

Определение механизмов протекания тока в структурах из двух слоев диэлектриков

© С.В. Булярский¹, В.С. Белов^{1,2}, Г.Г. Гусаров¹, А.В. Лакалин¹, К.И. Литвинова¹, А.П. Орлов¹

¹ Институт нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук, 119991 Москва, Россия

² Национальный исследовательский университет „Московский институт электронной техники“, 124498 Москва, Зеленоград, Россия

E-mail: bulyar2954@mail.ru

Поступила в Редакцию 18 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 10 марта 2023 г.

Принята к публикации 10 марта 2023 г.

Диоды металл-диэлектрик 1-диэлектрик 2-металл являются перспективными для использования в устройствах в паре с антеннами — ректеннах. Для создания диодов с требуемыми для работы характеристиками необходимо понимать механизмы переноса тока в обоих диэлектриках и их контактах с металлами. Для решения этой задачи нужно разработать алгоритм разделения общей вольт-амперной характеристики на характеристики отдельных контактов, анализ которых также позволит исследовать проблемы свойств дефектов в диэлектриках, из которых состоит диод. В данной работе представлено решение перечисленных выше задач на примере диода Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni. Авторы показали, как можно разделить вольт-амперную характеристику на составляющие, вычислить потенциальные барьеры на границах металлов с контактирующими диэлектриками, определить концентрацию и энергетические характеристики дефектов структуры в диэлектриках.

Ключевые слова: диоды металл-диэлектрик-металл, вольт-амперные характеристики, эффект Пула-Френкеля, токи термоэлектронной и термополевой эмиссии, токи, ограниченные пространственным зарядом.

DOI: 10.21883/FTP.2023.02.55335.3545

1. Введение

В связи с актуальностью преобразования энергии излучения в электрическую энергию широко изучаются структуры металл-диэлектрик-металл (МДМ), которые хорошо сочетаются с антеннами для приема электромагнитного излучения. Соединение антенны, которая улавливает энергию излучения, и диода, который выпрямляет переменный ток и обеспечивает получение энергии постоянного тока, называется ректенной [1,2]. Это устройство может быть выполнено как преобразователь энергии или как детектор [3,4]. Низкое сопротивление МДМ-диодов позволяет пропускать ток большой плотности, а их импеданс дает лучшее согласование диода с антенной [2,4,5]. Ректенны обладают определенными преимуществами. Например, они допускают прямую интеграцию с MOS-структурами, работающими в диапазоне частот до 95–100 ГГц [6], и могут работать в ТГц-диапазоне [5,7–9]. Диоды МДМ успешно используются для высокочастотных применений и быстрых переключений в силу того, что они работают на основных носителях заряда, а отсутствие неосновных электронов и дырок исключает рекомбинацию. Эти диоды могут работать в ректеннах без дополнительного источника питания, если для контактов использовать металлы с различной работой выхода [10–12]. Ректенны с углеродными нанотрубками создают для работы в оптическом диапазоне электромагнитного спектра [13]. Следует заметить, что перспективы использования структур МДМ в ГГц- и

ТГц-диапазонах исследуются в основном теоретически. На практике в их оксидных диэлектриках содержится достаточно много дефектов. Эти дефекты создают центры прилипания, которые экспоненциально распределены по энергиям, а также ловушки с электронными уровнями, глубоко расположенными относительно запрещенных зон [14]. Дефекты приводят к существенному отклонению свойств реальных диодов от теоретических. В первую очередь происходит увеличение проводимости диэлектрического слоя. Поэтому необходимо развивать методы диагностики структуры оксидов в уже готовых диодах.

Качество диодов МДМ можно существенно улучшить путем введения второго диэлектрика. При этом растет асимметрия параллельно с улучшением иных свойств диодов. Общая толщина диэлектрического слоя при этом должна оставаться неизменной. Данная конструкция увеличивает асимметрию очень значительно. Конструкция диода с двумя диэлектриками позволяет реализовать механизм резонансного туннелирования и значительно повысить эффективность преобразования энергии [15,16].

В то же время в работе [10] отмечаются недостатки таких МДМ-диодов как технологического характера (необходим тонкий диэлектрик хорошего качества и малая шероховатость поверхности), так и конструктивного характера, которые ограничивают частотный диапазон их работы. Эти недостатки необходимо устранять. Поэтому надо изучать механизмы переноса тока

в подобных диодах, чтобы понять источники наблюдаемых недостатков, в том числе большую концентрацию структурных дефектов, которые могут увеличивать токи утечки. Важным инструментом изучения дефектообразования являются электрические характеристики диодов. Методы исследования диэлектрических слоев хорошо изучены для монослойных однородных диэлектриков [17,18]. Однако для диодов с двумя слоями различных диэлектриков возникают проблемы [19]. Для таких структур надо искать способы изучения влияния каждого диэлектрического слоя на общие характеристики диода. Поэтому в данной работе изучается алгоритм определения падения напряжения на каждом из двух диэлектрических слоев и приводится анализ механизмов переноса в таких диодах на примере структуры Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni.

2. Экспериментальные результаты

2.1. Формирование диодов Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni

Структуры Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni были созданы на кремниевой подложке, покрытой оксидом кремния толщиной 600 нм. На оксид кремния методом электронно-лучевого напыления наносилась пленка никеля толщиной 150 нм (металл 1). На эту пленку наносился слой оксида кремния толщиной 200 нм, в котором вскрывались окна методом фотолитографии с применением плазмохимического травления. Пленка оксида тантала осаждалась на полученную структуру методом атомно-слоевого осаждения поверх пленок никеля и оксида кремния. Толщина осажденных пленок оксида тантала составляла 3, 5 и 7 нм по результатам измерения на эллипсометре. Затем поверх пленки оксида тантала электронно-лучевым методом осаждался слой алюминия (металл 2). Толщина этого слоя составляла 150 нм.

2.2. Исследование стехиометрического состава пленок Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni методом Оже

Результат измерения оже-спектров показывает, что при напылении алюминия электронным лучом между алюминием и оксидом тантала образуется слой из оксида алюминия. Атомы алюминия имеют высокую энергию после испарения и не только осаждаются на поверхности оксида тантала, но и проникают в него. При этом алюминий окисляется за счет кислорода оксида тантала и способствует генерации вакансий кислорода в оксиде тантала вблизи контакта. В свою очередь оксид тантала обедняется кислородом. Таким образом, напыление алюминия приводит к тому, что диэлектрический слой диода состоит из слоев двух веществ, а именно оксида алюминия и оксида тантала.

2.3. Просвечивающая электронная микроскопия высокого разрешения пленок Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni

На основе готовых образцов изготавливались ламели для просвечивающей электронной микроскопии высокого разрешения. Изображение представляет собой чередование нескольких слоев: никеля, оксида тантала, оксида алюминия и сверху алюминий (~ 150 нм). Результаты просвечивающей микроскопии подтверждают, что диэлектрик является двухслойным. У образцов с оксидом тантала различной толщины дополнительно образовался слой оксида алюминия толщиной 2.6 нм. Технология нанесения алюминия была одинакова для образцов с различными толщинами оксида тантала, поэтому толщина оксида алюминия в этом случае сохраняется одинаковой и не зависит от толщины оксида тантала. Таким образом, диэлектрик в изучаемых структурах — двухслойный, он состоит из оксида тантала и оксида алюминия, толщиной 2.6 ± 0.2 нм. Заметим, что суммарная толщина слоев оксидов алюминия и тантала превышает значения, полученные в результате эллипсометрии. Образцы, толщина которых составляла 3 нм по данным эллипсометрии, имеют суммарную толщину оксидного слоя 4.8 нм, а образцы 7 нм по данным эллипсометрии имеют толщину 8.7 нм. Это связано с расширением алюминия при окислении. Так как молярный объем оксида алюминия больше, чем молярный объем алюминия в 2.5 раза, то это и приводит к увеличению толщины пленки при окислении алюминия.

2.4. Вольт-амперные характеристики диодов Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni

Вольт-амперные характеристики диодов Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni со слоями оксида различной толщины имели вид ВАХ асимметричной встречно-барьерной структуры.

Величина выпрямления f_R , которая определялась как отношение величины тока диода при прямом смещении I_{dir} к величине тока диода при обратном смещении I_{rev} для одинаковых значений модуля напряжений ($f_R = I_{dir}/I_{rev}$), зависит от толщины оксида тантала. Она максимальна у образцов, на которые наносилось 7 нм оксида тантала, и достигает значения $\sim 10^3$. Эта величина падает с уменьшением температуры, а ее максимум смещается в область больших напряжений в этом случае.

Высокое значение выпрямления важно для использования диодов в ректеннах. Нелинейность вольт-амперной характеристики слабо меняется при напряжениях, больших 0.2 В. Это также является важным качеством для диодов, которые используются для детектирования электромагнитной энергии, так как при этом уменьшаются нелинейные искажения.

Соотношение между падением напряжения на слоях различной толщины имеет вид

$$\frac{U_2(d_1)}{d_1^{3/2}} = \frac{U_2(d_2)}{d_2^{3/2}}. \quad (9)$$

Алгоритм реализуется следующим образом: 1) Из экспериментальных данных согласно (3) вычисляется ΔU ; проводится оценка возможного механизма протекания тока. 2) Выбираются пары формул, подходящие для этого механизма: (3), (5) или (3), (7), или (3), (9), и проводятся вычисления $U_2(d_1)$, $U_2(d_2)$. 3) Анализируется результат вычислений.

4. Выделение вольт-амперных характеристик Al-Al₂O₃ и Ta₂O₅-Ni диодов Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni при прямом включении

4.1. Выделение вольт-амперных характеристик диодов с различной толщиной оксида тантала и анализ механизмов, которые их формируют

Первичная оценка механизмов переноса осуществляется путем анализа вольт-амперных характеристик диода, которые были построены в различных координатах.

Вольт-амперные характеристики диодов Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni при прямом включении представлены на рис. 1.

Вольт-амперные характеристики в полулогарифмическом масштабе (рис.1, а) являются нелинейными. Следовательно, простой механизм термоэлектронной эмиссии Шоттки в этом случае не реализуется. Вольт-амперные характеристики в полулогарифмическом масштабе, которые построены от корня квадратного из напряжения (рис. 1, б), линейны на начальном участке напряжения, что указывает на механизм Пула-Френкеля, который описывается формулой (4), а затем они отклоняются от этой зависимости. Такое поведение вольт-амперных характеристик указывает на достаточно сильное влияние сопротивления объема материала на эту характеристику. Вольт-амперные характеристики в двойном логарифмическом масштабе являются нелинейными на начальном участке роста напряжения смещения, а затем принимают вид, который имеет место для токов, ограниченных пространственным зарядом с ловушками, которые распределены по экспоненциальному закону [17]. Первичный анализ позволяет сделать вывод, что в диапазоне больших токов имеет место механизм переноса Пула-Френкеля. Поэтому для разделения вольт-амперных характеристик диода Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni на составляющие Ta₂O₅-Ni и Al-Al₂O₃ воспользуемся парой уравнений (3) и (5).

Система уравнений (3) и (5) решалась для случая, когда ток определяется прохождением над барьером,

получается

$$\begin{aligned} U_2(d_1) &= \Delta U / \left(\frac{d_2}{d_1} - 1 \right); \\ U_2(d_2) &= \Delta U / \left(1 - \frac{d_1}{d_2} \right). \end{aligned} \quad (10)$$

Экспериментальные вольт-амперные характеристики при прямом смещении были перестроены с помощью алгоритма, который описан в предыдущем параграфе. Результаты расчета для Ta₂O₅-Ni-контакта приведены на рис. 1, d.

Данные на рис. 1, d показывают, что вольт-амперные характеристики контактов Ta₂O₅-Ni подчиняются механизму токов ограниченных пространственных зарядов. Причем в Ta₂O₅ существует два типа распределения ловушек по энергии: моноэнергетическое, которое создает вертикальный участок на вольт-амперной характеристике, и экспоненциальное, которое определяет монотонно возрастающий участок ВАХ [21–23]. Барьер на границе никеля и оксида тантала смещен в прямом направлении и не оказывает влияния на величину тока. Для вычисления параметров ловушек использовались результаты работы [23]. Напряжение полного заполнения ловушек (U_F) дает возможность определить их концентрацию по формуле [23]

$$N_t = \frac{\epsilon_S U_F}{d_{Ta_2O_5}^2}, \quad (11)$$

где $d_{Ta_2O_5}$ — толщина слоя оксида тантала. Относительная диэлектрическая проницаемость оксида тантала $\epsilon \approx 26$.

Расчет выполнен на основании данных рис. 1, d и оценки толщины методом просвечивающей электронной микроскопии. Результаты вычислений N_t : $1.3 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ для образца 3 нм и $1.2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ для образца 5 нм. Концентрация ловушек, распределенных по энергии, выше и составляет $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Энергия активации моноэнергетической ловушки определяется по формуле [23]

$$E_t = kT \ln \left(\frac{N_C I_1}{N_t I_2} \right), \quad (12)$$

где N_C — эффективная плотность состояний зоны проводимости оксида тантала. Значения токов I_1 и I_2 приведены на рис. 1, d. Вычисления дают результат $E_t = 0.2 \text{ эВ}$. Характеристическую энергию экспоненциального распределения ловушек можно оценить по формуле

$$E_{\text{exp}} = kT_C = k(n - 1)T, \quad (13)$$

где n — наклон показателя степени вольт-амперной характеристики, построенной в двойном логарифмическом масштабе (рис. 1, c). Величина характеристической энергии равна 0.15 эВ.

Как было отмечено выше, оксид алюминия образуется за счет кислорода, который алюминий отбирает у оксида тантала. Можно предположить, что с этим связана высокая концентрация дефектов в оксиде тантала исследуемых диодов и возникновение экспоненциального

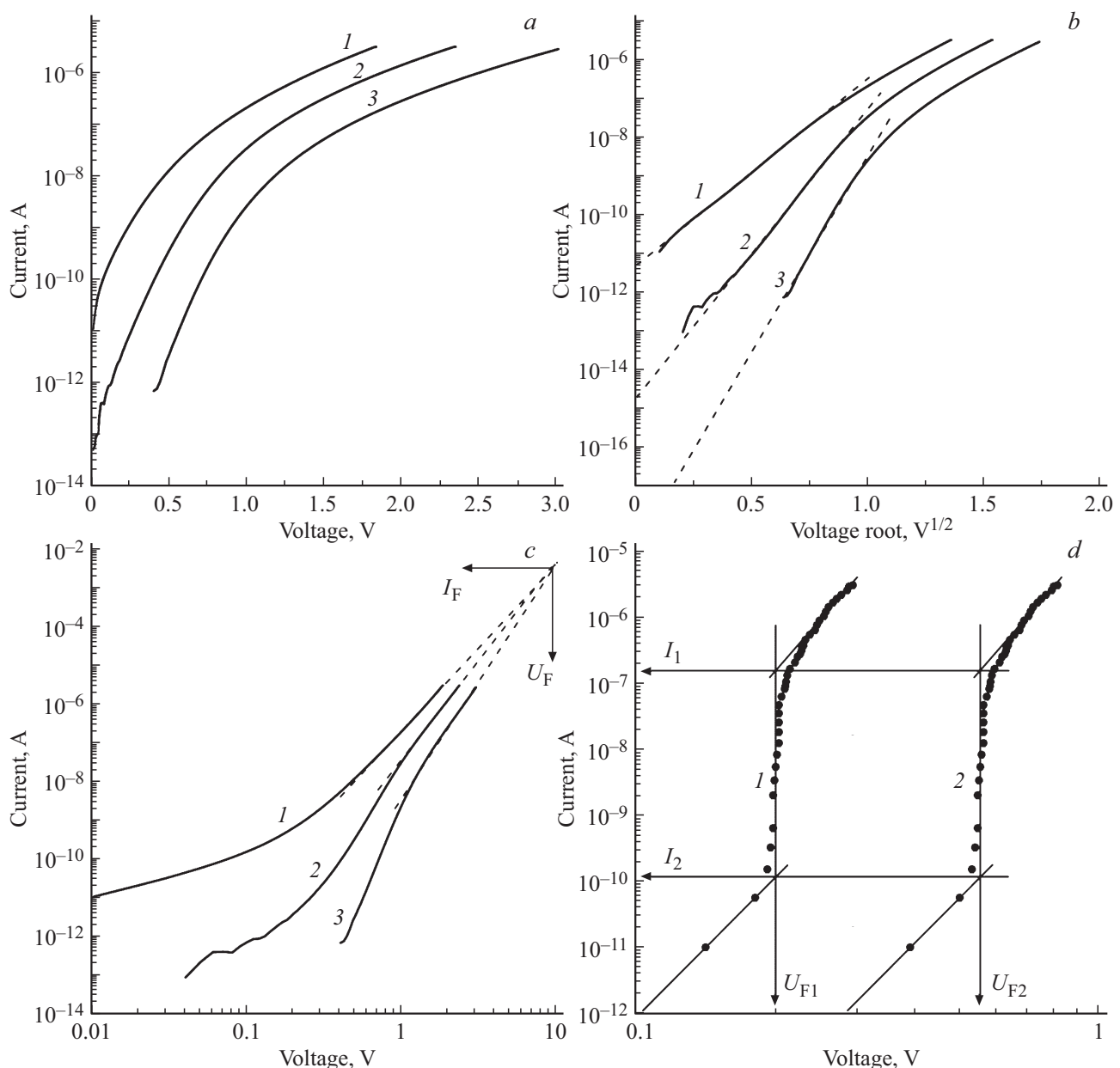


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики диодов Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni: *a* — полулогарифмический масштаб; *b* — полулогарифмический масштаб тока от корня напряжения; *c* — двойной логарифмический масштаб; *d* — вольт-амперная характеристика контакта Ta₂O₅-Ni в двойном логарифмическом масштабе.

распределения ловушек, которое вызвано разупорядочением материала при высокой концентрации дефектов.

Для того чтобы вычислить вольт-амперную характеристику контакта Al-Al₂O₃, надо использовать формулу (1). Вычитая из общего падения напряжения падение напряжения на контакте оксида тантала с никелем, получается вольт-амперная характеристика контакта оксида алюминия с алюминием, которая представлена на рис. 2.

Эта вольт-амперная характеристика определяется механизмом понижения высоты потенциального барьера Пуля-Френкеля и может быть аппроксимирована формулой (4) с константой Пуля-Френкеля, равной 0.0002 эВ·см^{0.5}/В^{0.5}, что близко к ее теоретическому

значению. Высоту потенциального барьера можно оценить по величине тока насыщения. Она составляет 0.74 эВ. Аппроксимация этой зависимости позволяет провести разделение вольт-амперных характеристик при различных температурах.

4.2. Анализ температурных зависимостей вольт-амперных характеристик диодов Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni при прямом смещении

Температурные зависимости вольт-амперных характеристик изучались на диодах, у которых, по данным эллипсометрии, толщина осажденного слоя оксида тантала

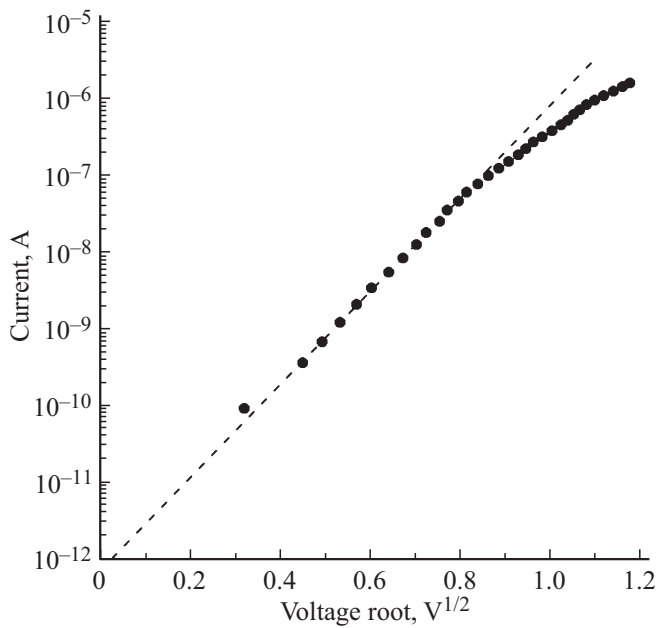


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика контакта Al-Al₂O₃.

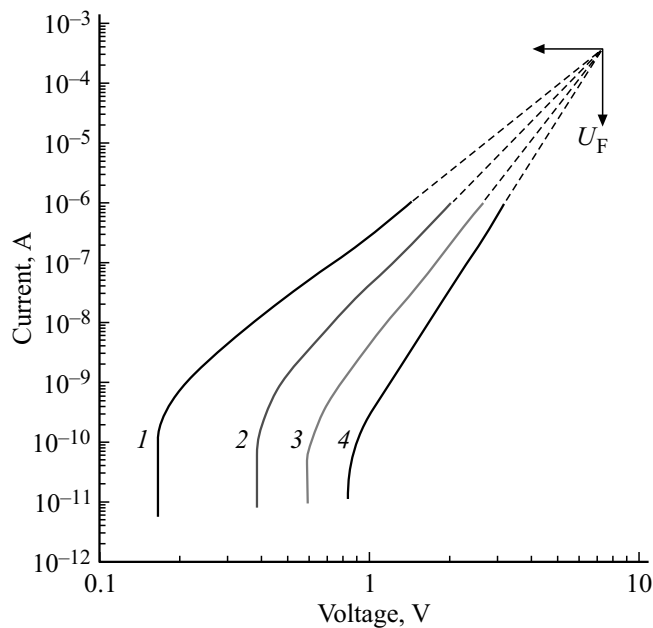


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики контакта Ta₂O₅-Ni после разделения с толщиной оксида тантала 7 нм по данным эллипсометрии, измеренные при температурах, К: 1 — 310, 2 — 280, 3 — 250, 4 — 220.

составляла 7 нм. Именно эти образцы обладали наибольшей асимметрией. Их вольт-амперные характеристики представлены на рис. 3.

Ток диодов Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni сильно зависит от температуры и этот факт является свидетельством механизма термоэлектронной эмиссии Шоттки. Вольт-амперная характеристика диода Al-Al₂O₃, которая описывается формулой (4), была преобразована для выделения вольт-

амперной характеристики диода Ta₂O₅-Ni:

$$I = I_{S1} \exp\left(\frac{\beta_F}{kT} \sqrt{\frac{U_1}{d}}\right) = I_{S1} \exp\left(\frac{\alpha}{T} \sqrt{U_1}\right),$$

$$\alpha = \frac{\beta_F}{k\sqrt{d}}, \quad U_1 = \left[\frac{T}{\alpha}\right]^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{I}{I_{S1}}\right)\right]^2, \quad (14)$$

где U_1 — падение напряжения на контакте Al-Al₂O₃, I_{S1} — ток насыщения этого контакта, T — температура измерения.

Падение напряжения на контакте Al-Al₂O₃ вычислялось по формуле (14) и данным, которые приведены на рис.2. Результаты вычислений представлены на рис. 3. Это вольт-амперная характеристика контакта Ni-Ta₂O₅. Данная характеристика формируется механизмом токов, ограниченных пространственным зарядом, с дискретным уровнем и зоной уровней, которые распределены по экспоненциальному закону, как это уже было проанализировано выше.

Таким образом, полярность напряжения смещения, которая приводит к более быстрому росту тока с напряжением и которую мы назвали прямым током, на самом деле приводит к смещению контакта Ni-Ta₂O₅ в прямом направлении. В этом случае барьер на контакте не оказывает влияния на величину тока, а ток определяется механизмом тока, ограниченного пространственным зарядом, в оксиде тантала, который составляет объем этого контакта. Контакт Al-Al₂O₃ смещен в обратном направлении и ток через него определяется понижением высоты потенциального барьера этого контакта за счет эффекта Пула-Френкеля.

5. Вольт-амперные характеристики диода Ni-Ta₂O₅-Al₂O₃-Al при обратном смещении

Вольт-амперные характеристики диодов Ni-Ta₂O₅-Al₂O₃-Al при обратном смещении линейны в координатах $\ln(I) = f(U^{1/2})$. Было сделано предположение, что эти характеристики определяются понижением высоты потенциального барьера контакта, который находится при обратном смещении, формула (4). Для каждой ВАХ были вычислены величины относительной диэлектрической проницаемости. Они хорошо согласуются с вычислением относительной диэлектрической проницаемости на основании формулы плоского конденсатора и результатов измерения емкости диодов Ni-Ta₂O₅-Al₂O₃-Al. При температурах > 250 К величины диэлектрической проницаемости, вычисленные по двум различным экспериментам, полностью совпадают. Это подтверждает применимость модели понижения высоты потенциального барьера для описания вольт-амперных характеристик в этом диапазоне температур. Различие результатов в области меньших температур указывает на то, что указанная модель при этих температурах

неприменима. Вольт-амперные характеристики параллельны при температурах < 250 К. Оба эти факта указывают на смену механизма протекания тока. Термоэлектронная эмиссия сменяется термополевой и усиливается роль туннельных процессов.

Величина диэлектрической проницаемости, которая была вычислена из константы Пула–Френкеля в области высоких температур, соответствует этой величине, вычисленной из формулы плоского конденсатора, и равна 26. Такое значение диэлектрической проницаемости имеет оксид тантала [24,25]. Это означает, что ток диода $\text{Ni-Ta}_2\text{O}_5\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$ определяется током контакта $\text{Ni-Ta}_2\text{O}_5$. В этом случае можно вычислить высоту потенциального барьера данного контакта по току насыщения при температуре 310 К. Величина барьера этого контакта равна 0.87 эВ.

Таким образом, при рассматриваемой полярности приложенного напряжения в области высоких температур вольт-амперные характеристики определяются только понижением высоты потенциального барьера контакта $\text{Ni-Ta}_2\text{O}_5$. Контакт $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$ смещен в прямом направлении и не оказывает существенного влияния на величину тока диода $\text{Ni-Ta}_2\text{O}_5\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$.

6. Заключение

Нами разработан алгоритм разделения вольт-амперных характеристик диодов с двумя диэлектрическими слоями на отдельные вольт-амперные характеристики контактов $\text{M}_1\text{-D}_1$ и $\text{M}_2\text{-D}_2$. Чтобы использовать этот алгоритм, один из диэлектриков должен иметь постоянную толщину, а у второго диэлектрика толщина должна изменяться. Данный алгоритм был проиллюстрирован на примере диода $\text{Ni-Ta}_2\text{O}_5\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$. Также проанализированы механизмы переноса тока при различных полярностях приложенного напряжения. При одной полярности контакт $\text{Ni-Ta}_2\text{O}_5$ смещается в прямом направлении, а $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$ в обратном. В этом случае проведено выделение вольт-амперных механизмов обоих контактов. Было показано, что ток контакта $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Al}$ обусловлен понижением высоты потенциального барьера за счет эффекта Пула–Френкеля, а ток контакта $\text{Ni-Ta}_2\text{O}_5$ определяется механизмом токов, ограниченных пространственным зарядом, что позволило определить энергетические характеристики и концентрацию дефектов в оксиде тантала. При обратном направлении ток диода определяется понижением потенциального барьера контакта $\text{Ni-Ta}_2\text{O}_5$.

Финансирование работы

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 0004-2022-0004, с использованием Уникальной научной установки „Комплекс оборудования для исследования технологий гетерогенной интеграции и кремний-углеродных нанотехнологий“ Института нанотехнологий микроэлектроники Российской академии наук.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] S. Shrivastava, C.C. Tripathi. *J. Electron. Mater.*, **48** (5), 2635 (2019). <https://doi.org/10.1007/s11664-018-06887-9>
- [2] S. Grover, G. Moddel. *IEEE J. Photovoltaics*, **1** (1), 78 (2011). <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2011.2160489>
- [3] M. Heiblum. *Solid State Electron.*, **24**, 4 (1981). [https://doi.org/10.1016/0038-1101\(81\)90029-0](https://doi.org/10.1016/0038-1101(81)90029-0)
- [4] G. Moddel, S. Grover. *Rectenna Solar Cells* (Springer, 2013). <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3716-1>
- [5] E. Donchev, J.S. Pang, P.M. Gammon, A. Centeno. *MRS Energy Sustainab.*, **1** (1), 1 (2014). <https://doi.org/10.1557/mre.2014.6>
- [6] E. Shaulov, S. Jameson, E. Socher. *2017 IEEE MTT-S Int. Microw. Symp.*, 307 (2017). <https://doi.org/10.1109/MWSYM.2017.8059105>
- [7] M. Dragoman, M. Aldrigo. *Appl. Phys. Lett.*, **109** (11), 113105 (2016). <https://doi.org/10.1063/1.4962642>
- [8] A. Costanzo, M. Dionigi, D. Masotti, M. Mongiardo, G. Monti, L. Tarricone, R. Sorrentino. *Proc. IEEE*, **102** (11), 1692 (2014). <https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2355261>
- [9] I. Wilke, Y. Oppliger, W. Herrmann, F. Kneubühl. *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process.*, **58**, 329 (1994). <https://doi.org/10.1007/BF00323606>
- [10] A.A. Khan, G. Jayaswal, F.A. Gahaffar, A. Shamim. *Microelectron. Eng.*, **181**, 34 (2017). <https://doi.org/10.1016/j.mee.2017.07.003>
- [11] S. Joshi, G. Moddel. *IEEE J. Photovoltaics*, **6** (3), 668 (2016). <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2016.2541460>
- [12] M.N. Gadalla, M. Abdel-Rahman, A. Shamim. *Sci. Rep.*, **4**, 4270 (2014). <https://doi.org/10.1038/srep04270>
- [13] E.H. Shah, B. Brown, B.A. Cola. *IEEE Trans. Nanotechnology*, **16** (2), 230 (2017). <https://doi.org/10.1109/TNANO.2017.2656066>
- [14] G. Pacchioni, S. Valeri. *Oxide Ultrathin Films* (Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2012).
- [15] F. Aydinoglu, M. Alhazmi, B. Cui, O.M. Ramahi, M. Irannejad, A. Brzezinski, M. Yavuz. *Austin J. Nanomed. Nanotechnol.*, **1** (1), 3 (2014). <https://ece.uwaterloo.ca/bcui/Publication/2014%20MIM%20diode%20Ferhat%20AJNN.pdf>
- [16] A. Belkadi, A. Weerakkody, G. Moddel. *Nature Commun.*, **12**, 2925 (2021). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23182-0>
- [17] Fu-Chien Chiu. *Adv. Mater. Sci. Eng.*, Article ID 578168 (2014). <http://doi.org/10.1155/2014/578168>
- [18] T.-H. Chiang, J.F. Wager. *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **65** (1), 223 (2018). <http://doi.org/10.1109/TED.2017.2776612>
- [19] S. Grover, G. Moddel. *Solid State Electron.*, **67**, 94 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.sse.2011.09.004>
- [20] С.В. Булярский, О.А. Невский, Г.Е. Желяпов. *ФТП*, **15** (7), 1660 (1981).
- [21] A. Rose. *Phys. Rev.*, **97**, 1538 (1955). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.97.1538>
- [22] M.A. Lampert. *Phys. Rev.*, **103**, 1648 (1956). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.103.1648>
- [23] M.A. Lampert, P. Mark. *Current Injection in Solids* (N.Y.-London, Academic Press, 1970).

- [24] S. Ezhilvalavan, T.Y. Tseng. J. Mater. Sci.: Mater. Electron., **10**, 9 (1999). <https://doi.org/10.1023/A:1008970922635>
- [25] G. Aygun, R. Turan. Thin Sol. Films, **517** (2), 994 (2008). <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2008.07.039>

Редактор Г.А. Оганесян

Determining the mechanisms of current flow in structures of two-layer dielectrics

S.V. Bulyarskiy¹, V.S. Belov^{1,2}, G.G. Gusarov¹,
A.V. Lakalin¹, K.I. Litvinova¹, A.P. Orlov¹

¹ Institute of Nanotechnology of Microelectronics
of the Russian Academy of Sciences,
119991 Moscow, Russia

² National Research University
of Electronic Technology,
124498 Moscow, Zelenograd, Russia

Abstract Diodes of type Metal-Dielectric 1-Dielectric 2-Metal are promising for use in devices paired with antennas-rectennas. To create diodes with the characteristics required for operation, it is necessary to understand the mechanisms of current transport in both dielectrics and their contacts with metals. To solve this problem, it is necessary to develop an algorithm for dividing the general current-voltage characteristic into characteristics of individual contacts, the analysis of which will also allow us to investigate the problems of the properties of defects in the dielectrics that make up the diode. In this paper, the solution of the above problems is presented on the example of the Al-Al₂O₃-Ta₂O₅-Ni diode. The authors showed how one can divide the current-voltage characteristic into components, calculate potential barriers at the boundaries of metals with contacting dielectrics, and determine the concentration and energy characteristics of structural defects in dielectrics.