4.

УДК 621.3.089.2: 621.317.35

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОСТРУКТУР НА ПЛАСТИНЕ

Г.В.Гудков, А.В.Желаннов*, А.С.Ионов*, А.В.Петров*, Д.Г.Федоров

MEASURING KOMPLEX FOR CHARACTERIZATION OF MICROSTRUCTURES ON WAFER

G.V.Gudkov, A.V.Zhelannov*, A.S.Ionov*, A. V.Petrov*, D. G.Fedorov

Институт электронных и информационных систем НовГУ, ggudkov@yandex.ru *AO «ОКТБ-Планета», Великий Новгород, petrovav@okbplaneta.ru

Рассматриваются вопросы совместного использования зондовой станции и системы для измерения характеристик микроструктур на пластине. Основной целью данной работы являлась разработка методики измерений вольтамперных характеристик вертикальных структур диодов Шоттки на нитриде галлия в диапазоне больших прямых токов (сотни мА). Решены проблемы компенсации паразитных сопротивлений измерительной схемы, а также разогрева зондов и места контакта протекающим током при повышенной температуре пластины. Скорректирована стандартная методика измерений вольт-фарадных характеристик вышеуказанных структур. Решена задача компенсации паразитной емкости держателя пластин. В результате разработана методика импульсных измерений прямых ветвей вольтамперных характеристик вертикальных структур с использованием карты генератора импульсов, входящей в состав системы для измерения характеристик микроструктур на пластине, усовершенствована методика измерений вольт-фарадных характеристик с учетом геометрии структур. Приведены результаты измерений, выполненных по этим методикам, при различных температурах пластины. Ключевые слова: зондовая станция, система для измерения характеристик полупроводниковых приборов, микроструктура, нитрид галлия, диод Шоттки, вольтамперная характеристик вольт-фарадная

характеристика, импульсные измерения

The article considers issues of joint use of the probe station and semiconductor characterization system. The main purpose of the work is development of measurement techniques of current-voltage characteristics of vertical microstructure of Shottky diode on gallium nitride in range of large forward currents. Following problems were solved: compensation of parasitic resistances of the measuring circuit; reduction of heating of probe in contact point because of current flow, mainly at elevated temperature of wafer; adjusting of standard methodology of measurements C-V characteristics for above mentioned vertical microstructure; compensation of parasitic capacitance of the chuck. As a result, pulse measurement technique was suggested for current-voltage characteristics of vertical microstructure. The pulse generator, which is part of semiconductor characterization system, was used. Method of measuring C-V characteristics was changed, taking into account geometry of structure. Some results of measurements, made by these techniques, are presented for different temperatures of wafer.

Keywords: probe station, semiconductor characterization system, microstructure, gallium nitride, Shottky diode, voltagecurrent characteristic, C-V characteristic, pulse measurements

1. Диоды Шоттки на нитриде галлия

В последние годы развитие мощной и высокотемпературной электроники на основе нитрида галлия привлекает большое внимание исследователей благодаря уникальному сочетанию свойств материала, а именно: большая ширина запрещенной зоны, высокая подвижность электронов, высокая критическая напряженность электрического поля и высокая дрейфовая скорость насыщения электронов [1]. Теплопроводность GaN также выше, чем у Si и GaAs. Мощные приборы на нитриде галлия имеют высокие характеристики при относительно низких затратах на их изготовление. Материалы группы III-нитридов отличаются высокой твердостью, стойкостью к воздействию агрессивных сред и радиационному излучению.

Эпитаксиальные слои GaN для приборных приложений выращиваются, как правило, на инородных подложках, таких как сапфир, карбид кремния и кремний.

Наличие низкодефектных проводящих подложек карбида кремния позволяет решить проблему разработки мощных приборов на основе нитрида галлия и создавать вертикальные структуры с вертикальным механизмом протекания тока, что приводит к уменьшению сопротивления структур и снижению величины рабочего напряжения и, как следствие, снижению потребляемой мощности [2].

В настоящей работе для создания диодных структур использовались подложки карбида кремния толщиной 450 мкм и сопротивлением ~0,01 Ом см. Подложки SiC имеют преимущество над сапфиром из-за меньшего рассогласования постоянных решетки (следовательно, меньшая плотность дефектов в эпитаксиальных слоях нитрида галлия) и лучшая теплопроводность подложки (следовательно, лучший отвод тепла при работе прибора) [3].

Эпитаксиальные слои нитрида галлия выращивались на подложках SiC методом химического осаждения из газовой фазы (MOCVD). В диодной структуре формировались следующие слои: слой n^+ -Al_{0.25}Ga_{0.75}N толщиной 0,2 мкм, слой n^+ -GaN толщиной 0,8мкм и слой n^- -GaN толщиной 1,7 мкм.

Контактная система диодов формировалась следующим образом. В качестве омических контактов использовались системы Cr/Ni к обратной стороне подложки с последующим быстрым термическим отжигом при температуре 1000°С в атмосфере азота. Барьерные контакты Ni/Au диаметром 150 мкм формировались магнетронным распылением с помощью взрывной фотолитографии [4]. Структура диода Шоттки представлена на рис.1.

Контакт Шоттки Ni/Au
n-GaN 1,7 мкм
ń-GaN 0,8 мкм
п ⁺ -Аl _{0,25} Ga _{0,75} N 0,2 мкм
Подложка SiC
Омический контакт Cr/Ni
Ag

Рис.1. Структура вертикального GaN диода Шоттки на проводящей SiC подложке

2. Состав измерительного комплекса

Для измерения вольтамперных и вольт-фарадных характеристик структур диодов Шоттки на пластине использовался измерительный комплекс, включающий в себя зондовую станцию MPS150 (Cascade Microtech, Германия) и систему для измерения характеристик полупроводниковых приборов 4200-SCS (Keithley, США). Кроме того, следует отметить целый ряд измерительных принадлежностей. Так, зондовая станция находится внутри защитного кожуха, обеспечивающего электромагнитное экранирование и размещенного на антивибрационном столе, в основе которого лежит использование пневматических подушек. С целью обеспечения проведения измерений в условиях повышенной температуры комплекс оснащен системой AC3 (ERS electronic GmbH, Германия), позволяющей устанавливать и поддерживать температуру подогреваемого держателя пластин в диапазоне от комнатной до 300°С. Держатель представляет собой столик круглой формы с вакуумной фиксацией пластин. Имеется дополнительный держатель, предназначенный для установки пластины с набором стандартных импедансов, которые используются для калибровки при измерении вольт-фарадных характеристик. Этот держатель также обеспечивает вакуумную фиксацию, но отличается гораздо меньшими размерами и отсутствием регулирования температуры. Упрощенная структурная схема измерительного комплекса представлена на рис.2.



Рис.2. Структурная схема измерительного комплекса

Система для измерения характеристик микроструктур на пластине 4200-SCS представляет собой программно-аппаратный комплекс, работающий под управлением операционной системы Windows 7. Она включает два блока источника-измерителя (SMU) модели 4200-SMU, один из которых укомплектован предварительным усилителем модели 4200-PA, вольт-фарадный блок (CVU) модели 4210-SVU, двухканальный генератор импульсов (PMU) модели 4225-PMU с двумя дистанционными импульсными усилителями/коммутаторами модели 4225-RPM, блок заземления (GNDU).

Интерактивное программное обеспечение 4200-SCS включает 6 программных средств, используемых в процессе работы и обслуживания системы, главным из которых является КІТЕ (Keithley Interactive Test Environment). Это приложение является универсальным средством, способствующим как интерактивному измерению характеристик отдельных приборов, так и тестированию структур на полупроводниковой пластине. Тесты организованы в виде интерактивных тестовых модулей (ITM), объединенных в отдельные проекты, которые управляются и выполняются КІТЕ.

Система 4200-SCS позволяет выполнять все виды измерений без какой-либо ручной перекоммутации измерительных кабелей. Функцию коммутаторов выполняют два дистанционных импульсных усилителями/коммутатора модели 4225-RPM, управление которыми осуществляет 4225-PMU через HDMI-интерфейс. 4225-RPM имеет магнитную базу и может быть установлен на рабочем столе зондовой станции в непосредственной близости от измеряемой полупроводниковой пластины. К его входам помимо кабеля HDMI подключаются триаксиальные кабели FORSE и SENSE от 4200-SMU и SMA-кабели от 4210-CVU. На выходе 4225-RPM имеется два триаксиальных гнезда FORSE и SENSE для подключения к зондам. Коммутация осуществляется автоматически при запуске соответствующего ITM.

3. Методики измерений ВАХ и ВФХ структур диодов Шоттки

ВАХ исследуемых структур могут быть измерены двумя методами:

— статические измерения с использованием SMU, в этом случае напряжение, прикладываемое к структуре, ступенчато нарастает с заданным шагом;

— сверхбыстрые измерения с использованием РМU, когда на структуру подаются короткие импульсы напряжения прямоугольной формы с нарастающей амплитудой, а измерение тока выполняется в задней части вершины импульса.

Первый метод не позволяет измерять прямую ветвь ВАХ в области больших токов, поскольку блок источника-измерителя модели 4200-SMU рассчитан на максимальный ток всего 105 мА. В то же время он предпочтителен при измерении обратной ветви, поскольку обеспечивает высокое разрешение в режиме измерения малых токов — 1 пА на пределе измерения 105 нА, а при использовании предварительного усилителя модели 4200-РА — 10 аА на пределе измерения 1,05 пА. Второй метод используется для измерения прямой ветви ВАХ в области больших токов, поскольку в этом случае достигается ряд преимуществ:

обеспечивается максимальный ток около 750 мА;

 предотвращается разогрев в области контакта зонда со структурой, поскольку длительность импульсов может быть менее 1 мкс;

— возможность осуществить компенсацию падения напряжения в соединительных кабелях и на выходном сопротивлении генератора.

Вертикальные полупроводниковые структуры на нитриде галлия имеют контактные площадки, расположенные по обе стороны пластины, так что необходимо осуществлять подключение через держатель пластин. Это приводит к внесению дополнительной емкости и увеличению шумов, что особенно критично для импульсных и емкостных измерений, а также статических измерений малых токов. Чтобы снизить негативные последствия подключения через держатель, при импульсных измерениях уменьшалась частота следования импульсов и увеличивалась их длительность по сравнению со значениями, указанными в эксплуатационной документации. Импульсы подавались со стороны держателя, а измерения проводились с противоположной стороны, используя второй канал РМU.



Рис.3. Прямая ветвь BAX GaN диода Шоттки с вертикальной структурой

На рис.3 показана прямая ветвь BAX GaN диода Шоттки с вертикальной структурой при различных температурах, построенная по результатам импульсных измерений.

Прямое падение напряжения в основном зависит от контактной разности потенциалов и сопротивления омического контакта. В настоящее время по значению этого параметра исследованные нами опытные образцы GaN структур уступают аналогичным структурам на основе кремния. С ростом температуры прямое падение напряжения уменьшается из-за снижения контактной разности потенциалов.

Измерения ВФХ GaN диода Шоттки с вертикальной структурой осуществляются с использованием вольт-фарадного блока модели 4210-CVU. Для достижения высокой точности измерений модель 4210-CVU использует метод автоматически уравновешивающегося моста. При измерении вольтфарадных характеристик вертикальных структур получить удовлетворительный результат практически невозможно, если осуществлять подключение через штатные разъемы держателя. Выходом из этой ситуации явилось подключение к нижней стороне структуры через зонд, опускаемый на держатель в непосредственной близости от пластины. Использовались так называемые квазикельвиновские зонлы типа DSP-HTR. Каждый из таких зондов имеет один наконечник и два разъема, что позволяет подключать к нему одновременно токовый (CUR) и потенциальный (РОТ) кабели. Таким образом, требуются только два зонда. После подключения зондов выполняется компенсация соединений (Connection compensation) и контроль достоверности (Confidence Check). Данные процедуры запускаются из меню Tools на панели меню КІТЕ. Компенсация соединений осуществлялась с использованием пластины с набором стандартных импедансов (опция 106-683), для фиксации которой, как сказано выше, предусмотрен отдельный вакуумный держатель. Процедура Confidence Check позволяет проводить измерение импеданса в режиме реального времени и предусматривает контроль в режиме холостого хода и короткого замыкания.

На рис.4 показана вольт-фарадная характеристика GaN диода Шоттки с вертикальной структурой, измеренная при различных температурах. При прямом и небольшом обратном смещении емкость растет с ростом температуры из-за уменьшения толщины обедненного слоя, вызванного снижением контактной разности потенциалов. При обратных напряжениях свыше 5 В толщина обедненного слоя практически не зависит от контактной разности потенциалов, и характеристики, измеренные при различных температурах, совпадают.



Рис.4. Вольт-фарадная характеристика GaN диода Шоттки с вертикальной структурой

Заключение

Проведен анализ совместного использования зондовой станции MPS150 и системы для измерения характеристик вертикальных структур диодов Шоттки на нитриде галлия на пластине 4200-SCS. Разработаны методики измерения вольтамперных и вольтфарадных характеристик структур диодов Шоттки на пластине в диапазоне температур 25÷300°С. При измерении прямой ветви ВАХ в области больших токов использовались сверхбыстрые измерения, когда на структуру подаются короткие импульсы напряжения прямоугольной формы с нарастающей амплитудой, а измерение тока выполняется в задней части вершины импульса. При измерении вольт-фарадных характеристик вертикальных структур диодов Шоттки необходимо использовать квазикельвиновские зонды типа DSP-HTR, имеющие один наконечник и два разъема, что позволяет подключать к нему одновременно токовый и потенциальный кабели и, таким образом, применяются только два зонда.

- Yoo D., Limb J., Ryou J.-H. et al. GaN full-vertical p-i-n rectifiers employing AlGaN:Si conducting buffer layers on SiC substrates // Appl. Phys. Lett. 2006. V.88. №19. P.193503.
- Туркин А.Н. Обзор развития технологии полупроводниковых гетероструктур на основе нитрида галлия // Полупроводниковая светотехника. 2011. №6. С.6-9.
- Федоров Д.Г., Желаннов А.В., Селезнев Б.И. Диоды Шоттки на структурах GaN с ионно-легированными слоями // Мокеровские чтения: Сб. тр. 6-й Междунар. науч.-практ. конф. по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 20–21 мая 2015 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С.44-45.

References

- Гольцова М. Мощные GaN-транзисторы истинно революционная технология // Электроника. Наука, технология, бизнес. 2012. №4. С.86-100.
- Yoo D., Limb J., Ryou J.-H. e t al. GaN full-vertical p-i-n rectifiers employing AlGaN:Si conducting buffer layers on SiC substrates // Appl. Phys. Lett. 2006. V.88. №19. P.193503.
- Туркин А.Н. Обзор развития технологии полупроводниковых гетероструктур на основе нитрида галлия // Полупроводниковая светотехника. 2011. №6. С.6-9.
- Федоров Д.Г., Желаннов А.В., Селезнев Б.И. Диоды Шоттки на структурах GaN с ионно-легированными слоями // Мокеровские чтения: Сб. тр. 6-я Междунар. науч.-практ. конф. по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники, 20–21 мая 2015 г. М.: НИЯУ МИФИ, 2015. С.44-45.

^{1.} Гольцова М. Мощные GaN-транзисторы истинно революционная технология // Электроника. Наука, технология, бизнес. 2012. №4. С.86-100.