

К. ф.-м. н. А. Г. ГОЛОВКО

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

Дата поступления в редакцию
10.09 2003 г.

Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

ИЗМЕНЕНИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ШУМОВ В p - n -ПЕРЕХОДАХ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Предлагается при разработке аппаратуры предварительно оценивать стабильность работы полупроводниковых датчиков в диапазоне пониженных температур.

Дальнейшее развитие отечественной электронной техники, несомненно, будет сопровождаться ускоренным освоением области работы датчиков и электронной аппаратуры при пониженных и крайне низких температурах. Однако разработчики аппаратуры еще не располагают полными данными о температурных зависимостях шумовых свойств всего многообразия применяемых датчиков. Вместе с тем эти зависимости в значительной степени определяют стабильность работы, чувствительность и помехозащищенность системы и должны быть известны. Поэтому на примере температурных исследований флуктуаций, возникающих в прямосмещенных p - n -переходах, предлагаем разработчикам проводить свой оценочный анализ возможных проявлений шумов используемых ими датчиков.

В работах [1, 2] раскрыта функция преобразования флуктуации проводимости датчика $S_u(f)$ с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ) во флуктуацию падения напряжения. Аналогичные экспериментальные исследования проведены нами на диоде, изготовленном из арсенида галлия, в температурном диапазоне 78—300 К. По данным разработчиков диодов, концентрация доноров в n -области (Te) составляла $n=4 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, акцепторов в p -области (Zn) — $p=2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Площадь перехода была близкой 1 мм². Ток насыщения при комнатной температуре составлял 3,7 мкА. В качестве шумового параметра измерялась среднеарифметическая величина флуктуаций падения напряжения $\langle |\delta u(t)| \rangle$ на частоте 700 Гц в полосе частот 70 Гц. Он пересчитывался в «текущий спектр» $S_u(f)$, как это описано в работе [1].

На рис. 1 представлен график токовой зависимости шумов при комнатной температуре. На нем горизонтальной штриховой линией отмечен уровень шумов входных каскадов усилителя, который вычитался из результатов измерений. Характер токовой зависимости флуктуаций полностью совпадает с полученной зависимостью для барьеров Шоттки (см. рис. в [1]). Он соответствует найденной нами [2, ф-ла (3)] функции преобразования флуктуации электропроводности $\delta g(t)$ образца во флуктуацию напряжения $\delta u(t)$:

$$\delta u(t) = -\delta g(t) r_d U, \quad (1)$$

где r_d — дифференциальное сопротивление образца, U — падение напряжения на нем.

Как известно [3], в металлических образцах снижение температуры приводит к уменьшению шумов. Однако для нашего полупроводникового образца снижение рабочей температуры от комнатной до азотной привело к совершенно неожиданному и очень сложному росту уровня шумов.

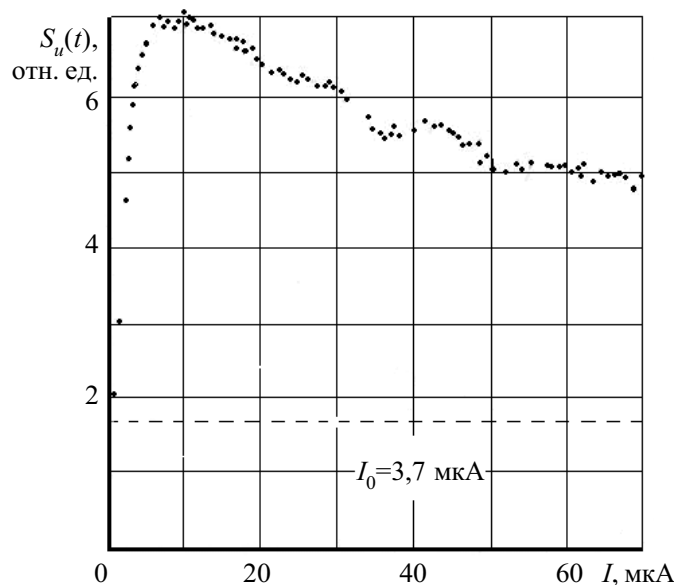


Рис. 1. Токовая зависимость шумов для исследуемого образца при комнатной температуре

На рис. 2 приведен трехмерный график зависимости $S_u(f)$ от температуры и силы тока. Четко выражены три участка резкого повышения шумов. Один из них — с температурно-независимым максимумом — находится в области самых малых смещений. И два участка — с температурно-зависимыми максимумами. Заранее предвидеть такой ход событий было невозможно, и только тщательность проведения эксперимента разделили и четко ограничили области повышенных флуктуаций напряжения.

Таким образом, данные экспериментальные исследования предупреждают разработчиков радиоэлектронной аппаратуры о том, что применение известных датчиков в новой температурной области чревато существенным ухудшением стабильности их работы.

Причину и характер полученных зависимостей нам удалось расшифровать исходя из рассмотрения шу-

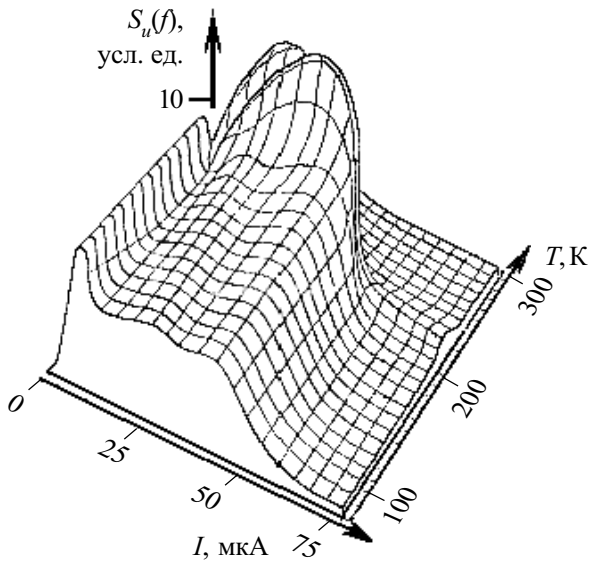


Рис. 2. Зависимость низкочастотных флуктуаций напряжения в $p-n$ -переходе на основе арсенида галлия от температуры и силы тока

мов как результата протекания процессов обмена носителями зарядов между примесными локализованными состояниями и разрешенными зонами. Рассмотрим этот процесс более детально на качественном уровне.

Сначала рассмотрим указанные процессы в базовой n -области $p-n$ -перехода. В условиях термодинамического равновесия концентрация подвижных электронов n устанавливается на уровне, определяемом известным соотношением [4, с. 42, ф-ла (28)]

$$n = 0,5 \cdot (N_d N_c)^{1/2} \exp[-(E_d/2kT)], \quad (2)$$

- где N_d — концентрация доноров;
- N_c — плотность электронных состояний в зоне проводимости;
- E_d — энергия активации донора;
- k — постоянная Больцмана;
- T — абсолютная температура.

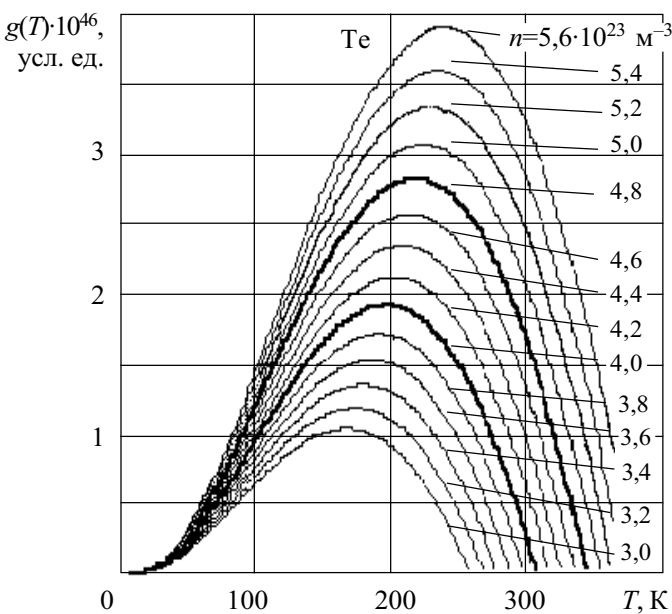


Рис. 3. Расчет скорости обмена электронами между донорным уровнем и зоной проводимости базовой области диода в зависимости от концентрации примеси

Однако при этом происходит постоянный процесс генерации подвижных электронов и их рекомбинации. В равновесии скорость обмена электронами между донорным уровнем и зоной проводимости определяется соотношением

$$g_n(T) = \beta_n (N_d - n) N_c \exp[-(E_d/kT)], \quad (3)$$

- где β_n — коэффициент генерации электронов;
- $(N_d - n)$ — концентрация неионизированной примеси.

Аналогично, для акцепторов в p -области полупроводника

$$g_p(T) = \beta_p (N_a - p) N_v \exp[-(E_a/kT)], \quad (4)$$

- где N_a — концентрация акцепторной примеси;
- p — концентрация подвижных дырок.

Соответственно

$$p = 0,5 \cdot (N_c N_v)^{1/2} \exp[-(E_a/2kT)]. \quad (5)$$

Для наглядности на рис. 3 представим рассчитанные по формуле (3) температурные зависимости скорости генерации электронов для различных значений концентрации теллура. Аналогично на рис. 4 приведены расчетные графики согласно (4) для дырок другой базы $p-n$ -перехода. Видно, что скорость генерации (обмена носителями зарядов) с увеличением температуры растет, достигает максимума и затем, по мере истощения примесей, стремится к нулю. Процесс, как видно, чувствителен к величине концентрации примесей. Избежать его невозможно, но он ограничен рамками определенного температурного диапазона. И при необходимости обеспечения стабильности работы датчика в этом диапазоне температур следует подобрать тип полупроводника и примеси, ее концентрацию.

Тут очевиден факт, что каждый акт генерации и рекомбинации носителя зарядов вызывает в электрической цепи элементарный импульс тока. Эти импульсы в совокупности приводят к формированию флуктуаций падения напряжения на образце, измеряемых как шумы. Очевидно также, что увеличение скорости

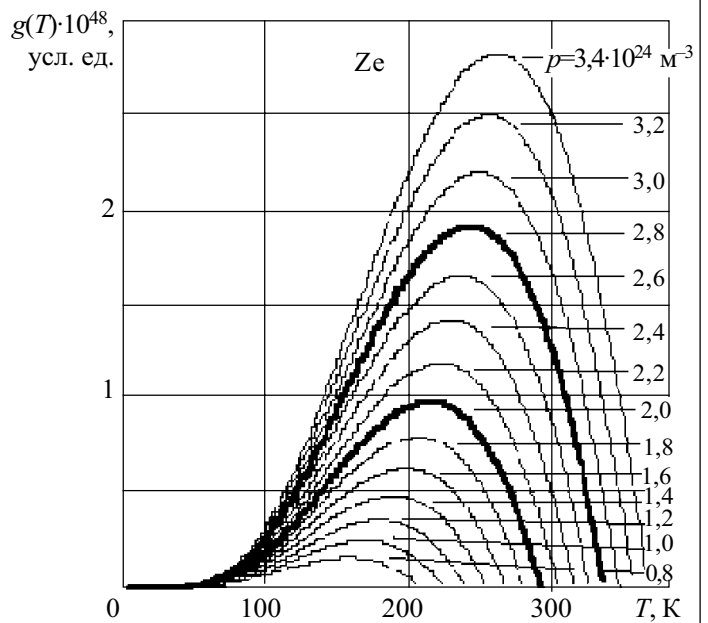


Рис. 4. Расчет скорости обмена дырками между акцепторным уровнем и валентной зоной базовой области диода в зависимости от концентрации примеси

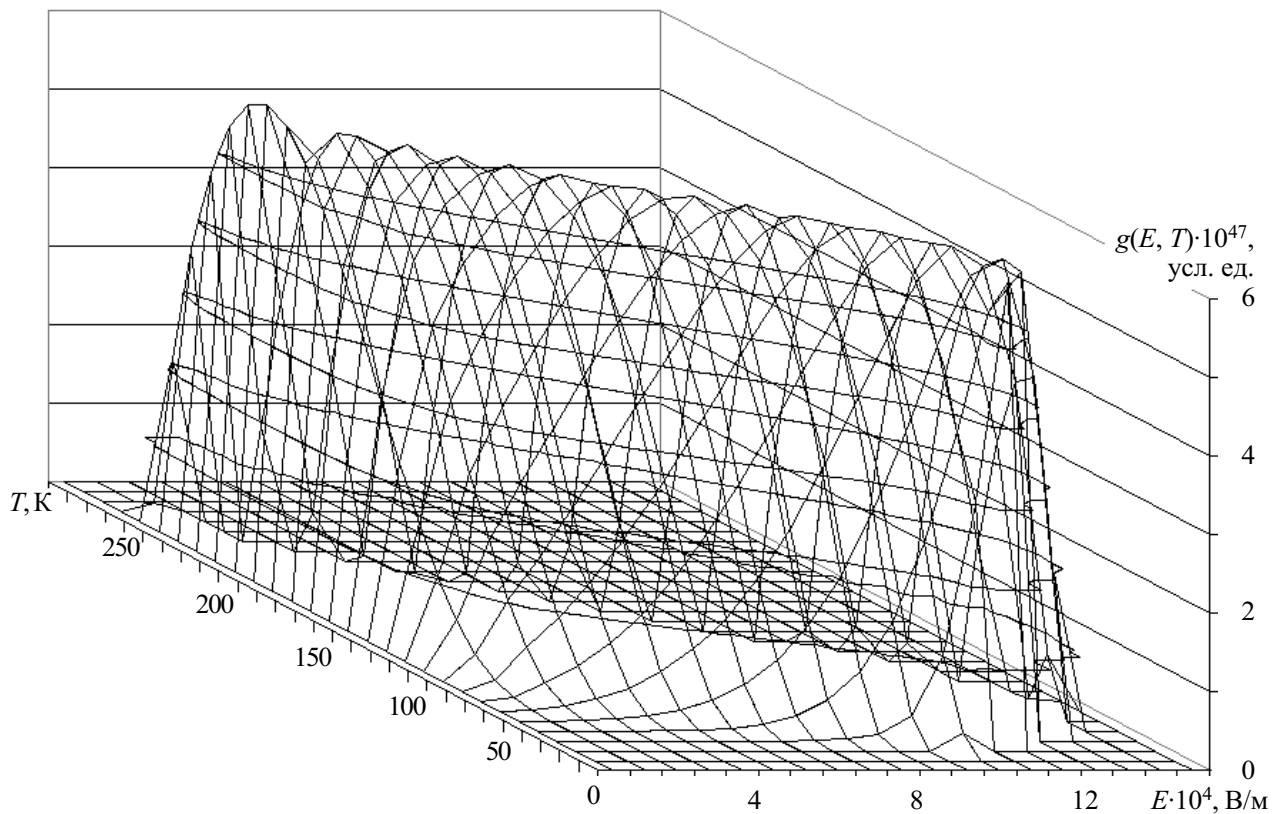


Рис. 5. Расчет скорости обмена электронами между примесным уровнем и зоной проводимости при френкелевской ионизации в обедненном слое p - n -перехода

ти обмена носителями зарядов приводит к росту шумов, истощение же примеси приводит к снижению шумов. Однако пока не установлено, линейная ли это зависимость. Тем не менее, видно качественное подобие шумовых и генерационно-рекомбинационных кривых для p - n -перехода.

Сложность сопоставления состоит в том, что на графиках рис. 3, 4 отражены процессы, протекающие без приложения внешнего напряжения. Они являются причиной флуктуаций электропроводности образца и отражаются в составляющей $\delta g(t)$ выражения (1). Электрическая цепь преобразует флуктуации так, что максимум шумов на токовой оси располагается при токе, в 1,718 раз превышающем ток насыщения соответствующей электронной или дырочной составляющей.

Для каждого значения температуры шумы имеют свой максимум на токовой оси. Зависимость высоты этих максимумов от температуры можно сопоставить с кривыми скорости протекания обменных процессов. У нас два таких температурно-зависимых процесса — для n - и для p -области. По положению одного максимума — максимума интенсивности обмена на температурной оси — можно оценить концентрацию соответствующей примеси. Эти значения оказывались для нас несколько большими тех величин, которые указали изготовители непосредственно для области p - n -перехода — соответственно концентрация теллура $4,8 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-3}$ и цинка — $2,8 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$. Есть некоторые основания считать, что шумовые кривые дают более правильные значения реальной концентрации примесей в «шумящих» областях.

Однако возникновение области температурно-независимых максимумов этим механизмом объяснить сложно. Подсказку дают совершенно другие наши экспериментальные исследования шумов, проведенные в нелинейных резисторах (варисторах) [5]. Они выявили подобную ситуацию: каждая шумовая кривая обладает максимумом, форма кривой меняется от температуры, но высота максимума от нее не зависит. Это может быть объяснено френкелевской ионизацией примеси в обедненной области p - n -перехода. Вследствие искривления энергетических зон для зарядов примесей высота потенциального барьера снижается на величину δE [6, с. 418]:

$$\delta E = 2(q^3/\epsilon)^{1/2} E_u^{1/2}, \quad (6)$$

где q — элементарный заряд;

ϵ — диэлектрическая проницаемость среды;

E_u — напряженность электрического поля.

Поэтому для расчета скорости протекания обменных процессов в выражениях (2)—(5) энергии активации примесей следует уменьшать на эту величину δE . На рис. 5 приведен расчетный график этого процесса.

Обращает на себя внимание особенность: максимальная интенсивность обмена не зависит от температуры, за исключением участков резкого падения в области нулевой температуры и температуры истощения примеси. Именно последнее выявили наши исследования шумов в p - n -переходе. Температура истощения примеси весьма чувствительна к величине концентрации примеси. Ее значение подтверждает, что в области пространственного заряда концентрация доноров совпадает с величиной, указанной изготовителем p - n -перехода. Для выявления кривых акцептор-

ной примеси точности наших шумовых измерений, по-видимому, пока не достаточно.

Таким образом, мы на качественном уровне рассмотрели возможные версии объяснения полученных очень сложных экспериментальных зависимостей низкочастотных флуктуаций напряжения от температуры и силы тока. Оценочные расчеты говорят в пользу того, что шумы по мере роста смещения сначала вызваны френкелевской ионизацией примесей в обедненной области. При этом максимальная интенсивность шумов не зависит от температуры. С истощением этих примесей по мере роста смещения в шумах проявляются генерационно-рекомбинационные процессы в базовых областях. Крайне низкие уровни смещения пока не позволяют наличными аппаратурными средствами изучить ВАХ при френкелевской ионизации для получения полной картины генерации шумов. Отдельная задача — математическое моделирование рассмотренных процессов.

Исследования показали, что разработчикам электронной аппаратуры при намерении использовать датчики при пониженных температурах сначала необходимо изучить стабильность их работы в таком диапазоне. При невозможности сделать это эксперимен-

тальными средствами можно провести качественные расчеты скорости протекания обменных процессов для данного полупроводника, типа и концентрации примеси. Возможно, что для обеспечения заданной стабильности работы датчиков необходимо будет использовать специфичные полупроводники и ограничиться строго определенными примесями и их концентрацией.

Считаем, что существует возможность вполне критично и грамотно подойти к решению проблемы обеспечения стабильности работы датчиков при пониженных температурах.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Головкин А. Г. Преобразование низкочастотных флуктуаций электропроводности в датчиках с нелинейной ВАХ // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2003. — № 4. — С. 50—51.
2. Головкин А. Г. Физический принцип преобразования флуктуаций в датчиках // Там же. — 2003. — № 6. — С. 47—48.
3. Букингом М. Шумы в электронных приборах и системах. — М.: Мир, 1986.
4. Зи С. М. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Энергия, 1973.
5. Головкин А. Г. 1/f-шумы варисторов // Изв. вузов. Физика. — 1980. — № 11. — С. 11—15.
6. Киреев П. С. Физика полупроводников. — М.: Высш. школа, 1975.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ

7—10

СЕНТЯБРЯ 2004 г.
РОССИЯ, МОСКВА
ВЦ "КРОКУС ЭКСПО"



третья международная специализированная выставка

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА



СВЯЗЬ

'2004

- ▶ РАДИОЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ
- ▶ ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПОНЕНТЫ И МАТЕРИАЛЫ
- ▶ НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ
- ▶ ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ
- ▶ МЕНЕДЖМЕНТ КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
- ▶ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

ОРГКОМИТЕТ:

тел: (+7 095)

937-4081

937-4082



INTERMATIC@MIIF.RU

WWW.MIIF.RU