

УДК 621.382.2; 621.396.621.57

Торцевые диоды Шоттки на кремневой пластине с пониженной высотой выпрямляющего барьера

В.Р. Закамов, Ю.И. Чеченин., Д.А. Пряхин, Д.В. Юрасов

В работе рассмотрена возможность изготовления диодов с пониженной высотой выпрямляющего барьера с малой емкостью. Выпрямляющий контакт является торцевым или боковым к проводящему слою полупроводника, а омический контакт расположен параллельно слою легирования. Понижение выпрямляющего барьера осуществляется за счет применения Si слоев, легированных сурьмой до концентраций 10^{19} и 10^{20} см⁻³. Рассмотрены различия выпрямляющих контактов на структурах с толстым (500 нм) и тонким сильнолегированным слоем (10 нм). Получены торцевые диоды с малой удельной емкостью.

PACS: 85.30.Ni

Ключевые слова: детекторные диоды, низкобарьерные диоды Шоттки

Введение

Для регистрации сигналов на частотах 1000 ГГц и выше необходимы недорогие неохлаждаемые приборы. Наиболее перспективными из полупроводниковых приборов являются низкобарьерные диоды [1]. Они являются планарными и имеют емкость от 1 фФ и выше. Емкость образуется между параллельными проводящими слоями как для туннельных диодов [2], так и для перехода металл-полупроводник [3, 4]. Емкость диодов ограничивает частотный диапазон работы полупроводникового прибора за счет шунтирования сопротивления выпрямляющего барьера. На сегодняшний день изготовлены и опробованы диоды планарного исполнения с площадью контакта 0.5×0.5 мкм² и емкостью около 1 фФ [5].

Закамов Вячеслав Робинovich, старший научный сотрудник.

Чеченин Юрий Иванович, начальник лаборатории. ОАО «НПП "Салют"».

Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Ларина, 7.
E-mail: zvr@ipm.sci-nnov.ru, vjacheslavnnov@mail.ru.

Пряхин Дмитрий Александрович, научный сотрудник.

Юрасов Дмитрий Владимирович, младший научный сотрудник.

Институт физики микроструктур РАН.
Россия, 603950, ГСП-105, Нижний Новгород.
E-mail: pda@ipm.sci-nnov.ru,
inquisitor@ipm.sci-nnov.ru.

Статья поступила в редакцию 27 ноября 2012 г.

© Закамов В.Р., Чеченин Ю.И., Пряхин Д.А., Юрасов Д.В.

Они показали рекордные значения по вольт-ваттной чувствительности (400 В/Вт на частоте 900 ГГц) и NEP (20 пВт Гц^{-1/2} на частоте 800 ГГц) [5]. Уменьшить емкость этих диодов за счет уменьшения площади контактов (следовательно, увеличить их чувствительность и частотный диапазон работы) является затруднительным, поскольку при ширине контакта и диода в доли микрон на ВАХ полупроводникового перехода существенное влияние будет оказывать краевой пространственный заряд, краевая емкость конденсатора и емкость подводимых к контакту линий. Для уменьшения краевых эффектов в полупроводниках нужно уменьшать расстояние между проводящими плоскостями, что приведет к увеличению емкости на единицу площади контакта. Следовательно, необходимо уменьшать ширину подводимых линий к контактам, что связано уже с технологическими трудностями уменьшения размеров проводящих линий.

Вместо детекторных диодов предлагается использовать полевые транзисторы с FET-структурой. Механизм их чувствительности объясняется нелинейным свойством плазмы в канале транзисторов под действием внешнего излучения [6], что приводит к изменению тока, проходящего через транзистор. Однако их пороговая чувствительность даже на частоте 650 ГГц остается невысокой, а именно, 300 пВт Гц^{-1/2} и уступает низкобарьерным диодам [5]. Поэтому изготовление низкобарьер-

ных диодов с малой емкостью и их исследование является более перспективным для регистрации терагерцовых частот.

Целью данной работы является определение возможности изготовления диодов с малой емкостью вдоль слоя легирования небольшой толщины.

Технические и технологические подходы

Выпрямляющий контакт является торцевым к легированному слою, а омический расположен параллельно слою легирования. Диоды изготавливались на кремниевой пластине, поскольку кремневая технология оказалась наиболее простой и технологичной. Кроме того, самые первые детекторные кремневые диоды с прижимным контактом имели чувствительность не хуже современных диодов. Главным их недостатком являлась нестабильность прижимного контакта. Предложенная конструкция и технология изготовления диодов может быть рассмотрена на структурах других полупроводников с высокой подвижностью носителей.

Конструкция диодов с малой емкостью

Рассмотрим простую структуру предполагаемого диода на кремнии (рис. 1, а) и способ его формирования. Структура диода напоминает структуру полевого транзистора. Отличием является то, что около поверхности существует высоколегированный слой, а анодом диода служит затвор. Высоколегированный слой в несколько нанометров служит для понижения выпрямляющего барьера Шоттки. При увеличении степени легирования проводящего слоя уменьшается область пространственного заряда между металлом и полупроводником, в свою очередь, за счет туннелирования электронов через эту область уменьшается эффективная высота выпрямляющего барьера. При этом удельная емкость таких контактов является высокой, но из-за малой толщины легированного слоя, например, в 10 нм, она не превосходит 0,2 фФ на длину контакта в 1 мкм. Для уменьшения сопротивления растекания диода вдоль сильнолегированного слоя (см. рис. 1, а) введены и другие слои: нижний слой, легированный на толщину в несколько нанометров, необходи-

мый для установления в глубине структуры электронной проводимости, и слаболегированный слой толщиной в несколько десятков нанометров, расположенный между более сильнолегированными слоями. Их вклад в емкость контакта соизмерим с емкостью, вносимой поверхностным высоколегированным слоем. Энергетические диаграммы слоя в разрезе для разных участков диода представлены на рис. 1, б. Из рис. 1, в видно, что под металлическим контактом, где удален высоколегированный поверхностный слой, должна образоваться область обеднения носителями из-за барьера на границе перехода металл-полупроводник. В промежутке между металлическими контактами высоколегированный слой обеспечивает проводимость по нижним слоям легирования.

Дополнительные предположения по возможности получения торцевых диодов с пониженной высотой выпрямляющего барьера

Известно, что для выпрямляющих контактов металл-полупроводник на ВАХ существует область обратного туннельного про-

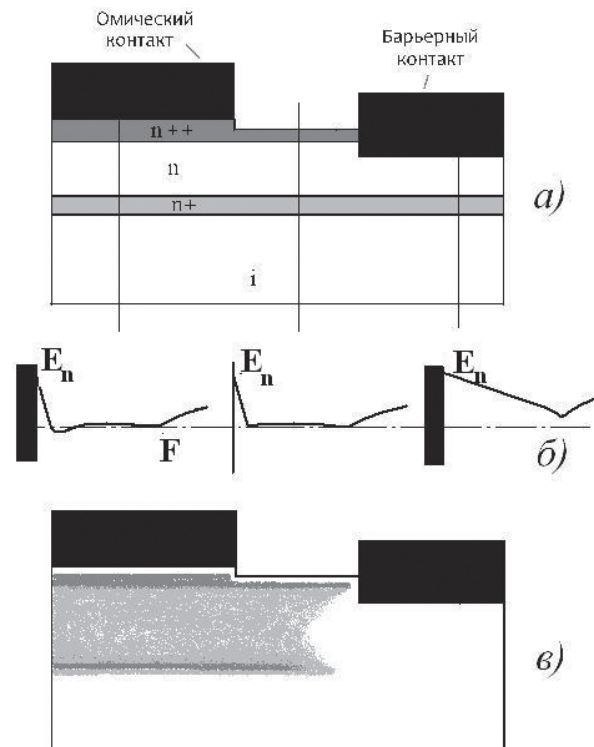


Рис. 1. Торцевой диод:
а – структура торцевого диода;
б – поперечные энергетические диаграммы для различных участков полупроводника;
в – распределение электронов (серым цветом) в полупроводнике диода.

боя. Величина напряжения пробоя зависит от степени легирования полупроводника. При сильном легировании ширина области пространственного заряда контактов Шоттки

уменьшается ($L \cong a\sqrt{\frac{1}{n}}$, где n – степень

легирования). При уменьшении области обеднения электроны могут туннелировать как в прямом, так и в обратном направлении, что ведет к уменьшению эффективной высоты барьера Шоттки. При свободном туннелировании электронов через барьер контакт становится омическим. Такая теория справедлива для контактов с однородным распределением примеси. Для торцевых контактов на ВАХ и величину напряжения туннельного пробоя существенное влияние оказывает геометрия контакта, поскольку существует неоднородное легирование полупроводника вдоль контакта [7]. Как показано на рис. 1, в, электроны в полупроводнике создают некоторую «иглу» в плоскости, которая упирается в металлический контакт. При прямом смещении электроны могут туннелировать с кончика «иглы» в плоскость металла. При обратном смещении «игла» смещается вглубь полупроводника. Для туннелирования электронов из металлической плоскости электроны должны попасть только на кончик «иглы», а это значит, что в туннелировании участвует только часть электронов, имеющих только определенную траекторию движения. Это должно приводить к увеличению величины напряжения обратного туннельного пробоя и к схожести ВАХ таких контактов с обычными диодами Шоттки, но с меньшей величиной эффективного барьера.

Для экспериментальной проверки вышеизложенных подходов возможности получения торцевых диодов с пониженной высотой барьера на пластине слабопроводящего кремния с удельным сопротивлением $> 5000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ методом МЛЭ были выращены структуры R284 и R285. Легирование слоев осуществлялось сурьмой с использованием методики, изложенной в [8]. Для выявления различий между торцевыми контактами с тонким и толстым легированным слоем структуры R284 и R285 различались толщинами и уровнем легирования слоев, как представлено на рис. 2.

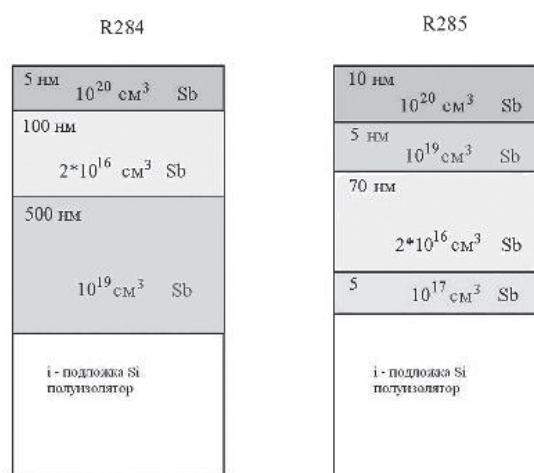


Рис. 2. Структуры R284 и R285 в разрезе по слоям со степенью легирования сурьмой Sb.

В структуре R284 слой в 500 нм легировался с концентрацией сурьмы в 10^{19} см^{-3} для получения низкобарьерного контакта. Верхний слой структуры в 5 нм легировался до концентрации 10^{20} см^{-3} для получения омического контакта. Между легированными слоями был сформирован слаболегированный (буферный) слой, который необходим для разделения токопереноса между верхним и нижним легированным слоем. Структура R285 была выращена для формирования диодов, представленных на рис. 1. Выращенные структуры R284 и R285 были разделены на несколько частей, что позволило использовать одну и ту же структуру для отработки технологических маршрутов и формирования диодов в различной геометрии.

Технологические методы

Наиболее важным для реализации диодов в планарной технологии является формирование омического контакта. Поэтому на первом этапе работы отработывалась технология их получения. Известно, что омические контакты для кремния с n типом проводимости и с малым сопротивлением контакта до $10^{-9} \text{ Ом}\cdot\text{см}^2$ получают за счет формирования силицидов на высоколегированном кремнии. Формирование силицидов происходит за счет вжигания тугоплавких металлов в слой высоколегированного кремния с концентрацией примеси до $2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ [9]. Слой высоколегированного кремния должен иметь толщину от 0,1 мкм, который может быть сформирован за счет ионной имплантации или выращен на поверх-

ности пластины кремния с помощью эпитаксии. Другим способом получения омических контактов к кремнию *n*-типа является нанесение металлов в вакууме на слой сильнолегированного кремния нагретого до 300 °С [10]. При этом омическая проводимость контакта лежит в пределах 10^{-5} – 10^{-6} Ом·см², при этом слой сильнолегированного кремния на поверхности полупроводника можно сделать толщиной в несколько нанометров. Однако в этом случае существует проблема удаления лишнего металлического слоя с высоким пространственным разрешением. В работе [11] омические контакты были получены напылением металлического слоя на пластину кремния с тонким высоколегированным слоем (около 5 нм) на поверхности кремния без нагрева в вакууме. При этом омическая проводимость контактов лежит в пределах 10^{-2} – 10^{-3} Ом·см², что значительно хуже чем при получении контактов двумя первыми способами. Однако для детекторных диодов, где плотность токов небольшая, такие контакты вполне применимы. Кроме того, емкость омического контакта может шунтировать резистивное сопротивление контакта на высоких частотах.

Для формирования омических контактов была использована «взрывная» литография, при которой вначале был получен рисунок на фоторезисте, а после чего наносился металлический слой. После этого за счет удаления фоторезиста был сформирован необходимый рисунок металла на пластине кремния. Как оказалось, в отличие от работы [11], нанесение металлического слоя сразу после проявления фоторезиста не приводит к образованию омического контакта. Данный факт, вероятно, связан с реакциями, происходящими на поверхности пластины кремния при нанесении фоторезиста и его проявлении. Омический контакт образуется только после удаления окисла в проявленных местах пластины кремния. Удаление окисла проводилось плавиковой кислотой.

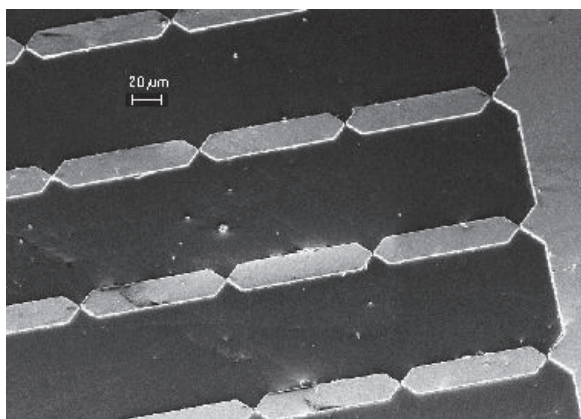
На втором этапе работы определялась методика удаления легированных слоев с поверхности пластины кремния с высоким разрешением и точностью для формирования торцевых контактов и диодов с малой емкостью. Для этой цели были опробованы два ме-

тода травления поверхности кремния, а именно, ионное травление аргоном и плазмохимическое травление во фторидной плазме. Процессы травления проводились на установке PlasmaLab 80Plus. Травление ионами аргона проводилось при давлении 10 мТорр и мощности, вкладываемой в емкостной разряд, на уровне 100 Вт. При проведении плазмохимического травления в качестве плазмообразующих газов использовались гексафторид серы (SF₆) и трифторметан (CHF₃). Добавка последнего в небольших количествах (не более 10 %) позволяет увеличить анизотропию профиля травления. Процесс проводился при давлении 20 мТорр и подводимой мощности 20 Вт. В обоих случаях в качестве маски использовался фоторезист.

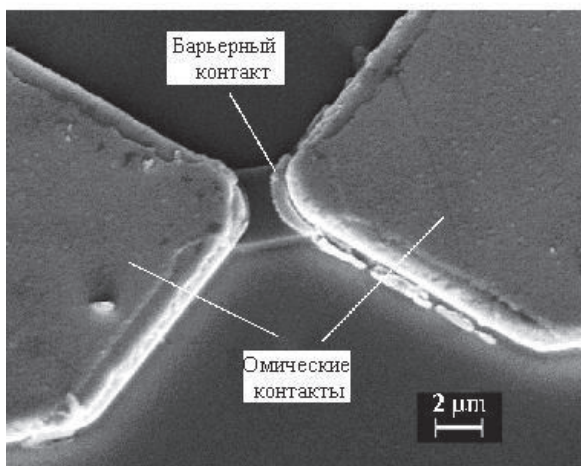
Как оказалось, травление ионами аргона позволяет удалять слои кремния толщиной до 20 нм за время травления около 30 минут. Однако из-за низкой селективности данного метода происходит травление как кремния, так и фоторезиста. Так, при толщине фоторезиста 0,5–0,7 мкм после проведения травления ионами аргона толщина фоторезиста уменьшается, приблизительно, в два раза. При плазмохимическом травлении из-за высокой селективности данного метода фоторезист подвергается меньшему воздействию даже при глубине травления кремния до 3 мкм. В этом режиме скорость травления составляла величину порядка 100 нм/мин.

Для тестирования получаемых омических контактов и отработки методов получения выпрямляющих контактов на пластине кремния была разработана топология металлизации. Топология металлизации необходима для создания контактов к диодам и для формирования самих диодов. В качестве металлических контактов использовались отрезки последовательно соединенных линий длиной около 120 мкм и шириной 20 мкм (рис. 3, а). На стыке линий металлические отрезки были заужены до ширины 2 мкм. Расстояние между отрезками было равно 2 мкм.

Нанесение металлического слоя Ti (0,1 мкм) и Al (0,2–0,5 мкм) проводилось методом термического испарения. После формирования рисунка металлизации с поверхности пластины кремния методом ионно-химического травления удалялась лишняя область



а)



б)

Рис. 3. Электронная фотография:
 а) металлических отрезков линий на поверхности пластины кремния, создающих омический контакт;
 б) выпрямляющего контакта на стыке металлических отрезков (полоска металла внутри зазора 2 мкм создает барьерный контакт с полупроводником).

высоколегированного слоя. Для этого область на стыке металлических отрезков закрывалась фоторезистом шириной 2,5–3 мкм. После чего проводилось измерение проводимости в зазорах отрезков линий.

Эксперименты по получению диодов и результаты

Измерения ВАХ в зазорах отрезков линий на пластинах R284 и R285 показало, что зависимость тока от напряжения имеет линейный характер на начальных участках ВАХ. Для пластины R284 сопротивление в зазоре металлических линий была равна около 300 Ом. Омическая проводимость наблюдалась до величины тока в несколько миллиампер. После чего происходил пробой, и сопротивление

уменьшалось до нескольких Ом, что соответствует сопротивлению нижнего высоколегированного слоя.

Основной вклад в сопротивление в зазорах металлических линий для пластины R284, по всей видимости, создает низколегированный слой ($2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ на рис. 2, а) и сопротивление перехода металл–полупроводник, поскольку полученный омический контакт не является воженным в полупроводник.

Для пластины R285 сопротивление в зазорах линий на омическом участке ВАХ было около 750 Ом. При токе около 2 мА наблюдалось насыщение тока, что связано с ограниченной проводимостью поверхностных легированных слоев. Появление участка насыщения тока свидетельствует, что основной вклад сопротивление в зазоре создают легированные слои.

Для получения выпрямляющих контактов в промежутках между отрезками линий была проведена повторная фотолитография. При этом был проведен сдвиг фотошаблона на 1 мкм в зазоре отрезков линий. До напыления металлического слоя было проведено плазмохимическое травление. Глубина травления для пластины R284 и R285 по оценкам была проведена на 0,7 и 0,05 мкм, соответственно. После травления был проведен контроль сопротивления в промежутках отрезков линий. Сопротивление возросло до нескольких десятков кОм. Затем было проведено нанесение металлического слоя Ti – 0,1 мкм и Al – 0,2 мкм и проведен «взрыв» металлического слоя. Вид выпрямляющих контактов в промежутках отрезков линий для структуры R285 представлен на рис. 3, б. Выпрямляющий контакт с одной стороны соединен с металлическим отрезком линии, а с другой создает торцевой контакт с легированным слоем.

Измерения ВАХ между отрезками линий показали существование различий для выпрямляющих контактов на пластинах R284 и R285. Наиболее ярко это различие проявляется в зависимости дифференциальных сопротивлений от приложенного напряжения к металлическим контактам (рис. 4). Для пластины R285 зависимость сопротивления от напряжения смещения соответствует выпрямляющим низкобарьерным диодам. Максимум дифференциального сопротивления

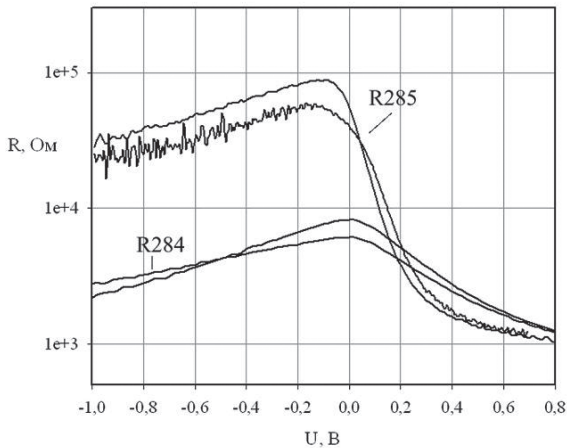


Рис. 4. Зависимости дифференциальных сопротивлений от напряжения смещения между металлическими отрезками линий на пластине R284 и R285.

находится на обратной ветви ВАХ. Для пластины R284 зависимость дифференциального сопротивления от напряжения смещения соответствует контактам между высоколегированным полупроводником и металлом, так как максимум дифференциального сопротивления находится в нулевой точке. Такое различие расположений максимумов дифференциального сопротивления на ВАХ приводит к тому, что контакты на пластине R285 способны выпрямлять переменный сигнал напряжения с малой амплитудой при отсутствии напряжения смещения, а контакты на пластине R284 выпрямлять сигнал без напряжения смещения не будут.

Уменьшение дифференциального сопротивления на обратной ветви ВАХ свидетельствует о туннельном пробое на границе металла и полупроводника. Туннельный пробой более сильный для контактов на пластине R284, что приводит к появлению симметрии прямой и обратной ветви ВАХ [7].

Дифференциальное сопротивление при прямом напряжении смещения для R285 изменяется сильнее по сравнению с сопротивлением для R284. Это указывает на наличие большого сопротивления на выпрямляющем контакте металл-полупроводник для пластины R284. Вероятно, вклад в сопротивление создает промежуточный слой между металлом и полупроводником, который существенно сглаживает зависимость дифференциального сопротивления от прямого смещения [7]. Такой слой может образоваться на стенке

полупроводника при плазмохимическом травлении. Пластина R284 подвергалась более глубокому травлению для формирования выпрямляющего контакта. При глубоком травлении, вероятно, происходит потрав и осаждение продуктов травления на стенки кремниевой структуры, что приводит к образованию промежуточного слоя между металлом и полупроводником. Этот промежуточный слой дает вклад сопротивление контакта и увеличивает токи обратного туннельного пробоя [7].

На зависимость дифференциальных сопротивлений от смещения между отрезками металлических линий влияет проводимость пластины, которая создает параллельное сопротивление барьерным контактам. Поэтому для дальнейших исследований торцевых диодов была изменена технология их формирования. Формирование диодов было выполнено на структуре R285. Были применены другие фотошаблоны для формирования отдельных омических и торцевых контактов. Контакты имеют, приблизительно, размер 20x20 мкм и заужены в местах диода до 2 мкм. Вначале были получены омические контакты. После чего была проведена фотолитография для формирования выпрямляющего контакта. Область выпрямляющего контакта травилась плазмохимическим методом на глубину 50 нм. После этого был сформирован выпрямляющий контакт. Промежуток между металлическими контактами составил 0,5–1 мкм. Для сохранения проводящего слоя шириной 2,5 мкм между контактами область диода закрывалась фоторезистом. Плазмохимическое травление поверхности кремния проводилось на глубину 0,1 мкм.

Измерения ВАХ торцевых диодов в положительных координатах представлены на рис. 5 (кривая 1). На кривой 2 также дана расчетная характеристика диода с коэффициентом идеальности 2,37. Видно, что расчетная характеристика диода достаточно точно описывает ВАХ полученных диодов при небольшом обратном смещении и при прямом смещении. Полученные диоды обладают дифференциальным сопротивлением в нулевой точке в пределах 100–200 кОм. Данные диоды уже являются перспективными для применения. Их можно использовать для разного диапазона

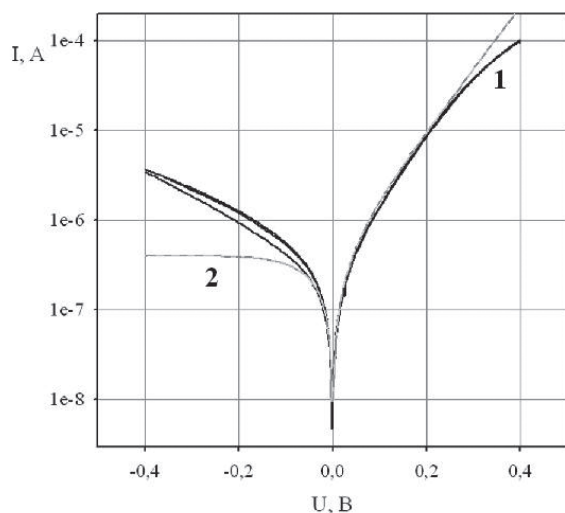


Рис. 5. ВАХ торцевых диодов на пластине R285. Кривая 1 – эксперимент; кривая 2 – расчетная ВАХ диода с коэффициентов идеальности 2,37.

частот. Для частот ниже 30 ГГц диоды можно применять, соединяя их последовательно и параллельно микрополосковыми линиями. Для более высоких частот, а особенно для терагерцового диапазона, необходимо согласовывать принимаемое излучение с диодами, поскольку существует существенное различие диэлектрической проницаемости воздуха и кремневой пластины.

Заключение

Торцевые диоды с пониженной высотой выпрямляющего барьера и с малой емкостью получены на пластине кремния. Кремневая технология оказалась наиболее простой для получения торцевых диодов. Исследование и изготовление торцевых диодов может быть расширено на другие структуры и наиболее привлекательными для этого являются полупроводники с FET структурой. Для их реализации необходимо отработать технологические приемы и методы, представленные в данной работе.

Омические контакты на кремнии для торцевых диодов с высокой точностью разрешения по размерам возможно получить за счет выращивания на поверхности высоколегированного слоя толщиной 10 нм с концентрацией сурьмы до 10^{20} см⁻³ без вжигания контактов и использования силицида на пластине крем-

ния. Для этого после проведения фотолитографии перед напылением металлов с поверхности кремния необходимо удалить окисел.

Толщина высоколегированного слоя стыкового контакта влияет на ВАХ диодов. Чем меньше толщина высоколегированного слоя, тем больше ВАХ соответствует выпрямляющим контактам. Понижение выпрямляющего барьера происходит за счет стыкования высоколегированного слоя и металлического контакта. Полученные диоды могут быть исследованы и применены для различных частот вплоть до терагерцовых, так как обладают малой емкостью контакта.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-07-97019-р_поволжье_a и при использовании оборудования ЦКП «Физика и технология микро- и наноструктур» ИФМ РАН.

Литература

1. Brown E. R. // J. Solid-State Electronics. 2004. V. 48. P. 2051.
2. Meyers R. G., Fay P., Schulman J. N. and et al. // IEEE Electron Devices Letters. 2004. V. 25. No 1. P. 4.
3. Sassen S., Witzigmann B., Wolk C. and Brugger H. // J. IEEE Transaction on Electron. Devices. 2000. V.47. No 1. P. 24.
4. United States Patent 4316201. February 1982. Low barrier-height Ge-GaAs mixer diode.
5. Hesler J.L. and Crowe T.W. // 18 Intl. Symp. Space Terahertz Techn. Pasadena. March 2007.
6. Knap W., Dyakonov M., Coquillat D., and et al. // J. Infrared Milli Terahz Waves. 2009. V. 30 P. 1319.
7. Струха В. И. Контактные явления в полупроводниках. Изд.: Вища школа. Киев. 1982
8. Yurasov D. V., Drozdov M. N., Shaleev M. V., and et al. // J. Appl. Phys. 2011. V. 109. P. 113533-7.
9. Wolf S. // Silicon Processing for the VLSI Era. V. 4. Deep-Submicron Process Technology. P. 805
10. Беляев А. Е., Болтовец Н. С., Капитанчук Л. М. и др. // Материалы и технология изготовления приборов СВЧ. 2009. № 2. С. 31.
11. Закамов В.Р., Чеченин Ю.И. // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 101.

Low barrier Schottky diode on silicon wafers with lateral structure

V.R. Zakamov¹, Y.I. Chechenin¹, D.A. Pryakhin², and D.V. Yurasov²

¹Salut R&P Enterprise, Inc.
7 Larin str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia
E-mail: zvr@ipm.sci-nnov.ru

²IPM RAS,
GSP-105, Nizhny Novgorod, 603950, Russia
E-mail: pda@ipm.sci-nnov.ru

In this paper, the possibility of making low barrier Schottky diode on silicon wafers with lateral structure considered. Barrier contact is lateral to a conductive layer of the semiconductor, ohmic contact is parallel to the layer doping. Lowering the barrier contact at the expense of Si layers doped with antimony concentrations up to 10^{19} and 10^{20} cm⁻³. The differences of lateral contacts on structures with a thick (500 nm) and a thin highly doped layer (10 nm). Received lateral diodes with a low specific capacitance.

PACS: 85.30.Hi

Keywords: detector diodes, low barrier Schottky diodes

Bibliography – 11 references

Received November 27, 2012