

УДК 535.247
EDN: OFWMVE

PACS: 85-60.-q

**Исследование вольт-фарадных характеристик МДП-структур на основе антимонида индия***В. П. Астахов, К. С. Андрейчиков, И. А. Дубенская, Е. В. Молодцова*

Проведено исследование вольт-фарадных характеристик (ВФХ) структур металл-диэлектрик-полупроводник (МДП), изготовленных на пластинах монокристаллического антимонида индия, вырезанных по плоскостям (211) и (100) из слитка, выращенного в направлении [211], и по плоскости (100) из слитка, выращенного в направлении [100]. МДП-структуры были двух типов – с анодным окисным слоем и с защитной диэлектрической композицией – с дополнительным слоем SiO_x. Измерения проводились при многократных прямых (начиная от нулевого смещения на полевом электроде) и обратных «проходах» со скоростью изменения напряжения смещения 500 мВ/с при температуре жидкого азота. Анализ результатов «проходов» позволил определить знак и значения эффективного поверхностного заряда в исходном состоянии и после каждого прямого «прохода», когда обнаруживаются дополнительные заряды двух видов: устойчивые и неустойчивые. Знак этих зарядов противоположен полярности напряжения на полевом электроде. Устойчивые заряды неизменны в течение всего времени охлаждения и «стекают» только при «отогреве» МДП-структуры. Неустойчивые «стекают» уже при закорачивании охлажденной МДП-структуры.

Показано, что значения всех видов поверхностного заряда в МДП-структурах с защитной диэлектрической композицией, а следовательно и концентрации ловушек, являются минимальными в случае пластин, вырезанных по плоскости (100) из слитков, выращенных в направлении [100].

Ключевые слова: вольт-фарадная характеристика, МДП-структура, антимонид индия, эффективный поверхностный заряд.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-2-146-154

Введение

На основании результатов многочисленных проб считается, что наилучшим защитным диэлектриком для планарных фотодиодных кристаллов (ФДК) p^+-n -типа на антимониде

индия является его анодно-окисный слой (АОС). При определении состава электролита для анодного окисления и режима проведения этого процесса исследуют ВФХ МДП-структур с АОС на антимониде индия, рассчитывая и анализируя которые определяют параметры

Астахов Владимир Петрович¹, гл. специалист, д.т.н.
Андрейчиков Кирилл Сергеевич^{1,2}, инженер-технолог.
E-mail: andreichikoff.kirill@yandex.ru

Дубенская Ирина Александровна^{1,2}, инженер-технолог.
Молодцова Елена Владимировна³, в.н.с., к.т.н.

¹ АО «МЗ «Сапфир».

Россия, 117545, Москва, Днепропетровский пр-д, 4А,
стр. 3А.

² НИТУ МИСИС.

119049, Москва, Ленинский пр-кт, 4, стр. 1.

³ АО «Гиредмет».

Россия, 111524, Москва, ул. Электродная, 2.

Статья поступила в редакцию 9.02.2023

После доработки 20.03.2023

Принята к публикации 28.03.2023

© Астахов В. П., Андрейчиков К. С., Дубенская И. А.,
Молодцова Е. В., 2023

границы раздела InSb-АОС (плотности поверхностных состояний и заряда), оценивают гистерезис ВФХ и выбирают наилучший вариант состава и режима. При этом основное внимание уделяют составу электролитов на основе гидроксида калия [1, 2], персульфата аммония [2, 3] и сернистого натрия [2, 4], применяемому в производстве. Меньшее внимание уделяют влиянию кристаллографической ориентации выращиваемых слитков и поверхности исходных пластин на свойства границы раздела InSb-АОС. Отдельные данные, касающиеся ориентации поверхности пластин (211) и (111) представлены соответственно в работах [1, 5, 6]. Большинство работ представляют ориентацию пластин по неполярной плоскости (100), которая именно благодаря неполярности была и до настоящего времени является принятой при производственном выпуске и разработке ФДК из антимонида индия.

Здесь следует иметь в виду, что до 2011 г. прибористы-технологи применяли пластины из запасов слитков марки ИСЭ (ИСЭ-0, ИСЭ-1, ИСЭ-2, ИСЭ-2У), выпускавшихся Подольским химико-металлургическим заводом до 2000 г. по ТУ 48-4-494-88. Такие слитки были *n*-типа проводимости, выращивались в кристаллографическом направлении [211] и имели при $T = 80$ К диапазоны концентраций электронов в пределах $6 \times 10^{13} \div 3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, подвижность электронов в пределах $(2 \div 7) \times 10^5 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ и плотность дислокаций не более 500 см^{-2} . Слитки нарезали на пластины по плоскости (100), пластины шлифовали, полировали и из них изготавливали планарные ФДК по базовой групповой технологии, разработанной до 1990 г. Выпуск слитков марок ИСЭ прекращён в 90-е годы и последний из запасов таких слитков был нарезан на пластины для запуска в производство в октябре 2022 г.

На основании опыта совместной работы металлургов и технологов-прибористов для обеспечения разработки и производства планарных фотодиодов из антимонида индия, АО «ГИРЕДМЕТ» в 2011 году на-

чал выпуск слитков марки АИН по ТУ 1775-329/0-0198396-11. Эти слитки – также *n*-типа проводимости, выращиваются уже в направлении [100] (как это удобно для производства), имеют значения концентрации и подвижности электронов при $T \approx 80$ К, соответствующие значениям для слитков марки ИСЭ-2, зарекомендовавшей себя наилучшей в производстве; при этом в ~ 5 раз снижена допустимая плотность дислокаций (не более 100 см^{-2}).

Учитывая всё изложенное, а также то, что вольт-амперная характеристика планарных, особенно малоразмерных ФДК, определяется состоянием границы раздела InSb – защитная диэлектрическая композиция, а именно величиной и знаком эффективного поверхностного заряда, представляет интерес сравнение свойств границы раздела InSb-АОС по этим параметрам в МДП-структурах, сформированных на пластинах, нарезанных из слитков, выращенных в направлении [211] (марка ИСЭ-2) и [100] (марка АИН). В первом случае целесообразно произвести нарезку пластин по плоскостям (211) – полярная и (100) – неполярная, а во втором случае – по плоскости (100). Представляет также интерес широкое исследование ВФХ МДП-структур на таких пластинах, включая не только АОС, но и защитную композицию АОС с поверхностным слоем SiO_x , применяемую при производстве планарных ФДК.

Рассмотрению этих вопросов и посвящена данная работа.

Методики проведения работы и измерений

Для исследований изготавливали 6 вариантов МДП-структур: 4 варианта – на основе пластин, нарезанных из слитка ИСЭ-2 (направление выращивания [211]) и 2 варианта – на основе пластин, нарезанных из слитка АИН (направление выращивания [100]). В первом случае пластины нарезали по плоскостям (211) и (100). Во втором случае – только по плоскости (100) (см. табл. 1).

Таблица 1

Кристаллографические особенности слитков и нарезаемых пластин в составе МДП-структур на их основе

Направление выращивания слитка	Плоскость поверхности пластин	Обозначение вида пластин	Тип МДП-структур
[211]	(211)	{[211] (211)}	МДП-1, МДП-2
	(100)	{[211] (100)}	
[100]	(100)	{[100] (100)}	

Поверхность всех пластин после их нарезки проходила одинаковую обработку (механическую и химическую полировки) и затем на пластинах каждого вида изготавливали по 2 типа МДП-структур: с тонким (500 \AA) АОС, получаемым в электролите на основе сернистого натрия (МДП-1) и с защитной композицией, применяемой при изготовлении ФДК: АОС (500 \AA) с поверхностным слоем SiO_x толщиной $0,5 \text{ мкм}$ (МДП-2) (см. табл. 1). Полевой электрод МДП-структур $\varnothing 0,7 \text{ мм}$ и толщиной $0,3 \text{ мкм}$ создавали на поверхности диэлектрика термическим напылением золота с подслоем хрома. Омическим контактом к антимониду индия служила область припайки индия.

Измерения ВФХ всех 6 вариантов изготовленных МДП-структур проводили в темноте при заливке образцов жидким азотом с применением прижимного контакта к полевому электроду. Измерения выполняли с помощью устройства Micromanipulator Co, inc Model 410 C-V Plotter на частоте 1 МГц при изменении напряжения смещения на полевом электроде с постоянной скоростью 500 мВ/с при «проходах» от нулевого смещения до заданного положительного или отрицательного (прямой «проход») и обратно (обратный «проход»). На МДП-структурах с АОС (МДП-1) диапазон напряжений смещения составлял от -2 В до $+1 \text{ В}$, а в случае защитной композиции АОС + SiO_x (МДП-2) – от -20 В до $+1 \text{ В}$. Такие «проходы» могли быть однократными и многократными с заданными перерывами при $U = 0 \text{ В}$ (закоротка МДП-структуры) до 10 минут .

Расчёт измеренных ВФХ проводили в соответствии с теорией работы [7], где определяется эффективный поверхностный заряд ($Q_{\text{эфф}}$), являющийся суммой зарядов на поверхностных состояниях и на ловушках в диэлектрике на расстояниях в пределах до 100 \AA от границы раздела полупроводник–диэлектрик. При этом определяется также концентрация основных носителей заряда в полупроводнике при $T = 80 \text{ К}$. Расчёт проводили целиком по алгоритму работы [7] с использованием графических зависимостей этой работы,

которые экстраполировали математическими выражениями, выполнив преобразования, связанные с заменой параметров кремния, для которого был выполнен расчёт в работе [7], на параметры антимонида индия. Изучали зависимости знака и величины $Q_{\text{эфф}}$ от полярности напряжения смещения и его величины при многократных прямых (от нулевого смещения) и обратных «проходах» и особенности гистерезиса ВФХ.

Результаты измерений и их обсуждение

1. МДП-структуры с АОС (МДП-1).

На рис. 1 представлены типичные ВФХ МДП-структур с АОС, выращенными на пластинах вида $\{[211] (211)\}$.

Весь цикл представляемых измерений с многократными прямыми и обратными «проходами» в диапазоне $\pm 0,5 \text{ В}$ и с выдержками при $U = 0 \text{ В}$ в течение $(0 \div 10)$ минут проводили на одном полевом электроде.

На рисунке указаны номера и направления последовательных «проходов» с соответствующими им значениями $Q_{\text{эфф}}$, рассчитанными из кривых для каждого «прохода», а также продолжительности выдержки при $U = 0 \text{ В}$ перед каждым последующим прямым «проходом».

Из этого рисунка следует, что при первом прямом «проходе» (кривая 1) фиксируется минимальный исходный положительный заряд $Q_{\text{эфф}}$ (1), равный $+0,8 \times 10^{11}$ единиц заряда электрона $\times \text{см}^{-2}$ (далее см^{-2}). Эта кривая находится правее всех остальных. При обратном «проходе» фиксируется заряд, возросший до $+2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ (кривая 2 сдвинута влево). При повторном прямом «проходе» кривая 3 сдвигается несколько влево относительно кривой 1, показывая увеличение заряда относительно исходного значения до $+1,2 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$.

Далее при всех последующих «проходах» от 0 В до $-0,5 \text{ В}$ и обратно все кривые прямого «прохода» (3, 5, 7) и обратного (2, 4, 6, 8) совпадают между собой независимо от продолжительности выдержки при $U = 0 \text{ В}$.

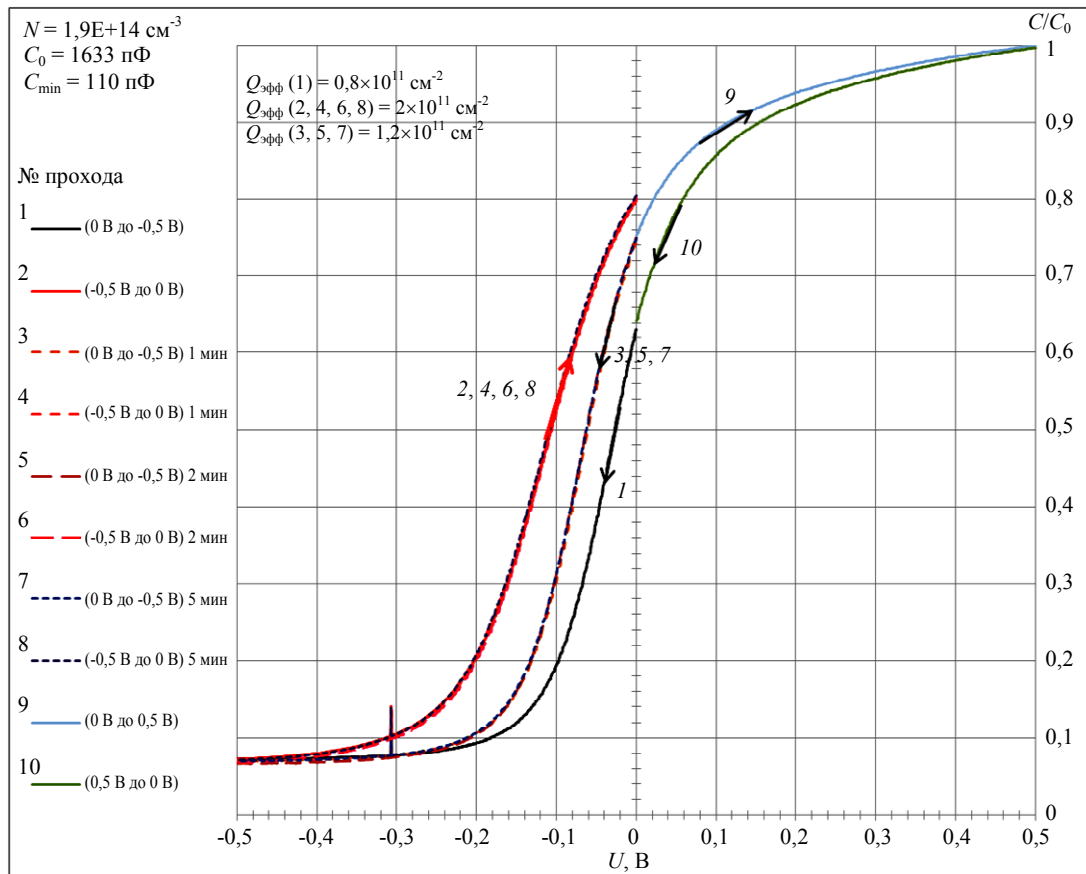


Рис. 1. ВФХ МДП-структуры с АОС на пластине вида $\{211\} (211)$ при последовательных прямых от 0 В до $-0,5$ В (кривые 1, 3, 5, 7) и обратных (кривые 2, 4, 6, 8) «проходах». Выдержка при $U = 0$ В перед каждым последующим прямым «проходом» составляла: 0 с (кривые 1, 2), 1 мин (кривые 3, 4), 2 мин (кривые 5, 6), 10 мин (кривые 7, 8). Кривые 9 и 10 относятся к прямому и обратному проходам в положительную область напряжений. На вставке к рисунку в увеличенном масштабе демонстрируется совпадение между собой кривых для прямых и обратных «проходов»

Из этого следует, что прямой «проход» от 0 В до $-0,5$ В приводит к увеличению положительного значения $Q_{эфф}$ за счёт инжекции дырок из InSb в АОС и их захвата на «мелкие» ловушки, расположенные на границе с InSb, и «глубокие» ловушки, расположенные на некотором отдалении от границы в глубине диэлектрика. После обратного «прохода» к $U = 0$ В, часть этих дырок «стекает» с «мелких» ловушек, о чём свидетельствуют также данные работы [1], а другая часть остается закрепленной на «глубоких» ловушках. Поскольку все кривые прямого (3, 5, 7) и обратного (2, 4, 6, 8) «проходов» совпадают между собой независимо от продолжительности выдержки при $U = 0$ В перед каждым прямым «проходом», устойчивый дополнительный заряд составляет величину:

$$Q^y = Q_{3,5,7} - Q_1 = 1,2 \times 10^{11} - 0,8 \times 10^{11} = +0,4 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}.$$

Неустойчивый дополнительный заряд, «стекающий» при нулевом смещении за время не более секунды, составляет величину:

$$Q^{HY} = Q_{2,4,6,8} - Q_{3,5,7} = 2 \times 10^{11} - 1,2 \times 10^{11} = +0,8 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}.$$

Неустойчивый заряд пополняется при каждом проходе до $U = -0,5$ В. Устойчивый заряд сохраняется на ловушках в течение всего времени непрерывного охлаждения. При прекращении охлаждения и «отогреве» МДП-структуры, устойчивый заряд также покидает ловушки, оставляя исходный заряд МДП-структуры, зафиксированный при первом «проходе» после охлаждения (кривая 1).

Из рис. 1 также следует, что прямой «проход» в область положительных напряжений смещения до $+0,5$ В (кривая 9) приводит к смещению обратной кривой 10 вправо, свидетельствуя о частичной компенсации дырок на

ловушках электронами, инжектированными из InSb в АОС при прямом «проходе» в данном случае.

Следует отметить, что для данного типа МДП-структур (МДП-1) с другими видами пластин ($\{[211] (100)\}$ и $\{[100] (100)\}$), все от-

меченные особенности результатов изменения ВФХ при «проходах» качественно полностью повторяются, отличаясь только значениями исходного и дополнительных устойчивого и неустойчивого эффективного поверхностного заряда, которые представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты измерений и расчётов эффективного поверхностного заряда при прямых и обратных «проходах» до напряжения -0,5 В для МДП-1 и -10 В для МДП-2

Вид пластин	Тип МДП-структуры	$Q_{эфф}^0 \times 10^{-11}$, см ⁻² (исходные значения)	$Q_{эфф}^y \times 10^{-11}$, см ⁻² (доп. заряд, устойчивый)	$Q_{эфф}^{ну} \times 10^{-11}$, см ⁻² (доп. заряд, неустойчивый)	$Q'_{эфф} \times 10^{-11}$, см ⁻² после «отогрева»	$\Sigma Q_{эфф} \times 10^{-11}$, см ⁻²	Концентрация электронов при $T = 80$ К в исходных пластинах N , см ⁻³
$\{[211] (211)\}$	МДП-1	+ 0,8	+ 0,4	+ 0,8	+ 0,7	2	$1,9 \times 10^{14}$
	МДП-2	+ 2,7	+ 0,4	+ 0,8	+ 2,7	3,9	$2,5 \times 10^{14}$
$\{[211] (100)\}$	МДП-1	+ 0,3	+ 0,1	+ 0,2	+ 0,2	0,6	$7,6 \times 10^{14}$
	МДП-2	+ 1,6	+ 0,4	+ 0,7	+ 1,6	2,7	$3,5 \times 10^{14}$
$\{[100] (100)\}$	МДП-1	+ 0,3	+ 0,2	+ 0,6	+ 0,1	1,1	$1,4 \times 10^{15}$
	МДП-2	+ 1,2	+ 0,2	+ 0,5	+ 1,1	1,9	$1,5 \times 10^{15}$

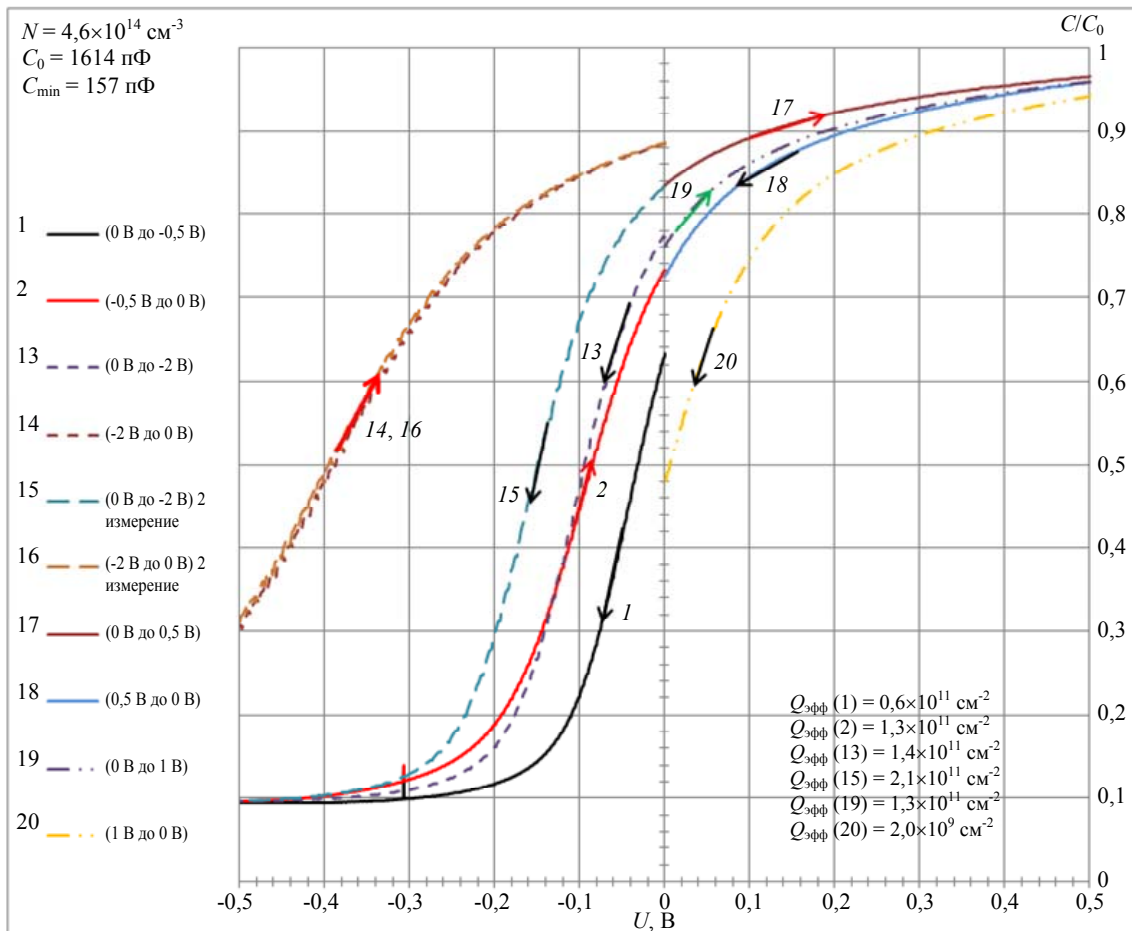


Рис. 2. ВФХ МДП-структур с АОС на пластине вида $\{[100] (100)\}$ при последовательных прямых (до -2 В, кривые 1, 13, 15, 17, 19) и обратных (кривые 2, 14, 16, 18, 20) «проходах» с последующими «проходами» в область положительных смещений до +1 В и обратно (кривые 17–20)

На рис. 2 на примере пластин вида $\{[100] (100)\}$ показано, как трансформируются ВФХ для данного типа МДП-структур при многократных проходах в сторону больших напряжений смещения. Из рисунка следует, что увеличение смещения при прямых «проходах» от $-0,5$ В до -2 В приводит к значительному увеличению положительного устойчивого эффективного заряда, о чём свидетельствует значительный сдвиг кривой 15 влево относительно кривой 13. Неустойчивый заряд при этом увеличивается в большей мере (см. данные табл. 3).

Увеличение напряжения смещения от $+0,5$ В до $+1$ В при последовательных прямых «проходах» в область положительных смещений сначала приводит к частичной компенсации положительного заряда, накопленного при предварительном проходе до -2 В, а затем – к почти полной компенсации этого заряда вместе с исходным до уровня $+0,02 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, о чём свидетельствует сдвиг кривой 20 вправо относительно кривой 1. Из данных этого рисунка также следует, что накапливаемый при положительных смещениях на полевом электроде дополнительный отрицательный эффективный поверхностный заряд разделяется на устойчивый и неустойчивый, как и положительный заряд при отрицательных смещениях, о чём свидетельствует сдвиг при нулевом смещении кривой 19 относительно кривой 18.

2. МДП-структуры с защитной композицией АОС + SiO_x (МДП-2).

На рис. 3 представлены ВФХ многократных «проходов» в область смещений до -10 В и обратно для МДП-структур с защитной композицией диэлектриков АОС + SiO_x (МДП-2) на пластинах вида $\{[211] (211)\}$.

Качественно данные этого рисунка полностью соответствуют данным рис. 1 для структур типа МДП-1 (только с АОС), поэтому их интерпретация допускает полное соответствие с интерпретацией данных рис. 1. При этом определены значения исходного и дополнительных устойчивого и неустойчивого эффективного поверхностного заряда. Аналогичным образом проводилось рассмотрение и расчёт данных для остальных видов пластин: $\{[211] (100)\}$ и $\{[100] (100)\}$ в структурах типа МДП-2. Результаты этих расчётов также представлены в таблице 2.

Влияние увеличения отрицательного напряжения смещения на полевом электроде для обоих типов МДП-структур (МДП-1 и МДП-2) иллюстрируют данные, представленные в таблице 3 для одного из видов пластин ($\{[100] (100)\}$), показавшего наименьшие значения $Q_{\text{эфф}}$ каждого разряда ($Q_{\text{эфф}}^0$, $Q_{\text{эфф}}^y$, $Q_{\text{эфф}}^{\text{HY}}$) в сочетании с защитной диэлектрической композицией (см. данные табл. 2 для МДП-2).

Таблица 3

Значения $Q_{\text{эфф}}$, измеренные на пластинах вида $\{[100] (100)\}$ в составе МДП-1 и МДП-2 при прямых и обратных «проходах» в диапазоне напряжений (0÷ -20) В

Максимальные напряжения при прямом «проходе» от $U = 0$ В, В	Тип МДП-структуры	$Q_{\text{эфф}}^0 \times 10^{-11}, \text{ см}^{-2}$	$Q_{\text{эфф}}^y \times 10^{-11}, \text{ см}^{-2}$	$Q_{\text{эфф}}^{\text{HY}} \times 10^{-11}, \text{ см}^{-2}$
-0,5	МДП-1 (с АОС)	+0,6	+0,2	+0,8
-1,0			+0,8	+1,3
-2,0			+1,5	+3,3
-10	МДП-2 (с АОС + SiO_x)	+1,5	+0,3	+0,7
-20			+0,8	+1,8

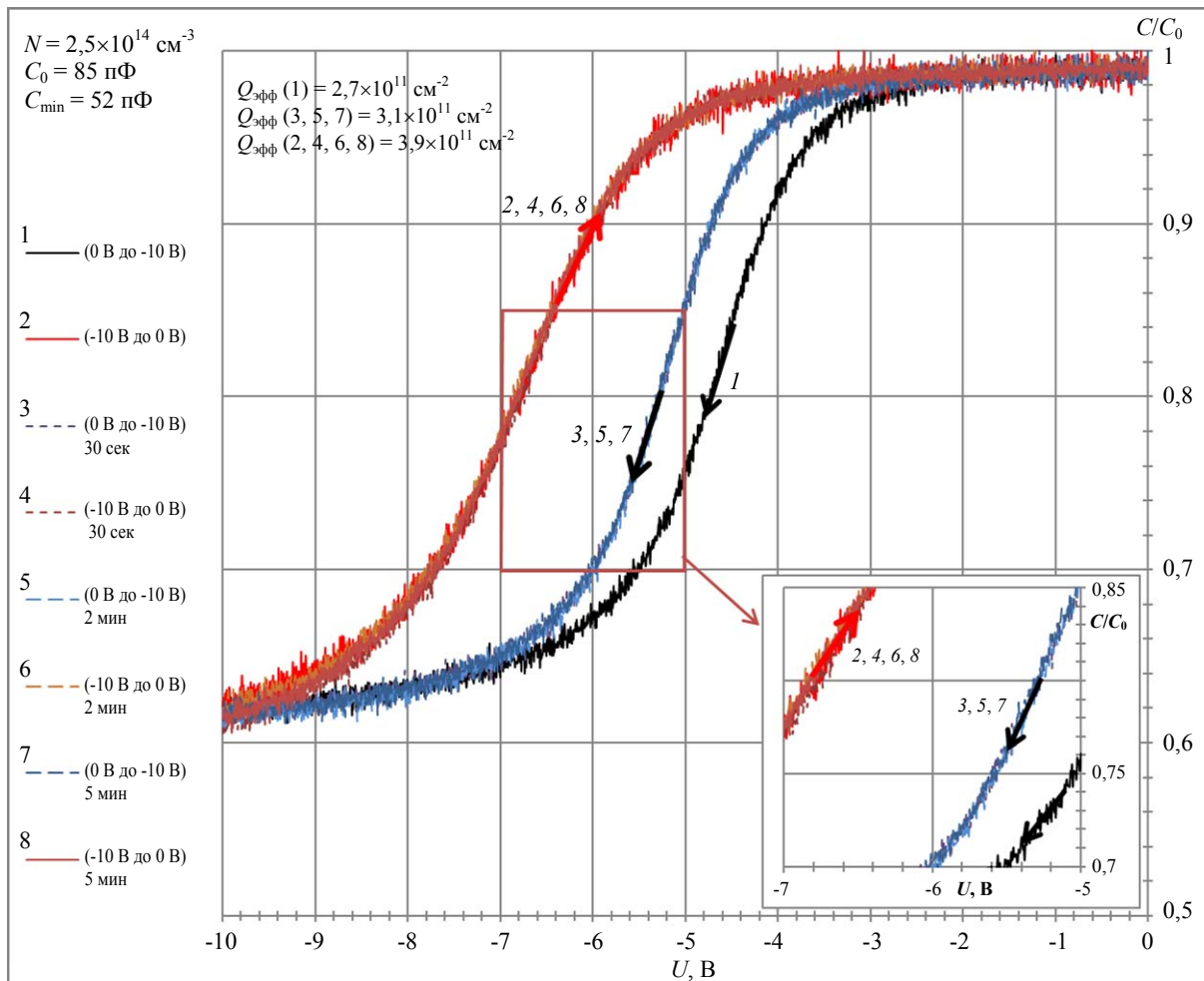


Рис. 3. ВФХ МДП-структуры с защитной композицией АОС + SiO_x на пластине $\{[211] (211)\}$ при последовательных прямых от 0 В до -10 В (кривые 1, 3, 5, 7) и обратных (кривые 2, 4, 6, 8) «проходах». Выдержка при $U = 0$ В перед каждым прямым «проходом» составляла: 0 с (кривые 1, 2), 30 с (кривые 3, 4), 2 мин (кривые 5, 6), 10 мин (кривые 7, 8)

Заключение

Рассмотрение всего набора представленных данных приводит к следующим обобщениям.

1. Исходный эффективный поверхностный заряд в области границы раздела InSb-АОС, $Q_{\text{эфф}}^0$, измеряемый при первом «проходе» в области отрицательных напряжений смещения на полевом электроде всех изучавшихся МДП-структур, является стойким к закорачиванию охлаждённых МДП-структур, а также к их «отогреву». Этот заряд обусловлен, скорее всего, устойчивыми структурными дефектами в широкой приповерхностной области кристалла. Поверхностная плотность таких дефектов в случае однослойного диэлектрика (АОС) зависит от ориентации поверхности пластин и находится в пределах

$(0,3 \div 0,8) \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$, возрастая в каждом случае в ~ 4 раза при нанесении второго диэлектрического слоя (SiO_x).

2. Подача возрастающих отрицательных напряжений смещения на полевой электрод МДП-структур обоих типов приводит к возрастающей инжекции дырок из антимоноидиндия в АОС и их захвату на ловушки для дырок. Так формируется дополнительный положительный эффективный поверхностный заряд, который разделяется на устойчивый $Q_{\text{эфф}}^y$ и неустойчивый $Q_{\text{эфф}}^{\text{ну}}$, каждый из которых пропорционально возрастает с увеличением напряжения смещения. Устойчивый заряд образуют дырки на «глубоких» ловушках, к которым они «привязаны» на всё время охлаждения и покидают их только при «отогреве» МДП-структуры. Неустойчивый заряд – дыр-

ки на «мелких» ловушках, с которых они «стекают» уже при закоротке охлаждённой МДП-структуры. При этом в каждом отдельном случае, независимо от вида пластин, типа МДП-структур и приложенного напряжения к полевому электроду, неустойчивый заряд превышает устойчивый в ~ 2 раза. Очевидно, что в таком же соотношении находятся величины поверхностных концентраций «мелких» и «глубоких» ловушек для дырок.

3. Аналогичным образом при противоположном (положительном) смещении на полевом электроде происходит инжекция электронов из антимонида индия в АОС, их захват на «глубокие» и «мелкие» ловушки для электронов и образование соответствующих дополнительных устойчивого и неустойчивого отрицательных эффективных поверхностных зарядов. Такой заряд при подборе значения напряжения смещения компенсирует исходный и дополнительные положительные заряды вплоть до их полной нейтрализации, когда у поверхности реализуется случай «плоских зон», необходимый в ряде приборных применений МДП-структур.

4. В сравнении с пластинами, нарезанными по плоскостям (211) и (100) из слитков,

выращенных в направлении [211], наименьшие значения исходного и дополнительных устойчивого и неустойчивого эффективных поверхностных зарядов, а следовательно и концентрации ловушек для дырок и электронов в МДП-структурах с защитной композицией АОС + SiO_x, характерны для пластин, нарезанных по плоскости (100) из слитков, выращенных в направлении [100].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Etchells A., Fisher C. W.* / J. Appl. Phys. 1976. Vol. 47. № 10. P. 4605–4610.
2. *Кожаринова Е. А., Батырев Н. И., Косышина П. А., Умникова Е. В.* / Успехи прикладной физики. 2017. Т. 5. № 2. С. 174–178.
3. *Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карнов В. В., Талимов А. В.* / Прикладная физика. 2002. № 1. С. 56–62.
4. *Мирофьянченко А. Е., Мирофьянченко Е. В., Лаврентьев Н. А., Попов В. С.* / Прикладная физика. 2020. № 3. С. 33–37.
5. *Бирюлин П. В., Туринов В. И., Якимов Е. Б.* / Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. Вып. 4. С. 498–503.
6. *Астахов В. П., Карнов В. В., Крапучин В. В., Чижко В. Ф., Шлёнский А. А.* / Прикладная физика. 2012. № 4. С. 79–82.
7. *Whelan M. V.* / Philips Res. Repts. 1965. Vol. 20. P. 620–632.

PACS: 85-60.-q

Capacitance-voltage characteristics based on indium antimonide MIS-structures study

V. P. Astakhov¹, K. S. Andreichikov^{1,2}, I. A. Dubenskaya^{1,2} and E. V. Molodcova³

¹ Moskovsky zavod «SAPFIR». J.S.C.
Bld. 4A, 3A, Dneprohetrovskiy passage, Moscow, 117545, Russia
E-mail: andreichikoff.kirill@yandex.ru

² NUST MISIS
Bd. 4, 1, Leninsky Prospekt, Moscow, 119049, Russia

³ "Giredmet". J.S.C.
Bd. 2, Electrodnaya st., Moscow, 111524, Russia

Received 9.02.2023; revised 20.03.2023; accepted 28.03.2023

The work is devoted to study of capacitance-voltage (CV) characteristics metal-insulator-semiconductor (MIS) structures, fabricated from single-crystal indium antimonide plates cut along the (211) and (100) planes from an ingot grown in the [211] direction and along the plane (100) from an ingot grown in the [100] direction. MIS structures were of two

types: with an anode oxide layer and with a protective dielectric composition, including additional layer of SiO_x . Measurements of the CV curve of MIS structures flooded with liquid nitrogen were carried out with multiple forward (starting from zero bias at the field electrode) and reverse "passes" at a bias voltage change rate 500 mV/s. Analysis results of "passes" made it possible to determine the sign and values of the effective surface charge in the initial state and after each direct "pass" when additional charges of two types are detected: stable and unstable. The sign of these charges is opposite to the polarity of the voltage on the field electrode. Stable charges are unchanged during the entire cooling time and "drain" only when the MIS structure is "warmed up". Unstable ones "drain" already when the cooled MIS structure is short-circuited.

It is shown that the values of all types of surface charge, and hence the concentration of traps, are minimal in the case of plates cut along the (100) plane from ingots grown in the [100] direction.

Keywords: capacitance-voltage characteristic, MIS-structure, indium antimonide, effective surface charge.

DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-2-146-154

REFERENCES

1. Etchells A. and Fisher C. W., J. Appl. Phys. **47** (10), 4605–4610 (1976).
2. Kozharinova E. A., Batyrev N. I., Kostyshina L. A. and Umnikova E. V., Usp. Prikl. Fiz. **5** (2), 174–178 (2017) [in Russian].
3. Astakhov V. P., Gindin P. D., Karpov V. V. and Talimov A. V., Applied Physics, № 1, 56–62 (2002) [in Russian].
4. Mirofyanchenko A. E., Mirofianchenko E. V., Lavrentyev N. A. and Popov V. S., Applied Physics, № 3, 33–37 (2020) [in Russian].
5. Biryulin P. V., Turinov V. I. and Yakimov E. B., Semiconductors **38** (4), 480–485 (2004).
6. Astakhov V. P., Karpov V. V., Karpukhin V. V. and Chishko V. F., Applied Physics, № 4, 79–82 (2012) [in Russian].
7. Whelan M. V., Philips Res. Repts. **20**, 620–632 (1965).