

УДК 535.247

Особенности планарных p^+ — n -переходов на кремнии и антимониде индия

В. П. Астахов, Г. М. Лихачёв

На основе анализа опубликованных и оригинальных экспериментальных результатов представлены две общие характерные особенности планарных p^+ — n -переходов на Si и InSb, а именно, наличие эффекта электротренировки и положительное влияние на прямые и обратные ветви ВАХ дополнительного короткозамкнутого близкорасположенного планарного p^+ — n -перехода. Обсуждены механизмы проявления каждой из этих особенностей и дано предположение о возможности их повторения на планарных p^+ — n -переходах из других полупроводниковых материалов.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: планарный p — n -переход, антимонид индия, кремний, эксперимент.

Введение

Известно, что при рабочих температурах от -60 до $+90$ °С для кремния и от 30 до 80 К для антимонида индия вольт-амперные характеристики (ВАХ) p — n -переходов на этих полупроводниковых материалах подчиняются теории Шокли—Нойса—Саа [1]. В то же время для планарных p — n -переходов типа p^+ — n и n^+ — p на Si и InSb существуют общие особенности ВАХ, определяемые принципиально аналогичными условиями на поверхности высокоомной области планарной структуры. Главным общим фактором является, как правило, некоторый положительный эффективный заряд, складывающийся из заряда на поверхностных состояниях и заряда встроенного в поверхностную диэлектрическую пленку. В случае планарных p^+ — n -переходов этот заряд приводит к обогащению поверхностного слоя высокоомной n -области электронами и образованию наведенного поверхностного n^+ -слоя, за счет которого снижаются пробивные напряжения $U_{\text{проб}}$, но не изменяются обратные токи при напряжениях, меньше пробивных. В случае планарных n^+ — p -переходов этот заряд индуцирует на поверхности высокоомной p -области инверсионный n^+ -канал, связывающий легированную n^+ -область с омическим контактом к p -области и, таким образом, шунтирующий n^+ — p -переход. В последнем случае канал имеет тем меньшее сопротивление, чем слабее

легирован исходный кристалл и чем больше положительный эффективный поверхностный заряд.

Анализ известных экспериментальных данных

Действительно, известные экспериментальные данные для Si и InSb свидетельствуют о том, что эффективный поверхностный заряд на границах раздела Si-диэлектрик и InSb-диэлектрик, в основном, положителен и в зависимости от условий создания поверхностного диэлектрика может колебаться от $\sim 10^{10}$ до $\sim 10^{12}$ ед. заряда электрона/см². При этом на величину заряда не оказывает влияние ни природа, ни концентрация легирующих атомов в исходном кристалле. В случае Si заряд обусловлен вакансиями кислорода в поверхностной пленке собственного или термического окисла на расстояниях до 100 \AA от границы Si-пленка, а в случае InSb — междоузельными атомами Sb в пленке собственного или анодного окисла вблизи и на границе InSb-пленка.

Для планарных p^+ — n -переходов на Si и InSb имеют место следующие принципиально общие особенности.

На них обнаружен и наблюдается эффект электротренировки, заключающийся в постепенном увеличении $U_{\text{проб}}$ по мере постепенного повышения прикладываемого обратного смещения. На планарных p^+ — n -переходах на основе Si с концентрацией легирующих атомов фосфора в высокоомной n -области $\sim 10^{13} \text{ см}^{-3}$ электротренировка при комнатной температуре позволяет увеличить $U_{\text{проб}}$ от 100 до 250 В. Этот результат сохраняется в течение ~ 3 ч, а затем происходит медленное снижение $U_{\text{проб}}$ до исходного значения 100 В [2]. При концентрации легирующих атомов в n -области более $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ эффект электротренировки не наблюдается.

Астахов Владимир Петрович, зам. начальника ЦКБ.
Лихачёв Геннадий Михайлович, заместитель начальника отдела.
ОАО «Московский завод "САПФИР"».
Россия, 117545, Москва, Днепропетровский пр., 4а.
Тел. 315-73-68. E-mail: ko-ckb@mail.ru

Статья поступила в редакцию 15 августа 2011 г.

© Астахов В. П., Лихачёв Г. М., 2012

На планарных p^+n -переходах на основе InSb электротренировка при $T = 77$ К увеличивает $U_{\text{проб}}$ от 0,7—1,5 до 3—12 В в зависимости от степени легирования исходных кристаллов, увеличиваясь в указанных пределах при уменьшении концентрации легирующих атомов теллура от $\sim 2 \cdot 10^{15}$ до $\sim 5 \cdot 10^{13}$ см^{-3} [3]. При степени легирования исходных кристаллов более $5 \cdot 10^{15}$ см^{-3} эффект электротренировки отсутствует, а $U_{\text{проб}}$ составляет $\sim 0,6$ В [4]. В тех случаях, когда эффект электротренировки имеет место, его результат сохраняется в течение всего времени охлаждения. Отогрев до комнатной температуры сразу возвращает значения $U_{\text{проб}}$ к исходным.

Следует отметить, что эффект электротренировки не влияет на прямую ветвь ВАХ планарных p^+n -переходов и не обнаружен вообще на планарных структурах n^+p -типа.

Эффект объясняется полевой инжекцией электронов с планарной границы p^+ -области в диэлектрик над высокоомной n -областью при увеличении обратного смещения, приводящего к увеличению электрического поля в области пространственного заряда (ОПЗ) p^+n -перехода на границе с диэлектриком. Инжектированные в диэлектрик электроны захватываются ловушками диэлектрика у границы полупроводник—диэлектрик и компенсируют их положительный заряд. В результате наведенный зарядом ловушек n^+ -слой на поверхности n -области в зоне инжекции постепенно исчезает и ОПЗ вблизи планарной p^+n -границы расширяется. При дальнейшем увеличении смещения электрическое поле увеличивается уже в более широкой поверхностной ОПЗ, и электроны проникают все дальше вдоль поверхности n -области, компенсируя и там заряд на ловушках. Так постепенно увеличивается $U_{\text{проб}}$ вплоть до значений, определяемых пробоем ОПЗ в объеме.

При концентрации легирующих атомов в исходных кристаллах n -типа выше определенного значения ($\sim 5 \cdot 10^{15}$ см^{-3} для InSb и $\sim 5 \cdot 10^{14}$ см^{-3} для Si) эффективный поверхностный заряд не способен индуцировать заметный n^+ -слой из-за экранирования проникающего в полупроводник поля поверхностного заряда электронами кристалла. Поэтому эффект электротренировки в данных случаях не проявляется, а прямые и обратные токи определяются объемной зоной p^+n -перехода.

Поверхностный n^+ -слой высокоомной n -базы является барьером для инжектированных в базу p^+n -перехода дырок. Поэтому его наличие не приводит к увеличению влияния на их концентрацию поверхностной рекомбинации, вследствие чего прямые ветви ВАХ нечувствительны к положительному поверхностному заряду и к результатам электротренировки, которая практически не

изменяет ситуацию с поверхностной рекомбинацией.

Продолжительность сохранения результатов электротренировки определяется способностью ловушек удерживать электроны при рабочих для данного полупроводника температурах. Повышение температуры приводит к эмиссии захваченных электронов с ловушек и возвращению ситуации на границе полупроводник—поверхностная пленка к той, которая была до электротренировки.

Дополнительный короткозамкнутый p^+n -переход

Впервые для малоразмерных (150×150 мкм) планарных p^+n -переходов на InSb было обнаружено положительное влияние дополнительного короткозамкнутого p^+n -перехода, окружающего "рабочий" p^+n -переход или группу p^+n -переходов на расстоянии в пределах двух диффузионных длин дырок в n -области. Положительное влияние сказывалось в том, что такой p^+n -переход "гасил" взрывные шумы фонового типа [5]. Этот прием позволил обеспечить производственный выпуск фотодиодов из InSb на основе патента [6]. Позднее было показано, что такой прием позволяет уменьшить обратные токи "рабочего" p^+n -перехода, причем в тем большей мере, чем ближе дополнительный p^+n -переход придвинут к "рабочему" [7].

На кремнии также было показано, что дополнительный p^+n -переход улучшает обратную ветвь ВАХ планарного малоразмерного (300×700 мкм) p^+n -перехода. При этом происходит также улучшение прямой ветви. Для выбранных промежутков между p^+n -переходами (15 и 300 мкм на разных их участках) обратные токи уменьшаются \sim втрое, не изменяя соответствие ВАХ теории Шокли—Нойса—Саа, когда ток и напряжение связаны соотношением $J \sim U^{0,5}$, а прямая ветвь изменяет свои параметры следующим образом: коэффициент неидеальности уменьшается от $\beta = 1,55$ до 1, а ток насыщения уменьшается от $j_0 = 2,2 \cdot 10^{-5}$ до $3,5 \cdot 10^{-6}$ А/см² [8].

Дополнительный короткозамкнутый планарный p^+n -переход постепенно становится элементом топологии кремниевых приборов с малоразмерными "рабочими" p^+n -переходами, для которых важно получить идеальную прямую ветвь ВАХ, в частности, для датчиков температуры и низкочастотных фотодиодов при применении в фотовольтаическом режиме.

В основе положительного влияния близкорасположенного короткозамкнутого p^+n -перехода лежит его свойство быть границей с бесконечной скоростью рекомбинации неосновных носителей заряда в базе — дырок и нулевой скоростью их

генерации. В результате этого дополнительный $p^+—n$ -переход поглощает из близлежащих областей базы генерируемые в них равновесные и неравновесные дырки, которые уже не могут участвовать в разделении носителей заряда "рабочим" $p^+—n$ -переходом и давать вклад в его обратный ток. При этом может уменьшаться и рекомбинационный ток, деформирующий прямую ветвь ВАХ.

Отметим, что применение дополнительного короткозамкнутого $p^+—n$ -перехода, скорее всего, является универсальным средством борьбы с негативным влиянием поверхности, а также объемными избыточными обратными и рекомбинационными токами и для других полупроводников. В пользу этого утверждения свидетельствует успешное изготовление с его применением малоразмерных фотодиодов $p^+—n$ -типа на InAs с параметрами на уровне теоретического предела [9].

Тестовые эксперименты

Исходя из свойства дополнительного близко-расположенного короткозамкнутого планарного $p—n$ -перехода любого типа ($p^+—n$ и $n^+—p$) поглощать неосновные носители заряда высокоомной области, можно предположить, что такой $n^+—p$ -переход будет в состоянии разорвать поверхностный инверсионный канал n^+ -типа в случае приборных структур $n^+—p$ -типа на высокоомном p -Si. Однако наши эксперименты показали, что этого не происходит. Наоборот, "рабочий" $n^+—p$ -переход при этом практически закорачивается, что свидетельствует о недостаточной эффективности отбора электронов дополнительным $n^+—p$ -переходом. Эффективным средством уменьшения влияния шунтирующего инверсионного канала в данном случае является раскоротка дополнительного $n^+—p$ -перехода и приложение к нему того же смещения, что и к "рабочему" $n^+—p$ -переходу.

Заключение

Для планарных $p^+—n$ -переходов на Si и InSb характерны две общие особенности, не наблюдаемые на планарных $n^+—p$ -переходах, а именно: наличие эффекта электротренировки при рабочих температурах (увеличение пробивного напряжения по мере увеличения прикладываемого обратного смещения), продолжительность действия которого растет при снижении температуры, и положительное влияние на прямые и обратные ветви ВАХ дополнительного планарного короткозамкнутого $p^+—n$ -перехода, расположенного в пределах двух диффузионных длин дырок от планарных границ "основного" $p^+—n$ -перехода. Предполагается, что эти особенности свойственны планарным $p^+—n$ -переходам и на других полупроводниковых материалах.

Литература

1. Шокли В., Нойс Р., Саа К. // УФН. 1962. Т. 77. № 3. С. 327.
2. Астахов В. П., Болесов И. А., Гиндин Д. А. и др. // Прикладная физика. 2002. № 1. С. 48.
3. Астахов В. П., Картов В. В., Соловьева Г. С., Талимов А. В. // Там же. 2003. № 3. С. 68.
4. Астахов В. П., Картов В. В. Особенности фотодиодов на основе "низкоомного" антимионида индия: Матер. докл. междунар. науч.-техн. семинара "Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах". — М., 2004.
5. Астахов В. П., Дудкин В. Ф., Кернер Б. С. и др. // Микроэлектроника. 1989. Т. 18. № 5. С. 455.
6. Астахов В. П., Варганов С. В., Демидова Л. В. и др. Способ изготовления фотодиодов на антимиониде индия. Пат. 1589963 РФ. Действует с 28.04.1994 г.
7. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Картов В. В. и др. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 73.
8. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Картов В. В. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 8. С. 72.
9. Астахов В. П., Данилов Ю. А., Дудкин В. Ф. и др. // Там же. 1992. Т. 18. № 3. С. 1.

Features of the planar $p^+—n$ -junctions on silicon and indium antimonide

V. P. Astakhov, G. M. Likhachev

Moscow Plant "Sapfir"

4a Dnepropetrovsky av., Moscow, 117345, Russia

E-mail: ko-ckb@mail.ru

Obtained are two common characteristic peculiarities of the planar $p^+—n$ -junctions on Si and InSb — presence of the electrotraining effect and positive influence of the additional neareplaced planar short-circuit $p^+—n$ -junctions on the direct and reverse volt-ampere characteristics. These peculiarities are discussed. It can be made a supposition that they will repeat on planar $p^+—n$ -junctions from others semiconductor materials.

PACS: 85.60.-q

Keywords: junction, indium antimonide, silicon, experiment.

Bibliography — 9 references.

Received August 15, 2011