

УДК 621.391.822

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА ИМПУЛЬСОВ ШУМОВЫХ ДИОДОВ, РАБОТАЮЩИХ В РЕЖИМЕ МИКРОПЛАЗМЕННОГО ПРОБОЯ

О.Ю. Горбадей, А.О. Зеневич

Белорусская государственная академия связи, Минск

INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF THE FLOW OF PULSES OF NOISE DIODES WORKING IN THE MODE OF MICROPLASMA BREAKDOWN

O.Y. Gorbadey, A.O. Zenevich

Belarusian State Academy of Telecommunications, Minsk

Определены зависимости интенсивности потока выходных импульсов от напряжения обратного смещения шумовых диодов и силы тока, протекающей через их $p-n$ -переход. Установлены основные процессы, влияющих на величину интенсивности потока выходных импульсов кремниевых шумовых диодов, работающих в режиме микроплазменного пробоя. Получено, что к таким процессам можно отнести ударную ионизацию, термогенерацию и туннелирование носителей электрического заряда.

Ключевые слова: шумовой диод, микроплазменный пробой, автокорреляционная функция.

The dependences of the intensity of the output pulse flux on the voltage of the reverse bias of the noise diodes and the current flowing through their $p-n$ junction are determined. The main processes influencing the intensity of the output pulse flux of silicon noise diodes operating in the microplasma breakdown mode are established. It is obtained that shock processes, thermal generation and tunneling of carriers of electric charge can be classified as such processes.

Keywords: noise diode, microplasma breakdown, autocorrelation function.

Введение

В настоящее время шумовые диоды находят широкое применение для создания генераторов случайных числовых последовательностей [1]. Такие генераторы используются в таких областях науки и техники как криптография, численное моделирование случайных процессов, создание игровых автоматов.

Все большее применение для этих целей находят шумовые диоды, работающие в режиме микроплазменного пробоя [2]. Это в основном связано с тем, что такие диоды имеют небольшие габариты, малые напряжения питания (менее 10 В) по сравнению с другими приборами, используемыми для генерации случайных числовых последовательностей. Такие свойства диодов позволяют достаточно просто встраивать их в различные электронные устройства.

Одной из основных характеристик шумовых диодов является интенсивность потока их выходных импульсов. Под интенсивностью понимается количество импульсов, сформированных на выходе диода, за единицу времени. Однако в настоящее время достаточно плохо изучены зависимости интенсивности потока выходных импульсов от напряжения обратного смещения шумовых диодов и силы тока, протекающей через их $p-n$ -переход, а также процессы, вносящие определяющий вклад в формирование величины интенсивности потока импульсов на выходе шумовых диодов, работающих в режиме

микроплазменного пробоя. Это и явилось целью данной работы.

1 Описание экспериментальной установки и методики измерения

Для проведения исследований использовалась экспериментальная установка, блок-схема которой представлена на рисунке 1.1. Для реализации режима микроплазменного пробоя шумовой диод ШД включался по схеме, показанной на рисунке 1.1. При этом последовательно с диодом ШД подключался нагрузочный резистор (R_n), а для ограничения тока, протекающего через него, применялся ограничительный резистор ($R_{огр}$). Источник постоянного напряжения (I) использовался для питания шумового диода. Напряжения, подаваемые на диод, были близкими или превышали напряжение его лавинного пробоя. Именно при этих напряжениях наблюдается микроплазменный пробой шумового диода [2]. Таким образом реализовывался микроплазменный режим работы шумового диода. Контроль напряжения питания диода осуществлялся при помощи вольтметра (V). Величина электрического тока, протекающего через шумовой диод, измерялась амперметром (A). Импульсы напряжения, сформированные на резисторе (R_n) в результате микроплазменного пробоя диода, поступали на вход усилителя (U). После усиления в усилителе эти импульсы подавались на вход амплитудного дискриминатора (D). Дискриминатор

осуществлял отделение микроплазменных импульсов от собственных шумов усилителя, а также их стандартизацию по амплитуде и длительности. С выхода амплитудного дискриминатора импульсы подавались на входы коррелятора (К) и частотомера (Ч). При помощи коррелятора (К) выполнялись измерения автокорреляционной функции выходного потока шумового диода. Частотомер (Ч) использовался для измерения интенсивности потока выходных импульсов шумового диода.

Измерения выполнялись при постоянной температуре 293 К. Во время исследований определялась вольтамперная характеристика шумового диода. По полученной вольтамперной характеристике определялись напряжения микроплазменных пробоев, согласно методике, описанной в работе [3]. Поскольку для исследуемых типов шумовых диодов напряжения пробоя отличались, то для определения зависимостей использовалась величина перенапряжения

$$\Delta U = U_{см} - U_n,$$

где $U_{см}$ – напряжение обратного смещения, приложенное к шумовому диоду, U_n – напряжение первого канала микроплазменного пробоя.

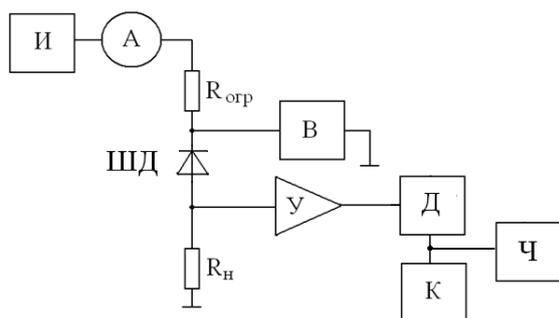


Рисунок 1.1 – Блок-схема экспериментальной установки (И – источник напряжения, ШД – шумовой диод, В – вольтметр, У – усилитель, Д – дискриминатор, К – коррелятор, А – амперметр, Ч – частотомер, $R_{огр}$ – ограничительный резистор, $R_н$ – нагрузочный резистор)

2 Результаты эксперимента и их обсуждение

В качестве объектов исследования были использованы серийно выпускаемые кремниевые шумовые диоды следующих марок: ND102L, ND103L, КГ401.

На рисунке 2.1 представлены зависимости интенсивности выходного потока импульсов λ шумовых диодов от ΔU . Согласно полученным зависимостям с ростом ΔU увеличивается интенсивность λ . Такое поведение зависимостей связано с тем, что концентрация неосновных носителей заряда в базовых областях p - n -перехода повышается с увеличением напряженности электрического поля, поскольку растет вероятность

ударной ионизации неосновных носителей заряда, выходящих из области пространственного заряда. Также с увеличением электрического тока, протекающего через диод, происходит разогрев канала микроплазменного пробоя, что приводит к увеличению концентрации термогенерированных неосновных носителей в базовых областях p - n -перехода. В кремниевых шумовых диодах с напряжением меньше 10 В наблюдается процесс туннелирования носителей заряда, который происходит через ловушечные уровни и приводит к увеличению концентрации неосновных носителей заряда [3]. Отметим, что частота генерации носителей заряда при этом процессе зависит от напряженности электрического поля [3]. Рост концентрации неосновных носителей заряда приводит к росту вероятности возникновения микроплазменного пробоя [3], и, как следствие, к увеличению частоты (интенсивности) появления микроплазменных импульсов на выходе диода с ростом перенапряжения.

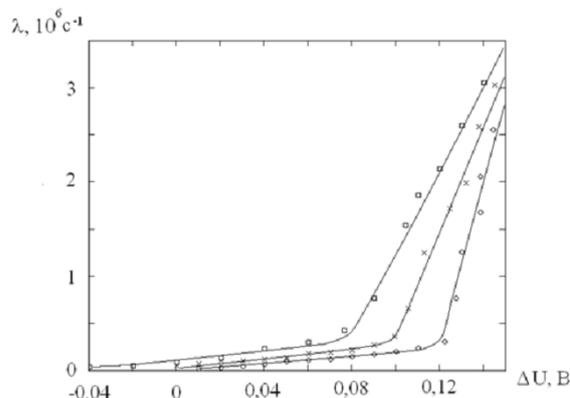


Рисунок 2.1 – Зависимость интенсивности выходного потока импульсов от перенапряжения \times – шумовой диод ND102L; \diamond – шумовой диод КГ401; \square – шумовой диод ND103L

Для определения наличия корреляционных связей между импульсами были выполнены измерения автокорреляционных функций выходного потока импульсов шумовых диодов. Полученные результаты измерений представлены на рисунке 2.2. Также на рисунке 2.2 представлены автокорреляционные функции для шумового диода КГ401. Для других марок шумовых диодов изменение вида автокорреляционной функции от перенапряжения было аналогичным. Автокорреляционная функция, представленная на рисунке 2.2 а), имела приблизительно одинаковые значения на всем временном интервале, на котором она была измерена. Получено, что такой вид автокорреляционных функций имели для следующих перенапряжений: $\Delta U = -0.04 \div 0,00$ В для шумового диода ND103 L; $\Delta U = 0.00 \div 0,03$ В – для КГ401; $\Delta U = 0.01 \div 0,05$ В – для ND102 L. Отметим, что максимальная интенсивность

потока импульсов $\lambda = 8,0 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$, при которой автокорреляционная функция имела вид, показанный на рисунке 2.2 а), была получена для шумового диода ND103L, а минимальная – $\lambda = 2,1 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ для шумового диода ND102L. Таким образом, при этих перенапряжениях корреляционных связей между импульсами не наблюдалось.

Дальнейшее увеличение ΔU приводит к тому, что изменяется вид автокорреляционной функции (рисунок 2.2 б), то есть наблюдался «провал» автокорреляционной функции для ее первого значения. Это связано с тем, что за каждым импульсом следует некоторый интервал времени τ , в течение которого напряженность электрического поля p - n -перехода восстанавливается до пробивного значения. В этот промежуток времени микроплазменный пробой не возникает, а, следовательно, и не может сформироваться импульс на выходе шумового диода. С ростом перенапряжения повышается интенсивность λ (рисунок 2.2). Это приводит к тому, что временной интервал между импульсами сокращается и приближается по длительности к τ , что приводит к уменьшению дисперсии числа выходных импульсов диода D по сравнению с их математическим ожиданием $\langle N \rangle$. Поэтому наблюдается «провал» автокорреляционной функции для ее первого значения.

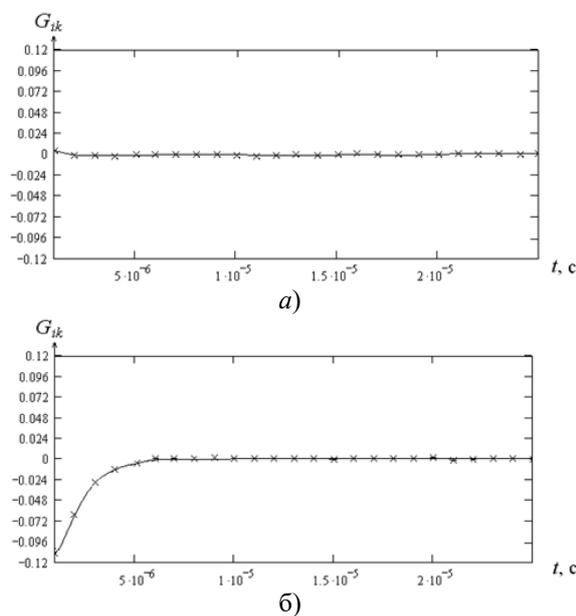


Рисунок 2.2 – Автокорреляционная функция для шумового диода ND103 L
а) $\Delta U = 0.00 \text{ В}$; б) $\Delta U = 0.10 \text{ В}$

На рисунке 2.3 представлены зависимости интенсивности выходных импульсов шумовых диодов от величины электрического тока I , протекающего через него. Как видно из полученных результатов (рисунок 2.3), эти зависимости имеют два участка, на которых зависимость λ от I линейна. Так, для шумового диода марки КГ401

первый диапазон линейности соответствовал диапазону напряжений обратного смещения $U_{см} = -7,98 \div -8,08 \text{ В}$, а второй диапазон линейности – $U_{см} = -8,09 \div -8,14 \text{ В}$. Для диода марки ND 102 L первый и второй диапазоны наблюдались при $U_{см} = -9,61 \div 9,72 \text{ В}$ и $U_{см} = -9,73 \div -9,78 \text{ В}$ соответственно. Шумовые диоды марки ND 103 L при исследуемых перенапряжениях имели первый и второй диапазон линейности для $U_{см} = -8,78 \div 8,89 \text{ В}$ и $U_{см} = -8,90 \div -8,98 \text{ В}$ соответственно. Отметим, что при напряжениях обратного смещения более низком, чем в указанных выше интервалах, происходило резкое увеличение электрического тока, протекающего через диод, что могло привести к его тепловому пробую. Поэтому при таких $U_{см}$ исследования не проводились.

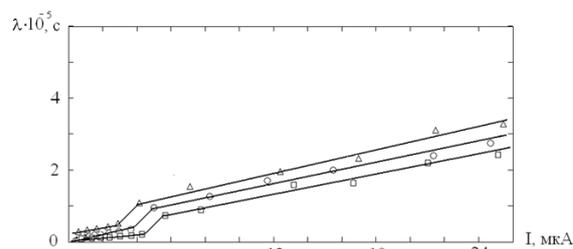


Рисунок 2.3 – Зависимости интенсивности выходных импульсов шумовых диодов от величины электрического тока
 Δ – для шумовых диодов КГ401; \circ – ND 102 L;
 \square – ND 103 L

Максимальное значение электрического тока I_{max} , соответствующее первому диапазону линейности, отличалось от минимального значения I_{min} , соответствующего второму диапазону линейности. Так, эти значения для исследуемых марок шумовых диодов составляли следующие значения: $I_{max} = 4,1 \text{ мкА}$ и $I_{min} = 6,0 \text{ мкА}$ для шумового диода ND103 L; $I_{max} = 3,8 \text{ мкА}$ и $I_{min} = 5,1 \text{ мкА}$ для ND102 L; $I_{max} = 3,0 \text{ мкА}$ и $I_{min} = 4 \text{ мкА}$ для КГ401. Для этих токов интенсивности выходных импульсов принимали следующие значения: $\lambda_{max} = 2 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ и $\lambda_{min} = 7 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ для шумового диода ND103 L; $\lambda_{max} = 3 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ и $\lambda_{min} = 9 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ для ND102 L; $\lambda_{max} = 5 \cdot 10^4 \text{ c}^{-1}$ и $\lambda_{min} = 1,1 \cdot 10^5 \text{ c}^{-1}$ для КГ401 (λ_{max} и λ_{min} – интенсивности выходных импульсов для I_{max} и I_{min} соответственно). Наличие таких участков связано с возникновением при малых напряжениях питания одного канала микроплазменного пробоя, а при больших напряжениях питания появлением и второго канала. Отметим, что микроплазменный пробой характеризуется последовательным сопротивлением R_s и напряжением пробоя U_{np} [3].

Коэффициент пропорциональности β между величинами λ и I представлены в таблице. Таким образом, величина I определяется частотой попадания носителей заряда в канал микроплазменного

Таблица 2.1 – Характеристики шумовых диодов

Тип шумового диода	Первый микроплазменный пробой			Второй микроплазменный пробой		
	$U_{пр}$, В	R_s , кОм	β , (мкА·с) ⁻¹	$U_{пр}$, В	R_s , кОм	β , (мкА·с) ⁻¹
КГ 401	7,98	33,1	$16,7 \cdot 10^3$	8,10	2,0	$9,3 \cdot 10^3$
ND 103 L1	8,77	30,2	$4,9 \cdot 10^3$	8,97	0,6	$9,5 \cdot 10^3$
ND 102 L1	9,61	40,1	$7,9 \cdot 10^3$	9,76	1,0	$9,8 \cdot 10^3$

пробоя и вероятностью включения микроплазменного пробоя. В основном от этих параметров зависит величина электрического тока, протекающего через шумовой диод в этом диапазоне ΔU . Также в таблице 2.1 представлены значения последовательных сопротивлений первого и второго микроплазменных пробоев R_s и коэффициентов пропорциональности β .

Как следует из представленных данных в таблице, при возникновении второго микроплазменного пробоя величина R_s уменьшается по сравнению с последовательным сопротивлением, полученным для первого микроплазменного пробоя. Это связано с тем, что с появлением второго микроплазменного канала увеличивается площадь p - n -перехода, по которой может протекать электрический ток, вызванный микроплазменным пробоем. Такое увеличение площади и приводит к уменьшению величины R_s . Отметим, что среди исследуемых марок шумовых диодов интенсивность выходных импульсов шумового диода КГ 401 имела более сильную зависимость от величины электрического тока для перенапряжений, соответствующим первому микроплазменному пробоя. Для перенапряжений, соответствующих второму микроплазменному пробоя, более сильная зависимость λ от I была характерна для шумовых диодов ND 102 L1 (см. таблицу 2.1).

Заключение

Получено, что увеличение напряжения обратного смещения приводит к росту интенсивности потока выходных импульсов на выходе шумового диода.

Выявлено, что при значениях интенсивности потока выходных импульсов, больших $8,0 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$, для всех исследуемых марок шумовых диодов наблюдалось наличие корреляционных связей между импульсами.

Установлено, что зависимость интенсивности потока выходных импульсов от величины силы тока, протекающего через шумовой диод, имеет два участка, на которых эта зависимость линейна.

Таким образом, на основании анализа полученных зависимостей и характеристик можно сделать заключение, что следующие процессы, протекающие в шумовых диодах, влияют на величину интенсивности потока импульсов на их выходе: ударная ионизация неосновных носителей заряда, выходящих из области пространственного заряда; термогенерация носителей заряда; туннелирование носителей заряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Криптология: учебник* / Ю.С. Харин [и др.]. – Минск: БГУ, 2013. – 511 с.
2. *Барановский, О.К.* Оценка энтропии случайных числовых последовательностей формируемых с использованием физического источника шума / О.К. Барановский, П.В. Кучинский, А.Ф. Чернявский // Вести НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. – 2004. – № 4. – С. 105–110.
3. *Грехов, И.В.* Лавинный пробой p - n -перехода в полупроводниках / И.В. Грехов, Ю.Н. Сережкин. – Л.: Энергия, 1980. – 152 с.

Поступила в редакцию 31.01.18.