

Пики избыточных шумов диодных структур на пористом кремнии

Е. С. Демидов¹⁾, Н. Е. Демидова, В. В. Карзанов, В. Н. Шабанов

Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 603600 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 19 апреля 2002 г.

Приводятся результаты попытки экспериментального наблюдения при комнатной температуре осцилляций напряжения, связанных с дискретным туннелированием дырок в пористом кремнии (ПК). Исследовались шумовые характеристики диодных структур с прослойкой ПК, сформированного на монокристаллах сильно легированного бором кремния. Обнаружены пики избыточных шумов на частотах ~ 1 МГц, на которых следовало ожидать одноэлектронные осцилляции. Пиковая мощность шума возрастала с ростом тока по степенному закону с показателем ~ 2.5 и при плотности тока 0.15 А/см² на 3–4 порядка превышала мощность шума приемника. Сложные вид спектра шумов и его расширение в область высоких частот с ростом тока объясняются трехмерностью системы кремниевых наноразмерных гранул, вкрапленных в диэлектрическую двуокись кремния в ПК.

PACS: 72.80.Ng

Пористый кремний (ПК) как представитель наноразмерных 1D, 0D гетероструктур наиболее широко исследуется в связи с его люминесцентными свойствами и возможностями применения в оптоэлектронике [1, 2]. Вместе с тем, имеются предпосылки и предварительные эксперименты, позволяющие полагать, что ПК может быть подходящим объектом для исследования явления дискретного туннелирования электронов или дырок и развития нового поколения наноэлектроники – одноэлектроники. В работе [3] приведены соображения, согласно которым топология пор и частичное окисление ПК приводят к формированию анизотропного материала с гирляндами из гранул кремния диаметром в единицы нанометров, вкрапленных в диэлектрическую двуокись кремния. Преимущественное наличие в ПК, кроме воздуха, двух твердых фаз Si и SiO₂ было экспериментально показано в [4]. Из-за малой электрической емкости между гранулами возможно проявление кулоновской блокады туннелирования электронов или дырок вдоль гирлянд. На вольт-амперных характеристиках диодных структур с прослойкой ПК, сформированного на p^+ Si (КДБ-0.01, КДБ-0.005) кристаллах, при комнатной температуре наблюдались в [3] ступеньки тока, которые связывались с дискретным туннелированием дырок. Настоящая работа является продолжением этих исследований. Согласно теории дискретного туннелирования [5], вследствие не коммутативности операторов заряда и тока, напряжение на туннельном контакте с проводящей гранулой в диэлектрическом промежутке между металли-

ческими обкладками при прохождении в пересчете на одну гранулу тока I_1 осциллирует с частотой

$$f = I_1/e, \quad (1)$$

где e – заряд электрона. Если, как и в [3], считать, что расстояние между гирляндами гранул в ПК около 10 нм, то в диодной структуре с прослойкой ПК и площадью сечения контакта 0.6 мм² при прохождении тока $I = 1$ мА, согласно (1), следует ожидать осцилляции напряжения с частотой около 1 МГц. В настоящей работе предпринята попытка обнаружить одноэлектронные колебания напряжения на частотах ~ 1 МГц.

Исследовались диодные структуры с прослойкой ПК металл(In)-ПК-Si p^+ -металл(In), изготовленные по более простой и экспрессной, чем в [3], технологии и с использованием еще более сильно легированных бором дырочных монокристаллов кремния КДБ-0,001. Слои ПК формировались распространенным способом [1] путем анодного растворения кремния на поверхности пластин с ориентацией (110) в растворе, содержащем равные по объему количества 48% HF и этанола C₂H₅OH при плотности тока 10 мА/см² в течение 10 мин. После травления образцы промывались в деионизованной воде, потом в этаноле, затем высушивались на воздухе. Металлический индиевый контакт к ПК имел площадь 0.5 – 0.7 мм². Другой индиевый контакт был на свободной от ПК части поверхности образцов кремния. Вследствие применения сильно легированного кремния такие контакты к сплошному кремнию приносили последовательное сопротивление в диодную структуру много меньшее, чем сопротивление пористого кремния.

¹⁾e-mail: demidov@phys.unn.runnet.ru

Вольт-амперные характеристики снимались по точкам на постоянном токе или в периодическом режиме с частотой 100 Гц на характеристографе TR-4805. Для наблюдения осцилляций напряжения на диодных структурах использовалась обычная для измерения шумов двухполюсная радиоэлектронная аппаратура. Ток в диодной структуре задавался источником регулируемого стабилизированного напряжения с последовательным сопротивлением 4.7 кОм. Переменное напряжение на диодной структуре регистрировалось супергетеродинным приемником измерителя полных сопротивлений Л2-7 с входным сопротивлением 4.7 кОм, полосой пропускания $\Delta f = 6$ кГц и линейным детектором на выходе. Для калибровки аппаратуры применялся генератор Г4-158. Измерение шумов производилось по точкам в диапазоне частот (0.4–10) МГц. Собственный коэффициент шума приемника в этой полосе частот не превышал 5 дБ.

Процедура измерений электрических характеристик диодных структур с ПК была усложнена тем, что вольт-амперные характеристики их существенно изменялись в процессе хранения на воздухе вследствие окисления ПК. Об окислении свидетельствовало возрастание падения напряжения на структуре при фиксированном токе при обеих полярностях. Наиболее быстрые изменения происходили в первые часы после формирования ПК. Процесс замедлялся через сутки. Поэтому измерения шумовых характеристик структур производились, начиная со вторых суток в течение трех дней. Кроме того, через сутки после изготовления ПК, в структурах при токах свыше 0.3 мА наблюдалось явление накопления заряда в ПК при прохождении тока. Это проявлялось в гистерезисе при снятии вольт-амперных характеристик по точкам. Гистерезис отсутствовал при регистрации $I-U$ -зависимостей на характеристографе с периодом развертки 100 Гц. Характеристики были гладкими безгистерезисными, но деформировались с течением времени. При отрицательной полярности на индиевом контакте на ПК ток диодной структуры уменьшался в течение 1.5–2 мин приблизительно в два раза, а при положительной полярности возрастал в 3–5 раз в течение 3–5 мин в зависимости от величины максимального тока.

На рис.1 показаны статические вольт-амперные характеристики одной из диодных структур с ПК, для которой на рис.2 и 3 приведены шумовые спектры при фиксированных частотах. Они построены по пути возрастания тока по установившимся значениям падения напряжения при фиксированных величинах I , при которых измерялся шум. Как видно из

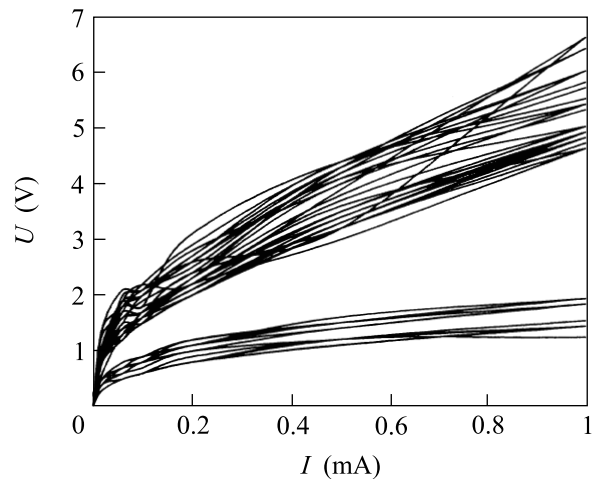


Рис.1. Вольт-амперные характеристики диодной структуры с прослойкой пористого кремния. Нижнее семейство кривых – “прямая” ветвь, верхнее – “обратная” ветвь. Сдвиг кривых вверх в обоих семействах связан с окислительным старением пористого кремния

рис.1, вольт-амперные характеристики нелинейные, несимметричные к направлению тока. Более высокая проводимость имеет место при приложении по-

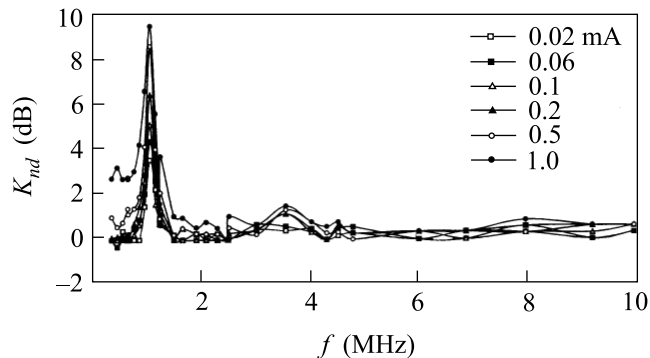


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента K_{nd} шума диодной структуры с прослойкой пористого кремния в прямом направлении при различных токах

ложительного напряжения к кремниевой подложке, когда происходит инжекция дырок из p^+-Si подложки в ПК. Соответствующие этой полярности ветви вольт-амперных характеристик рис. 1 условно названы прямыми, ветви противоположной полярности – обратными. Участки с отрицательным дифференциальным сопротивлением на рис.1 проявляются лишь при медленном изменении тока и обусловлены вышеуказанным эффектом накопления заряда. При периоде 10 мс регистрации $I-U$ -кривых участков с от-

рицательными наклонами нет. Более подробно $I-U$ -динамика будет обсуждена в другом сообщении.

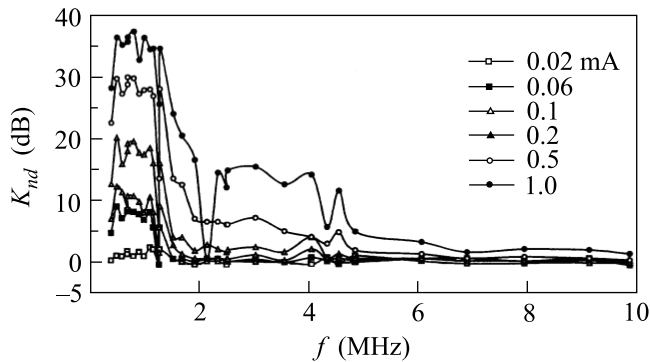


Рис.3. То же, что и на рис.2 для обратного направления тока

На рис.2 и 3 соответственно для прямой и обратной полярностей постоянного смещения приведены семейства спектральных зависимостей условного коэффициента шума K_{nd} при различных фиксированных токах. Условным он назван, поскольку определялся как $20\lg(U_{nd}/U_{ns})$, где U_{nd} — усредненное по времени в течение около 10с напряжение на выходе детектора при подключенной диодной структуре, U_{ns} — аналогичная величина измерительной системы при отключенной диодной структуре. Для определения истинного коэффициента шума необходимо было бы учитывать дифференциальное сопротивление диодной структуры, которое, как видно на рис.1, существенно зависит от тока для обеих полярностей смещения.

Как видно на рис.2 и 3, при пропускании тока через диодную структуру с прослойкой ПК проявляется неоднородный спектр шума в диапазоне 0.4–10 МГц. В прямом направлении наблюдается острый пик осцилляций с максимумом около частоты 1.1 МГц и при токе 1 мА с амплитудой, на порядок превышающей мощность шумов приемника. Если полагать, что дифференциальное сопротивление диода, согласно рис.1, при этом токе около 200–300 Ом, то есть на порядок меньше входного сопротивления приемника, истинная мощность шума диодной структуры оказывается на три порядка выше мощности шума приемника и имеет максимум коэффициента шума около 30 дБ. В обратном направлении, согласно рис.1, диодная структура при токах 0.5–1 мА имеет дифференциальное сопротивление, близкое к входному

сопротивлению приемника, и условный коэффициент шума с точностью в единицу децибел совпадает с истинным. Здесь максимум шумов также находится в районе 1 МГц. Амплитуда шумов по мощности при токе в 1 мА в этой полосе частот на четыре порядка превышает мощность шума приемника. На спектральной характеристике наблюдается воспроизводимая при разных токах тонкая структура спектра, при $I = 0.5-1$ мА появляется полоса избыточных шумов на частотах до 5 МГц. Оценка зависимости мощности избыточных шумов диодной структуры от тока показала, что эта мощность в максимуме растет с током приблизительно по степенному закону и пропорциональна $I^{2,5}$.

Обнаруженные пики избыточных шумов оказались в районе 1 МГц, то есть при частотах, при которых, согласно (1), при токе 1 мА следовало ожидать одноэлектронных осцилляций напряжения, связанных с дискретным туннелированием электронов. Однако не наблюдается простое, согласно (1), пропорциональное возрастание частоты осцилляций с ростом тока. Имеет место на рис.3 более сложное с ростом тока расширение спектра в область более высоких частот. Возможно, это связано, согласно [3], с трехмерностью системы гирлянд гранул в ПК с сотнями гранул по толщине слоя ПК. Удивительно стабильный пик 1.1 МГц при прямом смещении на рис.2 и воспроизводимая тонкая структура пиков около 1 МГц при обратном смещении на рис.3 при изменении тока в 50 раз свидетельствуют о внутренних резонансных свойствах ПК. Индуктивный вклад, вероятно, обусловлен присущим дискретному туннелированию запаздывающим фазовым сдвигом тока сквозь гранулы относительно изменения заряда на них.

Работа выполнена при поддержке гранта INTAS # 000-0064.

1. O. Bisi, S. Ossicini, and L. Pavesi, *Surf. Sci. Rep.* **38**, 1 (2000).
2. З. Ф. Красильник, в *Сб. тез. докл. V Российской конференции по физике полупроводников*, т. 1, 2001, с. 15.
3. Е. С. Демидов, В. В. Карзанов, В. Г. Шенгуров, *Письма в ЖЭТФ* **67**, 794 (1998).
4. М. И. Страшников, В. Л. Возный, В. Я. Резниченко, В. Я. Гайворонский, *ЖЭТФ* **120**, 409 (2001).
5. Д. В. Аверин, К. К. Лихарев, *ЖЭТФ* **90**, 733 (1986).