

МОДЕЛИРОВАНИЕ КРЕМНИЕВЫХ РЕЗИСТОРОВ В СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЯХ И ИМПУЛЬСНЫХ РЕЖИМАХ

П.Ю. Батяев

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева

Аннотация. В статье приведены результаты теоретических (на основе разработанной математической модели) и экспериментальных исследований работы высоковольтных кремниевых резисторов в сильных электрических полях и импульсных режимах. Так же результаты исследования влияния геометрических, электрофизических параметров резистивных элементов и режимов измерения на параметры резисторов. На основе проведённых исследований разработаны оригинальные методы изготовления кремниевых резисторов серии РК с заданными параметрами и зависимостями от приложенного к ним напряжения.

Ключевые понятия: полупроводник, резистор, электрическое поле, сопротивление, подвижность, математическая модель, моделирование

Высоковольтные кремниевые резисторы таблеточной конструкции благодаря исключительно низкой индуктивности, высокой удельной мощности и удобной конструкции могут найти широкое применение в современных мощных преобразователях электрической энергии, изготавливаемых на основе полностью управляемых полупроводниковых приборов (IGBT, IGCT).

Однако широкому применению резисторов до настоящего времени препятствовало то, что не были проведены исследования их работы в сильных электрических полях и импульсных режимах, характерных для этих типов преобразователей. Так же отсутствовали эффективные методы производства резисторов с высоким процентом выхода с заданными параметрами и зависимостями величины сопротивления резистора (R) от температуры и величины приложенного напряжения.

Для решения этих проблем разработана трёхмерная математическая модель резистора в радиально-симметричном приближении, которая позволяет учитывать реальные геометрические и электрофизические параметры полупроводниковой структуры резистора (распределение концентрации легирующей примеси в объёме резистора, спектр и концентрацию радиационных дефектов, вводимых в резистор в процессе его изготовления, зависимость подвижности и концентрации свободных носителей заряда от температуры и напряжённости электрического поля). При проведении расчётов

полагалось, что резистивный элемент (рис.1) выполнен в форме диска толщиной (L) и радиусом (R) с созданными в нём приконтактными диффузионными областями (n^+) и омическими металлическими контактами (Al). Для защиты от поверхностного пробоя формировалась круговая фаска.

Модель позволяет проводить расчёты динамических процессов, протекающих в резисторе при воздействии на него мощных импульсов напряжения. В частности, определить величину мощности выделяемой в резисторе и распределение температуры по его объёму в процессе работы резистора.

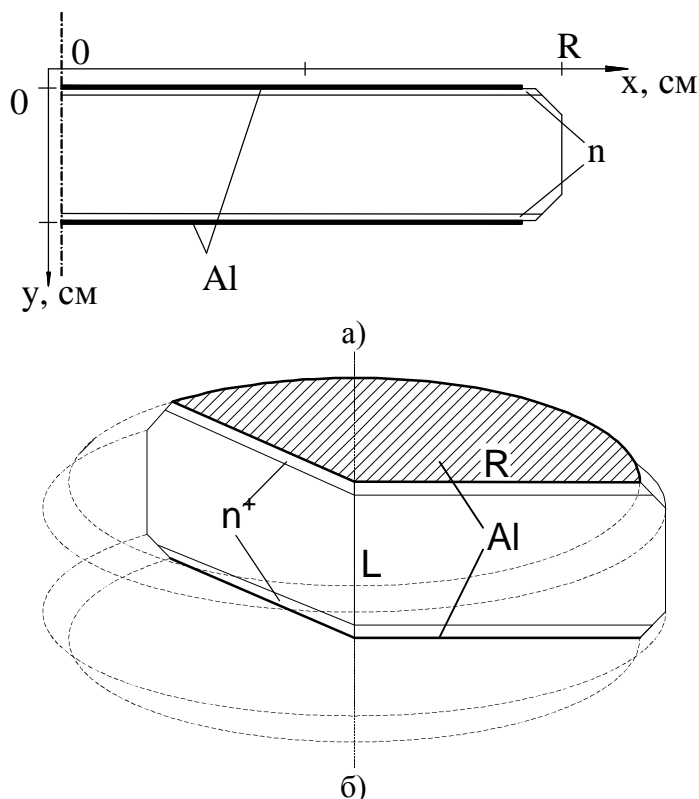


Рис. 1. – Конструкция, моделируемой полупроводниковой структуры высоковольтного резистора а) двухмерный вид, б) трёхмерный вид.

Математическая модель высоковольтного полупроводникового резистора, основанная на решении системы дифференциальных уравнений в частных производных и включает в себя: уравнение Пуассона, уравнения непрерывности для электронов и дырок, уравнения для плотностей токов для электронов и дырок, уравнение теплопроводности, уравнения описывающие зависимость подвижности основных носителей заряда от температуры и напряжённости электрического поля в структуре. Система решалась совместно с уравнениями электрического баланса для внешней схемы с помощью программы DESSIS (ISE-TCAD 10.0) [1].

При помощи разработанной модели были проведены исследования работы кремниевых резисторов в сильных электрических полях и импульсных режимах, а так же представлены результаты исследования влияния геометрических, электрофизических параметров резистивных элементов и режимов измерения на параметры резисторов.

1. Исследование зависимости величины сопротивления резистора (R) от

величины приложенного к нему напряжения при различных значениях температуры а так же зависимости увеличения сопротивления резистора при приложении к нему электрического напряжения (V) от толщины (L) резистивного элемента для кремния n- и p- типов электропроводности.

Результаты расчётов зависимости сопротивления резистора ($\rho_0=60 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) от приложенного напряжения при температуре 298 К и 398 К и зависимости относительного изменения сопротивления резистивного элемента ΔR (2) при изменении напряжения от 0 В до 1500 В (4000 В) и от его толщины, для кремния n-типа проводимости для резисторов типа РК343-3 приведены на рисунках 2,3 соответственно. При этом учитывалось, что для кремния марки КОФ60-60 величина ρ_0 в центре резистивного элемента на 7% выше чем на его краю.

$$\Delta R = \frac{R(U) - R(0)}{R(0)} \quad (1)$$

где $R(U)$ – значение сопротивления резистивного элемента при приложенном напряжении (U);

$R(0)$ – значение сопротивления резистивного элемента при напряжении равном нулю;

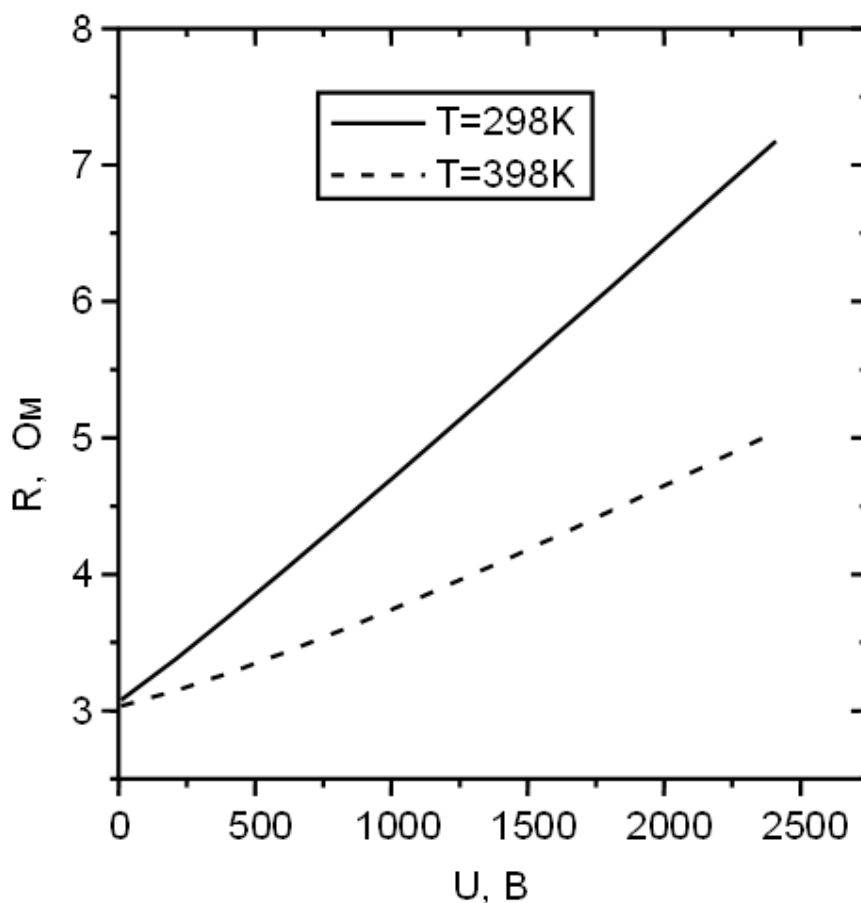
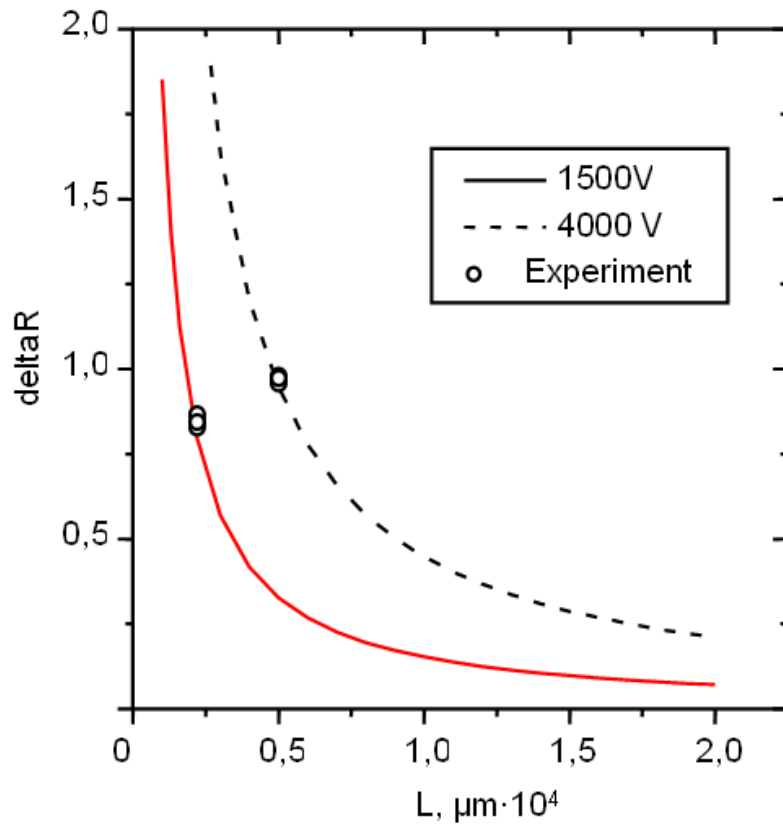
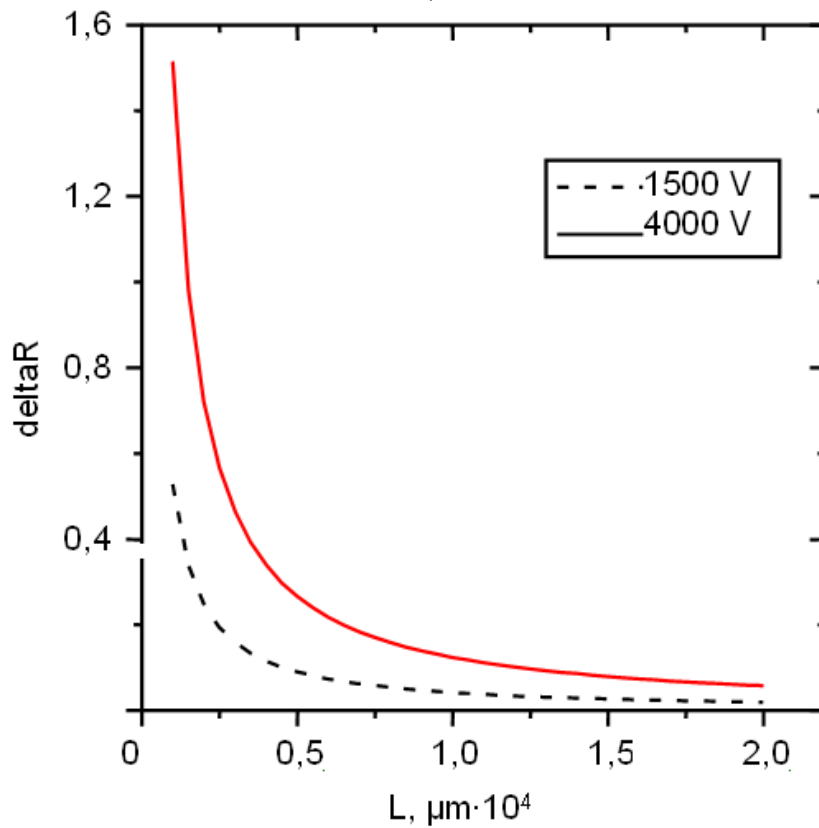


Рис. 2. Зависимость сопротивления резистора типа РК343-3 ($\rho_0=60 \text{ Ом}\cdot\text{см}$) от приложенного напряжения при температуре 298 К и 398 К.



a)



б)

Рис.3. Зависимость относительного изменения сопротивления резистивного элемента ΔR (1) при изменении напряжения от 0 В до 1500В (4000 В) и от его толщины, для кремния а) n- б) p-типа проводимости.

Из полученных результатов следует, что величина сопротивления кремниевого резистора увеличивается с ростом величины приложенного напряжения (U), однако изменение величины сопротивления (R) уменьшается при увеличении температуры структуры и её толщины. При этом зависимость величины R от величины U у резисторов на кремнии р-типа проводимости существенно слабее, чем у резисторов изготовленных на кремнии n-типа проводимости.

Для проверки результатов моделирования была изготовлена опытная партия образцов высоковольтных полупроводниковых резисторов серии РК343. Резисторы изготавливались в форме диска, толщиной (L) 0,22 см и 0,5 см, с защитой от краевого пробоя. Для расчёта сопротивления измерялся ток через резисторы при максимальном значении амплитуды импульса полусинусоидальной формы, при температуре $T=300$ К. Результаты эксперимента для шести образцов представлены на рис.3 и рис. 4, 5 вместе с результатами расчёта.

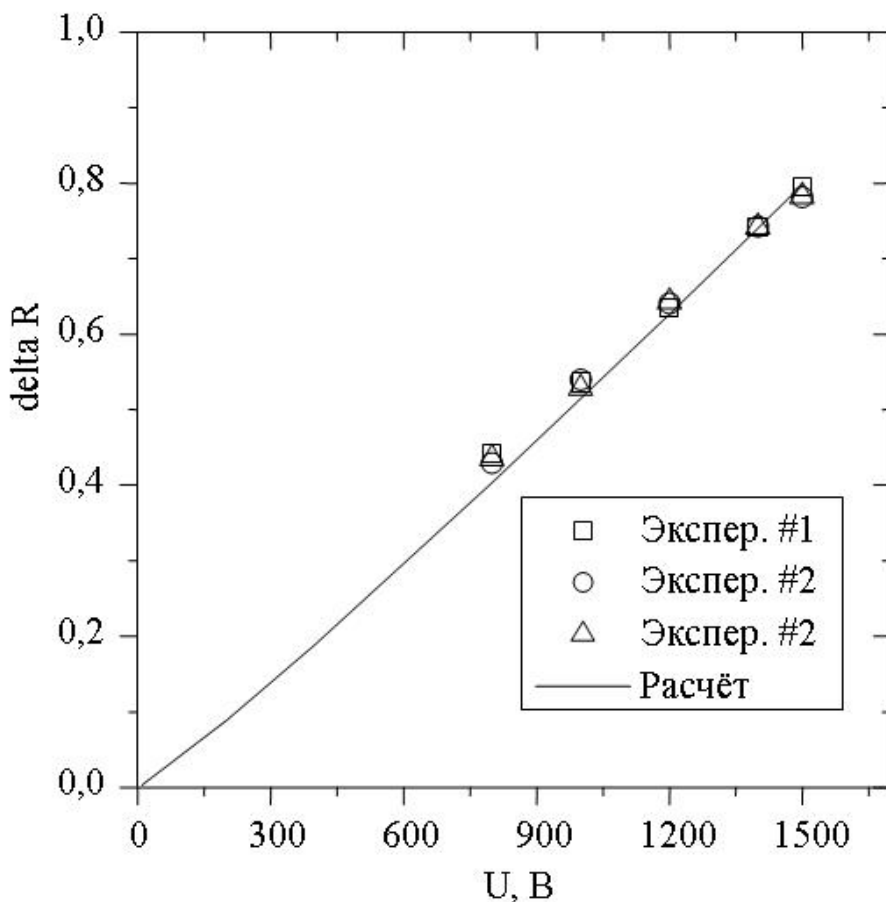


Рис.4. Зависимость относительного изменения сопротивления резистивного элемента ΔR от напряжения при толщине элемента 0,22 см.

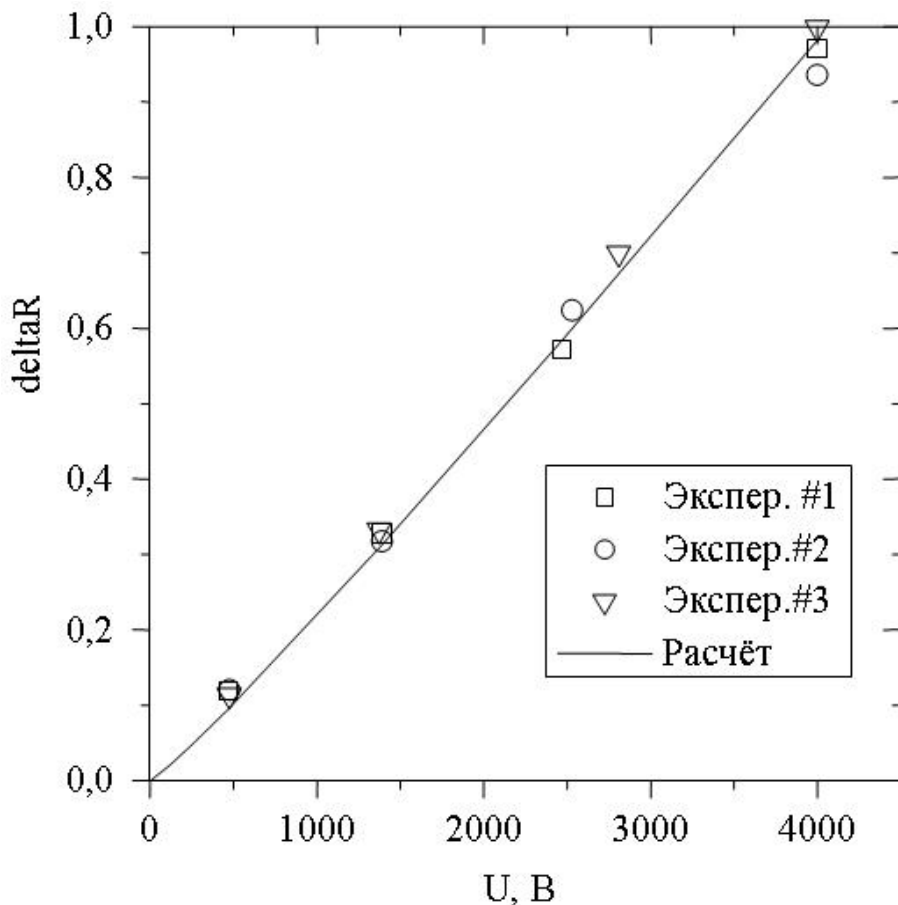


Рис.5. Зависимость относительного изменения сопротивления резистивного элемента ΔR от напряжения при толщине элемента 0,5см.

Из данных, приведённых на рис. 3 и 4, 5 видно хорошее соответствие расчётных и экспериментальных данных. На основе результатов моделирования можно выбирать оптимальную толщину для резистивного элемента исходя из требуемых условий эксплуатации.

2. *Зависимость максимальной температуры в структуре резистора от приложенного напряжения при разной глубине фаски и длительности импульса приложенного к структуре напряжения (рисунок 1).* Моделирование проводилось для резисторов с конструкцией представленной на рисунке 1, изменялась глубина залегания фаски по координате y , угол фаски всегда оставался постоянным, равным 45° , глубина p^+ -слоя равна 100 мкм. Для построения графика определялась максимальная температура в структуре резистора, на краю фаски (сечение $y=50\mu\text{м}$). Результаты расчёта приведены на рис. 5.

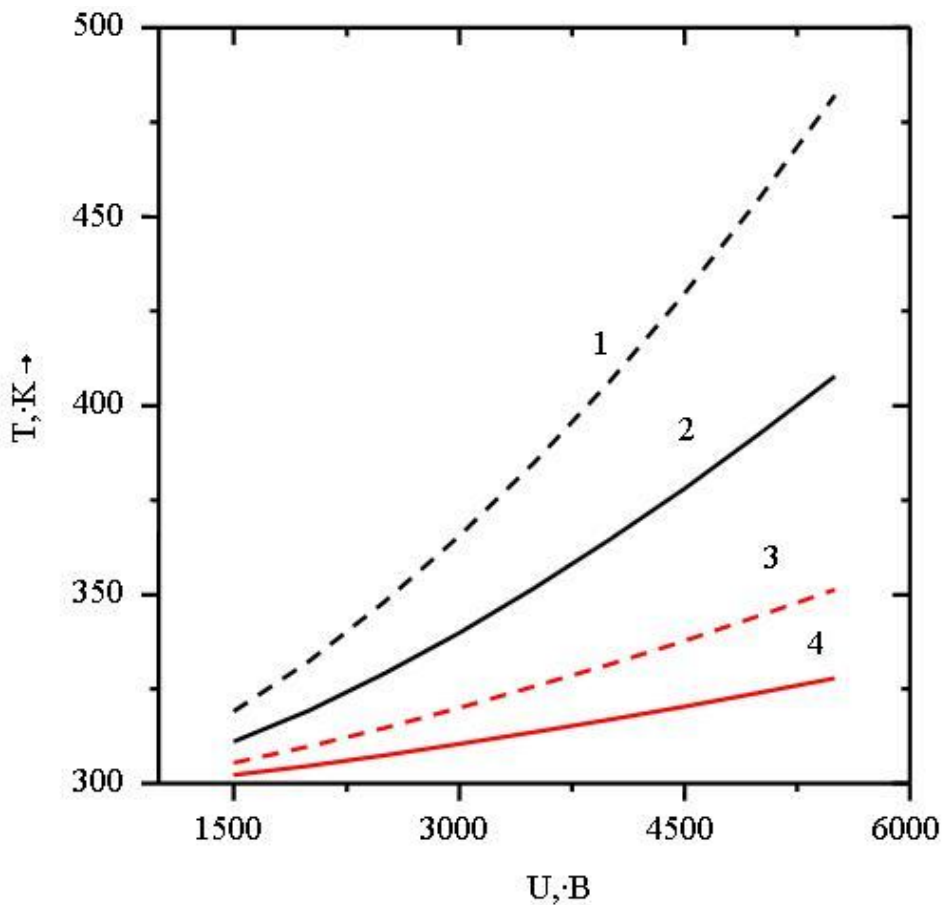


Рис.5 . Зависимость максимальной температуры в структуре высоковольтного полупроводникового резистора от приложенного напряжения при разной глубине фаски.

- 1 - глубина фаски 500 мкм длительность импульса 100 мкс
- 2 - глубина фаски 500 мкм длительность импульса 50 мкс
- 3 - глубина фаски 100 мкм длительность импульса 100 мкс
- 4 - глубина фаски 100 мкм длительность импульса 50 мкс

По результатам моделирования было получено распределение температуры по структуре резистора в сечении $y = 50\text{мкм}$, при разных значениях длительности полусинусоидального импульса напряжения, глубина фаски при этом составляла 100 мкм. Результаты моделирования приведены на рис. 6.

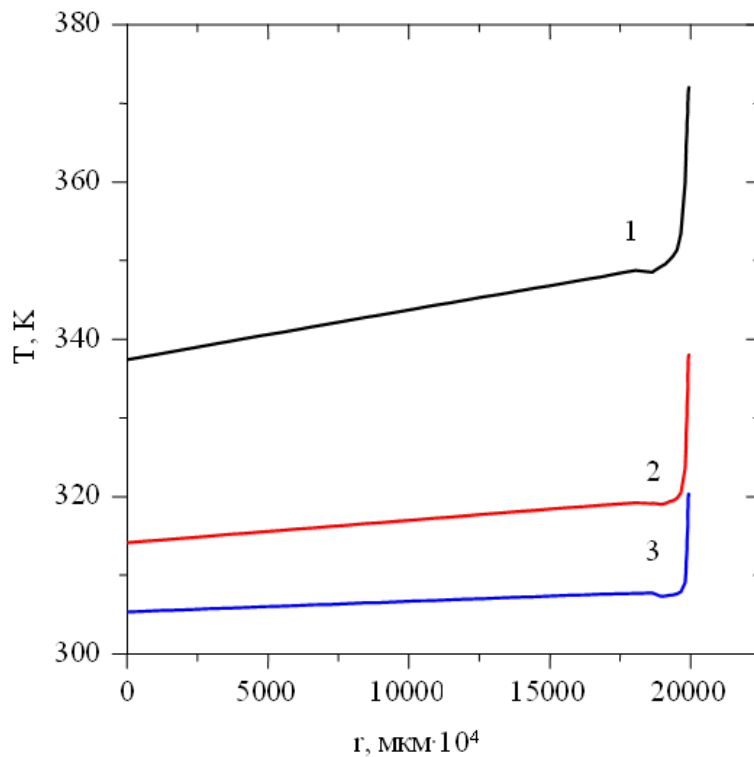


Рис.6. Распределение температуры по структуре резистора типа РК343-3 при разной длительности импульса напряжения в сечении $y=50\text{мкм}$ и глубине защитной фаски 100 мкм .

- 1- длительность импульса $200 \cdot 10^{-6}\text{ s}$;
- 2- длительность импульса $100 \cdot 10^{-6}\text{ s}$;
- 3- длительность импульса $50 \cdot 10^{-6}\text{ s}$.

Так же было получено двухмерное распределение температуры по структуре резистора, представлено на рисунке 7, 8.

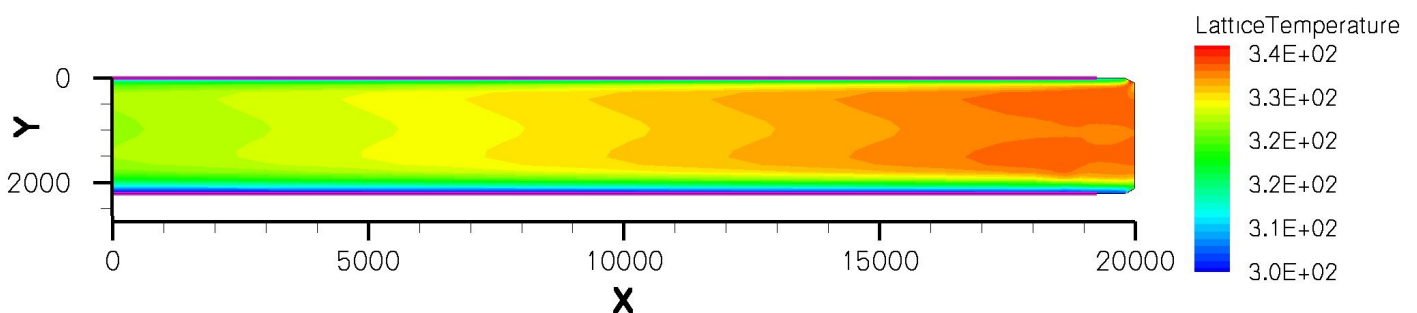


Рис.7. Распределение температуры по структуре резистора типа РК343-3 при длительности импульса напряжения полусинусоидальной формы 100 мкс и глубине защитной фаски 100 мкм .

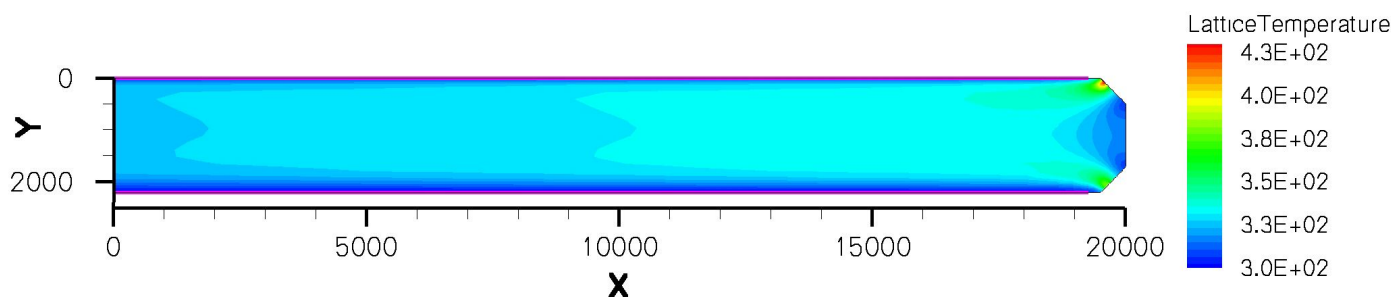


Рис.8. Распределение температуры по структуре резистора типа РК343-3 при длительности импульса напряжения полусинусоидальной формы 100 мкс и глубине защитной фаски 500мкм.

Из рисунка видно, что разброс удельного сопротивления по радиусу приводит к неоднородному нагреву резистора по площади, при чём величина перепада температуры увеличивается при увеличении амплитуды и длительности импульса напряжения.

На основе проведённых исследований разработаны оригинальные конструкции, а так же методы изготовления резисторов серии РК с заданными параметрами и зависимостями, которые обладают повышенной удельной мощностью.

Список использованной литературы

1. DESSIS ISE-TCAD 10.0: User's Manual / ISE-AG Inc. – 2004. – No. 12. – 631p.
2. Geyfman E.M., Chibirkin V.V. Methods of controlled lifetime monitoring of nonequilibrium carriers during power semiconductor devices manufacturing / Saransk: Mordovian Ogarev State University – 2002. – 104 p.

Сведения об авторе

Батяев Павел Юрьевич - аспирант кафедры «Полупроводниковые материалы и приборы» Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва.

Научный руководитель: Профессор, д.т.н Гейфман Евгений Моисеевич.

Контактный телефон +7 9279754848,

email: batjaev@mail.ru.