

УДК 621.315.592.

ФЛУКТУАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВАРИКАПАХ

Ирха В.И.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
phys@onat.edu.ua*

ФЛУКТУАЦІЙНІ ПРОЦЕСИ У ВАРІКАПАХ

Ирха В.И.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.
phys@onat.edu.ua*

FLUCTUATION PROCESSES IN VARIABLE – CAPACITANCE DIODES

Irkha V.I.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.
phys@onat.edu.ua*

Аннотация. Рассматриваются возможности и физические принципы для определения методов отбраковки ненадежных варикапов по их электрошумовым характеристикам. Приведены основные теоретические соотношения, определяющие их параметры. Показано, что физической основой метода прогнозирования отказов варикапов по их низкочастотным шумам является зависимость уровня шума от наличия дефектов структуры и качества контактов изделия. Повышенный уровень собственных шумов приборов несет информацию о наличии тех или иных дефектов.

Ключевые слова: варикапы, уровень шума, спектральная плотность мощности шума, деградация, электротренировка, вольтамперная характеристика, дефекты структуры, контакты.

Анотація. Розглядаються можливості та фізичні принципи для знаходження методів відбирання ненадійних варікапів за їхніми електрошумовими характеристиками. Приведені основні теоретичні співвідношення, що визначають їх параметри. Показано, що фізичною основою методу прогнозування відмов у роботі варікапів за їх низькочастотними шумами є залежність рівня шуму від присутності дефектів структури та якості контактів виробу. Підвищений рівень власних шумів приладів несе інформацію про присутність тих або інших дефектів.

Ключові слова: варікапи, рівень шуму, спектральна густина потужності шуму, деградація, електротренування, вольтамперна характеристика, дефекти структури, контакти.

Abstract. Possibilities and physical principles for determination of methods of a rejection of unreliable varicaps by their noise characteristics are considered. The basic theoretical relations which define their parameters are reduced. The physical base of a method of a failure prediction of varicaps on their low-frequency noises is association of noise level on presence of imperfections of structure and quality of contacts of a hardware product is shown. High level of an internal noise of instruments has the information on presence of those or other imperfections.

Key words: varicaps, noise level, a spectral density of a potency of noise, degradation, electrotesting, a voltage-current characteristic, structure imperfections, contacts.

В настоящее время рыночная экономика требует создания и выпуска высококачественной и высоконадежной продукции. Это в полной мере относится и к радиоэлектронной аппаратуре, надежность которой зависит от качества комплектующих

изделий, а особенно полупроводниковых приборов. Отказ аппаратуры в большинстве случаев происходит из-за отказа единичных элементов, в которых по ряду причин развиваются не свойственные общей массе изделий деградиационные процессы. Предпосылки этих процессов в виде явных дефектов обнаруживаются контролем в ходе производства. Но ряд дефектов в виду их малости и недостаточной чувствительности контрольной аппаратуры, зависимости от малоизученных и неизвестных еще причин не обнаруживается и изделия с такими скрытыми дефектами попадают в готовую продукцию предприятий – изготовителей комплектующих изделий [1].

Резерв повышения качества и надежности полупроводниковых приборов лежит в создании методики и средств диагностики скрытых дефектов. Для решения данной задачи наиболее эффективными являются электрофизические методы диагностирования, основывающиеся на диссипации энергии, внутренних флуктуациях спонтанного типа и на нелинейности функциональных характеристик [2, 3]. Одним из широко применяемых методов является прогнозирование надежности полупроводниковых приборов по низкочастотным шумам типа $1/f^{\gamma}$ [4]. Физической основой метода является доказанная зависимость уровня шума от наличия дефектов структуры и качества контактов изделия. Повышенный уровень собственных шумов должен нести информацию о наличии тех или иных дефектов, т.е. о возможно преждевременном отказе данного полупроводникового прибора.

Цель данной статьи – определение методов отбраковки ненадежных варикапов по их электрошумовым характеристикам.

Флуктуационные процессы (шумы) в полупроводниках обусловлены случайным характером различных происходящих в них физическим процессам [2,3]. Так, случайные изменения скоростей свободных носителей заряда, вызванные случайным характером процессов их рассеяния, приводит к флуктуациям их локальной плотности, в результате чего появляются случайные микроскопические диффузионные токи. По этой причине в полупроводниках, содержащих свободные носители заряда, существует флуктуирующий ток, равный сумме таких микротоков, а на электрических контактах у них возникает фрукутуирующее напряжение. В условиях термодинамического равновесия такого шума оно называется тепловым или джонсовским шумом. Среднеквадратическое значение напряжения такого шума определяется по формуле Найквиста:

$$\bar{U}_{ш}^2 = 4kTR\Delta f, \quad (1)$$

где k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; R – активное внутреннее сопротивление прибора; Δf – эквивалентная шумовая полоса.

В полупроводниковых приборах ток, протекающий через $p-n$ – переход, из-за случайного изменения концентрации носителей заряда за счет процессов генерации и рекомбинации, испытывает флуктуации [4]. Такой шум получил название генерационно – рекомбинационного шума или дробового шума.

При небольшой плотности тока взаимодействием носителей заряда между собой можно пренебречь и представить каждое пересечение носителей потенциального барьера как независимое, случайное событие. В этом случае среднеквадратическое значение шумового тока определяется формулой Шоттки:

$$\bar{I}_{ш}^2 = 2eI\Delta f, \quad (2)$$

где e – заряд электрона; I – ток, протекающий через $p-n$ – переход. Однако при этом необходимо учитывать, что ток через переход является суммой прямого и обратного тока и каждому из них присущ дробовой эффект.

С точки зрения прогнозирования отказов полупроводниковых приборов наибольший интерес представляют низкочастотные шумы, причиной возникновения которых являются различного рода дефекты в их структуре. В литературе эти шумы иногда называют фликкер-шум или шум типа $1/f$. Низкочастотный шум полупроводниковых приборов обусловлен

прежде всего электрофизическим состоянием поверхности кристалла, а также объемными дефектами полупроводника.

Первоисточником низкочастотных шумов является медленное состояние вблизи поверхности раздела полупроводниковых структур и защитных слоев окисной пленки, а также на ее поверхности. Флуктуации плотности поверхностных состояний вызывают изменения пространственного заряда в обедненной области вблизи поверхности и, как следствие, изменяют потенциальный барьер, что, в свою очередь, влечет за собой изменение тока через *p-n*-переход.

Возрастание низкочастотного шума является одним из первых признаков деградации активных областей полупроводниковой структуры и может привести к ее полному отказу. Контакты и их качество в полупроводниковой структуре являются причиной появления и увеличения в процессе эксплуатации низкочастотного шума. Каждый контакт может быть представлен как совокупность микроточек соприкосновения двух разнородных контактирующих материалов из которых часть может быть замкнута, а часть – разомкнута. Во время эксплуатации или электротренировки число разомкнутых микроточек может меняться случайно, что приводит к флуктуациям тока через весь контакт, а следовательно, и к возрастанию шума. По возрастанию шума в контактах можно судить о приближении их разрушения, а значит и о потенциальной ненадежности данного полупроводникового прибора.

Спектральная плотность мощности шума (СПМШ) от частоты для полупроводниковых приборов в общем виде состоит из четырех областей [5]. При низких частотах преобладает низкочастотный шум вида $1/f$. С повышением частоты преобладает генерационно-рекомбинационный или дробовой шум, причем его спектральная плотность постоянна к частотам, соизмеряемых с величиной, обратной времени жизни носителей заряда ($f \sim \frac{1}{\tau}$).

На более высоких частотах СПМШ генерационно-рекомбинационного шума начинает спадать по зависимости $(1 + \frac{B}{(\omega \cdot \tau^2)})$, где B – коэффициент; $\omega = 2\pi f$;

τ – время жизни носителей. На высоких частотах СПМШ теплового шума уже не зависит от частоты. Поэтому как тепловой так и дробовой шум относятся к шумам с белым спектром, их теория хорошо разработана. Однако эти два вида шумов непосредственно связаны с дефектами полупроводниковых приборов и не дают дополнительной информации о их потенциальной ненадежности.

Для прогнозирования отказов наибольший интерес представляют низкочастотные шумы, причиной которых являются различного рода дефекты в структурах и контактах полупроводниковых приборов.

Для анализа шума в варикапах необходимо рассмотреть все составляющие тока, протекающего через обратносмещенный *p-n* – переход: диффузионный ток, образованный зарядами носителей в нейтральных областях; генерационный ток, возникающий за счет появления носителей внутри обедненного слоя, который отличается от диффузионного по величине при обратном смещении; ток лавинного умножения, возникающий за счет генерационно-рекомбинационных эффектов поверхностных каналов, а также явлений, обусловленных влиянием защитной пленки. Однако не все компоненты обратного тока необходимо учитывать, так как туннельный ток незначителен при малых концентрациях примеси. Диффузионный ток у полупроводников с широкой запрещенной зоной намного меньше, чем ток генерации. Ток лавинного умножения можно также не учитывать при обратном смещении, равном 0,7...0,8 пробивного напряжения.

Следовательно, основными составляющими обратного тока, дающего шум варикапа (без учета качества контактов), можно считать генерационный и поверхностный токи. Поэтому суммарный шум варикапа, создаваемый всеми источниками будет обусловлен

тепловым шумом \bar{U}_T^2 последовательного сопротивления R_n , поверхностным \bar{U}_n^2 и генерационно-рекомбинационным $\bar{U}_{ГР}^2$ источниками шума, т.е.

$$\bar{U}_\Sigma^2 = \bar{U}_T^2 + \bar{U}_n^2 + \bar{U}_{ГР}^2. \quad (3)$$

С учетом выражения (3) общий шум, создаваемый обратно смещенным варикапом, можно выразить через СПМШ следующим образом:

$$S_\Sigma = 4\kappa TR_n + (0,27e\phi\phi_p N_D (\psi_k - U)\tau / \pi^2 \epsilon_a c A (1 + \omega\tau)^2) + S_{ГР}, \quad (4)$$

где κ – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; e – заряд электрона; ϕ – функция заполнения дислокационных акцепторных центров; ϕ_p – функция, характеризующая незаполненные акцепторные центры; N_D – плотность дислокаций; ψ_k – контактная разность потенциалов; U – напряжение смещения на p - n -переходе; τ – время жизни неосновных носителей тока; ϵ_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость кремния; c – расстояние между дислокационными акцепторными центрами; A – площадь p - n -перехода; ω – круговая частота. Как видно из (4) S_Σ прямо пропорциональна плотности дислокационных центров и функции их заполнения. Следовательно, на высоких и сверхвысоких частотах (см. формулу 4) основную роль играет тепловой шум последовательного сопротивления R_n варикапа, которое порядка одного или нескольких Ом. На низких частотах преобладает частотно независимый дробовой шум варикапа, который может превышать тепловой шум или быть с ним одного порядка. В области наиболее низких частот появляется характерный избыточный или фликкер-шум, СПМШ которого пропорциональна $1/f^\gamma$, где γ – коэффициент, характеризующий вид спектра. Этот шум создают флуктуации концентрации зарядов на поверхности, а также флуктуации скорости поверхностной рекомбинации вблизи поверхности раздела полупроводника и защитных слоев окисной пленки. Поэтому этот шум и будет в основном характеризовать надежность данного полупроводникового прибора (варикапа).

Наличие дефектов в контактных соединениях также будет приводить к увеличению уровня низкочастотного шума в варикапе. Если, например, из общего количества n микроконтактов N контактов ненадежны, то замыкаясь и размыкаясь случайным образом, каждый контакт пропускает ток I_k в замкнутом состоянии и нулевой ток в разомкнутом. В среднем число разомкнутых выключателей равно N_1 , а замкнутых – N_2 . Эти числа, отклоняясь от среднего, флуктуируют на величину ΔN_1 и ΔN_2 . Если ΔN_1 подчиняется биномиальному распределению

$$\Delta N_1^2 = NP(1 - P), \quad (5)$$

где $P = \frac{N_1}{N}$; $1 - P = \frac{N_2}{N}$, то при экспоненциальной функции автокорреляции спектральная плотность флуктуации тока получится в виде:

$$S_i(\omega) = \kappa I_k^2 N \frac{\tau_0}{1 + \omega^2 \tau_0^2}. \quad (6)$$

Здесь τ_0 характеризует время включенного состояния микроконтакта.

Спектральная плотность низкочастотного шума убывает с частотой, следовательно, абсолютный уровень шума на данной частоте определяется числом ненадежных контактов N и величиной проходящего через контакт тока.

Таким образом, отказу контактных соединений должно предшествовать увеличение уровня шума, обусловленного случайным процессом замыкания и размыкания отдельных

точек контактной площадки. Следовательно, появление контактных шумов варикапов может быть использовано для прогноза их отказов.

При рассмотрении низкочастотного шума как физического процесса, определяющего потенциальную надежность полупроводниковых приборов, следует исследовать СПМШ $S(f)$. Для этого можно использовать метод непосредственного измерения СПМШ на некоторой частоте звукового диапазона, заключающийся в измерении эффективного напряжения шума при помощи высокочувствительного измерителя с известной полосой пропускания. Очевидно, что чувствительность установки при непосредственном методе измерения ограничивается внутренними шумами самого измерителя. При этом прибор должен содержать линейный полосовой фильтр с достаточно узкой полосой пропускания Δf , квадратичный детектор, интегратор и регистрирующее устройство. Данный метод позволяет перекрывать достаточно широкий диапазон частот и не требует дорогостоящего и дефицитного оборудования.

Измерение шумов варикапов проводилось непосредственным методом в диапазоне частот $10 \dots 2 \cdot 10^4$ Гц при полосе пропускания 3 и 10 Гц. Уровень шума измерялся при обратных токах насыщения при определенной частоте.

Экспериментальные значения СПМШ на заданной частоте при известной полосе пропускания Δf измерительной установки и постоянном коэффициенте усиления K предварительного усилителя однозначно определяются эффективным напряжением шумов $U_{ш}$ по спектроанализатору СКЧ – 56 и рассчитывается по формуле:

$$S_U(f) = \frac{\bar{U}_{ш}^2}{K^2 \Delta f}. \quad (7)$$

Для измерения уровня шума исследуемого варикапа спектроанализатор настраивается на нужную частоту при определенной полосе пропускания. Для устранения флуктуации уровня шумового сигнала необходимо пользоваться переключателем видеофильтра спектроанализатора. После прогрева установки определяется первоначальный уровень шума для всей установки при нулевом смещении на варикапе. Затем на варикап подается обратное смещение, близкое к номинальному, и производится новый отсчет уровня шума. По разности показаний полученных измерений судят об истинном уровне шума варикапа.

Низкочастотный шум со спектральной плотностью вида $1/f^\gamma$ может генерироваться как в объеме, так и в приповерхностной области полупроводниковых структур. Этот шум зависит от технологий изготовления и режима работы $p-n$ -перехода и может служить мерой качества полупроводниковых приборов (варикапов), а также является источником информации о физических процессах, протекающих в них. Поэтому для определения этих источников следует пользоваться индивидуальными кривыми вольтамперных характеристик, снятыми экспериментально, которые, в свою очередь, могут сильно отличаться для одного и того же типа варикапов.

Возрастание низкочастотного шума является одним из первых признаков деградации в термодинамически неравновесных, подверженных старению областях полупроводниковой структуры, что может привести к ее полному отказу. Контакты и их качество, а также сопротивление базы являются основными источниками шумов в варикапах. Во время электротренировки, а также при эксплуатации число разомкнутых микроточек может меняться случайно, что обязательно будет приводить к флуктуациям тока через весь контакт и, следовательно, к возрастанию шума. По возрастанию шума в контактах можно судить о приближении их разрушения. Отбраковка варикапов с повышенными низкочастотными шумами повышает механическую прочность стабильной партии, также ее стойкость к тепловым нагрузкам.

Исследование низкочастотного шума обратных смещенных варикапов в предпробойной области в процессе деградации позволяет по возрастанию шума отбраковывать

некачественные образцы, что стабилизирует партию данного типа варикапов по пробивному напряжению.

Для различных типов варикапов проводились измерения СПМШ как на участке насыщения тока, так и в предпробойной области обратно смещенных варикапов $S_U(f)$. Из анализа этой зависимости следует, что шум варикапов при токах насыщения порядка $7,4 \cdot 10^{-9}$ А в процессе деградации стабилизируется в течение пяти суток и сравнительно мало меняется в последующие сутки. Первоисточником низкочастотных шумов типа $1/f^\gamma$ в этом случае очевидно являются медленные состояния вблизи поверхности раздела полупроводника и защитных слоев окисной пленки, а также на ее поверхности. Флуктуации плотности поверхностных состояний вызывают изменение пространственного заряда в обедненной области вблизи поверхности и, как следствие, изменяют потенциальный барьер, что, в свою очередь, влечет за собой незначительные изменения тока через *p-n*-переход.

При напряжении пробоя порядка 48В наблюдалось повышение уровня шума примерно на порядок относительно его уровня при токах насыщения. С другой стороны отмечено повышение низкочастотного шума в процессе деградации в предпробойной области. Из этого следует, что на участке приработки варикапов наблюдается четкая взаимосвязь между вольтамперной характеристикой и СПМШ. Это особенно заметно в предпробойной области, что позволяет производить отбраковку некачественных варикапов по низкочастотным шумам. Было установлено, что выдержка варикапов в течении 12...14 суток при переменном напряжении, амплитуда обратного периода которого не превышает $0,8...0,9 U_{обр}$ максимального обратного рабочего напряжения, а амплитуда прямого полупериода которого равняется по величине такому постоянному прямому току, при котором диффузионная емкость варикапа максимальна или достигает насыщения, сокращает время стабилизации параметров и позволяет повышать процент выхода годных приборов. Исключая же из партии приборов варикапы с повышенными электрошумовыми характеристиками можно стабилизировать партии варикапов по обратным вольтамперным характеристикам. Уровень шумов некачественных варикапов в предпробойной области может возрасти на 2...3 порядка. Исключение варикапов с повышенными шумами в предпробойной области стабилизирует партию приборов по пробивному напряжению.

Повышение уровня шума в процессе электротренировки и деградации варикапов может быть связано с появлением дислокаций, которые создавая глубокие генерационно-рекомбинационные уровни могут быть источником повышенного шума. Это, в свою очередь, не может не сказываться на параметрах изготавливаемых варикапов.

СПМШ, а также уровень шума на определенной частоте коррелируют с возрастанием обратного тока насыщения варикапов. Коэффициент корреляции порядка 0,8. Поэтому исключая из партии приборов варикапов с повышенными электрошумовыми характеристиками, можно их стабилизировать по обратным вольтамперным характеристикам. Исключение же варикапов с повышенными шумами в предпробойной области стабилизирует партию по пробивному напряжению. Начальный уровень шума варикапов зависит от начальной концентрации структурных дефектов, т.е. от качества производства. Он определяет скорость старения варикапов при их эксплуатации, а следовательно, и надежность.

В заключение можно сказать следующее: рассмотренные методы отбраковки ненадежных варикапов по их электрошумовым характеристикам занимают значительно меньше времени, чем при снятии их электрических характеристик и позволяют автоматизировать установку для разбраковки больших партий варикапов одного типа с одновременной отбраковкой потенциально ненадежных образцов по уровню шума. Шумы же варикапов можно существенно снизить путем совершенствования технологии их изготовления, рациональным выбором электро- и теплотренировки, а также режимом работы и условиями хранения, но нельзя исключить вообще.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ирха В.И. Основные характеристики шумов в полупроводниках / В.И. Ирха, К.В. Константинов // 68 науч.-техн. конф. ОНАС им. А.С. Попова, 4-6 дек. 2013 г.: тезисы докл. – Одесса, 2013. – С. 114-116.
2. Сердюк Г.Б. Интегральная диагностика электрорадиоизделий по эффектам нелинейности / Г.Б. Сердюк // Автоматика и телемеханика. – 1990. – № 2. – С. 132-156.
3. Лукьянчикова Н.В. Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах / Н.В. Лукьянчикова. – М.: Радио и связь, 1990. – 265 с.
4. Ирха В.И. Флуктуационные явления в полупроводниках / В.И. Ирха // 70 науч.-техн. конф. ОНАЗ им. О.С. Попова, 1-3 груд. 2015 р.: матер. конф, ч.1. – Одеса, 2015. – С. 12-13.
5. Irkha V. Forecasting of Reliability of Varicaps / V. Irkha, V.Gorbachev, I. Vikulin // Proceedings of XIIIth International Conference "CADSM 2015", 24-27 February 2015. – Lviv – Poljana, Ukraine, 2015. – P. 100-102.

REFERENCES:

1. Irkha V.I. Basic characteristics of noises in semiconductors / V.I. Irkha, K.V Konstantinov // 68 scientific conference ONAC named by of O.S. Popova, 4-6 Decem., 2013. – P. 114-116.
2. Serduk G.B. Integral diagnostic of electroradiohardware products on effects of non-linearity / G.B. Serduk // Automation and telemechanics. – 1990. – №2. – P. 132-156.
3. Lukjanchikova N.V. Fluctuation appearances in semiconductors and semiconductor devices / N.V. Lukjanchikova. – M.: Radio and communication, 1990. – 265 с.
4. Irkha V.I. Fluctuation appearances in semiconductors / V.I. Irkha // 70 scientific conference ONAC named by of O.S. Popov., 1-3 Decem., 2015, p.1. – Odessa, 2015. – P. 12-13.
5. Irkha V. Forecasting of Reliability of Varicaps / V. Irkha, V.Gorbachev, I. Vikulin // Proceedings of XIIIth International Conference "CADSM 2015", 24-27 February 2015. – Lviv – Poljana, Ukraine, 2015. – P. 100-102.