

Таким образом, тонкие пленки оксида титана на кремниевой подложке можно использовать для фотокаталитической очистки воды и воздуха от загрязнений используя естественное освещение или освещение с применением ультрафиолетовых ламп.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Ievlev V.M. Absorption spectra of thin TiO_2 films synthesized by reactive high-frequency magnetron sputtering of titanium / V.M. Ievlev // Physics and technology of semiconductors. – 2014. – Vol. 48, №. 7. – P. 875–884.
2. Российский рынок диоксида титана: реалии и перспективы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vestkhimprom.ru/posts/rossijskij-gynok-dioksida-titana-realii-i-perspektivy>. – Дата доступа: 18.08.2020.
3. Ola O. Review of material design and reactor engineering on TiO_2 photocatalysis for CO_2 reduction / O. Ola, M.M. Maroto-Valer // Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews. – 2014. – Vol. 24. – P. 16–42.
4. Siefke T. Materials pushing the application limits of wire grid polarizers further into the deep ultraviolet spectral / T. Siefke [et al.] // Advanced Optical Materials. – 2016.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ $p-n^+$ -ПЕРЕХОДА В ДЕКАРТОВОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМАХ КООРДИНАТ

Н. Л. Лагунович

*Филиал научно-технический центр «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ»-управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», ул. Корженевского, 12, 220108 Минск, Беларусь,
e-mail: n_dudarby@tut.by*

Разработаны программы для одно-, двух- и трёхмерного моделирования технологических процессов изготовления и измерения вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборных структур. Сравнительный анализ результатов моделирования показал, что для рассматриваемого $p-n^+$ -перехода разница в значениях технологических и электрофизических параметров при расчётах в декартовой и цилиндрической системах координат незначительна и ею можно пренебречь. Следовательно, рассматриваемую структуру можно моделировать в обеих системах координат с достаточно высокой степенью точности.

Ключевые слова: $p-n$ -переход; моделирование полупроводниковых структур; система координат; технологический процесс; технологический параметр; электрофизический параметр.

$p-n^+$ - JUNCTION STRUCTURE SIMULATION IN CARTESIAN AND CYLINDRICAL COORDINATE SYSTEMS

N. L. Lagunovich

*Affiliate Research & Design Center “Belmicrosystems” of Open Join-Stock Company “INTEGRAL” – “INTEGRAL” holding managing company, Korzhenevskii Str., 12, 220108 Minsk, Belarus
Corresponding author: N. L. Lagunovich (n_dudarby@tut.by)*

Consequently programs for one-, two- and three-dimensional simulation of manufacturing processes and volt-ampere characteristics of semiconductor device structures were developed. The main aim of this work was to perform two-dimensional modeling of a $p-n^+$ -type junction in silicon in both Cartesian (rectangular) and cylindrical coordinate systems. The comparative analysis of simulation results showed that for the considered $p-n^+$ -junction the difference in the values of technological and electrophysical parameters for calculating in Cartesian and cylindrical coordinate systems is insignificant and can be ignored. Therefore, the structure under consideration can be modeled in both coordinate systems with the sufficiently fine precision.

Key words: $p-n^+$ -junction; semiconductor structures simulation; coordinate system; technological process; process parameter; electrophysical parameter.

ВВЕДЕНИЕ

С повышением степени интеграции изделий в микроэлектронике и ростом их сложности возрастает потребность в предварительных расчётах их технологических и электрофизических параметров. В настоящее время моделирование полупроводниковых структур занимает важное место при разработке и оптимизации технологии изготовления новых изделий электронной техники, так как позволяет решить задачу получения конкретных приборов с заданными электрофизическими свойствами и электрическими характеристиками ещё до этапа изготовления их экспериментальных образцов [1]. $P-n$ -переход [2, 3] часто выполняет не только функции основной активной области прибора, например, диода, стабилитрона, но и функции одной из частей полупроводниковой структуры, в частности, переходов биполярных $n-p-n$ - и $p-n-p$ -транзисторов, истоковых и стоковых областей в МДП-структурах и т. д. Степень легирования n - или p -области определяет электрофизические свойства и характеристики прибора. В данной статье исследуется $p-n^+$ -переход, в котором p -область выполняет функцию базы, а n^+ -область – функцию эмиттера в биполярном $n-p-n$ -транзисторе [2, 3]. Целью данной работы было выполнение моделирования исследуемого $p-n^+$ -перехода транзистора в декартовой и цилиндрической системах координат для получения предварительной оценки конструктивных размеров и электрофизических параметров прибора и сравнение результатов расчётов, полученных в различных системах координат.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Так как в условиях производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» приборы изготавливаются в основном на кремниевых пластинах, в данной работе речь идёт о моделировании $p-n^+$ -перехода, получаемого в кремнии. Моделирование исследуемой структуры осуществлялось с использованием программного комплекса фирмы *Synopsys* версии *V-2003.12-0*. Технологическое моделирование выполнено с применением программы для двухмерного проектирования *TSuprem4*, а приборное моделирование как в декартовой, так и в цилиндрической системах координат было выполнено с использованием программы для двухмерного моделирования электрических характеристик прибора *Medici*. Обе программы входят в состав программного комплекса фирмы *Synopsys*, куда также входит визуализатор результатов моделирования *TaurusVisual*, с помощью которого были получены изображения структуры исследуемого перехода и его электрических характеристик. В состав вышеназванного комплекса входит также программа подготовки

эксперимента *WorkBench*, представляющая собой виртуальную фабрику по производству полупроводниковых схем и приборов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе структура исследуемого $p-n^+$ -перехода была получена путём ионного легирования фосфором дозой $D \approx 4,06 \times 10^{15}$ ион/см² с энергией $E = 60$ кэВ в область базы p -типа с концентрацией бора 4×10^{17} см⁻³. После выполнения данной операции легирования в процессе получения готового изделия выполнены несколько высокотемпературных обработок, повлиявших на параметры рассматриваемых областей: 1) отжиг при температуре 850 °С в среде O₂ в течение 30 минут; 2) отжиг при температуре 850 °С в среде N₂ в течение 60 минут; 3–5) три последовательных отжига при температуре 850 °С в среде O₂ в течение 30 минут

С учётом всех вышеописанных операций была получена структура $p-n^+$ -перехода для приборного моделирования как в декартовой (см. рис. 1), так и в цилиндрической (см. рис. 2) системах координат. Структура, показанная на рис. 2, использовалась для случаев приборного моделирования как в цилиндрической, так и в декартовой системах координат. Размеры её активных областей равны половине размеров тех же областей структуры, приведенной на рис. 1. В случае, когда приборное моделирование выполняется в цилиндрической системе координат, программа ведёт расчёт конструкции, получаемой путём вращения структуры, полученной в результате технологического моделирования. Следовательно, при технологическом моделировании необходимо задавать координаты областей таким образом, чтобы в результате получить не полную структуру (как на рис. 1), а её половину (см. рис. 2). Тогда можно говорить о соответствии результатов моделирования, полученных в вышеуказанных типах системы координат.

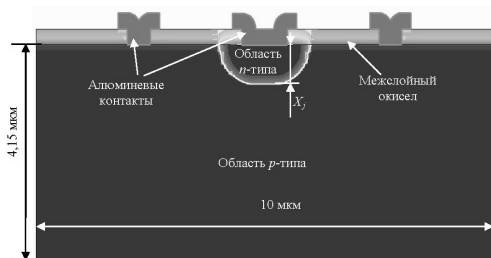


Рисунок 1. – Полная структура $p-n$ -перехода, полученная для приборного моделирования в декартовой системе координат

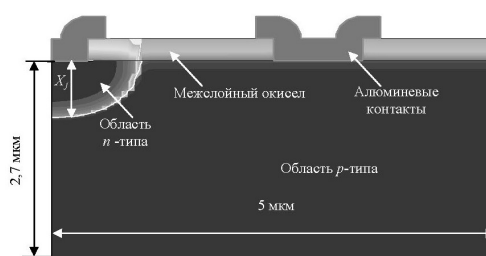


Рисунок 2. – Половина структуры $p-n$ -перехода, полученная для приборного моделирования как в декартовой, так и в цилиндрической системах координат

В данной работе с целью выполнения сравнительного анализа были осуществлены расчёты электрофизических параметров половины исследуемого $p-n^+$ -перехода ещё и в прямоугольной системе координат. Все три варианта структуры (полная структура, полученная в декартовой системе координат, половины структуры, полученные, как в декартовой, так и в цилиндрической системах координат), имея одинаковые размеры в поперечном сечении, показанном на рис. 1 и рис. 2, различаются по площади в планарной плоскости прибора. Это связано с тем, что при моделировании в декартовой системе координат ширина структуры в планарной плоскости по умолчанию составляет 1 мкм, поэтому площадь $p-n^+$ -перехода, пока-

занного на рис. 1, составляет 10 мкм^2 , показанного на рис. 2, – 5 мкм^2 . Площадь структуры, изображённой на рис. 2, в случае моделирования в цилиндрической системе координат составляет $\pi \times (5 \text{ мкм})^2 \approx 78,5 \text{ мкм}^2$.

По результатам технологического моделирования было установлено, что значение удельного сопротивления области p -типа ρ_v для всех типов системы координат является одинаковым и составляет $0,062 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, поверхностное сопротивление области n^+ -типа R_s равно 27 Ом/кв для случая моделирования полной структуры $p-n^+$ -перехода в прямоугольной системе координат (см. рис. 1) и 25 Ом/кв для случаев моделирования половины структуры $p-n^+$ -перехода как в прямоугольной, так и в цилиндрической системах координат (см. рис. 2). Глубина залегания $p-n^+$ -перехода X_j структуры, изображенной на рис. 1, составила $0,74 \text{ мкм}$, а структуры, показанной на рис. 2, как в декартовой, так и в цилиндрической системах координат равна $0,76 \text{ мкм}$. Как следует из вышесказанного, на величины конструктивно-технологических параметров исследуемого $p-n^+$ -перехода больше влияет размер его моделируемой части, чем система координат, в которой выполняются расчёты.

Результаты расчётов пробивного напряжения структур, изображённых на рис. 1 и рис. 2, приведены в табл. в прямоугольной и цилиндрической системах координат для площади структур равной 1 мкм^2 . Из табл. видно, что расчётное значение пробивного напряжения структуры, приведенной на рис. 1, составляет $8,74 \text{ В}$, а структуры, представленной на рис. 2, в прямоугольной системе координат составило $8,78 \text{ В}$, а в цилиндрической системе координат – $8,65 \text{ В}$.

Таблица

Расчётные значения пробивного напряжения, исследуемого $p-n^+$ -перехода при токе, протекающем через площадь 1 мкм^2

	Значения пробивного напряжения, В
Структура в декартовой системе координат (при токе $1 \cdot 10^{-7} \text{ А/мкм}^2$)	8,74
Половина структуры в декартовой системе координат (при токе $2 \cdot 10^{-7} \text{ А/мкм}^2$)	8,78
Структура в цилиндрической системе координат (при токе $\approx 1,27 \cdot 10^{-8} \text{ А/мкм}^2$)	8,65

Такие данные свидетельствуют о большем влиянии размера моделируемой структуры при приборном моделировании с использованием программы *Medici*, чем выбранной системы координат. Как видно из табл., значения пробивных напряжений при расчётах в декартовой и цилиндрической системах координат почти одинаковы. Разница в значениях пробивного напряжения при моделировании в декартовой и цилиндрической системах координат составляет $8,74 - 8,65 = 0,09 \text{ В}$ ($\sim 1 \%$) или $8,78 - 8,65 = 0,13 \text{ В}$ ($\sim 1,5 \%$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнение приборно-технологического моделирования структуры $p-n^+$ -перехода, выполняющего функции перехода база-эмиттер в биполярном $n-p-n$ -транзисторе, в декартовой и цилиндрической системах координат позволило оценить конструктивно-технологические параметры данного перехода и опреде-

лить его пробивные напряжения. Сравнительный анализ данных моделирования показал, что на величины конструктивно-технологических параметров исследуемого $p-n^+$ -перехода тип системы координат никакого влияния не оказывает, а разница в значениях пробивного напряжения при моделировании в декартовой и цилиндрической системах координат составляет $\sim 1-1,5\%$ и ею можно пренебречь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / П. Антонетти [и др.] – М.: Радио и связь, 1988. – 496 с.
2. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов / С. Зи – М.: Мир, 1984. – Ч. 1 – 455 с.
3. Малер, Р. Элементы интегральных схем / Р. Малер, Т. Кейминс – М.: Мир, 1989. – 630 с.
4. URL: <http://www.synopsys.com> (дата обращения: 17.07.2020).

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ПАЙКА БЕССВИНЦОВЫМИ ПРИПОЯМИ ПРИ МОНТАЖЕ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

В. Л. Ланин, Д. К. Буй

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
П. Бровки 6, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: vlanin@bsuir.by*

Ультразвуковая пайка активно применяется при монтаже солнечных батарей, а именно при создании токопроводящих контактов к алюминированным панелям. Локальные тепловые эффекты кавитации в расплавах создают условия для образования химических связей между компонентами на межфазной границе, а динамические эффекты обеспечивают удаление оксидных пленок с поверхностей материалов, что является физической основой процессов бесфлюсовой пайки трудноплавяемых материалов. Актуальна проблема разработки процесса бесфлюсовой пайки алюминиевых сплавов с использованием бессвинцовых припоев с содержанием диффузионно-активных металлов. Моделированием процесса диффузии показано, что воздействие ультразвуковых колебаний увеличивает глубину диффундирующего элемента Zn на 20–50 %. Прочность соединений деталей из алюминиевого сплава АМц зависит от температуры пайки и применяемого припоя. Для припоя системы Sn-20Zn-10Cd прочность в 5–6 раз выше, чем для припоя Sn-10Zn

Ключевые слова: ультразвук; бессвинцовый припой; солнечные батареи; монтаж.

ULTRASONIC SOLDERING BY LEAD FREE SOLDERS WITH SUNNY BATTERIES MOUNTING

V. L. Lanin, D. K. Bui

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, P. Brovki 6, 220013 Minsk, Belarus
Corresponding author: V. L. Lanin (vlanin@bsuir.by)*

Ultrasonic soldering is actively used in mounting of solar batteries, namely when creating conductive contacts to aluminized panels. Local thermal effects of cavitation in melts create the conditions for formation of chemical bonds between components at interface,