

УДК 621.382.2; 621.396.621.57

Детекторные диоды Шоттки с пониженной высотой барьера на основе структур кремния, легированных сурьмой

В. Р. Закамов, Ю. И. Чеченин

Рассмотрена возможность получения низкобарьерных контактов Шоттки на n -типе кремния за счет выращивания методом молекулярно-лучевой эпитаксии сильно легированного приповерхностного слоя (толщиной около 4 нм). Получены омические контакты и низкобарьерные контакты с дифференциальным сопротивлением 1—2 кОм. Опробован способ частичного травливания высоколегированного поверхностного слоя ионами аргона для получения барьера Шоттки. Проведено измерение емкости низкобарьерных контактов и отклика на внешний высокочастотный сигнал.

PACS: 85.30.Hi

Ключевые слова: детекторные диоды, низкобарьерные диоды Шоттки.

Введение

Для контроля уровня электромагнитного излучения от различных приборов в диапазоне от нескольких герц до нескольких гигагерц необходимы простые и недорогие детекторы. Наиболее простыми являются детекторы на основе выпрямляющих полупроводниковых структур, включая барьер Шоттки. Для обеспечения высокой чувствительности детекторных диодов нужно уменьшать эффективную высоту выпрямляющего барьера (p - n -перехода) и не использовать постоянное смещение. Это упрощает конструкцию детектора и приводит к снижению уровня шумов диодов (типа $1/f$ и др.) [1].

Известны первые кристаллические кремниевые детекторы с прижимным контактом [2]. Они отличались высокой чувствительностью, но главным их недостатком является нестабильность прижимного контакта. Сегодня в качестве кремниевых диодов с пониженной высотой барьера предлагается использовать гетероструктуры Si/SiGe [3] или контакты с силицидом эрбия и других лантоноидов [4]. Для диодов на основе других полупроводников для понижения барьера с металлическим контактом проводят сильное легирование приповерхностной области полупроводника [5], предлагаются диоды с объемным барьером [6], туннельные диоды [7] и гетероструктуры полуметалл—полупроводник ErAs/GaAs [8].

Однако детекторные диоды на основе кремния являются более привлекательными для массового применения, поскольку существует возможность их интеграции в системы обработки. Поэтому в данной работе рассматривается способ понижения выпрямляющего барьера для n -типа кремния, который был применен для диодов на GaAs [5].

Технология получения структур

Наиболее простыми из высокочастотных диодов являются диоды Шоттки. В них особую роль играет емкость барьера, которая определяет частотный диапазон работы прибора, поэтому для уменьшения емкости диодов степень легирования полупроводника приконтактного слоя стараются делать небольшой ($< 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$). Чтобы понизить высоту барьера Шоттки, предложено сильно легировать поверхностный слой полупроводника [5]. Толщина этого слоя должна быть небольшой для свободного туннелирования электронов через поверхностный барьер. Граница между слоями с небольшой концентрацией примеси и приповерхностным слоем должна быть резкой для сохранения свойств контактов Шоттки.

Для того чтобы удовлетворить вышеперечисленным требованиям для кремния, на пластине КЕС-0,01 методом молекулярно-лучевой эпитаксии были выращены следующие слои: слой толщиной 200 нм с концентрацией сурьмы 10^{19} см^{-3} , толщиной 70 нм с концентрацией $5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 4 нм с концентрацией 10^{20} см^{-3} . Данная пластина имеет номер R158. Концентрация сурьмы по глубине была проконтролирована измерениями на установке вторичного ионного масс-спектрометра TOF SIMS. На рис. 1 представлены профили концентрации кремния, кислорода и сурьмы в зависимости от времени травления. Как видно, полученный профиль концентрации сурь-

Закамов Вячеслав Робинovich, научный сотрудник.

Институт физики микроструктур РАН.

Россия, 603950, Нижний Новгород, ГСП-105.

Тел. (831) 438-55-55. E-mail: zvr@ipm.sci-nnov.ru

Чеченин Юрий Иванович, начальник лаборатории.

ФГУП «НПО "Салют"».

Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Ларина, 7.

Статья поступила в редакцию 15 августа 2011 г.

мы по глубине несколько размыт, что связано с артефактами ионного распыления при послойном анализе [9]. В работе [9] также приведены режимы роста эпитаксиальных слоев.

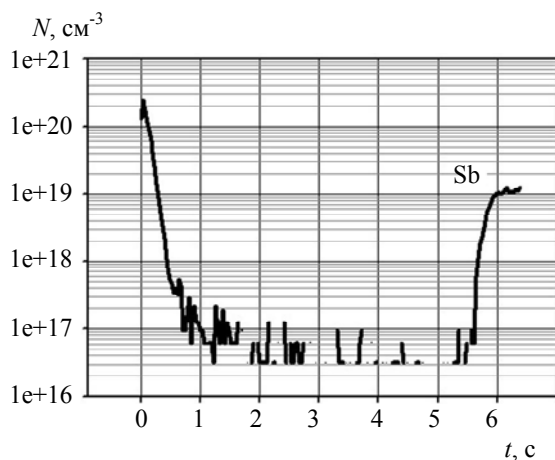


Рис. 1. Профиль концентрации сурьмы в кремниевой пластине в зависимости от времени травления

Эксперимент по получению и изучению контактов

На поверхность пластины R158 методом термического испарения в вакууме были нанесены металлический слой Ti толщиной 0,1 мкм и Al — 0,5 мкм. Методом химического травления были сформированы контакты диаметром 40 и 20 мкм. Измерения ВАХ показали, что контакты получились омическими. Проводимость контактов находится в диапазоне от 10^{-3} до $3 \cdot 10^{-3}$ Ом·см². Данные значения по проводимости несколько ниже, чем для омических контактов лавинно-пролетных диодов, получаемых при напылении Ti на горячую подложку кремния (300 °C) [10], но являются достаточными для детекторных диодов, где отсутствуют большие плотности токов.

Для формирования барьерных контактов и очистки поверхности было проведено ионно-лучевое травление пластины кремния аргоном. По оценкам, травление кремния было проведено на глубину 1,5—2 нм. После этого был проведен второй этап нанесения металлического слоя Ti и Al и проведена фотолитография. На пластине кремния образовались новые контакты и остались старые омические. Новые контакты оказались барьерными с дифференциальным сопротивлением (рис. 2) около 300—1000 кОм в нулевой точке на ВАХ. Определение коэффициента идеальности выпрямляющего барьера показало, что оно равно 1,6. Неидеальность барьерного контакта, вероятно, может быть объяснена тем, что при травлении аргоном происходит некоторое разрушение поверхности кристаллического кремния. После выноса на воздух формируется новый слой оксида кремния и,

возможно, более толстый, чем на нетравленной поверхности пластины. Прослойка диэлектрика между металлом и полупроводником вносит вклад в сопротивление контактов.

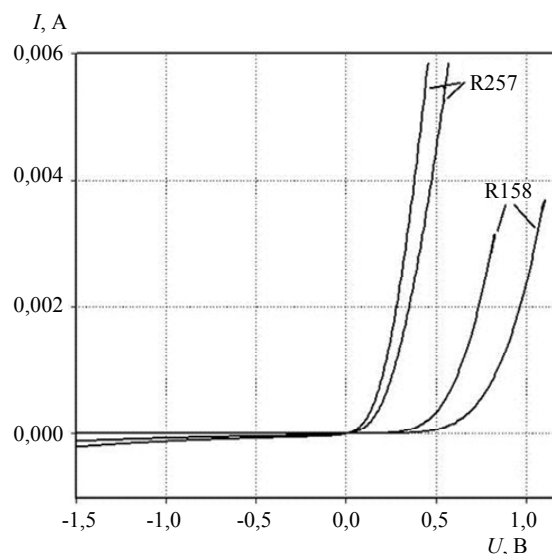


Рис. 2. ВАХ контактов на пластине кремния R158 после травления поверхности аргоном и на пластине R257 диаметром 40 и 20 мкм, соответственно

Для измерения емкости контактов использовался метод, связанный с определением частоты поглощения в LC-цепи (рис. 3), поскольку при измерении простыми измерителями емкости, работающих на одной частоте (около 1 кГц), активная проводимость контакта может шунтировать емкостную проводимость. Также для нелинейного элемента происходит эффект выпрямления переменного сигнала в постоянный, что приводит к возникновению напряжения смещения в измеряемом приборе. Емкость 1 мкФ служит для блокировки по постоянному току. Емкость C_i является емкостью контакта, а R_i — его эквивалентным дифференциальным сопротивлением. Для наблюдения резонанса поглощения для барьерных контактов на пластине R158 индуктивность была взята равной 4,7 мкГн.

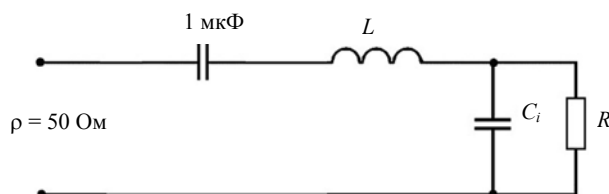


Рис. 3. Цепочка LC для измерения емкости контактов

Для определения частоты поглощения использовался векторный анализатор цепей E8361A (Agilent Technologies). Зондирующая мощность составляла –30 дБм (1 мкВт) и меньше, для того чтобы амплитуда напряжения на нелинейном элементе

те не превышала несколько милливольт. Частоты поглощения определялись из коэффициента отражения S_{11} .

Для контактов с диаметром 40 мкм наблюдалось резонансное поглощение на частоте около 42 МГц, а для контактов диаметром 20 мкм — 55 МГц. Такие частоты поглощения для индуктивности 4,7 мкГн соответствуют емкости 3,0 и 1,6 пФ. В эти значения емкости входят емкость иглы (навесного контакта) и емкость индуктивности. При измерении их можно считать постоянными. Из отношений площадей контактов были определены значения емкостей контактов. Для этого используются простые уравнения $C + C_{\text{п}} = 3$ и $C/4 + C_{\text{п}} = 1,6$, где $C_{\text{п}}$ — постоянная емкость зонда. Вычисленная емкость контактов диаметром 40 и 20 мкм составляет около 2,1 и 0,5 пФ, соответственно. Если сравнивать эти значения емкостей с емкостью плоского конденсатора толщиной нелегированного кремния 70 нм, то получим емкости, близкие по значениям. Так, для идеального конденсатора диаметром 40 мкм емкость составляет 1,59 пФ, что близко к значению 2,1 пФ. Более большая емкость свидетельствует о том, что ширина области пространственного заряда под контактом немного меньше, чем ширина слаболегированного слоя (70 нм). Это свидетельствует о пониженной высоте барьера Шоттки, поскольку при концентрации доноров 10^{17} см^{-3} и высоте барьера 0,7 эВ область обеднения равна примерно 100 нм.

При зондировании контактов высокочастотным сигналом наблюдается выпрямленное напряжение. Отклик максимален на резонансных частотах поглощения и для квадратичного режима лежит в районе 50 мВ/мкВт. При отсутствии индуктивности вольт-ваттная чувствительность контактов значительно ниже, максимум составляет около 3 мВ/мкВт, но наблюдается в полосе частот до нескольких сот мегагерц. Такой отклик на высокочастотный сигнал свидетельствует о хороших детекторных свойствах подобных контактов.

Для формирования контактов с низкой высотой барьера Шоттки без проведения травления поверхностного слоя была выращена структура с меньшей концентрацией сурьмы в приповерхностном слое ($n^+ < 10^{20} \text{ см}^{-3}$) и с меньшей концентрацией доноров в приконтактном слое (около 10^{16} см^{-3}). Пластина имеет номер R257. После нанесения слоя титана и алюминия на поверхности пластины кремния были получены контакты так же, как и для пластины R158, диаметром 40 и 20 мкм. Из измерений ВАХ было определено, что дифференциальные сопротивления в нулевой точке находятся около 1100 и 2400 Ом, соответственно. При этом коэффициент идеальности для полученных барьерных контактов с диаметром 40 мкм равен

3,1 и уменьшается до 2,4 на контактах с диаметром 20 мкм, а ток насыщения I_s изменяется почти обратно пропорционально площади контактов.

Для измерения емкости контактов на пластине R257 также использовалась цепочка из индуктивности и емкости (см. рис. 3), но индуктивность была взята равной 0,12 мкГн. Резонансные частоты поглощения наблюдались на частотах около 225 и 330 МГц. Определение эквивалентных емкостей контактов показало, что они немного больше, чем для барьерных контактов на пластине R158, хотя концентрация легируемой примеси в приконтактном слое для R257 значительно меньше (около 10^{16} см^{-3}), что также связано со значительным понижением барьера Шоттки.

На контактах пластины R257 наблюдается отклик на зондирующий высокочастотный сигнал. Для контакта диаметром 40 мкм вольт-ваттная чувствительность находится около 3,7 мВ/мкВт на частоте поглощения 225 МГц, а для контакта диаметром 20 мкм — 6,5 мВ/мкВт на частоте 321 МГц. Более сильный отклик на высокочастотный сигнал для контактов с меньшей площадью объясняется тем, что при уменьшении емкости контакта увеличивается резонансная частота поглощения, а с увеличением частоты LC-цепочка при одной и той же индуктивности согласует линию с волновым сопротивлением 50 Ом на более высокое сопротивление контакта. Как следствие, увеличивается амплитуда переменного напряжения и увеличивается постоянная составляющая на выпрямляющем контакте.

Если сравнивать максимально достижимые вольт-ваттные чувствительности для контактов с небольшим дифференциальным сопротивлением (пластина R257) и для более высокоомных контактов (пластина R158), то следует заметить, что предельная чувствительность квадратичных детекторов определяется также шумами. Эффективное напряжение шума высокоомных резисторов существенно превосходит шум низкоомных резисторов, поэтому предпочтение следует отдать контактам, полученным на пластине R257.

Важной характеристикой детекторных диодов являются шумы от смещения в прямом направлении, поскольку небольшое смещение довольно часто применяют для температурной стабилизации детекторов с большим дифференциальным сопротивлением. Для определения шумовых характеристик использовался малошумящий операционный усилитель OP37 и низкочастотный анализатор спектра Я4С-68. Ток смещения на контакт подавался через резистор 12 кОм. На рис. 4 приведены шумовые спектры на контакте диаметром 20 мкм для пластины R258 в зависимости от прямого напряжения смещения. Видно, что при нали-

чии смещения шумы возрастают. Спектр шумов при смещении подчиняется зависимости типа $1/f$. При больших величинах тока смещения происходит насыщение в шумовом спектре. Для барьерных контактов на пластине R158 при смещении в спектре шума также наблюдаются шумы вида $1/f$, но только здесь шумы не возрастают столь интенсивно из-за того, что тепловой шум для большого дифференциального сопротивления является также большим.

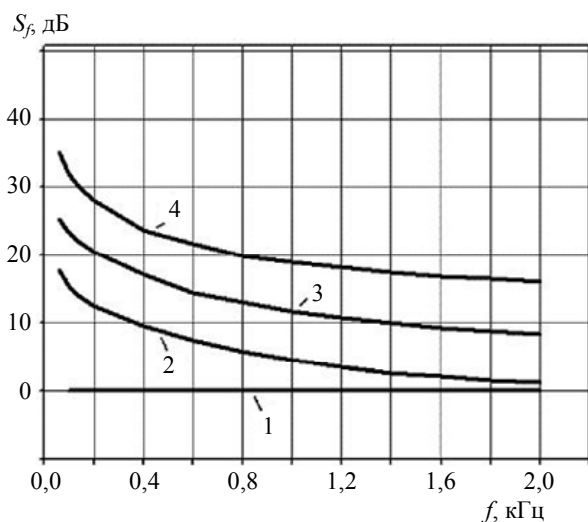


Рис. 4. Спектр шумов контакта диаметром 20 мкм на пластине R257:

1 — без смещения; 2 — смещение 7 мВ; 3 — 22 мВ; 4 — 132 мВ

Заключение

Рассматривая характеристики полученных металлических контактов на пластинах кремния легированных сурьмой, можно утверждать, что высокочастотные диоды с пониженной высотой барьера Шоттки на n -типе кремния можно получить за счет выращивания методом молекулярно-лучевой эпитаксии сильно легированного поверхностного слоя. Высота барьера Шоттки может быть различной в зависимости от степени легирования поверхностного слоя. За счет сильно легированного поверхностного слоя можно получить и омические контакты для детекторных диодов. На структурах с омическими контактами частичное травление поверхностного слоя ионами аргона позволяет получить барьерные контакты.

Полученные барьерные контакты с дифференциальным сопротивлением около 300—1000 кОм

и 1—2 кОм в нулевой точке на ВАХ можно использовать в детекторных диодах. Если сравнивать характеристики выпрямляющих контактов с имеющимися диодами, то контакты с дифференциальным сопротивлением около 1000 кОм схожи по характеристикам с диодами MA4E2054 [11] фирмы MACOM и BAT 62-02W фирмы Infineon Technologies [12]. Контакты с дифференциальным сопротивлением около 1 и 2 кОм схожи с диодами SMS7621-060 фирмы Skyworks [13], но для того чтобы быть их аналогами, необходимо уменьшить емкость исследуемых контактов до 0,12—0,18 пФ. Уменьшить емкость можно за счет уменьшения площади контакта или увеличения области пространственного заряда в слаболегированном слое за счет уменьшения степени легирования.

Авторы выражают благодарность лаборатории Новикова А. В. из ИФМ РАН за изготовление структур кремния.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-07-97019-р_поволжье_а.

Литература

1. Brown E. R. // J. Solid-State Electronics. 2004. V. 48. P. 2051.
2. Кристаллические детекторы/ Под ред. Пумпера Е. Я. — М.: Советское радио, 1950.
3. Rommel S. L., Dillon T. E., Dashiell M. W. et al. // J. Appl. Phys. Lett. 1998. V. 73. P. 2191.
4. Tu K. N., Thompson R. D., Tsaor B. Y. // J. Appl. Phys. Lett. 1981. V. 38. No. 8. P. 626.
5. Sassen S., Witzigmann B., Wolk C., Brugger H. // J. IEEE Transaction on Electron. Devices. 2000. V. 47. No. 1. P. 24.
6. Zhirun Hu, Vo V. T., Rezazadeh A. A. // J. IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2005. V. 15. No. 3. P. 150.
7. Meyers R. G., Fay P., Schulman J. N. et al. // IEEE Electron Devices Letters. 2004. V. 25. No. 1. P. 4.
8. Young A. C., Zimmerman J. D., Brown E. R., Gossard A. C. // J. Appl. Phys. Lett. 2005. V. 87. P. 163506.
9. Yurasov D. V., Drozdov M. N., Murel A. V. et al. // J. Applied Physics. 2011. V. 109. P. 113533.
10. Беляев А. Е., Болтовец Н. С., Капитанчук Л. М. и др. // Материалы и технология изготовления приборов СВЧ. 2009. № 2. С. 31.
11. Описание диодов MA4E2054 Series фирмы M/A-COM Technologies Solutions.
12. Описание диодов BAT62 фирмы Infineon Technologies, 2007-04-19.
13. Описание диодов SMS7621-060 фирмы Skyworks.

Low-barrier Schottky detector diode of silicon structures doped with antimony

V. R. Zakamov

IPM RAS,

GSP-105, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

E-mail: zvr@ipm.sci-nnov.ru

Yu. I. Chechenin

FSUP "Salut",

7 Larina, 7str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

The possibility of obtaining low barrier Schottky contacts on n type silicon by growing by molecular beam epitaxy of heavily doped surface layer (thickness about 4 nm). Obtained ohmic contacts and low barrier contacts with differential resistance 1—2 k Ω . Tested method of partial etching of high-alloyed surface layer by argon ions for the Schottky barrier. Measured the capacity low barrier contacts and response to external RF signal.

PACS: 85.30.Hi

Keywords: detector diodes, low barrier Schottky diodes.

Bibliography — 13 references.

Received August 15, 2011