

Д. т. н. В. В. БАРАНОВ, А. М. БОРОВИК, И. Ю. ЛОВШЕНКО,
к. т. н. В. Р. СТЕМПИЦКИЙ, ЧАН ТУАН ЧУНГ, ИБРАГИМ ШЕЛИБАК

Республика Беларусь, г. Минск, Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

E-mail: nil44@bsuir.by

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ

Реализована процедура оптимизации порогового напряжения биполярного транзистора с изолированным затвором. Посредством проведения отсеивающего эксперимента выявлены наиболее значимые входные параметры. Проведены экспериментальные исследования с использованием метода поверхности откликов для определения разброса значений выходной характеристики посредством анализа в цикле Монте-Карло, а также расчета допустимых отклонений входных параметров, в наибольшей степени влияющих на пороговое напряжение.

Ключевые слова: биполярный транзистор с изолированным затвором (БТИЗ), технологический процесс, конструкция, оптимизация, частотные и статические характеристики, отсеивающий эксперимент.

Среди многообразных направлений современной полупроводниковой электроники важное место занимают электронные приборы, эксплуатируемые при высоких уровнях мощности. Важным требованием для силовой электроники является минимизация потерь энергии при преобразовании и управлении, что стимулирует поиск новых конструктивных решений, материалов для таких структур, оптимизацию технологии их изготовления.

Компьютерное моделирование, проектирование и оптимизация технологических процессов формирования приборов, а также маршрута изготовления интегральной схемы позволяют значительно сократить время разработки и исследования, повысить точность расчетов, выбрать наилучшие варианты для реализации на основе строгого математического анализа.

Биполярный транзистор с изолированным затвором (**БТИЗ**, англ. isolated gate bipolar transistor, IGBT) — один из наиболее распространенных в настоящее время приборов современной силовой электроники [1, 2], сочетающий достоинства полевого МОП-транзистора (высокое входное сопротивление, низкий уровень управляющей мощности) и биполярного транзистора (низкое выходное сопротивление, низкий уровень прямого падения напряжения). К электрофизическим параметрам БТИЗ предъявляют высокие требования (высокое, до нескольких тысяч вольт, напряжение пробоя; высокие, до нескольких сотен ампер, рабочие токи; малое, до нескольких десятков наносекунд, время переключения), но их достижение возможно только при оптимизации конструкции прибора и технологических параметров его изготовления.

Важным и необходимым этапом в современном цикле проектирования и производства интегральных микросхем является проведение статистического анализа технологии/прибора/схемы/системы с целью оптимизации параметров технологического процесса изготовления и повышения выхода годных изделий. Однако, поскольку прямое статистическое моделирование технологии требует значительных вычислительных ресурсов, особую актуальность приобретает применение аппроксимационных методов. Идея заключается в том, чтобы найти эффективный способ аппроксимации результатов численного моделирования технологического процесса, позволяющий достаточно точно описать результаты как можно меньшего количества компьютерных опытов (моделирования с использованием специального программного обеспечения) в виде, например, полиномиального ряда, и затем использовать эти аппроксимационные зависимости в статистических расчетах в цикле Монте-Карло.

В последнее время при решении таких задач посредством статистического анализа результатов численного моделирования активно используется метод поверхности откликов (**МПО**, англ. response surface methodology, RSM), в рамках которого возможно эффективное использование многомерных физических моделей для статистического проектирования и оптимизации. МПО позволяет решить принципиальную проблему, связанную с большими вычислительными затратами при проведении оптимизации параметров посредством статистического анализа в цикле Монте-Карло результатов численного моделирования в совместном цикле проектирования технологии/прибора/схемы [3]. МПО достаточно экономичен при исследовании чувстви-

тельности параметров технологического процесса посредством аппроксимации сложных взаимозависимостей. Это особенно важно для тех случаев, когда отсутствуют модели, устанавливающие соотношения между рассматриваемыми параметрами. Поведение входных параметров исследуемых процессов в методе поверхности откликов рассматривается как «черный ящик», а поверхность выходных характеристик описывается в виде полинома.

Реализация МПО заключается в последовательном применении следующих процедур.

1. Определение факторов, оказывающих наибольшее влияние на выходную характеристику. Данная процедура реализуется на основе отсеивающего эксперимента согласно выбранному плану (как правило, план Плакетта — Бермана) [4].

2. Проведение серии расчетов в рамках компьютерного моделирования или натурного эксперимента согласно выбранному плану (планы первого и второго порядков — полный факторный эксперимент, Бокса — Бенкина, Хартли, ортогональный центральный композиционный план) [4, 5] для определения коэффициентов аппроксимационного полинома, адекватно описывающего зависимость между входными параметрами и исследуемой выходной характеристикой.

3. Определение разброса выходных характеристик при заданном его интервале посредством анализа в цикле Монте-Карло с использованием полученного полинома (прямая задача).

4. Вычисление допустимого диапазона значений входных технологических параметров, обеспечивающих изменение выходной характеристики внутри заданного интервала (обратная задача).

В настоящей работе представлены результаты решения прямой и обратной задачи оптимизации технологии формирования БТИЗ.

В сложных технологических процессах на выходные характеристики изготавливаемого изделия оказывает влияние достаточно большое количество технологических параметров (факторов), но лишь несколько из них являются действительно значимыми. Для выявления этих факторов проводят так называемые отсеивающие эксперименты, что является важным и необходимым этапом решения прямой задачи — определения влияния разброса значений технологических параметров на выходные характеристики изделия.

Одним из способов планирования отсеивающего эксперимента является план Плакетта — Бермана, использующего матрицы Адамара и позволяющего тестировать большое число факторов при использовании минимального количества опытов [6].

При проведении отсеивающего эксперимента прежде всего формируется список факторов, влияющих на изучаемое явление. В соответствии с планом Плакетта — Бермана все факторы варьируются на двух уровнях (максималь-

ное и минимальное значение параметра) с одинаковым разбросом значений относительно номинального. Уровни факторов в отсеивающем эксперименте выбираются так, чтобы матрица планирования обладала следующими свойствами: сумма чисел в каждом столбце равна нулю и сумма произведений элементов, относящихся к одному наблюдению, для двух любых столбцов тоже равна нулю.

Алгоритм математической обработки результатов отсеивающего эксперимента, проведенного согласно плану Плакетта — Бермана, представлен на рис. 1.

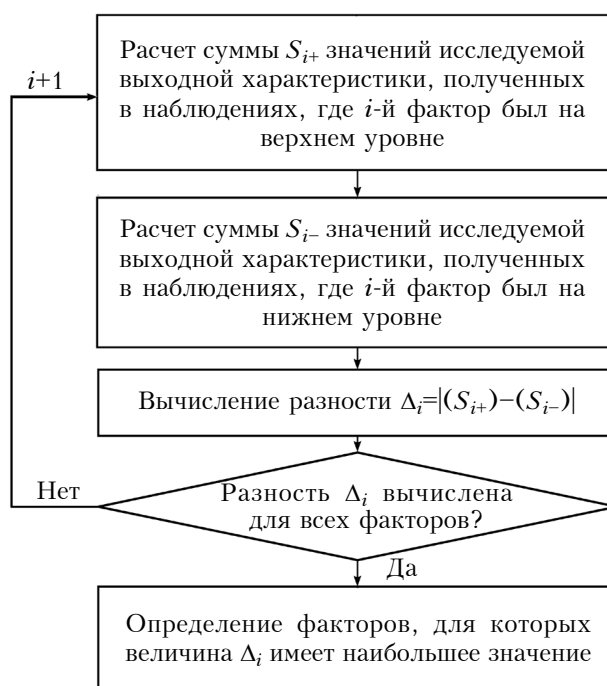


Рис. 1. Алгоритм математической обработки результатов отсеивающего эксперимента по плану Плакетта — Бермана

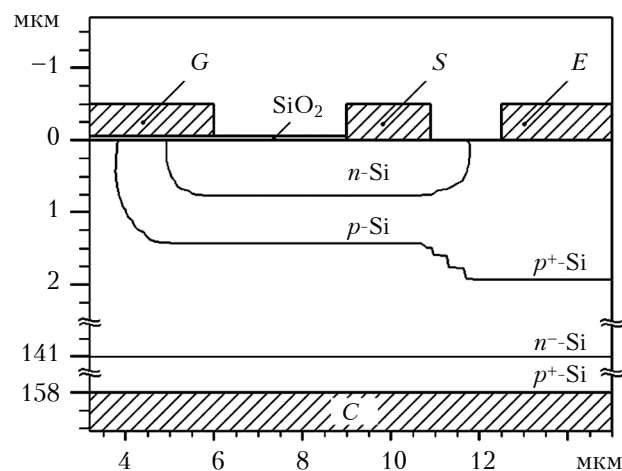


Рис. 2. Структура БТИЗ:

E — эмиттер; C — коллектор; S — исток; G — затвор

В случае формирования БТИЗ наиболее значимыми конструктивно-технологическими параметрами являются те, для которых абсолютная величина разности Δ_i между суммами значений порогового напряжения для верхнего и нижнего уровня факторов имеет наибольшее значение.

Для проведения опытов в соответствии с планом эксперимента использовались модули ATHENA и ATLAS программного комплекса компании Silvaco.

Оптимизация конструктивных и технологических параметров проводилась для структуры БТИЗ, представленной на **рис. 2**.

По результатам исследования влияния технологических и конструктивных факторов на пороговое напряжение $U_{\text{пор}}$ выбраны следующие значимые параметры:

- толщина подзатворного оксида $d_{\text{ок}}$;
- ширина базы W ;
- концентрация примеси в области базы N_6 ;
- длина канала L ;
- концентрация примеси в области канала N_k ;
- концентрация примеси в области эмиттера $N_э$;
- концентрация примеси в области истока $N_{\text{и}}$.

Построение аппроксимационной зависимости порогового напряжения БТИЗ от факторов эксперимента, определение допустимого разброса выходных характеристик посредством анализа в цикле Монте-Карло и допустимых отклонений входных параметров производится в программном комплексе Icarus [7].

Используемый для проведения отсеивающего эксперимента план Плакетта – Бермана представлен в **табл. 1**.

В **табл. 2** представлены значения порогового напряжения БТИЗ для каждого из проведенных в соответствии с выбранным планом опытов, а также результаты вычислений, с целью анализа степени влияния каждого фактора на выходной параметр.

Результаты проведенного отсеивающего эксперимента показали, что входными конструктивно-технологическими параметрами, оказывающими наибольшее влияние на величину порогового напряжения БТИЗ, являются:

- толщина подзатворного оксида $d_{\text{ок}}$ (далее фактор X_1);
- длина канала L (X_2);
- концентрация примеси в области канала N_k (X_3);

Таблица 1

План отсеивающего эксперимента в нормированных/номинальных значениях при исследовании влияния различных факторов на пороговое напряжение

№ опыта	$d_{\text{ок}}$, нм	W , мкм	N_6 , 10^{13} см^{-3}	L , мкм	N_k , 10^{16} см^{-3}	$N_э$, 10^{15} см^{-3}	$N_{\text{и}}$, 10^{18} см^{-3}
1	+1/60	-1/116	-1/5,29	+1/1,3	-1/8,4	+1/30,5	+1/7
2	+1/60	+1/174	-1/5,29	-1/0,9	+1/13	-1/2,03	+1/7
3	+1/60	+1/174	+1/7,93	-1/0,9	-1/8,4	+1/30,5	-1/4,7
4	-1/40	+1/174	+1/7,93	+1/1,3	-1/8,4	-1/2,03	+1/7
5	+1/60	-1/116	+1/7,93	+1/1,3	+1/13	-1/2,03	-1/4,7
6	-1/40	+1/174	-1/5,29	+1/1,3	+1/13	+1/30,5	-1/4,7
7	-1/40	-1/116	+1/7,93	-1/0,9	+1/13	+1/30,5	+1/7
8	-1/40	-1/116	-1/5,29	-1/0,9	-1/8,4	-1/2,03	-1/4,7

Таблица 2

Результаты анализа влияния различных факторов на величину порогового напряжения БТИЗ

№ опыта	Факторы							$U_{\text{пор}}$, В
	$d_{\text{ок}}$	W	N_6	L	N_k	$N_э$	$N_{\text{и}}$	
1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	4,26
2	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	5,72
3	+1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	4,13
4	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	3,04
5	+1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	6,48
6	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	4,29
7	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1	3,88
8	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	3,03
S_{i+}	20,59	17,18	17,53	18,07	20,37	16,56	16,9	
S_{i-}	14,24	17,65	17,3	16,76	14,46	18,27	17,93	
Δ_i	6,35	-0,47	0,23	1,31	5,91	-1,71	-1,03	

— концентрация примеси в области эмиттера N_3 (X_4).

Полученные результаты полностью соответствуют данным, представленным в [8–10].

Статистический анализ и оптимизация порогового напряжения проводятся в предположении нелинейности его зависимости от факторов, что наиболее точно описывает экспериментальные данные. Полученный аппроксимационный полином имеет вид

$$Y = 11,56 - 45,61X_1 + 8,835X_2 - 2,040 \cdot 10^{-16} \cdot X_3 - 3,003 \cdot 10^{-16}X_4 + 4,938 \cdot 10^2 \cdot X_1^2 - 10,80 \cdot X_2^2 + 8,869 \cdot 10^{-16} \cdot X_3^2 + 7,382 \cdot 10^{-17} \cdot X_4^2 - 3,357 \cdot X_1X_2 + 2,543 \cdot 10^{-17} \cdot X_1X_3 - 1,767 \cdot 10^{-16} \cdot X_1X_4 + 4,479 \cdot 10^{-34} \cdot X_2X_3 + 3,211 \cdot 10^{-33} \cdot X_2X_4 + 3,004 \cdot 10^{-33} \cdot X_3X_4,$$

где Y — выходная характеристика (пороговое напряжение).

В табл. 3 представлены основные статистические характеристики полученной аппроксимационной зависимости, откуда следует, что она достаточно хорошо описывает зависимость между входными параметрами и выходной характеристикой. Это подтверждается и корреляционной зависимостью, приведенной на рис. 3.

Таблица 3

Характеристики аппроксимационной зависимости для порогового напряжения БТИЗ

Статистический параметр	Значение
Среднеквадратическое отклонение	0,1167
Коэффициент детерминации	0,9925
Скорректированный коэффициент детерминации	0,9819
Усредненная относительная ошибка, %	1,148
Максимальная относительная ошибка, %	3,927

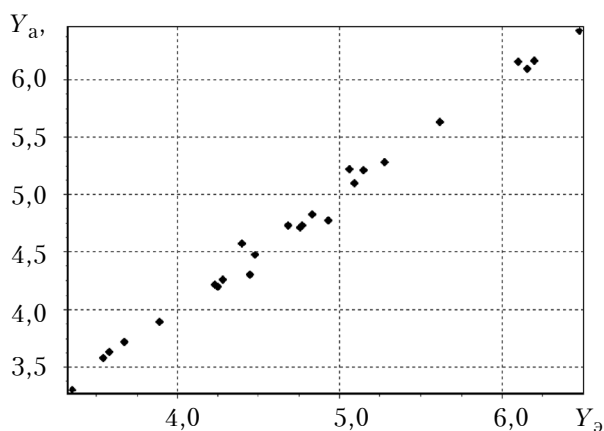
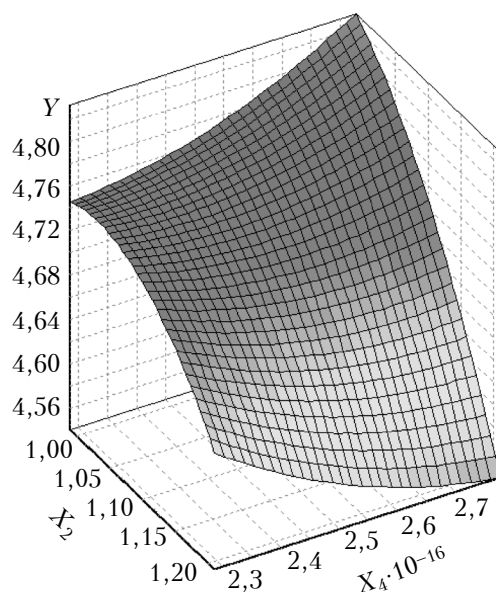


Рис. 3. Корреляция между значениями порогового напряжения БТИЗ, полученными в результате численного моделирования $Y_э$ и аппроксимации $Y_а$

а)



б)

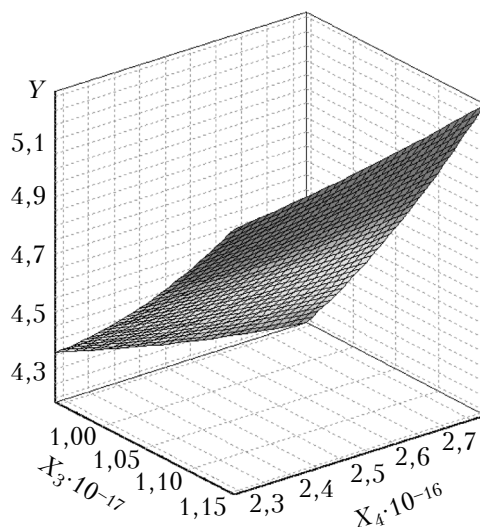


Рис. 4. Зависимости порогового напряжения Y от факторов X_2 и X_4 (а) и X_3 и X_4 (б) при номинальных значениях остальных параметров

На рис. 4 приведены типичные поверхности отклика для полученной аппроксимационной зависимости.

С использованием полученного аппроксимационного полинома проведена серия многовариантных, в цикле Монте-Карло, расчетов для определения разброса значений порогового напряжения при выбранных диапазонах отклонения входных параметров. Комбинации входных технологических параметров определялись случайным образом по нормальному закону распределения в пределах заданного диапазона их изменения (табл. 1). Статистический анализ в цикле Монте-Карло показал, что пороговое напряжение может принимать значения от 3,38 до 6,32 В.

Таблица 4
Результаты оптимизации порогового напряжения
БТИЗ

Параметр	d_{ox} , мкм	L , мкм	N_K , 10^{17} см^{-3}	N_E , 10^{16} см^{-3}
Минимальное значение	0,047	1,053	1,020	2,405
Максимальное значение	0,062	1,082	1,095	2,613

Процедура оптимизации параметров технологического маршрута формирования БТИЗ сводилась к математической задаче определения допустимого диапазона значений значимых входных конструктивных и технологических параметров ($X_1, \dots, X_4$), обеспечивающих изменение порогового напряжения БТИЗ в интервале от 4,71 до 4,81 В. Результаты оптимизации представлены в табл. 4.

Заключение

Таким образом, проведенные исследования позволили выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на величину порогового напряжения БТИЗ, и определить интервалы их изменений для достижения значения порогового напряжения исследуемой структуры в диапазоне от 4,71 до 4,81 В, а именно:

- толщина подзатворного оксида 0,047 — 0,062 мкм;
- длина канала 1,053 — 1,082 мкм;
- концентрация примеси в области канала $(1,020 - 1,095) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$;
- концентрация примеси в области эмиттера $(2,405 - 2,613) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Представленные результаты демонстрируют эффективность и работоспособность предлагаемой методики оптимизации, основанной на последовательном применении процедуры поиска значимых входных технологических параметров,

аппроксимации результатов компьютерных экспериментов и поиска допустимых значений входных параметров, которые обеспечивают изменение выходной характеристики (порогового напряжения) в заданном диапазоне, и могут быть использованы для статистического проектирования технологии в научных исследованиях, а также в условиях опытного, серийного, а также «виртуального» производства изделий микроэлектроники.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Грехов И. Силовая полупроводниковая электроника и импульсная техника // Вестник российской академии наук. — 2008. — №2. — С. 106 — 115.
2. Флоренцев С. Современное состояние и прогноз развития приборов силовой электроники // СТА. — 2004. — №2. — С. 20 — 30.
3. Khuri A.I., Mukhopadhyay S. Response surface methodology // Wiley Interdisciplinary Reviews — Computation Statistics. — 2010. — Vol. 2, N2. — P. 128 — 149.
4. Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента. — Минск: Изд-во БГУ, 1982.
5. Архипов В.А., Березиков А.П. Основы теории инженерно-физического эксперимента: учебное пособие. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008.
6. Hartman, K., Lezki E., Schafer W. Statistische Versuchsplanung und -auswertung in der Stoffwirtschaft. — Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1974.
7. Nelayev V., Stempitsky V., Kovalevsky A. Program package for statistical analysis and optimization of IC technology // Proc. of the Int. Conf. MIXED 2004. — Szczecin, Poland. — 2004. — P. 242 — 246.
8. Khanna V. K. The insulated gate bipolar transistor IGBT: Theory and design. — New York: Wiley-IEEE Press, 2003. 648 p.
9. Michel M. Leistungselektronik. — Berlin: Springer, 2011.
10. Dodge J., Hess J. IGBT tutorial // Advanced Power Technology APT0201 Rev. B. — 2002.

Дата поступления рукописи
в редакцию 12.11 2014 г.

В. В. БАРАНОВ, А. М. БОРОВИК, І. Ю. ЛОВШЕНКО, В. С. СТЕМПИЦЬКИЙ,
ЧАН ТУАН ЧУНГ, ІБРАГІМ ШЕЛІБАК

Республіка Білорусь, м. Мінськ, Білоруський державний університет інформатики і радіоелектроніки
E-mail: nil44@bsuir.by

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ І ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БІПОЛЯРНОГО ТРАНЗИСТОРА З ІЗОЛЬОВАНИМ ЗАТВОРОМ

Реалізовано процедуру оптимізації граничної напруги біполярного транзистора з ізольованим затвором. За допомогою експерименту, що відсіває, виявлено входні параметри, які найбільш суттєво впливають на вихідну величину (граничну напругу). Проведено експериментальні дослідження з використанням методу поверхні відгуків для визначення розкиду вихідних характеристик за допомогою аналізу в циклі Монте-Карло, а також розрахунку допустимих відхилень входних параметрів, що впливають на порогову напругу в найбільшій мірі.

Ключові слова: технологічний процес виготовлення біполярного транзистора з ізольованим затвором (БТИЗ), конструкція, оптимізація, частотні і статичні характеристики, експеримент, що відсіває.

Republic of Belarus, Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

E-mail: nil44@bsuir.by

STATISTICAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION
OF IGBT MANUFACTURING FLOW

The use of computer simulation, design and optimization of power electronic devices formation technological processes can significantly reduce development time, improve the accuracy of calculations, choose the best options for implementation based on strict mathematical analysis. One of the most common power electronic devices is isolated gate bipolar transistor (IGBT), which combines the advantages of MOSFET and bipolar transistor. The achievement of high requirements for these devices is only possible by optimizing device design and manufacturing process parameters. Therefore important and necessary step in the modern cycle of IC design and manufacturing is to carry out the statistical analysis. Procedure of the IGBT threshold voltage optimization was realized. Through screening experiments according to the Plackett-Burman design the most important input parameters (factors) that have the greatest impact on the output characteristic was detected. The coefficients of the approximation polynomial adequately describing the relationship between the input parameters and investigated output characteristics were determined. Using the calculated approximation polynomial, a series of multiple, in a cycle of Monte Carlo, calculations to determine the spread of threshold voltage values at selected ranges of input parameters deviation were carried out. Combinations of input process parameters values were determined randomly by a normal distribution within a given range of changes. The procedure of IGBT process parameters optimization consist a mathematical problem of determining the value range of the input significant structural and technological parameters providing the change of the IGBT threshold voltage in a given interval. The presented results demonstrate the effectiveness of the proposed optimization techniques.

Keywords: IGBT manufacturing process, optimization, IGBT frequency and static characteristics, screening experiments.

REFERENCES

1. Grekhov I. [Power semiconductor electronics and impulse technique] *Vestnik Rossiiskoi Akademii Nauk*, 2008, no 2, pp. 106-115. (in Russian)
2. Florentsev S. [Current state and forecast of power electronic devices development]. *CTA (Contemporary Technologies in Automation)*, 2004, no 2, pp. 20-30. (in Russian)
3. Khuri A.I., Mukhopadhyay S. Response surface methodology. *Wiley Interdisciplinary Reviews — Computation Statistics*, 2010, vol. 2, no 2, pp. 128-149.
4. Krasovsky G.I., Filaretov G.F. *Experiment planning*, Minsk, Publishing house BGU, 1982, 302 p. (in Russian)
5. Arhipov V. A., Berezikov A. P. *Osnovy teorii inzhenerno-fizicheskogo eksperimenta* [Fundamentals of engineering and physics experiment theory]. Tomsk, Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2008, 206 p. (in Russian)
6. Hartman, K., Lezki E., Schafer W. *Statistische Versuchsplanung und -auswertung in der Stoffwirtschaft*. Leipzig, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1974, 439 p.
7. Nelayev V., Stempitsky V., Kovalevsky A. Program package for statistical analysis and optimization of IC technology. *Proc. of the Int. Conf. MIXED 2004*, Szczecin, Poland, 2004, pp. 242-246.
8. Khanna V. K. *The insulated gate bipolar transistor IGBT: Theory and design*. Wiley-IEEE Press, 2003, 648 p.
9. Michel M. *Leistungselektronik*. Berlin, Springer, 2011, 327 p.
10. Dodge J., Hess J. IGBT tutorial, *Advanced Power Technology APT0201 Rev. B*, 2002, 15 p.