

УДК 621.357.7:621.383.52

## Формирование термостойких анодных окисных пленок и их использование для изготовления фотодиодов на InSb

А. В. Талимов, В. Ю. Филиновский  
ОАО «Московский завод «Сапфир»»

А. Г. Титов

Государственное унитарное предприятие «НПО «Орион»», Москва, Россия

*На основе анализа процессов формирования анодных окисных пленок на антимониде индия предложена методика получения однородных термостойких защитных покрытий с повышенными напряжениями пробоя. В предлагаемой методике анодирование велось в гальваностатическом режиме с программируемым изменением анодного тока. Электролитом служил обезвоженный раствор персульфата аммония. Сравнение фотоэлектрических параметров капсул планарных фотодиодов, изготовленных с применением предложенной методики и аналогичного базового процесса, показало перспективность применения этой методики для повышения термостойкости фотодиодов из InSb. Такие фотодиоды пригодны для применения в низкофоновых системах.*

Одним из основных процессов при производстве диодных фоточувствительных элементов (ФЧЭ) на InSb по базовой технологии [1] является защита  $p-n$ -перехода с помощью анодного окисления (АО) в гальваностатическом режиме (ГС) в безводном растворе  $\text{Na}_2\text{S}$ . Проведенное ранее исследование показало, что получаемая анодная окисная пленка (АОП) сохраняет свои защитные свойства лишь до температуры 130 °С. При больших температурах, которым может подвергаться ФЧЭ, происходят структурные изменения неплотной окисной пленки, рост ее проводимости, шунтирование (вплоть до закоротки)  $p-n$ -перехода. Значительные технологические затруднения возникают также при очистке исходного  $\text{Na}_2\text{S}$ , связанные с его высокой гигроскопичностью. Поэтому в [2] был предложен способ формирования защитной АОП в электролите на основе персульфата аммония (ПА) —  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ . Указанный электролит позволяет повысить термостойкость АОП до 175 °С и избавиться от проблем, сопровождающих применение  $\text{Na}_2\text{S}$ . В работе [2] было изучено также влияние дополнительной (второй) стадии АО с пониженной плотностью анодного тока на свойства пленки и показано, что подобная стадия улучшает однородность пленки по поверхности и повышает пробивное напряжение АОП. Однако полученная АОП не была опробована при изготовлении фотодиодов (ФД).

Цель данного исследования — определение перспективности использования АОП, полученных на InSb в электролите на основе ПА при программируемом гальваностатическом анодировании, для изготовления ФД из InSb, и объяснение причин повышенной термостойкости подобных АОП.

### Методики экспериментов

Эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе изучалось влияние ГС-режимов АО с программируемым (ступенчатым) изменением плотно-

сти анодного тока в безводном электролите на основе ПА на пробивное напряжение и однородность получаемых АОП. Режим АО выбирался для обеспечения лучшей (по сравнению с базовым режимом) защиты поверхности пластин InSb. Для этого на поверхности пластин *n*-InSb марки ИСЭ-2в, прошедших химико-динамическую полировку, были изготовлены МДП-структуры. Диэлектриком служила АОП, полученная при выбранном режиме АО, на поверхность которой через маску с отверстиями диаметром  $\approx 1$  мм методом термического распыления при  $T = 90$  °С наносились алюминиевые электроды. На полученных МДП-структурах с помощью ПНХТ измерялись пробивные напряжения  $U_{\text{проб}}$ . Контакты к структуре осуществлялись следующим образом: к полупроводнику — с помощью припайки индием никелевого провода, а к металлу (Al) — путем прижимания игольчатого зонда. При измерениях пробивного напряжения МДП-структуры выходили из строя (пробивались). На основе данных по  $U_{\text{проб}}$  на каждой из пластин (каждая со своим режимом АО) строились гистограммы  $U_{\text{проб}}$  (количество точек на пластине  $\approx 60$ ). В этих экспериментах были опробованы лучший из двухстадийных процессов, изученных в [2], и трехстадийные процессы ГС-режима АО, в которых первая стадия проводилась при большем, а каждая последующая — при все меньшем токе. Используемые ступенчатые режимы АО в электролите на основе ПА вместе с базовым режимом АО в электролите на основе  $\text{Na}_2\text{S}$  и толщины получаемых пленок приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы анодного окисления

№ п/п	Режим и тип электролита	$J$ , мкА/см <sup>2</sup> ( $J_1$ , мА)	$\tau_1$ , мин	$J$ , мкА/см <sup>2</sup> ( $J_2$ , мА)	$\tau_2$ , мин	$J$ , мкА/см <sup>2</sup> ( $J_3$ , мА)	$\tau_3$ , мин	Примечания
1	ГС, ПА	70 (0,76)	90	45 (0,5)	30	—	—	$U_{\text{кон.1}} = 27$ В; $U_{\text{кон.2}} = 26,9$ В; $U_{\text{нач.2}} = 25,5$ В; $d = 1200$ Å
2	ГС, ПА	90 (1)	40	27 (0,3)	10	9 (0,1)	10	$U_{\text{кон.1}} = 27$ В; $U_{\text{кон.2}} = 25$ В; $U_{\text{нач.2}} = 22$ В; $U_{\text{кон.3}} = 16$ В; $U_{\text{нач.3}} = 15$ В; $d = 1100$ Å
3	ГС, ПА	90 (1)	45	27 (0,3)	10	9 (0,1)	15	$U_{\text{кон.1}} = 24,8$ В; $U_{\text{кон.2}} = 20$ В; $U_{\text{нач.2}} = 18,5$ В; $U_{\text{кон.3}} = 17$ В; $U_{\text{нач.3}} = 16$ В; $d = 1200$ Å
4	ГС, $\text{Na}_2\text{S}$	70 (0,76)	22	—	—	—	—	$U_{\text{кон}} = 23,4$ В; $d = 650$ Å

Обозначения. ГС — гальваностатический режим АО;  $I_i$ ;  $\tau_i$  — ток и длительность стадий АО (индекс  $i = 1$  относится к начальной стадии при более высоких токах, а индексы  $i = 2, 3$  — ко второй и третьей стадиям АО, если они имеют место);  $U_{\text{кон}}$  — конечное напряжение, достигаемое в ходе АО на электродах, причем индексы 1, 2 и 3 относятся к соответствующим стадиям АО;  $U_{\text{нач}}$  — начальное напряжение второй или третьей стадии, которое фиксируется после переключения тока в ГС-режиме на другое значение;  $d$  — толщина АОП, измененная с помощью интерференционного и эллипсометрического методов.

Профили распределения элементов по толщине анодных окислов, полученных в лучшем режиме АО в электролите на основе ПА и в базовом режиме АО в электролите на основе  $\text{Na}_2\text{S}$ , исследовались методом Оже-спектроскопии. Регистрацию Оже-спектров проводили на приборе РНІ-545А. Энергия пучка первичных электронов составляла 5 кэВ, ток пучка  $\sim 1$  мкА. Для получения Оже-профилей по толщине АОП проводили их травление пучком ионов аргона с энергией 3 кэВ. Химический состав определяли по следующим Оже-линиям: SLMM (151 эВ), InMNN (404 эВ), SbMNN (454 эВ), OKLL (512 эВ). Чувствительность метода в исследуемом диапазоне энергий не менее  $10^{-2}$  ат. %. Относительную концентрацию элементов регистрировали по интенсивности линий Оже-электронов.

Полученные на первом этапе режимы АО (наряду с базовым) были опробованы на втором этапе исследований для изготовления 64-элементных капсул ФЧЭ с размером фоточувствительных площадок  $150 \times 150$  мкм<sup>2</sup>. При изготовлении ФЧЭ использовались режимы ионной имплантации (ИИ) и постимплантационного отжига, рекомендуемые для разработчиков низкофоновых систем [3]. Вольт-амперные характеристики элементов капсул измерялись на установке "Semiconductor parameter analyzer" при погружении капсулы в жидкий азот. На основе ФЧЭ были собраны фотоприемные устройства (ФПУ), для которых измерялись следующие фотоэлектрические параметры: напряжения сигнала  $U_c$  и шума  $U_{ш}$ , фоновый ток  $I_{ф}$  (по методике, приведенной в [4]). Источником излучения в эксперименте являлось абсолютно черное тело (АЧТ) с температурой рабочей полости 373 К. Частота модуляции излучения при измерении выходного сигнала составила 800 Гц, полоса пропускания измерительного тракта — 190 Гц, апертурный угол ФПУ  $\geq 60^\circ$ . На основании данных этих измерений рассчитывались значения токовой  $S_I$  и пороговой  $\Phi_{п}$  чувствительностей в соответствии с [4]. В результате на втором этапе сравнивались параметры партий, изготовленных по шести разным технологиям:

**№ 1 — базовая технология:** двухстадийная имплантация ионов  $Be^+$  с  $E_1 = 100$  кэВ и  $\Phi_1 = 3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-2</sup>;  $E_2 = 40$  кэВ и  $\Phi_2 = 10^{14}$  см<sup>-2</sup>; термический отжиг при  $T = 375$  °С с капсулирующей пленкой  $SiO_2$  в течение 30 мин в потоке  $H_2$  и  $Ag$ ; анодное окисление в ГС-режиме при плотности тока 70 мкА/см<sup>2</sup> до достижения  $U_{кон} = 23$  В в электролите на основе  $Na_2S$ ;

**№ 2 — базовая технология, кроме АО.** Последнее велось в электролите на основе ПА в лучшем (согласно [2]) двухстадийном ГС-режиме АО ( $j_1 = 70$  мкА/см<sup>2</sup>,  $\tau_1 = 90$  мин и  $j_2 = 45$  мкА,  $\tau_2 = 90$  мин);

**№ 3 — имплантация ионов  $Be^+$**  с  $E = 40$  кэВ и  $\Phi = 10^{14}$  см<sup>-2</sup>; ламповый отжиг на установке "Оникс" при  $T = 390$  °С в течение 30 с; анодное окисление в ГС-режиме при плотности тока 70 мкА/см<sup>2</sup> до достижения  $U_{кон} = 23$  В в электролите на основе  $Na_2S$  (эта технология рекомендована в [3] в качестве оптимальной для низкофоновых систем);

**№ 4 — технология № 3, кроме АО.** Последнее велось в электролите на основе ПА в трехстадийном режиме АО ( $j_1 = 90$  мкА/см<sup>2</sup>,  $\tau_1 = 45$  мин;  $j_2 = 27$  мкА/см<sup>2</sup>;  $\tau_2 = 10$  мин;  $j_3 = 9$  мкА/см<sup>2</sup>;  $\tau_3 = 15$  мин);

**№ 5 — имплантация ионов  $Be^+$**  с  $E = 40$  кэВ и  $\Phi = 10^{14}$  см<sup>-2</sup>; термический отжиг при  $T = 375$  °С с капсулирующей пленкой  $SiO_2$  в течение 30 мин в потоке  $H_2$  и  $Ag$ ; анодное окисление в ГС-режиме при плотности тока 70 мкА/см<sup>2</sup> до достижения  $U_{кон} = 23$  В велось в электролите на основе  $Na_2S$ ;

**№ 6 — технология № 5, кроме АО.** Последнее велось в электролите на основе ПА в трехстадийном ГС-режиме АО ( $j_1 = 90$  мкА/см<sup>2</sup>,  $\tau_1 = 45$  мин;  $j_2 = 27$  мкА/см<sup>2</sup>;  $\tau_2 = 10$  мин;  $j_3 = 9$  мкА/см<sup>2</sup>;  $\tau_3 = 15$  мин).

Остальные процессы формирования приборной структуры соответствовали базовой технологии (нанесение  $SiO$  и  $Cr + Au$  термическим распылением, вскрытие  $SiO$  с применением плазмотехнического травления).

Полученные результаты изменений сведены в табл. 2, которая демонстрирует влияние электролита на фотоэлектрические параметры ФД.

Таблица 2

Влияние электролита на основные фотоэлектрические параметры ФД

Элемент	№ технологии	Общие характерные особенностям групп образцов	$U_{\text{проб}}, \text{ В}$	$I(U=-0,2 \text{ В}), \text{ нА}$	$\beta$ , отн. ед.	$n$ , отн. ед.	$\Phi_{\text{п}}, (^{\circ})$	$I_{\text{ф}}, \text{ мкА}$	$S_I, \text{ А/Вт}$	$U_c, \text{ мВ}$	$\Delta U_c, \%$	$U_{\text{ш}}, \text{ мВ}$	$\Delta U_{\text{ш}}, \%$
Na <sub>2</sub> S	1	ИСЕ-2, 2-ступ. ИИ, стац. отжиг	3,5(4)	16,0	1,43	2,00	0,83	0,246	0,166	428	+41	17,0	+56
	2												
Na <sub>2</sub> S	3	ИСЭ-2, ИИ: 40; 20, импупл. отжиг	3(5)	3,8	1,67	1,30	0,71	0,206	0,162	440	+14	13,3	+4
	4												
Na <sub>2</sub> S	5	ИСЭ-2? ИИ: 40; 20, стац. отжиг	2(3)	9,8	1,88	1,00	0,77	0,199	0,149	393	-8	14,0	-8
	6												

Примечание. \* — размерность параметра  $\Phi_{\text{п}} - \text{Вт} \cdot \Gamma \text{ц}^{-1/2} \cdot \text{см}^{-1}$ ;

$U_{\text{проб}}$  — среднее по линейке значение пробивного напряжения капсул ФЧЭ, измеренное из ВАХ на ПНХТ (в скобках приводится значение  $U_{\text{проб}}$  после электротренировки);

$I_T (U = -0,2 \text{ В})$  — средняя величина темнового тока, измеренная при значении обратного смещения на  $p-n$ -переходе 200 мВ;

$n_{\text{ср}}$  — среднее значение показателя степени обратной ветви ВАХ вида  $I \sim U^n$ ;

$\beta_{\text{ср}}, \Phi_{\text{п}}, S_I, U_c, U_{\text{ш}}, I_{\text{ф}}$  — средние значения коэффициента неидеальности из прямой ветви ВАХ, пороговый и токовой чувствительности, напряжений сигнала и шума, фонового тока, соответственно;

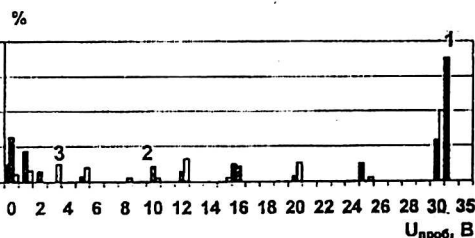
$\Delta U_c$  — относительное изменение значений  $U_c$ , полученных при переходе от электролита на основе Na<sub>2</sub>S, к электролилу на основе ПА в партиях, остальные режимы изготовления которых были одинаковыми. Расчет проводился по формуле  $\Delta U_c = 2 \cdot [U_c(\text{ПА}) - U_c(\text{Na}_2\text{S})] / [U_c(\text{ПА}) + U_c(\text{ПА})] \cdot 100 \%$ .

## Результаты измерений и их обсуждение

**Этап 1.** На рис. 1 дано сравнение гистограммы пробивных напряжений МДП-структур для полученного при наших исследованиях лучшего двухстадийного ГС-режима АО ( $I_1 = 0,76$  мА;  $\tau_1 = 90$  мин;  $I_2 = 0,5$  мА;  $\tau_2 = 30$  мин) в сравнении с двумя трехстадийными процессами. Из этих данных следует, что добавка третьей стадии АО уменьшает количество закороток в окисле, а наилучшим по этому параметру режимом является следующий: трехстадийный ГС-режим ( $j_1 = 90$  мкА/см<sup>2</sup>;  $\tau_1 = 45$  мин;  $j_2 = 27$  мкА/см<sup>2</sup>;  $\tau_2 = 10$  мин;  $j_3 = 9$  мкА/см<sup>2</sup>;  $\tau_3 = 15$  мин). Однако двухстадийный режим обеспечивает большую долю максимальных пробивных напряжений, полученных в этой серии экспериментов. Следует отметить, что переключение тока на следующее значение осуществлялось в тот момент, когда происходило насыщение зависимости  $U(\tau)$ . Выбор этого момента наглядно демонстрирует кинетика АО, представленная на рис. 2.

**Рис. 1.** Гистограммы пробивных напряжений МДП-структур, изготовленных в ступенчатых ГС-режимах АО:

1 — режим АО № 1 ( $I_1 = 0,76$  мА;  $\tau_1 = 90$  мин;  $I_2 = 0,5$  мА;  $\tau_2 = 30$  мин); 2 — режим АО № 2 ( $I_1 = 1$  мА;  $\tau_1 = 40$  мин;  $I_2 = 0,3$  мА;  $\tau_2 = 10$  мин;  $I_3 = 0,1$  мА;  $\tau_3 = 10$  мин); 3 — режим АО № 3 ( $I_1 = 1$  мА;  $\tau_1 = 45$  мин;  $I_2 = 0,3$  мА;  $\tau_2 = 10$  мин;  $I_3 = 0,1$  мА;  $\tau_3 = 15$  мин)



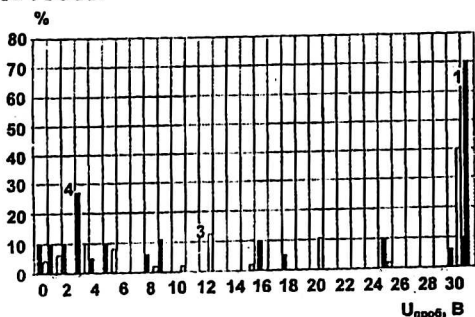
**Рис. 2.** Кинетика АО в трехстадийном ГС-режиме



На рис. 3 представлены гистограммы пробивных напряжений МДП-структур для лучших двухстадийного и трехстадийного ГС-режима АО на основе ПА электролита в сравнении с принятым в базовой технологий ГС-режимом в электролите на основе  $\text{Na}_2\text{S}$  ( $I_1 = 0,76$  мА;  $\tau_1 \approx 22$  мин до  $U_{\text{кон}} = 23$  В). Из этих данных следует, что выбранные многостадийные режимы АО в электролите на основе ПА по величине  $U_{\text{проб}}$  сравнимы с базовым ГС-режимом в электролите на основе  $\text{Na}_2\text{S}$ . Однако ступенчатый режим существенно уменьшает число “слабых мест” в пленке, и это является его преимуществом. Таким образом, выбранные многостадийные режимы АО в ПА позволяют получить АОП, которые превосходят другие АОП.

**Рис. 3.** Гистограммы пробивных напряжений МДП-структур:

1 — режим АО № 1 ( $I_1 = 0,76$  мА;  $\tau_1 = 90$  мин;  $I_2 = 0,5$  мА;  $\tau_2 = 30$  мин; электролит ПА); 3 — режим АО № 3 ( $I_1 = 1$  мА;  $\tau_1 = 45$  мин;  $I_2 = 0,3$  мА;  $\tau_2 = 10$  мин;  $I_3 = 0,1$  мА;  $\tau_3 = 15$  мин); 4 — режим АО № 4 ( $I_1 = 0,76$  мА;  $\tau_1 = 22$  мин; электролит  $\text{Na}_2\text{S}$ )



Улучшение защитных свойств и повышение термостойкости АОП обычно [5] достигаются в результате увеличения толщины и однородности пленки, а также посредством совершенствования ее физико-химической структуры. Большинство разработанных рекомендаций относится к случаю вентильных металлов однокомпонентного состава. Закономерности роста АОП на полупроводниковом интерметаллическом InSb значительно сложнее и включают индивидуальные особенности окисления и химического растворения компонентов кристалла.

Важную роль в процессе АО играет реакция выделения кислорода на поверхности растущей АОП.

Общими рекомендациями для получения плотных АОП на полупроводниковых материалах, по-видимому, являются:

использование органических растворителей с небольшим содержанием растворенного кислорода и воды;

использование солей слабых кислот, обеспечивающих достаточную электропроводность раствора и стабилизирующих его буферную емкость;

использование режимов электролиза, при которых потенциал анода меняется в узкой области значений (до начала интенсивного выделения кислорода). Перечисленные условия были реализованы в настоящем исследовании.

Для получения плотных АОП многими авторами [5] рекомендуется смешанный режим электролиза: ГС-режим с невысокой плотностью анодного тока для образования первоначальной однородной пленки, а затем — потенциостатический режим для дорастивания и уплотнения первоначальной пленки. Однако использование потенциостатического режима может приводить к нестабильности АО и неравномерному распределению процесса вдоль поверхности.

Предпочтительным является использование на второй (и последующих) стадии АО гальваностатического режима с пониженным анодным током. Нарастание потенциала электрода в таком случае замедляется, снижается вероятность выделения кислорода, сохраняется равномерность распределения реагентов вдоль поверхности анода. В выбранном ГС-режиме АО величина анодного тока изменялась по следующей программе: снижение анодного тока ступеньками, причем по мере снижения тока сокращалась продолжительность ступеней. Применение подобного режима АО позволяет сохранить высокую скорость роста АОП (определяемой первой ступенью) и вести процесс на последующих этапах в более “мягком” режиме, обеспечивая увеличение сплошности пленки и улучшение ее защитных свойств. Снижение анодного тока приводит также к уменьшению величины дополнительного объемного заряда в пленке, накапливаемого в процессе АО, что подтверждается приведенными выше опытными данными.

Процесс роста АОП включает взаимную диффузию кислорода внутрь пленки (по междоузлиям) и ионов индия и сурьмы (по вакансиям) к границе раздела АОП—раствор. В растворах, содержащих  $\text{Na}_2\text{S}$ , в области анодных потенциалов, при которых протекает процесс АО, возможен также разряд сульфид-иона. Образующиеся в результате разряда атомы серы адсорбируются на внешней границе АОП, препятствуя окислению. В растворах ПА разряд ионов  $(\text{S}_2\text{O}_8)^{2-}$  при рассматриваемых анодных потенциалах протекает, по-видимому, по сложному механизму, включающему химические стадии. Выделение свободной серы на внешней границе АОП маловероятно. Приведенные соображения подтверждаются результатами определения элементного состава АОП, полученных в электролитах на основе  $\text{Na}_2\text{S}$  и ПА и приведенными на рис. 4, а, б. Как видно из рис. 4, а, б, на границе раздела АОП — электролит

содержание In и S намного больше, а Sb — меньше в случае электролита на основе  $\text{Na}_2\text{S}$  по сравнению с электролитом на основе ПА.

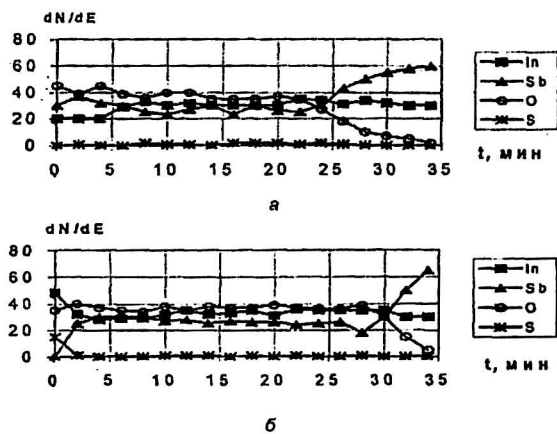


Рис. 4. Оже-профили химического состава АОП, полученной в электролите на основе: а — ПА; б —  $\text{Na}_2\text{S}$

Таким образом, в составе окисла на границе АОП—электролит наряду со связями In—O и Sb—O в случае электролита на основе  $\text{Na}_2\text{S}$  присутствуют в большем количестве связи In—S, которые обладают меньшей энергией связи по сравнению с энергией связи In—O. Содержание кислорода и сурьмы в случае электролита на основе  $\text{Na}_2\text{S}$  на границе АОП—электролит меньше, чем в электролите на основе ПА. Из того факта, что энергия связей Sb—S сопоставима с энергией связи Sb—O, следует что АОП на основе ПА будет обладать сильными связями по сравнению с АОП на основе  $\text{Na}_2\text{S}$  за счет меньшего количества связей In—S, ослабляющих структуру АОП. Поэтому следует ожидать повышение термостойкости последних, полученных в электролите на основе ПА по сравнению с АОП, полученными на основе  $\text{Na}_2\text{S}$ .

Приведенные на рис. 4, а, б распределения элементов могут быть использованы для качественных доказательств более плотных АОП, получаемых в растворах ПА.

Как видно из рис. 4, б, на внутренней границе АОП содержание Sb несколько ниже, чем в объеме пленки. Подобное обстоятельство при неизменном содержании остальных элементов свидетельствует о накоплении в этой области окислов Sb(V). Критерий Пиллинга-Бедворса [6], характеризующий плотность защитной пленки, для окислов  $\text{Sb}_2\text{O}_5$  значительно ниже, чем для  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ . Таким образом, и на внутренней границе АОП в случае применения электролита на основе  $\text{Na}_2\text{S}$  происходит ослабление структуры АОП за счет увеличения доли связей Sb(V)—O.

Представленная модель подтверждается полученными результатами исследования структурных и электрических свойств АОП, которые свидетельствуют о положительном влиянии применения электролита на основе ПА и дополнительных стадий ГС-режима на характеристики ФД- и МДП-структур.

**Этап 2.** Представленные в табл. 2 значения основных ФЭ параметров свидетельствуют о том, что базовый режим АО технологии № 1 предпочтительнее двухступенчатого ГС-режима с электролитом на основе ПА (технология № 2).

Сравнение технологий № 3 и 4, а также № 5 и 6 дает неоднозначную оценку преимуществ того или иного электролита. Так, технология № 3 не-

сколько предпочтительнее технологии № 4 по параметру  $U_c$  (на 14 %) и совершенно одинакова по  $\Phi_n$  и  $U_{\text{проб}}$ . Напротив, данные по параметру  $\beta$  демонстрируют лучшее качество металлургической границы  $p$ - $n$ -перехода и меньший уровень темновых токов у технологии № 4. При сравнении технологий № 5 и 6 получается следующее: технология № 5 несколько уступает технологии № 6 по  $U_c$  (на 8 %),  $U_{\text{проб}}$  (3 В после ЭТ вместо 4 В), и  $\beta$  (1,88 против 1,51), и практически одинакова по  $\Phi_n$  и  $I_T$ , но превосходит по  $n$  (1,0 вместо 1,5).

Учитывая, что точность результатов измерения  $U_c$  и  $S_f$  составляет 10 %,  $U_{\text{ш}}$  — 15 %,  $\Phi_n$  — 18 %, становится ясным, что технологии № 4 и 6 не уступают технологиям № 3 и 5 по этим параметрам.

Необходимо заметить, что низкие значения конечного напряжения, полученные по технологии № 2, связаны с неудовлетворительной предобработкой поверхности пластин и несоблюдением требований по их отбраковке после ХДП. Сопоставление технологий № 1 и 2 поэтому не вполне корректно. Таким образом, данные сравнений фотоэлектрических параметров ФД с различными используемыми электролитами свидетельствуют о том, что выбранный трехступенчатый ГС-режим АО в электролите на основе ПА является достойной альтернативой применяемому в базовой технологии ГС-режиму в электролите на основе  $\text{Na}_2\text{S}$ , а технология № 4 с использованием этого режима АО может быть рекомендована в качестве модернизированной технологии, обеспечивающей выпуск ФД на  $\text{InSb}$  не только для традиционных потребителей, но и для разработчиков низкофоновых систем.

## Выводы

1. Применение электролита на основе ПА снимает проблемы, связанные со сложностью и трудоемкостью очистки исходного порошка  $\text{Na}_2\text{S}$ , а также с его высокой гигроскопичностью. Используемая для защиты поверхности АОП на основе ПА проста в приготовлении, является более термостойкой (на 50 °С), чем полученная в электролите на основе  $\text{Na}_2\text{S}$ , что позволяет повысить температуру нанесения последующих защитных и проводящих слоев, уменьшая брак по их отслоениям.

2. Определен режим АО в электролите на основе ПА, который позволяет получить защитную диэлектрическую пленку, по пробивным напряжениям и однородности свойств значительно превосходящую другие АОП. Этот режим — трехстадийный гальваностатический при  $j_1 = 90 \text{ мкА/см}^2$ , ( $I = 1 \text{ мА}$ );  $\tau_1 = 45 \text{ мин}$ ;  $j_2 = 27 \text{ мкА/см}^2$  ( $I = 0,3 \text{ мА}$ );  $\tau_2 = 10 \text{ мин}$ ;  $j_3 = 9 \text{ мкА/см}^2$  ( $I = 0,1 \text{ мА}$ );  $\tau_3 = 15 \text{ мин}$ .

3. Разработана модель оптимального защитного покрытия, основанная на применении ступенчатого ГС-режима АО в электролите на основе ПА.

4. Представлена альтернатива базовой технологии, включающая имплантацию ионов  $\text{Ve}^+$  с  $E = 40 \text{ кэВ}$  и  $\Phi = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ , ламповый отжиг на установке "Оникс" при  $T = 390 \text{ °С}$  в течение 30 с, анодное окисление в электролите на основе ПА в трехстадийном ГС-режиме АО ( $j_1 = 90 \text{ мкА/см}^2$ ;  $\tau_1 = 45 \text{ мин}$ ;  $j_2 = 27 \text{ мкА/см}^2$ ;  $\tau_2 = 10 \text{ мин}$ ;  $j_3 = 9 \text{ мкА/см}^2$ ;  $\tau_3 = 15 \text{ мин}$ ). Технология обеспе-

чивает изготовление ФД, по своим фотоэлектрическим параметрам не уступающих серийным образцам, а также годящихся для использования их в низковольтных системах.

*Авторы признательны В. П. Астахову и Н. В. Мирошникову за полезное обсуждение полученных результатов.*

#### Л и т е р а т у р а

1. Комплект технической документации ОС2.003.023/НПО "Орион", 1982.
2. Астахов В. П., Гундин Д. А., Карпов В. В., Талимов А. В. Повышение термостойкости фотодиодов на InSb//Прикладная физика, 2001. № 5. С. 30.
3. Астахов В. П., Винецкий Ю. Р., Карпов В. В., Талимов А. В. и др. Результаты разработки фотодиодов на InSb с ультранизкими темновыми токами для высокочувствительных ИК ПЗС//Там же. 1999, № 2. С. 86.
4. ГОСТ 17772—79. Приемники излучения и устройства приемные полупроводниковые фотоэлектрические. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. ГОСТ СССР, 1979.
5. Юнг Л. Анодные оксидные пленки. — Л.: Энергия, 1967. — 232 с.
6. Одынец Л. Л., Орлов В. М. Анодные оксидные пленки. — Л.: Наука, 1990. — 200 с.

## Forming the heat-resistant anode oxide films and their usage for manufacture of the InSb photodiodes

*A. V. Talimov, V. Yu. Filinovsky*  
The Sapphire Moscow Plant, Inc., Moscow, Russia

*A. G. Titov*  
The Orion R&P Enterprise, Moscow, Russia

*The procedure of deriving the homogeneous bakeable cap layers with the heightened voltages of a disruption is offered on the basis of the analysis of processes of forming the anode oxide films on antimonide of indium. In the tendered procedure the anodizing was carried on in the galvanic-static mode with programmed change of a anode current. The solution pesulphate of ammonium was utilized for an experiment. The matching of photoelectric parameters of capsules of planar photodiodes manufactured with application of the offered procedure and similar base process has shown prospects of application of this procedure for pinch of a thermostability of the InSb photodiodes. Such photodiodes are suitable for application in the low-phon systems.*