

## ФИЗИКА ПОЛУПРОВОДНИКОВ И ДИЭЛЕКТРИКОВ

УДК 539.239: 537.312.5

DOI: 10.17223/00213411/62/9/106

А.Г. АФОНИН, В.Н. БРУДНЫЙ, П.А. БРУДНЫЙ, Л.Э. ВЕЛИКОВСКИЙ

ОСОБЕННОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ  
InAlN/GaN HEMT \*

Проанализировано влияние облучения протонами, электронами, гамма-лучами и быстрыми нейтронами на параметры InAlN/GaN HEMT-структур. Рассмотрены особенности исходных электронных свойств барьерных слоев InAlN и AlGaIn при изменении их состава, а также изменение этих свойств при воздействии высокоэнергетической радиации с учетом композиционной зависимости энергетического положения уровня зарядовой нейтральности в энергетическом спектре барьерных слоев.

**Ключевые слова:** InAlN/GaN-транзистор с высокой подвижностью электронов, радиационная стойкость, уровень зарядовой нейтральности.

## Введение

Транзисторы с высокой подвижностью электронов (HEMT) применяются в микроволновых системах связи высокой частоты. В то же время HEMT на основе полупроводниковых соединений группы III–N по сравнению с HEMT на основе кубических кристаллов GaAs, InAs и т.д. имеют высокие поля пробоя и большую выходную удельную мощность. Такие транзисторы также демонстрируют устойчивость к воздействию радиации высоких энергий вследствие прочности химических связей AlN (11.52 эВ), GaN (8.6 эВ) и InN (7.72 эВ). Так, экспериментальные оценки пороговых энергий смещения атомов ( $E_d$ ) в GaN при электронном облучении дают значения  $E_d(\text{Ga}) = (19 \pm 2)$  эВ [1],  $E_d(\text{Ga}) = 20.5$  эВ и  $E_d(\text{N}) = 10.8$  эВ соответственно [2]. В то же время соответствующие расчеты с использованием методов молекулярной динамики дают величины  $E_d(\text{Ga}) = (22 \pm 1)$  эВ и  $E_d(\text{N}) = (25 \pm 1)$  эВ [3],  $E_d(\text{Ga}) = 39$  эВ и  $E_d(\text{N}) = 17$  эВ [4]. Кроме того, высокая плотность электронов в области двумерного электронного газа (2DEG) в HEMT на основе нитридов ( $\sim 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) и малая толщина их активной области дополнительно обеспечивают им радиационную устойчивость выше, чем у соответствующих структур на базе кубических полупроводников. Это делает HEMT на основе нитридов пригодными для использования в бортовых системах в околоземном космическом пространстве. В настоящее время значительное количество исследований посвящено проблеме влияния различных типов радиационного воздействия на параметры структур AlGaIn/GaN. Между тем аналогичные систематические исследования более перспективных InAlN/GaN-структур, которые могут обеспечить увеличение плотности двумерных электронов в 2–3 раза в проводящем канале по сравнению с AlGaIn/GaN HEMT, в настоящее время практически отсутствуют [5].

## Факторы космического излучения

К особенностям космической среды относятся наличие высокоэнергетической радиации, низких температур и невесомости. Фактор температуры и невесомости может быть учтен при проектировании HEMT и его испытаниях. Основным фактором космического воздействия являются потоки заряженных частиц – протонов ( $\sim 90\%$ ), альфа-частиц ( $\sim 9\%$ ), ядер тяжелых элементов ( $\sim 1\%$ ) и электронов ( $\sim 1\%$ ), участвующих в формировании вокруг земли радиационных поясов Ван Аллена. Внутренний пояс на высотах от 1000 до 6000 км в основном представлен протонами с энергиями до 600 МэВ с плотностью потока до  $10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , а внешний пояс на высотах от 13 000 до 60 000 км содержит преимущественно электроны с энергиями до 10 МэВ. Пространственное и энергетическое распределение протонов и электронов в радиационных поясах достаточно слож-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке ПНИЭР «Исследования и разработки технологии изготовления сверхвысокочастотных монолитных интегральных схем на основе гетероструктур InAlN/GaN для изделий космического применения» № 14.578.21.0240 (соглашение от 29.09.2017 г.) УИР RFMEFI 57817X240.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала  
**«Известия высших учебных заведений. Физика»**  
осуществляется на платформе  
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU  
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>