

УДК 535.247

PACS: 85.60.-q

Результаты зарядки поверхности планарных фотодиодов из антимонида индия при коротковолновом облучении и обратном смещении

В. П. Астахов, П. Д. Гиндин, Г. В. Чеканова

Представлены результаты по воздействию коротковолнового излучения и обратного смещения с широким диапазоном величин воздействующих факторов (энергии квантов и плотности потока фотонов, тока и напряжения обратного смещения) на вольтамперные характеристики, токи шума и сигнала, а также равномерности тока сигнала в многоплощадочных планарных фотодиодах p^+ - n -типа из антимонида индия. Исследования проводили непосредственно на кристаллах, а также макетах фотодиодов с этими кристаллами. Для обоих случаев воздействия все полученные результаты по деградации и восстановлению изучаемых параметров объясняются единой моделью на основе зарядки определённых участков поверхности кристалла «горячими» электронами, «разогретыми» до необходимых энергий либо поглощёнными квантами, либо электрическим полем области пространственного заряда p^+ - n -перехода, а также зависимости степени закрепления электронов на поверхности от величин воздействующих факторов. Делается вывод о том, что при проектировании и производстве следует учитывать возможности отказов ФД за счёт зарядки поверхности планарной структуры при сохранении бездефектной металлургической и планарной границ p^+ - n -перехода. Определены меры по устранению таких отказов.

Ключевые слова: планарный фотодиод, антимонид индия, зарядка поверхности, «горячие» электроны.

Ссылка: Астахов В. П., Гиндин П. Д., Чеканова Г. В. // Успехи прикладной физики. 2019. Т. 7. № 2. С. 131.

Reference: V. P. Astakhov, P. D. Gindin, and G. V. Chekanova, Usp. Prikl. Fiz. 7 (2), 131 (2019).

Введение

Анализ результатов разработки и производства планарных фотодиодов (ФД) из антимонида индия вместе с рядом опубликованных данных свидетельствуют о том, что во

многих случаях изменения (и улучшения, и ухудшения) характеристик ФД при различных воздействиях могут быть объяснены зарядкой локальных участков или всей поверхности планарной приборной структуры электронами.

Планарные ФД из InSb изготавливают на пластинах n -типа проводимости с концентрацией легирующей примеси (теллура) $(0,2-3) \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, являющихся базой ФД. Эмиттером является планарная фоточувствительная площадка (ФЧП) p^+ -типа. Необходимым элементом топологии ФД является окружающий ФЧП дополнительный замкнутый на базу планарный p^+ -слой (охранное кольцо – ОК), расположенный от планарных границ ФЧП на расстоянии меньше или сравнимом с

Астахов Владимир Петрович, гл. специалист, д.т.н.
Гиндин Павел Дмитриевич, ген. директор, д.т.н.
Чеканова Галина Васильевна, зам. начальника цеха.
АО «МЗ «Сапфир».
Россия, 117545, Москва, Днепропетровский проезд, 4А,
стр. 3А.
Тел. 8 (495) 315-73-68. E-mail: ko-ckb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2019 г.

© Астахов В. П., Гиндин П. Д., Чеканова Г. В., 2019

двумя диффузионными длинами дырок в базе, как правило, в пределах 5–30 мкм. Такое ОК избавляет ФД от нестационарных проявлений типа «взрывные» шумы фонового типа [1, 2]. Кроме того, при оптимальном расстоянии до ФЧП оно способствует снижению темнового тока и приближению величины коэффициента неидеальности прямой ветви вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФЧП к единице [3, 4], а также ограничению фотоэлектрического размера ФЧП без применения отражающего покрытия.

Планарные p^+n -переходы ФЧП и ОК создают локальной имплантацией ионов бериллия с последующим термическим отжигом, а защиту поверхности осуществляют анодной окисной плёнкой (АОП), обеспечивающей на поверхности InSb минимальные значения эффективного поверхностного заряда, складывающегося из заряда на поверхностных состояниях InSb и заряда, встроенного в АОП у границы с InSb [1]. При этом происходит подавление «взрывных» шумов туннельного типа [1, 2]. На поверхность АОП наносят пассивирующий слой SiO_x , слабо влияющий на поверхностный заряд [5].

Согласно модели работы [2], возможен кратковременный равновесный захват единственного электрона из приповерхностной области кристалла на участок поверхности базы площадью $\sim 10^{-12}$ см², отделяющий от ФЧП область малоразмерного стационарного «наведённого» p^+n -перехода, образованного при наличии на поверхности локального стационарного избыточного отрицательного заряда, появившегося за счёт возможной флуктуации заряда в АОП. Это приводит к образованию у поверхности кристалла на данном участке базы «наведённой» p^+ -области, кратковременно (на время захвата) соединяющей ФЧП со стационарным «наведённым» p^+n -переходом, что приводит к кратковременному увеличению площади собирания фонового тока, создающего шумовой импульс фонового типа, определяющий механизм «взрывных» шумов данного типа. Такой импульс завершается обратным забросом захваченного электрона в кристалл, приводящим к отсоединению области «наведённого» p^+n -перехода от ФЧП, т. е. к возврату размера об-

ласти собирания фонового тока к исходному состоянию и завершению шумового импульса.

Аналогичные поверхностные процессы уже на участке эмиттера, граничащем с базой, приводят к кратковременной компенсации туннельной проводимости, вызванной локальным стационарным избыточным положительным поверхностным зарядом на этом участке. Такая флуктуация заряда также возможна в АОП, а её нейтрализация захваченным электроном и его возврат в кристалл определяют механизм взрывного шума туннельного типа.

Зарядка поверхности кристалла InSb МДП-структуры с поверхностной АОП при воздействии коротковолнового излучения (видимого и ближнего ИК-диапазона) изучалась в работах [6–8]. Результаты этих работ показали, что при таком воздействии на охлаждённую до 77 К МДП-структуру поверхность InSb заряжается электронами, забрасываемыми из кристалла через потенциальный барьер величиной 1,2 эВ на ловушки границы InSb – АОП и самой АОП [6]. В работе [7] показано, что охлаждаемые структуры обладают запоминающим эффектом, а из данных работы [8] следует, что при аналогичных условиях эффективность зарядки повышается с увеличением плотности потока фотонов, увеличивая накопленный заряд вплоть до значений $(3-4) \times 10^{12}$ ед. заряда электрона на см⁻², при которых происходит инверсия на поверхности кристалла n -типа проводимости с концентрацией примеси до 10^{16} см⁻³. Показано также, что длительность хранения заряда при 77 К возрастает от 1÷2 минут для энергии квантов, не превышающей $\sim 0,76$ эВ, и нескольких десятков минут для энергии квантов, не превышающей ~ 1 эВ, до, практически, всей продолжительности состояния охлаждения для энергии квантов, превышающей 1 эВ. Эта зависимость объяснена более глубоким проникновением и более прочным закреплением в глубине АОП «горячих» электронов, «разогретых» поглощёнными квантами до значительных энергий у поверхности InSb.

Зарядка поверхности планарных p^+n -переходов из InSb «горячими» электронами, «разогретыми» у поверхности кристалла электрическим полем области пространственного заряда (ОПЗ) обратномещённого p^+n -пере-

хода, также возможна, и в ряде случаев она проявляется через улучшение ВАХ ФЧП при приложении обратного смещения на уровне «пробивного» напряжения* (см., например, работу [9]). Такое воздействие называют электротренировкой, а улучшение ВАХ ФЧП, происходящее в результате электротренировки, является следствием нейтрализации избыточного поверхностного заряда положительного знака. В работе [9] успешная электротренировка наблюдалась также в случае планарных p^+-n -переходов из кремния.

К изложенному следует добавить, что наши наблюдения за воздействиями, при которых происходит деградация ВАХ и сопутствующие ухудшения фотоэлектрических параметров планарных фотодиодов из InSb, свидетельствуют о том, что деградации не сопутствует появление каких-либо структурных нарушений на металлургической или планарной границах p^+-n -перехода, в то время как в кремнии при деградации обычно наблюдаются проплавления при тепловом и «следы» микроплазм при электрическом пробоях металлургической границы. Это позволяет предположить, что определяющим процессом, приводящим к деградации фотодиодов из InSb, является зарядка поверхности планарной структуры по одному из представленных механизмов.

Целью данной работы является проверка высказанного предположения путём расширения экспериментального изучения фактов изменения и восстановления параметров планарных ФД при широком наборе величин различных воздействующих факторов.

Методики проведения экспериментов и измерений

По серийной технологии, из антимонида индия марки ИСЭ-2 были изготовлены кристаллы 10-площадочных планарных ФД с размерами ФЧП 50×300 и 50×50 мкм с типовой топологией: ФЧП полностью окружены единым ОК, расположенным от границ ФЧП на расстоянии 4, 10, 20 или 30 мкм. На основе

этих кристаллов собирали капсулы с прозрачной заглушкой вместо входного окна, которые помещали в макеты типовых ФД для исключения возможности прямого попадания излучения на кристалл, но не исключают «бокового» вхождения в полость макета, отражений от стенок баллона и попадания на кристалл ослабленного потока излучения за счёт наличия прозрачных основания и раstra, окружающего кристалл в капсуле. При этом макет состоял из типовых деталей, а именно: держателя, баллона (сосуда Дьюара), системы контактных выводов. Для измерений токов сигнала на части макетов заглушка не устанавливалась.

На охлаждаемых жидким азотом кристаллах в условиях экранирования от подсветки измеряли прямые и обратные ветви ВАХ ФЧП вплоть до «пробивных» напряжений с применением характериографа. Изучали также влияние на ВАХ излучения осветительной лампы накаливания типа ОИ-24, нагреваемой с последовательным повышением температуры, при его воздействии на охлаждаемый и не охлаждаемый кристалл.

Макеты ФД измеряли без и при охлаждении дроссельным микроохладителем на основе эффекта Джоуля-Томсона. Измеряли ВАХ, токи шума $I_{ш}$ и сигнала I_c ФЧП методами ГОСТ 17778 при типичном комнатном освещении, включающем рассеянное солнечное и излучение осветительных галогенных ламп. Все измерения проводили в типовых измерительных колодках без и с надетыми на головную часть макета светонепроницаемыми чехлами, а также с экранированием от комнатного освещения всей измерительной установки вместе с макетом путём обёртывания в светонепроницаемую ткань. При всех этих условиях изучали влияние на ВАХ, $I_{ш}$ и I_c обратного смещения и электротренировки с использованием возможностей характериографа, а также последующих прогревов при температурах 60 и 80 °С в течение от 1 часа до 3-х суток. Наблюдали также влияние фокусировки входящего в макет излучения, создаваемой обертыванием никелевой фольгой половины поверхности головной части макета, ограниченной двумя диаметрально противоположными линиями, параллельными оси баллона.

* «Пробивным» напряжением названо напряжение начала резкого возрастания темнового тока.

Результаты экспериментов и их обсуждение

Зарядка поверхности кристаллов при коротковолновом облучении

При облучении охлаждённых кристаллов от лампы накаливания было замечено, что при малом токе накала, когда появляется лишь слабое красное свечение, обратная ветвь ВАХ ФЧП опускается вниз параллельно оси напряжений (рис. 1, а, кривая I_n^1), возвращаясь при завершении облучения, что обычно происходит при воздействии излучения, соответствующего спектральной области чувствительности ФД. При увеличении тока накала, когда свечение всё более становится белым, наблюдается постепенно увеличивающийся наклон обратной ветви, свидетельствующий о появлении шунтирующего p^+-n -переход сопротивления, уменьшающегося от десятков МОм до сотен Ом (рис. 1, а, кривые I_n^2 , I_n^3). При некотором значительном токе накала появляется также искажение прямой ветви ВАХ в виде уменьшения крутизны участка резкого возрастания тока (рис. 1, б, кривые I_n^2 , I_n^3). При прекращении облучения в случае условий получения кривых I_n^2 , I_n^3 искаженные ВАХ запоминаются в течение всего времени охлаждения.

Эти результаты объясняются формированием на облучаемой поверхности базы охлаждаемого кристалла отрицательного заряда, образованного в той или иной степени закреплёнными на ней «горячими» электронами, преодолевшими барьер между InSb и АОП. При этом формируется «наведённый» поверхностный p - или p^+ -слой, соединяющий ФЧП с ОК и поэтому шунтирующий ФЧП, увеличивая наклон обратной ветви ВАХ (рис. 1, кривые I_n^2 , I_n^3). Этот же слой при прямом смещении на ФЧП создаёт условия для формирования направленного к поверхности потока из части инжектированных в базу дырок. Рекомбинирующие на поверхности дырки этого потока уменьшают прямой ток, соответственно искажая прямую ветвь ВАХ (рис. 1, б, кривые I_n^2 , I_n^3).

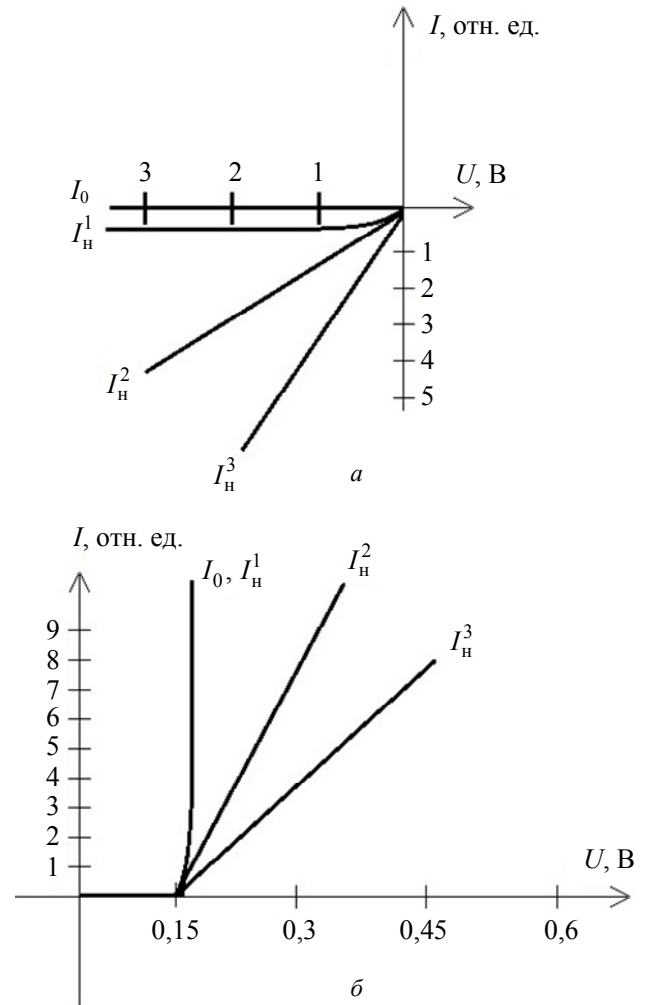


Рис. 1. Динамика изменения обратных (а) и прямых (б) ветвей ВАХ ФЧП при увеличении тока накала I_n осветительной лампы, облучающей кристалл. Токи $I_n^1 < I_n^2 < I_n^3$; I_0 – при выключенной лампе.

Весь диапазон токов накала лампы по воздействию на ВАХ можно разделить на три поддиапазона: «слабый», «средний» и «предельный», которые отличаются увеличивающимся сдвигом максимума спектра создаваемого излучения в коротковолновую область и возрастанием плотности потока при переходе от «слабого» к «предельному». Для «слабого» поддиапазона характерно отсутствие запоминания деформации ВАХ (опускания обратной ветви), вызванной облучением. Для «среднего» поддиапазона характерно запоминание деформированной облучением ВАХ на всё время охлаждения вместе с её восстановлением при доведении температуры кристалла до комнатной, а при отсутствии восстановления – до 60–80 °С. Для «предельного» поддиапазона (при ярком белом свечении) характерна

наиболее сильная деформация ВАХ, соответствующая шунтированию на уровне единиц или десятков Ом, которая не восстанавливается прогревом как в предыдущем случае, но иногда восстанавливается электротренировкой. Однако превышение напряжения электротренировки в пределах возможности характеристики приводит к невозможности восстановления ВАХ, и при этом появления каких-либо дополнительных структурных нарушений кристалла в оптическом и электронном микроскопах не наблюдается.

При аналогичных воздействиях на охлаждённые кристаллы деформации ВАХ после охлаждения не наблюдаются.

Зарядка поверхности кристаллов в составе макетов ФД при коротковолновом облучении

Изучение свойств охлаждаемых макетов ФД при комнатном освещении показало, что при измерениях без чехлов и обёртывания макета вместе с измерительной колодкой или установкой, на ~ 30 % макетов обнаружено от 1 до 6 шт. ФЧП, имевших повышенный уровень $I_{ш}$, сопровождаемый либо увеличенными значениями темного тока при напряжениях выше 1 В, либо состоянием, близким к короткому замыканию, либо пониженным уровнем I_c на отдельных ФЧП или у всей группы ФЧП, сопровождаемым слабой деформацией обратной ветви ВАХ. Часть макетов со слабой деформацией ВАХ восстанавливала свои свойства при прогревах (повышались и выравнивались по ФЧП токи сигналов, снижался до нормы уровень тока шума). При сильной деформации ВАХ и высоком уровне тока шума прогрев не нормализовал параметры.

Ряд макетов, надёжно защищённых от проникновения комнатного излучения в полость, успешно прошли длительную наработку, но при снятии световой защиты на каком-либо этапе наработки на части макетов сразу происходила деградация ВАХ и остальных параметров единичных ФЧП, а иногда нескольких соседних ФЧП до невозможности восстановления состояния. В некоторых случаях удавалось наблюдать медленный процесс деградации отдельных ФЧП, который проявлялся сразу после снятия либо световой защиты измерительной установки, либо следующего за

этим снятием светозащитного чехла с макета. Такой вид деградации удавалось устранить прогревом.

На макетах, в составе которых в условиях отсутствия световой защиты была выявлена медленно (десятки минут) деградирующая ФЧП, после её восстановления прогревом был сформирован отражающий экран из никелевой фольги, обеспечивающий фокусировку излучения, входящего внутрь макета. После этого макет был охлаждён, и та же ФЧП сразу показала деградацию до уровня короткого замыкания, не восстанавливаясь ни прогревом, ни электротренировкой. Таким образом, дополнительная фокусировка коротковолнового излучения повышает эффективность закрепления электронов на поверхности кристалла, скорее всего, за счёт коллективного вклада энергии сконцентрированных электронов в процессе их закрепления на участке поверхности.

В целом, результаты экспериментов на макетах ФД показали, что при боковых подсветках коротковолновым излучением при его возможном «непрямом» попадании на кристалл, из-за многократных отражений от внутренней стенки баллона формируются один или несколько лучей. В использованных макетах расположение лучей в пространстве непредсказуемо, так же как и непредсказуемы области поверхности кристалла, на которые они могут попасть, площадь луча на этой области и степень его фокусировки. При попадании между ФЧП и ОК, в соответствии с рис. 2, *а, б*, луч создаёт на поверхности этой области кристалла отрицательный заряд «горячих» электронов, переброшенных из кристалла. В свою очередь, отрицательный поверхностный заряд электронов формирует в приповерхностной области кристалла «наведённый» p - или p^+ -слой с проводимостью, пропорциональной величине поверхностного заряда. Если область «наведённого» $p(p^+)$ -слоя не соединена с ФЧП или ОК (см. рис. 2, *а*), тогда она не шунтирует ФЧП и не повышает $I_{ш}$, но создаёт условия для оттока к поверхности части сигнальных дырок, уменьшая I_c . Если эта область соединяет ФЧП с ОК (см. рис. 2, *б*), то её сопротивление шунтирует ФЧП, приводя к увеличению $I_{ш}$ пропорционально степени шунтирования при соответствующих деформациях ВАХ вплоть до короткого замыкания.

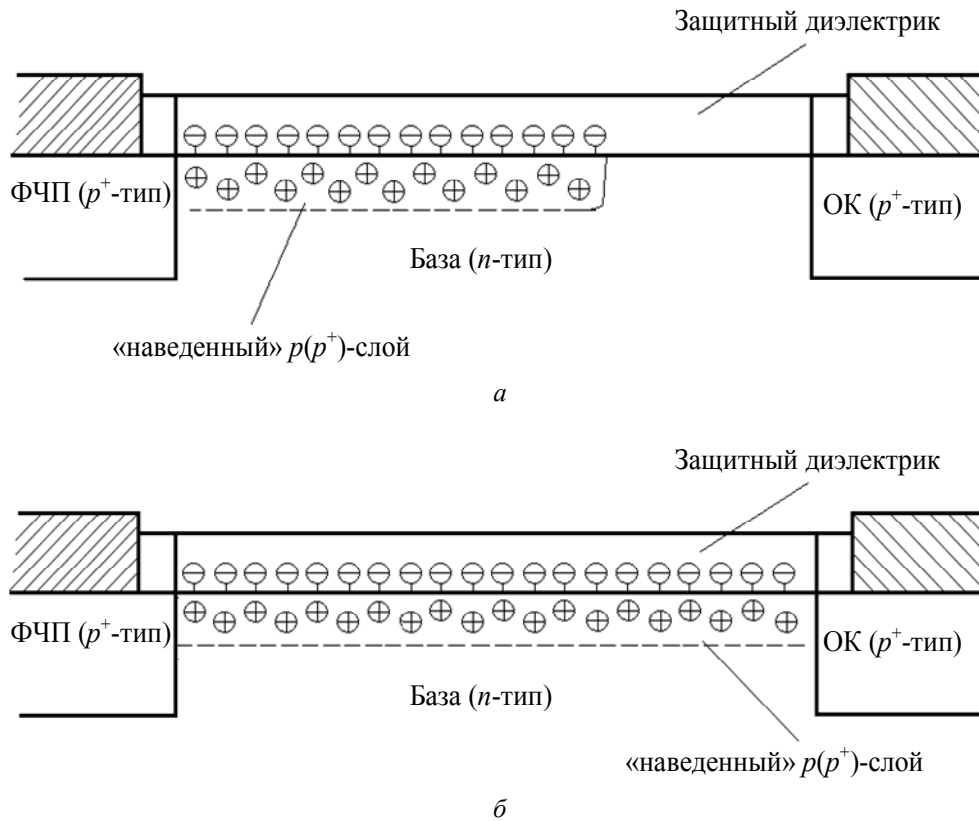


Рис. 2. Зарядка поверхности кристалла *InSb* «горячими» электронами, формирующими сплошной наведенный $p(p^+)$ -слой, не замыкающий ФЧП с ОК (а) и замыкающий (б).

▨ – Контактный металл.

⊖ – «Горячие» электроны, закрепленные в диэлектрике.

⊕ – Дырки в «наведенном» $p(p^+)$ -слое у поверхности базы.

Все эти изменения характеристик ФЧП сохраняются до тех пор, пока существует поверхностный заряд электронов. Степень закрепления электронов на поверхности пропорциональна степени фокусировки и сдвигу спектрального состава луча в коротковолновую область. Слабое закрепление устраняется прогревом, когда восстанавливаются равномерность значений I_c по ФЧП и исходные значения $I_{ш}$. Сильное закрепление делает дефектность неустранимой (остаются неравномерными значения I_c и повышенный уровень $I_{ш}$ вместе с деформацией ВАХ).

Представляет практический интерес вопрос, какие величины плотности потока коротковолновых фотонов могут приводить к такой зарядке поверхности охлажденного кристалла, при которой происходит деградация ВАХ, $I_{ш}$ и I_c , делающая ФД негодными для применения. Оценки сделаны при предположении, что каждый коротковолновый квант перебрасывает и закрепляет на поверхности

один электрон, деградация происходит при достижении плотности поверхностного заряда $10^{11} \frac{\text{ед.заряда электрона}}{\text{см}^2}$, а сам процесс де-

градации может длиться в течение 1 часа облучения, что наблюдалось на некоторых макетах ФД. Эти оценки показали, что при указанных условиях, к деградации приводит плотность потока коротковолновых фотонов $\sim 6 \times 10^7 \text{ (см}^{-2} \text{ с}^{-1}\text{)}$ или $\sim 10^{-11} \text{ (Вт см}^{-2}\text{)}$ (если считать, что весь поток состоит из фотонов с длиной волны максимума спектра солнечного излучения), что всего в ~ 50 раз превышает плотность потока от АЧТ_{300К} на данной длине волны. При длительности облучения ~ 10 часов деградация может происходить при плотности потока квантов ещё в 10 раз меньшей.

Следует отметить, что зарядка поверхности в ослабленном и восстанавливаемом виде наблюдалась при засветках макета ярким солнечным излучением через 1–2 минуты после прекращения охлаждения, когда темпера-

тура кристалла от 77 К возрастала до ~ 100 К. Зарядки не было замечено вообще при аналогичной засветке неохлаждённого макета. Таким образом, эффект зарядки коротковолновым облучением в составе макета, так же как и при облучении непосредственно кристалла, проявляется в наибольшей мере при глубоком охлаждении.

В целом, данные предыдущих разделов и работы [5] свидетельствуют о том, что и конструкция ФД и условия сборки и контрольных измерений параметров должны быть такими, чтобы охлаждённый кристалл до температур ниже комнатной был полностью защищён от попадания коротковолнового излучения с длинами волн, меньше нижней границы рабочего диапазона ФД (2,5–3) мкм.

Зарядка поверхности планарного p^+ - n -перехода при обратном смещении

Как отмечалось выше, при значительном положительном заряде на границе InSb-АОП у поверхности n -базы планарного p^+ - n -перехода образуется «наведённая» n^+ -область, стимулирующая туннелирование и связанную с ним деформацию обратной ветви ВАХ (увеличение темнового тока и уменьшение «пробивного» напряжения). Такая деформация может убираться электротренировкой электрическим полем обратносмещённого p^+ - n -перехода достаточной величины, для того чтобы «разогреть» электроны приповерхностной области, дрейфующие из p^+ -эмиттера в базе, до энергий, необходимых для преодоления потенциального барьера между InSb и АОП, перехода в АОП и закрепления в ней. При этом постепенное увеличение обратного смещения приводит сначала к компенсации положительного поверхностного заряда базы непосредственно у границы с p^+ -областью ФЧП, позволяя ОПЗ ФЧП расширяться дальше и так постепенно компенсировать исходный положительный заряд на всё более дальних участках поверхности базы. Это и приводит к ликвидации туннельной составляющей темнового тока, повышению «пробивного» напряжения и формированию обратной ветви ВАХ ФЧП, соответствующей теории [10] на весь период охлаждения.

После повышения температуры до комнатной или выше эффект улучшения исчезает,

и электротренировку требуется проводить заново. Дальнейшее повышение обратного смещения выше «пробивного», когда протекают огромные обратные токи, как правило, приводит к невосстанавливаемому закорачиванию ФЧП. Поскольку и в этом случае следов «пробоя» также не обнаруживается, то закорачивание, скорее всего, обусловлено сильным «разогревом» электронов кристалла в поверхностной области ОПЗ, их далёким забросом из InSb в глубину АОП, надёжным закреплением в АОП, стимулируемым коллективным взаимодействием за счёт используемых повышенных значений обратных токов и напряжения и формированием между ФЧП и ОК шунтирующего ФЧП «наведённого» $p(p^+)$ -слоя (так, как это показано на рис. 2, б).

Как отмечалось выше, процесс электротренировки может восстанавливать результаты воздействия коротковолнового излучения (зарядки поверхности электронами), приводящего к слабым деформациям ВАХ. По-видимому, в этих случаях происходит «срывание» с поверхности электронов, слабозакреплённых на малой глубине в АОП, полем ОПЗ ФЧП, проникающим в диэлектрик. Ужесточение условий электротренировки (увеличение обратного тока и напряжения) в данном случае также приводит к резкому увеличению числа надёжно закреплённых в АОП электронов, в результате чего происходит шунтирование ФЧП образующимся «наведённым» $p(p^+)$ -слоем.

Влияние расстояния между границами ФЧП и ОК на эффективность зарядки поверхности при обратном смещении и её результаты

При обратном смещении ФЧП в планарных структурах ФД с расположением ОК на расстоянии $\ell = 4, 10, 20$ и 30 мкм от ФЧП выявлены следующие особенности. В процессе проверки «пробивных» напряжений в случае $\ell = 4$ и 10 мкм на $\sim 50\%$ из числа испытываемых структур происходило значительное увеличение $I_{\text{ш}}$ и соответствующее ухудшение обратной ветви ВАХ: появлялись наклоны, которые в некоторых случаях исчезали после прогрева при $T = 60 \div 80$ °С (ВАХ восстанавливалась вместе с $I_{\text{ш}}$), а в других – прогрев не

влиял, но параметры восстанавливались на период охлаждения электротренировкой. Восстановление происходит в тех случаях, когда смещение при электротренировке ограничивается областью «пробивного» напряжения. Если смещение заходит в область больших напряжений и обратных токов, то восстановление при прогреве не происходит.

В случае $\ell = 20$ и 30 мкм такие эффекты наблюдались только при подаче смещений на уровне предельных возможностей характеристикографа по току.

Результаты измерений ВАХ всего набора этих структур показали, что их напряжение «пробоя» является возрастающей функцией расстояния ℓ во всём интервале его значений. Для каждого значения ℓ были определены величины предельно-допустимого напряжения смещения $U_{\text{ПД}}$ и их разброс. Эти данные представлены на рис. 3. При определении величин $U_{\text{ПД}}$ измерялось напряжение смещения, при котором начиналась обратимая деградация ФЧП ($U_{\text{Д}}$), из которого вычитался запас по напряжению $U_3 = 0,5$ В, т. е. $U_{\text{ПД}} = U_{\text{Д}} - U_3$.

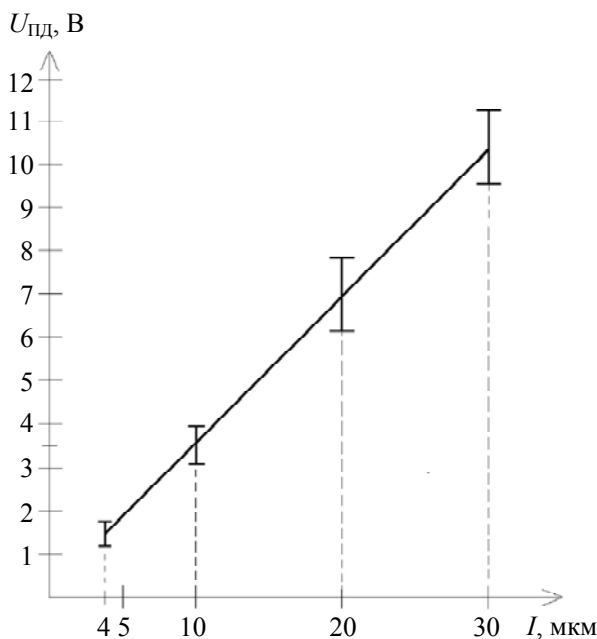


Рис. 3. Зависимость предельно-допустимого напряжения смещения ФЧП $U_{\text{ПД}}$ от расстояния между границами ФЧП и ОК.

Из данных рис. 3 следует, что величина $U_{\text{ПД}}$, как и $U_{\text{Д}}$, возрастает при увеличении ℓ от 4 до 30 мкм.

Представленные результаты объясняются особенностями зарядки поверхности базы

электронами, «разгоняемыми» электрическим полем ОПЗ ФЧП до энергий, достаточных для их заброса и закрепления на поверхности базы. При увеличении обратного смещения ОПЗ ФЧП расширяется и в глубину кристалла, и вдоль поверхности базы в сторону ОК. При этом в ОПЗ ФЧП увеличивается напряжённость электрического поля, постепенно достигая величин, при которой электроны, движущиеся вдоль поверхности из эмиттера в базу, на длине свободного пробега приобретают энергию, достаточную для переброса и закрепления на поверхности базы у границы с эмиттером. Таким образом, на данном участке поверхности базы формируется отрицательный поверхностный заряд, индуцирующий у поверхности кристалла «наведённый» $p(p^+)$ -слой, увеличивающий размер ФЧП. При увеличении смещения этот слой постепенно расширяется в сторону ОК и при достижении ОК замыкает ФЧП на базу через сопротивление этого слоя. Такая ситуация соответствует достижению напряжения $U_{\text{Д}}$, величина которого будет возрастать при отдалении ОК от ФЧП из-за необходимости увеличения смещения для расширения приповерхностной части ОПЗ ФЧП вплоть до ОК. Параллельно возрастает и величина $U_{\text{ПД}}$.

Такая модель позволяет подойти следующим образом к расчёту зависимости величины $U_{\text{ПД}}$ от ℓ . В качестве исходного уравнения применена известная зависимость ширины ОПЗ W несимметричного p - n -перехода от напряжения обратного смещения U [11]:

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon\epsilon_0 U}{eN}}, \quad (1)$$

где e – элементарный заряд; ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость InSb; ϵ_0 – электрическая постоянная (в системе СИ); N – концентрация основных носителей заряда в базе при 77К.

Исходя из формулы (1) и считая, что величина $U_{\text{Д}}$ соответствует расширению приповерхностной части ОПЗ ФЧП вплоть до границы ОК, когда $W = \ell$, зависимость $U_{\text{ПД}}$ от ℓ можно представить в виде формулы:

$$U_{\text{ПД}} = \frac{\ell^2 e N}{2\epsilon\epsilon_0} - U_3. \quad (2)$$

Однако, как показало сравнение рассчитанных по этой формуле значений $U_{\text{ПД}}$ с экспериментальными на рис. 3, рассчитанные значения существенно (в 2–7 раз по мере увеличения ℓ) превышают экспериментальные. Это объясняется тем, что в формуле (2) не учтено постепенное смещение границы ФЧП к ОК за счёт увеличения её размера при расширении «наведённого» $p(p^+)$ -слоя. Этот процесс и приводит к отставанию роста экспериментальных значений $U_{\text{ПД}}$ от расчётных при увеличении смещения и его можно учесть, дополнив формулу (2) эмпирическим безразмерным коэффициентом k в виде убывающей функции ℓ , которая получена аппроксимацией экспериментальных данных рис. 3 с использованием формулы (2) и программного обеспечения «Origin». Полученное выражение для k имеет вид:

$$k = 1,6 \exp(-2,1 \times 10^3 \ell) + 0,15, \quad (3)$$

где ℓ – в см.

Перемножив правые части уравнений (2) и (3), получаем окончательную расчётную формулу (4), связывающую величины ℓ и $U_{\text{ПД}}$ и позволяющую определять значения $U_{\text{ПД}}$ по заданным значениям ℓ (4, 10, 20 и 30 мкм) с отклонением от экспериментальных данных не более чем на 5 % при $N = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$:

$$U_{\text{ПД}} = \left(\frac{\ell^2 \times eN}{2\epsilon\epsilon_0} - U_3 \right) \times \left[1,6 \exp(-2,1 \times 10^3 \ell) + 0,15 \right]. \quad (4)$$

Указанное значение N соответствует нижнему пределу легирования InSb использовавшейся марки ИСЭ-2, благодаря чему, согласно формуле (4), обеспечивается дополнительный запас по параметру $U_{\text{ПД}}$ при применении этого же материала с большими значениями N (до $3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$).

Отметим, что при использовании более высокоомного InSb (марок ИСЭ-1, ИСЭ-0) с нижним пределом величины $N = 6 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$ следует экспериментально проверить и при необходимости откорректировать вид функции $k(\ell)$.

Результаты данного раздела свидетельствуют о том, что приближение ОК к ФЧП от

30 до 4 мкм повышает эффективность зарядки поверхности и, как следствие, – уменьшает величину $U_{\text{ПД}}$, ограничивая возможности применения ФД. С другой стороны, отдаление ОК от ФЧП более чем на две диффузионные длины дырок в базе L_d может привести к снижению эффективности подавления взрывных шумов фонового типа [2]. Согласно данным работы [12], величина L_d для используемых в производстве марок InSb (ИСЭ-2, ИСЭ-1, ИСЭ-0) составляет 12–15 мкм, т. е. на практике величина ℓ не должна превышать 30 мкм.

Изложенное не означает, что для всех ФД должна быть применена единая «безопасная» и подтвердившая эффективное подавление взрывных шумов фонового типа величина ℓ , например, 20–30 мкм. В ряде случаев, особенно, когда требуется получить уникально низкие темновые токи малоразмерных ФЧП (50×50 мкм и меньше), добиться этого позволяет именно приближение ОК к ФЧП. Так, в работе [4] значения темнового тока уровня $7 \times 10^{-12} \text{ А}$ при смещении 200 мВ в соответствии с рекомендациями работы [3] удалось добиться, в основном, за счёт приближения ОК к ФЧП от 30 до 7 мкм. Именно в этих случаях для каждого выбранного значения параметра ℓ , пользуясь формулой (4) или экспериментально, требуется определять величину $U_{\text{ПД}}$, которую нельзя превышать при всех измерениях охлаждённых кристаллов и эксплуатации ФД.

Следует подчеркнуть, что формула (4) при проектировании ФД позволяет определять величину $U_{\text{ПД}}$ при заданном значении ℓ , и наоборот – значение ℓ при заданной величине $U_{\text{ПД}}$. И тот, и другой случаи могут быть востребованы при разработке топологии ФД на основе тех или иных приоритетных параметров технического задания: размеров и шага площадок ФД или $U_{\text{ПД}}$, в том числе рабочего напряжения.

Заключение

Представлены экспериментальные результаты, показывающие, что воздействия коротковолнового излучения и обратного смещения на планарные фотодиоды из антимонида индия p^+-n -типа при их охлаждении могут приводить к обратимой и необратимой

деградации таких параметров, как токи шума и сигнала и связанной с ними деградацией ВАХ (уменьшение крутизны прямой ветви и увеличение наклона обратной ветви вплоть до короткого замыкания). Может также проявляться неравномерность тока сигнала по площадкам многоплощадочных ФД.

В обоих случаях воздействия результаты находятся в согласии с моделью, объясняющей все наблюдаемые эффекты зарядкой отдельных участков или всей поверхности границы раздела InSb – АОП «горячими» электронами, «разогреваемыми» либо поглощёнными квантами, либо электрическим полем ОПЗ $p^+ - n$ -перехода ФЧП. Такими участками являются промежутки между границами ФЧП и ОК. При слабых воздействиях (низкоэнергетичных квантах и малых потоках излучения, малых обратных смещениях и токах) происходит обратимая зарядка, которая снимается низкотемпературным прогревом до 20–80 °С или электротренировкой. Необратимая зарядка происходит при больших значениях тех же воздействующих факторов и объясняется прочным закреплением электронов на больших глубинах в АОП за счёт больших энергий «горячих» электронов и их коллективного взаимодействия при остановке.

Полученные данные показывают, что для предотвращения зарядки поверхности и связанной с ней деградацией ВАХ и фотоэлектрических параметров ФД их конструкция и все операции сборки и контроля параметров на этапах сборки должны не допускать попадания коротковолнового излучения на охлаждённые кристаллы. Уровень обратных смещений при этом не должен превышать предельно-допустимых значений, зависящих

от расстояния между границами ФЧП и ОК и определяемых либо экспериментально, либо расчётом по полученной расчётно-эмпирической формуле.

Авторы выражают благодарность Р. И. Шакирзянову за выполнение расчётов, Е. В. Сусову за внимание и интерес к работе и М. А. Трищенко за ознакомление с рукописью и ценные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Астахов В. П., Борисов С. Р., Варганов С. В. и др. Патент РФ SU 1589963A1 от 17.01.1995 г.
2. Астахов В. П., Дудкин В. Ф., Кернер Б. С., Осипов В. В., Смолин О. В., Таубкин И. И. // Микроэлектроника. 1989. Т. 18. Вып. 5. С. 455.
3. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В. // Письма в ЖТФ. 1998. № 4. С. 72.
4. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В., Соловьёва Г. С., Талимов А. В. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 73.
5. Астахов В. П., Пасеков В. Ф., Тихонова О. В. // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1986. Вып. 1. С. 24.
6. Krag W. E., Phelan R. J. // J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40. No. 9. P. 3661.
7. Phelan R. J., Dimock J. O. Patent 3.746.867 USA, МКІ J11c11/44.
8. Астахов В. П., Пасеков В. Ф., Савельева Л. В. // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 1990. Вып. 6 (209). С. 64.
9. Астахов В. П., Лихачёв Г. М. // Прикладная физика. 2012. № 4. С. 83.
10. Шокли В., Нойс Р., Саа К. // Успехи физических наук. 1962. Т. 77. № 3. С. 327.
11. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984.
12. Астахов В. П., Астахов М. В., Карпов В. В., Якимов Е. Б. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2007. № 1. С. 1.

Results of antimony indium planar photodiodes surface charging at shortwave irradiation and reverse voltage displacement

V. P. Astakhov, P. D. Gindin, and G. V. Chekanova

Moskovsky zavod «SAPFIR». J.S.C.
Bld. 3A, 4A Dneproretrovskiy passage, Moscow, 117545, Russia
E-mail: ko-ckb@mail.ru

Received February 19, 2019

Consideration is given to the quality results concern influence of a shortwave irradiation and reverse voltage displacement with wide diapason of influence factors (quant energy and there flow density, current and voltage of reverse displacement) on volt-ampere characteristics, noise and signal currents and alsou uniform of signal currents in manygrounds planar photodiodes p^+-n tipos from antimony indium. The investigations carried out directly on cristalles and alsow photodiodes makets with this cristalles. For both occasions of influence, all received resultes concern degradation and investigated parameters restore, explained with united quality model, grounded on charging of some crystal surface plots with «hot» electrons, «heated» till necessary energies either absorbed quants or electric field of p^+-n junction space region and on dependens of fixing degree electrons surface from influence factors quality. Made resolution, that considerable quantity effects, be of importance in production and at trial, connected with planar structure surface charging by in the time of preservation without defects metallurgical and planar p^+-n jnnction boundaries.

Keywords: planar photodiode, antimony indium, surface charging, «hot» electrons.

REFERENCES

1. V. P. Astakhov, S. P. Borisov, S. V. Varganov, et al., Patent RF SV1589963A1, 17.01.1995.
2. V. P. Astakhov, V. F. Dudkin, B. S. Kerner, V. V. Osipov, O. V. Smolin, and I. I. Taubkin, Mikroelektroniks **18** (5), 455 (1989).
3. V. P. Astakhov, D. A. Gindin, and V. V. Karpov, Lett. Journ. Techn. Physics, No. 4, 72 (1998).
4. V. P. Astakhov, D. A. Gindin, V. V. Karpov, G. S. Solovjova, and A. V. Talimov, Prikl. Fiz., No. 2, 73 (1999).
5. V. P. Astakhov, V. F. Pasekov, and O. V. Tihonova, Elektron. Tekhnika. Ser. 2. Poluprov. Pribory. No. 1, 24 (1986).
6. W. E. Krag and R. J. Phelan, J. Appl. Phys. **40** (9), 3661 (1969).
7. R. J. Phelan and J. O. Dimock, Patent 3.746.867USA. MKI J 11C11/44.
8. V. P. Astakhov, V. F. Pasekov, and L. V. Saveljeva, Ekelectron. Tekhnika. Ser. 2. Poluprov. Pribory. No. 6 (209), 64 (1990).
9. V. P. Astakhov and G. M. Lihachov, Prikl. Fiz., No. 4, 83 (2012).
10. V. Shokli, R. Nois, and K. San, Sov. Phys. Usp. **73** (3), 327 (1962).
11. S. Zi., Physics of Semiconductor Devices. (Mir, Moscow, 1984) [in Russian].
12. V. P. Astakhov, M. P. Astakhov, V. V. Karpov, and E. B. Jakimov, Surface. Roentgens, synchrotrons and neutrons investigations, No. 1, 1 (2007).