

ФИЗИЧЕСКИЙ МЕХАНИЗМ ГЕНЕРАЦИИ НЧ-ШУМА В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ БАРЬЕРНЫХ СТРУКТУРАХ

Т.А. Холомина

Рязанский государственный радиотехнический университет, Россия

marta.tap@yandex.ru

Abstract. *Results of the theoretical and experimental justification and development of activation-drift model of relaxation processes low-frequency noise generation in physical barrier layers, and also the method of noise spectroscopy of deep levels are summarized.*

Ключевые слова: *активационно-дрейфовая модель, глубокие уровни, спектроскопия низкочастотного шума*

I. Введение

Изучение природы формирования избыточных низкочастотных (НЧ) шумов в полупроводниковых барьерных структурах имеет особое значение, поскольку шумовые характеристики оказывают значительное влияние на параметры и надежность микроэлектронных устройств. Глубокие центры (ГЦ), создаваемые различными дефектами структуры, играют важную роль в процессах генерации НЧ-шума в полупроводниковых приборах.

Одним из наиболее информативных методов изучения параметров глубоких уровней (ГУ) является спектроскопия низкочастотного шума. Методика расчета параметров ГЦ определяется физическими моделями, описывающими релаксационный процесс формирования низкочастотных флуктуаций. Процессы генерации НЧ-шума в полупроводниковых барьерных структурах описаны активационно-дрейфовой моделью, предложенной П.Т. Орешкиным [1,2], и подтвержденной многочисленными экспериментальными и расчетными данными [3,4] и др.

Цель настоящей работы – развитие, теоретическое и экспериментальное обоснование на основе последних данных активационно-дрейфовой модели процесса генерации НЧ-шума в полупроводниковых барьерных структурах.

II. Теоретические исследования

Анализ показал, что многие, часто альтернативные, теории генерации НЧ-шума в полупроводниковых барьерных структурах имеют характерные общие черты:

- удовлетворительное соответствие экспериментальных результатов расчетным при описании спектров НЧ-шума суперпозицией множества составляющих лоренцевой функции, характеризующегося набором времен релаксации процессов;

- доминирующее влияние на спектры НЧ-шума флуктуаций зарядового состояния, созданных дефектами структуры глубоких центров, пространственно локализованных на внешней границе (поверхности) или в области пространственного заряда (ОПЗ) барьерной структуры;

- термоактивационный характер низкочастотных флуктуаций, обусловленных генерацией носителей с глубоких уровней;

- практически нереализованное в большинстве моделей стремление описать токовый НЧ-шум как явление, сопровождающее направленное движение носителей заряда под действием электрического поля ОПЗ.

Применение активационно-дрейфовой модели к описанию генерации НЧ-флуктуаций тока в физических барьерных слоях не только диодов Шоттки и несимметричных p - n -переходов, но и полевых транзисторов позволяет наиболее полно учесть указанные выше особенности такого релаксационного процесса. Физический механизм генерации НЧ-шума в полупроводниковых барьерных структурах при обратном смещении состоит в реализации двух совместных событий (для полупроводника n -типа): эмиссии электронов в активной части как результата тепловых флуктуаций и дрейфа носителей к электронейтральной области барьерной структуры. Аналогично случаю релаксационной спектроскопии ГУ для получения достоверных данных о параметрах ГЦ необходимо, чтобы обратное смещение $U = U_s$ обеспечивало пролет активированных с ГУ носителей заряда сквозь ОПЗ в электронейтральную область базы. При этом в ОПЗ, где свободные носители заряда отсутствуют, процессы захвата не определяют физический механизм процесса.

Для описания времени релаксации τ физических процессов, имеющих активационную природу, в активационно-дрейфовой модели применен закон Больцмана

$$\tau = \tau_0 \exp(\Delta E_t / kT), \quad (1)$$

где τ_0 – множитель, которому придается физический смысл времени пролета носителей, ΔE_t – энергия ионизации, T – температура. Реализация полного пролета носителей заряда, активированных с ГУ, в базу, достигается приложением напряженности поля обратного смещения, равного или большего 10^4 В·см⁻¹. При этом время релаксации барьерного слоя $\tau_0 = 2\tau_m$ – есть время пролета (дрейфа) основных носителей сквозь ОПЗ в базу диода; $\tau_m = r\epsilon\epsilon_0$ – максвелловское время релаксации в базе диода с удельным объемным сопротивлением r , ϵ – относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника, ϵ_0 – электрическая постоянная вакуума. Соотношение (2) определяет время релаксации активационно-пролетного процесса:

$$\tau = 2\tau_m \exp(\Delta E_t / kT). \quad (2)$$

Указанное справедливо для диодов Шоттки и резких p^+ - n - и n^+ - p -переходов при обратном электрическом смещении. Только следует рассматривать перезарядку акцепторных уровней, а физический механизм процесса определится эмиссией и пролетом дырок.

Такой подход оказался плодотворным для описания физических процессов при релаксационной (нестационарной) спектроскопии глубоких уровней (*DLTS*), спектроскопии НЧ-шума, термоактивированном переносе заряда в пленках двуокиси кремния МДП-систем и других явлениях [3-6].

Описанные представления позволяют учесть не только активационный, но и дрейфовый компонент процесса релаксации в отличие от ранее предложенных механизмов. В [1-6] приведены аргументированные доказательства и экспериментальные результаты, подтверждающие развиваемую модель.

Одним из основных предметов дискуссии во время апробации модели являлся вопрос о соотношении времени активации носителя заряда с ГУ в ОПЗ обратно смещенной барьерной структуры и времени пролета в базу. Ряд авторов полагали, что временем пролета носителей заряда в ОПЗ можно пренебречь по сравнению со временем активации. Однако экспериментальные результаты как П.Т. Орешкина и сотрудников, так и сторонних авторов подтвердили, что время пролета носителей в ОПЗ определяется максвелловским временем релаксации в соотношении (2), и время пролета может быть сопоставимо с общим временем релаксации.

В соответствии с представлениями теории релаксации заряда в высокоомных материалах (или областях приборов) указанное соотношение постоянных времени представляется справедливым. Согласно [7] соотношение характеристических постоянных времени в релаксационных полупроводниках таково: время пролета носителей заряда больше времени захвата на ГУ, а время захвата превышает время активации носителя: « $\text{detrapping time} < \text{trapping time} < \text{transit time}$ ».

Наличие широкого диапазона изменения времени релаксации флуктуационных процессов τ , составляющего много порядков величин, обусловлено изменением не только ΔE_i , но и τ_0 [в соотношениях (1), (2)] в пределах $0 < \tau_0 < 2\tau_M$. Обоснованием широкого диапазона изменения τ развиваемая модель устраняет одну из основных трудностей модельного описания экспериментальных спектров НЧ-шума..

Известно, что спектральная плотность мощности (СПМ) избыточных низкочастотных шумов коррелирует с такими параметрами полупроводниковых приборов, как значения обратных токов, пробивных напряжений, радиационной стойкости и др. Проведенный анализ опубликованных в литературе экспериментальных результатов исследования спектров, а также температурных зависимостей СПМ НЧ-шума показал, что соответствующие кривые для диодов Шоттки, несимметричных p - n -переходов и полевых транзисторов имеют качественно сходный характер[3,5]. Это указывает на единый механизм формирования избыточного шума в таких приборах.

III. Развитие модели процессов генерации НЧ-шума

В последние годы активационно-дрейфовая модель генерации НЧ-шума в физических барьерных слоях получила развитие путем учета влияния эффекта Френкеля на значение энергии ионизации глубоких уровней полупроводниковых барьерных структур. При этом для описания взаимодействия носителей заряда с глубокими центрами использовались представления о дальнедействующем кулоновском потенциале, которое ранее применялось к заряженным мелким донороподобным легирующим центрам в диапазоне низких (обычно до 100 К) температур, соответствующих области примесной проводимости. Ионизация глубоких уровней происходит при более высокой по сравнению с мелкими температуре, поэтому модель применена нами к описанию процессов ионизации ГУ при комнатной и более высокой температуре. Кроме того, получена система соотношений, расширяющая рамки модели и позволяющая найти энергию ионизации ГУ при описании их посредством модели экранирующего кулоновского потенциала, впервые примененной к описанию физического механизма генерации НЧ-шума в барьерных структурах [8].

Экспериментальные исследования, проведенные независимыми методами, показали, что при расчете энергии ионизации глубоких уровней необходимо учитывать поправки, обусловленные эффектом Френкеля.

При исследовании параметров ГЦ в полупроводниковых барьерных структурах методом спектроскопии НЧ-шума в качестве функции отклика используются спектр либо температурная зависимость СПМ процесса. Для определения параметров ГУ используются максимумы температурных зависимостей СПМ, измеренных при фиксированной частоте f_b или характерные частоты перегиба (изменения наклона) спектров НЧ-шума при фиксированной температуре T . В обоих случаях выполняется условие $2\pi f_b \tau = \omega_b \tau = 1$, где ω_b – круговая частота, соответствующая перегибу или максимуму, τ – время релаксации процесса. Энергию ионизации ГУ обычно определяют по наклону зависимостей Аррениуса $\lg \tau = \varphi(1/T)$.

Сопоставление значений энергии ионизации ГУ в одних и тех же образцах при их экспериментальном исследовании методами РСГУ и спектроскопии НЧ-шума с учетом поправки на влияние эффекта Френкеля показало, что они обычно совпадали как между собой, так и со значениями, рассчитанными по (2). Разброс величины ΔE_i , как правило, не превышал погрешности измерений и расчета, т.е. $\pm(0,01-0,02)$ эВ.

В работе [9] приведены результаты исследования параметров глубоких центров в барьерных структурах на основе собственного арсенида галлия, используемых в детекторах заряженных частиц и рентгеновского излучения, методами РСГУ и спектроскопии низкочастотного шума. В образцах обнаружены два глубоких уровня с разной слоевой концентрацией. Показано, что высокотемпературный ГУ, имеющий большую энергию ионизации, определяет уровень спектральной плотности мощности избыточного шума и величину обратных токов детектора на основе структур Al/i-GaAs. Получено совпадение значений энергий ионизации ГУ, найденных методами РСГУ и спектроскопии НЧ-шума.

Процессы генерации и рекомбинации, происходящие с участием ГУ, являются причиной возникновения избыточных шумов и влияют на величину обратного тока в барьерных структурах. В результате анализа результатов измерений обратных ветвей вольтамперных характеристик, а также СПМ избыточного шума и слоевой концентрации ГУ в различных образцах барьерных структур была обнаружена корреляция между величиной обратного тока, СПМ избыточного шума и слоевой концентрацией ГУ [9].

В ряде работ [10-12] и др., опубликованных в научно-технической литературе, приведены экспериментальные результаты, свидетельствующие о зависимости параметров НЧ-шума в физических барьерных слоях, содержащих ГУ, от приложенного электрического напряжения обратного смещения. Отметим, что в работе [10], посвященной изучению характеристик детекторов ядерного излучения на основе полуизолирующего арсенида галлия, значительное внимание уделено изучению ВШХ приборов. Полученная авторами ВШХ имела вид кривой, интенсивно растущей на начальном участке, который при дальнейшем увеличении напряжения переходил в участок более слабого роста. Указано, что, начиная с определенного напряжения обратного смещения на барьерном слое, происходило насыщение величины СПМ НЧ-шума. Кроме того, отмечено, что процессы релаксации заряда в высокоомной базе прибора происходят с постоянной времени максвелловской релаксации.

В наших исследованиях форма вольт-шумовой характеристики (ВШХ) диодов Шоттки при обратном смещении аппроксимировалась двумя функциями вида $\sim e^{\alpha U}$, смещенными друг относительно друга по оси напряжений [13]. Наличие точки, в которой происходит смена коэффициента α , объясняется тем, что при некоторой напряженности поля создаются условия для генерации с ГУ и дрейфа носителей заряда. Увеличение напряженности поля приводит к росту части активированных с ГУ носителей, пролетевших слой ОПЗ, что в результате вызывает увеличение амплитуды шумовой составляющей обратного тока структуры. В соответствии с эффектом Френкеля увеличение напряженности электрического поля вызывает понижение потенциального барьера для отдельного атома, что, в свою очередь, приводит к увеличению количества активированных с ГУ носителей. Одновременное действие электрического поля, как на дрейфовую, так и на генерационную составляющие приводит к росту числа носителей, достигших области базы и давших вклад в общий шумовой ток. С ростом обратного смещения на барьерном слое, начиная с напряжения, величина которого определяется соотношениями активационно-дрейфовой модели, происходило насыщение величины СПМ НЧ-шума. Аналогичные результаты получены в работах [11,12] и др.

Эти данные, наряду с отмеченными ранее, подтверждают изложенные выше представления о физическом механизме процессов генерации НЧ-шума в полупроводниковых барьерных структурах.

IV. Заключение

Представлены результаты, посвященные развитию активационно-дрейфовой модели генерации НЧ-шума на основе учета влияния эффекта Френкеля на значение энергии ионизации глубоких уровней и параметры шумовых процессов полупроводниковых барьерных структур, а также экспериментальные данные, подтверждающие развиваемые физические концепции.

Практическим применением полученных результатов может служить установленная связь между значением СПМ обратной смещенной барьерной структуры и потенциальной надёжностью приборов: величиной обратных токов, наличием и суммарной концентрацией электрически активных глубоких центров. Экспресс-анализ полупроводниковых приборов по форме вольт-шумовых характеристик может способствовать выявлению потенциально ненадежных структур.

Результаты проведенных исследований позволяют заключить, что активационно-дрейфовый механизм переноса носителей заряда относится к наиболее общим физическим процессам и дальнейшей задачей является теоретическое и экспериментальное обоснование возможностей применения активационно-дрейфовых представлений к описанию и практическому применению других релаксационных процессов в барьерных структурах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, с использованием оборудования регионального центра зондовой микроскопии коллективного пользования (РЦЗМкп).

V. Библиография

1. Oreshkin P.T. Barrier layers as resonators on deep centers // Phys. stat. sol. (a). 1991. – Vol. 123. – №2. – P. 483-491.
2. Орешкин П.Т. Барьерные слои как резонаторы на глубоких центрах // Известия вузов СССР. Физика. 1990. – № 11. – С. 21-25.
3. Холомина Т.А. Физический механизм нестационарной спектроскопии глубоких уровней и генерации низкочастотного шума в барьерных слоях // Изв. вузов. Электроника. 1998. – № 2. – С. 22-26.
4. Холомина Т.А. Определение параметров глубоких уровней в полупроводниках при нестационарной спектроскопии и спектроскопии низкочастотного шума // Измерительная техника. 1998. – № 2. – С. 44-46.
5. Холомина Т.А. Влияние глубоких центров на физические процессы в кремниевых барьерных структурах / Дис. докт. физ.-мат. наук: 01.04.10. М.: МЭИ, 1999. – 376 с.
6. Холомина Т.А. Влияние центров с глубокими уровнями на процессы генерации НЧ-шума в барьерах Шоттки // Изв. вузов. Материалы электронной техники. 1998. – № 2. – С. 57-59.
7. Haegel N.M. Relaxation semiconductors: in theory and in practice // Appl.Phys. 1991. – A53. – P. 1-7.
8. Холомина Т.А., Кострюков С.А., Лактюшкин А.С. Исследование полупроводниковых барьерных структур методом спектроскопии низкочастотного шума. Вестник РГРТУ.Рязань, 2012. - № 1 (выпуск 39). - Часть 1. - С. 74-78.
9. Исследование параметров глубоких центров в детекторах заряженных частиц и рентгеновского излучения на основе Al/i-GaAs / Г.П. Жигальский., С.А. Кострюков, В.Г. Литвинов М.С. Родин, Т.А. Холомина // Радиотехника и электроника. 2007. – Т. 52. – № 10. – С. 1260-1265.
10. Характеристики детекторов ядерного излучения на основе полуизолирующего арсенида галлия / Е.М. Вербицкая, В.К. Еремин, А.М. Иванов и др. // Физика и техника полупроводников. 2004. – Т. 38. – Вып. 4. – С. 490-497.

11. Шумовые методы контроля высоковольтных силовых диодов / А.Д. Геленко, А.М. Гуляев, И.Ю. Кукоев, И.Н. Мирошникова и др. // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах. Материалы докладов науч.-метод. семинара. – М.: МНТО РЭС им. А.С.Попова, МЭИ, 1996. – С. 185-190.

12. Классификация надежности интегральных схем с использованием показателя формы спектра γ / М.И. Горлов, Д.Ю. Смирнов, Д.Л. Ануфриев // Известия вузов. Электроника. 2006. - № 5. - С. 78 – 82.

13. Кострюков С.А., Холомина Т.А., Лактюшкин А.С. Влияние обратного электрического смещения на параметры низкочастотного шума барьеров Шоттки // Шумовые и деградационные процессы в полупроводниковых приборах. Материалы междунар. науч.-метод. семинара. – М.: МНТО РЭС им. А.С. Попова, МЭИ, 2009. – С. 77-82.