Национальный исследовательский
Томский государственный университет

Радиофизический факультет

8-я Международная научно-практическая конференция

Актуальные проблемы радиофизики АПР 2019

Сборник трудов конференции

РОССИЙСКИЙ ФОНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1-4 октября 2019 года
г. Томск

Электрофизические характеристики MWIR *nBn*-структур на основе МЛЭ HgCdTe

Войцеховский А.В.
Несмелов С.Н., Дзядух С.М., Горн Д.И., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Якушев М.В.. Сидоров Г.Ю.
Томский государственный университет
E-mail:vav43@mail.tsu.ru

Для высокочувствительного детектирования в спектральных областях окон прозрачности атмосферы 3-5 и 8-12 мкм широко используются гибридные матрицы фокальной плоскости на основе HgCdTe. Фоточувствительными элементами таких фотоприемных устройств часто являются фотодиоды на основе материала, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Формирование электронно-дырочного перехода в МЛЭ HgCdTe сопряжено с рядом технологических проблем. Область с дырочным типом проводимости обычно создается при помощи ионной имплантации акцепторной примеси и последующего активационного отжига. Качество эпитаксиального материала снижается в процессе этих технологических операций. Кроме этого, темновые токи тепловой генерации накладывают ограничения на рабочую температуру фотоприемного устройства. Для реализации режима ограничения пороговых характеристик шумами фонового излучения необходимо значительное охлаждение детекторов, позволяющее снизить шумы, обусловленные темновыми генерационными токами. Перечисленные проблемы могут быть решены при создании на основе МЛЭ HgCdTe детекторов нового типа – барьерных униполярных детекторов [1] (например, с *nBn*- или *NBνN*-конфигурацией). Пока проводятся преимущественно теоретические исследования процессов в *nBn*-структурах на основе HgCdTe [2-4], хотя известны немногочисленные попытки практической реализации приборных структур такого типа [5-8]. В докладе представлены результаты экспериментальных исследований вольтамперных характеристик и адмиттанса *nBn*-структур на основе МЛЭ HgCdTe, которые были спроектированы и изготовлены для детектирования в MWIR диапазоне (3–5 мкм).

Структуры для исследований были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках из GaAs(013) в Институте физики полупроводников имени А.В. Ржанова СО РАН. Скорость роста гетероэпитаксиальных пленок находилась в пределах 1.5-1.7 мкм/час. При выращивании пленок формировалось заданное распределение содержания CdTe (состава *x*) и концентрации донорной примеси индия. Распределение состава *x* по толщине пленки контролировалось при помощи автоматического эллипсометра в процессе эпитаксиального роста. Барьерный слой создавался из широкозонного МЛЭ $Hg_{1-x}Cd_xTe$, причем состав в барьерном слое для структур разных типов (№№ 1, 2, 3) был равен 0.66, 0.74 и 0.83, соответственно. Толщина барьерного слоя для структур №№ 1, 2, 3 составляла 160, 300 и 210 нм, соответственно. Состав в поглощающем слое был близок к 0.32. Пример распределения состава и примеси для *nBn* структуры № 1 приведен в работе [9].

Для создания приборной структуры при помощи фотолитографии проводилось локальное травление контактного покрывающего слоя и барьерного слоя до поглощающего (нижнего) слоя *n*-типа. Для обеспечения фронтальных контактов проводилась металлизация получившихся островков – создавались полевые электроды различной площади из индия. Для создания контакта к поглощающему слою (обратного контакта) также осуществлялась металлизация по периметру пленки. Для исключения тока поверхностной утечки проводилась пассивация фронтальной и боковой поверхности меза структуры путем нанесения диэлектрического покрытия Al_2O_3, созданного методом плазменного атомно-слоевого нанесения. При помощи специальной микроскопической методики для каждой *nBn* структуры определялась площадь полевого электрода.

Концентрация легирующей примеси в приповерхностном слое HgCdTe определялась путем исследования адмиттанса тестовых МДП-систем на основе *nBn*-структур при пассивации диэлектриком Al_2O_3. Установлено, что концентрация легирующей примеси, определенная по наклону вольт-фарадной характеристики (ВФХ) в режиме обеднения, хорошо соответствует концентрации введенной примеси индия. При исследованиях емкостных характеристик МДП-систем на основе *nBn*-структур из МЛЭ HgCdTe обнаружена длительная релаксация электрофизических параметров (в частности, емкости МДП-системы в обогащении) после воздействия оптического излучения с длиной волны 0.91 мкм. Электрофизические параметры восстанавливаются по истечении нескольких часов или после нагрева образцов примерно до 150 K.

Исследованы вольтамперные характеристики (ВАХ) *nBn*-структур при различных температурах. Установлено, что для структур № 1 и 2 характерна большая плотность тока и слабая зависимость тока от температуры при различных смещениях. Исследования ВАХ для структур с различной площадью полевого электрода показали, что плотность тока близка для структур с различным отношением периметра электрода к его площади, что позволяет исключить возможность доминирования тока поверхностной утечки. Наиболее вероятно, что ток в этих образцах определяется туннелированием подвижных носителей заряда через потенциальный барьер. Хотя туннельными эффектами обычно пренебрегают при толщине барьерного слоя более 50 нм, но реальное распределение состава в барьерном слое может несколько отличаться от заданного при выращивании профиля [7]. Для структуры № 3 наблюдалась значительно меньшая, чем для структур № 1 и 2, плотность темнового тока при обратном смещении до -1 В. Плотность темнового тока при обратном

смещении для структуры № 3 оказалась значительно меньше, чем плотность тока для структур, описанных в литературе [5]. Для этой структуры обнаружены участки сильной зависимости темнового тока от температуры, причем энергия активации для этих участков составляет примерно 0.065 эВ. Освещение излучением с длиной волны 0.91 мкм приводит к появлению заметного (особенно при отрицательных смещениях) фототока (*рис.1*). Поскольку энергия активации значительно меньше половины энергии ширины запрещенной зоны (около 0.6 эВ), вероятно, что ток в структуре № 3 определяется туннелированием через ловушки. Ограничивающим величину тока процессом на участках сильной зависимости тока от температуры является тепловой заброс носителей на уровень в запрещенной зоне, а на участках слабой зависимости – собственно туннельный переход.

В широком диапазоне температур и частот экспериментально исследован адмиттанс *nBn* структур на основе МЛЭ HgCdTe с различными параметрами барьерных слоев. ВФХ для структур на основе МЛЭ HgCdTe значительно отличаются от аналогичных характеристик *nBn* структур на основе материалов группы A^3B^5 [10]. Каждому типу исследованных *nBn* структур на основе МЛЭ HgCdTe присущи индивидуальные особенности вольт-фарадных характеристик и полевых зависимостей проводимости (*рис.2*). Например, для структур № 2 при отрицательных напряжениях наблюдается отрицательная емкость, возникновение которой может быть связано с задержкой изменений тока при изменениях тестового напряжения. При увеличении температуры от 9 до 300 К дифференциальная проводимость *nBn* структур на основе МЛЭ HgCdTe возрастает, а температурная зависимость емкости при использовании параллельной схемы замещения имеет для структуры № 3 выраженный максимум при малых отрицательных напряжениях смещения.

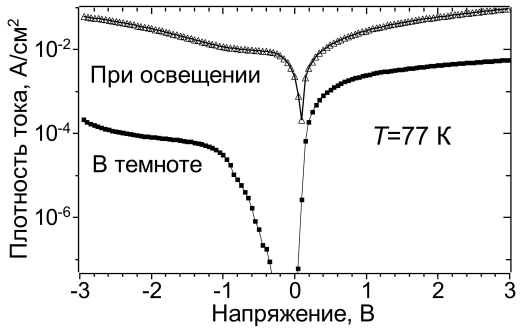

Рис.1 ВАХ nBn-структуры №3 на основе МЛЭ HgCdTe, измеренные при температуре 77 К в темновом режиме и при освещении

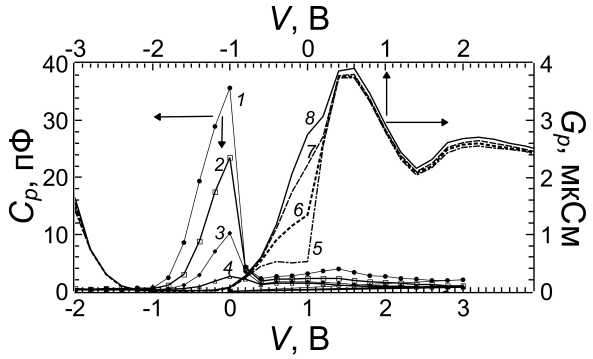

Рис.2 Зависимости емкости C_p (кр.1–4) и проводимости G_p (кр.5–8) от напряжения для nBn структуры №3, измеренные при температуре 9 К на различных частотах, кГц: кр.1,5 – 5, кр.2,6 – 10, кр.3,7 – 20, кр.4,8 – 50

Экспериментальные частотные зависимости емкости и проводимости хорошо согласуют с результатами расчета при использовании эквивалентной схемы, состоящей из двух последовательно соединенных параллельных *RC* цепочек. Одна параллельная цепочка связана с областью пространственного заряда в барьерном (и частично в поглощающем) слое, механизмы формирования второй цепочки (с емкостью менее 0.5 пФ) остаются дискуссионными. Определены значения элементов эквивалентной схемы для структур с разными параметрами барьерного слоя, а также при разных температурах и напряжениях (для структуры с большим составом в барьерном слое). Обнаружено, что параметры эквивалентной схемы изменяются в течение нескольких часов после воздействия на структуру ИК излучения с длиной волны 0.91 мкм. Для установления причины долговременных процессов в *nBn* структурах после освещения требуется проведение дополнительных исследований.

Барьерные униполярные структуры изготовлены и исследованы при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 19-12-00135).

Список публикаций:

[1] Maimon S., Wicks G. W. // Appl Phys Lett. 2006. V. 89. No.15. P. 151109.
[2] Akhavan N. D., Jolley G., Umana-Membreno G. A., et al. // J Electron Mater. 2015. V. 44. No. 9. P. 3044.
[3] Uzgur F., Kocaman S. // Infrared Phys Technol. 2019. V. 97. P. 123.
[4] Ye Z.H., Chen Y. Y., Zhang P., et al. // Proc SPIE. 2014. V. 9070. P. 90701L.
[5] Istuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. // Appl Phys Lett. 2012. V. 100. No. 16. P. 161102.
[6] Velicu S., Zhao J., Morley M., et al. // Proc SPIE. 2012. V. 8268. P. 82682X.
[7] Gravrand O., Boulard F., Ferron A., et al. // J Electron Mater. 2015. V. 44. No. 9. P. 3069.
[8] Kopytko M., Keblowski A., Gawron W., et al. // Opto-Electron Rev. 2013. V. 21. No. 4. P. 402.
[9] Войцеховский А. В., Несмелов С. Н., Дзядух С. М. // Прикладная физика. 2018. № 4. С. 43.
[10] Rhiger D. R., Smith E. P., Kolasa B. P., et al. // J Electron Mater. 2016. V. 45. No. 9. P. 4646.