

Исследование характеристик фотодиодных линеек на InSb

© П.В. Бирюлин[¶], В.И. Туринов, Е.Б. Якимов^{*¶}

Научно-производственное предприятие „Исток“,
141190 Фрязино, Россия

* Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук,
142432 Черноголовка, Россия

(Получена 18 марта 2003 г. Принята к печати 20 августа 2003 г.)

Исследованы электрические характеристики из 8-элементных сурьмянисто-индиевых фотодиодных линеек при $T = 78–145$ К. Коэффициенты взаимной связи соседних $p-n$ -переходов не превышали 4.3%. При исследовании поверхности имплантированных цинком $p-n$ -переходов в режиме вторичных электронов и методом наведенного тока в растровом микроскопе у них выявлены дефекты под пленкой ZnS, а также локальные неоднородности тока через $p-n$ -переходы.

Природа токов у экспериментальных $p-n$ -переходов на InSb, полученных различными технологическими методами, исследовалась во многих работах [1,2], поэтому здесь мы ограничимся интерпретацией результатов измерений температурных зависимостей вольт-амперных характеристик (ВАХ) $p-n$ -переходов в фотодиодной линейке, исходя из нашей цели: определить величину минимального коэффициента взаимной электрической связи соседних $p-n$ -переходов при сохранении у них высокой чувствительности.

Электрические характеристики фотодиодных линеек на InSb из 8 элементов размером 80×100 мкм, рассчитанных на эксплуатацию при температурах выше азотной, исследовались в специально разработанном микрокриостате для целевого применения. У некоторых $p-n$ -переходов при $T = 78$ К на ВАХ и небольших напряжениях смещения $U \approx 0 \pm k_0 T/q$ (k_0 — константа Больцмана, q — заряд электрона, T — температура в К) нами наблюдались аномалии дифференциального сопротивления R_d в виде дополнительного пика (рис. 1). Это также побудило нас к проведению более подробного исследования характеристик линеек и технологических процессов их изготовления, результаты которых излагаются в данной работе.

Исходный антимионид индия n -типа марки ИСЭ-1В имел концентрацию $n(78 \text{ К}) = (1–3) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и холловскую подвижность $\mu_H(78 \text{ К}) = (4–9) \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$. Линейки с $p-n$ -переходами изготавливались имплантацией ионов Zn^{++} с энергией $E = 120$ кэВ и дозой легирования 20 мкКул/см^2 . В качестве маски, а также для пассивации поверхности использовалась пленка ZnS толщиной ~ 0.5 мкм. Были проведены эксперименты и по отработке легирования пластин ИСЭ-1В ионами В^+ с энергией $E = 60$ кэВ сквозь защитную тонкую пленку ZnS толщиной ~ 0.05 мкм для торможения ионов, т.е. уменьшения степени разрушения ионами поверхности. При таких энергиях ионов, по данным [3], в InSb с незащищенной поверхностью средний пробег, например, ионов цинка составляет $L_i \approx 220 \text{ \AA}$ при $E = 40$ кэВ.

Толщина же легированных слоев d_0 намного превышает L_i и зависит от уровня легирования исходного материала и температуры последующего отжига T_a . Например, отжиг при $T_a = 400^\circ\text{C}$ в течение 15 мин легированного $\text{Zn}^+ p\text{-InSb}$ с $p = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ дает величину $d_0 = 0.7–12$ мкм [4]. Однако технология легирования В^+ сквозь пленку ZnS оказалась более „капризной“ при восстановлении удельного дифференциального сопротивления $p-n$ -перехода R_0A при $U = 0$ В (A — площадь $p-n$ -перехода), что сказалось на однородности фотоэлектрических параметров линеек, поэтому для их изготовления была применена имплантация Zn^{++} . Исследования процесса легирования ионами Zn^{++} в зависимости от дозы ионов в диапазоне от $3 \cdot 10^{12}$ до $6.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ показали, что при дозе ниже $3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ не происходит формирование $p-n$ -переходов, а при дозах выше $6.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ наблюдалось сильное разрушение поверхности ионами, вплоть до ее аморфизации, что подтверждало данные работы [5]. Этот поверхностный слой захватывает легирующую примесь [1] и препятствует ее разгонке при отжиге, в результате чего профиль легирования остается исходным, соответствующим пробегу ионов, и прецизионным травлением удалялся как разрушенный ионами слой, так и вместе с ним сама легирующая примесь, и восстановить R_0A не удавалось. В пределах указанных доз уровень легирования слабо влиял на R_0A , поэтому в технологию была заложена доза $9 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$ (30 мкКул/см^2), в 3 раза превышающая нижний предел легирования. Влияние энергии ионов в пределах $E = 60–120$ кэВ на R_0A не обнаружено, так как отжиг радиационных дефектов и последующее прецизионное травление поверхности пластин „маскировали“ в нашей технологии эффект исходного профиля распределения легирующей примеси на параметры фотодиодов.

При отжиге радиационных дефектов в интервале $T \approx 360–380^\circ\text{C}$ наряду с процессом „залечивания“ дефектов в исходных пластинах $n\text{-InSb}$ идет процесс термоконвертирования типа проводимости с n - на p -тип. Этот процесс начинается на поверхности и развивается в толщу полупроводника. В результате по всей поверхности пластины образуется инверсный слой [1], работающий как канал утечки, и происходит падение R_d $p-n$ -перехо-

[¶] E-mail: birulin@sl.ru

^{*¶} E-mail: yakimov@ipmt-hpm.ac.ru

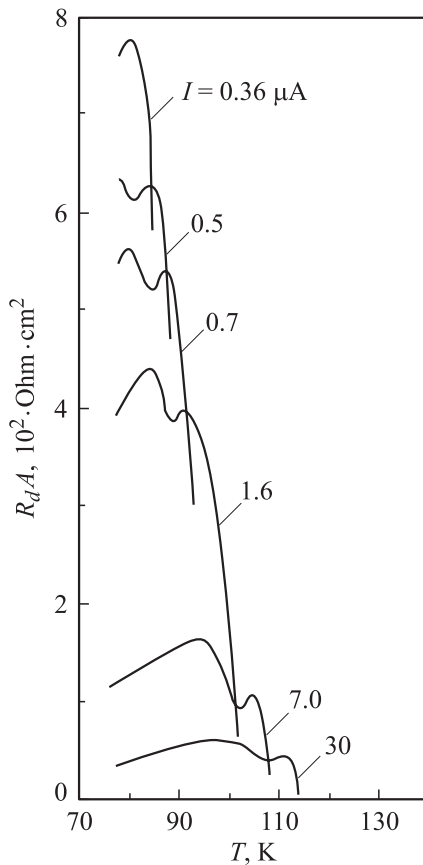


Рис. 1. Температурная зависимость $R_d A$ p - n -перехода на InSb, имеющего аномалию $R_d A$ при $U = \pm k_0 T/q$, при различных обратных токах.

дов. Поэтому были проведены поиски способа прецизионного снятия термоконверсионного p -слоя. Было опробовано анодное окисление поверхности пластин n -InSb в 0.1 нормальном растворе NaOH в этиленгликоле, когда термоконверсионный p -слой сначала переводился в окисел, который затем удалялся травлением в HCl или HF. Применялось также химическое травление в растворе СП-4А + H₂O (1:5) и, наконец, травление в растворе Br + метанол (1%-й раствор), которое дало наиболее хорошие и воспроизводимые результаты по восстановлению R_d .

На рис. 2 представлены прямые ветви ВАХ фотодиодных структур на InSb, измеренные при трех температурах. При температуре 78 К в исследованном интервале прямых смещений у p - n -переходов наблюдались три механизма тока. При $U < 7k_0 T/q$ ВАХ имела место зависимость $I = I_d \exp(qU/\gamma k_0 T)$, где $\gamma = 1.1$, $I_d = 4 \cdot 10^{-7}$ А/см², характерная для диффузионного тока. При $7k_0 T/q < U < 20k_0 T/q$ ВАХ соответствовала зависимости $I = I_0 \exp(qU/\beta k_0 T)$, где $\beta = 2.3$, $I_0 = 1.5 \cdot 10^{-4}$ А·см⁻², т.е. наряду с диффузионной действовала и рекомбинационная составляющая тока. При $U > 30k_0 T/q$ наступал режим высокой инжекции, сопротивление области пространствен-

ного заряда (ОПЗ) становилось сравнимым с сопротивлением толщи полупроводника, диффузионный процесс развивался глубже в базу и ВАХ описывалась зависимостью вида $I = I_c \exp(qU/ck_0 T)$ [6]. Здесь $c = 2[b + \text{ch}(d/l_d)]/(b + 1)$, d — толщина базы диода, $l_d = L[2b/(b + 1)]^{1/2}$, L — длина диффузионного смещения и $b = \mu_n/\mu_p$ — отношение подвижностей носителей тока. По экспериментальным зависимостям при $d = 350$ мкм и $b = 50$ была проведена оценка длины диффузионного смещения носителей L в n -базе, которая при $T = 78$ К составляла $L = 44$ мкм и незначительно возрастала до 46 мкм при $T = 145$ К. С увеличением температуры при $T > 110$ К характерный участок чисто диффузионного механизма исчезал, величина β падала с 2.3 при $T = 78$ К до 1.9 при $T = 145$ К, т.е. при таких температурах во всем диапазоне прямых смещений (до режима высокой инжекции) ток p - n -переходов на InSb состоял из двух составляющих — диффузионной и рекомбинационной.

При обратных смещениях ВАХ p - n -переходов на InSb описывались зависимостями вида $I = (I_d + I_g) \times [\exp(qU/ck_0 T) - 1] = I_s [\exp(qU/ck_0 T) - 1]$, где I_d — диффузионная составляющая тока; в общем случае, при $n_p = p_n$ (концентрации неосновных носителей тока в p - и n -области перехода соответственно) I_d состояла из

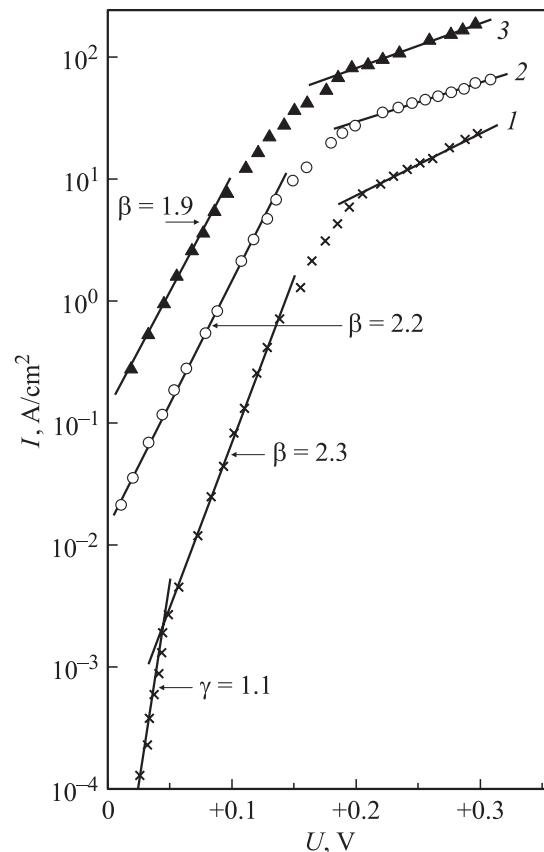


Рис. 2. ВАХ p - n -переходов на InSb при прямых смещениях для температур T , К: 1 — 78, 2 — 115, 3 — 145. Пояснения см. в тексте.

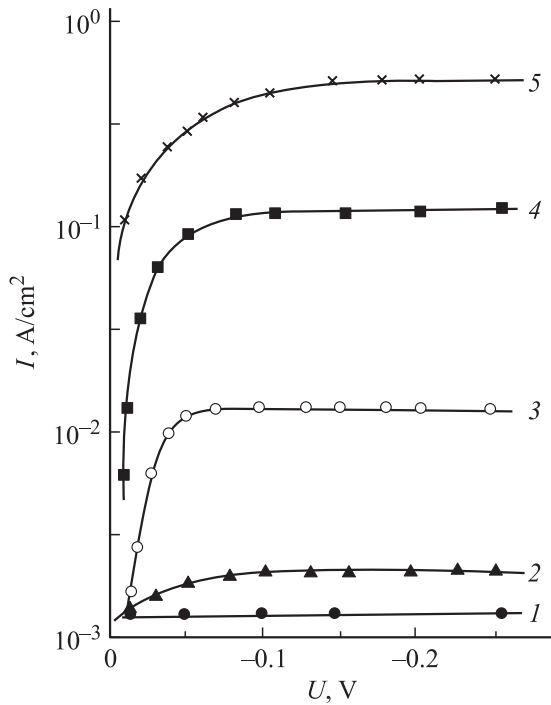


Рис. 3. ВАХ $p-n$ -переходов на InSb при обратных смещениях. Температура T , К: 1 — 78, 2 — 95, 3 — 115, 4 — 130, 5 — 145.

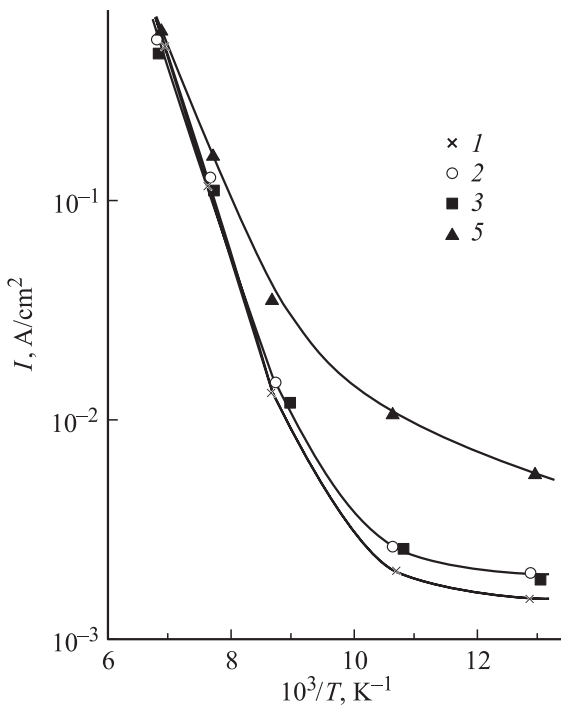


Рис. 4. Зависимость обратных токов фотодиодов на InSb № 1–4 от температуры при $U = -0.2$ В.

электронной и дырочной компонент p - и n -областей перехода, $I_g = qn_i W / 2\tau_0$ — генерационный ток ОПЗ (рис. 3), где W — ширина ОПЗ, n_i — собственная концентрация носителей заряда и τ_0 — их эффектив-

ное время жизни. Во всем исследованном интервале температур ВАХ имели зависимость $I = I_s$. Однако ток I_s не выходил на насыщение, хотя и медленно, но возрастал. Природу тока I_s можно определить по его температурной зависимости (рис. 4). При $U \approx -0.2$ В и температурах вблизи 78 К ток I_s слабо изменялся с увеличением температуры, что не соответствовало ни зависимости тока I_d , ни I_g от температуры. Такое поведение тока I_s можно объяснить утечками по поверхности [7]. При $T > 110$ К и $U \approx -0.2$ В ток I_s изменялся с температурой по экспоненциальному закону. При выявлении природы этого тока, а также тока на участке нарастания ВАХ ($I < I_s$) при обратных смещениях были проведены исследования зависимости изменения $R_d A$ $p-n$ -переходов от U и температуры (рис. 5). При $T > 110$ К и $I < I_s$ на кривых $R_d A = f(U)$ наблюдались изломы, характерные для смены механизма тока. Температурные зависимости $R_d A = f(10^3/T)$, построенные для трех фотодиодов при $U = -75$ мВ и $U = -250$ мВ (рис. 6), дали представление о природе токов, так как величина $(R_d A)_{diff} \propto 1/I_d$ изменяется с температурой как $1/n_i^2$, тогда как $(R_d A)_g \propto 1/I_g \propto 1/n_i$. Из данных рис. 6 следует, что при $T > 110$ К и $U > -0.1$ В доминирует ток I_d , а при $U < -0.1$ В ток I_g . Причем с ростом температуры область доминирования I_g сдвигается в диапазон бóльших обратных смещений (рис. 5, штри-

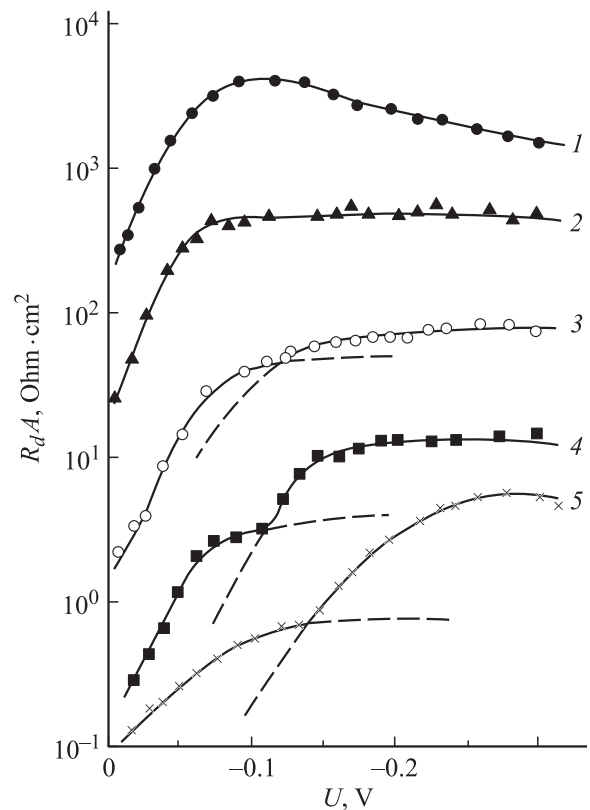


Рис. 5. Зависимость дифференциального сопротивления ВАХ $p-n$ -переходов на InSb от обратного смещения. Температура T , К: 1 — 78, 2 — 95, 3 — 115, 4 — 130, 5 — 145.

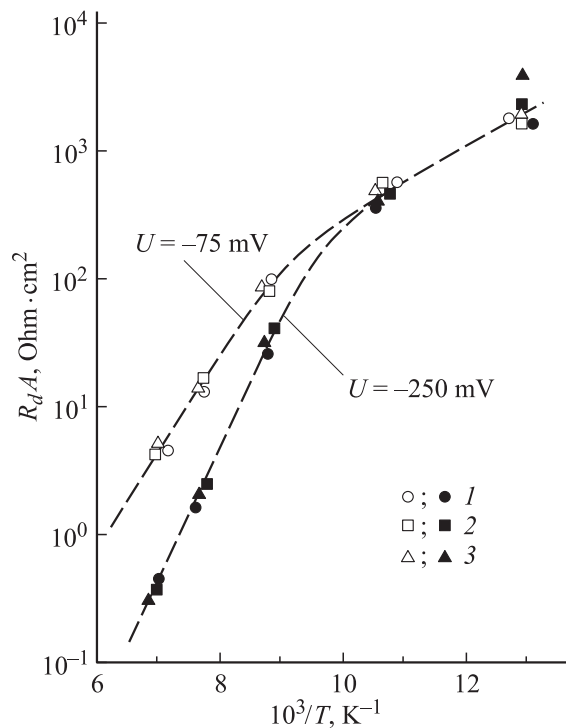


Рис. 6. Зависимость компонент дифференциального сопротивления фотодиодных структур на InSb № 1–3 от температуры при двух напряжениях смещения.

ховые кривые) из-за необходимости компенсировать напряжением уменьшение ширины W ОПЗ $p-n$ -перехода при увеличении температуры.

На этих же линейках были проведены исследования $p-n$ -переходов в растровом микроскопе в режиме наведенного тока [8,9]. Этот метод позволяет выявлять рекомбинационные дефекты, как ростовые, так и введенные в процессе обработки, а также неоднородности распределения наведенного тока по площади $p-n$ -перехода, связанные, например, с неоднородным распределением диффузионной длины неосновных носителей заряда. Примеры полученных результатов представлены на фото 1, $b-3, b$. На фото 1, $a-3, a$ представлены соответствующие изображения поверхности образцов, полученные в режиме вторичных электронов, анализ которых позволяет отделить объемные дефекты в самом материале (в данном случае InSb) от дефектов на поверхности, в частности дефектов на внешней поверхности пленки ZnS (ср. фото 1, $b-3, b$ и фото 1, $a-3, a$). В $p-n$ -переходе, представленном на фото 1, не удалось выявить отдельных протяженных дефектов, однако распределение наведенного тока было неоднородным, ток увеличивался в области вблизи металлического контакта. На этом $p-n$ -переходе наблюдалась аномалия $R_d A$ (рис. 1, его же зависимость $I(10^3/T)$ приведена на рис. 4, фотодиод 5). У таких элементов получались и заниженные значения токовой чувствительности S_i . У $p-n$ -перехода, представленного на фото 2, наведенный ток равномер-

но распределен по площади $p-n$ -перехода, и величина диффузионной длины больше, чем у $p-n$ -перехода, представленного на фото 1. На этом переходе удалось выявить отдельные протяженные дефекты (фото 4) при

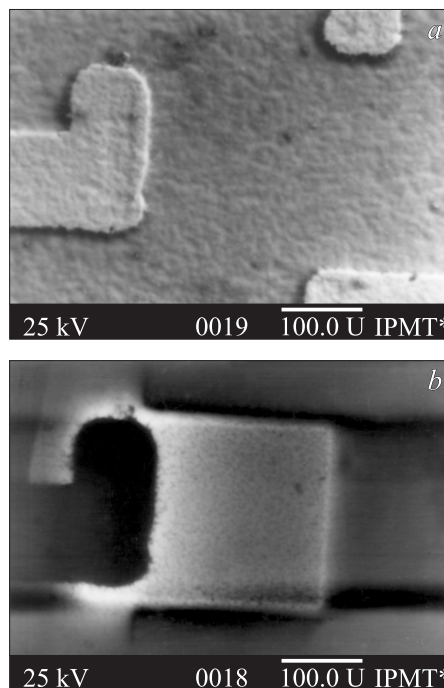


Фото 1. Внешний вид элемента линейки на InSb в режиме вторичных электронов (a) и в режиме наведенного тока (b). Увеличение $\times 100$.

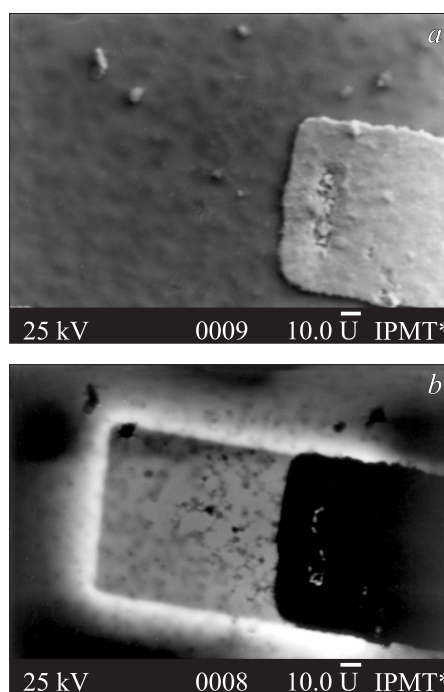


Фото 2. Внешний вид элемента линейки на InSb в режиме вторичных электронов (a) и в режиме наведенного тока (b). Увеличение $\times 100$.

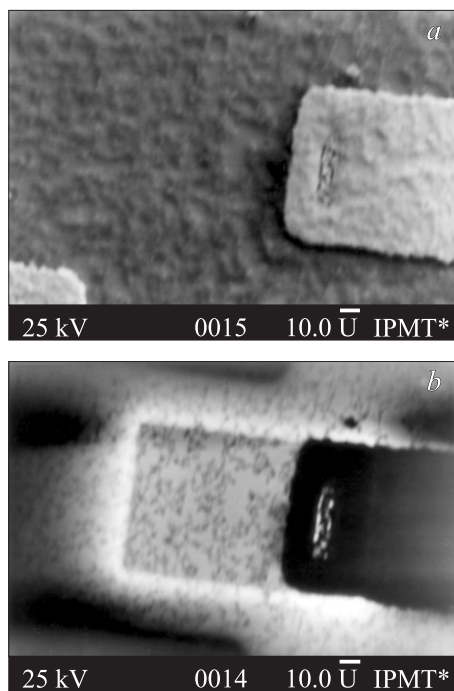


Фото 3. Внешний вид элемента линейки на InSb в режиме вторичных электронов (*a*) и в режиме наведенного тока (*b*). Увеличение $\times 100$.

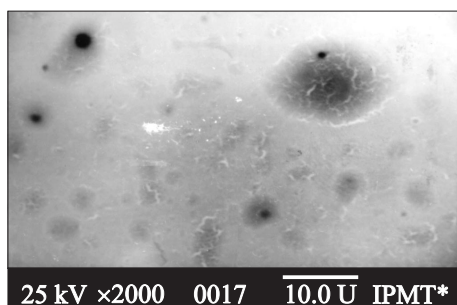


Фото 4. Изображение элемента, представленного на фото 2, *b*, с увеличением $\times 2000$.

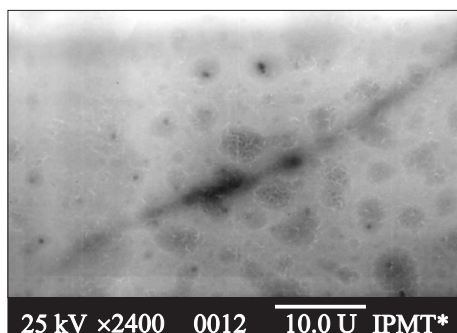


Фото 5. Изображение элемента, представленного на фото 3, *b*, с увеличением $\times 2400$.

увеличении $\times 2000$, которые, хотя и повышают локальную скорость рекомбинации, однако, практически не оказывают влияния на его S_i . У $p-n$ -перехода на фото 3 диффузионная длина была еще больше, чем у перехода, представленного на фото 2, что привело к увеличению коэффициента взаимной связи между элементами линейки. При большом увеличении $\times 2400$ (фото 5) на этом $p-n$ -переходе также были выявлены протяженные дефекты, в частности линейный дефект, возможно связанный со скоплением дислокаций или малоугловой границей. На представленных на фото 1, *b*–3, *b* изображениях отражены дефекты в слое InSb на глубине до 3 мкм и плюс дефекты на самой границе раздела ZnS/InSb (например, в виде пор и включений цинка и серы, появляющихся в данном случае в начальной стадии термического напыления ZnS, ср. фото 2, *b* и 3, *b* с фото 1, *b*, на котором они практически отсутствуют). Следовательно, разрешение данного метода составляет ~ 3 мкм.

Параметры фотодиодов линейки на InSb

№ фотодиода в линейке	Коэффициент взаимной связи, %						
	2	3	4	5	6	7	8
1							
2	3.5	0.8					
3	100	4.2	0.5				
4	4.9	100	3.8	0.9			
5	0.7	4.7	100	4.1	0.6		
6		0.6	4.2	100	4.1	0.5	
7			0.8	4.7	100	4.1	0.7
8				0.7	4.3	100	4.2
					0.9	4.8	100

В таблице приведены результаты исследования коэффициента взаимной связи фотодиодов линейки фото 2. Видно, что среднее значение коэффициента взаимной связи соседних фотодиодов не превышало 4.3%. Эта величина сравнима с величиной в 3%, известной из литературы [10]. Среднее значение коэффициента связи фотодиодов, расположенных через один, не превышало 0.7%. Вольтовая чувствительность фотодиодов находилась в интервале $(1.15-1.27) \cdot 10^6$ В/Вт при среднем значении $S_v = 1.24 \cdot 10^6$ В/Вт, т.е. неоднородность S_v не превышала 9.7% и тоже незначительно отличалась от известной величины из литературы $\pm 8\%$ [11], полученной на большой матрице 128×128 элементов. Неоднородность D^* была существенно выше (51%), т.е. основной вклад в разброс D^* давал шум фотодиодных структур.

Эти данные и дополнительные к приведенным выше исследования травления поверхности в процессе прецизионного снятия нарушенного имплантацией слоя показали, что аномалии ВАХ заключались в появлении „зачаточного“ S -образного участка вблизи нулевого смещения. Он появлялся при недотравливании поверхности, что приводило к повышенной величине сопротивления растекания имплантированного Zn^{++} p -слоя, а из-за

этого часть тока фотоносителей „садилась“ на этом p -слое и не выходила во внешнюю цепь фотодиода. Такие фотодиоды обычно отличались низкой S_v , повышенной величиной шума и дрейфом параметров при эксплуатации вблизи $U = 0$. Отмеченные аномалии ВАХ, т. е. появление S -образной характеристики, на некоторых фотодиодах можно было наблюдать на ПНХТ (прибор для наблюдения характеристик транзисторов), но в большинстве случаев они не выявлялись таким контролем, и для их обнаружения требовались трудоемкие измерения R_d в зависимости от U и температуры. С другой стороны, излишнее стравливание поверхностного слоя по глубине после операции отжига радиационных дефектов (элемент на фото 3) тоже сказывалось негативно на параметрах линейки из-за увеличения коэффициента взаимной связи между элементами. И если это для одиночных фотодиодных структур было не столь важно, то для p - n -переходов в линейке это был существенный недостаток.

Список литературы

- [1] С.Е. Hurwitz, J.P. Donnelly. Sol. St. Electron., **18**, 753 (1975).
- [2] О.В. Косоков, Л.С. Перевазкин. ФТП, **5**, 1611 (1970).
- [3] В.А. Богатырев, Г.А. Качурин, Л.С. Смирнов. ФТП, **12**, 102 (1978).
- [4] В.А. Богатырев, Г.А. Качурин, Л.С. Смирнов. ФТП, **12**, 878 (1978).
- [5] А.Б. Коршунов. ФТП, **13**, 1846 (1979).
- [6] В.И. Стафеев. ЖТФ, **28**, 1631 (1958).
- [7] В.И. Туринов. Тез. докл. 9-й науч.-техн. конф. „Фотометрия и ее метрологическое обеспечение“, 24–26 ноября (М., ВНИИОФИ, 1992) с. 43.
- [8] Г.Н. Панин, В.Ф. Кулешов, Е.Б. Якимов. Тез. докл. VII Всес. симп. „Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы“ (Изд-во Львов, гос. ун-та, 1986) ч. 1, с. 43.
- [9] Е.Б. Якимов. Изв. РАН. Сер. физ., **56**, 31 (1992).
- [10] I. Bloom, Y. Nemirovsky. IEEE Trans. Electron. Dev., **38**, 1792 (1991).
- [11] G.C. Bailey, C.A. Niblack, J.T. Wimmers. SPIE, **686**, 76 (1986).

Редактор Л.В. Беляков

Characteristics of InSb photodiode linear arrays

P.V. Birulin, V.I. Turinov, E.B. Yakimov*

State Research & Production Corporation „Istok“,
141190 Fryazino, Russia

* Institute of Microelectronics Technology,
Russian Academy of Sciences,
142432 Chernogolovka, Russia

Abstract Electrical characteristics of the 8-elements indium antimonide photodiode linear arrays were investigated within the 78–145 K temperature range. The mutual relation factor of neighbouring elements didn't exceed that of 4.3 per cent. Secondary emission and the electron beam induced current made it possible to display the ZnS subfilm defects and local inhomogeneities of the current through p - n junctions.