

мнимой частями комплексной амплитуды отраженного луча [5]. По измеренному спектру отражения естественного света были рассчитаны спектры показателя преломления и коэффициента поглощения.

Измерения эллипсометрических параметров исследуемых структур SiC/поликор проводились на спектральном эллипсометре VASE (variable angle spectral ellipsometer) при углах падения от 65° до 70° в диапазоне длин волн от 200 до 1000 нм. Угол наклона плоскости поляризации падающего излучения к плоскости падения при всех измерениях был равен 45° [6]. На основании полученных данных были определены спектры показателя преломления и коэффициента поглощения слоев карбида кремния на поликоре.

Спектры оптических параметров исследуемых структур SiC/поликор полученные двумя различными способами хорошо согласуются между собой и могут быть использованы для контроля структур карбид кремния на поликоре.

Список использованных источников

1. Лучинин В., Таиров Ю. Отечественный полупроводниковый карбид кремния: шаг к паритету // Современная электроника. 2009. № 7.

2. Лучинин В., Таиров Ю. Карбид кремния – алмазоподобный материал с управляемыми наноструктурно-зависимыми свойствами // Наноиндустрия. – 2010, № 1. с. 36-40.

3. Полищук А. Полупроводниковые приборы на основе карбида кремния – настоящее и будущее силовой электроники // Компоненты и технологии. – 2004. № 8.

4. Чепурнов В.И. Способ получения карбида кремния / АС СССР №1436544 от 08.07.1988.

5. Уханов Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977. – 366 с.

6. Алексеев С.А., Прокопенко В.Т., Скалецкий Е.К. и др. Введение в прикладную эллипсометрию. СПб.: ГУ ИТМО, 2005. 200 с.

УДК 621.382.2/3

ПРИМЕНЕНИЕ КАРБИДОКРЕМНИЕВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СВЧ МОЩНОСТИ НА ОСНОВЕ ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫХ ЭФФЕКТОВ В АЭРОКОСМИЧЕСКОМ ПРИБОРОСТРОЕНИИ

Л.В. Курганская, А.В. Щербак, З.М. Яшкин

«Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», г. Самара

Ключевые слова: СВЧ-мощность, радиоэлектрический эффект, эффект Холла, термоЭДС.

Область сверхвысоких частот, охватывающая диапазоны от дециметровых до субмиллиметровых длин волн (10^{11} – 10^{12} Гц), широко используется в аэрокосмическом приборостроении, а именно, в бортовых системах космических аппаратов в негерметичном исполнении, в

радиолокационной аппаратуре и аппаратуре навигации и связи, а также в системах контроля энергетических установок и систем космических аппаратов.

В связи с этим требуется непрерывное совершенствование радиоизмерительных средств, одним из которых являются измерители СВЧ-мощности. В первую очередь это связано с улучшением их характеристик, а именно, расширением диапазона измеряемых мощностей (до 100 Вт) при обеспечении требуемой линейности и предельно минимальных массогабаритных характеристиках, а также с повышением стабильности функционирования при интенсивном воздействии внешних неблагоприятных факторов (высокие температуры, повышенный радиационный фон, химически агрессивные среды и т.п.).

В настоящее время для измерения СВЧ-мощности широко используются тепловые датчики (терморезистивные, термопарные и др.). Основные недостатки таких датчиков обычно связаны с невысокими эксплуатационными характеристиками, а именно: малой предельно допустимой мощностью измеряемого сигнала, большой инерционностью процесса измерения, невысокой точностью, а также большими массами и габаритными размерами измерительной системы в целом. Невысокие характеристики таких измерителей связаны с различными факторами, основными из которых являются применяемые полупроводниковые материалы для их изготовления и конструктивные решения.

Таким образом, создание подобных измерителей СВЧ-мощности предполагает использование полупроводниковых материалов с высокими электрофизическими характеристиками (высокой подвижностью носителей заряда, высокой теплопроводностью). Этим требованиям в большой степени отвечает полупроводниковый карбид кремния. Еще одной задачей при создании измерителей СВЧ мощности является разработка их принципа работы, среди которых можно выделить работу на основе тепловых и гальваномагнитных эффектов. Как правило, первые обладают высокой чувствительностью и большой инерционностью, динамический диапазон работы таких измерителей ограничен сотнями милливольт. В основе действия гальваномагнитных измерителей лежит высокочастотный эффект Холла или радиоэлектрический эффект [1], который характеризуется очень малой постоянной времени релаксации ($\tau \sim 10^{-12}$ с) и соответственно безынерционностью процесса, что связано с возможностью работы в области сверхвысоких частот (1...10 ГГц) и в широком интервале температур (от -100°C до 300°C).

В наиболее простом случае радиоэлектрический эффект представляет собой взаимодействие электромагнитной волны со свободными носителями заряда в полупроводнике, ЭДС, возникающая в проводящей среде, связана с анизотропией функции распределения электронов. Ее возникновение может быть обусловлено силой Лоренца (высокочастотный эффект Холла), т.е. динамическим действием, а также градиентом электромагнитного поля,

действие которого, в частности, проявляется в неоднородном разогреве среды вдоль направления вектора Умова-Пойнтинга. Рассматривая теоретические модели радиоэлектрического эффекта, можно определить условия преобладания увлекающего механизма радиоЭДС над неоднородно разогревающим (градиентным) механизмом возникновения ЭДС. В наиболее простом случае взаимодействия полупроводника с электромагнитным полем, температура электронов и фононов локально одинакова. Полная система уравнений для нахождения ЭДС в образце состоит из уравнений Максвелла и уравнения теплопроводности, источником в котором служит джоулево тепло, выделяемое в полупроводнике при прохождении плоской электромагнитной волны. Уравнения Максвелла, описывающие распространение электромагнитного поля, дополняются макроскопической связью между током, электрическим полем и градиентом температуры. Последнее необходимо для учета термоэлектродвижущих сил. Поток тепла в этом приближении зависит не только от градиента температуры, но и от плотности тока. Для сравнительно низких частот ($\omega = 5,7 \cdot 10^{10} \div 2,5 \cdot 10^{11}$ Гц) можно использовать макроскопические уравнения. Уравнение теплопроводности дополняется граничными условиями, которые можно считать ньютоновскими и тогда можно получить для ЭДС увлечения и термоЭДС следующие выражения [1]:

$$V_{\parallel} = \frac{4\pi}{c^2} \mu_H W_0 \frac{1 - e^{-L\alpha}}{\alpha},$$

$$V_T = -\frac{\alpha_T W_0}{\chi \alpha} \frac{h_1(1 - \alpha L - e^{-L\alpha}) + h_2(1 - e^{-L\alpha}(1 - L\alpha))}{h_1 + h_2 + L},$$

где μ_H – холловская подвижность носителей в полупроводниках; W_0 – плотность потока мощности, падающей на проводящую среду; α – коэффициент поглощения электромагнитной волны; α_T – коэффициент термоЭДС; χ – коэффициент теплопроводности; h_1 и h_2 – коэффициенты обратной величины теплоотдачи, $h_1 = \frac{\chi}{4ST}$, S – постоянная Стефана-Больцмана. При $h_1 = h_2 = 0$ имеем $V_T = 0$. Это значит, что в случае хорошего теплоотвода с обеих сторон поверхность полупроводниковой пластины термоэдс не вносит вклад в радиоэлектрический эффект.

Из вышеизложенного можно отметить, что к достоинствам измерителей СВЧ-мощности, работающим на радиоэлектрическом эффекте, относятся непосредственное прямое измерение проходящей СВЧ-мощности, так как $V_T = 0$, что в свою очередь при правильном подборе параметров полупроводникового материала и конструкции самих измерителей, приведет к улучшению их характеристик: высокое быстродействие, высокая чувствительность при малой инерционности,

улучшенные массогабаритных показателей систем измерения мощности за счет отсутствия ответвителя и ослабителя сигнала.

Список использованных источников

1. Щербак А.В., Курганская Л.В., Голубева Д.Ю. Быстродействующие преобразователи СВЧ-мощности на основе радиоэлектрического эффекта / Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 2017, т. 20, № 1, С. 124.

УДК 681.586.74

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОВЫХ СЕНСОРОВ НА ОСНОВЕ WS₂ И MOS₂, СИНТЕЗИРОВАННЫХ В СМЕСИ АЦЕТОНИТРИЛ/ВОДА

А.С. Горшкова, К.Н. Тукмаков, А.Р. Рымжина, Н. Трипати,
В.С. Павельев

«Самарский национальный исследовательский университет имени
академика С.П. Королева», г. Самара

В данной статье описывается исследование чувствительности газовых сенсоров на основе двумерных материалов - WS₂ и MoS₂, синтезированных в смеси ацетонитрил/вода с последующим центрифугированием. Преимущество данной технологии жидкостного синтеза заключается в ускорении процесса синтеза, однако требует дополнительной промывки для последующего проведения процесса нанесения частиц [1, 2].

Так, синтез проводился следующим образом: 1 мг неотшелушенных частиц были добавлены в 15 мл ацетонитрила и 5 мл воды, затем раствор был подвержен ультразвуковой обработке в течение 6 часов. Далее проводилось центрифугирование раствора на 3500 rpm в течение 20 минут, после чего были взяты верхние фракции растворов. Затем для проведения процесса диэлектрофореза наночастицы были промыты от воды на максимальных оборотах центрифуги с последующим добавлением изопропанола.

Также была проведена предварительная оценка необходимого количества добавленной воды для ускорения процесса отшелушивания, результат оценивался визуально по цвету раствора после обработки в ультразвуковой ванне - присутствие насыщенного желтого цвета является косвенным свидетельством успешного протекания синтеза. Так, были сравнены колбы с ацетонитрилом, ацетонитрилом и водой в соотношении 15мл/5мл и 10мл/10мл соответственно. Было отмечено, что для ускорения процесса отшелушивания достаточно небольшого количества воды.

Электроды для газовых сенсоров были изготовлены на основе стандартного литографического процесса на оксидированной кремниевой подложке, материал электродов - алюминий. Затем на поверхность