

Моделирование воздействия нейтронного облучения на ВАХ силовых полупроводниковых приборов в программной среде Comsol Multiphysics

Матюхин С.И., Дроздов А.А.

ИПАИТ ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орёл



Традиционные представления о воздействии радиации на ВАХ полупроводниковых диодов

$$U_{\text{пр}} = U_{p-n} + U_{\text{б}}$$

$$U_{p-n} = \frac{mkT}{q} \left(\ln \frac{j_{\text{пр}}}{q\Pi} + M \ln \tau \right), \quad \text{- уменьшается за счет уменьшения } \tau$$

$$U_{\text{б}} = \frac{j_{\text{пр}} W_{\text{б}}}{\sigma} \quad \text{- возрастает за счет уменьшения электропроводности базы } \sigma$$

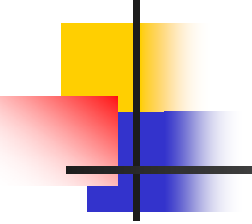
т.е. пороговое напряжение U_{τ} падает, дифференциальное сопротивление r растет, обратный ток меняется слабо

[Таперо К.И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения,- М.: БИНОМ, 2012. С. 67-71.]



Используемые допущения:

- Невысокие уровни инжекции
- Сравнительно низкие плотности токов (до 50 A/cm^2)
- Взаимодействие инжектированных носителей только с глубокими примесными уровнями, играющими роль центров рекомбинации и прилипания



Особенности режимов работы силовых приборов:

- Высокие уровни инжекции
- Высокие плотности токов (свыше 50 A/cm^2)
- Существенная роль эффектов, обусловленных взаимодействием НЗ друг с другом: снижение коэффициентов инжекции эмиттерных переходов, электронно-дырочное рассеяние (ЭДР), появление Оже-рекомбинации



Модель прямой ветви ВАХ СИЛОВЫХ ДИОДОВ И ТИРИСТОРОВ

$$U_F \approx U_{pn} + U_B + U_{ee} + U_A$$

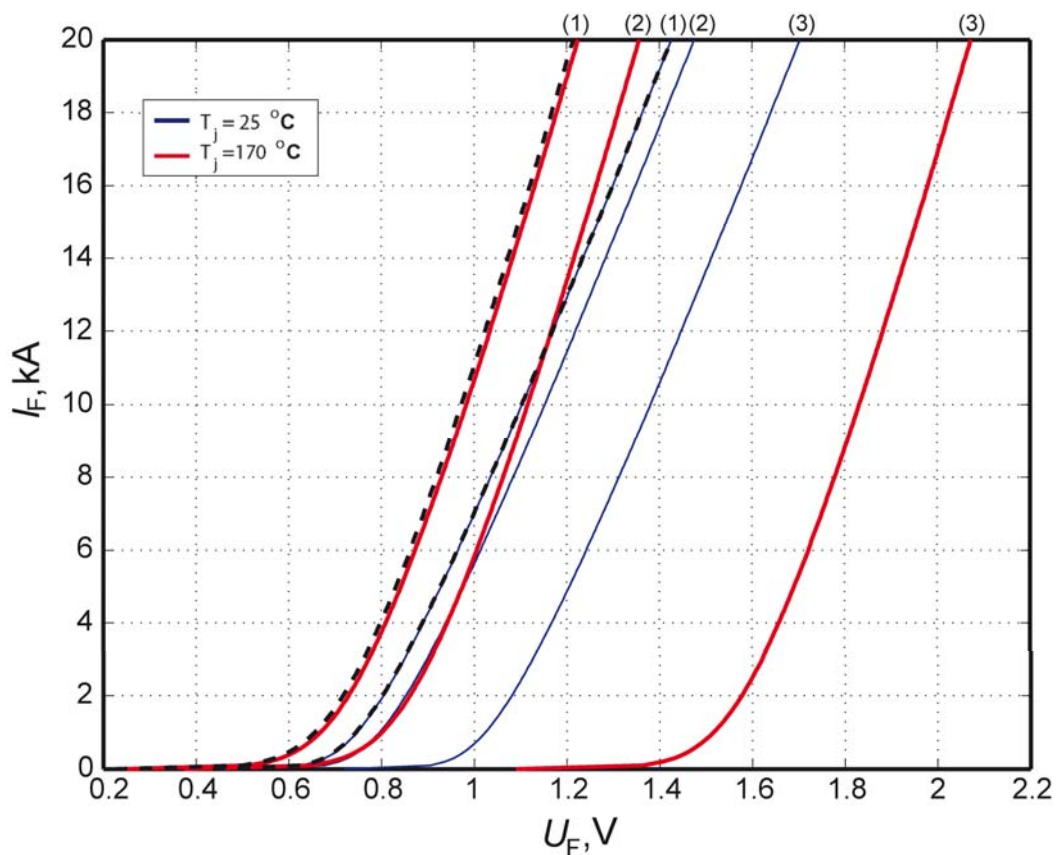
$$U_{pn} \approx \frac{\eta kT}{e} \ln \left(\frac{I_F}{I_{Si}} \right) \quad - \text{ вклад } p\text{-}n\text{-перехода}$$

$$U_B \approx \frac{1.5kT}{e} \exp \left(\frac{W_B}{2\Lambda_{pB}} \right) \quad - \text{ вклад базы}$$

$$U_{ee} \approx \frac{W_B I_F}{16S_0 \left(\frac{T}{300} \right)^\beta} \quad - \text{ вклад электронно-дырочного рассеяния}$$

$$U_A \approx \frac{[C_n(T) + C_p(T)] \tau_{pB}^2}{e^2 (\mu_{nB} + \mu_{pB})} \left(\frac{I_F}{S_0} \right)^2 \quad - \text{ вклад Оже-рекомбинации}$$

Результаты аналитического моделирования нейтронного облучения (2014 г.)



Флюенс [1/см²]: (1) – $3 \cdot 10^{12}$, (2) – $1 \cdot 10^{13}$, (3) – $3 \cdot 10^{13}$
Пунктир – положение исходных кривых

ВЫВОДЫ (2014 г.)

[Матюхин С.И., Турин В.О., Ставцев А.В., Малый Д.О., Писарев А.А., Титушкин Д.А. Действие радиации на вольтамперные характеристики силовых полупроводниковых приборов на основе кремния // ВАНТ. Серия: «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру». 2015. Вып.3. С.39-43.]

- действие радиации приводит к увеличению порогового напряжения и обратного тока СПП; дифференциальное сопротивление СПП практически не меняется
- изменение характеристик СПП связано, в основном, с деградацией времени жизни НЗ; изменение концентрации и подвижности НЗ на ВАХ СПП практически не сказывается
- увеличение порогового напряжения обусловлено опережающим (в сравнении с падающим напряжением р-п-перехода) ростом напряжения на базе СПП; напряжение, обусловленное ЭДР практически не меняется
- дифференциальное сопротивление СПП определяется, в основном, процессами ЭДР; оно может слабо меняться в той области токов и в тех приборах, в которых существенными становятся процессы Оже-рекомбинации



Почему Comsol Multiphysics?

- Мощная интерактивная среда для моделирования с помощью дифференциальных уравнений в частных производных (PDE)
- PDE решаются методами конечных элементов
- позволяет моделировать огромное количество взаимосвязанных явлений

Прикладные модули Comsol Multiphysics

ELECTRICAL

AC/DC
Module

RF
Module

New
Wave Optics
Module

MEMS
Module

Plasma
Module

New
Semiconductor
Module

MECHANICAL

Heat Transfer
Module

Structural Mechanics
Module

Nonlinear Structural
Materials Module

Geomechanics
Module

Fatigue
Module

New
Multibody Dynamics
Module

Acoustics
Module

FLUID

CFD
Module

Microfluidics
Module

Subsurface Flow
Module

Pipe Flow
Module

New
Molecular Flow
Module

CHEMICAL

Chemical Reaction
Engineering Module

Batteries &
Fuel Cells Module

Electrodeposition
Module

Corrosion
Module

New
Electrochemistry
Module

MULTIPURPOSE

Optimization
Module

Material
Library

Particle Tracing
Module

INTERFACING

LiveLink™
for MATLAB®

CAD Import
Module

LiveLink™
for SolidWorks®

LiveLink™
for Inventor®

LiveLink™
for Creo™ Parametric

LiveLink™
for Solid Edge®

LiveLink™
for Excel®

ECAD Import
Module

LiveLink™
for SpaceClaim®

LiveLink™
for AutoCAD®

LiveLink™
for Pro/ENGINEER®

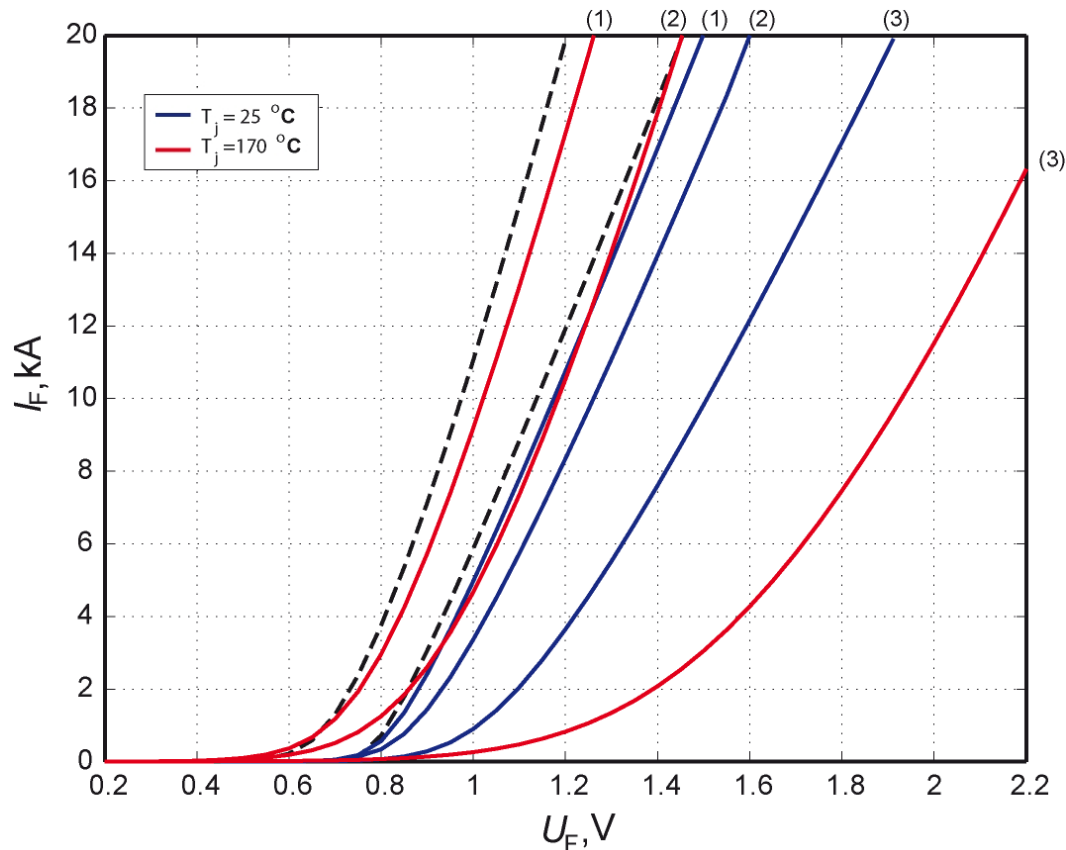
File Import
for CATIA®V5



Основные допущения при компьютерном моделировании ВАХ силового диода

- Выполняются условия дрейфово-диффузионного приближения
- Существенную роль играют такие эффекты, как снижение коэффициентов инжекции эмиттерных переходов, ЭДР, Оже-рекомбинация
- Радиация воздействует на все области прибора (нейтронное облучение)
- Под действием облучения изменяются: время жизни τ ; концентрация N_3

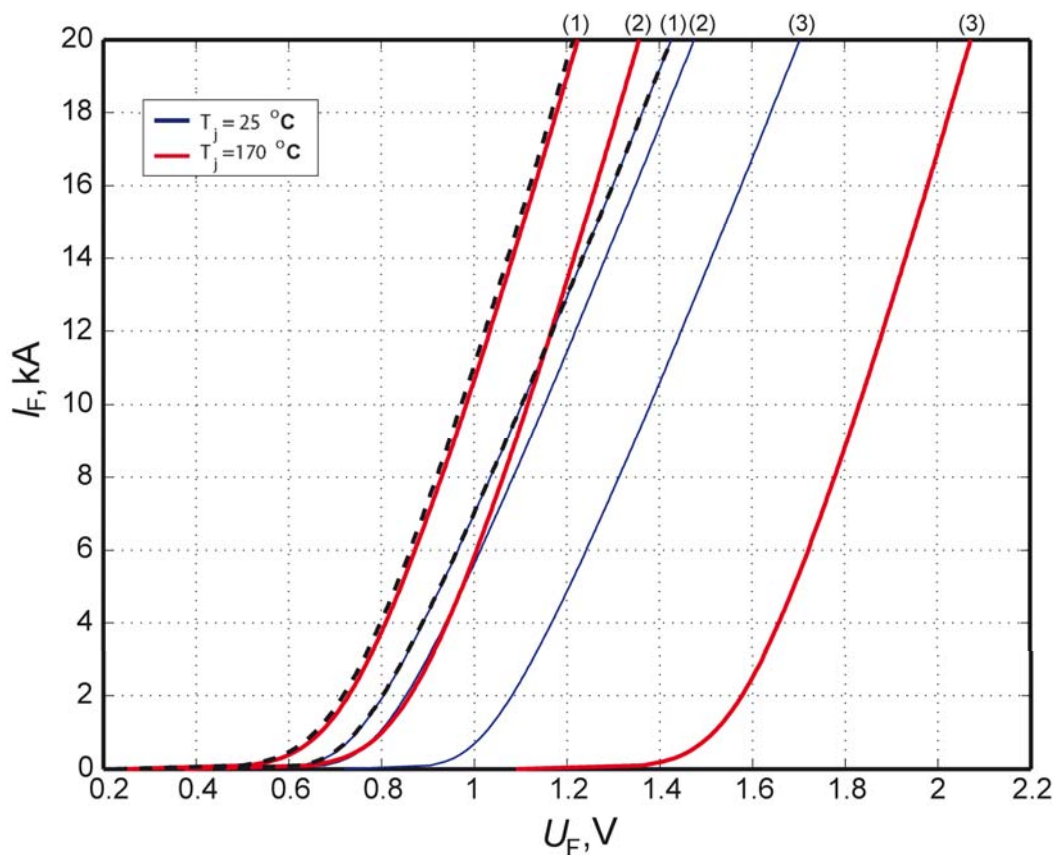
Результаты компьютерного моделирования нейтронного облучения (2017 г.)



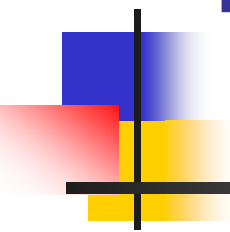
Флюенс [1/см²]: (1) – $3 \cdot 10^{12}$, (2) – $1 \cdot 10^{13}$, (3) – $3 \cdot 10^{13}$

Пунктир – положение исходных кривых

Результаты аналитического моделирования нейтронного облучения (2014 г.)



Флюенс [$1/\text{cm}^2$]: (1) – $3 \cdot 10^{12}$, (2) – $1 \cdot 10^{13}$, (3) – $3 \cdot 10^{13}$
Пунктир – положение исходных кривых



Моделирование воздействия нейтронного облучения на ВАХ силовых полупроводниковых приборов в программной среде Comsol Multiphysics

Матюхин С.И., Дроздов А.А.

ИПАИТ ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орёл