

МОЩНЫЕ СВЧ КОЛЕБАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОМ ДИОДЕ ПРИ ПРОТЕКАНИИ ТОКА ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТИ

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@ier.uran.ru

Аннотация — Численными методами исследована работа диффузионного кремниевого диода p^+-p-n^+ типа. Через диод с толщиной структуры 320 мкм, глубиной залегания $p-n$ -перехода 220 мкм и площадью 0.5 см² пропускался обратный ток плотностью до 50 кА/см². Показано, что при плотности тока, лежащей в диапазоне от 3 до 20 кА/см², в структуре диода реализуется режим незатухающих колебаний напряжения. За пределами диапазона в структуре устанавливается режим стационарного пробоя. Наиболее мощные колебания возникают при протекании через диод тока плотностью ~ 15 кА/см². В расчете на один диод, мощность колебаний достигает ~1 МВт при частоте ~ 10 ГГц и КПД ~30%. Проведено сравнение с экспериментом.

I. Введение

Для генерации колебаний напряжения СВЧ диапазона давно используются полупроводниковые приборы с диодной структурой. Наибольшее распространение получили лавинно-пролетные диоды (ЛПД-IMPATT) и лавинно-ключевые диоды (ЛКД-TRAPATT). Механизм работы обоих типов диодов основан на явлении пробоя полупроводника под действием 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. Характерные значения мощности и частоты колебаний для ЛПД достигают 50 Вт и 10÷100 ГГц, для ЛКД – до 400 Вт и 0.6÷10 ГГц [1].

В работе [2] были обнаружены колебания напряжения гигагерцовой частоты в кремниевом p^+-p-n^+ -диоде, возникающие при прохождении через него обратного тока плотностью несколько кА/см². Мощность колебаний составила ~ 10 кВт. Следующим этапом стала работа [3], где при плотности тока $J \sim 4$ кА/см², частота колебаний достигла 5÷7 ГГц, а мощность ~ 300 кВт. Ниже результаты [3] модельно продолжают в область более плотных токов.

II. Результаты моделирования

Для численного моделирования была использована модель [4], заключающаяся в совместном решении уравнений Кирхгофа, описывающих работу электрической схемы с диодом, и уравнений динамики электронов и дырок в структуре диода. Учитывались процессы генерации-рекомбинации, зависимости подвижности носителей от электрического поля, электронно-дырочного рассеяния и рассеяния на примесях. Исследуемый кремниевый диод, как и в работе [3], имел структуру p^+-p-n^+ типа толщиной 320 мкм, глубиной залегания $p-n$ -перехода 220 мкм и площадью $S \sim 0.5$ см². Через диод в режиме генератора тока пропускался ток, нарастающий со скоростью 30 А/(см²·нс). Результаты расчета показаны на рис. 1-2.

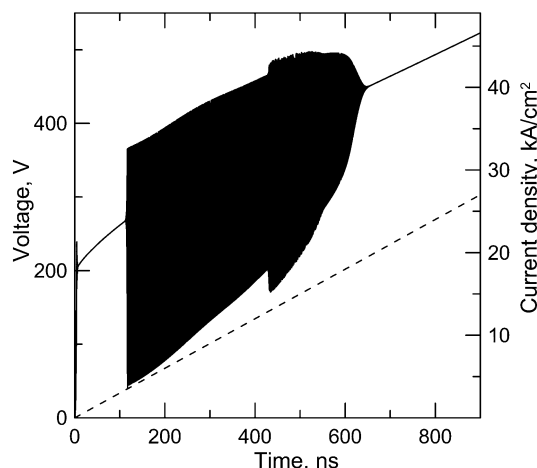


Рис. 1. Расчетные зависимости плотности тока через диод (штриховая линия) и напряжения на нем (сплошная линия) от времени.

Fig. 1. Calculated time dependences of the diode current density (dashed curve) and diode voltage (solid curve)

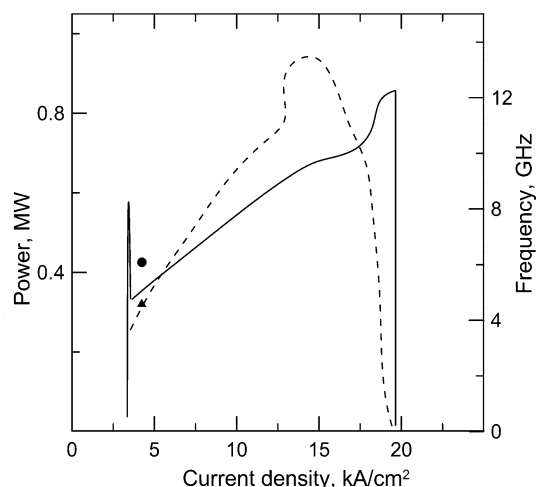


Рис. 2. Зависимости частоты (сплошная линия) и мощности (штриховая линия) колебаний напряжения на диоде от плотности тока. Экспериментальные данные [3]: ▲ – мощность; ● – частота.

Fig. 2. Dependences of frequency and oscillation power on the diode current density (dashed curve). The experimental data [3]: ▲ – power; ● – frequency.

Видно, что в диапазоне J от 3 до 20 кА/см² в структуре диода существуют колебания напряжения, размах которых максимален в начале и достигает 320 В, далее снижается с ростом плотности тока. За пределами диапазона реализуется режим стационарного пробоя, когда в структуре устанавливается характерное распределение электронов, дырок и электрического поля не меняющееся со временем.

III. Анализ результатов моделирования

Расчеты показали, что процесс генерации колебаний напряжения в 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. Период колебаний можно оценить как сумму времени нарастания электрического поля до максимума ($E_m \sim 400$ кВ/см) и удаления носителей из области пробоя:

$$\tau = \frac{\varepsilon \cdot E_m}{J} + \frac{\xi \cdot W}{V_s} \quad (1)$$

где $\varepsilon = 10^{-12}$ Ф/см – диэлектрическая проницаемость кремния, $W \sim 15$ мкм – ширина области сильного поля, $\xi \sim 0.7$ – доля области W занятая пробоем, $V_s \sim 10^7$ см/с – насыщенная скорость носителей в кремнии. Оценка (1) и расчет (рис. 2.) показывают рост частоты при увеличении плотности тока. Растет и мощность колебаний, достигая максимума ~ 1 МВт при плотности тока ~ 15 кА/см² и частоте ~ 10 ГГц. Мощность, связанную с пульсациями энергии электромагнитного поля в структуре можно записать как:

$$P = V_E \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varepsilon \cdot E^2}{2} \right) \approx (S \cdot W) \cdot \frac{\varepsilon \cdot E_m^2}{\tau} \quad (2)$$

Оценка (2) дает ~ 1 МВт. Наиболее мощные кремниевые ЛКД-TRAPATT диоды излучают мощность ~ 0.4 кВт при частоте ~ 1 ГГц [1]. Отличие связано с факторами, учтенными в (2) – большим объемом области, занимаемой электрическим полем, и малым периодом изменения его амплитуды.

IV. Заключение

Численными методами исследована работа диффузионного кремниевого диода p^+-p-n^+ -типа. Показано, фактором, запускающим и далее поддерживающим процесс генерации колебаний напряжения в структуре диода является плотность обратного тока. Установлено, что при плотности тока, лежащей в диапазоне от 3 до 20 кА/см², в структуре диода реализуется режим незатухающих колебаний напряжения. Обнаружено, что наиболее мощные колебания возникают при протекании через диод тока плотностью ~ 15 кА/см². В расчете на один диод, мощность колебаний достигает ~ 1 МВт при частоте ~ 10 ГГц. 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. Генерация мощных СВЧ колебаний напряжения в диффузионном кремниевом диоде // 12-я Междунар. Крымская конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012). Материалы конф. (Севастополь, 10–14 сент. 2012 г.). Севастополь: Вебер, 2012.
- [4] Рукин С. Н. и др. Работа полупроводникового прерывателя при сверхвысоких плотностях тока // ФТП. 2012. Т. 46. Вып. 4. С. 535–543.

POWER MICROWAVE VOLTAGE OSCILLATIONS IN SEMICONDUCTOR DIODE AT HIGH CURRENT DENSITY

Tsyranov S. N.^{*,†}

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

[†]Ural Federal University, Mira 19, Yekaterinburg, 620002, Russian Federation

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

Abstract — Numerical methods were used to investigate the operation of the diffusive silicon p^+-p-n^+ diode. The reversed current density of 50 kA/cm² passed through the diode having the width of 320 μ m, $p-n$ junction depth of 220 μ m, and surface area of 0.5 cm². It is shown that at a current density of 3–20 kA/cm², in the structure of the diode there is a mode of undamped voltage oscillations. Outside of this range in the structure the mode of stationary breakdown is established. The most powerful oscillations exist at a current density ~ 15 kA/cm², with power of oscillations in the diode of ~ 1 MW, frequency ~ 10 GHz and efficiency ~ 30 %.

I. Introduction

For generation of microwave voltage oscillations, the semiconductor diodes operating in IMPATT and a TRAPATT-mode long ago are used. The mechanism of diode operation is based on the phenomenon of ionization breakdown. The external impulse of an overvoltage is necessary for diode operation. The characteristic values of microwave power and oscillation frequency for IMPATT is 50 W and 10–100 GHz, in a TRAPATT-mode to 400 W at a frequency 1–10 GHz. The microwave voltage oscillations in silicon p^+-p-n^+ diode, arising when passing the reversed current through is for density on ~ 4 kA/cm². The the oscillation power of ~ 300 kW, the frequency of 5–7 GHz. In this paper we continue these researches.

II, III. Main Part

The calculation was performed using a model consisting of a simultaneous solution to the Kirchhoff equations that describe the operation of an electric circuit with the diode and equations of electron and hole dynamics in the diode structure. The studied silicon diode had a width of 320 μ m, $p-n$ junction depth of 220 μ m, and surface area of 0.5 cm². The current build up with a speed 15 A/ns was passed via the diode in a current generator mode. In the range of a current density of 3–20 kA/cm² in the structure of the diode there are voltage oscillations. The swing of the oscillations is maximum at the beginning (~ 320 V), and then further falls with an increase in a current density. Outside of this range the mode of stationary breakdown is carried out. In this case in structure the characteristic distribution of electrons, holes and an electric field not changing over time is established. It was shown that the process of voltage oscillations develops in vicinity of the $p-n$ -junction, and is bound to periodic filling with its minority carriers arising owing to processes of avalanche multiplication, and the subsequent their removal by an electric field. The power of oscillations reaches a maximum ~ 1 MW in case of current density ~ 15 kA/cm² and frequency ~ 10 GHz. The power can be written as:

$$P = V_E \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\varepsilon \cdot E^2}{2} \right) \approx (S \cdot W) \cdot \frac{\varepsilon \cdot E_m^2}{\tau} \quad (1)$$

where $\varepsilon = 10^{-12}$ F/cm is the permittivity of Si, $W \sim 15$ μ m is the width of area of the strong field, $E_m \sim 400$ кВ/см is the maximum of an electric field, $\tau \sim 100$ ps is the period of oscillations. A high value of power (~ 1 MW) is defined by the factors considered in (1), i.e. a large volume of the area occupied by the electric field, and the small period of change of its amplitude.

IV. Conclusion

The numerical methods were used to investigate the operation of the silicon p^+-p-n^+ diode with a width of 320 μ m, $p-n$ junction depth of 220 μ m, and surface area of 0.5 cm². In forms of a single diode at a current density of 3–20 kA/cm² the oscillation power reaches 1 MW at a frequency of 10 GHz.