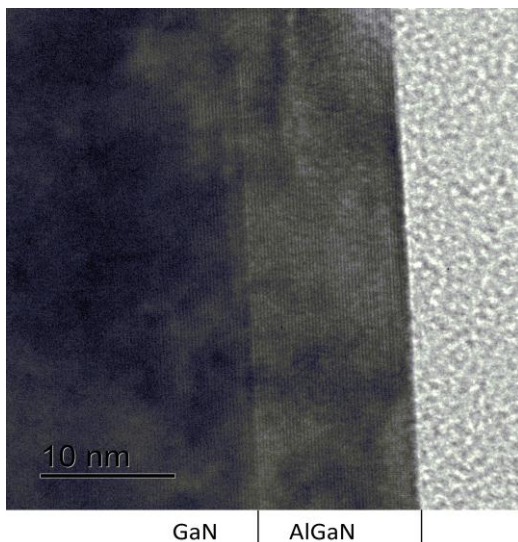


Рисунок 4 – Поперечное изображение образца №2226, полученное с помощью просвечивающей электронной микроскопии. На рисунке обозначены слои гетероструктуры.

Для определения влияния степени структурной релаксации на частотные характеристики НЕМТ была измерена предельная частота усиления по току f_T^{u3M} и построена зависимость $f_T^{u3M}(R^B)$, а также зависимость удельного значения подзатворной ёмкости C_{GS0}^{exp} от степени структурной релаксации R^B (рис. 5).

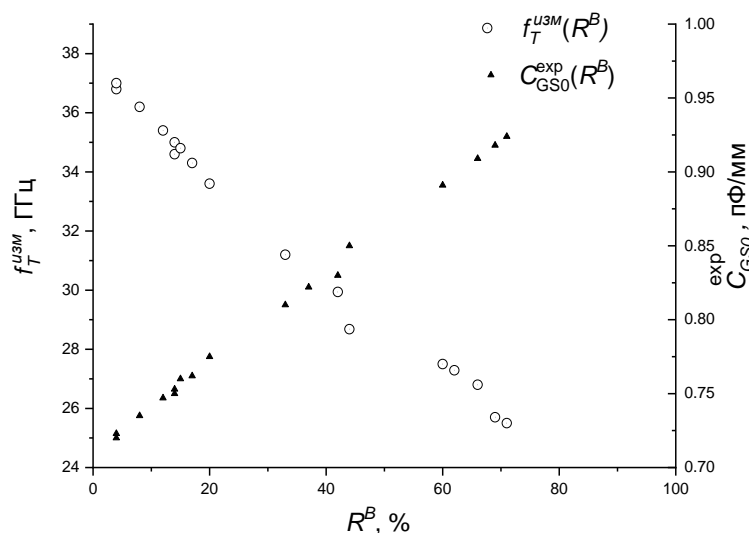


Рисунок 5 – Зависимости измеренной предельной частоты усиления по току $f_T^{u3M}(R^B)$ и подзатворной ёмкости $C_{GS0}^{exp}(R^B)$ от степени структурной релаксации, определенной из ВФХ

Полученные экспериментальные зависимости близки к линейным. Зависимость $f_T^{u3M}(R^B)$ зеркальна к зависимости $C_{GS0}^{exp}(R^B)$, что показывает негативное влияние дополнительной подзатворной ёмкости образовавшейся в результате протекания процесса структурной релаксации на частотными характеристиками НЕМТ на основе GaN.