

О природе изменения эффективного поверхностного заряда на кристаллах InAs при выращивании анодного оксидного слоя

© 2017 г. А. В. Артамонов¹, В. П. Астахов², И. Б. Варлашов^{3,4}, П. Д. Гиндин²,
Н. И. Евстафьева², П. В. Митасов³, И. Н. Мирошникова^{3,4,§}

¹ООО «Технологические системы защитных покрытий»,
Симферопольское шоссе, д. 19, Щербинка, Москва, 108852, Россия

²ОАО «Швабе-Фотосистемы»,
Днепропетровский проезд, д. 4А, стр. 3А, Москва, 117545, Россия

³Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250, Россия

⁴Институт нанотехнологий микроэлектроники РАН «ИНМЭ РАН»,
Ленинский просп., д. 32А, Москва, 119991, Россия

Аннотация. Изучена динамика изменения распределения атомов фтора по толщине выращенных слоев анодного оксида и эффективного поверхностного заряда на кристаллах InAs под такими слоями. Анодное окисление проведено в щелочном электролите с добавкой фторосодержащего компонента в гальваностатическом режиме при плотностях анодного тока 0,05 или 0,5 мА · см⁻². Толщину слоев в пределах 32—51 нм варьировали, задавая конечное напряжение на электродах при выращивании в пределах значений 15—25 В. Толщина и коэффициент преломления слоев измерены методом эллипсометрии, а распределение атомов фтора по толщине — методом фотоэлектронной спектроскопии в сочетании с ионным травлением. Параллельно на основе выращенных слоев изготовлены МДП-структуры, из расчета вольт-фарадных характеристик которых определены значения эффективного поверхностного заряда и плотности поверхностных состояний, соответствующие различным толщинам слоя.

Установлено, что по мере роста слоев независимо от плотности тока анодирования происходит их уплотнение. Профиль распределения атомов фтора смещается в сторону InAs, а положительный эффективный поверхностный заряд постепенно уменьшается от $3,6 \cdot 10^{11}$ до $2,0 \cdot 10^{11}$ см⁻² при плотности поверхностных состояний в пределах $(6—7) \cdot 10^{11}$ эВ⁻¹ · см⁻² для всех случаев. На основе сопоставления полученных данных с теоретическими представлениями о зарядовом строении МДП-структуры сделан вывод о постепенном отдалении встроенного заряда от границы с InAs в процессе выращивания анодного оксидного слоя. Это объясняет наблюдаемое уменьшения эффективного поверхностного заряда с ростом толщины слоя. Полученный результат свидетельствует о том, что скорость роста слоя превышает скорость смещения встроенного заряда в сторону InAs.

Ключевые слова: арсенид индия, анодное окисление, анодный оксидный слой, эффективный поверхностный заряд, встроенный заряд, плотность поверхностных состояний, профиль концентрации

Введение

Анодные оксидные слои (АОС) на полупроводниковых материалах группы A^{III}B^V часто применяются в качестве диэлектрических слоев в составе структур типа «диэлектрик—полупроводник» (ДП) и «металл—диэлектрик—полупроводник» (МДП).

Так, ДП-структуры и их АОС выполняют функции защиты и пассивации поверхности планарных p—n-переходов биполярных приборов (см.,

например, [1—6]), а АОС МДП-структур являются активным элементом приборов на основе эффекта поля [7].

Большой интерес для применения в фотоэлектронике представляют ДП- и МДП-структуры на основе монокристаллов InAs. Для обоих типов структур важнейшим параметром является эффективный поверхностный заряд на границе InAs—АОС Q_{ss}^{eff} , который складывается из заряда на поверхностных состояниях границы Q_{ss} и заряда, встроенного

Артамонов Антон Вячеславович¹ — научный сотрудник; Астахов Владимир Петрович² — доктор техн. наук, главный специалист; e-mail: ko-skb@mail.ru; Варлашов Игорь Борисович^{3,4} — канд. техн. наук, доцент кафедры электроники и наноэлектроники (3), старший научный сотрудник (4); e-mail: WarlashovI@mpei.ru; Гиндин Павел Дмитриевич² — доктор техн. наук, генеральный директор; Евстафьева Наталия Игоревна² — начальник отдела; Митасов Павел Викторович³ — аспирант, e-mail: mitasovpv@gambler.ru; Мирошникова Ирина Николаевна^{3,4,§} — доктор техн. наук, зав. кафедрой электроники и наноэлектроники (3), старший научный сотрудник (4), e-mail: MiroshnikovaIN@mpei.ru

§ Автор для переписки.

енного в АОС на расстоянии возможного взаимодействия с зарядом свободных носителей в InAs вблизи границы $Q_{\text{АОС}}$ [8–11]. В зависимости от знака и величины $Q_{\text{ss}}^{\text{eff}}$ на поверхности высокоомных областей биполярных приборов могут формироваться инверсионные или обогащенные области, наличие которых приводит соответственно к увеличению обратных токов и даже закоротке p – n -перехода или к уменьшению его пробивного напряжения. В случае полевых приборов изменяются значения управляющих напряжений или теряется работоспособность.

Известно, что АОС на InAs с наименьшими значениями $Q_{\text{ss}}^{\text{eff}}$ создают анодированием в гальваностатическом режиме с добавлением в электролит фторсодержащей компоненты. Последняя позволяет внедрить в растущий АОС атомы фтора [12], которые компенсируют встроенный заряд, вызванный наличием ловушек для дырок [13], а также устранить источник поверхностных состояний за счет образования фтористо-кислородных соединений элементов III и V групп в АОС [14]. Такое фторирование АОС позволяет получать уникальные параметры границы InAs–АОС, актуальные для приборов с зарядовой инжекцией, например, в структурах InAs–АОС–SiO₂–In₂O₃ [15].

Значения Q_{ss} и $Q_{\text{АОС}}$ определяются элементарным и химическим составом и их распределением по толщине АОС, которые зависят от состава электролита, режима анодирования, плотности тока анодирования, напряжения на электродах и длительности анодирования, так как именно эти показатели определяют процессы формирования АОС.

Изучению состава АОС на InAs методом Оже- и фотоэлектронной спектроскопии посвящены работы [16–18]. Случай малых толщин АОС (менее 20 нм) изучали в работе [19]. Определяли распределения атомов фтора, индия, кислорода и мышьяка по толщине АОС. Выяснено, что АОС состоят из оксифторидов индия и мышьяка, а также оксида индия In₂O₃. При этом фтор накапливается вблизи границы InAs, и его концентрация у границы с InAs возрастает примерно в 3 раза при увеличении плотности тока анодирования от 0,05 до 0,5 мА·см^{–2}. Однако не было выяснено, как процессы формирования состава АОС и накопления фтора у границы отражаются на значению эффективного поверхностного заряда и его трансформации в процессе роста АОС.

Работа посвящена изучению динамики изменения распределения атомов фтора по толщине слоев анодного оксида в процессе их выращивания и эффективного поверхностного заряда на кристаллах InAs под такими слоями. Результаты этих исследований должны способствовать выяснению природы изменений значений $Q_{\text{ss}}^{\text{eff}}$ при росте АОС и могут оказаться полезными для разработчиков

приборов на InAs при выборе толщины и режима выращивания АОС с заданными требованиями к границе InAs–АОС.

Образцы и методы исследований

В экспериментах использовали пластины с ориентацией (111)А, вырезанные из кристаллов InAs n -типа проводимости марки ИМЭб, с концентрацией основных носителей заряда $(1,4–1,6) \cdot 10^{16}$ см^{–3} и подвижностью $\sim 4 \cdot 10^4$ см²·В^{–1}·с^{–1} при 77 К.

Для формирования АОС применяли электролит [15] на основе смеси этиленгликоля и концентрированного раствора аммиака в соотношении 5 : 1 с добавкой фторсодержащей компоненты — NH₄F (3,6 г на 300 мл смеси), обеспечивающей концентрацию молекул NH₄F в электролите 12 г/л. Процесс анодирования проводили в гальваностатическом режиме при плотностях тока $j = 0,05$ или $0,5$ мА·см^{–2} до достижения напряжений U_k 15, 20 или 25 В. После анодирования на эллипсометре ЛЭФ–3М измеряли толщину и коэффициент преломления выращенных АОС.

На части каждого образца измеряли распределение атомов фтора по глубине АОС методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии в полном соответствии с методикой, рассматриваемой в работе [18]. Значения коэффициентов элементной чувствительности брали из работы [20]. Измерения проводили с шагом 1,0–1,4 нм, который обеспечивали удалением материала ионным травлением.

На другой части образца напылением на поверхность АОС алюминиевых контактов диаметром 1 мм формировали МДП-структуры. Вольт-фарадные характеристики (**ВФХ**) этих структур измеряли на частоте 1 МГц при температуре 77 К. Измерения проводили в условиях отсутствия видимого излучения «по точкам» на приборе Е7–20 с длительностью каждого измерения 15–20 с. Далее исходя из теоретических основ работы [21] проводили расчет ВФХ для определения значений $Q_{\text{ss}}^{\text{eff}}$. По данным тех же измерений рассчитывали плотности поверхностных состояний (**ППС**) на границе InAs–АОС методом Термана в соответствии с методикой, применяемой в работе [22].

Результаты и их обсуждение

Эллипсометрические измерения всех изготовленных АОС показали, что при обоих использованных значениях плотности тока анодирования и каждом фиксированном значении U_k вырастают АОС с близкими толщинами, увеличивающимися от ~ 32 до ~ 51 нм при повышении U_k от 15 до 25 В. При этом коэффициент преломления также практически не зависит от значения j , возрастая от 1,8 до 1,87 при увеличении U_k , что свидетельствует об уплотнении АОС в процессе его выращивания.

На рис. 1 для заданных значений тока анодирования U_k представлены экспериментальные профили распределения концентрации атомов фтора по толщине АОС в относительных единицах, определяемой временем ионного травления АОС t . Нулевые значения на оси абсцисс соответствуют поверхности АОС, а максимальные — границе с InAs. Значения Q_{ss}^{eff} , полученные на образцах с аналогичными толщинами, представлены на рис. 2 в виде зависимости от толщины АОС. Из рис. 1 видно, что все образцы имеют схожую форму профилей распределения атомов фтора с максимумами вблизи границы с InAs. Расчет площадей под кривыми показал, что с увеличением U_k на 5 В содержание атомов фтора

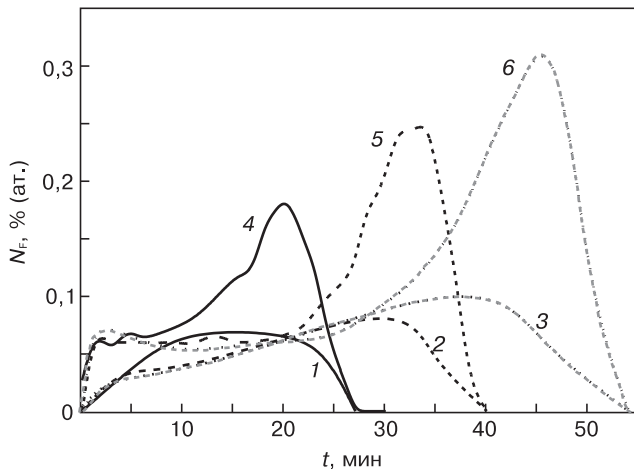


Рис. 1. Экспериментальные профили распределения атомов фтора по толщине АОС, выращенных на образцах 1—6 при значениях $j = 0,05$ (1—3) и $0,5$ (4—6) $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ и различных значениях U_k , В: 1, 4 — $U_k = 15$; 2, 5 — 20 ; 3, 6 — 25

Fig. 1. Experimental profiles of the distribution of fluorine atoms over the thickness of AOL grown for given values of j and U_k on samples 1—6: (1—3) $j = 0.05 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$; (4—6) 0.5 ; (1), (4) $U_k = 15 \text{ V}$; (2), (5) 20 ; (3), (6) 25

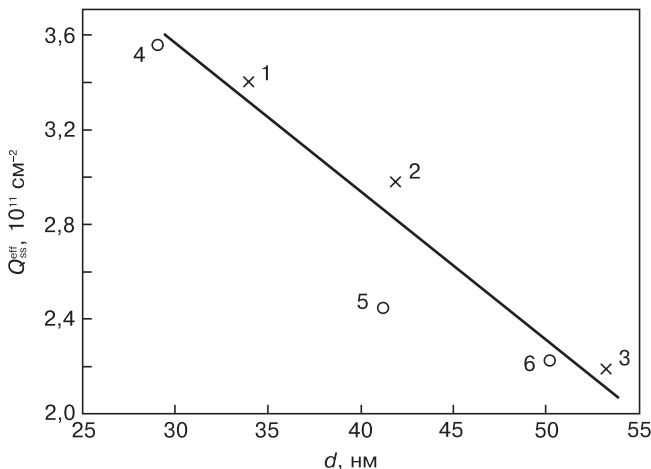


Рис. 2. Зависимость эффективного поверхностного заряда от толщины АОС образцов 1—6 (см. рис. 1): $\circ$ — $j = 0,05 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$; $\times$ — $0,5$

Fig. 2. Dependence of the effective surface charge on the AOL thickness of samples (see Fig. 1): $(\circ)$ $j = 0.05 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$; $(\times)$ 0.5

в объеме АОС увеличивается в $\sim 1,2$ и $\sim 1,5$ раза при значениях $j = 0,05$ и $0,5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ соответственно. В то же время увеличение плотности тока от $0,05$ до $0,5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ при одном и том же значении U_k и составе электролита приводит к увеличению концентрации атомов фтора вблизи границы с InAs в 3 раза.

Сопоставление данных рис. 1 и 2 и экстраполяция зависимости на рис. 2 единой прямой линией, (при допущении возможной ошибки в расположении точки и, соответствующей образцу 5), позволяют заключить, что значение Q_{ss}^{eff} слабо зависит от тока анодирования и содержания атомов фтора как в объеме АОС, так и в максимуме распределения вблизи границы с АОС и определяется только толщиной АОС, задаваемой U_k .

Результаты оценки ППС показали, что для всех экспериментальных МДП-структур значения ППС мало отличаются друг от друга и находятся в пределах $(6—7) \cdot 10^{11} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$. Это позволяет допустить, что вклад заряда на поверхностных состояниях в значение Q_{ss}^{eff} является одинаковым для всех рассмотренных случаев.

Отметим, что согласно данным работы [21] величина Q_{ss}^{eff} определяется формулой:

$$Q_{ss}^{eff} = Q_{ss} + \frac{x}{d_{\text{АОС}}} Q_{\text{АОС}},$$

где $d_{\text{АОС}}$ — толщина АОС; x — расстояние от поверхности АОС до места локализации $Q_{\text{АОС}}$.

Учитывая изложенное выше можно заключить, что уменьшение Q_{ss}^{eff} с ростом $d_{\text{АОС}}$ (см. рис. 2), связано с уменьшением отношения $x/d_{\text{АОС}}$ при росте АОС. Это означает, что по мере роста АОС встроенный заряд постепенно отдаляется от границы с InAs. При этом возможно незначительное залечивание электрически активных дефектов, определяющих значение $Q_{\text{АОС}}$, атомами фтора. На такое залечивание расходуется только часть атомов фтора, о чем свидетельствуют близкие значения Q_{ss}^{eff} для случаев $j = 0,05$ и $0,5 \text{ mA} \cdot \text{cm}^{-2}$, когда концентрация атомов фтора у границы с InAs отличается в ~ 3 раза. Последний факт позволяет считать, что степень дефектности в области встроенного заряда, а значит и его значение, для всех рассмотренных случаев является почти одинаковой.

Таким образом, полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при росте АОС в диапазоне толщин $\sim 30—50 \text{ nm}$ происходит постепенное отдаление встроенного заряда в АОС от границы с InAs. При этом его величина не претерпевает значимых изменений. Этот результат позволяет заключить, что при анодном окислении скорость роста АОС превышает скорость смещения встроенного заряда в сторону InAs.

Заключение

Установлено, что по мере роста АОС на кристаллах InAs в гальваностатическом режиме при плотностях тока анодирования $j = 0,05$ и $0,5 \text{ мА} \cdot \text{см}^{-2}$ в электролите с фторсодержащей добавкой АОС постепенно уплотняется, а профиль концентрации атомов фтора в нем сдвигается в сторону InAs. При этом эффективный поверхностный заряд на границе InAs—АОС не зависит от концентрации атомов фтора (плотности тока анодирования) и уменьшается по мере роста АОС.

Сделанно предположение, что при выращивании АОС в рассмотренных условиях скорость его роста превышает скорость смещения практически неизменного встроенного в АОС заряда в сторону InAs, из-за чего происходит постепенное отдаление встроенного заряда от InAs и уменьшение его вклада в Q_{ss}^{eff} .

Библиографический список

1. Астахов В. П., Карпов В. В., Крапухин В. В., Чижко В. Ф. Фотодиоды из антимонида индия с эффектом Мосса—Бурштейна на основе жидкофазных гомоэпитаксиальных структур // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 79—82.
2. Астахов В. П., Данилов Ю. А., Дудкин В. Ф., Лесников В. П., Сидорова Г. Ю., Суслев Л. А., Таубкин И. И., Эскин Ю. М. Планарные фотодиоды на основе InAs материала // Письма в ЖТФ. 1992. Т. 18, Вып. 3. С. 1—5.
3. Wilmsen C. W. Oxide layers on III–V compound semiconductors // Thin Solid Films. 1976. V. 39. P. 105—117. DOI: 10.1016/0040-6090(76)90628-3
4. Schwartz G. P., Sunder W. A., Griffiths J. E., Gualtieri G. J. Condensed phase diagram for the In–As–O system // Thin Solid Films. 1982. V. 94, Iss. 3. P. 205—212. DOI: 10.1016/0040-6090(82)90297-8
5. Yamaguchi M., Yamamoto N., Sugiura H., Uemura C. Thermal oxidation of InAs and characterization of the oxide film // Thin Solid Films. 1982. V. 92, Iss. 4. P. 361—370. DOI: 10.1016/0040-6090(82)90161-4
6. Belyi V. I., Smirnova T. P., Zakharchuk N. F. On the problem of elemental B^V material in the interface of native oxide/A^{III}B^V structures // Thin Solid Films. 1984. V. 113, Iss. 2. P. 157—164. DOI: 10.1016/0040-6090(84)90024-5
7. Ковчавцев А. П., Курышев Г. Л., Базовкин В. М., Валишева Н. А., Гузев А. А., Ли И. И., Ковалевская Т. Е., Панова З. В., Ефимов В. М. // Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Гл. 1. Фотоприемники зарядовой инжекции на арсениде индия. Новосибирск: Наука, 2001. С. 10—118.

8. Широков А. А., Маркова Е. А., Захаров И. С. Электрофизические свойства МДП-структур на основе арсенида индия // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. 1982. Т. 18, № 9. С. 1459—1463.
9. Гуртов В. А., Золотов М. В., Ковчавцев А. П., Курышев Г. Л. Объемный заряд в МДП-структурах на основе арсенида индия // Микроэлектроника. 1986. Т. 15, № 2. С. 142—149.
10. Eremeev S. V., Valisheva N. A., Tereshchenko O. E., Kulko-va S. E. Change in the electronic properties of an InAs (111)A surface at oxygen and fluorine adsorption // Semiconductors. 2012. V. 46, Iss. 1. P. 49—55. DOI: 10.1134/S1063782612010083
11. Валишева Н. А., Ковчавцев А. П., Левцова Т. А., Логвинский Л. М., Курышев Г. Л., Петренко А. З., Петренко И. П. Влияние фтора на границу раздела анодный оксид—арсенид индия // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 1999. № 11. С. 53—58.
12. Давыдов В. Н., Лоскутова Е. А., Фефелова И. И. Влияние фтора на свойства систем оксид — полупроводниковое соединение A³B⁵ // Микроэлектроника. 1986. Т. 15, № 5. С. 455—459.
13. Лоскутова Е. А., Давыдов В. Н., Лезина Т. Д. Особенности электрофизических и фотоэлектрических характеристик МОП-структур из InAs // Микроэлектроника. 1985. Т. 14, № 2. С. 134—138.
14. Аксенов М. С., Валишева Н. А., Левцова Т. А., Терещенко О. Е. Влияние фтора на электрофизические свойства границы раздела анодный оксид/InAs(111)A // ФТП. 2014. Т. 48, № 3. С. 322—326.
15. Валишева Н. А., Гузев А. А., Ковчавцев А. П., Курышев Г. Л., Левцова Т. А., Панова З. В. Электрофизические свойства МДП-структур InAs—SiO₂—In₂O₃ с модифицированной границей раздела // Микроэлектроника. 2009. Т. 38, № 2. С. 99—106.
16. Григорович С. Л., Волков А. С., Лоцман А. П., Афанасьев А. К. Исследование состава анодных окисных пленок на арсениде индия методом Оже—электронной спектроскопии // Электронная техника. Сер. Материалы. 1981. Вып. 3(152). С. 39—42.
17. Кузнецов В. В., Олевский С. С., Сорокин И. Н. Изучение анодных окисных пленок на InAs методом Оже—спектроскопии // Электронная техника. Сер. Микроэлектроника. 1980. Вып. 3(87). С. 77—81.
18. Артамонов А. В., Астахов В. П., Варлашов И. Б., Евстафьева Н. И., Митасов П. В. Состав анодных окисных пленок на кристаллах InAs // Тонкие химические технологии. 2015. Т. 10, № 5. С. 13—18.
19. Валишева Н. А., Терещенко О. Е., Просвирин Н. П., Калинин А. В., Голяшов В. А., Левцова Т. А., Бухтияров В. И. Формирование анодных слоев на InAs (111)A. Исследование химического состава // ФТП. 2012. Т. 46, № 4. С. 569—575.
20. Urch D. S., Urck M. J. ESCA (Mg) – Auger tables. London: Queen Mary College, Chemistry Department, 1981. 52 p.
21. Whelan M. V. Graphical relations between surface parameters of silicon, to be used in connection with MOS–capacitance measurements // Philips Res. Repts. 1965. V. 20. P. 620—632. URL: http://www.extra.research.philips.com/hera/people/aarts/_Philips%20Bound%20Archive/PRRep/PRRep-20-1965-620.pdf
22. Гуртов В. А. Твердотельная электроника : учебное пособие. М., 2005. 76 с.

Статья поступила в редакцию 14 июня 2017 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = *Materials of Electronics Engineering*. 2017, vol. 20, no. 2, pp. 129—133. DOI: 10.17073/1609-3577-2017-2-129-133

About nature of the effective surface charge on InAs crystals transformation during anode oxide layer growing

A. V. Artamonov¹, V. P. Astakhov², I. B. Warlashov^{3,4}, P. D. Gindin², N. I. Evstafieva²,
P. V. Mitsov³, I. N. Miroshnikova^{3,4,8}

¹ *Technological systems for protective coatings Ltd., 19 Simferopolskoye Shosse, Shcherbinka, Moscow, 108852 Russia*

² *JSC Schwabe–Photosystems, 4A, bl. 3A Dnipropetrovsk proezd, Moscow, 117545 Russia*

³ *National Research University «Moscow Power Engineering Institute», 14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow 111250 Russia*

⁴ *Institute of Nanotechnologies of Microelectronics RAS «INME RAS», 32A Leninsky Prospekt, Moscow 119991, Russia*

Abstract. Dynamics of changes in fluorine atoms distribution through grown anodic oxide layer thickness and the effective surface charge on InAs crystals under such layers has been studied. Anodic oxidation was performed in alkaline electrolyte with fluorochemical additive component in galvanostatic mode at anode current densities 0.05 or 0.5 mA·cm⁻². The layers thickness in bounds 32–51 nm varied by electrodes final voltage setting in range 15–25 V. The layer thickness and refractive index was measured by ellipsometric method, and distribution of fluorine atoms through thickness — by photoelectron–spectroscopy method, combined with ion etching. At the same time, based on grown layers there were produced MIS structures, and from calculation of theirs capacitance–voltage characteristics are determined effective surface charge and surface states density, corresponding to different layer thicknesses.

Main results are reduced to the facts during layers growing despite of anodizing current density comes their sealing, the profile of fluorine atoms distribution shifts towards InAs, positive effective surface charge gradually decreases from $3.6 \cdot 10^{11}$ to $2.0 \cdot 10^{11}$ cm⁻² at surface states density in $(6-7) \cdot 10^{11}$ eV·cm⁻² range for all cases. Based on comparison of these data and theoretical concepts of MIS structure charge construction, there was made a conclusion about gradual built-in charge distancing from the border with InAs in the process of growing anodic oxide layer, which explains observed effective surface charge decrease during layer thickness increasing. This results indicates that the layer growth rate exceeds the built-in charge displacement rate towards InAs.

Keywords: indium arsenide, anodic oxidation, anodic oxide layer, effective surface charge, insert charge, surface–state density, a concentration profile

References

1. Astakhov V. P., Karpov V. V., Karpukhin V. V., Chishko V. F., Shlyonsky A. A. Photodiodes from indium antimonide with Moss–Burshtein effect on basis of liquid–phase homoepitaxial structures. *Prikladnaya Fizika = Applied Physics*, 2012, no. 4, pp. 79–82. (In Russ.)
2. Astakhov V. P., Danilov Yu. A., Dudkin V. F., Lesnikov V. P., Sidorova G. Yu., Suslov L. A., Taubkin I. I., Eskin Yu. M. Planar photodiodes based on InAs material. *Pis'ma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Technical Physics Letters*, 1992, vol. 18, no. 3, pp. 1–5. (In Russ.)
3. Wilmsen C. W. Oxide layers on III–V compound semiconductors. *Thin Solid Films*, 1976, vol. 39, pp. 105–117. DOI: 10.1016/0040-6090(76)90628-3
4. Schwartz G. P., Sunder W. A., Griffiths J. E., Gualtieri G. J. Condensed phase diagram for the In–As–O system. *Thin Solid Films*, 1982, vol. 94, no. 3, pp. 205–212. DOI: 10.1016/0040-6090(82)90297-8
5. Yamaguchi M., Yamamoto N., Sugiura H., Uemura C. Thermal oxidation of InAs and characterization of the oxide film. *Thin Solid Films*, 1982, vol. 92, no. 4, pp. 361–370. DOI: 10.1016/0040-6090(82)90161-4
6. Belyi V. I., Smirnova T. P., Zakharchuk N. F. On the problem of elemental BV material in the interface of native oxide/Al^{III}B^V structures. *Thin Solid Films*, 1984, vol. 113, no. 2, pp. 157–164. DOI: 10.1016/0040-6090(84)90024-5
7. Kovchavtsev A. P., Kuryshv G. L., Bazovkin V. M., Valisheva H. A., Guzev A. A., Li I. I., Kovalevskaya T. E., Panova Z. V., Efimov V. M. *Matrichnye fotopriemnye ustroystva infrakrasnogo diapazona*. Glava 1. Fotopriemniki zaryadovoi inzhetsii na arsenide indiya [Matrix photodetector devices of infrared range. Chapter 1. Photodetectors of charge injection on indium arsenide]. Novosibirsk: Nauka, 2001, pp. 10–118. (In Russ.)
8. Shirokov A. A., Markova E. A., Zakharov I. S. Electrical properties of MOS structures based on indium arsenide. *Izv. ANSSSR. Neorganicheskie materialy = Inorganic materials*, 1982, vol. 18, no. 9, pp. 1459–1463. (In Russ.)
9. Gurtov V. A., Zolotov M. V., Kovchavtsev A. P., Kuryshv G. L. Space charge in MOS structures based on indium arsenide. *Mikroelektronika*, 1986, vol. 15, no. 20, pp. 142–149. (In Russ.)
10. Ereemeev S. V., Valisheva N. A., Tereshchenko O. E., Kulko-va S. E. Change in the electronic properties of an InAs (111)A surface at oxygen and fluorine adsorption. *Semiconductors*, 2012, vol. 46, no. 1, pp. 49–55. DOI: 10.1134/S1063782612010083
11. Valisheva N. A.; Levtsova T. A., Logvinsky L. M., Kovchavtsev A. P., Kuryshv G. L., Petrenko A. Z., Petrenko I. P. Influence of fluorine on the interface anode oxide–indium arsenide. *J. Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2000, vol. 15, no. 11, pp. 1667–1675.
12. Davydov V. N., Loskutova E. A., Fefelova I. I. Influence of fluorine on the properties of systems oxide — semiconductor compound A³B⁵. *Mikroelektronika*, 1986, vol. 15, no. 5, pp. 455–459. (In Russ.)
13. Loskutova E. A., Davydov V. N., Lezina T. D. MOS–structures on InAs electric and photoelectric characteristics particularity. *Mikroelektronika*, 1985, vol. 14, no. 2, pp. 134–138. (In Russ.)
14. Aksenov M. S., Valisheva N. A., Levtsova T. A., Tereshchenko O. E. Effect of fluorine on the electrical properties of anodic oxide/InAs(111)A interface. *Semiconductors*, 2014, vol. 48, no. 3, pp. 307–311. DOI: 10.1134/S1063782614030026
15. Valisheva N. A., Guzev A. A., Kovchavtsev A. P., Kuryshv G. L., Levtsova T. A., Panova Z. V. Electrical properties of InAs–SiO₂–In₂O₃ MIS structures with a modified interface. *Russian Microelectronics*, 2009, vol. 38, no. 2, pp. 87–94. DOI: 10.1134/S1063739709020024
16. Grigorovich S. L., Volkov A. S., Lotsman A. P., Afanas'ev A. K. The composition of anodic oxide films on indium arsenide study with Auger–electron spectroscopy method. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Materialy*, 1981, vol. 3, pp. 39–42. (In Russ.)
17. Kuznetsov V. V., Olevskii S. S., Sorokin I. N. Auger–spectroscopy study of anodic oxide films on InAs. *Elektronnaya tekhnika. Ser. Mikroelektronika*, 1980, vol. 3, pp. 77–81. (In Russ.)
18. Artamonov A. V., Astakhov V. P., Varlashov I. B., Evstaf'eva N. I., Mitasov P. V. The composition of anodic oxide films on InAs crystals. *Tonkie khimicheskie tekhnologii = Fine Chemical Technologies*, 2015, vol. 10, no. 5, pp. 13–18. (In Russ.)
19. Valisheva N. A., Tereshchenko O. E., Levtsova T. A., Prosvirin I. P., Kalinkin A. V., Bukhtiyarov V. I., Goljashov V. A. Formation of anodic layers on InAs (111)III. Study of the chemical composition. *Semiconductors*, 2012, vol. 46, no. 4, pp. 552–558. DOI: 10.1134/S1063782612040239
20. Urch D. S., Urck M. J. ESCA (Mg) – Auger tables. London: Queen Mary College, Chemistry Department, 1981, 52 p.
21. Whelan M. V. Graphical relations between surface parameters of silicon, to be used in connection with MOS–capacitance measurements. *Philips Res. Repts*, 1965, vol. 20, pp. 620–632. URL: http://www.extra.research.philips.com/hera/people/aarts/_Philips%20Bound%20Archive/PRRep/PRRep-20-1965-620.pdf
22. Gurtov V. A. *Tverdotel'naya elektronika* [Solid–state electronics]. Moscow, 2005, 76 p. (In Russ.)

Information about authors:

Anton V. Artamonov¹: Researcher; **Vladimir P. Astakhov**²: Dr. Sci. (Eng.), Chief Specialist, ko-ckb@mail.ru; **Igor B. Warlashov**^{3,4}: Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor (3), Senior Researcher (4), WarlashovIB@mpei.ru; **Pavel D. Gindin**²: Dr. Sci. (Eng.), General Manager; **Natalia I. Evstafieva**²: Head of Department; **Pavel V. Mitasov**³: Postgraduate Student, mitasovpv@rambler.ru; **Irina N. Miroshnikova**^{3,4}: Dr. Sci. (Eng.), Head of Department Electronics and Nanoelectronics (3), Senior Researcher (4), MiroshnikovaIN@mpei.ru

§ Corresponding author

Received June 14, 2017