

07.1;07.2

Исследование плотности интерфейсных состояний на границах раздела диэлектрик/ $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$

© А.П. Ковчавцев¹, М.С. Аксенов^{1,2,¶}, А.Е. Настовьяк¹, Н.А. Валишева¹, Д.В. Горшков¹, Г.Ю. Сидоров¹, Д.В. Дмитриев¹

¹ Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

¶ E-mail: m.se.aksenov@gmail.com

Поступило в Редакцию 10 февраля 2020 г.

В окончательной редакции 20 февраля 2020 г.

Принято к публикации 20 февраля 2020 г.

Изучены вольт-фарадные характеристики (ВФХ) структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) $\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ и $\text{Au}/\text{SiO}_2/\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$. Установлено, что измерение ВФХ МДП-структур на основе InAlAs фрагментарным способом (в отличие от стандартной методики регистрации при постоянной скорости развертки по напряжению) значительно ослабляет влияние гистерезисных явлений и позволяет записывать стационарные кривые. Показано, что рассчитанная методом Термана из таких ВФХ плотность быстрых интерфейсных состояний слабо изменяется по ширине запрещенной зоны InAlAs и составляет $(3-6) \cdot 10^{11}$ и $(1-3) \cdot 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ для МДП-структур с Al_2O_3 и SiO_2 соответственно.

Ключевые слова: $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$, диэлектрик, вольт-фарадная характеристика, плотность интерфейсных состояний.

DOI: 10.21883/PJTF.2020.10.49423.18238

Тройное соединение InAlAs является перспективным материалом для изготовления транзисторов с высокой подвижностью электронов [1], сверхвысокочастотных фотодетекторов [2] и лавинных фотодиодов [3,4], работающих в спектральном диапазоне $1.55 \mu\text{m}$. Как и для других полупроводников типа A^3B^5 , качество границы раздела диэлектрик/ InAlAs определяет стабильность и надежность полупроводниковых устройств, в которых диэлектрические слои используются в качестве функциональных элементов (например, в полевых транзисторах или варикапах) и защитных покрытий, пассивирующих поверхность полупроводника. Однако разработка надежного *ex situ* способа формирования границ раздела диэлектрик/полупроводник A^3B^5 (InAlAs), при котором обеспечивается низкая (менее $10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) плотность интерфейсных состояний (D_{it}), является сложной технологической задачей. Установлено, что основной причиной несовершенства данных границ раздела являются различного рода дефекты полупроводниковой поверхности и переходного слоя, состоящего из оксидов элементов полупроводника сложного и нестехиометрического состава [5–7]. Уменьшение величины D_{it} на границах раздела диэлектрик/ A^3B^5 достигается с помощью различных способов химической модификации поверхности и осаждения диэлектрических слоев, а также путем оптимизации технологических процессов.

Плотность интерфейсных состояний на границе раздела диэлектрик/ InAlAs , сформированной методом атомно-слоевого осаждения (АСО) high-k диэлектриков HfO_2 или Al_2O_3 на поверхность InAlAs после проведения различных химических обработок, изучалась

в [8–11]. Во всех работах при анализе импеданса структур металл–диэлектрик–полупроводник (МДП) была получена D_{it} более $10^{12} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Целью настоящей работы является изучение плотности интерфейсных состояний на границах раздела диэлектрик/ InAlAs , сформированных слоями Al_2O_3 и SiO_2 , которые синтезировались методами АСО и газофазного осаждения при пониженном давлении соответственно. Отметим, что основное внимание уделяется быстрым (с характерными временами перезарядки менее 10^{-3} s) интерфейсным состояниям, которые приводят к деформации (изменению наклона) стационарных вольт-фарадных характеристик (ВФХ) в МДП-структурах, тогда как медленные интерфейсные состояния, ответственные только за гистерезисные явления ВФХ, подробно обсуждаться не будут.

В работе использовались гетероэпитаксиальные структуры $i\text{-In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ (30 nm)/ $i(n)\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (500 nm)/ $n^+\text{-In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$ (300 nm), выращенные на *epi-ready* полуизолирующих подложках InP (001) методом молекулярно-лучевой эпитаксии на установке „Compact 21T“ фирмы Riber. Слои InAlAs выращивались при температуре 530°C . Защитный слой InGaAs , предотвращающий окисление InAlAs при изготовлении омического контакта, выращивался при температуре 480°C .

Слои Al_2O_3 формировались методом АСО при температуре 190°C на установке „FlexAL System“ фирмы Oxford Instruments. В качестве прекурсоров использовались триметилалюминий и кислород (удаленная кислородсодержащая высокочастотная плазма). Слои SiO_2

синтезировались путем окисления моносилана кислородом при давлении 140 Torr и температуре 195°C [12].

Перед осаждением диэлектрического слоя с поверхности образцов удалялся защитный слой InGaAs в растворе янтарной кислоты с перекисью водорода в соотношении 5:1. Затем проводилась обработка поверхности InAlAs в 10% водном растворе HCl в течение 15 s для удаления собственного оксидного слоя. Круглые металлические контакты площадью $2 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2$ изготавливались при термическом напылении золота через маску. Омический контакт к слою n^+ -InAlAs формировался напылением Ge/Au/Ni/Au (20/40/20/200 nm) и вжиганием при $T = 385^\circ\text{C}$ в течение 5 min в водороде после удаления слоев i -InGaAs и i -InAlAs в смеси $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 38$.

Толщина диэлектрических слоев контролировалась методом эллипсометрии с помощью сканирующего эллипсометра Microscan. При расчете толщины использовалась модель однородной изотропной пленки на полупроводниковой подложке с комплексным показателем преломления $N_{\text{sub}} = 3.637 - 0.362j$.

ВФХ МДП-структур измерялись с помощью анализатора импеданса Keysight B1500A. Измерения проводились в режиме параллельной цепи с использованием синусоидального тестового сигнала с амплитудой 5 mV в темноте при температуре 310 K. Частота переменного сигнала во всех измерениях составляла 1 kHz, так как при повышении частоты наблюдалось существенное уменьшение емкости в режиме обогащения, что связано с влиянием последовательного сопротивления слоя i -InAlAs и осложняет интерпретацию ВФХ. Методика расчета теоретических ВФХ в предположении отсутствия интерфейсных состояний в полной мере описана в работах [13,14]. При расчетах значение работы выхода металла полагалось равным 4.9 eV.

На рис. 1 (кривая 1) представлена зависимость малосигнальной емкости от напряжения МДП-структур Au/Al₂O₃/InAlAs с диэлектрическим слоем толщиной 6 nm. Видно, что ВФХ, записанные при постоянной скорости развертки в диапазоне напряжений смещения $\pm 2 \text{ V}$ при прямом и обратном проходе, имеют гистерезис электронного типа с величиной сдвига $\Delta V \approx 0.5 \text{ V}$. Наблюдаемая петля гистерезиса, вероятнее всего, связана с захватом электронов на ловушки в диэлектрическом слое вблизи границы раздела с характерными временами перезарядки более 10^{-1} s , их плотность составляет $\sim 7 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$. Данные ловушки часто называют медленными интерфейсными состояниями.

Для ослабления влияния гистерезисных эффектов на вид ВФХ и упрощения ее анализа использовался метод регистрации, описанный в работе [15]. В данном методе для устранения гистерезисных эффектов ВФХ формируется из отдельных фрагментов (рис. 1, кривая 2), которые записываются при малом изменении напряжения смещения ($\pm 50 \text{ mV}$) вблизи фиксированного напряжения (рис. 1, вставка).

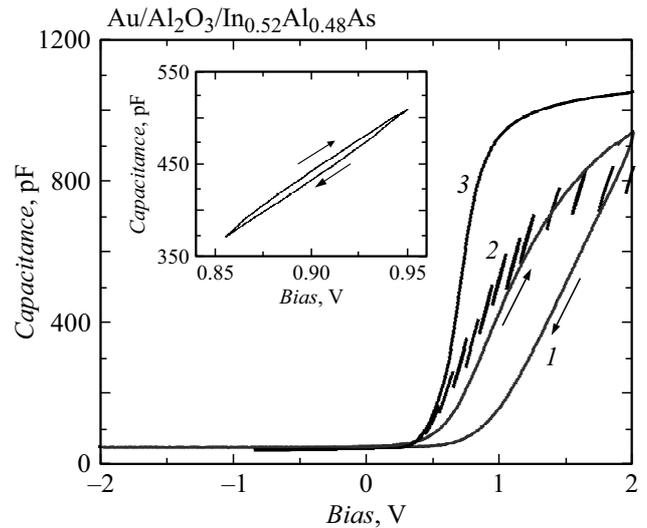


Рис. 1. Экспериментальные ВФХ (1, 2), измеренные на частоте 1 kHz, и теоретическая ВФХ (3) МДП-структуры Au/Al₂O₃ (6 nm)/InAlAs. Кривая 1 записана в диапазоне напряжений смещения $\pm 2 \text{ V}$ при постоянной скорости развертки 10^{-2} V/s , кривая 2 — фрагментарным способом. На вставке представлен увеличенный отдельный фрагмент (штрих) кривой 2.

Из рис. 1 видно, что гистерезисные ВФХ МДП-структур Au/Al₂O₃/InAlAs (кривые 1) имеют существенно меньший наклон по сравнению с фрагментами кривой 2. Это указывает на то, что записанные стандартным методом ВФХ с гистерезисом являются нестационарными и не могут использоваться для определения D_{it} на границе раздела Al₂O₃/InAlAs методом Термана [16], который основан на сравнении наклонов экспериментальной и теоретической ВФХ. Важно отметить, что некорректное использование нестационарных гистерезисных ВФХ (рис. 1, кривая 1) для расчетов методом Термана приведет к существенному завышению значений D_{it} .

При фрагментарном же способе записи гистерезис практически отсутствует, т.е. наклон каждого фрагмента соответствует наклону стационарной ВФХ при данном значении поверхностного потенциала. Отметим, что увеличение смещения фрагментов стационарной ВФХ относительно теоретической в области положительных напряжений смещения связано с захватом электронов на ловушки в диэлектрическом слое (рис. 1, кривая 2). Расчет квазинепрерывной спектральной плотности быстрых интерфейсных состояний методом Термана с использованием стационарных ВФХ МДП-структур Au/Al₂O₃/InAlAs (рис. 1, кривая 2) и теоретической ВФХ (рис. 1, кривая 3) показывает, что величина плотности интерфейсных состояний на границе раздела, образованной слоем Al₂O₃, вблизи середины запрещенной зоны InAlAs составляет $3 \cdot 10^{11} \text{ eV}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ и монотонно увеличивается к краю зоны проводимости примерно в 2 раза.

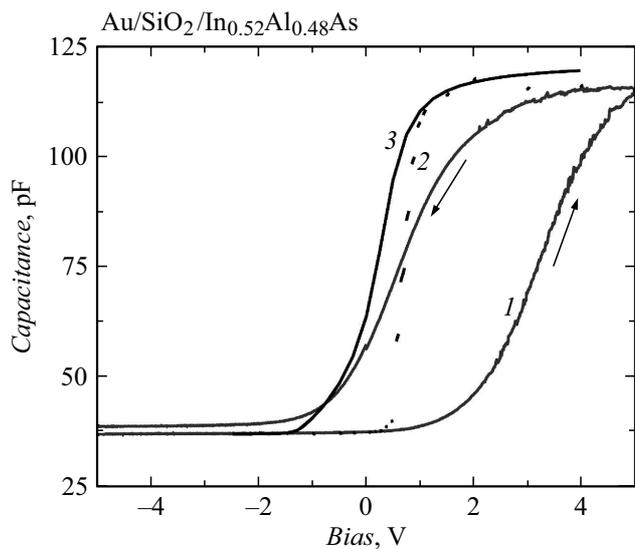


Рис. 2. Экспериментальные ВФХ (1, 2), измеренные на частоте 1 kHz, и теоретическая ВФХ (3) МДП-структуры Au/SiO₂ (80 nm)/InAlAs. Кривая 1 записана в диапазоне напряжений смещения ± 5 V при постоянной скорости развертки 10^{-2} V/s, кривая 2 — фрагментарным способом.

На рис. 2 (кривая 1) представлена записанная при постоянной скорости развертки по напряжению ВФХ МДП-структуры Au/SiO₂/InAlAs с толщиной диэлектрического слоя 80 nm. В отличие от ВФХ МДП-структур с Al₂O₃ (рис. 1, кривые 1) данные кривые демонстрируют ионный тип гистерезиса (рис. 2, кривые 1), что связано с наличием в слоях SiO₂, синтезированных при пониженной температуре, подвижных ОН-ионов [12]. Полученная из анализа данных гистерезисных ВФХ плотность переносимого ионами заряда составляет около $2 \cdot 10^{12}$ cm⁻², что в несколько раз меньше плотности медленных состояний, ответственных за гистерезис, на границе раздела Al₂O₃/InAlAs.

Распределение D_{it} для границы раздела SiO₂/InAlAs, полученное методом Термана из стационарных ВФХ МДП-структур Au/SiO₂/InAlAs без гистерезиса, записанных фрагментарным способом (рис. 2, кривая 2), подобно наблюдавшемуся для границы раздела Al₂O₃/InAlAs. Оно плавно возрастает от середины запрещенной зоны к краю зоны проводимости. При этом величина D_{it} изменяется от $1 \cdot 10^{11}$ до $3 \cdot 10^{11}$ eV⁻¹ · cm⁻², что сопоставимо со значениями, полученными для границы раздела Al₂O₃/InAlAs, при формировании которой (во время первых циклов АСО) реализуется эффект самоочистки, приводящий к уменьшению толщины остаточного собственного оксидного слоя [17].

Таким образом, при изучении ВФХ МДП-структур Au/Al₂O₃ (6 nm)/InAlAs и Au/SiO₂ (80 nm)/InAlAs установлено, что ВФХ, записанные при постоянной скорости развертки по напряжению, из-за влияния гистерезисных эффектов являются нестационарными. Использование фрагментарного способа записи ВФХ поз-

воляет существенно ослабить гистерезисные эффекты и получить стационарные кривые. Проведенные методом Термана расчеты с использованием фрагментарных ВФХ показали, что спектры плотности интерфейсных состояний на исследованных границах раздела диэлектрик/InAlAs, сформированных двумя разными диэлектрическими слоями с помощью двух различных методов, практически не различаются. Они слабо изменяются по ширине запрещенной зоны InAlAs в пределах $(3-6) \cdot 10^{11}$ и $(1-3) \cdot 10^{11}$ eV⁻¹ · cm⁻² для границ раздела со слоями Al₂O₃ и SiO₂ соответственно. Данные значения существенно меньше, чем приведенные в работах [8–11]. Полученные результаты показывают, что наблюдаемые различия величин D_{it} могут быть связаны как с технологическими особенностями формирования границы раздела диэлектрик/InAlAs, так и с особенностями измерения ВФХ МДП-структур на основе InAlAs.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 18-32-00548.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Takahashi T., Kawano Y., Makiyama K., Shiba S., Sato M., Nakasha Y., Hara N. // IEEE Trans. Electron. Dev. 2017. V. 64. P. 89–95. DOI: 10.1109/TED.2016.2624899
- [2] Aksenov M.S., Valisheva N.A., Chistokhin I.B., Dmitriev D.V., Kozhukhov A.S., Zhuravlev K.S. // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 114. P. 221602. <https://doi.org/10.1063/1.5091598>
- [3] Li N., Sidhu R., Li X., Ma F., Zheng X., Wang S., Karve G., Demiguel S., Holmes A.L., Jr., Campbell J.C. // Appl. Phys. Lett. 2003. V. 82. P. 2175–2177. <https://doi.org/10.1063/1.1559437>
- [4] Яковлева Н.И., Болтарь К.О., Седнев М.В., Лопухин А.А., Коротаев Е.Д. // Прикладная физика. 2015. № 1. С. 87–91.
- [5] Берченко Н.Н., Медведев Ю.В. // Успехи химии. 1994. Т. 63. № 8. С. 655–672. [Пер. версия: <https://doi.org/10.1070/RC1994v063n08ABEH000108>]
- [6] Robertson J. // Appl. Phys. Lett. 2009. V. 94. P. 152104. <https://doi.org/10.1063/1.3120554>
- [7] Houssa M., Scarrozza M., Pourtois G., Afanas'ev V.V., Stesmans A. // Appl. Phys. Lett. 2011. V. 98. P. 141901. <https://doi.org/10.1063/1.3575559>
- [8] Kobayashi M., Thareja G., Sun Y., Goel N., Garner M., Tsai W., Pianetta P., Nishi Y. // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 142906. <https://doi.org/10.1063/1.3379024>
- [9] Brennan B., Galatage R.V., Thomas K., Pelucchi E., Hurley P.K., Kim J., Hinkle C.L., Vogel E.M., Wallace R.M. // J. Appl. Phys. 2013. V. 114. P. 104103. <https://doi.org/10.1063/1.4821021>
- [10] He G., Lv H.-H., Hui G., Zh Y.-M., Zh Y.-M., Wu L.-F. // Chin. Phys. B. 2015. V. 24. P. 126701. DOI: 10.1088/1674-1056/24/12/126701

- [11] *Wu L.-F., Zhang Y.-M., Lv H.-L., Zhang Y.-M.* // *Chin. Phys. B.* 2016. V. 25. P. 108101.
DOI: 10.1088/1674-1056/25/10/108101
- [12] Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона / Отв. ред. С.П. Сеница. Новосибирск: Наука, 2001. С. 10.
- [13] *Kovchavtsev A.P., Tsarenko A.V., Guzev A.A., Aksenov M.S., Polovinkin V.G., Nastovjak A.E., Valisheva N.A.* // *J. Appl. Phys.* 2015. V. 118. P. 125704.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.4931772>
- [14] *Kovchavtsev A.P., Sidorov G.Y., Nastovjak A.E., Tsarenko A.V., Sabinina I.V., Vasilyev V.V.* // *J. Appl. Phys.* 2017. V. 121. P. 125304. <https://doi.org/10.1063/1.4978967>
- [15] *Nakagawa T., Fujisada H.* // *Appl. Phys. Lett.* 1977. V. 31. P. 348–350. <https://doi.org/10.1063/1.89695>
- [16] *Terman L.M.* // *Solid-State Electron.* 1962. V. 5. P. 285–299.
[https://doi.org/10.1016/0038-1101\(62\)90111-9](https://doi.org/10.1016/0038-1101(62)90111-9)
- [17] *Trinh H.-D., Chang E.Y., Wong Y.-Y., Yu C.-C., Chang C.-Y., Lin Y.-C., Nguyen H.-Q., Tran B.-T.* // *Jpn. J. Appl. Phys.* 2010. V. 49. P. 111201. <https://doi.org/10.1143/JJAP.49.111201>