Известия НАН Армении, Физика, т.43, №3, с.204-210 (2008)

УДК 621.382

ШУМЫ В ПОРИСТЫХ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУРАХ В ВОЗДУХЕ И В УСЛОВИЯХ ГАЗОВОЙ АДСОРБЦИИ

З.О. МХИТАРЯН, А.А. ШАТВЕРЯН,
В.М. АРУТЮНЯН, Ф.В. ГАСПАРЯН

Ереванский государственный университет, Армения

(Поступила в редакцию 17 января 2008 г.)

Исследованы низкочастотные шумы в образцах со слоем пористого кремния, имеющих структуру Au/PS/SCS/Al в диапазоне частот 1–500 Гц при комнатной температуре. Оценены численные значения шумового параметра $\alpha_н$, обнаружена зависимость ($_н$ от состава газовой среды, в которой находится образец. Обсуждены возможные причины наблюдаемых больших значений $\alpha_н$ для образцов в воздухе и возрастания ($_н$ в условиях газовой адсорбции. При введении в воздух окиси углерода изменяется также форма спектра.

1. Введение

Как известно, на низких и инфранизких частотах в полупроводниках и полупроводниковых приборах преобладает фликкер-шум, спектральная плотность мощности которого с уменьшением частоты возрастает по закону $1/f^{\gamma}$, где γ – частотный индекс и имеет значение порядка единицы. Вопрос о происхождении и механизмах низкочастотного шума в полупроводниках широко обсуждается в научно-технической литературе на протяжении не одного десятка лет, но и сейчас эта проблема далека от универсального решения. Предложены модели, которыми можно описывать данные измерения низкочастотных шумов в различных материалах и структурах. Эти модели можно объединить в три основные группы [1-3]:

1) Теория флуктуаций числа носителей. В этой теории, предложенной впервые Мак-Уортером [4], шум приписан случайным захватам носителей заряда в ловушки и случайным освобождениям из ловушек оксидного слоя. Каждая отдельная ловушка ведет к лоренцевскому спектру, и в случае однородного пространственного распределения ловушек лоренцевские спектры суммируются и дают спектр $1/f$.

2) Теория флуктуаций подвижности. В сравнительно массивных образцах определяющую роль в формировании $1/f$ шума играют флуктуации подвижности носителей заряда, обусловленные рассеянием электронов на акустических фононах [2,3,5]. В рамках этой модели в последние годы интенсивно развивается также теория $1/f$ шума, связанная с флуктуациями функции распределения электронов [6].

3) Объединенная шумовая модель. Объединенная модель, предложенная в [7-9],

является комбинацией обеих теорий – флуктуаций числа носителей и флуктуаций подвижности. Согласно этой теории, флуктуирует не только число носителей заряда, но также и их подвижность.

На эмпирическом уровне шумовая спектральная плотность S_U, определяемая флуктуациями напряжения, приложенного к образцу, может быть описана формулой

$$S_U = \frac{\alpha_H U^{\delta}}{N f^{\gamma}}, \qquad (1)$$

где N – число свободных носителей в образце, α_H – безразмерный параметр Хуга, U – напряжение на исследуемой структуре, для линейного участка ВАХ показатель степени $\delta \approx 2$.

Численное значение α_H, его температурная зависимость и зависимость от характеристик материала были предметом теоретического обсуждения в течение долгого времени. Заметим, что в рамках модели флуктуаций подвижности в работах [3,8-10] получены аналитические выражения для α_H для конкретного случая полупроводника *n*-типа, но исчерпывающие ответы на эти вопросы в литературе отсутствуют.

Пористый кремний (PS) является представителем наноразмерных гетероструктур и широко исследуется с целью технического применения в различных отраслях народного хозяйства. Изучение электрофизических свойств PS в различных газовых средах [1-13] показало, что его свойства, благодаря нанометровым размерам кристаллитов и большой общей площади их поверхности, очень чувствительны к внешней газовой среде. Шумовые свойства PS с излучающим PS в воздушной среде исследованы в [14,15]. В обеих работах получено, что низкочастотный шум имеет $1/f$ характер. Шумовые свойства структур с PS при адсорбции активных газов, как показывает обзор литературы, не исследованы вообще. Между тем следует отметить, что шумовая спектроскопия может быть ценным инструментом для анализа и качественной оценки структур и приборов на основе PS. В наших предыдущих работах [16-18] исследования низкочастотного шума при адсорбции окиси углерода были проведены для PS с пористостью 50%.

Целью настоящей работы было экспериментальное исследование низкочастотного шума в слоях PS с пористостью 73% и определение значений α_H и γ из экспериментальных данных.

2. Техника эксперимента и образцы

Измерения шумовых характеристик проводились методом прямой фильтрации при комнатной температуре. Шумовые измерения включали в себя прямое измерение шумового напряжения при прямосмещенных образцах. В эксперименте использовалась измерительная установка для исследования шумов в системе полупроводник–газ в диапазоне частот 1–500 Гц, содержащая малошумящий предварительный усилитель и анализатор спектра с выходом на компьютер. Установка подробно описана в работах [19,20]. Построение спектров шума осуществлялось с помощью программы «Origin». При измерениях образец помещался в стеклянную газовую ячейку, которая позволяла проводить шумовые измерения в сухом воздухе с введением в него различных газов или паров жидкости. Внутри ячейки на подложке

монтировались образец и контакты.

Исследовались образцы со слоем пористого кремния, имеющим структуру Au/PS/SCS/Al, где через SCS обозначен монокристаллический кремний. Слой PS формировался электрохимическим травлением на подложке из сильно легированного (ρ = 0.01 Ω см) кремния ρ^+-типа с кристаллографической ориентацией (100). На тыловую часть подложки для создания омического контакта к структуре напылялся слой алюминия толщиной 20–30 нм. Верхний контакт из золота напылялся на поверхность PS и имел форму круга с диаметром 1,5 мм. Выводы к верхнему контакту клеились с помощью специального клея на основе серебра для изготовления контактов марки «Conductive Epoxy». Слой пористого кремния имел толщину 3 мкм, а пористость равнялась 73%. В образцах были сформированы поры нанометровых размеров. Тонкая высокопористая структура, подобная нашим образцам, показана на рис.1 и заимствована из работы [21].

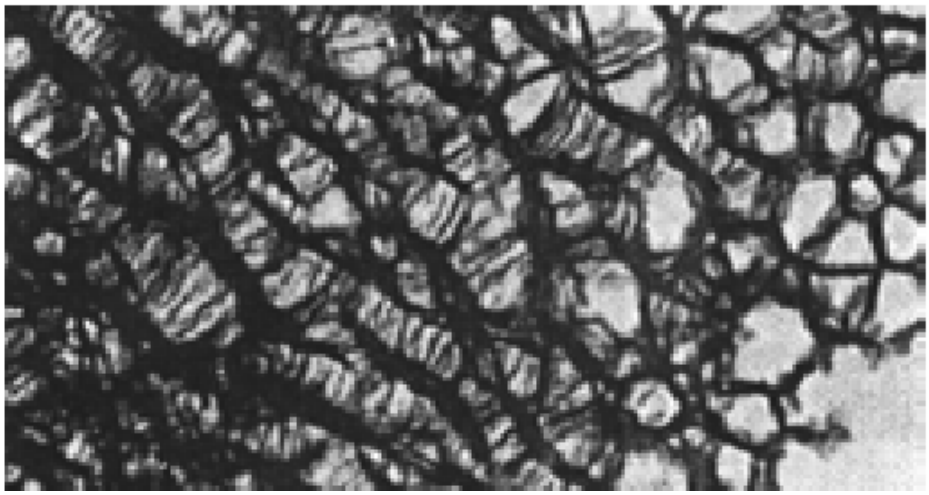

Рис.1. Изображение структуры пористого кремния на ρ-Si, полученное на просвечивающем электронном микроскопе. Размеры пор составляют около 50 нм, а кремниевые нити (темные области) имеют диаметр менее 10 нм

Нами получено, что вид ВАХ в воздухе имеет, как и в случае образцов с PS 50% пористости, выпрямляющий характер, но есть отличия: в образцах PS с 73% пористости, по сравнению с образцами со слоем PS с 50% пористости, наблюдается резкое уменьшение проводимости и отсутствие насыщения обратного тока на ВАХ. Результаты подробных исследований ВАХ образцов PS с 73% пористости представлены в работе [22].

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

На рис.2a,b,c приведены частотные зависимости нормализованной спектральной плотности напряжения шумов $S_U(f)/U^2$. Графики измерены в частотном диапазоне 1–500 Гц при комнатной температуре. Напряжение шумов на образце измерялосъ при прохождении через него постоянного прямого тока (режим генератора тока). Спектры приведены в двойном логарифмическом масштабе. Шумовые спектры в разных газовых средах в области низких частот отличаются количественно и имеют различный вид. Как видно из приведенных графиков, с введением в воздух окиси углерода показатель γ в частотной зависимости спектральной плотности напряжения шумов растет: γ (воздух) = 0,5; γ (воздух + 0,4% CO) = 1, γ (воздух + 2% CO) = 1,3.

Параметр ($_H$ определялся из формулы (1) на частоте 10 Гц. Значения S_U, U^δ и γ определялись экспериментально из приведенных в работе спектров, а значение N оценивалось из формулы $N = l^2/e\mu R$, где l – толщина слоя PS, e – заряд электрона, R – сопротивление образца, μ – подвижность дырок, равная $7{,}4 \times 10^{-3}$ см^2/В с [23].

Получено, что значение α_H в воздухе порядка 1,8, в воздухе с 0,4% CO – 4,8, в воздухе с 2% CO – 14. Если сравнивать со значениями α_H для кристаллических материалов (в частности, кремния), то α_H на несколько порядков выше по величине, чем в кристаллических структурах. Но, как отмечено в работе [15], в многочисленных исследованиях было показано, что в неупорядоченных структурах (в том числе и в PS) α_H может принимать значения от 1 до 10^4. Одна из причин этого – очень низкая подвижность носителей заряда в неупорядоченных материалах, к которым относится и пористый кремний. К большим значениям α_H может также привести неоднородная плотность тока через образец [24], в нашем случае вызванная нанокристаллитами PS, образующими кораллообразную систему кремниевых нитей переменного сечения. Получено, что значение α_H меняется при введении в воздух окиси углерода, причем с увеличением в воздухе концентрации CO имеет место возрастание значения α_H. Это легко объяснить, если учесть следующее. Известно, что принцип действия сенсоров обсуждаемого типа основан на явлении изменения электрического сопротивления тонкопленочного полупроводника при адсорбции на его поверхности молекул различных газов. Возможно, что в запрещенной зоне чувствительного элемента, состоящего из полупроводника, при адсорбции на его поверхности газов, которые мигрируют по порам к границе раздела PS/SCS, образуются дополнительные донорные или акцепторные уровни. В этом случае поверхностные состояния с уровнями энергии, расположенными между валентной зоной и зоной проводимости,

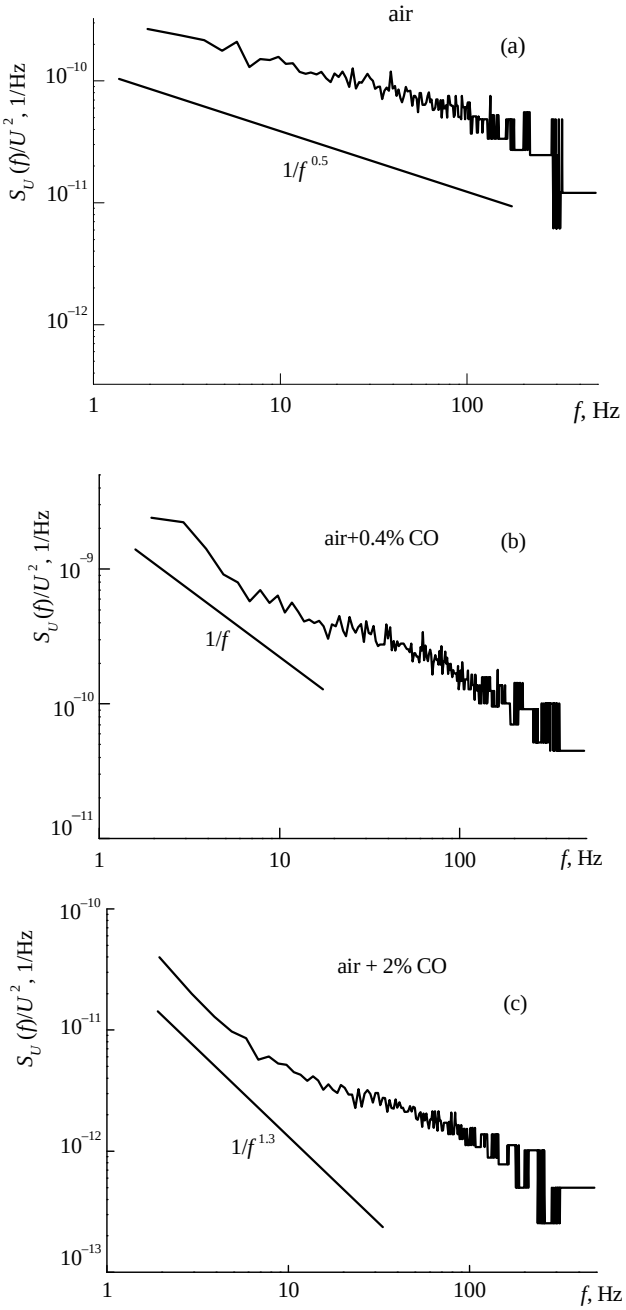

Рис.2. Шумовые спектры образцов со слоем пористого кремния, имеющих структуру Au/PS/SCS/Al.

создают дополнительные рекомбинационные центры с различными временами жизни носителей. Чем больше концентрация молекул в окружающем пленку газе, тем больше число адсорбированных на поверхности молекул, и тем больше плотность ловушек, расположенных

вблизи границы раздела PS/SCS. Высота гетеробарьера при газовой адсорбции, как показано в работе [22], становится все ниже с увеличивающейся концентрацией адсорбата, так что эффект потенциального барьера, по сравнению с увеличивающейся концентрацией поверхностных ловушек, становится менее важным. Как следствие, из-за процессов захвата и испускания носителей заряда возрастают не только флуктуации числа носителей заряда, но и флуктуации их подвижности. При этом немаловажную роль может играть изменение физического состояния границы раздела, приводящее к перераспределению перколяционных точек на ней для определенных фононных мод, тем самым изменяя характер электрон-фононного взаимодействия [25].

4. Заключение

1. Оценены численные значения шумового параметра $\alpha_н$, которые находятся в согласии с типовыми значениями $\alpha_н$, найденными для неупорядоченных структур.

2. Обнаружена зависимость шумового параметра $\alpha_н$ от состава газовой среды, в которой находится образец – в условиях газовой адсорбции имеет место возрастание $\alpha_н$.

3. Обсуждены возможные причины больших значений $\alpha_н$ для образцов в воздухе и возрастания $\alpha_н$ в условиях газовой адсорбции.

4. При введении в воздух окиси углерода в области частот 1–10 Гц обнаружен рост показателя формы спектра γ в зависимости $1/f^{\gamma}$.

Авторы выражают благодарность М.З.Гулиняну за предоставленные образцы. Работа выполнена при поддержке гранта ISTC A-1232 и Армянской национальной программы «Полупроводниковая наноэлектроника».

ЛИТЕРАТУРА

1. **A.J.Scholten, L.F.Tiemeijer, R.Langevelde, R.J.Havens, A.T.A. Zegers-van Duijnhoven, V.C. Venezia**. Electron Devices, **l.5,** 618 (2003).
2. **S.V.Melkonyan, F.V.Gasparyan, H.V.Asriyan.** Main sources of electron mobility fluctuations in semiconductors. SPIE 4th Int. Symp. Fluctuation and Noise, 20–24 May 2007, Florence, Italy, Proc. of SPIE, **6600**, 66001K-1 (2007).
3. **S.V.Melkonyan, V.M.Aroutiounian, F.V.Gasparyan, H.V.Asriyan.** Physica B: Physics of Condensed Matter, **382**, 65 (2006).
4. **L.McWorther**, in Semiconductor Surface Physics. Philadelphia, Univ. of Pennsylvania Press, 1957, p.207.
5. **N.Hooge, T.G.M.Kleinpenning, L.K.J.Vandamme.** Rep. Progr. Phys., **44**, 497 (1981).
6. **S.V.Melkonyan, V.M.Aroutiounian, F.V.Gasparyan, C.E.Korman.** Physica B: Physics of Condensed Matter, **357**, 398 (2005).
7. **K.K.Hung, P.K.Ko, C.Hu, Y.C.Cheng**. IEEE Trans. Electron Devices, **37,** 654 (1990).
8. **K.K.Hung, P.K.Ko, C.Hu, Y.C.Cheng.** IEEE Trans. Electron Devices, **37,** 1323 (1990).
9. **G.Ghibaudo, O.Roux, C.Nguyen-Duc, F.Balestra, J.Brini.** Phys. Stat. Sol. (a), **124,** 57 (1991).
10. **H.V.Asriyan, F.V. Gasparyan.** Mod. Phys. Lett. B, **18,** 427 (2004).
11. **Д.И.Биленко, О.Я.Белобровая, Э.А.Жаркова, И.Б.Мысенко, Е.И.Хасина**. ФТП, **36**, 490 (2002).
12. **С.В.Слободчиков, Д.Н.Горячев, Х.М.Салихов, О.М.Сресели.** ФТП, **33,** 340 (1997).
13. **Е.А.Тутов, М.Н.Павленко, И.В.Протасова, В.М.Кашкаров.** Письма в ЖТФ, **28,** №17, 45 (2002).
14. **B.Szentpбli, P.Gottwald, T.Mohacsy, K.Molnar, I.Barsony.** Proc. SPIE, **5113,** 398 (2003).
15. **I.Bloom, I.Balberg.** APL, **74,** 1427 (1999).

16. **Z.H.Mkhitaryan, A.A.Shatveryan, V.M.Aroutiounian, M.Ghulinyan, L.Pavesi.** Extended Abstracts of the 5th Int. Conf., Sitges-Barcelona, 2006, p.254.
17. **Z.H.Mkhitaryan, A.A.Shatveryan, V.M.Aroutiounian, M.Ghulinyan, L.Pavesi, L.B.Kish, C.C.Granquist.** E-MRS IUMRS ICEM 2006 Spring Meeting. Symposium C. Silicon Nanocrystals for Electronic and Sensing Applications. Nice, France, 2006, p.27.
18. **Z.H.Mkhitaryan, A.A.Shatveryan, V.M.Aroutiounian, M.Ghulinyan, L.Pavesi.** Phys. stat. sol. (c), **4**, 2063 (2007).
19. **Z.H.Mkhitaryan, A.A.Shatveryan, G.A.Egiazaryan, H.V.Asriyan**. Proc. of the fifth international conference Semiconductor Micro- and Nanoelectronics, Agveran, Armenia, 2005, p.32.
20. **А.А.Шатверян**. Изв. НАН Армении, Физика, **41**, 129 (2006).
21. **D.Turner.** J. Electochem. Soc., **5**, 402 (1958).
22. **З.О.Мхитарян, А.А.Шатверян, В.М.Арутюнян**. Изв. НАН Армении, Физика, **42,** 236 (2007).
23. **Н.С.Аверкиев, Л.П.Казакова, Э.А.Лебедев, Н.Н.Смирнова.** ФТП, **35,** 607 (2001).
24. **A.Mercha, L.K.J.Vandamme, L.Pichon, R.Carin, O.Bonnaud.** J. Appl. Phys., **90,** 4019 (2001).
25. **S.V.Melkonyan, F.V.Gasparyan, V.M.Aroutiounian, H.V.Asriyan.** 1/f-type noise in view of phonons interface percolation dynamics. 18th Int. Conf. on Noise and Fluctuations (ICNF 2005), September 19–23, 2005; Salamanca, Spain, p.87.

Ի² ԿՈՏԿԵՆ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԱՅԻՆ ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐՈՒՄ ԱՂՄՈՒԿՆԵՐԸ ՕԴՈՒՄ ԵՎ ԳԱԶԱՅԻՆ ԱԴՍՈՐԲՑԻԱՅԻ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ

Զ.Հ. ՄԽԻԹԱՐՅԱՆ, Ա.Ա. ՇԱՏՎԵՐՅԱՆ,
Վ.Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Ֆ.Վ. ԳԱՍՊԱՐՅԱՆ

Ուսումնասիրված են ցածր հաճախային աղմուկները ծակոտկեն սիլիցիումի շերտ ունեցող նմուշներում, որոնք ունեին Au/PS/SCS/Al կառուցվածքը: Չափումները կատարված են սենյակային ջերմաստիճանում՝ 1–500 Հց հաճախային տիրույթում: Գնահատված է աղմուկային գործակցի՝ $\alpha_{\text{ն}}$-ի թվային արժեքը և հայտնաբերված է $\alpha_{\text{ն}}$-ի կախվածությունը գազային միջավայրի բաղադրությունից: Ցույց է տրված, որ գազի առկայության դեպքում փոխվում է նաև հաճախության ցուցիչը:

NOISE IN POROUS SILICON STRUCTURES IN AIR AND IN GAS ADSORPTION CONDITIONS

Z.H. MKHITARYAN, A.A. SHATVERYAN,
V.M. AROUTIOUNIAN, F.V. GASPARYAN

Spectral density of the low-frequency noise in samples with a layer of porous silicon, having the Au/PS/SCS/Al structure were measured in the frequency range 1–500 Hz at room temperature. Numerical values of the Hooge parameter α_H are estimated, and the dependence of α_H on the composition of the gas environment in which a sample is placed is revealed. The possible reasons of observed high values of α_H for samples in air and the tendency of increase in α_H in conditions of gas adsorption are discussed. With introduction of carbon oxide in air the frequency index γ in the $1/f^{\gamma}$ dependence increases.