

Моделирование варактора с затвором на основе р-п перехода

О.Е. Зайцев, И.Н. Закасовский, В.В. Перепеловский

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

Аннотация: в работе представлены результаты моделирования планарного варикапа с затвором на р-п переходе. Исследованы: вольт-фарадные и вольт-амперные характеристики в режиме обратного смещения, частотные зависимости, а также напряжение пробоя. Моделирование выполнено на основе двумерной термодинамической модели учитывающей ключевые физические эффекты: сужения запрещенной зоны, рекомбинации по механизму Шокли-Рида-Холла, Оже-рекомбинации и лавинный пробой, описываемый через интеграл ионизации. Полученные вольт-фарадные и вольт-амперные характеристики подтверждают возможность применения разработанной структуры в СВЧ-устройствах, таких как ограничители мощности и умножители частот.

Ключевые слова: варактор, TCAD, р-п переход, пробой.

1. Введение

Варакторы, устройства изменяющие емкость под воздействием приложенного электрического напряжения, широко применяются в разнообразных областях современной электроники, включая управляемые напряжением генераторы, синтезаторы частот, перестраиваемые фильтры [1], логические элементы [8] и фотодетекторы [12]. В сверхвысокочастотном диапазоне варакторы играют ключевую роль в функционировании смесителей, умножителей частот [2], ограничителей мощности [3], а так же частотно перестраиваемых усилителей [4]. Это подчеркивает многофункциональность и важность варакторов в разработке современных электронных компонентов и систем.

К текущему моменту разработан обширный спектр топологий, обеспечивающих достижение заданных емкостных и частотных характеристик. Варикапы могут основываться на: MSM-2DEG технологии [7], р-п-переходах, MEMS структурах [5,11], барьерах Шоттки [6, 12, 13], сегнетоэлектрических пленках [15] и МДП конфигурациях [14]. Активные исследования в данном направлении продолжаются, фокусируясь на разработке архитектурных решений, направленных на расширение компонентной базы при проектировании современных радиочастотных и микроволновых систем.

В статье описывается разработанная структура трехконтактного варактора на базе р-п переходов, обладающая максимумом вольт-фарадной характеристики, сходной с характеристикой MSM-2DEG варакторов [9], что говорит о потенциальном применении в фазовращателях [10]. В статье приведены результаты моделирования емкостных, частотных и вольт-амперных характеристик разработанного варактора.

2. Математическая модель

В работе представлена модель полупроводникового варактора с затвором на основе р-п перехода. Профиль легирования моделируемой структуры показан на рисунке 1 (р-области обозначены синим цветом). Красным цветом обозначен слаболегированный кремний n-типа с концентрацией примесей $1.5 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$, выполненный в форме прямоугольного параллелепипеда размерами $4 \times 10 \times 600 \text{ мкм}$. В данной структуре сформированы три вырожденные р-области с концентрацией акцепторов $1 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Потенциал анод-затвор равен 5 В.

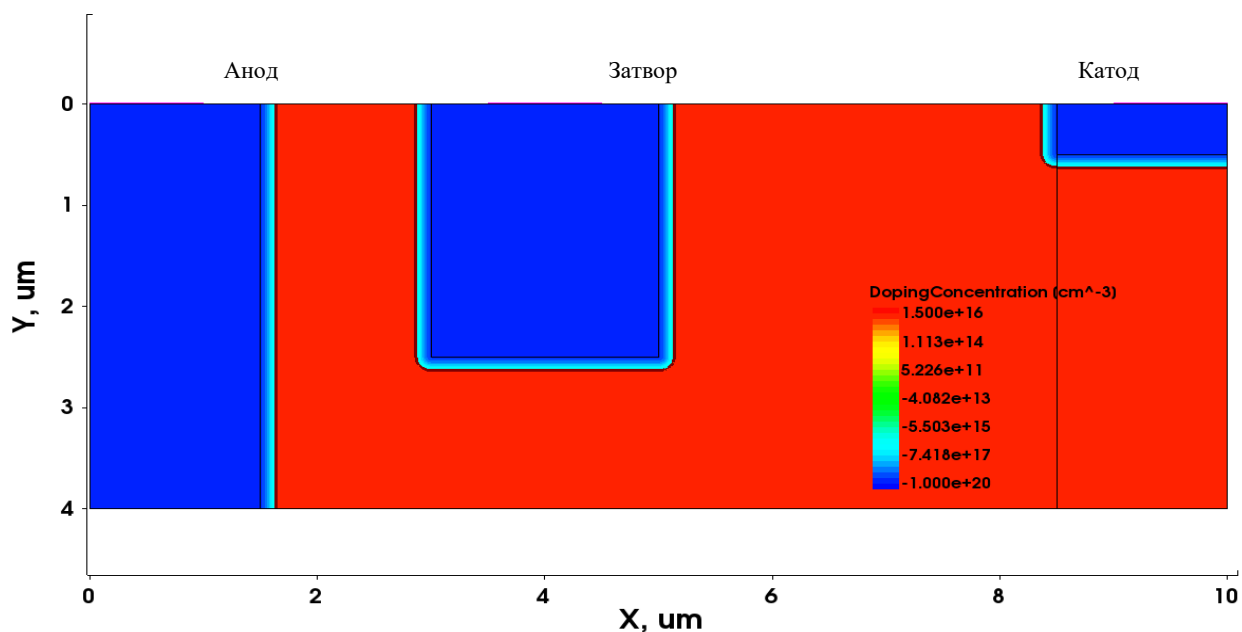


Рисунок 1. Структура моделируемого варактора

Для численного моделирования методом конечных элементов использовались нижеперечисленные модели и учитывались следующие эффекты:

- Термодинамическая модель
- Изменение подвижности носителей заряда под воздействием напряженности электрического поля.
- “Модель общей подвижности Philips”, учитывающая влияние на подвижность носителей заряда степени легирования.
- Модель Слотбома учитывающая собственную концентрацию носителей заряда и эффект сужения запрещенной зоны
- Учтены процессы Оже-рекомбинации, лавинная генерация носителей и рекомбинация по модели Шокли-Рида-Холла.
- Учтено туннелирование электронов через p-n переход.
- Точка лавинного пробоя определена с помощью интеграла ионизации.

Число узлов расчётной сетки составило примерно 14 тысяч,

Количество элементов – 27 тысяч.

3. Результаты моделирования

На рисунке 2а продемонстрирована рассчитанная вольт-фарадная характеристика варактора. Пробой структуры наблюдается при напряжении порядка 22 В. При напряжении смещения свыше 19 В начинаются процессы лавинного умножения носителей заряда, что приводит к нелинейному изменению характеристик устройства, делая данный диапазон не пригодным для варакторного применения, в дальнейшем этот диапазон не представлен.

Полученные емкостные характеристики демонстрируют перспективность применения разработанного варакторного устройства в качестве активного элемента ограничителя мощности СВЧ-диапазона. Принцип работы предложенного устройства (для иллюстрации выбран полоснопропускающий LC контур) основан на выборе рабочей точки в области максимума вольт-фарадной характеристики. Для малого размаха сигнала, коэффициент пропускания, или в терминах S матриц, параметр S_{21} , в дБ, приведен на рисунке 2б. Красной линией обозначен коэффициент пропускания на

частоте сигнала. При увеличении размаха входного сигнала свыше ширины рабочего пика вольт-фарадной характеристики происходит существенное изменение емкости варактора. Это приводит к смещению полосы пропускания фильтра относительно частоты входного сигнала, что обеспечивает эффект ограничения мощности и отображено на рисунке 2с.

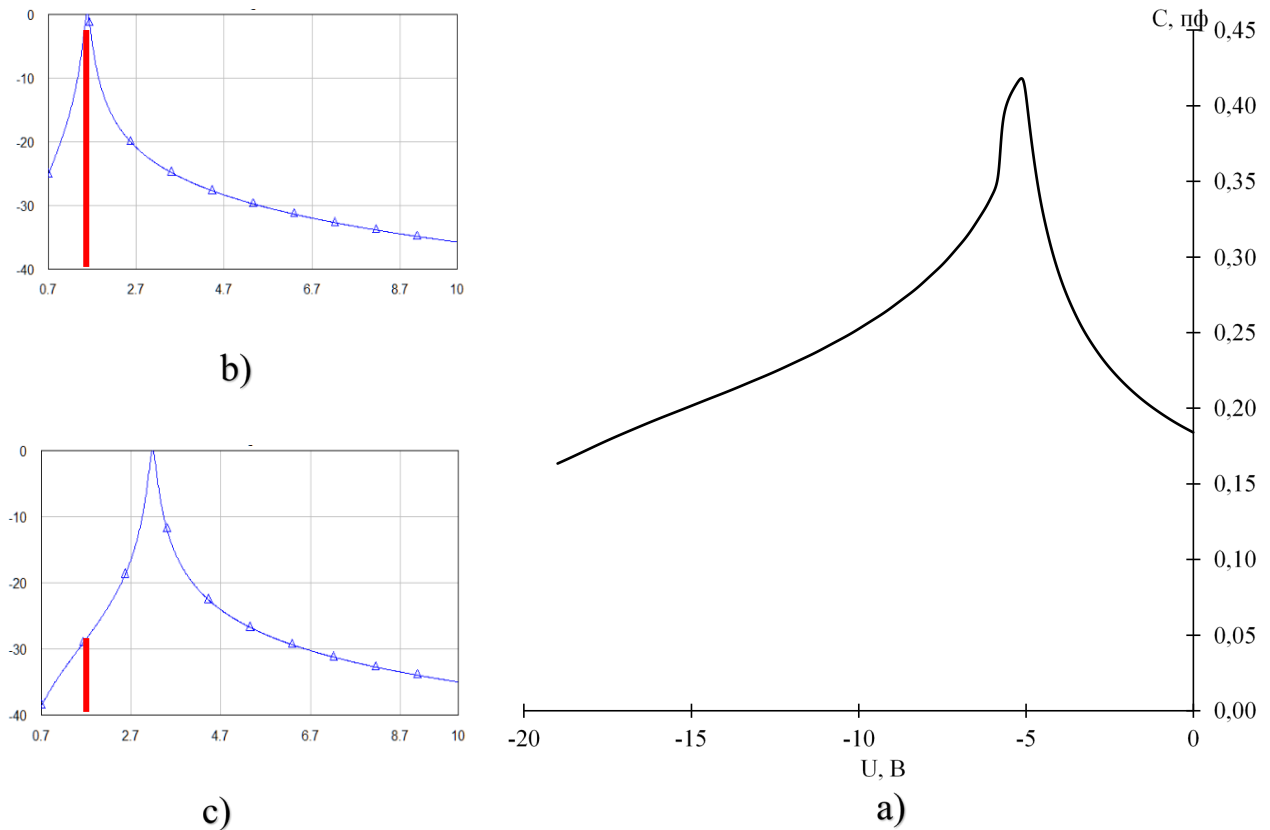


Рисунок 2. а) Вольт-фарадная характеристика моделируемой структуры б) График S_{21} ограничителя от частоты, при малых размахах сигнала с) График S_{21} ограничителя от частоты, при размахах сигнала больших чем ширина пика.

На рисунке 3 представлены зависимость емкости от частоты и вольт-амперная характеристика исследуемого устройства. В качестве опорного напряжения для анализа частотной зависимости выбрано значение в 5 В. На рисунке 3а показано, что емкость устройства остается практически неизменной в широком диапазоне частот вплоть до единиц ГГц, что свидетельствует о стабильности электрофизических параметров структуры в данном режиме. На вольт-амперной характеристике (рисунок 3б) наблюдается минимум тока, соответствующий максимуму емкости на вольт-фарадной характеристике.

Представленная зависимость тока от напряжения носит преимущественно качественный характер, что обусловлено приближенным видом используемых моделей.

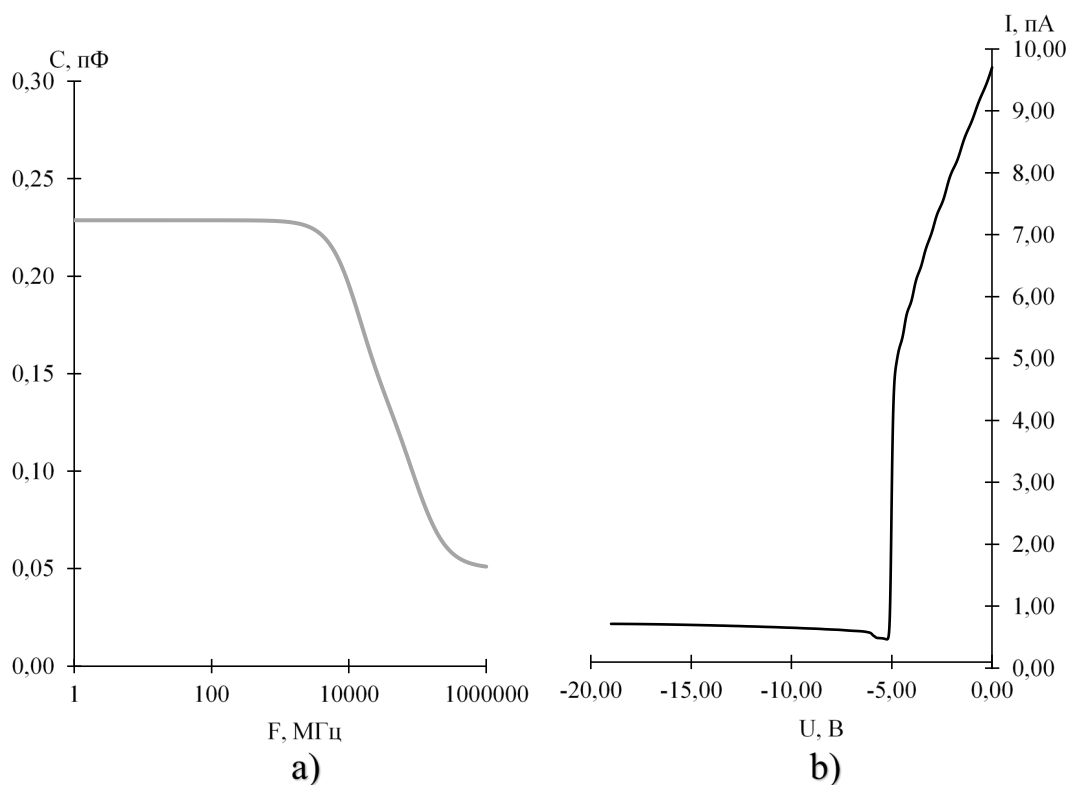


Рисунок 3. а) Зависимость емкости варактора от частоты. б) Вольт-амперная характеристика варактора

4. Заключение

В работе предложена новая топология варактора, обеспечивающая ярковыраженный пик вольт-фарадной характеристики в широком диапазоне рабочих частот. Наблюдаемая характеристика, обладающая сходством с параметрами MSM-2DEG варакторов, создает предпосылки для разработки новых и модернизации существующих электронных компонентов и устройств. В качестве практической реализации рассмотрен полосно-пропускающий фильтр, способный выполнять функцию ограничителя мощности. Простота структуры позволяет предсказуемо регулировать емкость структуры путем изменения геометрических размеров.

Следует отметить, что минимум тока, совпадающий с максимумом ёмкости, указывает на достижение максимальной добротности в основном рабочем диапазоне [16]. Однако количественная оценка добротности в рамках представленного моделирования затруднена ввиду ограничений применяемой физико-математической модели.

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 [Текст] / Y.I.A. Al-Yasir [et al.] //Sensors. – 2020. – Vol. 20, №. 16. –P. 4538.
2. Rizzi B. J. et al. Planar varactor diodes for submillimeter applications [Текст] / B.J. Rizzi [et al.] //Proceedings of the Fourth International Symposium on Space Terahertz Technology. – 1993.
3. Jahan F. et al. RF power limiter using capacitively-coupled contacts III-nitride varactor [Текст] / F. Jahan [et al.] //Electronics letters. – 2012. – Vol. 48, №. 23. – P. 1480-1481.
4. Nesimoglu T. Design and analysis of frequency-tunable amplifiers using varactor diode topologies [Текст] / T. Nesimoglu //Circuits, Systems, and Signal Processing. – 2011. – Vol. 30 – P. 705-720.
5. Kurmendra MEMS Switch Realities: Addressing Challenges and Pioneering Solutions [Текст] / Kurmendra, S. Agarwal // Micromachines. – 2024. – Vol. 15, №. 5. – P. 556.

6. Mehdi I. et al. THz diode technology: Status, prospects, and applications [Текст] / I. Mehdi [et al.] // Proceedings of the IEEE. – 2017. – Vol. 105, №. 6. – P. 990-1007.
7. Shih, C. F. Capacitance Characteristics and Breakdown Mechanism of AlGaIn/GaN Metal–Semiconductor–Metal Varactors and Their Anti-Surge Application [Текст] / C. F. Shin [et al.] // Crystals. – 2020. – Vol. 10, №. 4. – P. 292.
8. Galisultanov, A. Capacitive-based adiabatic logic [Текст] / A. Galisultanov [et al.] // Reversible Computation: 9th International Conference, RC 2017, Kolkata, India, July 6-7, 2017, Proceedings 9. – Springer International Publishing, 2017. – P. 52-65.
9. Hwang J. H. et al. Self-aligned metal–semiconductor–metal varactors based on the AlGaIn/GaN heterostructure [Текст] / J. H. Hwang [et al.] // IEEE Electron Device Letters. – 2019. – Vol. 40, №. 11. – P. 1740- 1743.
10. Cook M., Rogers J. W. M. A highly compact 2.4-GHz passive 6-bit phase shifter with ambidextrous quad-rant selector [Текст] / M. Cook, J.W.M. Rogers // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2016. – Vol. 64, №. 2. – P. 131-135.
11. Kahmen G., Schumacher H. Interactive design of MEMS varactors with high accuracy and application in an ultralow noise MEMS-based RF VCO [Текст] / G. Kahmen, H. Schumacher // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2017. – Vol. 65, №. 10. – P. 3578-3584.
12. Levi A. et al. Graphene Schottky varactor diodes for high-performance photodetection [Текст] / A. Levi [et al.] // ACS Photonics. – 2019. – Vol. 6, №. 8. – P. 1910-1915.
13. Vassos E. et al. Air-bridged Schottky diodes for dynamically tunable millimeter-wave metamaterial phase shifters [Текст] / E. Vassos [et al.] // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11, №. 1. – P. 5988.
14. Lee M., Lee J., Park C. Layout of MOS Varactor with Improved Quality Factor for Cross-Coupled Differential Voltage-Controlled Oscillator Applications [Текст] / M. Lee [et al.] // Electronics. – 2023. – Vol. 12, №. 6. – P. 1385.
15. Apostolidis P. et al. Quantum paraelectric varactors for radiofrequency measurements at millikelvin temperatures [Текст] / P. Apostolidis [et al.] // Nature Electronics. – 2024. – Vol. 7, №. 9. – P. 760-767.
16. Ghosh I., Angira M. Q Factor Modeling and Material Selection of a Variable Capacitor based on RF-MEMS Technology [Текст] / I. Ghosh, M. Angira // Transactions on Electrical and Electronic Materials. – 2022. – V. 23. №. 3. – P. 304-312.