

Моделирование напряжений в многослойных полупроводниковых структурах автомобильных регуляторов и прогнозирование надежности их работы

© 2020 г. С. А. Адарчин¹, В. Г. Косушкин^{1,§}, В. М. Гурин², Л. В. Кожитов³,
М. С. Васютин², В. Г. Бебенин⁴

¹ *Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет) (калужский филиал),
ул. Баженова, д. 2, Калуга, 248000, Россия*

² *ООО «Фокон»,
Грабцевское ш., д. 73, Калуга, 248035, Россия,*

³ *Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»,
Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049, Россия*

⁴ *Московский политехнический университет,
ул. Б. Семеновская, д. 38, Москва, 107023, Россия*

Аннотация. Автомобильная и силовая электроника — это одна из самых инновационных и динамичных областей современного производства электронных компонентов. К наиболее важным элементам автомобильных систем относится регулятор напряжения — часть генераторной установки, предназначенная для стабилизации напряжения, как важнейшего фактора отказоустойчивости и безопасности автомобиля. Рассмотрены проблемы повышения надежности микроэлектромеханических систем на примере автомобильного регулятора напряжения. Предложена модель процесса и проведено исследование влияния температуры на формирование полей напряжений в полупроводниковых структурах активных элементов регулятора. Исследования построены на основе предположения о возможной причине изменения параметров регулятора из-за возникновения дефектов кристаллической структуры полупроводникового материала, используемого в структурах интегральных регуляторов напряжения. Для исследования была предложена математическая модель, описывающая поведение полупроводникового элемента реального регулятора напряжения автомобиля. В результате моделирования в системе Comsol Multiphysics установлено, что распределение напряжений в структурах неравномерно и максимума значение напряжений достигает у краев. Увеличение градиентов температуры в структурах регуляторов приводит к формированию дислокаций, которые изменяют электрические характеристики приборов. В результате моделирования установлено, что возникающие в процессе изготовления и функционирования полупроводниковых структур регулятора термоупругие напряжения в регуляторах данного типа могут вызывать изменение структуры полупроводникового прибора за счет релаксаций упругих напряжений на дислокациях. Результаты расчетов получили экспериментальное подтверждение при металлографических исследованиях структур реальных регуляторов напряжения, проработавших разное время в автомобилях. Предложены меры, включающие термостатирование чувствительных элементов микроэлектромеханических структур, что позволит увеличить ресурс их работы.

Ключевые слова: надежность, электронные регуляторы, моделирование

Введение

Обычно надежность приборов определяется периодом времени, в течение которого изделие сохра-

няет свои параметры в заданных пределах. Особую роль параметры надежности играют в производстве аппаратов, которые работают в автономных условиях. Первопричиной снижения надежности микро-

Адарчин Сергей Александрович¹ — канд. техн. наук, доцент, e-mail: adarchin@rambler.ru; Косушкин Виктор Григорьевич^{1,§} — доктор техн. наук, профессор, e-mail: vic_kos@mail.ru; Гурин Виталий Михайлович² — инженер-технолог, e-mail: vityal.gurin918@yandex.ru; Кожитов Лев Васильевич³ — доктор техн. наук, профессор, e-mail: kozitov@rambler.ru; Васютин Максим Сергеевич² — генеральный директор, e-mail: maksim.vasiutin@gmail.com; Бебенин Вячеслав Геннадьевич⁴ — профессор

§ Автор для переписки

структур являются деградационные процессы, связанные с формированием и накоплением дефектов в активных элементах приборов [1—5].

Стандартные методики анализа дефектов в чувствительных элементах полупроводниковых измерительных преобразователей и силовых полупроводниковых приборах, а также степень их влияния на функциональные характеристики приборов в настоящее время не определены. Также недостаточно адекватных физических моделей образования дефектов в полупроводниковых структурах приборов, подверженных постоянному влиянию знакопеременных механических и электрических нагрузок, а также случайных воздействий, возникающих в процессе эксплуатации. В работе [6] рассмотрены проблемы надежности электронных компонентов, используемых в космической отрасли. Установлено, что одной из важнейших причин отказов являются дефекты кристаллов, на базе которых производятся электронные системы.

Ниже представлены результаты исследования влияния дефектов, формируемых в структурах приборов, работающих в автомобильной технике. Результаты этого исследования позволяют дополнить имеющиеся данные [7—20] и установить некоторые базовые закономерности отказов приборов в реальных условиях эксплуатации.

Автомобильная и силовая электроника — это одна из самых инновационных и динамичных областей современного производства электронных компонентов. Электронные системы современных автомобилей включают системы безопасности, комфорта, электронного дистанционного контроля, освещения, управления двигателем и коробкой передач, информационно-развлекательные системы, навигацию, системы эффективности использования энергии, цифровые дисплеи и т. п.

Одним из наиболее важных элементов автомобильных систем является регулятор напряжения. Регулятор напряжения — часть генераторной установки, предназначенная для стабилизации на-

пряжения как важнейшего фактора отказоустойчивости и безопасности автомобиля.

Регулятор поддерживает напряжение бортовой сети в заданных пределах во всех режимах работы при изменении частоты вращения ротора генератора, электрической нагрузки, температуры окружающей среды.

Кроме того, он может выполнять дополнительные функции — защищать элементы генераторной установки в аварийных режимах и перегрузках, автоматически включать в бортовую сеть цепь обмотки возбуждения или систему сигнализации аварийной работы генераторной установки [15].

В работе [20] приведено подробное описание принципов работы реле и регуляторов напряжения. Необходимо отметить, что современный регулятор напряжения является твердотельным полупроводниковым прибором, а по классификации попадает в группу силовой электроники.

Цель работы — определение причин возникновения отказов полупроводниковых структур автомобильных интегральных регуляторов напряжения в реальных условиях эксплуатации. Для исследований была использована математическая модель из современного пакета Comsol Multiphysics.

Моделирование величины упругих напряжений в структурах датчиков и регуляторов

На основе анализа экспериментальных данных, полученных в наших исследованиях [12—16] и литературных источников [17—20] было сделано предположение о возможной причине изменения параметров интегральных регуляторов напряжения вследствие возникновения дефектов кристаллической структуры полупроводникового материала. С целью проверки данной гипотезы был проведен расчет величины упругих напряжений в полупроводниковых структурах регулятора напряжения (рис. 1).

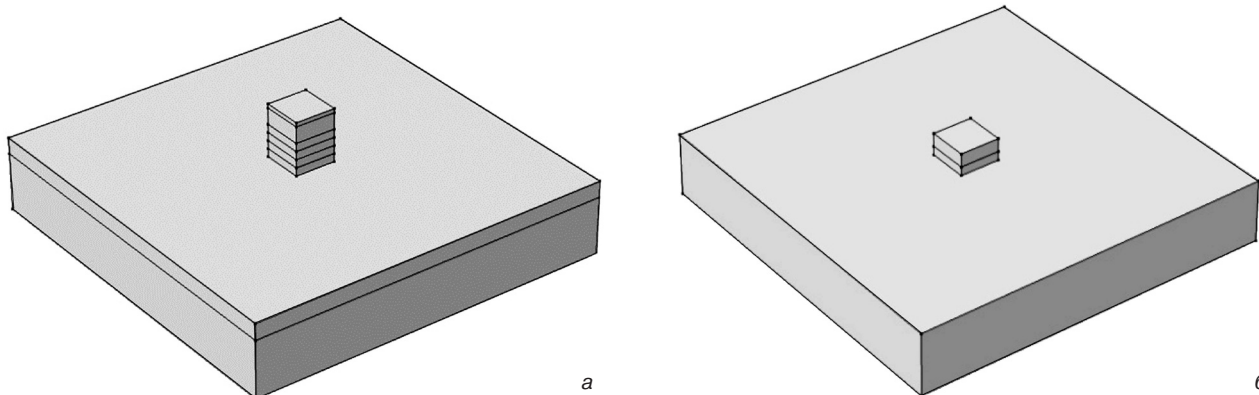


Рис. 1. Структура конструкции прибора:

а — конструкция (интегрального восьмислойного); б — упрощенная модель интегрального регулятора напряжения

Fig. 1. The structure of the device:

(a) dconstruction (integral eight-layer); (b) simplified model of an integral voltage regulator

Таблица 1

Параметры слоев интегрального измерительного восьмислойного регулятора напряжения
 [Layer parameters of the integrated measuring eight-layer voltage regulator]

Параметр	Номер слоя							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Материалы	Сталь10	Ni	Sn ₆₃ Pb ₃₇	Ag	Ni	Ti	Si	SiO ₂
Толщина, мкм	2000	9000	1000	400	3000	100	4000	6000
Модуль Юнга, Н/м ²	200	210	40	80	210	112	109	69
Коэффициент Пуассона	0,3	0,28	0,37	0,367	0,28	0,32	0,266	0,17
Плотность, кг/м ³	7800	8800	8400	10500	8800	4510	2330	2600
КТР, К ⁻¹	11,5	14	23,3	19,5	14	8,15	5,1	5,85
КТР — коэффициент термического расширения.								

Для исследования была предложена математическая модель, описывающая поведение полупроводникового элемента реального регулятора напряжения автомобиля. Структура конструкции реального прибора показана на рис. 1, а. Параметры слоев приведены в табл. 1.

Поскольку исходная структура содержит слои, толщины которых различаются на порядки, а влияние тонких слоев пренебрежимо мало на систему в целом, то она была упрощена без потери информативности по методике, описанной в работе [18] (рис. 1, б). Параметры слоев упрощенной структуры приведены в табл. 2.

Рассмотрим регулятор напряжения, сформированный на трехслойной квадратной пластине размером 0,045 × 0,045 м² (см. рис. 1, б, что соответствует размерам реального регулятора. Физико-механические характеристики слоев характеризуются параметрами: E_k — модуль упругости; ν_k — коэффициент Пуассона; α_k — температурный

коэффициент линейного расширения (**ТКЛР**); T_k — температура; h_k — толщина k -го слоя; k — номер слоя ($k = 1, 2, 3$).

Для расчетов была выбрана наиболее часто используемая модель

$$\sigma_{\text{терм.}} = E(\alpha_{\text{пл.}} - \alpha_{\text{подл.}})\Delta T. \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{пл.}}$, $\alpha_{\text{подл.}}$ — температурные коэффициенты расширения пленки и подложки соответственно; ΔT — разница температур; E — модуль Юнга пленки.

В программном пакете COMSOL Multiphysics определение величины упругих напряжений производится с использованием уравнения

$$0 = \nabla \times S + F_v, \quad (2)$$

где ∇ — дивергенция; S — тензор напряжений; F_v — внешние объемные силы.

В качестве варьируемого параметра модели была принята температура.

Методика расчетов. В процессе эксплуатации регуляторов напряжения, его составляющие слои подвергаются температурному воздействию и могут нагреваться до температур, значения которых приведены ниже. Из-за воздействия температуры и различных температурных коэффициентов расширения материалов регулятора, его элементы подвергаются воздействию упругих механических напряжений. Поэтому для их расчетов в качестве параметров модели были использованы температуры, до которых нагреваются слои.

Номер слоя	Температура, К
1	523,15
2	293,15
3	233,15

Таблица 2

Параметры слоев интегрального регулятора напряжения

[The parameters of the layers of the integrated voltage regulator]

Параметр	Номер слоя		
	1	2	3
Материалы	Сталь10	Sn ₆₃ Pb ₃₇	Si
Толщина, мкм	2000	100	500
Модуль Юнга, Н/м ²	200	40	109
Коэффициент Пуассона	0,3	0,37	0,266
Плотность, кг/м ³	7800	8400	2330
КТР, К ⁻¹	11,5	23,3	5,1

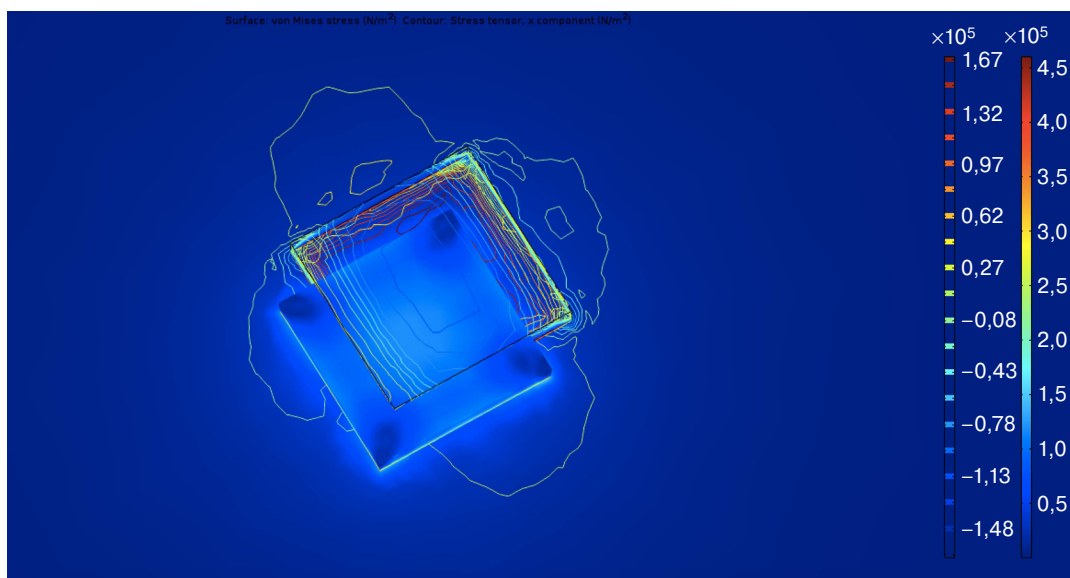


Рис. 2. Результаты расчетов упругих напряжений в полупроводниковой структуре, припое и основании регулятора напряжения
Fig. 2. The results of calculating elastic stresses in a semiconductor structure, solder and the base of the voltage regulator

Физико-химические свойства материалов соответствовали структуре прибора, отображенной в табл. 2 и задавались разделе Materials (Материалы) программного пакета COMSOL Multiphysics.

Результаты моделирования и их обсуждение

Результаты расчетов упругих напряжений в структуре, припаянной к основанию, (см. рис. 1, б) представлены на рис. 2—5.

На рис. 2 показано распределение упругих напряжений в полупроводниковой структуре в трехмерной проекции, припое и основании регулятора напряжения.

Приведенные на рис. 2 поля упругих напряжений, в свою очередь, приводили к деформации материалов элементов, составляющих регулятор (рис. 3).

Для наиболее точного определения областей с максимальными упругими напряжениями были построены диаграммы (рис. 4 и 5), демонстрирующие наиболее критические зоны.

В результате расчетов установлено, что упругие напряжения в активном элементе регулятора распределялись неравномерно и достигали максимума на краях кристалла. Постоянное воздействие упругих напряжений, превышавших критическое значение образования дислокаций, приводило к деградации материала, а знакопеременные нагрузки (термоциклы) усугубляли этот процесс, что было подтверждено в работе [14].

Таким образом, в результате моделирования установлено, что возникающие в процессе функционирования полупроводниковых структур регу-

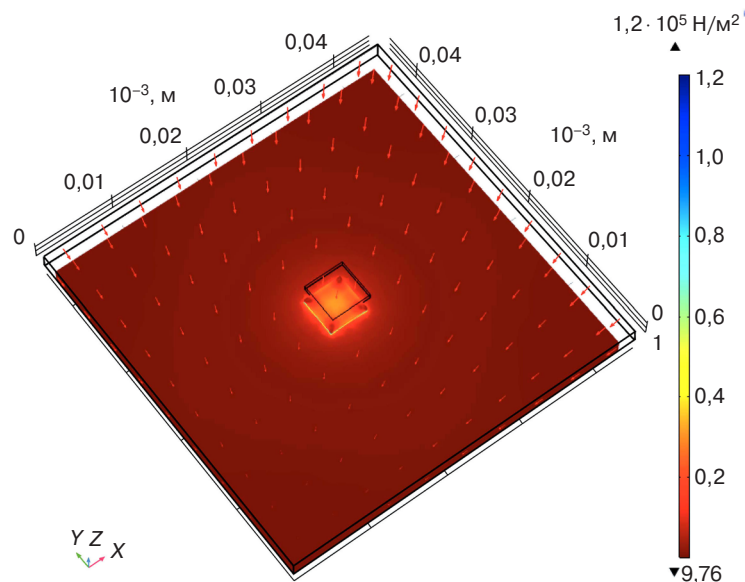


Рис. 3. Распределение упругих напряжений в полупроводниковой структуре, припое и основании

Fig. 3. Distribution of elastic stresses in the semiconductor structure, solder and base

лятора термоупругие напряжения в регуляторах данного типа могут вызывать изменение структуры полупроводникового прибора. Для подтверждения этого вывода, основанного на результатах модельных исследований, были изучены чувствительные элементы интегральных регуляторов напряжения, проработавших в условиях реальной эксплуатации автомобилей.

Экспериментальное исследование формирования дислокационной структуры в упругих элементах регулятора напряжения

Методика исследования. Для изучения были взяты образцы реальных интегральных регулято-

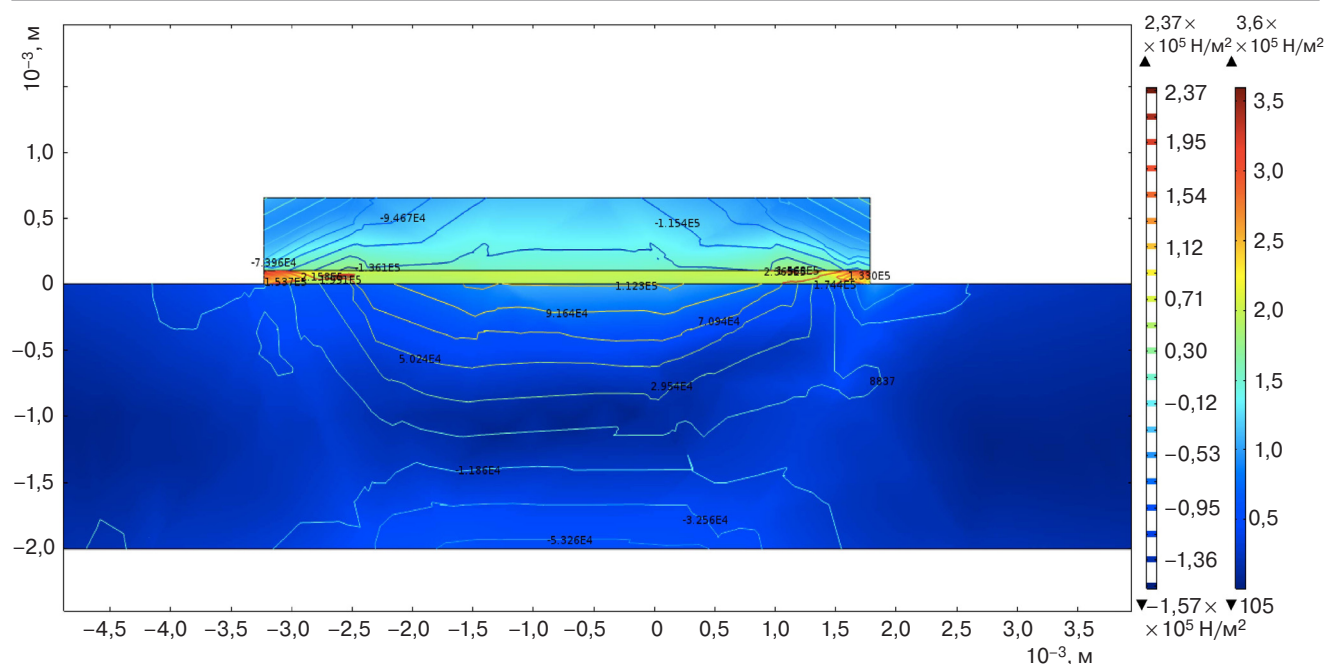


Рис. 4. Распределение упругих напряжений в плоскости YZ

Fig. 4. Distribution of elastic stresses in the YZ plane

ров напряжения с восьмислойной структурой. Методом металлографии были исследованы следующие элементы:

- прошедшие двукратные ресурсные испытания (наработка 2);
- прошедшие однократные ресурсные испытания (наработка 1);
- не подвергавшиеся испытаниям.

Для выявления дефектов на поверхности микроструктур использовали селективное травление. В качестве травителя применяли раствор на основе CrO_3 . Количество и характер распределения дефектов, выявляемых этим травителем, определяли на исследовательском металлографическом микроскопе марки «Е» при увеличении $\times 200$ и $\times 500$. Погрешность при измерении составляла $\pm 50\%$.

Результаты и их обсуждение. Характер распределения дислокаций после проведения испытаний показан на рис. 6. Для элементов, не подвергавшихся испытаниям, свойственно отсутствие ямок травления и на рис. 6 он не приведен. Значения плотности дислокаций для каждого вида приборов приведены ниже.

Прибор	Плотность дислокаций, см^{-2}
Исходный кремний	$\ll 10^2$
До наработки	$< 10^2$
Наработка 1	$< 10^5$
Наработка 2	$\leq 10^6$

Из рис. 6 и данных, приведенных выше, видно, что с увеличением времени наработки происходит увеличение плотности дислокаций от исходной

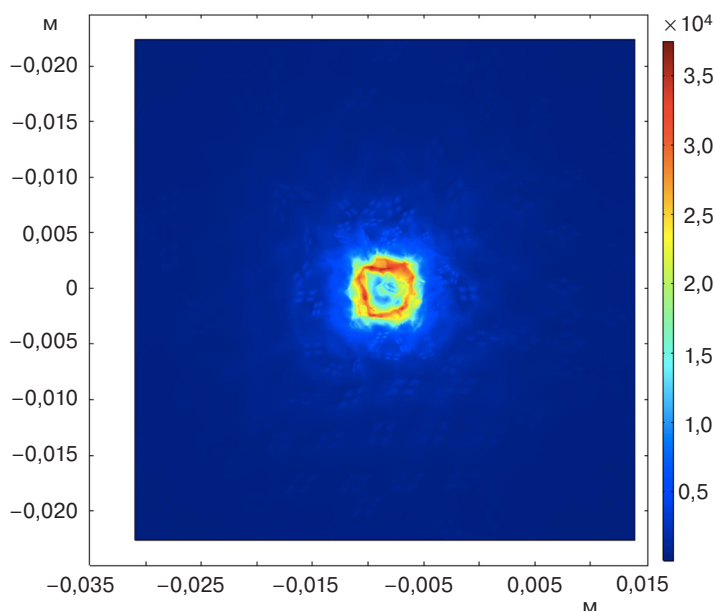


Рис. 5. Распределение упругих напряжений в плоскости XY полупроводникового кристалла

Fig. 5. Distribution of elastic stresses in the XY plane of a semiconductor crystal

плотности 10^2 см^{-2} до более, чем 10^6 см^{-2} . Характер распределения дислокаций коррелирует с результатами модельного расчета.

Полученные результаты сравнения модельных расчетов и натурных измерений плотности дислокаций позволяют говорить о корреляции между изменением параметров приборов и увеличением плотности дислокаций. Так же они доказывают справедливость сделанных ранее предположений и верность физической модели деградации, предложенной в предыдущих работах [12—16].

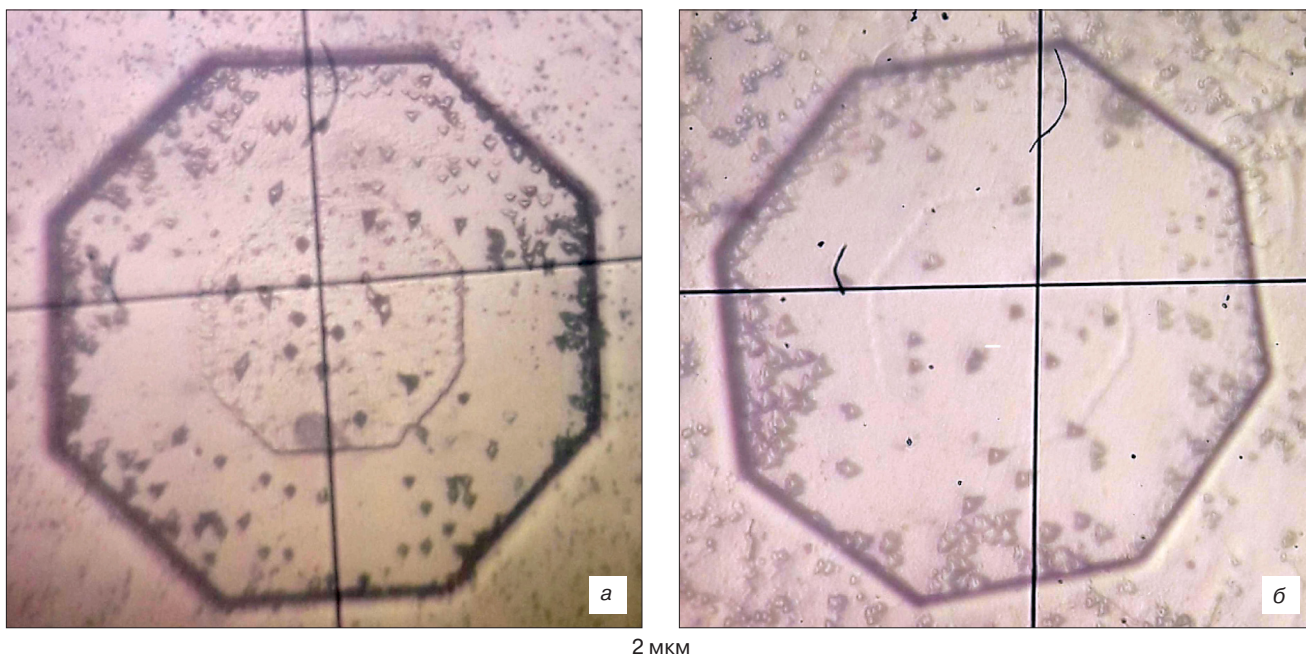


Рис. 6. Характер распределения дислокаций:
а — образец прошедший 26 тыс. ч наработки (наработка 2); б — образец прошедший 13 тыс. ч наработки (наработка 1)

Fig. 6. The nature of the distribution of dislocations:
(a) sample that has passed 26 thousand hours of operating time (operating time 2); (b) sample that has passed 13 thousand hours of operating time (operating time 1)

Закключение

Установлено, что в процессе эксплуатации и наработки образцов изделий автомобильной электроники наблюдается увеличение плотности дислокаций в микроэлектромеханических и электронных структурах, подверженных знакопеременным электрическим или механическим нагрузкам: от бездислокационного состояния до плотности дислокаций, превышающей 10^5 – 10^6 см $^{-2}$. Это неизбежно приводило к изменениям электрических параметров приборов. Для повышения надежности работы таких приборов следует предусматривать средства их термостатирования, предотвращающие возможность изменения структуры регуляторов при изменении температуры их эксплуатации.

Библиографический список

1. Bai H., Pekarek S., Tichenor J., Eversman W., Buening D., Holbrook G., Hull M., Krefta R., Shields S. Analytical derivation of a coupled circuit model of a claw-pole alternator with concentrated stator windings // *IEEE Trans. Energ. Convers.* 2002. V. 17, Iss. 1. P. 32—38. DOI: 10.1109/60.986434
2. Zhang Y., Rajagopalan S., Salman M. A practical approach for belt slip detection in automotive electric power generation and storage system // *Aerosp. Conf. Big Sky (MT, USA): IEEE*, 2010. DOI: 10.1109/AERO.2010.5446832
3. Caliskan V. Modeling and simulation of a claw-pole alternator: Detailed and average models. Tech. Rep. 00-009. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for Electromagnetic and Electronic Systems, 2000.
4. Ruf F., Barthels A., Walla G., Winter M., Kohler T. P., Michel H.-U., Froeschl J., Herzog H.-G. Autonomous load shutdown mechanism as a voltage stabilization method in automotive power nets // *Vehicle Power and Propulsion Conference*. Seoul: IEEE, 2012. P. 1261—1265. DOI: 10.1109/VPPEC.2012.6422712

5. Scacchioli A., Rizzoni G., Pisu P. Model-based fault diagnosis design for an electrical automotive system // *Proc. Int. Mech. Eng. Congr. Expo (ASME 2006)*. Chicago (IL, USA), 2006. P. 315—324. DOI: 10.1115/IMECE2006-14504
6. Абгарян К. К., Харченко В. В. Типовая модель гетеро-структуры для СВЧ-устройств. Известия вузов. Материалы электронной техники. 2016. Т. 19, № 1. С. 43—49. DOI: 10.17073/1609-3577-2016-1-43-49
7. Абгарян К. К. Применение оптимизационных методов для проектирования многослойных полупроводниковых наносистем // *Труды Института системного анализа Российской академии наук. Динамика неоднородных систем*. 2010. Т. 53, № 3. С. 6—9.
8. Харченко В. А. Проблемы надежности электронных компонентов. Известия вузов. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18, № 1. С. 52—57. DOI: 10.17073/1609-3577-2015-1-52-57
9. Петухов Б. В. Влияние динамического старения дислокаций на деформационное поведение примесных полупроводников // *Физика и техника полупроводников*. 2002. Т. 36, Вып. 2. С. 129—133.
10. Власов Н. М., Зазноба В. А. Влияние атомов примеси на процесс размножения краевых дислокаций // *Журнал технической физики*. 2001. Т. 71, Вып. 1. С. 53—56. URL: journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/38691
11. Петухов Б. В. Статистическая теория движения дислокаций при наличии спонтанных процессов блокирования — деблокирования // *Физика твердого тела*. 2001. Т. 43, Вып. 5. С. 813—817.
12. Глотова О. Н., Адарчин С. А. Влияние качества тонких пленок на надежность интегральных микросхем // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2016. Т. 21, № 5. С. 3—7.
13. Адарчин С. А., Бережанский В. Р., Косушкин В. Г., Кожитов Л. В., Червяков Л. М. Дислокации, как один из факторов, определяющих параметрическую надежность полупроводниковых датчиков физических величин // *Труды XIII Международной конференции «Технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов»*. Курск, 2016. С. 106—114.
14. Адарчин С. А., Бережанский В. Р., Косушкин В. Г., Кожитов Л. В., Червяков Л. М. Влияние механических напряжений на электрофизические свойства микроэлектромеханических датчиков давления // *Труды XIII Международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов»*. Курск, 2016. С. 127—132.

15. Адарчин С. А., Бережанский В. Р., Косушкин В. Г. Особенности деградации чувствительных элементов датчиков // Сб. трудов XXXV Всероссийской научно-технической конференции «Проблемы эффективности и безопасности функционирования сложных технических и информационных систем». Ч. 6. Серпухов: Военная акад. РВСН им. Петра Великого (фил. в г. Серпухове Московской обл.), 2016. С. 125—129.

16. Адарчин С. А., Косушкин В. Г., Бережанский И. Р., Кулагина Н. С., Емельянов С. Г., Кожитов Л. В. Формирование наноразмерных дефектов в упругих элементах полупроводниковых датчиков давления // Сб. научн. статей 3-й Международной научно-практической конференции «Физика и технология наноматериалов и структур». В 2-х т. Курск: ЗАО «Университетская книга», 2017. С. 170—174.

17. Шияев И. А., Белоножкин П. А., Алешин А. Е. Моделирование механических напряжений в структурах Ge/Si // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. 2014. № 1–2. С. 116—121.

18. Кравченко Н. И. Математическая модель образования погрешностей обработки плоских поверхностей, вызываемых упругими деформациями технологической системы // Машиностроение и компьютерные технологии. 2018. № 9. С. 1—14.

19. Шестеркин А. Н. Система моделирования и исследования радиоэлектронных устройств Multisim 10. М.: ДМК Пресс, 2012. 360 с.

20. Горохов Д. А. Моделирование регулятора напряжения автомобильной генераторной установки // Научные труды Кубанского государственного технологического университета. 2017. № 3. С. 57—62.

Статья поступила в редакцию 11 мая 2020 г.

Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = *Materials of Electronics Engineering*. 2020, vol. 23, no. 2, pp. 134—141.
DOI: 10.17073/1609-3577-2020-2-134-141

Stresses modeling in multilayer semiconductor structures of automobile regulators and predicting the reliability of their operation

S. A. Adarchin¹, V. G. Kosushkin^{1,§}, V. M. Gurin², L. V. Kozhitov³,
M. S. Vasyutin², V. G. Bybenin⁴

¹ *Federal State Budgetary Educational Institution
of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University» (Kaluga Branch),
2 Bazhenov Str., Kaluga 248035, Russia*

² *Fokon LLC,
73 Grabtsevskeye shosse, Kaluga 248035, Russia*

³ *National University of Science and Technology MISiS,
4 Leninsky Prospekt, Moscow 119049, Russia*

⁴ *Moscow Polytechnic University,
38 Bolshaya Semyonovskaya Str., Moscow 107023, Russia*

Abstract. The problems of increasing the reliability of microelectromechanical systems are considered on the example of an automobile voltage regulator. A model of the process is proposed and a study of the effect of temperature on the formation of stress fields in semiconductor structures of active elements of the controller is carried out. The studies assumed of a possible reason for the change in the parameters of the regulator due to the appearance of defects in the crystal structure of the semiconductor material in the structures of integrated voltage regulators. For the study, a mathematical model was proposed that describes the behavior of a semiconductor element of a real car voltage regulator. It was found that the distribution of stresses in the structures is uneven and the maximum value of stresses reaches the edges. An increase in temperature gradients in the structures of regulators leads to the formation of dislocations that change the electrical characteristics of devices. As a result of modeling, it has been established that thermoelastic stresses arising in the process of manufacturing and functioning of semiconductor structures of a regulator in regulators of this type can cause a change in the structure of a semiconductor device due to relaxation of elastic stresses at dislocations. in cars. Measures are proposed, including thermostating of the sensitive elements of microelectromechanical structures, which will increase their service life.

Keywords: reliability, electronic regulators, modeling

References

1. Bai H., Pekarek S., Tichenor J., Eversman W., Buening D., Holbrook G., Hull M., Krefta R., Shields S. Analytical derivation of a coupled-circuit model of a claw-pole alternator with concentrated stator windings. *IEEE Trans. Energ. Convers.*, 2002, vol. 17, no. 1, pp. 32—38. DOI: 10.1109/60.986434

2. Zhang Y., Rajagopalan S., Salman M. A practical approach for belt-slip detection in automotive electric power generation and storage system. *Aerosp. Conf. Big Sky (MT, USA): IEEE*, 2010. DOI: 10.1109/AERO.2010.5446832

3. Caliskan V. Modeling and simulation of a claw-pole alternator: Detailed and average models. Tech. Rep. 00–009. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, Laboratory for Electromagnetic and Electronic Systems, 2000.

Information about authors:

Sergey A. Adarchin¹: Associate Professor (adarchin@rambler.ru); **Victor G. Kosushkin**^{1,§}: Professor (vic_kos@mail.ru); **Vitaly M. Gurin**²: Engineer–Technologist (vitaly.gurin918@yandex.ru); **Lev V. Kozhitov**³: Dr. Sci. (Eng.), Professor (kozhitov@rambler.ru); **Maxim S. Vasyutin**²: General Director (maksim.vasyutin@gmail.com); **Vyacheslav G. Bybenin**⁴: Professor.

§ Corresponding author

4. Ruf F., Barthels A., Walla G., Winter M., Kohler T. P., Michel H.-U., Froeschl J., Herzog H.-G. Autonomous load shutdown mechanism as a voltage stabilization method in automotive power nets. *Vehicle Power and Propulsion Conference*. Seoul: IEEE, 2012, pp. 1261—1265. DOI: 10.1109/VPPC.2012.6422712
5. Scacchioli A., Rizzoni G., Pisu P. Model-based fault diagnosis design for an electrical automotive system. *Proc. Int. Mech. Eng. Congr. Expo (ASME 2006)*. Chicago (IL, USA), 2006, pp. 315—324. DOI: 10.1115/IMECE2006-14504
6. Abgaryan K. K., Kharchenko V. A. standard model heterostructures for microwave devices. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2016, vol. 19, no. 1, pp. 43—49. (In Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2016-1-43-49
7. Abgaryan K. K. Application of optimization methods for modelling of semiconductor film nanosystems. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiiskoi akademii nauk. Dinamika neodnorodnykh system*, 2010, vol. 53, no. 3, pp. 6—9.
8. Kharchenko V. A. Problems of reliability of electronic components. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 52—57. (In Russ.). DOI: 10.17073/1609-3577-2015-1-52-57
9. Petukhov B. V. Effect of dynamic aging of dislocations on the deformation behavior of extrinsic semiconductors. *Semiconductors*, 2002, vol. 36, no. 2, pp. 121—125. DOI: 10.1134/1.1453422
10. Vlasov N. M., Zaznoba V. A. Influence of impurity atoms on the process of multiplication of edge dislocations. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Journal of technical physics*, 2001, vol. 71, no. 1, pp. 53—56. (In Russ.). URL: journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/38691
11. Petukhov B. V. The statistical theory of dislocation motion in spontaneous locking–unlocking processes. *Physics of the Solid State*, 2001, vol. 43, no. 5, pp. 845—849. DOI: 10.1134/1.1371363
12. Glotova O. N., Adarchin S. A. Influence of quality thin dielectric films on the reliability of integrated circuits. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy*, 2016, vol. 21, no. 5, pp. 3—7. (In Russ.)
13. Adarchin S. A., Berezhansky B. R., Kosushkin V. G., Kozhitov L. V., Chervyakov L. M. Dislocations as one of the factors determining the parametric reliability of semiconductor sensors of physical quantities. *Trudy XIII Mezhdunarodnoi konferentsii «Tekhnologii, oborudovanie i analiticheskie sistemy dlya materialovedeniya i nanomaterialov» = Proc. XIII International conference “Technologies, equipment and analytical systems for materials science and nanomaterials”*. Kursk, 2016, pp. 106—114. (In Russ.)
14. Adarchin S. A., Berezhansky B. R., Kosushkin V. G., Kozhitov L. V., Chervyakov L. M. Effect of mechanical stresses on the electrophysical properties of microelectromechanical pressure sensors. *Trudy XIII Mezhdunarodnoi konferentsii “Perspektivnye tekhnologii, oborudovanie i analiticheskie sistemy dlya materialovedeniya i nanomaterialov” = Proc. XIII International Conference “Advanced Technologies, equipment and analytical systems for materials science and nanomaterials”*. Kursk, 2016, pp. 127—132. (In Russ.)
15. Adarchin S. A., Berezhansky B. R., Kosushkin V. G. Features of degradation of sensitive elements of sensors. *Sb. trudov XXXV Vserossiiskoi nauchno–tekhnicheskoi konferentsii «Problemy effektivnosti i bezopasnosti funktsionirovaniya slozhnykh tekhnicheskikh i informatsionnykh sistem» = Proceedings of the XXXV All–Russian Scientific and Technical Conference “Problems of the efficiency and safety of functioning of complex technical and information systems”*. Pt 6. Serpukhov: Voennaya akad. RVSN im. Petra Velikogo, 2016, pp. 125—129. (In Russ.)
16. Adarchin S. A., Kosushkin V. G., Berezhansky B. R., Kulagina N. S., Emelyanov S. G., Kozhitov L. V. Formation of nanoscale defects in elastic elements of semiconductor pressure sensors. *Sb. nauchn. statei 3–i Mezhdunarodnoi nauchno–prakticheskoi konferentsii «Fizika i tekhnologiya nanomaterialov i struktur» = Sci. Art. 3rd International Scientific and Practical Conference “Physics and Technology of Nanomaterials and Structures”*. Kursk: ZAO “Universitetskaya kniga”, 2017, pp. 170—174. (In Russ.)
17. Shilyaev P. A., Belonozhkin P. A., Aleshin A. E. Simulation of mechanical strains in Ge/Si heterostructures. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2014, no. 1–2, pp. 116—121. (In Russ.)
18. Kravchenko I. I. Mathematical model of flat surface machining inaccuracies due to elastic strains of technological system. *Mashinostroenie i kompyuternye tekhnologii*, 2018, no. 9, pp. 1—14. (In Russ.)
19. Shesterkin A. N. *Sistema modelirovaniya i issledovaniya radioelektronnykh ustroystv Multisim 10* [System of modeling and research of radioelectronic devices Multisim 10. Moscow: DMK Press, 2012. 360 p. (In Russ.)
20. Gorokhov D. A. Modeling of the voltage regulator of automobile generator set. *Scientific works of the Kuban State Technological University*, 2017, no. 3, pp. 57—62. (In Russ.)

Received May 15, 2020