

УДК 537.311.322

Д. А. КОВАЛЕНКО, М. А. БУНЕВИЧ, Д. В. ГОРБАЧЁВ

ЗАРЯДОПЕРЕНОС В ВЫПРЯМЛЯЮЩИХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОКСИДНЫХ СТРУКТУРАХ С ПЕНТАОКСИДОМ НИОБИЯ

Исследованы ВАХ и механизмы переноса заряда в структурах $\text{Al}/\text{Nb}_2\text{O}_5/\text{n}^+\text{-Si}$. По результатам анализа ВАХ при температурах 35–55 °С установлено, что проводимость в слабых полях подчиняется закону Ома, а в средних полях доминируют токи, ограниченные пространственным зарядом. Закономерность изменения ВАХ с температурой подтверждает наличие локализованных состояний в виде ловушек электронов в запрещенной зоне пентаоксида ниобия.

В настоящее время изделия микроэлектроники служат основой для работы самых современных электронных устройств во многих областях – от коммуникаций, оборудования для автоматизации производств и авиации, до автомобилестроения и бытовой техники. Достичь такого уровня развития стало возможным благодаря совершенствованию технологии применения монокристаллического кремния, используемого как базовый элемент. В последнее время для разработки и изготовления электронных компонентов стали применяться и другие полупроводниковые материалы, одним из которых являются оксиды металлов с полупроводниковыми свойствами.

Достижения научно-технического прогресса привели к новым приложениям, где необходимо применение полупроводниковых материалов из оксидных материалов. Однако между технологиями традиционных полупроводников (Si , Ge , $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$) и технологией оксидных полупроводников имеются большие различия. В случае первой технологии, основанной на полупроводниковых материалах, тип и концентрация носителей заряда определяются контролируемым введением соответствующих примесей (легирование или допирование), играющих роль донорных или акцепторных центров. В случае технологии оксидных полупроводников концентрация носителей заряда связана с образованием дефектов в их структуре на этапе их химического синтеза. Поэтому многие оксиды металлов даже без внешнего введения примесей многие оксиды проявляют заметную проводимость n - или p -типа. Это связано с низкими энтальпиями образования внутренних дефектов нестехиометрии – анионными (кислородными) или катионными вакансиями. Большинство оксидов бинарного состава показывают n -тип проводимости, благодаря тому, что энергия ухода кислорода в междоузельное пространство меньше энергии ухода катиона. Имеется также ряд оксидов (NiO , CuO , MnO_3) которые проявляют проводимость p -типа [1].

В настоящей работе выпрямляющая структура на основе барьера Шоттки формировалась с помощью низкотемпературного магнетронного напыления слоя $n\text{-Nb}_2\text{O}_5$ с контактом из Al на подложке из высоколегированного кремния n^+ -типа. В этом случае контакт $n\text{-Nb}_2\text{O}_5$ с n^+ высоколегированным кремнием является омическим. Были изучены вольтамперные характеристики (ВАХ) при различных температурах и механизмы переноса заряда в таких структурах.

На рисунке 1 показаны кривые ВАХ структуры сильнолегированный кремний (n^+) / оксид ниобия / алюминий, измеренные в диапазоне температур 35–55 °С. Как видно из рисунка, все ВАХ кривые показывают нелинейное поведение, что характерно для протекания тока с Шоттки выпрямляющим контактом. При прямом смещении с напряжением около 700 мВ появляется ток, который с увеличением напряжения начинает изменяться по экспоненциальному закону.

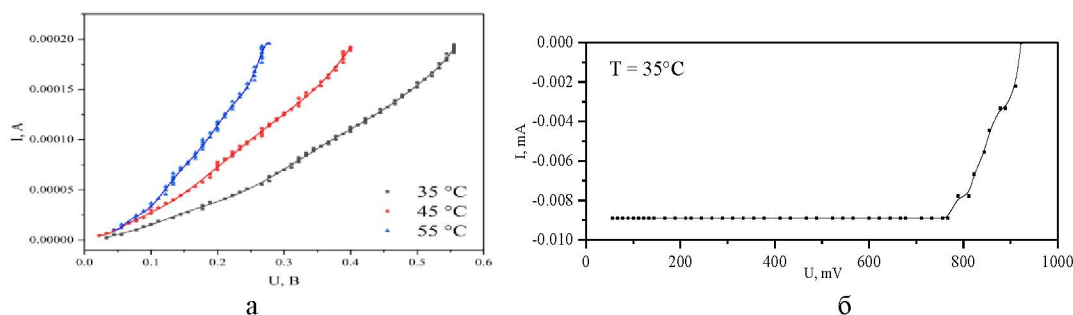


Рисунок 1 – Вольтамперные характеристики структуры сильнолегированный кремний (n^+) / оксид ниобия / алюминий, измеренные в диапазоне температур 35–55 °С при прямом (а) и обратном смещении (б)

В свою очередь, если напряжение меньше 700 мВ, то в МДМ наноструктуре протекает уже незначительный остаточный ток. При этом даже при больших изменениях напряжения остаточный ток не изменяется.

Нелинейность ВАХ вызвана формированием обедненного слоя в приконтактной области оксида ниобия. Поэтому при рассмотрении токовых кривых ВАХ можно ограничиться только областью контакта алюминий/оксид ниобия, где возникает потенциальный барьер Шоттки.

Как видно из рисунка 1 для значений температур 35, 45 и 55 °С имеет место сильная зависимость ВАХ от температуры, что характерно для токов ограниченного пространственного заряда (ТОПЗ), так как степень заполнения ловушек зависит от температуры [2].

Поведение ВАХ в прямом и обратном направлении можно объяснить следующим образом. В отсутствие внешнего напряжения, энергия в глубине оксида ниобия понижается относительно сильно легированного полупроводника. В равновесии ток электронов, проходящий из оксида ниобия в полупроводник равен току электронов, проходящих из полупроводника в оксид ниобия, что соответствует нулевому полю. При минусе на оксиде ниобия, потенциальный барьер в оксиде уменьшается на величину eU . В случае достижения напряжения около 700 мВ, потенциальный барьер уменьшается до такой величины, что ток со стороны полупроводника начинает увеличиваться. В то же время ток со стороны оксида не изменяется, так как имеется барьер со стороны полупроводника. Как следствие, возникает ток, текущий от полупроводника к оксиду, который быстро увеличивается при увеличении напряжения. Если напряжение меньше 700 мВ, то потенциальный барьер Шоттки в оксиде увеличивается, а ток из оксида уменьшается. В этом случае электроны из оксида почти не могут преодолеть потенциальный барьер, и поэтому обратный ток не зависит от внешнего напряжения.

Определить основной механизм проводимости можно с помощью построения ВАХ в координатах, позволяющих выделить линейные участки, которые соответствуют определенному механизму проводимости. На рисунке 2 показаны кривые ВАХ структуры сильнолегированный кремний (n^+)-оксид ниобия измеренные в диапазоне температур 35–55 °С в логарифмических координатах.

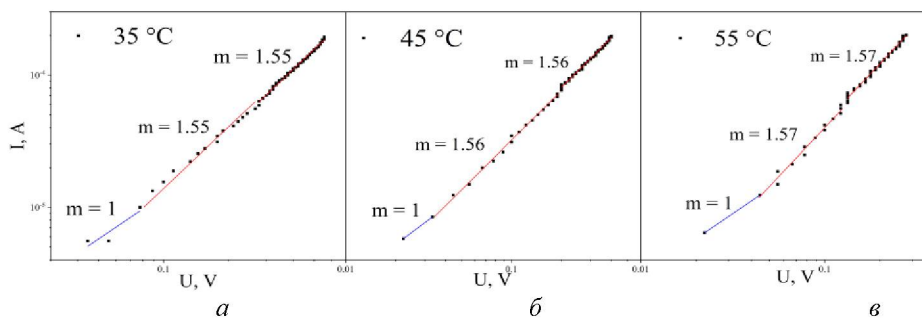


Рисунок 2 – Вольтамперные характеристики структуры сильнолегированный кремний (n^+)-оксид ниобия, измеренные в диапазоне температур 35–55 °С, в логарифмических координатах при различных температурах: а) 35 °С; б) 45 °С; в) 55 °С

Как видно из рисунка 2, вне зависимости от температуры образцов на прямых ВАХ можно выделить два участка, каждый из которых описывается линейной зависимостью тока от напряжения $I \propto U^m$. Первый участок имеет угол наклона $m = 1$. На втором участке угол наклона составляет $m = 1,55$. Первый участок с $m = 1$, это область слабых полей, когда проводимость еще не зависит от электрического поля и описывается законом Ома. Второй участок с $m = 1,55$, это область средних полей, где проводимость определяется инжекционными токами, которые ограничены пространственным зарядом (ТОПЗ). Как известно в пленках оксида ТОПЗ обычно наблюдаются при невысоких (не более 400К) температурах и электрических полях не превышающих 10^6 В/см. Механизм ТОПЗ связан с наличием в запрещенной зоне оксида ловушечных уровней.

С помощью построения ВАХ в координатах, позволяющих выделить линейные участки с определенным механизмом проводимости, были проанализированы ВАХ на этих участках для нахождения механизма проводимости. Проведенный анализ механизмов проводимости показал, что пентооксид ниобия Nb_2O_5 , полученный методом магнетронного распыления, является полупроводником n -типа, в запрещенной зоне которого имеются локализованные состояния в виде электронных ловушек. Рассмотрение ВАХ, выявило, что механизм проводимости пленки Nb_2O_5 определяется ТОПЗ. ВАХ на омическом и ТОПЗ участке описывается степенной зависимостью тока от напряжения $I \propto U^m$.

Список литературы

1. Thickness-dependent electronic structure and morphology of ultrathin Nb_2O_5 films on metal substrates / S. Chen [et al.] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2020. – Vol. 53, no. 12. – P. 125304.
2. Conduction mechanisms and nitrogen doping of atomic layer deposited Nb_2O_5 for MIM capacitors / G. Lupina [et al.] // Microelectronic Engineering. – 2012. – Vol. 96. – P. 32–36.

Charge transfer mechanisms in Al/Nb₂O₅/n⁺-Si structures have been studied. I-V analysis at 35–55°C shows Ohmic conduction at low fields and space-charge-limited currents (SCLC) at medium fields. The temperature dependence confirms the presence of trap levels in the niobium pentoxide band gap.

Коваленко Данила Андреевич, НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, kavalenka.d.a@gmail.com.

Буневич Михаил Алексеевич, НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, bunevich@bsuir.by.

Горбачев Дмитрий Владимирович, кафедра ИСиТ, Институт информационных технологий БГУИР, Минск, Республика Беларусь, d.gorbachev@bsuir.by.

Научный руководитель – *Врублевский Игорь Альфонсович*, кандидат технических наук, доцент, НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь, vtrublevsky@bsuir.edu.by.