

О влиянии цифровых потенциальных барьеров на характеристики обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием

С.Н. Карпов, С.А. Богданов, А.Б. Пашковский, Е.В. Терешкин

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: в данной работе представлены первые результаты исследования обращенных гетероструктур с донорно – акцепторным легированием и тонкими потенциальными барьерами AlAs(цифровыми барьерами). Исследовано влияние цифровых барьеров на изменение всплеска дрейфовой скорости носителей заряда при влете их в область сильного поля. Показан эффект локализации горячих электронов верхних уровней в барьерной решётке цифровых барьеров. Учет этого эффекта также ведет к дополнительному увеличению всплеска дрейфовой скорости электронов.

Ключевые слова: обращенная гетероструктура, цифровые барьеры, всплеск дрейфовой скорости

1. Введение

В настоящее время идет рост количества передаваемой информации, связанный с повсеместной цифровизацией общества и производства. Этот рост требует увеличения как рабочих частот каналов связи, так и их пропускной способности. А для этого требуются мощные усилители мощности, способные работать в частотном диапазоне 300 ГГц. На данный момент технологии производства мощных транзисторов, работающих в терагерцовом диапазоне частот, связаны с нитридом галлия [1-4]. Несмотря на превосходные мощностные характеристики GaN-устройств, продвижение их в частотную область выше 100 ГГц затруднено [4,5]. Поэтому для изготовления полевых транзисторов и усилителей на их основе для работы на длинах волн менее 2 мм используются, в основном, гетероструктуры на основе InGaAs [6]. Эти структуры позволяют создавать транзисторы с усилительными характеристиками, не имеющих конкурентов, но ввиду узкой запрещенной зоны канала удельная выходная мощность таких транзисторов оказывается невелика. Другим же подходом для продвижения в терагерцовый диапазон частот является использование гетероструктур с донорно-акцепторным легированием. Применение этой технологии позволило увеличить удельную мощность и коэффициент усиления полевых транзисторов [7].

Особый интерес вызывают обращенные гетероструктуры, изготовленные с применением донорно-акцепторного легирования. Особенность этих структур, а именно легирование только со стороны подложки, позволяет максимально сократить расстояние канал-затвор, что, в свою очередь, может увеличить крутизну транзистора. Таким образом, имеется интерес оценить возможности улучшения характеристик полевых транзисторов на основе обращенных гетероструктур с донорно-акцепторным легированием, а также сравнить их с традиционными гетероструктурами на основе GaAs и InGaAs.

2. Теоретический расчет

Использование донорно-акцепторного легирования позволяет создавать в гетероструктурах резкие p-i-n потенциальные барьеры, увеличивающих локализацию электронов в области канала, а, следовательно, и повышающих дрейфовую скорость электронов. Помимо p-i-n барьеров, локализация электронов в канале также зависит от разрывов зон на гетерограницах и их эффективности (резкости и высоты). Однако,

вместо однородных материалов как в спейсере между каналом и p^+ дельта слоем, так и в нелегированном промежутке между дельта слоем и тонким p^+ слоем, можно использовать структуру, состоящую из набора чередующихся двух – трех монослоев широкозонного материала (AlAs) и трех – шести монослоев узкозонного материала (GaAs) – цифровых барьеров.

Проводилось сравнение нескольких гетероструктур – обычной обращенной, обращенной с донорно-акцепторным легированием и обращенной с донорно-акцепторным легированием и дополнительными цифровыми барьерами. Мольная доля Al в спейсерах между легирующими слоями и каналом во всех случаях подбиралась таким образом, чтобы среднее значение по всему спейсеру оказалось примерно равным во всех трех случаях. На рисунке 1 представлены зонные диаграммы структур.

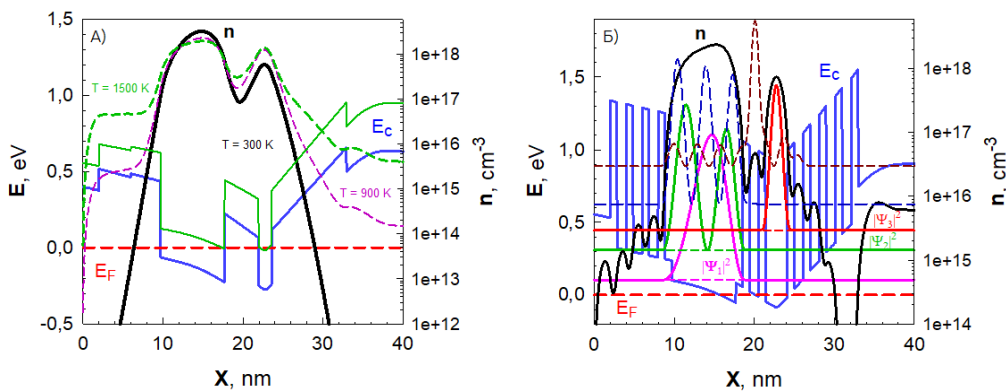


Рисунок 1. Зонные диаграммы и профиль концентраций носителей заряда в обращенных структурах. А) - структура с усредненным спейсером; Б) – структура с дополнительными цифровыми барьерами.

Расчёты по модели [8], основанной на самосогласованном решении уравнений Шредингера-Пуассона и системы гидродинамических уравнений, показали, что использование «цифровых» барьеров в гетероструктурах с донорно – акцепторным легированием позволяет существенно (на 30 – 40 %) увеличить дрейфовую скорость электронов. Результаты расчета представлены на рисунке 2.

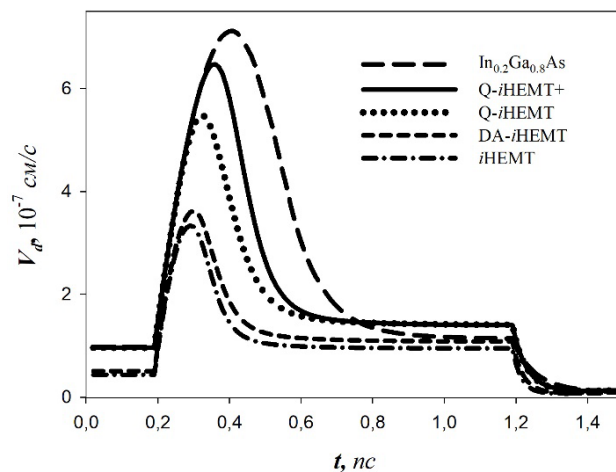


Рисунок 2. Зависимость дрейфовой скорости электронов от времени. Электрическое поле при ($t=0 - 0,2$ пс и $1,2 - 1,5$ пс) $E = 1$ кВ/см, при ($t=0,2 - 1,2$) пс) $E = 20$ кВ/см, i HEMT – обращенная структура, DA- i HEMT – обращенная структура с донорно-акцепторным легированием, Q- i HEMT – обращенная структура с донорно-акцепторным легированием и цифровыми барьерами, Q- i HEMT+ – расчёт с учетом локализации состояний в сверхрешётке.

Помимо этого, в системе из чередующихся потенциальных барьеров типа сверхрешётки, появляются локализованные внутри нее состояния за пределами квантовой ямы канала. Это ведёт к дополнительному росту дрейфовой скорости электронов, и она приближается к теоретическому пределу для используемой модели - скорости электронов в чистом объёмном материале.

3. Заключение

Полученные результаты показывают, что применение цифровых барьеров в обращенных структурах с донорно-акцепторным легированием позволяет улучшить их характеристики. Это позволит увеличить коэффициент усиления в полевых транзисторах на основе этих гетероструктур до двух раз при сохранении удельной мощности, а также позволит конкурировать этим транзисторам с GaN транзисторами и транзисторами на основе InGaAs.

Список литературы

1. H. Wang, F. Wang, S. Li, T.Y. Huang, A.S. Ahmed, N.S. Mannem, J. Lee, E. Garay, D. Munzer, C. Snyder, S. Lee, H.T. Nguyen, M.E.D. Smith. Power amplifiers performance survey 2000-present [Online]. Available: https://gems.ece.gatech.edu/PA_survey.html
2. B. Romanczyk, S. Wienecke, M. Guidry, H. Li, E. Ahmadi, X. Zheng, S. Keller, U.K. Mishra. Demonstration of Constant 8 W/mm Power Density at 10, 30 and 94 GHz in State-of-the-Art-Millimeter-Wave N-Polar GaN MISHEMTs // IEEE Transactions Electron Devices. – 2018. – Vol. 65. – No. 1. – PP. 45 – 50.
3. Nidhi, S. Dasgupta, S. Keller, J. S. Speck, and U. K. Mishra. N-Polar GaN/AlN MIS-HEMT With f_{\max} of 204 GHz for Ka-Band Applications // IEEE Electron Device Letters. – 2011. – Vol. 32. – No. 12 – PP. 1683 – 1685.
4. Y. Tang, K. Shinohara, D. Regan, A. Corrion, D. Brown, J. Wong, A. Schmitz, H. Fung, S. Kim, M. Micovic. Ultrahigh-Speed GaN High-Electron-Mobility Transistors With f_t/f_{\max} of 454/444 GHz // IEEE Electron Device Letters. – 2015. – Vol. 36. – No. 6. – PP. 549 – 551.
5. V. Camarchia, R. Quaglia, A. Piacibello, D.P. Nguyen, H. Wang, A. Pham. A review of technologies and design techniques of millimeter-wave power amplifiers // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 2020. – Vol. 68. – No. 7. – PP. 2957 – 2983.
6. X. Mei, W. Yoshida, M. Lange, J. Lee, J. Zhou, P. Liu, K. Leong, A. Zamora, J. Padilla, S. Sarkozy, R. Lai, W.R. Deal. First demonstration of amplification at 1 THz using a 25-nm InP high electron mobility transistor process // IEEE Electron Device Letters. – 2015. – Vol. 36. – No. 4. – PP. 229 – 327.
7. В.М. Лукашин, А.Б. Пашковский, К.С. Журавлев, А.И. Торопов, В.Г. Лапин, А.Б. Соколов. Уменьшение роли поперечного пространственного переноса электронов и рост выходной мощности гетероструктурных полевых транзисторов // Письма в ЖТФ. – 2012. – Т. 38. – В. 17. – С. 84.
8. А.Б. Пашковский, А.С. Богданов, В.М. Лукашин, С.И. Новиков. Нелокальная динамика электронов в транзисторных гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием // Микроэлектроника. – 2020. – Т.49. – № 3. – С. 210 – 225.