

УДК 621.383

О возможностях увеличения токовой чувствительности фотодиодов на основе InSb

В. П. Астахов, В. В. Карпов, Г. С. Соловьева, А. В. Талимов
ОАО «Московский завод «Сапфир»», Москва, Россия

На основе результатов многофакторного эксперимента, в котором варьировались тип исходных кристаллов, режимы имплантации ионов бериллия и постимплантационного отжига, а также тип электролита и режимы анодного окисления при защите поверхности, показано, что при прочих равных условиях применение более высокоомных исходных кристаллов приводит к увеличению уровня сигналов изготавливаемых фотодиодов (ФД) на InSb. Определены характерные режимы и условия, при которых достигается наиболее высокий уровень всех фотоэлектрических параметров фотодиодов.

В базовой технологии изготовления ФД на InSb используется исходный материал марки ИСЭ-2в, в котором концентрация легирующей примеси составляет $6 \cdot 10^{14}$ — $2 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Диффузионная длина дырок в этом материале, по оценкам, составляет ~15 мкм. Имеются также и высокоомные марки InSb: ИСЭ-1 и ИСЭ-0, в которых концентрация примеси составляет $8 \cdot 10^{13}$ — $2 \cdot 10^{14}$ см⁻³ и $6 \cdot 10^{13}$ — $2 \cdot 10^{14}$ см⁻³, соответственно. Очевидно, что в более совершенном кристалле диффузионная длина должна быть больше, и в этом случае должно возрасть количество собираемых p - n -переходом фотоносителей, поскольку поглощение излучения диапазона 3—5 мкм происходит на глубинах до 40—50 мкм. Таким образом, применение более высокоомного материала должно способствовать увеличению фототока, т. е. токовой чувствительности и обнаружительной способности (при условии, что темновые токи не возрастают).

Учитывая большое влияние на параметры ФД совершенства металлургической границы p - n -перехода, которая определяет и величину диффузионной длины и темновые вольт-амперные характеристики (ВАХ) ФД, следует ожидать, что режимы ионной имплантации (ИИ) и последующего отжига, а также качество защиты поверхности p - n -перехода, возможно, в большей мере, чем диффузионная длина в исходном материале, будут определять фотоэлектрические характеристики ФД.

В работе определены возможности увеличения чувствительности и повышения других фотоэлектрических параметров ФД за счет учета влияния каждого из вышеперечисленных факторов.

Методики эксперимента

Было изготовлено 12 различных партий (по 12 отличающимся технологиям) 64-элементных линеек ФД с размером фоточувствительных (ФЧ)

площадок $150 \times 150 \text{ мкм}^2$. Половина партий была изготовлена на материале ИСЭ-2в (средняя концентрация примеси в нем составила $N_{\text{ср}} = 1,09 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$), а другая — на ИСЭ-1 ($N_{\text{ср}} = 1,15 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$). При формировании $p-n$ -переходов в этих партиях было использовано два режима ИИ (двухстадийная имплантация ионов Be^+ с $E_1 = 100 \text{ кэВ}$ и $\Phi_1 = 50 \text{ мкКл/см}^2$; $E_2 = 40 \text{ кэВ}$ и $\Phi_2 = 20 \text{ мкКл/см}^2$ и одностадийная имплантация ионов Be^+ с $E = 40 \text{ кэВ}$ и $\Phi = 20 \text{ мкКл/см}^2$) и два вида постимплантационного отжига (термический отжиг при $T = 375 \text{ }^\circ\text{C}$ с капсулирующей пленкой SiO_2 в течение 30 мин в потоке H_2 и Ag и импульсный фотонный отжиг (ИФО) на установке "Оникс" при $T = 390 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 30 с). Защита поверхности осуществлялась с помощью двухслойного диэлектрика, нижним слоем которого была анодная окисная пленка (АОП), выращенная в гальваностатическом (ГС) режиме, в первой половине случаев — в электролите на основе персульфата аммония (ПА), в во второй — на основе Na_2S . В этом многофакторном эксперименте варьировались тип исходного материала, режимы ИИ и постимплантационного отжига, а также методы формирования АОП в двух составах электролитов. Стоит отметить, что при формировании АОП на основе ПА использовались двух- и трехстадийный ГС-режимы анодного окисления (АО), а для электролита на основе Na_2S — базовый одноступенчатый ГС-режим. Все эти режимы подробно были рассмотрены в

работе [1]. Остальные технологические операции соответствовали базовым [2]

Изготовленные по этим технологиям кристаллы диодных ФЧ-элементов были собраны в капсулы, а затем в фотоприемные устройства. ВАХ диодных элементов капсул измерялись характеристографом ПНХТ-1 и на измерительной установке Semiconductor parameter analyzer при погружении капсул в жидкий азот. Обработка измеренных ВАХ позволила определить значения параметров n и β (таблица). В ФПУ измерялись следующие фотоэлектрические параметры: напряжение сигнала и шума и фоновый ток [3]. Источником излучения, использованным для измерений, являлось 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 и пороговой чувствительностей в соответствии с [3].

Результаты измерений 12 партий приведены в таблице, и они представлены так, чтобы выявить влияние на параметры ФД исходного материала. Сравнение напряжений сигнала, пороговой чувствительности и темнового тока при обратном смещении на $p-n$ -переходе 200 мВ проводилось на основе гистограмм распределения этих параметров для каждого исходного материала.

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОГО МАТЕРИАЛА InSb НА ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ФД

Марка InSb	№ партии	Общие технологические особенности изготовления партии	$U_{\text{проб}}$, В	$I_{\text{н.а}}$, нА ($U = -0,2$)	β , отн. ед.	n , отн. ед.	$\Phi_{\text{п}}$, 10^{10} Вт·Гц $^{-1}$ · $\mu\text{м}^2$ · см^{-1}	$I_{\text{ф}}$, мкА	S_{f} , А/Вт	$U_{\text{с}}$, мВ	$\Delta U_{\text{с}}$, %	$U_{\text{ш}}$, мВ	$\Delta U_{\text{ш}}$, %
ИСЭ-1	1	2-я стад. ИИ, стац.	6(9)	0,6	1,51	0,67	0,93	—	0,185	478	11	21,2	+22
ИСЭ-2в	2	отжиг, эл-т Na_2S	3,5(4)	16,0	1,43	2,00	0,83	0,246	0,166	428		17,0	
ИСЭ-1	3	1-я стад. ИИ, стац.	6(—)	0,4	2,00	0,83	0,68	0,320	0,225	597	41	18,0	+25
ИСЭ-2в	4	отжиг, эл-т Na_2S	2(3)	9,8	1,88	1,00	0,77	0,199	0,149	393		14,0	
ИСЭ-1	5	1-я стад. ИИ, ИФО	8(9)	0,1	1,44	0,80	0,71	0,254	0,193	472	7	12,7	—5
ИСЭ-2в	6	эл-т Na_2S	3(5)	3,8	1,67	1,30	0,71	0,206	0,162	440		13,3	
ИСЭ-1	7	2-я стад. ИИ, стац.	7(9)	5,1	1,37	0,75	0,89	0,267	0,149	387	31	15,8	+49
ИСЭ-2в	8	отжиг, эл-т ПА	2,5(3,5)	4,3	1,58	1,30	0,90	0,192	0,115	283		9,6	
ИСЭ-1	9	1-я стад. ИИ, стац.	2(9)	2870,0	1,77	1,20	0,82	0,260	0,170	450	5	17,0	+11
ИСЭ-2в	10	отжиг, эл-т ПА	1,5(4)	20,0	1,51	1,50	0,78	0,241	0,164	427		15,2	
ИСЭ-1	11	1-я стад. ИИ, ИФО	2(3)	0,3	1,37	2,00	0,78	0,289	0,169	440	15	17,9	+36
ИСЭ-2в	12	эл-т ПА	3(5)	0,5	1,43	0,90	0,73	0,180	0,147	381		12,4	

В таблице введены следующие обозначения:

$U_{\text{проб}}$ — среднее по линейке значение пробивного напряжения ФЧ-элементов, измеренное на ПНХТ (в скобках приводится значение $U_{\text{проб}}$ после электротренировки);

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

n — среднее значение показателя степени для обратной ветки ВАХ вида $I \sim U^n$;

β , Φ_n , S_I , U_c , $U_{\text{ш}}$, I_Φ — средние значения коэффициента неидеальности, рассчитанного из прямой ветви ВАХ, пороговой и токовой чувствительностей, напряжений сигнала и шума, фонового тока;

ΔU_c , $\Delta U_{\text{ш}}$ — относительное изменение значений $U_{\text{ш}}$ и U_c , полученное при замене исходного материала ИСЭ-1 на ИСЭ-2в в партиях, где остальные режимы изготовления были одинаковыми. Для ΔU_c расчет проводился по формуле

$$\Delta U_c = 2 |U_{c(\text{ИСЭ-1})} - U_{c(\text{ИСЭ-2})}| / [U_{c(\text{ИСЭ-1})} + U_{c(\text{ИСЭ-2})}] \cdot 100 \%$$

Величины $\Delta U_{\text{ш}}$ рассчитывались по аналогичной формуле, где значения U_c заменены соответствующими им значениями $U_{\text{ш}}$.

Результаты измерений и их обсуждение

Сравнение гистограмм величин U_c , Φ_n и I_T для ФД, полученных на двух типах исходного материала, показало, что при одинаковых технологических режимах изготовления, ФД на кристаллах марки ИСЭ-1 имеют большие значения напряжения сигнала и меньшие темновые токи, чем ФД на кристаллах марки ИСЭ-2в. Значения Φ_n , ввиду невысокой точности их измерения (ошибка составляет 15 %), слабо отличаются. Так, в некоторых случаях более высокие значения Φ_n получаются на ИСЭ-2в, а в некоторых — на ИСЭ-1, но все эти отличия укладываются в 15 %. При этом значения $U_{\text{ш}}$ почти во всех случаях больше на материале ИСЭ-1, что не согласуется с данными по темновым токам, а объясняется скорее всего разницей в величинах дифференциального сопротивления ФД, из-за чего рабочие точки усилителей разнятся. Поэтому нельзя однозначно судить по этим результатам о преимуществе какого-либо исходного материала с точки зрения влияния на Φ_n , но зато различия в сигналах в некоторых случаях до 40 % при точности их измерений 10 % дают основание с полной уверенностью утверждать, что для увеличения сигнала целесообразен переход на более высокоомный материал, которым явля-

ется ИСЭ-1. Скорее всего применение в качестве исходного материала кристаллов марки ИСЭ-0 даст аналогичный результат ввиду того, что разница в концентрациях легирующей примеси и, по-видимому, в значениях диффузионной длины в кристаллах марки ИСЭ-0 от ИСЭ-1 незначительна.

Из таблицы следует, что максимальное среднее значение U_c по партии (597 мВ) достигается при использовании исходного материала ИСЭ-1, одностадийной имплантации ионов Be^+ с $E = 40$ кэВ и $\Phi = 20$ мкКул/см², постимплантационного термического отжига при $T = 375$ °С с капсулирующей пленкой SiO_2 в течение 30 мин в потоке H_2 и Ag , защиты поверхности с помощью ГС-режима АО в электролите на основе Na_2S (технология партии № 3 таблицы). Среднее значение токовой чувствительности в этом случае ($S_I = 0,225$ А/Вт) также является максимальным для всех использовавшихся технологических режимов. При данной технологии формирования ФД обеспечивается минимальное среднее значение пороговой чувствительности ($\Phi_n = 0,68 \cdot 10^{-10}$ Вт·Гц^{-1/2}·см⁻¹) и одно из самых низких значений темнового тока I_T ($U = -0,2$ В) = 0,4 нА. Отметим, что этот лучший технологический вариант обеспечивает гораздо более высокий уровень всех ФЭ параметров по сравнению с базовой технологией изготовления (технология партии № 2 таблицы). Так, для технологии партии № 2 $U_c = 428$ мВ, $\Phi_n = 0,83 \cdot 10^{-10}$ Вт·Гц^{-1/2}·см⁻¹, I_T ($U = -0,2$ В) = 16 нА.

Несколько худшие по сравнению с технологией партии № 3 ФЭ параметры свойственны технологии партии № 5: $U_c = 472$ мВ, $\Phi_n = 0,71 \cdot 10^{-10}$ Вт·Гц^{-1/2}·см⁻¹. Однако в этом случае наблюдается минимальное для всех партий значение $I_T = 0,13$ нА ($U = -0,2$ В) и достигается высокое совершенство металлургической границы $p-n$ -перехода ($\beta = 1,44$). По всей видимости, это связано с использованием в этой партии импульсного фотонного отжига, который обеспечивает наибольшее совершенство $p-n$ -переходов. Для партий № 3 и 5 значения $n < 1$ (0,83 и 0,80, соответственно), что свидетельствует о том, что в данных случаях темновой ток обусловлен в большей мере металлургической границей $p-n$ -перехода, нежели поверхностной утечкой или поверхностной рекомбинацией. Отметим также, что вместе с технологией партии № 3 технология партии № 5 с точки зрения параметров ФД предпочтительнее базовой технологии.

Заключение

Применение в качестве исходного материала при изготовлении фотодиодов на InSb кристал-

лов более высокоомной марки ИСЭ-1 вместо ИСЭ-2в обеспечивает большие значения напряжений сигнала (токовой чувствительности) для всех использовавшихся режимов ИИ и постимплантационного отжига за счет увеличения диффузионной длины носителей заряда.

Наилучшая технология для получения максимальных значений напряжения сигнала и токовой чувствительности, а также минимальных величин пороговой чувствительности и темнового тока имеет следующие характерные особенности:

- исходный материал ИСЭ-1;
- имплантация ионов Be^+ и с $E = 40$ кэВ и $\Phi = 20$ мкКул/см²;
- постимплантационный термический отжиг при $T = 375$ °С с капсулирующей пленкой SiO_2 в течение 30 мин в потоке H_2 и Ag ;
- защита поверхности осуществляется с помощью двухслойного диэлектрика, нижним слоем из которых является анодная окисная пленка,

полученная в гальваностатическом режиме при плотности тока 70 мкА/см² до достижения $U_{кон} = 23$ В в электролите Na_2S ; верхним слоем является пленка SiO_x .

Применение такой технологии изготовления ФД приводит к увеличению напряжений сигнала ФД на ~ 30 % по сравнению с базовой технологией.

Л и т е р а т у р а

1. Талимов А. В. Исследование процессов формирования и защиты поверхности планарных $p-n$ -переходов и модернизация базовой технологии изготовления фотодиодов на основе InSb. — Канд. дис. — М.: МГАТХТ, 2002.
2. Комплект технической документации ОС2.003.023. НПО "Орион", 1982.
3. ГОСТ 17772—79. Приемники излучения и устройства приемные полупроводниковые фотоэлектрические. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. Государственный стандарт СССР, 1979.

About opportunity of photodiodes on the ground InSb curvy sensitivity rise

V. P. Astakhov, V. V. Karпов, G. S. Solovjova, A. V. Talimov
Joint-Stock Company «Moscow Plant "Sapphire"», Moscow, Russia

On the ground of manufactors experiment, in wich varjed initial crystals tipe, ion berillium implantation and postimplantation annealing regimes and also electrolyte type and anodic oxydation regimes at surfase covering, it is showed, that at othe same conditions the application of more highohms crystals results to manufactured InSb photodiodes signals level rise. In is determined the regimes and conditions, at wich photodiodes highest photoelectric parameters level is riches.