УДК 621.3

НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ШУМЫ КОНТАКТА МЕТАЛЛ–ПОЛУПРОВОДНИК

Г.Д. ХОНДКАРЯН^{*}, Ф.В. ГАСПАРЯН

Ереванский государственный университет, Ереван, Армения

^{*}e-mail: hxondkaryan@mail.ru

(Поступила в редакцию 28 ноября 2014 г.)

Исследованы ВАХ и низкочастотные шумы структур металл-полупроводник при комнатной температуре. Получены ВАХ и спектры низкочастотных шумов диодных структур с барьером Шоттки, изготовленных на основе Fe/n-Si, Cr/n-Si, W/n-Si. Показано, что ВАХ, уровень и частотный индекс шумов сильно зависят от выбора металлического контакта и величины его площади. Выявлены физические процессы, влияющие на уровень и поведение низкочастотных шумов. Установлено, что с точки зрения уменьшения уровня низкочастотных шумов использование хрома как контактного материала лучше по сравнению с железом и вольфрамом.

1. Введение

Диоды с барьером Шоттки являются перспективными нелинейными элементами, которые широко используются в интегральных микросхемах. Диоды Шоттки используют переход металл-полупроводник в качестве барьера Шоттки (вместо *p-n* перехода как у обычных диодов). Барьер Шоттки имеет меньшую электрическую емкость перехода что позволяет заметно повысить рабочую частоту диода [1]. Обычные кремниевые диоды имеют прямое падение напряжения около 0.6–0.7 В. Применение диодов Шоттки позволяет снизить это значение до 0.2–0.4 В. Столь малое прямое падение напряжения присуще только диодам Шоттки с максимальным обратным напряжением порядка десятков вольт [2,3].

В настоящее время интенсивно изучается роль процессов, происходящих на границах раздела полупроводника с другими веществами, такими как металл, диэлектрик, электролит, газ. Выявляется вклад этих процессов как на токопрохождение, так и на другие электрофизические параметры. Обычно считается, что все эти явления связаны с процессами, происходящими в приповерхностном слое полупроводника [3,4]. Микро- и наноэлектронные приборы, использующие эти эффекты, широко известны как биохимические и газовые сенсоры [5-12]. Особое место в этом ряду занимает контакт металл–полупроводник. В большинстве случаев учет разновидности металлов до сих пор ограничивался только выбором величины работы выхода [13].

Основные направления в развитии современных микросхем, содержащих контакт металл-полупроводник, связаны с уменьшением геометрических размеров, снижением энергопотребления и повышением соотношения сигнал/шум. Так как полезный уровень сигнала иногда невозможно увеличить до нужного уровня без его искажения, возникает необходимость снизить уровень внутренних шумов. Одним из методов решения этой проблемы служит изменение площади и типа контактного токоснимающего металла [14]. Как известно, на низких частотах в полупроводниках и полупроводниковых приборах преобладает фликкер-шум, спектральная плотность мощности которого с уменьшением частоты возрастает по закону $1/f^{\gamma}$ [5,8,13-17], где частотный показатель у имеет значение порядка единицы. Шумовая диагностика является одним из мощных и чувствительных методов изучения свойств полупроводников и приборов различного назначения, в частности, структур металл-полупроводник [14,15,17,18]. Для определения зависимостей электрофизических параметров контакта металл-полупроводник от свойств, типа металла и его геометрических размеров необходимо комплексное исследование внутренних шумов структур металл-полупроводник при разных контактных металлах и при различных площадях контактирующих металлов [14,17,18].

В настоящей работе представлены особенности влияния типа контактного металла, его размеров и путей токопроходящего канала (поверхностного или объемного) на ВАХ и низкочастотные (НЧ) шумы структур Fe/n-Si, Cr/n-Si, W/n-Si.

2. Образцы и методика эксперимента

Были изготовлены образцы структур Fe/n-Si, Cr/n-Si, W/n-Si с барьером Шоттки двух разновидностей. В образцах 1 площадь контакта составляла 1.6×2 мм², а в образцах 2 она равнялась 2×2 мм². Конструкция исследуемых структур представлена на рис.1. Образцы были изготовлены на кремниевых пластинах *п*-типа с удельным сопротивлением 40 Ом см, толщиной 250 мкм и кристаллографическим направлением <111>. Токоснимающие контакты изготовлены с помощью ионно-плазменного напыления в вакуумном установке У279 040РМЗ. Процесс изготовления образцов состоял из трех этапов. Первый этап: очистка поверхностей пластины кремния с использованием ионов аргона (ток пучка 0.2 А, высокое напряжение между анодом и катодом 2 кВ для получения пучка ионов, время очистки 2 мин., давление 6×10⁻⁴ Topp). Второй этап: нанесение атомов Fe, Cr и W на поверхность кремневой пластины (ток катода 80 А, ток анода 2–3 А, напряжение анода 50 В, давление в камере 6×10^{-4} Торр, время осаждения в зависимости от типа атомов от 20 до 30 мин.). На этом этапе создавались контакты 1 и 2 с барьером Шоттки (см. рис.1). Третий этап: осаждение атомов золота с содержанием 1% сурьмы с помощью ионной бомбардировки на заднюю поверхность образца для получения омического контакта (контакт 3, рис.1). Толщина металлических контактов составляла 1200±100 Å.



Рис.1. Исследуемые структуры. Размеры контактов: образец $1 - 1.6 \times 2 \text{ мм}^2$, образец $2 - 2 \times 2 \text{ мм}^2$.

Сопротивление между контактами 1 и 2 составляло ~10–20 кОм, а между контактами 1 и 3 оно было ~6–8 кОм в зависимости от нанесенного металла. Барьер Шоттки n-Si/контакт 1 смещен в прямом и n-Si/контакт 2 – в обратном направлении.

ВАХ измерялись с шагом 0.1 В по возрастающей зависимости. Контроль напряжения осуществлялся вольтметром LW-64. Интервал используемых напряжений составлял 0–4 В.

Измерения НЧ шумов выполнялись методом прямой фильтрации в диапазоне частот от 2 до 500 Гц при температуре T = 300К. Шумы измерялись в режиме постоянного тока, т. е. измерялись флуктуации напряжения. Значения тока были взяты из линейной области прямой ветви ВАХ образцов. Схема измерения шумов состоит из источника питания с низким уровнем собственных шумов Panasonic HHR-9SGE, который обеспечивает постоянный ток через образец, усилителя Model-5184 Preamplifier и спектрального Фурье-анализатора Handyscope 3. Программное обеспечение Handyscope-3 синхронизируется с Windows 7. Данные Фурье-анализатора обрабатываются программой LabVIEW. Измерительная система размещена в изолированном от внешнего электромагнитного влияния пермаллоевом ящике.

3. Результаты и обсуждение

На рис.2 приведены ВАХ образцов 1 и 2 для структуры Fe/n-Si, когда ток протекает через объем образцов между контактами 1-3 (рис.1). ВАХ структур Cr/n-Si и W/n-Si имеют аналогичный вид и отличаются только величинами токов.

Как видно из рис.2, у обоих образцов ВАХ имеет вид экспоненты, что связано с протеканием тока через объем образца и образованием барьера Шоттки. Разница кривых на рис.2 обусловлена как различием площадей токоснимающих контактов, так и сопротивлением обоих образцов. В связи с тем, что образцы с различной площадью контактов были изготовлены не в одном технологическом процессе, сопротивления образцов с площадью контактов $2 \times 2 \text{ мм}^2$ были меньше по сравнению с образцами с площадью контактов $1.6 \times 2 \text{ мм}^2$ $(R_{2\times 2} \approx 6.0 \text{ кОм}, R_{1.6\times 2} \approx 8.1 \text{ кОм}).$



Рис.2. ВАХ образцов 1 и 2, когда ток протекает через объем образцов между контактами 1 и 3.

На рис.3 представлены спектры НЧ шумов флуктуаций сигнала образцов *I* и 2 при прохождении объемного тока между контактами *I*–3. Для описания поведения НЧ шумов отметим, что механизмы формирования этих шумов в полупроводниках, в основном, сводятся к поверхностному (модель Мак Уортера [22]) и объемному (модель, основанная на электрон-фононном взаимодействии [15,16,18-20]) характерам. Для описания поведения и выявления физической природы образования НЧ шумов в случае протекания объемного тока можно использовать универсальную эмпирическую формулу Хуга со спектральной зависимостью $S_{\mu} \sim 1/f^{\gamma}$ [15].



Рис.3. Шумовые спектры флуктуаций сигнала образцов 1 и 2 при прохождении тока через объем между контактами 1 и 3.

При объемном характере тока, как видно из рис.3, спектральная плотность шума образца 2 выше, чем у образца 1, а показатель степени γ образца 2 ($\gamma \approx 1.2$) ниже, чем у образца *1* ($\gamma \approx 1.7$). Это означает, что при протекании объемного тока одинаковой величины (значение тока составляло 0.1 мА) величина шума выше в случае структур с контактами с большей площадью, а величина частотного индекса γ меньше по сравнению с контактами с меньшей площадью. Предполагается, что рост уровня НЧ шумов для образцов с большей площадью контактов, в основном, обусловлен ростом поверхности контактов, так как уменьшение приложенного напряжения для поддерживания постоянного тока для случая большей площади не должно приводить к существенному увеличению уровня шумов. Отметим также, что с ростом площади контактов спектр шумов сглаживается.



Рис.4. ВАХ образцов 1 и 2, когда ток протекает через поверхность образцов между контактами 1 и 2.

На рис.4 представлены ВАХ обоих образцов для структуры Fe/n-Si, когда ток имеет поверхностный характер (ток измеряется между контактами 1 и 2, рис.1). В этом случае мы имеем дело с поверхностным током и ВАХ, как и следовало ожидать, имеет омический характер.



Рис.5. Шумовой спектр флуктуаций сигнала образцов 1 и 2 при прохождении поверхностного тока между контактами 1 и 2.

Спектральная плотность шума образца 2 выше, чем у образца 1, и величина γ у образца 2 принимает значение $\gamma \approx 0.6$, а у образца 1 $\gamma \approx 1.1$ (рис.5). Как при объемном, так и при поверхностном характере тока в режиме постоянного тока с ростом величины площади токоснимающего контакта уровень НЧ шума возрастает, а величина частотного индекса γ уменьшается.

На рис.6 представлены шумовые спектры образцов с одинаковыми величинами площадей контактов $1.6 \times 2 \text{ мм}^2$ (образцы *I*), но для разных контактных материалов в случае протекания тока через объемы образцов. Видно, что спектральная плотность шума образца с контактом из W выше, чем у образцов с контактами из Fe и Cr. Показатель степени γ образца с контактом из W ($\gamma \approx 0.7$) ниже, чем в случае Fe ($\gamma \approx 0.9$) и Cr ($\gamma \approx 1.3$).



Рис.6. Шумовые спектры флуктуаций сигнала между контактами 1 и 3 для структур W/n-Si, Fe/n-Si, Cr/n-Si.

Таким образом, независимо от характера токопрохождения (объемного или поверхностного) уровень НЧ шумов, как и показатель γ , сильно зависит от величины площади токоснимающего контакта и от типа контактных материалов.

Объемная модель НЧ шумов основана на электрон-фононном взаимодействии в объеме полупроводника. Рассеяние электронов на колебаниях решетки описывается с помощью испускания и поглощения фононов движущимися электронами [17]. Величина НЧ шума зависит от среднего коэффициента отражения длинноволновых акустических фононов ($A\Phi$) на границе раздела между полупроводником и контактирующим материалом [14-21].

На рис.7 приведены значения коэффициентов просачивания на границах раздела в системах Fe/n-Si, Cr/n-Si, W/n-Si [14], а на рис.8 – схема процессов отражения и просачивания AФ. Здесь $R_{\rm SS}$ и $R_{\rm MM}$ – коэффициенты отражения AФ, а $R_{\rm SM}$ и $R_{\rm MS}$ – коэффициенты просачивания AФ на границе раздела из

полупроводника в металл и обратно. Как видно из рис.7, коэффициент просачивания для АФ принимает минимальное значение в случае контактного материала из Cr (большой коэффициент отражения).



Рис.7. Значения коэффициентов просачивания АФ из кремния в металл и из металла в кремний [14]; v_L – скорость продольных фононов.



Рис.8. Схема, иллюстрирующая просачивание и отражение АФ на границе раздела металл-полупроводник.

Из рис.6 видно, что в структуре Cr/n-Si величина спектральной плотности шума ниже по сравнению со структурами Fe/n-Si и W/n-Si. Как показано в [14,16-21], один из основных механизмов формирования HЧ шумов обусловлен электрон-фононными взаимодействиями в объеме полупроводника. Чем меньше коэффициент R_{SM} , тем больше оставшихся в полупроводнике продольных АФ. В результате, в объеме полупроводника будет сохраняться квазиравновесное термодинамическое состояние между системами взаимодействующих электронов и АФ. Как видно на рис.7, уровень шумов в структуре с контактным материалом из хрома наименьший. Зависимость НЧ шума от величины площади металлического токоснимающего контакта в основном будет обусловлена количеством просачивающихся фононов из полупроводника в металл. С увеличением контактной площади увеличивается количество просачивающихся фононов из полупроводника в металл, нарушается термодинамическое квазиравновесие в объеме полупроводника, более интенсивным становится рассеяние электронов на фононах и уровень НЧ шумов растет. Такое объяснение поведения НЧ шумов в рамках электрон-фононного взаимодействия хорошо описывает поведение экспериментальных кривых на рис.4, 6 и 7.

Таким образом, выбором контактного материала и величины его площади можно управлять уровнем НЧ шумов в приборах, содержащих границу раздела металл–полупроводник.

Авторы выражают благодарность д.ф.-м.н., доценту ЕГУ С.В. Мелконяну за обсуждение работы и полезные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. В.И. Шашкин, А.В. Мурель. ФТП, 38, 574 (2004).
- 2. А.В. Клюев, Е.И. Шмелев, А.В. Якимов. Вестник Нижегородского Университета, **57**, 57 (2010).
- 3. R.T. Yung. Materials Science and Engineering, R35, 1 (2001).
- 4. C.R. Crowell, S.M. Sze. Solid-State Electronics, 9, 1035 (1966).
- 5. Р.В. Оганесян, Г.Д. Хондкарян, М.С. Алексанян, В.М. Аракелян, Б.О. Семерджян, В.М. Арутюнян, Ф.В. Гаспарян. Известия НАН Армении, 49, 241 (2014).
- 6. F.V. Gasparyan. Advanced Sensors for Safety and Security, NATO Science for Peace and Security Series B: Physics and Biophysics. Springer Science + Business Media Dordrecht, 2013, Chapter 11, pp. 139-150.
- 7. F.V. Gasparyan, V.M. Aroutiounian. Sensors & Transducers Journal, 137, 36 (2012).
- F.V. Gasparyan, A. Poghossian, S.A. Vitusevich, M.V. Petrychuk, V.A. Sydoruk, J.R. Siqueira Jr., O.N. Oliveira, A. Offenhäusser, M.J. Schöning. IEEE Sensors Journal, 11, 142 (2011).
- 9. Z. Mkhitaryan, F. Gasparyan, A. Surmalyan. Sensors & Transducers Journal, 104, 58 (2009).
- 10. F.-G. Bănică. Chemical Sensors and Biosensors: Fundamentals and Applications. Chichester, John Wiley & Sons, 2012.
- A. Poghossian, M.J. Schöning. Enciclopedia of Sensors. Stevenson Ranch, American Scientific Publisher, 2006, pp. 463-533.
- V.M. Aroutiounian, Z.H. Mkhitaryan, A.A. Shatveryan, F.V. Gasparyan, M.Zh. Ghulinyan, L. Pavesi, L.B. Kish, C.-G. Granqvist. IEEE Sensors Journal, 8, 786 (2008).
- 13. С. Зи. Физика полупроводниковых приборов. М., Мир, 1984.
- F.V. Gasparyan, H.V. Asriyan, S.V. Melkonyan, C.E. Korman. U.S. Patent Application for Letters Patent of the United States No. 61/332,408. Int. Publ. Date 10 November 2011. Int. Publ. Number WO 2011/140541 A2. Int. Application Number PCT/US201/035686.
- 15. F.N. Hooge. Physica, 60, 130 (1976).
- S.V. Melkonyan, V.M. Aroutiounian, F.V. Gasparyan, H.V. Asriyan. Physica B, 382, 65 (2006).
- 17. Sh. Kogan. Electronic Noise and Fluctuations in Solids. Cambridge University Press, 2008.
- 18. F.V. Gasparyan, S.V. Melkonyan, H.V. Asriyan, C.E. Korman, B. Noaman, A.H. Arakelyan, A.A. Shatvetyan, A.M. Avetisyan. Proc. 6th Int. Conf. on Semicond. Micro-

& Nano-Electronics, Tsakhcadzor, Yerevan, 2007, p. 153.

- S.V. Melkonyan, F.V. Gasparyan, H.V. Asriyan. Proceedings of SPIE, 6600, 66001K-(1–8). (2007).
- H.V. Asriyan, A.A. Shatveryan, V.M. Aroutiounian, F.V. Gasparyan, S.V. Melkonyan, Z.H. Mkhitharian, G. Ayvazyan. Proc. 3rd Int. Symp. On Fluctuations and Noise, Austin Texas USA, 2005, 5846-25, p. 192.
- S.V. Melkonyan, F.V. Gasparyan, V.M. Aroutiounian, H.V. Asriyan. Proc. 18th Int. Conf. on Noise and Fluctuations, Salamanca, Spain, 2005, 780, p. 87.
- 22. A. McWhorter. 1/f Noise and Germanium Surface Properties. In: Sem. Surf. Phys. RH Kingston, Univ. Penn. Press, 1957, pp. 207–215.

ՄԵՏԱՂ–ԿԻՍԱՀԱՂՈՐԴԻՉ ԿՈՆՏԱԿՏԻ ՑԱԾՐՀԱՃԱԽԱՅԻՆ ԱՂՄՈՒԿՆԵՐԸ

Հ.Դ. ԽՈՆԴԿԱՐՅԱՆ, Ֆ.Վ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ

Ուսունասիրվել են մետաղ–կիսահաղորդիչ կառուցվածքի ՎԱԲ-ը և ցածրհաձախային աղմուկները սենյակային ջերմաստիձանում։ Ստացված են Fe/*n*-Si, Cr/*n*-Si, W/*n*-Si հիմքի վրա պատրաստված Շոտկիի արգելքի ՎԱԲ-ը և ցածրհաձախային աղմուկների սպեկտրները։ ծույց է տրված, որ ինչպես ՎԱԲ-ը, այնպես էլ ցածրհաձախային աղմուկների հաձախային գործակիցը խիստ կախված են կոնտակտային մետաղի տեսակից և վերջինիս մակերեսի չափերից։ Բացահայտված են այն ֆիզիկական պրոցեսները, որոնք ազդում են ցածրհաձախային աղմուկների մակարդակի և վարքի վրա։ ծույց է տրված, որ ցածրհաձախային աղմուկների նվազեցման առումով քրոմի կիրառումը որպես կոնտակտային նյութ ավելի նպատակահարմար է, քան երկաթինն ու վոլֆրամինը։

LOW-FREQUENCY NOISES IN THE METAL–SEMICONDUCTOR CONTACT H.D. KHONDKARYAN, F.V. GASPARYAN

CVC and low-frequency noises of the metal-semiconductor structures at room temperature were investigated. The CVC and low-frequency noise spectra of the diode structures with Schottky barrier prepared on the base of Fe/n-Si, Cr/n-Si and W/n-Si are obtained. It is shown that the CVC, noise level and its frequency index are strongly dependent on the choice of contact metal, and its surface area value. There are identified physical processes that are affecting on the level and behavior of low-frequency noises. It was found out that in term of reducing the level of low-frequency noises, the use of chromium as a contact material is the best compared with iron and wolfram.