

# Моделирование трёх диапазонного варактора на основе барьера Шоттки с МДП затвором

О.Е. Зайцев, В.В. Перепеловский

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

**Аннотация:** Представлены результаты моделирования трёх диапазонного варактора на основе барьера Шоттки, в среде TCAD. Были исследованы вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики в обратном смещении, определены коэффициенты перекрытия, а так же напряжение пробоя. Были проведены сравнения модифицированной структуры с базовой. В данной работе использовалась двухмерная термодинамическая модель. При анализе подробно рассматривались следующие факторы: модификация ширины запрещенной зоны, лавинный пробой, особенности рекомбинации согласно модели Шокли-Рида-Холла, Оже-рекомбинация. В результате данной работы получена модернизированная структура варактора, позволяющая получить большую емкость и коэффициент перестройки, в сравнении с аналогичной по геометрическим размерам, материалу и легированием структуры, за счёт добавления МДП затвора, электрически связанного с контактом с барьером Шоттки.

**Ключевые слова:** варактор, барьер Шоттки, TCAD, МДП затвор, коэффициент перестройки.

## 1. Введение

Варакторы, благодаря своей способности к изменению емкости под воздействием приложенного электрического напряжения, активно используются в разнообразных областях современной электроники. Их применение охватывает широкий спектр устройств, включая управляемые напряжением генераторы, синтезаторы частот и перестраиваемые фильтры [1]. В секторе СВЧ-сигналов варакторы играют ключевую роль в функционировании смесителей, умножителей частоты [2,3], ограничителей мощности [4], а так же частотно перестраиваемых усилителей [5]. Это подчеркивает multifunctionality и важность варакторов в разработке современных электронных компонентов и систем.

В представленной статье описывается новаторская структура варактора, которая обеспечивает увеличение коэффициента перекрытия и емкости без изменения геометрических размеров устройства. Данный результат достигается за счет интеграции в структуру устройства МДП-затвора, который электрически соединен с контактом через барьер Шоттки. Сравнение проводилось с упрощенной моделью структуры аналогичных геометрических размеров [6]. Кроме того, в характеристиках предложенной структуры выделяются три диапазона напряжений, в каждом из которых наблюдается значительное отличие в крутизне вольт-фарадной характеристики. Это разнообразие в поведении характеристик может быть эффективно использовано при разработке электронных компонентов и систем, позволяя адаптировать их функционал в соответствии с конкретными требованиями приложений.

## 2. Математическая модель

В рамках текущего исследования была разработана модель полупроводниковой структуры, представляющей собой кремниевый цилиндр с радиусом и высотой по 100 мкм. Данная структура характеризуется слабым n-типом легирования для достижения заданных электрических характеристик. Для обеспечения омического контакта в области контакта было проведено дополнительное легирование донорными примесями.

В структуру был интегрирован МДП-затвор, формируемый полукруглой формы с радиусом 30 мкм и покрытый слоем диоксида кремния толщиной 0,1 мкм. Потенциал на затворе равен потенциалу на контакте Шоттки. На рисунке 1 представлено качественное изображение распределения плотности сетки в сечении от центральной оси вращения цилиндра (ось С-С') до его периферии, где размещен МДП-затвор.

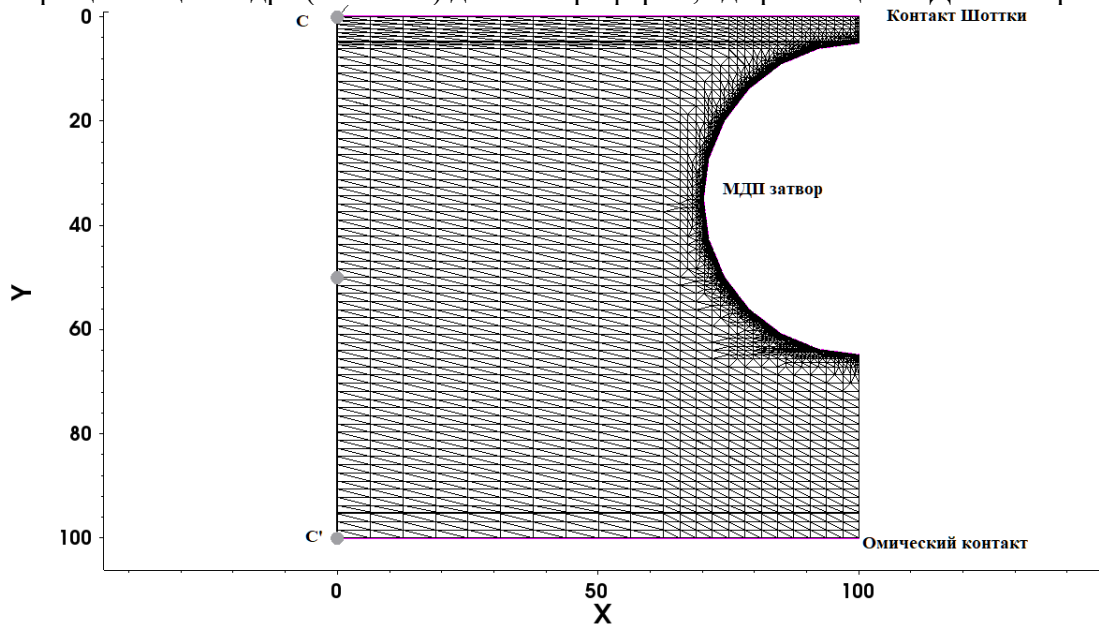


Рисунок 1. Структура модифицированного варактора

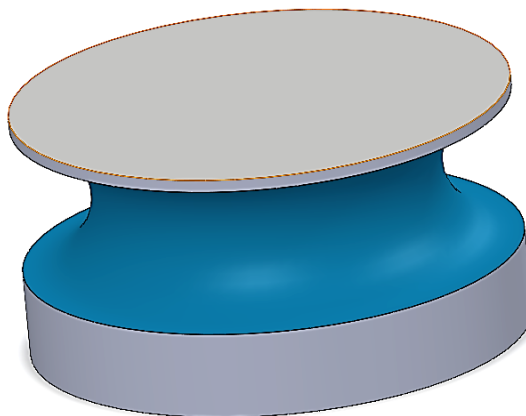


Рисунок 2. 3д модель варактора с МДП затвором

Для расчётов использовались следующие модели и учитывались следующие эффекты:

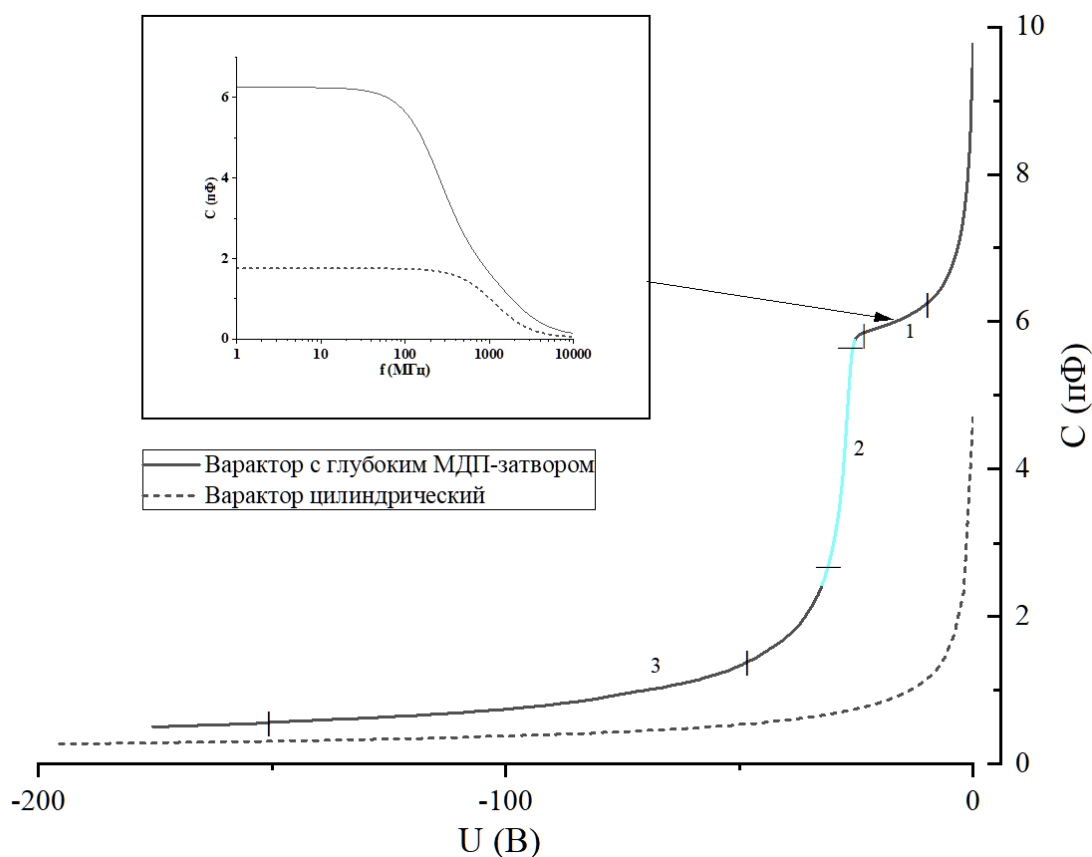
- Термодинамическая модель

- Модель зависимости подвижности носителей заряда от напряженности поля.
- Модель зависимости подвижности носителей заряда от степени легирования “Модель общей подвижности Philips”.
- Учитывается собственная концентрация носителей и сужение запрещенной зоны по модели Слотбома
- Учитывается Оже-рекомбинация, рекомбинация Шокли-Рида-Холла, и генерация носителей в ходе лавинообразования.
- Учитывалось туннелирование электронов через барьер Шоттки
- При помощи расчёта интеграла ионизации был учтен лавинный пробой.

Итоговое число узлов расчётной сетки – 165 тысяч, количество элементов – 303 тысячи.

### 3. Результаты моделирования

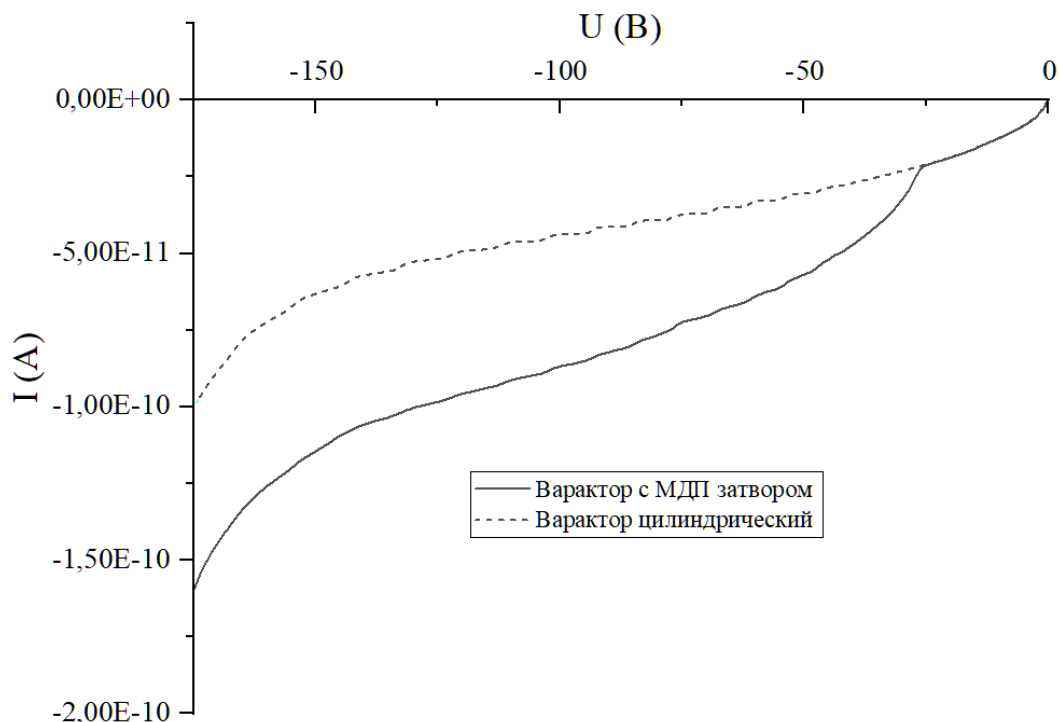
На рисунке 3 демонстрируется, что характеристика емкости модифицированной структуры может быть разделена на три основных участка. В диапазоне напряжений от 4 до 24 вольт наблюдается минимальное изменение емкости. На втором участке, выделенном синим цветом и охватывающем диапазон напряжений от 24 до 33 вольт, наблюдается заметное увеличение крутизны характеристики, сравнимое с крутизной вблизи нулевого значения напряжения. На третьем участке крутизна вновь уменьшается.



**Рисунок 3.** Вольт-фарадные характеристики и зависимость емкости от частоты при обратном смещении.

Важно отметить, что, согласно данным, представленным на рисунке 4, на втором и третьем участках происходит увеличение токов, что способствует снижению добротности устройства. Учитывая, что в данном исследовании использовалась

модель, не включающая анализ дефектов, количественная оценка изменений указанного параметра остается за рамками возможностей текущего анализа.



**Рисунок 4.** Вольт-амперная характеристика структур при обратном смещении.

Анализ рисунка 3 демонстрирует, что рабочий диапазон частот модифицированной структуры приближается к диапазону частот немодифицированного варактора. Низкочастотность обеих структур обуславливается стремлением к простоте моделируемой конструкции. Потенциально, частотный диапазон можно расширять вплоть до ТГц [9].

Необходимо подчеркнуть, что в результате модификации структуры наблюдается снижение напряжения электрического пробоя. В случае исходной структуры пробой происходит при обратном напряжении в 192 В, тогда как для модифицированной структуры данный показатель составляет 175 В.

#### 4. Заключение

В данной работе представлена инновационная топология варактора, которая обеспечивает расширенный диапазон перестройки емкости при сохранении идентичных геометрических размеров и без компромиссов в частотных характеристиках. Вольт-фарадная характеристика, охватывающая три рабочих зоны, открывает возможности для разработки новых электронных компонентов и устройств. В качестве примера, ступенчатое изменение емкости во второй рабочей зоне может быть использовано для создания ограничителя сигнала. Увеличенный диапазон перестройки емкости предоставляет потенциал для расширения рабочих частотных диапазонов устройств, в которых управляемая напряжением емкость применяется для перестройки частоты.

#### Список литературы

1. Al-Yasir Y. I. A. et al. A varactor-based very compact tunable filter with wide tuning range for 4G and Sub-6 GHz 5G communications //Sensors. – 2020. – Т. 20. – №. 16. – С. 4538.
2. Gamal M. et al. Varactor Diode: A Comprehensive Overview On All Aspects, 2024

3. Rizzi B. J. et al. Planar varactor diodes for submillimeter applications //Proceedings of the Fourth International Symposium on Space Terahertz Technology. – 1993.
4. Jahan F. et al. RF power limiter using capacitively-coupled contacts III-nitride varactor //Electronics letters. – 2012. – Т. 48. – №. 23. – С. 1480-1481.
5. Nesimoglu T. Design and analysis of frequency-tunable amplifiers using varactor diode topologies //Circuits, Systems, and Signal Processing. – 2011. – Т. 30. – С. 705-720.
6. Gunther Fenner, Klaus Gillessen, Erhard Kohn; Telefunken Electronic, GmbH Licentia Patent Verwaltungs GmbH. Varactor diode. United States patent US4916716A. 1990 Apr 10.
7. Перепеловский В. В., Михайлов Н. И., Марочкин В. В. Разработка электронных устройств в среде Synopsys Sentaurus TCAD: лаб. практикум. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.
8. Sentaurus™ Device User Guide, Ver. T-2022. 03, Synopsys TCAD Sentaurus, San Jose, CA, USA, 2022.
9. Mehdi I. et al. THz diode technology: Status, prospects, and applications //Proceedings of the IEEE. – 2017. – Т. 105. – №. 6. – С. 990-1007.