

К. ф.-м. н. А. Г. ГОЛОВКО

Украина, г. Херсон, НПФ «Артур»
E-mail: argo_m@ukr.net

Дата поступления в редакцию
12.12 2003 г. — 24.02 2004 г.

Оппонент К. ф.-м. н. С. Д. ВОТОРОПИН
(НИИПП, г. Томск)

МЕХАНИЗМ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ШУМОВЫХ МАКСИМУМОВ В ЭЛЕМЕНТАХ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ВОЛЬТ-АМПЕРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Полученные результаты направлены на раскрытие связи между дефектностью структур, надежностью образцов и их шумовыми характеристиками.

В период становления отечественной микроэлектроники в качестве важнейших стояли как проблема проектирования и изготовления микросхем, так и проблема обеспечения их надежности. Последняя в значительной степени была решена усилиями Центрального бюро применения интегральных микросхем МЭП СССР (г. Москва) введением специальных программ технологических тренировок и испытаний с целью отбраковки потенциально ненадежных микросхем [1]. Одновременно велись поиски неразрушающих методов контроля полупроводниковых приборов и микросхем с целью экспрессного прогнозирования их надежности. Весьма привлекательной для этой цели предполагалась возможность использования так называемых « $1/f$ -шумов» [2]. И это имело под собой основу, т. к. дефекты структуры, загрязнение, действительно, приводят к повышению уровня шумов [3]. Судя по всему, интерес к таким поискам до сих пор не иссяк (см. напр. [4]).

Однако практика показала, что всевозможные очистки, совершенствование технологий и структуры полупроводников не приводят к ожидаемому избавлению от $1/f$ -шумов. Даже бездислокационный кремний обладает значительными шумами, избавиться от которых невозможно. Пересмотр первоначальных взглядов на связь шумов и дефектов стал неизбежным. Однако сначала необходимо было заняться раскрытием физики флуктуационных превращений и понять причины появления непредвиденных результатов при прогнозировании надежности по шумам. Как впоследствии была решена эта задача, излагается в данной работе.

Сначала для проведения исследований нам потребовалось существенно улучшить точность и чувствительность измерительной аппаратуры. Первые же измерения, проведенные на ней, показали, что перед пробоем p - n -переходов уровень шумов сначала несколько снижается [5—7], и лишь затем резко возрастает. Это видно из **рис. 1**. На нем также представлены значения среднеквадратичных отклонений. Их низкий уровень гарантирует, что наблюдаемое понижение шумов значимо, и его наличие не вызывает сомнений. Следовательно, приближение быстрого

пробоя шумов не выявляют повышением своего уровня. Поэтому их использование для прогнозирования времени наступления пробоя p - n -переходов требует особой осторожности.

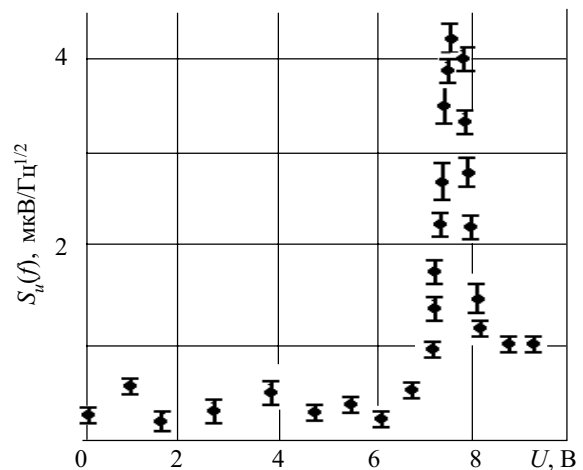


Рис. 1. Низкочастотные шумовые уровни в обратносмещенном p - n -переходе

Следующим этапом стали исследования барьеров Шоттки и p - n -переходов — основы микросхем. Они показали, что по мере роста тока шумов сначала быстро растут, достигают максимума и затем плавно уменьшаются [8—10]. Читатели "ТКЭА" такую же, но более тщательно выполненную, кривую могут увидеть в работе [11]. Мы первыми наблюдали весь ход преобразований шумов из тепловых в развитые токовые и уже могли судить о сущности установленной зависимости. Нами было найдено ее аналитическое выражение, показавшее, что характер изменения «текущего спектра» низкочастотных флуктуаций напряжения $S_u(f)$ или мгновенных значений флуктуаций напряжения $\delta u(t)$ подчиняется токовой зависимости произведения дифференциального сопротивления образца r_d и падения напряжения на нем U , т. е. $r_d U$ [11—13]:

$$S_u(f) = S_g(f) r_d U; \quad (1)$$

$$\delta u(t) = -\delta g(t) r_d U, \quad (2)$$

где $S_g(f)$ — «текущий спектр» флуктуаций проводимости образца; $\delta g(t)$ — элементарная флуктуация электропроводности.

Эти выражения являются отражением установленного нами [12] физического принципа преобразования средне- и низкочастотных флуктуаций в электрических цепях.

В рамках традиционных представлений о прямой связи повышения токовых шумов с дефектами изделий следовало бы предполагать, что причиной оговоренного столь мощного роста шумов есть некоторые неизвестной природы деградационные процессы. Однако на практике, как показали наши исследования, «очиститься» от этого максимума совершенно невозможно никакими средствами, включая изменение типа полупроводникового материала, уровня легирования, металла выпрямляющего контакта, очистки поверхности, применения сколов в вакууме и т. д. Потенциальный барьер оказывался одинаково надежен и при работе в режиме микротоков, и при номинальных смещениях, хотя уровень шумов при этом существенно различался.

Разгадка несоответствия уровня шумов предполагаемому уровню надежности оказалась весьма простой, но не полностью совместимой с известными взглядами на природу токовых шумов [14—18]. Так, в соответствии с (1) для барьеров Шоттки видно, что интенсивность первоисточника флуктуаций напряжения (т. е. электропроводности образца $S_g(f)$) не зависит от смещения. Элемент же электрической цепи с нелинейной ВАХ (т. е. барьер) преобразует эти флуктуации пропорционально произведению $r_d U$, т. е. по закону (1). Выходит, что сам источник флуктуаций работает совершенно стабильно, без протекания в нем деградационных процессов, а электрическая цепь за счет энергии внешнего источника питания и за счет особенностей преобразования резко меняет интенсивность флуктуаций напряжения в зависимости от смещения. Это совершенно не связано с надежностью элемента. Иначе говоря, в возникновении максимума мы видим отражение не первопричины шумов, а явления, не связанного с физикой надежности, действующего за счет энергии внешнего источника питания и особенностей преобразования шумов электрической цепью в средне- и низкочастотной области. Дефекты образцов, поверхностные явления, токи утечки, внешняя среда в этом механизме образования максимума не играют определяющей роли. Их влияние прослеживается лишь через участие в формировании механизма переноса зарядов в образце, а следовательно, его ВАХ.

Такое преобразование (т. е. выражение (1)) должно быть общим и, одновременно, различным для образцов с различными механизмами переноса зарядов.

Рассмотрим некоторые формы проявления выражения (1).

Чтобы завершить обсуждение барьеров Шоттки и $p-n$ -переходов, отметим, что рассмотренный выше шумовой максимум обусловлен ВАХ образцов конкретного вида, обусловленного термоэлектронной эмиссией [11]:

$$I = I_0 [\exp(qU/mkT) - 1], \quad (3)$$

- где I_0 — ток насыщения;
- q — элементарный заряд;
- m — коэффициент идеальности ВАХ;
- k — постоянная Больцмана;
- T — абсолютная температура.

Однако более тщательное рассмотрение шумовых кривых, например, представленных в работе [11],

позволяет увидеть осцилляции шумов. Это, на наш взгляд, объясняется проявлением квантово-механического отражения носителей зарядов от барьеров. Растянутость осцилляций меняется с изменением концентраций примесей в полупроводнике, следовательно, зависит от толщины обедненной области барьеров [19].

Рассмотрим теперь образцы с совершенно иной ВАХ — тривиальные линейные резисторы. Для них в (1) $r_d = R$, а $U = RI$, где R — омическое сопротивление резистора, а I — сила тока в цепи. В слабых электрических полях, когда для (1) $S_g(f) = \text{const}$ (т. е. не зависит от смещения), $S_u(f)$ должна быть линейной функцией силы тока. Это равнозначно известной из литературы пропорциональности спектральной плотности флуктуаций напряжения $G_u(f)$ квадрату силы тока. Эксперимент всегда демонстрирует это [14]. Однако и в этом случае рост шумов не является отражением надежностных показателей объекта.

Рассмотрим третий классический вид ВАХ, характерный для вакуумных диодов. Им присущ широко известный закон «3/2» [20, с. 331, 334]:

$$I = \alpha U^{3/2}. \quad (4)$$

На рис. 2 представлена зависимость шумов от смещения для вакуумного диода в прямых координатах. Это совершенно иная форма шумовой кривой, не имеющая максимума. Тем не менее, анализ показывает, что рост шумов также происходит в соответствии с произведением $r_d U$ закона (1). Это подтверждает спрямление шумовой кривой в специальных координатах, как это демонстрирует рис. 3 [21]. Однако и тут первоисточник шумов $S_g(f)$ является постоянным, а флуктуации напряжения являются результатом аппаратного превращения флуктуаций, не отражающего надежностных характеристик изделия.

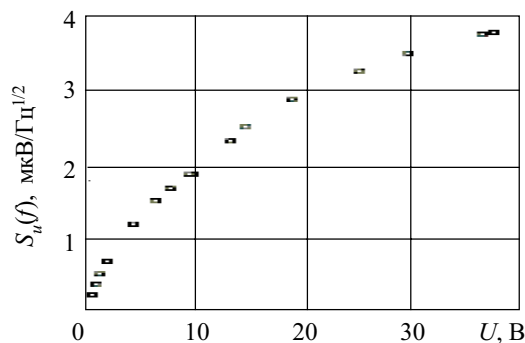


Рис. 2. Зависимость шумов в вакуумном диоде от смещения

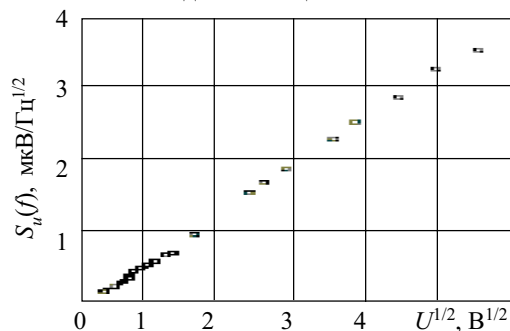


Рис. 3. Представление экспериментальных данных шумовых исследований для вакуумного диода в спрямляющих координатах

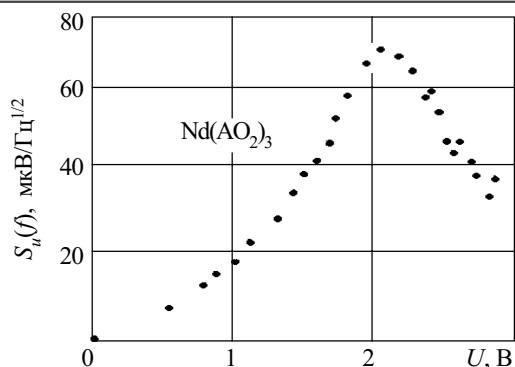


Рис. 4. Зависимость флуктуаций напряжений от величины смещения для тонких слоев аморфного полупроводника

Гораздо более сложная шумовая картина наблюдается для образцов, в которых полупроводник находится под воздействием сильных электрических полей. Это имеет место, например, для репрограммируемых элементов памяти, изготовленных на основе аморфных полупроводников. На рис. 4 представлена полученная нами зависимость шумов от напряжения для тонкого слоя аморфного полупроводника $Nd(AsO_2)_3$ [22]. Это соединение было синтезировано в Институте неорганической химии АН Грузии (г. Тбилиси). Толщина аморфной пленки составляла около 1 мкм.

Известно, что в аморфных полупроводниках основной механизм переноса зарядов обусловлен явлением снижения потенциального барьера для носителей зарядов сильным электрическим полем за счет эффекта Френкеля. Характер изменения шумов здесь существенно отличается от трех рассмотренных нами выше зависимостей, и его можно пояснить только приняв, что в (1) зависимым от смещения оказывается параметр $S_g(f) = S_g(f, U, I)$. Однако изучить его более детально нам удалось в поликристаллическом карбиде кремния [23].

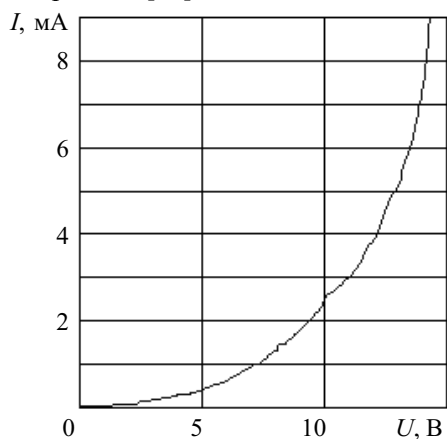


Рис. 5. Вольт-амперная характеристика варистора

Исследовались шумовые свойства варисторов типа С2-2-15. ВАХ такого варистора приведена на рис. 5. Видно, что она обладает ярко выраженной нелинейностью. ВАХ варисторов можно описывать точно так же, как и для аморфных полупроводников [22], зависимостью [23]

$$I \sim \exp(\alpha U^\gamma), \tag{5}$$

где γ — константа.

Очевидно, что эта характеристика плохо описывает реальную кривую в области малых токов — при нулевом смещении ток отсутствует. Поэтому мы усложнили ВАХ до выражения

$$I = I_0[\exp(\alpha U^\gamma) - 1] \tag{6}$$

и на основе экспериментальных данных определили необходимые константы:

$$I_0 = 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ А}, \alpha = 2\text{В}^{-1/2} \text{ и } \gamma = 1/2.$$

На рис. 6 экспериментальные результаты представлены в спрямляющих для зависимости (6) координатах $\ln[(I/I_0)+1] \sim U^{1/2}$; ожидаемое спрямление графика получено, что подтвердило применимость выражения (6) для данного образца.

На рис. 7 представлена зависимость спектра шумов $S_u(f)$ от напряжения. Видно, что кривая похожа на аналогичную зависимость для аморфных полупроводников. Однако более тщательное исполнение измерений позволило выявить особенность в области малых смещений — наличие дополнительного шумового максимума. Большой шумовой максимум нами уже был детально обсужден в работе [23] на основе рассмотрения френкелевской ионизации примеси. Он обусловлен аналогичной зависимостью скорости обмена носителями зарядов между примесным уровнем и разрешенной зоной $g(U)$ с учетом сниже-

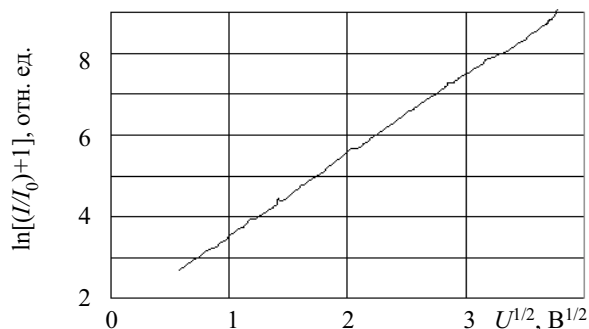


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика варистора в спрямляющих координатах

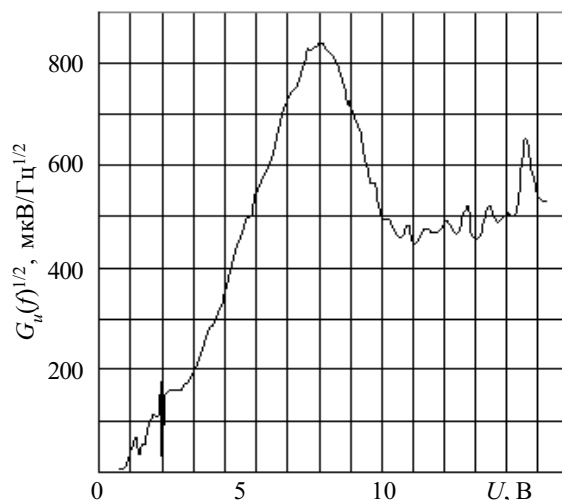


Рис. 7. Зависимость шумов варистора от приложенного напряжения

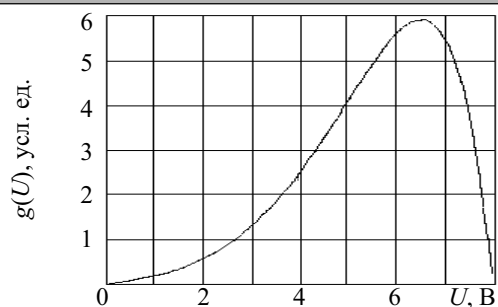


Рис. 8. Зависимость скорости обмена носителями зарядов в варисторе между примесным уровнем и разрешенной зоной [23]

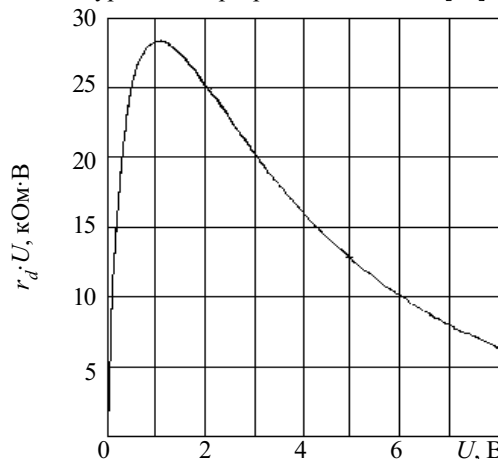


Рис. 9. Зависимость произведения $r_d U$ для варистора

ния потенциальных барьеров в сильном электрическом поле (см. график **рис. 8**), что в формуле (1) соответствует зависимости спектра электропроводности $S_g(f, U)$ от смещения (т. е. $S_g(f) = S_g(f, U)$).

Но расчет на основе ВАХ образца (6) зависимости произведения $r_d U$ обнаруживает максимум в области малых смещений (см. график **рис. 9**). Поэтому, согласно (1), один из максимумов для варисторов должен быть при малых смещениях, и обусловлен он характером зависимости $r_d U$, а второй — при больших смещениях за счет зависимости в (1) $S_g(f)$ от напряжения. Однако ни первый, ни второй максимум не обусловлены какими-либо деградационными процессами. Они обусловлены исключительно действием в образце известного механизма переноса зарядов и законом преобразования флуктуаций проводимости во флуктуации напряжения.

Есть уверенность, что проведение более тщательных исследований для аморфных полупроводников выявит в области слабых смещений аналогичный рассмотренному выше максимум за счет произведения $r_d U$ — в силу идентичности их ВАХ.

Таким образом, мы считаем, что наши исследования достаточно убедительно раскрывают природу появления различного вида шумовых максимумов в образцах с нелинейными ВАХ. Раскрыта природа их возникновения, что дает возможность приступить к следующему этапу исследований — раскрытию связи между дефектностью структур, надежностью образцов и их шумовыми характеристиками. В этом плане уже совершенно ясно, что для образцов суще-

ствует некоторая масштабная величина I_0 (сила обратного тока), и шумовые параметры необходимо сопоставлять для одной и той же степени (стадии) развитости процесса переноса зарядов относительно этого масштаба. Дефектность изделия будет проявляться через изменения в механизме переноса зарядов, т. е. через изменения ВАХ образцов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Головки А. Г., Козырь И. Я. Использование тренировок для браковки микросхем / В сб.: Труды Московского института электронной техники.— 1974.— Вып. 17.— С. 156—159.
2. Методы прогнозирования отказов радиоэлектронной аппаратуры // Радиоэлектроника за рубежом.—1967.— Вып. 39.— С. 58—67.
3. Пряников В. С. Прогнозирование отказов полупроводниковых приборов.— М.: Энергия, 1978.
4. Проект НАТО SPr-973799 Semiconductors, «Разработка радиационноустойчивых полупроводниковых приборов для систем связи и прецизионных измерений с использованием шумового анализа», выполненный в рамках программы «НАТО—Россия, Наука ради мира» (1999—2003 гг.).
5. Головки А. Г., Шермергор Т. Д. О токовой зависимости низкочастотных токовых шумов в начале пробоя // ФТП.— 1974.— № 7.— С. 1353—1355.
6. Головки А. Г. $1/f$ -шумы в начале пробоя обратносмещенных $p-n$ -переходов // ФТП.— 1980.— № 8.— 1660—1661.
7. А. с. 711502 СССР. Способ измерения напряжения пробоя $p-n$ -переходов / А. Г. Головки.— 1980.
8. А. с. 555814 СССР. Способ измерения тока насыщения $p-n$ -переходов и барьеров Шоттки / А. Г. Головки.— 1977.
9. Головки А. Г. $1/f$ -шумы в барьерных слоях // Изв. вузов. Радиотехника.— 1978.— № 10.— С. 1531—1534.
10. Головки А. Г. Флуктуации напряжения в барьерах Шоттки // ФТП.— 1978.— № 12.— С. 2382—2383.
11. Головки А. Г. Преобразование низкочастотных флуктуаций электропроводности в датчиках с нелинейной ВАХ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 4.— С. 50—51.
12. Головки А. Г., Головки Т. А. Новый флуктуационный закон для стационарных процессов переноса зарядов // Тр. междунар. семинара "Шумы и деградационные процессы в полупроводниковых приборах".— М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 1998.— С. 264—268.
13. Головки А. Г. Физический принцип преобразования флуктуаций в датчиках // Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2003.— № 6.— С. 47—48.
14. Ван дер Зил А. Флуктуационные явления в полупроводниках.— М.: ИЛ, 1961.
15. Букингем М. Шумы в электронных приборах и системах.— М.: Мир, 1986.
16. Нарышкин А. К., Врачев А. С. Теория низкочастотных шумов.— М.: Энергия, 1972.
17. Бочков Г. Н., Кузовлев Ю. Е. Новое в исследованиях $1/f$ -шума // УФН.— 1983.— Т. 41, вып. 1.— С. 151—176.
18. Hooge F. N., Kleinpenning T. G. M., Vandamme L. K. J. Experimental studies of $1/f$ noise // Rep. Prog. Phys.— 1981.— Vol. 44.— P. 479—532.
19. Головки А. Г., Головки Т. А. Новый источник $1/f$ -флуктуаций в барьерных слоях / Мат-лы междунар. науч.-тех. семинара «Шумовые и деградационные процессы в полупроводниках».— М.: МНТОРЭС им. А. С. Попова, 1999.— С. 269—272.
20. Шимони К. Физическая электроника.— М.: Энергия, 1972.
21. Головки А. Г. $1/f$ -шумы инжекционных токов. Диэлектрическая поляризация / Мат-лы Всесоюз. конф. по физике диэлектриков. Секция «Диэлектрическая релаксация».— Томск: Изд-во Томского политехн. ин-та, 1988.— С. 139—141.
22. Губеладзе Н. Я., Нанобашвили Е. М., Головки А. Г. Исследование электропроводности высокотемпературных полупроводников для репрограммируемых запоминающих устройств // Собр. АН ГССР.— 1980.— Т. 100, № 1.— С. 101—103.
23. Головки А. Г. $1/f$ -шумы варисторов // Изв. вузов. Физика.— 1980.— № 11.— С. 11—15.