

07

Увеличение насыщенной скорости дрейфа электронов в рНЕМТ-гетероструктурах с донорно-акцепторным легированием

© Д.Ю. Протасов^{1,2}, Д.В. Гуляев¹, А.К. Бакаров¹, А.И. Торопов¹,
Е.В. Ерофеев³, К.С. Журавлев^{1,4}

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

³ Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, Россия

⁴ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия
E-mail: protasov@isp.nsc.ru

Поступило в Редакцию 26 октября 2017 г.

Приводятся измеренные импульсным методом полевые зависимости дрейфовой скорости электронов в обычных гетероструктурах рНЕМТ и гетерозпитаксиальных структурах (ГЭС) с донорно-акцепторным легированием (ДА-рНЕМТ), в которых глубина квантовой ямы (КЯ) увеличена на 0.8–0.9 eV при помощи акцепторных слоев. Показано, что в ГЭС ДА-рНЕМТ скорость насыщенного дрейфа в 1.2–1.3 раза выше, чем в обычных ГЭС рНЕМТ. В спектрах электролюминесценции ГЭС ДА-рНЕМТ отсутствуют полосы, связанные с рекомбинацией в широкозонных слоях — барьерах КЯ. Интенсивность электролюминесценции КЯ в таких ГЭС не насыщается при увеличении напряженности электрического поля. Это свидетельствует о подавлении переноса в реальном пространстве горячих электронов из КЯ в окружающие ее барьерные слои, с чем и связано увеличение насыщенной скорости дрейфа.

DOI: 10.21883/PJTF.2018.06.45770.17098

Увеличение эффективной глубины квантовой ямы (КЯ) на 0.8–0.9 eV в псевдоморфных гетероструктурах AlGaAs/InGaAs/AlGaAs (pseudomorphic high electron mobility transistor, рНЕМТ) при помощи дополнительных акцепторных слоев [1] позволило увеличить концен-

Параметры гетероструктур

Номер образца	Тип	$n_s, 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$\mu, \text{ cm}^2 \cdot \text{ V}^{-1} \cdot \text{ s}^{-1}$
1	pHEMT	2.5	7070
2	pHEMT	2.6	6900
3	DA-pHEMT	3.7	4150
4	DA-pHEMT	3.4	4770
5	DA-pHEMT	3.9	6590
6	DA-pHEMT	4.0	6600

трацию двумерного электронного газа (ДЭГ) до $(4-5) \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ без появления заметной параллельной проводимости [2] и повысить на 50% значение удельной выходной мощности СВЧ-транзистора до 1.7 W/mm на частоте 10 GHz [3]. Характеристики транзисторов определяются не только проводимостью канала транзистора в слабом электрическом поле, но и ее изменением при увеличении напряженности электрического поля. Вследствие малых размеров транзисторов режим сильного электрического поля реализуется уже при малых приложенных напряжениях, поэтому полевая зависимость дрейфовой скорости электронов в значительной мере определяет свойства СВЧ-транзисторов. На основании анализа малосигнальных характеристик СВЧ-транзистора было показано, что насыщенная скорость дрейфа v_{sat} в гетероэпитаксиальных структурах (ГЭС) pHEMT с донорно-акцепторным легированием (DA-pHEMT) больше таковой для ГЭС pHEMT в 1.4–1.6 раза [4]. Однако физические причины такого увеличения до сих пор неясны. Более того, изменение вида полевой зависимости и значений насыщенной скорости дрейфа при увеличении эффективной высоты барьеров, ограничивающих КЯ, ранее не исследовалось.

В настоящей работе приводятся результаты сравнительного исследования полевых зависимостей дрейфовой скорости в ГЭС pHEMT и DA-pHEMT при 300 K . Также методом электролюминесценции (ЭЛ) в этих ГЭС был изучен перенос электронов, нагретых сильным электрическим полем, из КЯ в окружающие ее широкозонные барьерные слои (перенос в реальном пространстве — ПРП) [5].

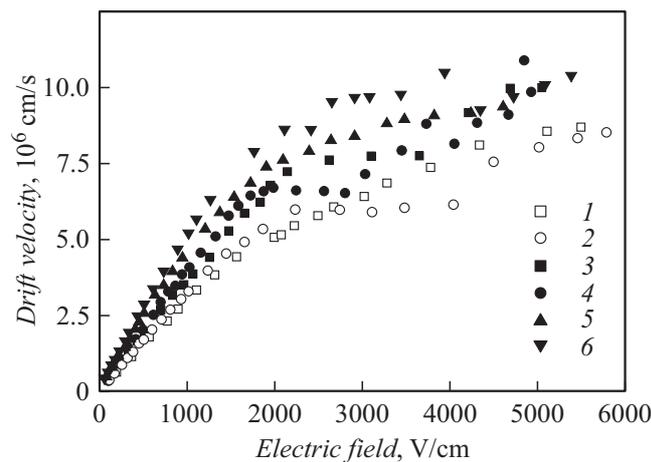


Рис. 1. Полевые зависимости дрейфовой скорости для исследуемых ГЭС (см. таблицу). рНЕМТ: 1 — № 1, 2 — № 2; DA-рНЕМТ: 3 — № 3, 4 — № 4, 5 — № 5, 6 — № 6.

ГЭС рНЕМТ и DA-рНЕМТ были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках GaAs. Последовательность слоев гетероструктур, их толщины, молярное содержание алюминия и индия, уровень легирования приведены в работе [2]. Значения концентрации и подвижности ДЭГ в исследуемых ГЭС, определенные исходя из измерений эффекта Холла и сопротивления методом Ван дер Пау на образцах размером 5×5 mm при значении индукции магнитного поля 0.2 Т, приведены в таблице. Для увеличения достоверности полученных результатов исследовались три пары идентичных по условиям роста и конструкции ГЭС: № 1 и 2, № 3 и 4, № 5 и 6. В двух образцах DA-рНЕМТ (№ 5 и 6) для подавления кулоновского рассеяния каждый из δ -слоев был разделен на два слоя, отстоящих друг от друга на 2 nm. Ближний к КЯ δ -слой отвечал за формирование ДЭГ, а дальний заполнял акцепторы в близлежащем акцепторном слое.

Для измерений полевых зависимостей дрейфовой скорости методом фотолитографии были изготовлены прямоугольные меза-структуры, состоящие из набора двух параллельных омических контактов

Ge/Au/Ni/Au, промежуток между которыми имел следующие размеры (длина \times ширина): 6×200 , 15×200 , 50×200 , 150×600 и $500 \times 2000 \mu\text{m}$. Измерения вольт-амперных характеристик (ВАХ) проводились в импульсных электрических полях с длительностью импульса 800 ns и периодом повторения импульсов 5 ms . Форма и амплитуда импульсов напряжения и тока контролировались с помощью четырехканального цифрового осциллографа Tektronix TDS 3034 с шириной полосы 300 MHz . Дрейфовая скорость электронов определялась в предположении, что концентрация ДЭГ не изменяется в электрическом поле. В этом случае полевая зависимость дрейфовой скорости рассчитывалась как $v_{dr}(E) = I(E)/qn_s w$, где w — ширина образца. Для возбуждения ЭЛ в исследуемых ГЭС также использовались импульсы тока длительностью 800 ns . Регистрация ЭЛ при температуре 300 K проводилась с помощью спектрометра на основе одинарного дифракционного монохроматора, оснащенного кремниевой CCD-матрицей.

Для расчета полевых зависимостей дрейфовых скоростей использовались ВАХ образцов с наименьшей длиной, так как в этом случае уменьшается амплитуда зарядов, индуцированных высоким электрическим полем в широкозонном барьере [6]. Кроме того, выбирались те данные, для которых проводимость в области малых напряженностей электрического поля соответствовала проводимости на постоянном токе. Этим условиям соответствовали ВАХ образцов с длиной $15 \mu\text{m}$. Рассчитанные полевые зависимости дрейфовой скорости приведены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что насыщение дрейфовой скорости в исследуемых образцах начинается при полях выше $2000\text{--}3000 \text{ V/cm}$. Величина насыщенной дрейфовой скорости в ГЭС рНЕМТ составляет около $8.6 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$, тогда как в ГЭС DA-рНЕМТ она в $1.2\text{--}1.3$ раза выше и лежит в диапазоне $(1.0\text{--}1.1) \cdot 10^7 \text{ cm/s}$. Заметим, что максимальная насыщенная скорость дрейфа наблюдается в ГЭС DA-рНЕМТ ГЭС с расщепленными δ -слоями.

Для определения физических причин такого возрастания насыщенной скорости дрейфа при увеличении эффективных потенциальных барьеров КЯ были измерены спектры ЭЛ ГЭС рНЕМТ и DA-рНЕМТ, приведенные на рис. 2. Как можно видеть из этого рисунка, в спектрах ЭЛ обоих типов ГЭС доминируют полосы I и II, связанные с оптическими переходами из первой и второй электронных подзон в первую подзону тяжелых дырок: $e1-h1$ и $e2-h1$ соответственно.

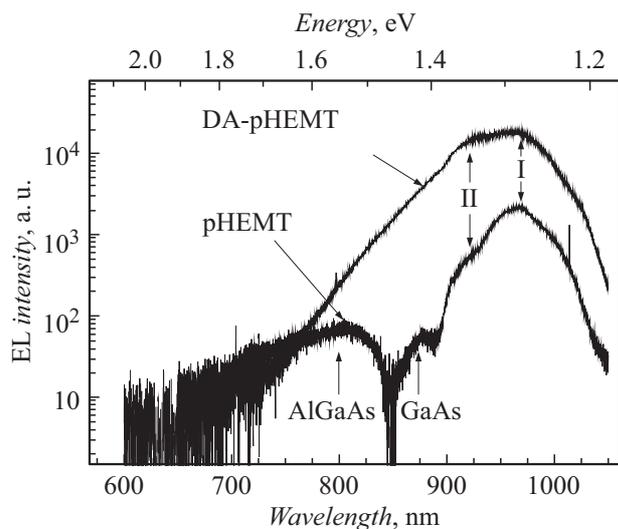


Рис. 2. Типичные спектры ЭЛ ГЭС pHEMT (№ 1) и DA-pHEMT (№ 3). Импульсная сила тока, протекающего через структуры, составляет 1 А.

Следует отметить, что в спектрах ЭЛ ГЭС pHEMT с увеличением напряженности электрического поля становятся хорошо различимыми полосы, связанные с переходами в слоях GaAs (1.4 eV) и AlGaAs (рис. 2). В ГЭС DA-pHEMT таких полос не наблюдается.

На рис. 3 построены зависимости интегральной интенсивности ЭЛ полос, связанных с рекомбинацией носителей заряда через уровни КЯ, от тока, протекающего через исследуемые структуры. Для сравнения на этом же рисунке подобная зависимость приведена для полосы, связанной с рекомбинацией в слое GaAs. Как можно видеть, интенсивность ЭЛ КЯ в ГЭС pHEMT насыщается при токе в 0.3 А. Интенсивность ЭЛ слоя GaAs при этом продолжает возрастать. Следует отметить, что падение интенсивности ЭЛ слоя GaAs вблизи 1 А связано с предпробивными эффектами, поскольку при дальнейшем повышении тока происходил пробой образца. В ГЭС DA-pHEMT интенсивность ЭЛ КЯ, наоборот, продолжает повышаться вплоть до максимальных значений тока, составляющих 1.2 А. Такое различие в зависимости интенсивности

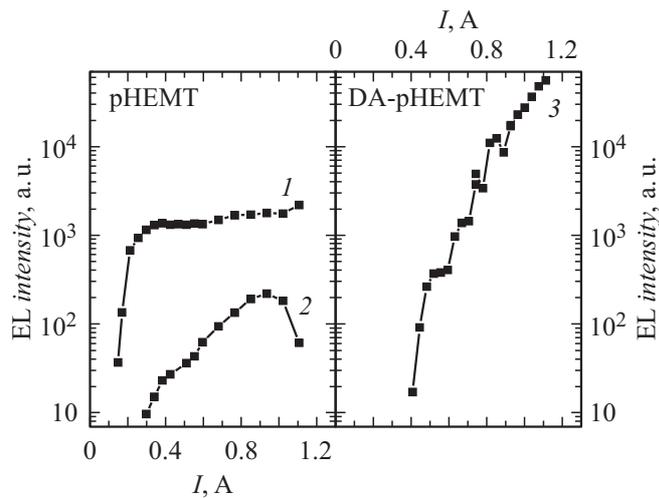


Рис. 3. Зависимости интенсивности ЭЛ от протекающего тока для ГЭС рНЕМТ (№ 1) и DA-рНЕМТ (№ 3). Кривые 1 и 3 соответствуют люминесценции КЯ InGaAs, кривая 2 люминесценции слоя GaAs.

ЭЛ КЯ для ГЭС рНЕМТ и DA-рНЕМТ от протекающего тока, который пропорционален напряженности приложенного электрического поля, указывает на существенно большую высоту потенциальных барьеров в ГЭС DA-рНЕМТ ГЭС, затрудняющих делокализацию электронов из КЯ в сильных электрических полях.

Полученное значение возрастания насыщенной дрейфовой скорости при увеличении глубины КЯ (при переходе от ГЭС рНЕМТ к DA-рНЕМТ) меньше, чем оцененное в работе [4]. Авторы этой работы считали, что существует две причины роста насыщенной скорости дрейфа в ГЭС DA-рНЕМТ: подавление ПРП и уменьшение темпа рассеяния электронов на полярных оптических фононах в КЯ с 10–15 подуровнями размерного квантования вследствие ограничений на изменение волнового вектора электронов, причем вклады этих двух механизмов примерно одинаковые. Если подавление ПРП подтверждается нашими результатами измерения ЭЛ, то со второй причиной не все так очевидно. Увеличение количества подуровней размерного квантования

в ГЭС DA-pHEMT не приводит автоматически к уменьшению темпа рассеяния. В ГЭС DA-pHEMT в состоянии теплового равновесия заполнены две первые подзоны размерного квантования, поэтому даже в слабом электрическом поле электроны только за счет упругих механизмов рассеяния могут переходить из одной подзоны в другую [7]. Межподзонное (как упругое, так и неупругое при взаимодействии с полярными оптическими фононами) рассеяние будет возрастать при нагреве электрическим полем, так как число заполненных подзон будет увеличиваться вследствие термического возбуждения электронов. Поэтому корректно ответить на вопрос о влиянии количества подзон размерного квантования на скорость рассеяния горячих электронов удастся только при тщательном моделировании процесса переноса электронов в ГЭС DA-pHEMT методом Монте-Карло.

Таким образом, в работе показано, что увеличение глубины КЯ при использовании дополнительных барьеров, созданных акцепторными слоями, приводит к увеличению насыщенной скорости дрейфа электронов в 1.2–1.3 раза: от $8.6 \cdot 10^6$ см/с для ГЭС pHEMT ГЭС до $(1.0–1.1) \cdot 10^7$ см/с для ГЭС DA-pHEMT. Измерения полевых зависимостей и спектров ЭЛ подтверждают подавление ППП в ГЭС DA-pHEMT. По нашему мнению, именно с этим и связано увеличение насыщенной скорости дрейфа в ГЭС DA-pHEMT.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках соглашения № 14.577.21.0250 от 26.09.17 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0250.

Список литературы

- [1] Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Соколов А.Б. // Письма в ЖТФ. 2012. Т. 38. В. 17. С. 84–89.
- [2] Gulyaev V.M., Zhuravlev K.S., Bakarov A.K., Toropov A.I., Protasov D.Yu., Gutakovskii A.K., Ber V.Ya., Kazantsev D.Yu. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2016. V. 49. P. 095108 (1–9).
- [3] Лукашин В.М., Пашковский А.Б., Журавлев К.С., Торопов А.И., Лапин В.Г., Голант Е.И., Капралова А.А. // ФТП. 2014. Т. 48. В. 5. С. 684–692.
- [4] Борисов А.А., Журавлев К.С., Зырин С.С., Лапин В.Г., Лукашин В.М., Маковецкая А.А., Новоселец В.И., Пашковский А.Б., Торопов А.И., Урсуляк Н.Д., Щербаков С.В. // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 16. С. 41–47.

- [5] *Gribnikov Z.S., Hess K., Kosinovsky A.G.* // Appl. Phys. Rev. 1995. V. 77. N 4. P. 1337–1373.
- [6] *Мокеров В.Г., Васильевский И.С., Галиев Г.Б., Пожела Ю., Пожела К., Сужделис А., Юцене В., Пашкевич Ч.* // ФТП. 2009. Т. 43. В. 4. С. 478–482.
- [7] *Protasov D.Yu., Zhuravlev K.S.* // Solid State Electron. 2017. V. 129. P 66–72.