

ГЕНЕРАЦИЯ МОЩНЫХ СВЧ КОЛЕБАНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ В ДИФФУЗИОННОМ КРЕМНИЕВОМ ДИОДЕ

Любутин С. К.^{*}, Рукин С. Н.^{*}, Словиковский Б. Г.^{*}, Цыранов С. Н.^{*,†}

^{*}Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук

г. Екатеринбург, 620016, Амундсена 106, Россия

[†]Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, 620002, Мира 19, Россия

тел.: 343-2678780, e-mail: serg@iep.uran.ru

Аннотация — Исследован механизм генерации мощных СВЧ колебаний напряжения в диффузионном кремниевом диоде. Через диод с толщиной структуры 320 мкм, глубиной залегания $p-n$ -перехода 220 мкм и площадью 0.5 см² пропускался обратный ток амплитудой 2 кА. При среднем напряжении на диоде около 300 В и длительности СВЧ импульса ~ 200 нс максимальный размах наблюдаемых колебаний достигает 480 В. Частота колебаний находится в диапазоне от 5 до 7 ГГц, мощность СВЧ компоненты импульса составляет ≈ 300 кВт при КПД ~ 50%. Механизм генерации колебаний рассмотрен теоретически. Показано, что запуск процесса колебаний напряжения, их размах и частота определяются плотностью обратного тока.

I. Введение

Для генерации колебаний напряжения СВЧ диапазона давно используются полупроводниковые приборы с диодной структурой. Наибольшее распространение получили лавинно-пролетные диоды (ЛПД) и лавинно-ключевые диоды (ЛКД). ЛКД представляет собой лавинно-пролетный диод, работающий в так называемом *TRAPATT*-режиме. Механизм работы обоих типов диодов основан на явлении ионизационного пробоя полупроводника под действием сильного электрического поля. Для работы диодов необходим внешний импульс перенапряжения. В ЛПД для этого используется наложение высокочастотного электрического поля, которое, суммируясь с полем постоянного смещения, обеспечивает пробой диода в каждый период колебаний внешнего поля. В *TRAPATT*-режиме диод работает как высокочастотный коммутатор, частота срабатывания которого задается частотой поступления на диод импульсов перенапряжения от внешней схемы резонатора. На один диод характерные значения СВЧ мощности и частоты колебаний для ЛПД достигают 50 Вт и 10–100 ГГц, в *TRAPATT*-режиме до 400 Вт при частоте от 0.6 до 10 ГГц [1]. В работе [2] были обнаружены незатухающие СВЧ колебания напряжения гигагерцовой частоты в кремниевом $p^+ - p - n^+$ -диоде, возникающие при прохождении через него обратного тока длительностью ~ 300 нс и плотностью несколько кА/см². Мощность колебаний оценивалась величиной ~ 10 кВт на один $p-n$ -переход. Данная работа продолжает исследования [2].

II. Результаты эксперимента

Исследуемый кремниевый диод D имел структуру $p^+ - p - n^+$ типа толщиной 320 мкм, глубиной залегания $p-n$ -перехода 220 мкм и площадью 0.5 см². Для возбуждения СВЧ колебаний напряжения в диоде использовалась схема (рис. 1). Конденсатор $C1$ (20 нФ) заряжается от источника питания за 1 мкс до напряжения ~14 кВ. Магнитный ключ $MS1$ закрыт. В момент максимального напряжения на $C1$ ключ $MS1$ насыщается, и энергия из $C1$ передается в $C2$ (20 нФ). Ток амплитудой 1.2 кА и длительностью 320 нс протекает через диод D в прямом направлении. При

достижении на $C2$ напряжения ~ 12 кВ насыщается ключ $MS2$. Конденсатор $C2$ перезаряжается через ключ $MS2$, а ток этого процесса амплитудой 2 кА и длительностью 350 нс протекает через D в обратном направлении. При протекании обратного тока из диода происходит вынос избыточных носителей, инжектированных за время прохождения положительной полуволны тока. В момент времени, близкий к максимуму обратного тока, диод начинает восстанавливать свои блокирующие свойства. Обратное напряжение на нем резко возрастает, что инициирует волновой ударно-ионизационный пробой.

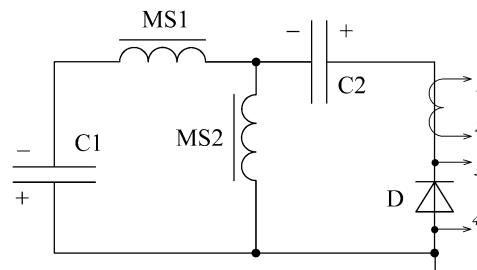


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

Fig. 1. The experimental setup block diagram

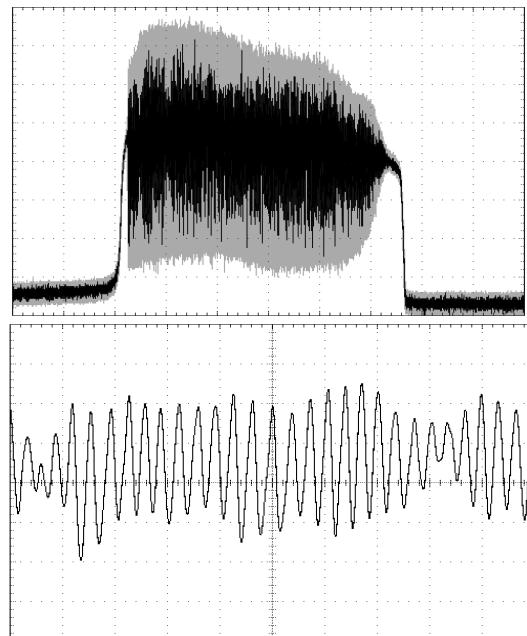


Рис. 2. Оциллограммы напряжения на диоде (80 В/дел.): а – огибающая одиночного импульса (черный) и при наложении 2500 импульсов (серый) – 40 нс/дел.; б – одиночный СВЧ импульс, масштаб – 500 пс/дел.

Fig. 2. Voltage oscilloscopes on the diode (80 V/div.): a – bending around an individual impulse (black) and when imposing 2500 impulses (gray) – 40 ns/div; b – individual impulse, scale - 500 ps/div

Последующее протекание обратного тока через диод происходит в режиме генерации СВЧ колебаний напряжения. Длительность колебаний ~ 200 нс (рис. 2.). В момент максимального тока размах колебаний достигает 480 В, частота 6.25 ГГц, мощность СВЧ компоненты ≈ 300 кВт при средней входной мощности 600 кВт. Генерация колебаний напряжения на диоде прекращается до окончания импульса обратного тока. Плотность тока отсечки ~ 900 А/см².

Система регистрации включала в себя кабель с частотой отсечки более 20 ГГц, аттенюаторы «Barth Electronics» с полосой пропускания 30 ГГц и цифровой осциллограф Tektronix TDS-6154C (полоса пропускания 15 ГГц, дискретизация 25 пс).

III. Анализ результатов эксперимента

Для анализа экспериментальных данных были проведены численные расчеты с помощью модели [3], заключающейся в совместном решении уравнений Кирхгофа, описывающих работу электрической схемы с диодом D , и уравнений динамики электронов и дырок в структуре диода. Было показано, что процесс генерации колебаний напряжения в диффузионном диоде развивается в окрестности $p-n$ -перехода, и связан с периодическим заполнением ее неосновными носителями, возникающими вследствие процессов лавинного размножения, и последующим их удалением электрическим полем.

Установлено, что основные характеристики процесса колебаний напряжения, такие как частота и размах колебаний, определяются плотностью проходящего через диод тока. Расчеты подтвердили экспериментальный факт, что существует критическая плотность тока, ниже которой колебания отсутствуют. В этом случае в окрестности $p-n$ -перехода реализуется режим стационарного пробоя, когда устанавливается распределение электронов, дырок и электрического поля не меняющееся со временем.

IV. Заключение

В работе экспериментально и теоретически исследован механизм генерации мощных колебаний напряжения в кремниевом диоде $p^+ - p - n^+$ -типа, возникающих при протекании обратного тока плотностью до 4 кА/см². Частота колебаний лежит в диапазоне 5÷7 ГГц, мощность ≈ 300 кВт при КПД $\approx 50\%$.

В отличие от существующих методов генерации колебаний в полупроводниковых диодах, где необходим внешний импульс напряжения, в данном методе фактором, запускающим и поддерживающим процесс генерации колебаний, является плотность обратного тока. Установлено, что высокая мощность колебаний связана с большим объемом области, занимаемой электрическим полем, и малым периодом изменения его амплитуды.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 10-08-00313 и № 12-08-01152.

V. Список литературы

- [1] Sze S. M., Ryder R. M. *Microwave Avalanche Diodes*. // Proc. IEEE. 1971. Vol. 59. N. 8. P. 1140 – 1154.
- [2] Рукин С. Н. и др. Генерация колебаний сверхвысокой частоты безбазовым диодом // ФТП. 2002. Т. 36. Вып. 5. С. 629—634.
- [3] Рукин С. Н. и др. Работа полупроводникового прерывателя при сверхвысоких плотностях тока // ФТП. 2012. Т. 46. Вып. 4. С. 535—543.

GENERATION OF POWERFUL MICROWAVE VOLTAGE OSCILLATION IN DIFFUSED SI DIODE

Lyubutin S. K.^{*}, Rukin S. N.^{*}, Slovikovsky B. G.^{*},
Tsyranov S. N.^{†,‡}

^{*}Institute of Electrophysics, Ural Branch, RAS
106, Amundsena Str., Yekaterinburg, 620016, Russia

[†]Ural Federal University
19, Mira Str., Yekaterinburg, 620002, Russia
Ph.: 343-2678780, e-mail: serg@iep.uran.ru

Abstract — Generation of powerful microwave voltage oscillations in a diffused silicon diode has been studied. The reverse current of 2 kA in amplitude passed through 320- μ m diode with $p-n$ junction depth of 220 μ m, and surface area of 0.5 cm². At the average voltage about 300 V and microwave voltage pulse duration of ~ 200 ns the voltage swing of the oscillations reaches 480 V. The frequency of the oscillations is 5 to 7 GHz, and power is about 300 kW. In the theoretical analysis it is shown that start of process of oscillations, their swing and frequency are determined by density of a reverse current.

I. Introduction

For generation of microwave voltage oscillations the semiconductor avalanche transit time diodes operating in IMPATT and TRAPATT-modes are used for a long time. The mechanism of operation of diodes is based on the phenomenon of ionization breakdown. The external impulse of overvoltage is necessary for operation of diodes. The characteristic values of microwave power and oscillation frequency for IMPATT is 50 W and 10-100 GHz, in TRAPATT-mode is up to 400 W at frequency of 1÷10 GHz. Recently microwave voltage oscillations were found in silicon $p^+ - p - n^+$ -diode, arising when passing reversed current through it in density in some kA/cm². Power of oscillations is about 10 kW, frequency is 1 GHz. In this article we continue these researches.

II, III. Main Part

The studied silicon diode has $p^+ - p - n^+$ type structure in thickness of 320 μ m, $p-n$ -junction depth 220 μ m and the area of 0.5 cm². At the close to reverse current maximum (~ 4 kA/cm²), the diode starts to recover the blocking properties. Reverse voltage on it sharply increases. Impact ionization starts and process of voltage oscillations begins. Oscillations have frequency of 6.25 GHz, power of ≈ 300 kW, duration ~ 200 ns. Voltage oscillation stops in case of current density lesser ~ 900 kA/cm².

Model calculations showed that process of voltage oscillation develops in vicinities of the $p-n$ -junction, and it is bound to periodic filling with its minority carriers arising owing to processes of avalanche multiplication, and then owing to their removal by an electric field. It is established that the main characteristics of process of voltage oscillation, such as swing and oscillation frequency, are defined by density of the current passing through the diode. Calculations confirmed the experimental fact that there is critical current density below which voltage oscillations are absent. In this case in neighborhood of $p-n$ -junction the mode of stationary breakdown, when distribution of electrons, holes and the electric field does not change over time, is established.

IV. Conclusion

Process of generation of powerful voltage oscillations in the silicon $p^+ - p - n^+$ diode, arising in case of course of reverse current by density to ~ 4 kA/cm², is probed. Oscillation frequency is in the range 5÷7 GHz, power of 300 kW, efficiency $\sim 50\%$. Unlike the existing methods of generation of oscillations in semiconductor diodes, where an external pulse of voltage is necessary, in this method a factor starting and supporting the process of generation of oscillations, is reverse current density.