Нетипичные C—V-характеристики структуры Al/SmF_3/Ge, вызванные интерфейсными и приграничными ловушками

© М.Б. Шалимова, Н.В. Сачук

Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, 443011 Самара, Россия

E-mail:shamb@ssau.ru

Поступила в Редакцию 9 марта 2026 г.
В окончательной редакции 11 марта 2026 г.
Принята к публикации 20 марта 2026 г.

Существование приграничных ловушек, энергетическое положение которых находится на одном уровне с интерфейсными состояниями в середине запрещенной зоны германия, предлагается как основной фактор, влияющий на нетипичные $C-V$-характеристики метал-диэлектрик-полупроводник структур Al/SmF_3/Ge. Эти приграничные ловушки пространственно расположены в диэлектрике очень близко к интерфейсу SmF_3/nGe и обмениваются с поверхностными состояниями зарядом посредством туннелирования, что помогает поддерживать высокую плотность электронов вблизи границы раздела и создавать режим обогащения основными носителями заряда. При развертке от положительного напряжения к отрицательному изменение эффективного заряда структур Al/SmF_3/Ge составляло $\sim (4-17) \cdot 10^{-8}$ К/см^2, что соответствовало плотности приграничных ловушек $D_{\mathrm{Nit}} = (5-20) \cdot 10^{12}$ эВ$^{-1}$. см$^{-2}$.

Ключевые слова: МДП-структура, германий, фторид самария, плотность поверхностных состояний, плотность приграничных ловушек, сечение захвата ловушки.

DOI: 10.61011/FTP.2026.01.62898.9230

1. Введение

Электрофизические характеристики устройств на основе структур металл–диэлектрик—полупроводник (МДП) сильно зависят от свойств диэлектрического слоя затвора и границы раздела диэлектрик–полупроводник. При нанесении диэлектрической пленки на полупроводниковую подложку возникают электрически активные дефекты, локализованные на границе диэлектрик-полупроводник или вблизи нее. Учитывая их непосредственную близость от свободных носителей в полупроводнике, они могут эффективно захватывать и высвобождать подвижные дырки и электроны. Дефекты, которые могут захватывать или высвобождать дырки и электроны из-за тепловой эмиссии, известны как интерфейсные ловушки (поверхностные состояния, ПС), тогда как дефекты, которые захватывают или освобождают дырки и электроны через туннелирование, называются ловушками, прилегающими к границе раздела (приграничными ловушками) [1].

В последнее время в ряде работ отмечается значительное влияние приграничных ловушек на изменение электрофизических характеристик МДП структур, особенно в режиме инверсии [1–4]. Наблюдалось изменение экспериментальных квазистатических вольт-емкостных ($C-V$) характеристик (металл–оксид-полупроводник) МОП-конденсаторов Al/SiO_2/SiC, которые не проявляли инверсионного поведения без освещения, однако фотостимулированные $C-V$-кривые демонстрировали емкость, примерно равную емкости диэлектрика [2], что объяснялось испусканием электронов и дырок из ловушек в оксиде. Наличие приграничных ловушек, совместно с эффектом квантового ограничения на границе раздела SiC/SiO_2, было предложено как основной фактор, влияющий на полевую подвижность в МОП-транзисторах на основе 4H-SiC. Эти приграничные ловушки пространственно расположены в оксиде очень близко к интерфейсу SiC, с быстрым временем отклика, с уровнями энергии, расположенными на одном уровне с зоной проводимости SiC [1].

Работа [3] посвящена изучению ловушек вблизи границы раздела фаз в термически окисленных и отожженных в NO пленках SiO_2 МОП-конденсаторов Al/SiO_2/4H-SiC методом измерения переходной емкости. Предполагается, что сначала электроны из приграничных ловушек туннелируют к интерфейсным ловушкам на границе раздела, находящимся на эквивалентных энергетических уровнях, затем они термически испускаются в зону проводимости 4H-SiC. Установлено, что глубина заполнения приграничных ловушек составляет 1.3 нм, что согласуется с толщиной нестехиометрического слоя SiO_2 вблизи границы раздела.

В работе [4] систематически исследовали эффекты интерфейсных слоев (ILs) металл–полупроводник или диэлектрик–полупроводник в устройствах AlGaN/GaN, где AlO_x, TiO_x или NiO_x используется как IL. Из вольт-емкостных характеристик структур металл/IL/AlGaN/GaN с IL металл–полупроводник между затвором и AlGaN видно, что IL модулирует пороговое напряжение, приписываемое скачку уровня вакуума, вызванному фиксированным зарядом диполей IL.

Известно, что высокая плотность ловушек на границе раздела и ловушек вблизи границы раздела влияет на работу полевых МДП-транзисторов, включая неэффективную модуляцию инверсионного канала из-за связанного захваченного заряда на границе раздела и

деградацию эффективной полевой подвижности в канале инверсии за счет захвата подвижных носителей заряда. Следовательно, методы, способные количественно оценить плотность ловушек интерфейса и соответствующее энергетическое положение электрически активных дефектов, имеют решающее значение для разработки высококачественной границы раздела диэлектрик-полупроводник для облегчения практического применения МДП-структур. Однако теоретическая основа для объяснения электрических свойств и методов описания приграничных ловушек остается неясной и неполной по сравнению с теоретической основой для поверхностных состояний [3]. В данной работе изучаются интерфейсные и приграничные ловушки в структуре Al/SmF_3/Ge, которые в значительной степени влияют на электрофизические характеристики и ответственны за нетипичный вид $C-V$-характеристик.

2. Экспериментальные результаты

Подложками для МДП-структур служили пластины монокристаллического германия n-типа проводимости марки ГЭС-2 (111). Диэлектрические пленки фторида самария изготавливались методом термического распыления порошкообразного фторида в вакууме при давлении $\sim 10^{-3}$ Па при температуре подложки $\sim 300\,^{\circ}$C. Пленки SmF_3 проявляют достаточно стабильные и воспроизводимые свойства и обладают поликристаллической структурой. Толщина диэлектрика во всех случаях составляла 250–400 нм. Для получения МДП-емкостей на диэлектрик методом термического испарения в вакууме через трафарет наносились алюминиевые электроды диаметром 0.5–0.7 мм.

Для модификации величины эффективного заряда в исходной пленке диэлектрика образцы подвергались нескольким циклам выдержки в среде с повышенной влажностью с последующим низкотемпературным отжигом. Такая обработка приводит как к изменению плотности поверхностных состояний, так и к созданию новых зарядовых центров в объеме диэлектрика и в приграничной с полупроводником области [5,6].

На рис. 1 представлены зависимости удельной емкости от напряжения МДП-структуры Al/SmF_3/nGe, измеренные на частоте 1 МГц. Особенность экспериментальной $C-V$ на рис. 1 состоит в том, что при отрицательных напряжениях, когда при достаточно высокой частоте 1 МГц должен наблюдаться спад емкости при реализации режима инверсии, высокочастотные вольт-фарадные зависимости представляют „низкочастотное“ поведение. Для сравнения высокочастотной и низкочастотной кривых была рассчитана низкочастотная $C-V$-характеристика идеальной МДП-структуры с параметрами германия марки ГЭС-2 (показана на рис. 1).

Смещение начала спада экспериментальной кривой относительно идеальной в области положительных напряжений указывает на наличие отрицательного заряда в пленке диэлектрика. В то же время повторный спад

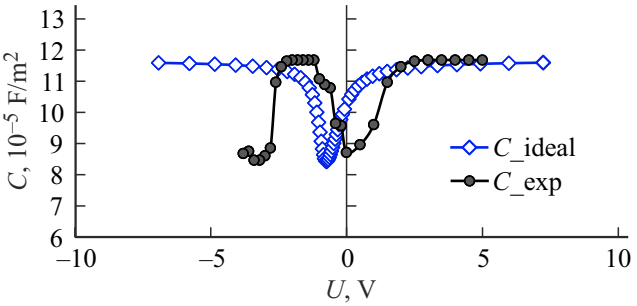


Рис. 1. Зависимости измеренной удельной емкости ($C_{_\,\mathrm{exp}}$) структуры Al/SmF_3/nGe на частоте 1 МГц и расчетной низкочастотной идеальной удельной емкости ($C_{_\,\mathrm{ideal}}$) от напряжения.

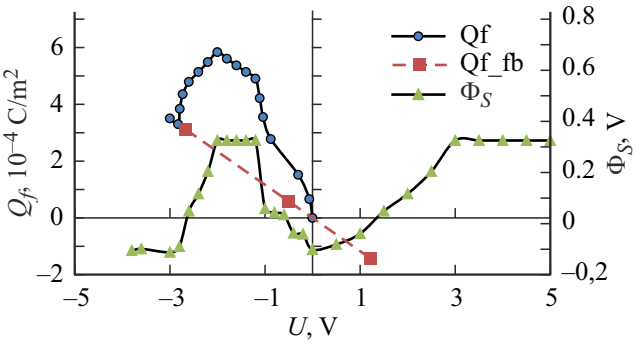


Рис. 2. Зависимость изменения плотности эффективного заряда Q_f и поверхностного потенциала Φ_S от напряжения структуры Al/SmF_3/nGe.

емкости, который наблюдается уже в области отрицательных напряжений, указывает на наличие положительного заряда в пленке диэлектрика. Таким образом, при развертке от положительного напряжения к отрицательному изменился эффективный заряд $Q_f = Q_{\mathrm{ox}} + Q_{\mathrm{it}}$, который складывается из заряда в диэлектрике Q_{ox} и заряда поверхностных состояний Q_{it}.

Для получения зависимости изменения эффективного заряда от напряжения $dQ_f(U)$ из экспериментальных $C-V$-кривых рассчитывалась зависимость поверхностного потенциала Φ_S от напряжения. Затем на кривой $\Phi_S(U)$ выбирались значения напряжения U_1 до минимума и U_2 после минимума, при которых наблюдались одинаковые значения поверхностного потенциала (рис. 2). Поскольку одинаковым значениям поверхностного потенциала соответствуют одинаковые значения заряда Q_S в области пространственного заряда, то можно записать

$$U_1 = -\varphi_k + \Phi_S - \frac{Q_{f1}}{C_D} - \frac{Q_S}{C_D},$$

$$U_2 = -\varphi_k + \Phi_S - \frac{Q_{f2}}{C_D} - \frac{Q_S}{C_D}, \qquad (1)$$

где C_D — удельная емкость диэлектрика, φ_k — разность работ выхода металл–полупроводник, $Q_{f1,2}$ — удельный эффективный заряд на разных участках зависимости поверхностного потенциала от напряжения, Q_S — удель-

ный заряд в области пространственного заряда германия. Тогда

$$(U_1 - U_2)C_D = Q_{f2} - Q_{f1}. \quad (2)$$

Зависимость изменения эффективного заряда от изменения напряжения будет иметь вид

$$dQ_f = C_D(U_1 - U_2) = dQ_f(U). \quad (3)$$

На рис. 2 представлены графики зависимости поверхностного потенциала и плотности эффективного заряда от напряжения структуры Al/SmF$_3$/nGe. Наблюдается рост плотности положительного эффективного заряда с ростом обратного смещения, что выполнялось для всех структур Al/SmF$_3$/nGe, которые проявляли „низкочастотное“ поведение на частоте 1 МГц в режиме инверсии. На рисунке также показаны значения эффективного заряда Q_{f_fb}, полученные из значений напряжения плоских зон (пунктирная прямая линия). Данные зависимости подтверждают, что начальный эффективный заряд структуры был отрицательный, а после того, как поверхностный потенциал достиг режима слабой инверсии, заряд становится положительным. Началу режима слабой инверсии в германии марки ГЭС-2 соответствует значение поверхностного потенциала $\Phi_S \sim -0.08$ В, в этом режиме уровень Ферми на поверхности полупроводника сравнивается с собственным уровнем $n_S = p_S = n_i$, где n_S, p_S — концентрации электронов и дырок на поверхности полупроводника, n_i — собственная концентрация в объеме германия. Такой режим соответствует изгибу зон на поверхности полупроводника, равному разнице между уровнем Ферми и серединой запрещенной зоны в объеме германия $E_F - E_i \approx 0.08$ эВ, что приводит к тому, что внешнее напряжение изменяет энергетический спектр и вызывает контролируемую передислокацию электрической плотности в системе.

Достаточно большая плотность положительного эффективного заряда, возникшая в процессе C–V-измерения в диэлектрике и на границе раздела диэлектрик/германий, для различных образцов составляла $\sim (4-17) \cdot 10^{-8}$ К/см^2. Увеличение положительного эффективного заряда компенсирует бóльшую часть отрицательного смещения, приложенного к верхнему электроду, что препятствует формированию слоя инверсии. Поэтому на поверхности полупроводника слой обогащения сохраняется вплоть до высоких отрицательных напряжений, а время ответа носителей на изменение напряжения будет обеспечиваться основными носителями заряда. Это приводит к специфическому поведению емкости при обратном смещении, напоминающем сценарий „низкочастотного“ поведения емкости. Однако в данном случае при обратном смещении, приложенном к МДП-структуре, включены последовательно емкость слоя диэлектрика и слоя обогащения основными носителями заряда на поверхности германия, а не слоя инверсии.

На рис. 3 показаны зависимости удельной проводимости G и поверхностного потенциала Φ_S от напряжения структуры Al/SmF$_3$/nGe на частоте 1 МГц,

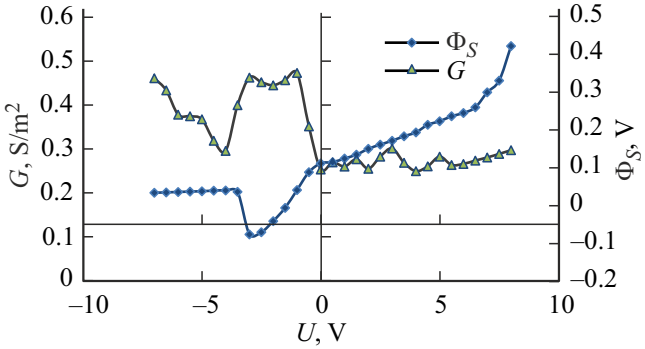


Рис. 3. Зависимость удельной проводимости G и поверхностного потенциала Φ_S от напряжения структуры Al/SmF$_3$/nGe на частоте 1 МГц.

характерные для некоторых экспериментальных образцов. Максимальная проводимость наблюдается вблизи значения поверхностного потенциала $\Phi_S \approx -0.08$ В, что соответствует началу режима слабой инверсии.

При этом значении поверхностного потенциала происходит перезарядка уровней поверхностных состояний с энергией $E_t \sim 0.3$ эВ вблизи середины запрещенной зоны германия, что приводит к росту положительного заряда приграничных ловушек и росту проводимости в структуре. Вследствие этого поверхность полупроводника переходит в режим аккумуляции, и поверхностный потенциал принимает положительные значения. В рассматриваемом случае соответствующие параллельные потери хорошо выражены в G–V кривой и растут, что связано с обменом зарядами между поверхностью и объемом германия.

3. Обсуждение результатов

Предполагается, что интерфейсные ловушки пространственно расположены на границе раздела полупроводник–диэлектрик, где они могут легко обмениваться зарядом с большинством носителей либо из дна зоны проводимости, либо из вершины валентной зоны за счет термоэмиссии и захвата носителей. Энергетически эти ловушки образуют континуум уровней энергии, находящихся в запрещенной зоне полупроводника. Ловушки, которые энергетически расположены ниже уровня Ферми, заполнены, а ловушки с уровнями энергии выше уровня Ферми пусты.

На рис. 4 кривая *1* представляет собой график распределения плотности поверхностных состояний D_{it} по энергиям в запрещенной зоне германия, рассчитанный из C–V-характеристик по методу Термана. Такая зависимость довольно типична для структур Al/SmF$_3$/nGe, как проявляющих, так и не проявляющих специфическое „низкочастотное“ поведение на частоте 1 МГц. Здесь наблюдается пик при $(E_C - E_F)_S = 0.3$ эВ (для различных экспериментальных образцов это значение может

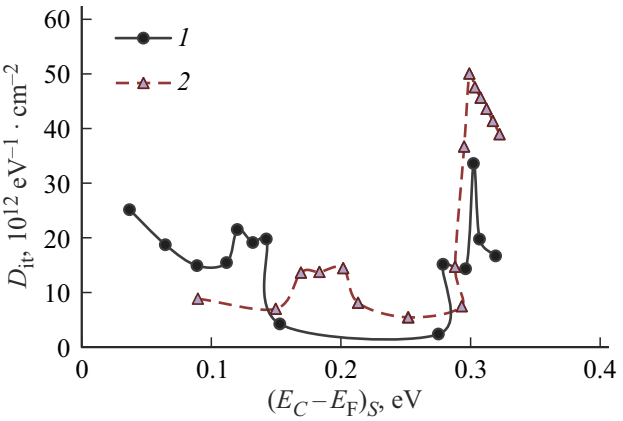


Рис. 4. Распределение плотности поверхностных состояний по энергиям в запрещенной зоне германия структуры Al/SmF_3/nGe. Здесь E_C — энергия дна зоны проводимости, E_F — энергия уровня Ферми, индекс „S“ указывает на принадлежность параметров к поверхности германия.

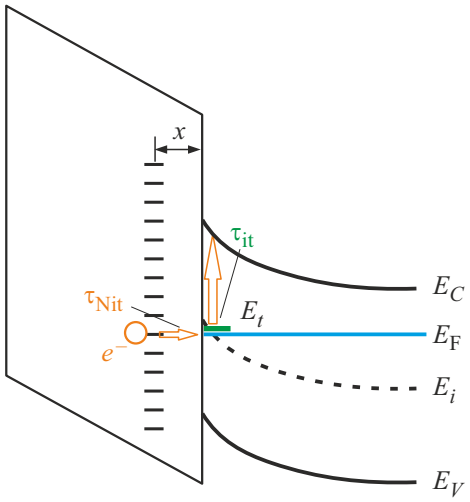


Рис. 5. Зонная диаграмма границы раздела SmF_3/nGe в режиме слабой инверсии, иллюстрирующая процесс туннелирования электрона из приграничной ловушки на энергетический уровень $E_t \sim 0.3$ эВ состояния интерфейса, с последующим переходом в зону проводимости германия.

лежать в интервале 0.3–0.33 эВ) и пик при 0.12–0.14 эВ (для других образцов этот пик может смещаться либо вовсе отсутствовать). Пунктирная кривая *2* представляет аналогичную зависимость со смещением последнего пика в область 0.17–0.21 эВ.

Уровень энергии 0.3 эВ соответствует значению энергии поверхностных состояний E_t примерно в середине запрещенной зоны германия, как представлено на зонной диаграмме рис. 5, и он является наиболее интенсивным, т. е. можно сделать предположение о доминирующем характере этого уровня. Смещение уровней энергии в интервале 0.12–0.21 эВ (либо их полное отсутствие) указывает на то, что на границе раздела SmF_3/nGe могут происходить сложные микроскопические процессы.

На рис. 5 показана зонная диаграмма, соответствующая „низкочастотному“ сценарию изменения C–V-характеристик на частоте 1 МГц. В отсутствие внешнего смещения на полевом электроде ($U = 0$) поверхность может находиться в режиме плоских зон, обеднения или обогащения, во всех этих случаях уровень поверхностных состояний с энергией $E_C - E_t \sim 0.3$–0.33 эВ лежит ниже уровня Ферми. После реализации режима слабой инверсии при $U < 0$ интерфейсные ловушки при $E_t \sim 0.3$ эВ, которые прежде были заняты электронами, начинают освобождаться (так как они уже будут находиться выше уровня Ферми), и за время τ_{it} электроны из них будут переходить в зону проводимости, т. е. создавать свободные электроны. После этого концентрация электронов в зоне проводимости увеличивается, и изгиб зон уменьшается, соответственно, уровень Ферми приближается к краю зоны проводимости на поверхности полупроводника, и ПС вновь заполняются электронами, но эти электроны уже приходят с приграничных состояний за время туннелирования τ_{Nit}.

В таком режиме ловушки могут работать довольно длительное время, пока есть источник электронов из приграничных ловушек. После того как бóльшая часть электронов покидает приграничные ловушки, структура переходит в режим сильной инверсии, и в МДП-структуре реализуется режим „классического“ высокочастотного поведения. Таким образом, интерфейсные ловушки, расположенные в середине запрещенной зоны полупроводника, действуют как исток для электронов. Они захватывают электроны, туннелирующие из приграничных ловушек, и затем отдают их в объем полупроводника. Это совпадает с представлением о том, что электроны в слоях инверсии и аккумуляции могут напрямую туннелировать как к приграничным ловушкам с уровнями энергии ниже уровня Ферми, так и от них [1].

Энергетическое положение уровней приграничных ловушек оценить затруднительно, но по быстроте их ответа можно предположить, что они находятся на одном, эквивалентном уровне с поверхностными состояниями. Приграничная ловушка, отдав электрон на эквивалентное интерфейсное состояние, затем может захватить электрон из приграничного состояния, находящегося на уровне с более высокой энергией, обеспечивая таким образом непрерывность процесса обмена зарядом с поверхностными состояниями.

Сечение захвата определяет среднюю физически активную область дефектного центра. Если свободный электрон находится в окрестности области дефекта, то он будет иметь очень высокую вероятность захвата. Сечение захвата σ интерфейсной ловушки можно рассчитать по времени ответа ловушки, определяемому статистикой Шокли–Рида–Холла. Для подложек n-типа время ответа для ловушки между электронами зоны проводимости и ловушками интерфейса может быть

определено как [1]

$$\tau_{\text{it}} = \frac{\exp[(E_C - E_t)/kT]}{\sigma \upsilon_{\text{th}} N_C}, \qquad (4)$$

где E_C — дно зоны проводимости полупроводника, E_t — энергетическая позиция интерфейсной ловушки, σ —- сечение захвата ловушки, υ_{th} —- тепловая скорость электронов, N_C — эффективная плотность состояний в зоне проводимости. Предполагая частоту измерения 1 МГц, $E_C - E_t \sim 0.3-0.33$ эВ, $N_C = 1.04 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$, $\upsilon_{\text{th}} = 5 \cdot 10^6$см/с, получим сечение захвата интерфейсной ловушки в середине запрещенной зоны германия $\sigma = (2.1-8.2) \cdot 10^{-15}$ см^2, что соответствует стороне квадрата $\sim (4.6-8.2) \cdot 10^{-10}$ м, т.е. сопоставимо с размером атома. Расчетное сечение захвата ловушек с энергетическими уровнями около середины запрещенной зоны вполне реально, это предполагает, что данные ловушки на частоте 1 МГц могут участвовать в процессе электропроводности, обмениваясь зарядом с зоной проводимости.

Действительное время ответа интерфейсной ловушки может быть меньше, чем время, обратное частоте сигнала, тогда сечение захвата будет больше. Возможно, часть этого времени тратится на туннелирование электрона из приграничного состояния, хотя процесс туннелирования может происходить параллельно, т.е. в данный момент времени на одни интерфейсные уровни энергии электроны могут туннелировать, а с других, соседних — переходить в зону проводимости. Приграничные ловушки, находящиеся на одном уровне энергии с интерфейсными ловушками, обмениваются с ними зарядом и изменяют пороговое напряжение от начального значения V_{T0} до V_{T}. Этот захват требует двухэтапного процесса: туннелирование электронов из приповерхностных ловушек и захват электрона интерфейсными ловушками. Время высвобождения электронов из приграничных ловушек для туннельного процесса обычно определяется формулой [3]

$$\tau(x, T) = \text{F}(E, T)\tau_0(E)\exp(2Dx), \qquad (5)$$

где x — расстояние для туннелирования от границы раздела, $D = \sqrt{2m^*(E_C^{\text{ox}} - E)}/\hbar$ — коэффициент туннельного затухания для электрона на энергетическом уровне E, E_C^{ox} — высота энергетического барьера для туннелирования, F — функция Ферми–Дирака, для τ_0 — предполагается широкий диапазон значений $\sim 0.1-10^3$ пс. Например, оценка показала, что максимальное расстояние, на котором электроны еще могут туннелировать из слоя SiO_2, составляет 1.4–1.6 нм в структуре $SiO_2/4H$-SiC. При этом максимальное время туннелирования могло составлять сотни секунд, минимальное время не удалось оценить с помощью применяемого метода исследования [3].

Плотность приграничных ловушек (D_{Nit}) на единицу площади можно рассчитать по захваченному заряду следующим образом [1]:

$$D_{\text{Nit}} = \frac{\Delta Q_f}{2kTq}. \qquad (6)$$

В уравнении (6) k — постоянная Больцмана, T — температура, q — заряд электрона, ΔQ_f — плотность эффективного заряда. Если брать изменение плотности эффективного заряда при развертке от положительного напряжения к отрицательному $\Delta Q_f \sim (4-17) \cdot 10^{-8}$ К/см^2, что наблюдалось в эксперименте, то плотность приграничных ловушек $D_{\text{Nit}} = (5-20) \cdot 10^{12}$ эВ$^{-1} \cdot$ см$^{-2}$. Это сопоставимо с плотностью интерфейсных состояний на границе раздела, в минимуме плотность интерфейсных состояний в верхней половине запрещенной зоны $\sim (2-5) \cdot 10^{12}$ эВ$^{-1} \cdot$ см$^{-2}$.

Приграничные состояния, т.е. заряженные центры в диэлектрике вблизи границы раздела, могут создаваться в результате различных видов обработки, например выдержки в среде с высокой влажностью с последующим кратковременным отжигом [5,6]. Описание природы заряженных центров на границе раздела SmF$_3$/nGe, причин их возникновения и стабильности их существования в данной работе не проводится.

4. Заключение

Существование приграничных ловушек, энергетическое положение которых находится на одном уровне с поверхностными состояниями в середине запрещенной зоны германия, предлагается как основной фактор, влияющий на нетипичные $C-V$-характеристики в МДП-структурах Al/SmF$_3$/nGe. Эти приграничные ловушки пространственно расположены очень близко к интерфейсу SmF$_3$/nGe и отличаются быстрым временем отклика.

Приграничные состояния обмениваются с поверхностными состояниями зарядом посредством туннелирования, и это помогает поддерживать высокую плотность электронов вблизи границы раздела и создавать режим обогащения основными носителями заряда.

Высокий положительный эффективный заряд Q_f сильно уменьшает концентрацию дырок на границе раздела Ge посредством электростатической индукции, что задерживает установление режима сильной инверсии в структуре Al/SmF$_3$/nGe. Уникальная положительная полярность Q_f экранирует объемные неосновные носители от поверхности Ge, что предпочтительно для физической пассивации Ge n-типа, которую можно осуществлять с помощью электрического поля.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] Peyush Pande, Daniel Haasmann, Jisheng Han, Hamid Amini Moghadam, Philip Tanner, Sima Dimitrijev. Microelectron. Reliab., **112**, 113790 (2020). https://doi.org/10.1016/j.microrel.2020.113790

[2] Kyota Mikami, Mitsuaki Kaneko, Tsunenobu Kimoto. J. Appl. Phys., **138**, 225303 (2025). https://doi.org/10.1063/5.0298366

[3] Haodong Fu, Qi Li, Dongyuan Zhai, Yuwei Wang, Jiwu Lu. J. Appl. Phys., **136**, 245702 (2024). https://doi.org/10.1063/5.0238784
[4] Yuchen Deng, Jieensi Gelan, Kazuya Uryu, Toshi-kazu Suzuki. J. Appl. Phys., **135**, 084504 (2024). https://doi.org/10.1063/5.0186457
[5] М.Б. Шалимова, И.В. Белянина. ФТП, **57**, 95 (2023). DOI: 10.21883/FTP.2023.02.55328.4124
[6] Н.В. Сачук, М.Б. Шалимова. Матер. XVI Междунар. конф. по физике диэлектриков „*Диэлектрики-2024*“, 2–4 октября 2024 (СПб., РГПУ им. А.И. Герцена, 2024) с. 12.

Редактор Г.А. Оганесян

Atypical $C-V$ Characteristics of the Al/SmF_3/Ge Structure Caused by Interface and Near-interface Traps

M.B. Shalimova, N.V. Sachuk

Samara University,
443011 Samara, Russia

Abstract The existence of near-interface traps, whose energy position is at the same level as the interface states in the middle of the germanium band gap, is proposed as the main factor influencing the atypical $C-V$ characteristics of Al/SmF_3/Ge metal-insulator semiconductor structures. These near-interface traps are spatially located in the dielectric very close to the SmF_3/nGe interface and exchange charge with the surface states via tunneling, which helps maintain a high electron density near the interface and create a majority-carrier enrichment regime. When sweeping from positive to negative voltage, the change in the effective charge of the Al/SmF_3/Ge structures was $\sim (4-17) \cdot 10^{-8}$ C/cm^2, which corresponded to a density of near-interface traps of $D_{\mathrm{Nit}} = (5-20) \cdot 10^{12}\,\mathrm{eV}^{-1} \cdot \mathrm{cm}^{-2}$.