

ЗАХИРИДДИН  
МУҲАММАД БОБУР  
НОМИДАГИ АНДИЖОН  
ДАВЛАТ УНИВЕРСИТЕТИ

ANDIJAN STATE  
UNIVERSITY NAMED  
AFTER ZAKHIRIDDIN  
MUKHAMMAD BABUR

# ИЛМИЙ ХАБАРНОМА

Физика-математика  
Тадқиқотлари  
(Махсус сон)

# SCIENTIFIC BULLETIN

Physical and  
Mathematical Research  
(Special Issue)

Андижон  
2023 йил

**Муассис**

Захириддин Мухаммад Бобур номидаги Андижон давлат университети

**ИЛМИЙ ХАБАРНОМА.  
ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА  
ТАДҚИҚОТЛАРИ**

Журнал бир йилда 2 марта чоп этилади.

Андижон вилояти ахборот ва оммавий коммуникациялар бошқармаси  
томонидан 2019-йил 26 декабрда  
0452 рақам билан рўйхатга олинган.

Нашр индекси: 344

Нашр учун масъул:  
А.Й.Бобоев

Босишга рухсат этилди:

27.12.2019.

Қоғоз бичими: 60x81 1/8

Босма табоғи: 13,5

Офсет босма. Офсет қоғози.

Адади: 110 дона.

Баҳоси келишилган нарҳда.

Буюртъа №: 165.

“Мухаррир” нашриёти манбаа бўлимида чоп этилди.

Тошкент шаҳри, Сўгалли ота кўчаси 7-уй

**Таҳририят манзили:**

170100, Андижон шаҳри, Университет кўчаси, 129. Телефон: +998911602043.

Факс: (374) 223-88-30

E-mail: [adu\\_xabarnoma@mail.ru](mailto:adu_xabarnoma@mail.ru) Расмий сайт: [uzjournals.edu.uz/adu](http://uzjournals.edu.uz/adu)

**Сборник статей международной научно-практической конференции по  
«Полупроводниковая опто- и наноэлектроника, альтернативные  
источники энергии и их перспективы» Андижан, 12-13 октября 2023 года**

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

<b>С.З. ЗАЙНАБИДИНОВ, А.Й. БОБОЕВ, Б.М. ЭРГАШЕВ</b> Механизмы формирования квантово-размерных нанообъектов в многокомпонентных структурах GaAs/Ge/ZnSe и GaAs/Si/ZnSe.....	7
<b>М.Х. АШУРОВ, Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР, С.Х. СУЛЕЙМАНОВ, С.Е. МАКСИМОВ, З.И. КАРИМОВ, Н.Н. НИКИФОРОВА, Ф.А. ИСКАНДАРОВА</b> Современные аспекты радиационной деградации твердых тел и биообъектов.....	10
<b>М.Т. НОРМУРАДОВ, Е.Н. ВЛАСОВА, К.Т. ДОВРАНОВ, Д.А. НОРМУРОДОВ, Х.Т. ДАВРАНОВ</b> Измерение оптических параметров, диэлектрических материалов, созданных низкоэнергетическим ионно-плазменным методом.....	15
<b>Е.С. РЕМБЕЗА, Т.В. СВИСТОВА, Н.Н. КОШЕЛЕВА, М.Б. РАСУЛОВА</b> Гетероструктуры металлооксид-кремний, как перспективные структуры для создания солнечных элементов.....	24
<b>О.О. МАМАТКАРИМОВ, В.Х. QUHQAROV, М.А. ERGASHEV, А.А. XOLMIRZAYEV</b> Yarimo'tkazgich moddalariga asoslangan konvertorlarni ishlab chiqishda va uning asl parametrlarini saqlanishini o'rganish xossalari.....	28
<b>S.Z. ZAINABIDINOV, H.J. MANSUROV, N.YU. YUNUSALIEV</b> Photoelectric Properties of n-ZnO/p-Si Heterostructures.....	34
<b>Х.Б. АШУРОВ, А.А. ЗАРИПОВ, А.А. РАХИМОВ, У.Ф. БЕРИДЕВ, И.Ж. АБДИСАИДОВ, М.М. АДИЛОВ</b> Методы синтеза никелевого нанокатализатора для получения углеродных нанотрубок.....	39
<b>Н.Ф. ЗИКРИЛЛАЕВ, М.М. ШОАБДУРАХИМОВА</b> Особенности автоколебаний тока в компенсированном кремнии и их применение в электронике.....	46
<b>Ш.Б. УТАМУРАДОВА, Ж.Ж. ХАМДАМОВ, В.Ф. ГРЕМЕНОК, К.А. ИСМАЙЛОВ, Х.Ж. МАТЧОНОВ, Х.Ю. УТЕМУРАТОВА</b> Комбинационное рассеяние света в монокристаллическом Si, легированного атомами Gd.....	54
<b>N.N. ABDURAZAKOV, R. ALIEV</b> Power load forecasting using linear regression method of machine learning: Andijan regional case.....	58
<b>И. Н. КАРИМОВ, М. ФОЗИЛЖОНОВ, А.Э. АБДИКАРИМОВ</b> Вольт-фарадные характеристики SOI FINFET структуры.....	63
<b>О.А. АБДУЛХАЕВ, А.З. РАХМАТОВ</b> Низковольтные ограничители напряжения на основе структур с эффектом смыкания.....	67
<b>SH.X. YO'LCHIYEV, B.D. G'ULOMOV, J.A. O'RINBOYEV</b> ZnO va ZnO:Al yuqqa plyonkalarini sintez qilish va ularni fizik xossalari o'rganish.....	75
<b>Ш.Т. ХОЖИЕВ, С.Ф. КОВАЛЕНКО, С.Е. МАКСИМОВ, В.М. РОТШТЕЙН, О.Ф. ТУКФАТУЛЛИН, Б.Л. ОКСЕНГЕНДЛЕР, Ш.К. КУЧКАНОВ</b> Кластеры $Y_n^+$ и $Y_nO_m^+$ , распыленные ионной бомбардировкой: эксперимент и теоретические аспекты.....	79

<b>M. RASULOVA</b>	
Application of Solution of the Quantum Kinetic Equations for Renewable Energy problem.....	85
<b>A.A.МИРЗААЛИМОВ, Р.АЛИЕВ, Н.А.МИРЗААЛИМОВ</b>	
разработка высокоэффективных и ресурсосберегающих конструкций кремниевых высоковольтных фотоэлектрических устройств.....	89
<b>D.G' KHAJIBAEV, B.Ya. YAVIDOV</b>	
On correlation of $T_c$ and Cu-O <sub>apex</sub> distance in single layered cuprates.....	97
<b>A. АБДУЛВАХИДОВ, С.ОТАЖОНОВ, Р.ЭРГАШЕВ</b>	
Фоточувствительность солнечных элементов гетероструктуры p CdTe – n CdS и p CdTe – n CdSe с глубокими примесными уровнями.....	102
<b>М.К. КУРБАНОВ, К.У. ОТАБАЕВА, Д.У. ХУДОЙНАЗАРОВА</b>	
Распыление пленок льда при бомбардировке ионами Ag+.....	107
<b>H.O. QO'CHQAROV S.B. FAZLIDDINOV B.B.BURXONJANOV</b>	
Simmetrik bo'lgan silikon diodning statik parametrlarini hisoblash p-n-uch nuqtali zaryadlangan nuqsonlarning $\delta$ -qatlami o'tish.....	113
<b>N.Yu. SHARIBAYEV, B.M. BAXROMOV R.M. JALALOV A.A. YUSUFJONOV</b>	
Study of electrophysical properties of semiconductor materials based on lead-selenium.....	120
<b>Ш.К.КУЧКАНОВ, Х.Б.АШУРОВ, Б.М.АБДУРАХМАНОВ, С.Е.МАКСИМОВ, О. Э. КИМИЗБАЕВА, Ш.А.МАХМУДОВ</b>	
О роли структурных дефектов в процессах генерации при нагреве эдс и носителей заряда в эпитаксиальных плёночных кремниевых p-n-структурах.....	125
<b>S.Z. ZAYNABIDINOV, I.M. SOLIYEV, SH.K. AKBAROV</b>	
Kremniy monokristallarida elektro noaktiv nikel va kislorod atomlarining o'zaro tasirlashuvi.	128
<b>M.A.MUYDINOVA, G.J. MAMATOVA</b>	
Yarimo'tkazgich plastinalar sirti va p-n strukturalarning optik xususiyatlari va ularni takomillashtirish usullari.....	132
<b>L.O.OLIMOV, I.I. ANARBOYEV</b>	
Kremniy granulari asosida termoelektrik material samaradorligini oshirish mexanizimi.....	136

## Особенности автоколебаний тока в компенсированном кремнии и их применение в электронике

**Н.Ф.Зикриллаев, М.М.Шоабдурахимова**

Ташкентский государственный технический университет имени И. Каримова, Узбекистан, 100095, Ташкент, ул. Университетская, 2.

**Аннотация:** Показано, что на основе полученных результатов можно создать принципиально новый класс датчиков физических величин, чувствительность которых значительно больше, чем у существующих. Определено, что созданные твердотельные генераторы на основе автоколебаний тока могут работать как многофункциональные универсальные датчики внешних воздействий. Предлагаемый датчик обладает достаточно высокой чувствительностью к различным внешним воздействиям, является многофункциональным и из-за модулированного выходного сигнала по частоте и амплитуде также может работать в дистанционном режиме.

**Ключевые слова:** компенсированный кремний, датчик, твердотельный генератор, автоколебания, частота, амплитуда.

Автоколебания тока наблюдались во многих полупроводниковых материалах и структурах. Однако, эти автоколебания тока были обнаружены в определенных условиях (температуре, освещении, электрическом и магнитном поле и другие) и отсутствовали воспроизводимости наблюдаемых неустойчивостей от электрофизических параметров исследованных материалов.

Литературный анализ показал, что до настоящего времени не были одновременно получены разные типы автоколебаний тока в одном полупроводниковом материале. Поэтому исследования особенностей переходных процессов автоколебаний тока от одного типа к другому вызывает большой интерес с точки зрения изучения и создания физического механизма этих эффектов [1,2]. В прикладном аспекте на основе автоколебаний тока можно создать целый класс приборов для функциональной электроники и принципиально нового поколения датчиков физических величин с амплитудно-частотным выходом, а также твердотельные генераторы, работающие в широком интервале температур  $T=77\div 350$  К [3,4].

Всесторонние и комплексные исследования автоколебательных процессов в компенсированном кремнии показали, что если управлять термодинамическими условиями существования (напряженность электрического поля, освещение, температура и др.), то можно получить несколько видов неустойчивостей тока с различными природами возбуждения в одном и том же материале [5-8].

Установлено, что для наблюдения автоколебаний тока необходимы образования глубоких энергетических уровней в запрещенной зоне кремния. В наших исследованиях были использованы исходные кремнии с различными удельными сопротивлениями и типами проводимости. Для получения компенсированного кремния использовались примесные атомы марганца, цинка, серы или селена (см. в таб.-1).

Диффузионная технология получения компенсированного кремния легированного примесными атомами марганца, цинка, серы или селена подробно описаны в работах [9,10], поэтому нами не было подробно описана технология получения образцов компенсированного кремния для исследований

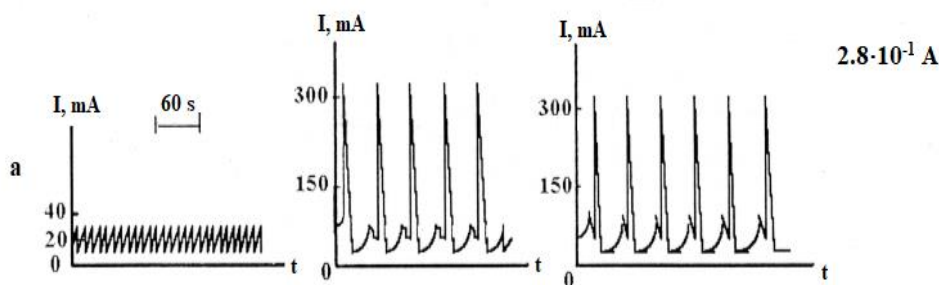
Таблица-1.

№	Марка исходного кремния	Тип примеси	Удельная проводимость и тип проводимости полученных образцов	Энергетические уровни
1.	КДБ-1; КДБ-2; КДБ-10 КЭФ-4,5; КЭФ-40	марганец	$\rho=10^2 \div 10^5 \text{ Ом} \times \text{см}$ р-тип, $\rho=10^3 \div 10^5 \text{ Ом} \times \text{см}$ п-тип	$E_c$ -0,27 эВ донор, $E_c$ -0,5 эВ донор
2.	КЭФ-2; КЭФ-4,5; КЭФ-10; КДБ-1; КДБ-10	цинк	$\rho=10^2 \div 10^5 \text{ Ом} \times \text{см}$ п-тип, $\rho=10^3 \div 10^5 \text{ Ом} \times \text{см}$ р-тип	$E_v$ - 0,31 эВ акцептор, $E_v$ - 0,55 эВ акцептор
3.	КДБ-0,5; КДБ-1; КДБ-10 КЭФ-0,5; КЭФ-60	сера	$\rho=10^2 \div 10^5 \text{ Ом} \times \text{см}$ р-тип, $\rho=10^3 \div 10^5 \text{ Ом} \times \text{см}$ п-тип	$E_c$ - 0,18 эВ донор, $E_c$ - 0,37 эВ донор, $E_c$ - 0,63 эВ донор
4.	КДБ-0,1; КДБ-0,5; КДБ-1; КДБ-100 КЭФ-1; КЭФ-40; КЭФ-60	селен	$\rho=10^2 \div 10^5 \text{ Ом} \times \text{см}$ р-тип, $\rho=10^2 \div 10^5 \text{ Ом} \times \text{см}$ п-тип	$E_c$ - 0,51 эВ донор, $E_c$ - 0,29 эВ донор, $E_c$ - 0,19 эВ в молекулярном состоянии $\text{Se}_2$

Исследования показали, что автоколебания тока в компенсированном кремнии наблюдаются в достаточно широком интервале температуры и изменение термодинамических условий переводит автоколебания тока из одного типа в другой. Установлено, что многие параметры наблюдаемых автоколебаний тока в компенсированном кремнии перекрывают граничные области существования друг друга по температуре, напряженности электрического поля, удельному сопротивлению материала и типа проводимости. В таблице-2 приведены особенности и граничные области существования трех видов автоколебаний тока в обнаруженном и исследованном компенсированном кремнии. Как видно из таблицы-2, в образцах компенсированного кремния, легированного атомами марганца или цинка можно будет наблюдать три вида автоколебаний тока. Это дает возможность создания автоколебательной среды в данном материале и получить широкий спектр формы, частоты и амплитуды автоколебаний тока (рис. 1).

Исследования автоколебаний тока в компенсированном кремнии дали возможность установить особенности переходных процессов автоколебаний тока от одного типа к другому. Хотя, по удельному сопротивлению, типу проводимости и по температурной области существования все эти типы автоколебаний тока перекрывают друг друга, однако при переходе от одного к другому в узком интервале происходит срыв с дальнейшим переходом к

нерегулярным хаотическим колебаниям тока. Дальнейшие изменения внешних воздействий (температуры, напряженности электрического поля, освещения, давления, магнитного поля и др.) приводят к появлению регулярных и воспроизводимых автоколебаний тока. В большинстве случаев в начале цепи возбуждаются квазигармонические автоколебания тока, которые в дальнейшем переходят в другие формы.



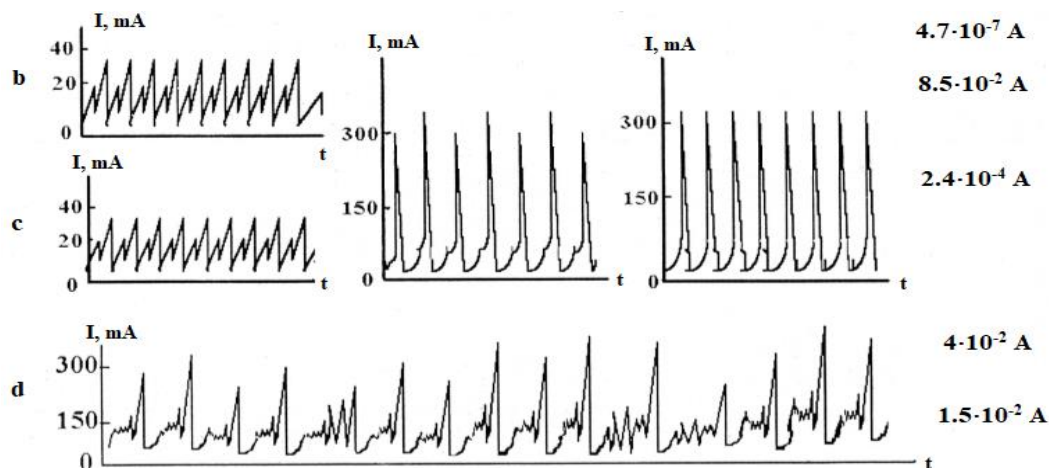


Рис 1. Регулярные и стохастические автоколебания тока в компенсированном кремнии

В компенсированных образцах кремния, легированного примесными атомами серы или селена были обнаружены только два типа автоколебаний тока, поэтому изучение условий возбуждения инжекционных автоколебаний тока на базе компенсированного кремния легированного примесными атомами селена или серы требует дополнительных исследований. Кроме того, в таблице - 2 четко выделены температурные области существования всех трех типов автоколебаний тока, что дает ценную информацию при определении физического механизма и создания модели автоколебаний тока в компенсированном кремнии.

Таблица-2.

№	Виды автоколебаний	Материал	Удельное сопротивление материала $\rho$ , Ом×см	Область температуры Т, К	Пороговая напряженность электрического поля $E_n$ , В/с×м	Монохроматическим и интегральным светом $J_{\text{осв.,лк}}$ , $h\nu$ , Вт/см²×с $\lambda$ , мкм	Максимальное значение амплитуды $I$	Минимальное значение амплитуды $J_{\text{min}}$ , А	Интервал частоты автоколебаний тока $f$ , Гц
1.	Температурно-электрические неустойчивости (ТЭН)	Si<Mn>	$5 \times 10^3 \div 2 \times 10^5$ р-тип $8 \times 10^4 \div 2 \times 10^5$ п-тип	77÷200	150÷200	$J=10^{-3} \div 50 \text{ лк}$ $I_\gamma=10^{-9} \div 10^{-5}$ Вт/см²×с $\gamma=1 \div 3$ мкм	$3 \times 10^{-1}$	$10^{-6} \div 10^{-8}$	$10^{-3} \div 10$
		Si<Zn>	$10^2 \div 2 \times 10^5$ п-тип	77÷180	150÷200	$J=10^{-2} \div 10 \text{ лк}$ $I_\gamma=10^{-7} \div 10^{-5}$ Вт/см²×с $\gamma=1 \div 2,5$ мкм	$2 \times 10^{-2}$	$10^{-4} \div 10^{-6}$	$5 \times 10^{-3} \div 10$
		Si<S>	$3 \times 10^2 \div 2 \times 10^5$ р-тип	77÷160	500÷600	$J=0,1 \div 10 \text{ лк}$ $I_\gamma=10^{-8} \div 10^{-3}$ Вт/см²×с $\gamma=1 \div 2$ мкм	$1,5 \times 10^{-1}$	$10^{-6} \div 10^{-8}$	$3 \times 10^{-3} \div 10$
		Si<Se>	$5 \times 10^2 \div 6 \times 10^4$ р-тип	77÷200	100÷300	$J=0,5 \div 20 \text{ лк}$ $I_\gamma=10^{-8} \div 10^{-3}$ Вт/см²×с $\gamma=1 \div 1,5$ мкм	$6 \times 10^{-2}$	$10^{-6}$	$10^{-3} \div 10^3$
2.	РК	Si<Mn>	$5 \times 10^2 \div 10^5$	200÷350	30÷100	в темноте	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-3} \div 10^4$

			<b>p-тип</b> <b><math>10^3-10^5</math></b>						
			<b>n-тип</b>						
		<b>Si&lt;Zn&gt;</b>	<b><math>7 \times 10^3 \div 7 \times 10^4</math></b>	<b><math>260 \div 350</math></b>	<b><math>50 \div 80</math></b>	<b>в темноте</b>	<b><math>10^{-5} \div 10^{-6}</math></b>	<b><math>10^{-6}</math></b>	<b><math>10^3 \div 10^4</math></b>
			<b>n-тип</b>						
		<b>Si&lt;S&gt;</b>	<b><math>10^2 \div 10^5</math></b>	<b><math>240 \div 350</math></b>	<b><math>40 \div 130</math></b>	<b>в темноте</b>	<b><math>10^{-4}</math></b>	<b><math>10^{-5} \div 10^{-6}</math></b>	<b><math>10^3 \div 10^4</math></b>
			<b>p-тип</b>						
		<b>Si&lt;Se&gt;</b>	<b><math>10^2 \div 10^5</math></b>	<b><math>280 \div 350</math></b>	<b><math>30 \div 100</math></b>	<b>в темноте</b>	<b><math>5 \times 10^{-4}</math></b>	<b><math>10^{-6}</math></b>	<b><math>10^2 \div 10^5</math></b>
			<b>p-тип</b>						
3.	Инжекцион- ная	<b>p<sup>+</sup>- Si&lt;Mn&gt;- p<sup>+</sup></b>	<b><math>5 \times 10^2 \div 10^5</math></b>	<b><math>77 \div 350</math></b>	<b><math>20 \div 50</math></b>	<b>в темноте</b>	<b><math>8 \times 10^{-1}</math></b>	<b><math>10^{-3} \div 10^{-4}</math></b>	<b><math>10^{-2} \div 5 \times 10^4</math></b>
		<b>n<sup>+</sup>- Si&lt;Zn&gt;-n<sup>+</sup></b>	<b><math>10^3 \div 10^4</math></b>	<b><math>77 \div 300</math></b>	<b><math>30 \div 100</math></b>	<b>в темноте</b>	<b><math>5 \times 10^{-2}</math></b>	<b><math>10^{-5}</math></b>	<b><math>10^{-2} \div 10^3</math></b>
			<b>n-тип базы</b>						

Анализ температурной области существования автоколебаний тока в компенсированном кремнии показал, что самыми широкими областями существования по температуре наблюдаются в образцах кремния, легированного атомами марганца. На рис. 2 показаны изменения максимального и минимального значений амплитуды автоколебаний тока от температуры трех типов автоколебаний тока обнаруженные в образцах Si<Mn>. Как видно из рис. 2, самый большой интервал существования по температуре имеют инжекционные автоколебания тока (ИН). Температурные электрические неустойчивости (ТЭН) тока наблюдаются при меньших интервалах температур относительно других двух типов автоколебаний. Однако в этом случае максимальное и минимальное значение амплитуды, т.е. глубина модуляции намного превосходит, чем в других двух типах. Кроме того, частота автоколебаний тока в ТЭН имеет самое низкое значение не только по сравнению с другим видом неустойчивости, но также относительно низкочастотных автоколебаний тока, исследованных в компенсированном кремнии легированного другими примесями (см. таб.-2). Результаты этих исследований показывают, что автоколебания тока в компенсированном кремнии можно получить в широком интервале температур. Эти результаты исследований позволяют сделать выбор типа автоколебаний тока для рекомендации по их применению в электронной промышленности.

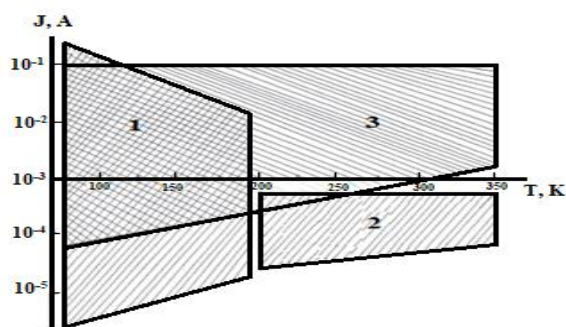


Рис 2. Зависимость максимального и минимального значения амплитуды автоколебаний тока от температуры в компенсированном кремнии легированного примесями атомами марганца (удельное сопротивление для всех исследованных образцов кремния было равно  $\rho \approx 5 \cdot 10^4$  Ом·см). 1-ТЭН - температурно-электрическая неустойчивость; 2-РЕ - рекомбинационные волны; 3-ИН - инжекционные неустойчивости.

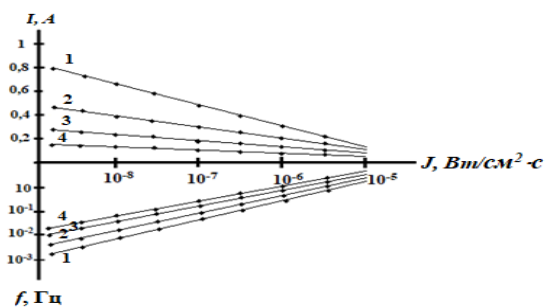


Рис 3. Изменение максимального значения амплитуды автоколебаний тока компенсированного кремния, легированного примесями атомами марганца, селена, цинка от амплитуды и частоты низкочастотных автоколебаний тока. 1-ТЭН - температурно-электрическая неустойчивость; 2-РЕ  $h\nu = 1,12$  эВ при  $T = 80$  К.



Из анализа полученных результатов установлено, что в отличие от других низкочастотных автоколебаний тока, обнаруженных в разных материалах в компенсированном кремнии, автоколебания существуют в широком интервале интенсивностей интегральной освещенности и длины волны монохроматического излучения. На рис. 3 показана зависимость максимального значения амплитуды и изменения частоты низкочастотных автоколебаний тока в компенсированном кремнии от интенсивности монохроматического излучения с энергией фотонов  $h\nu \approx 1,2$  эВ.

Как видно из рис. 3, самое большое значение амплитуды наблюдается в компенсированных образцах кремния, легированного атомами серы. Однако в этих образцах низкочастотные автоколебания тока ограничены по длине волны монохроматического излучения. Установлено, что из образцов компенсированного кремния, в которых возбуждались автоколебания тока, самыми оптимальными по существованию от интенсивностей интегрального света и длины волны монохроматического излучения являются компенсированные образцы кремния, легированного примесными атомами марганца. Эти результаты исследований показывают, что низкочастотные автоколебания тока в компенсированном кремнии наблюдаются не только при энергии фотонов  $h\nu > E_g$ , но также и при меньших энергиях фотонов, чем энергии ширины запрещенной зоны кремния. Анализ этих исследований показывает, что для возбуждения автоколебаний тока в компенсированном кремнии необходимо присутствие глубокого энергетического уровня в запрещенной зоне кремния (см. в таб.-1). Возбуждение автоколебаний тока при меньших энергиях, чем ширина запрещенной зоны кремния, объясняется двойным оптическим переходом носителей тока.

Из анализа полученных результатов исследований установлены закономерности измерений амплитуды и частоты автоколебаний тока в зависимости от интенсивности монохроматического излучения. Определено, что амплитуда автоколебаний тока меняется по следующему закону:

$$J = J_0 [1 - \beta \ln (I/I_{\min})]$$

где:  $\beta$  - постоянный коэффициент.

Частота автоколебаний тока меняется по закону

$$f = f_0 [1 - \beta \ln (I/I_{\min})]$$

где:  $\beta$  – постоянный коэффициент.

Из трех типов исследованных автоколебаний тока в компенсированном кремнии рекомбинационные волны (РВ) представляют отдельный интерес. Этот вид автоколебаний тока наблюдается около комнатной температуре, не требует дополнительных технологических операций для получения инжектирующих контактов и возбуждается при относительно низких напряженностях электрического поля. Поэтому были определены температурные области существования рекомбинационных волн в зависимости от удельного сопротивления и типа проводимости компенсированного кремния. На рис. 4 показаны граничные температурные области существования рекомбинационных волн. Как видно из рисунка, самую большую область существования РВ по температуре, удельному сопротивлению и типу проводимости обладают образцы кремния, легированные примесными атомами марганца. С помощью полученных результатов исследований рекомбинационных волн в зависимости от удельного сопротивления и типа проводимости в компенсированном кремнии можно создать твердотельные генераторы и датчики физических величин с амплитудно-частотным выходом.

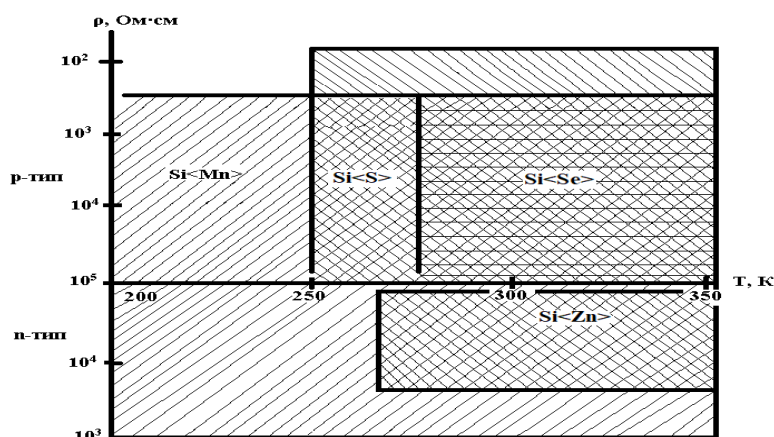


Рис 4. Температурные области существования рекомбинационных волн в зависимости от удельного сопротивления и типа проводимости компенсированного кремния.

На основе полученных результатов и проведенных анализов можно сказать, что автоколебания тока, возбуждаемые в компенсированном кремнии связаны с присутствием в запрещенной зоне глубоких энергетических уровней примесных атомов марганца, цинка, селена или серы. Распределение и зарядность этих примесей в кремнии приводит к появлению неоднородностей в объеме компенсированного кремния. Нами объяснены механизмы автоколебаний тока в компенсированном кремнии с учетом неоднородности материала [11,12]. Хорошее согласие экспериментальных результатов с теоретическими расчетами, дает основание на то, что полученные результаты являются достаточно достоверными и могут быть основой для открытия нового направления в физике полупроводников - физика неравновесных процессов компенсированных полупроводников. Эти результаты исследований также показывают возможности использования автоколебаний тока в компенсированном кремнии для создания твердотельных генераторов и датчиков физических величин с амплитудно-частотным выходом.

Разработана почти на производственном уровне технология получения компенсированного кремния, легированного примесными атомами и структурами на их основе [13,14]. Эта технология позволяет получить материалы с заданными и воспроизводимыми электрофизическими параметрами. Комплексное исследование электрофизических, фотоэлектрических и оптических свойств автоколебаний тока в компенсированном кремнии в зависимости от технологии его получения, с учётом растворимости, коэффициентов диффузии и концентрации электроактивных примесных атомов позволяет создавать новые виды полупроводниковых приборов.

Разработанные твердотельные генераторы на базе компенсированного кремния не только удобны для эксплуатации и экономичны, но также на их основе можно создать принципиально новые классы чувствительных многофункциональных датчиков различного назначения.

Таблица-3.

T, K	$E_n$ , В/см	$f_n$ , Гц	$I_n$ , А
77	550	$2 \cdot 10^{-3}$	$2.8 \cdot 10^{-1}$
130	350	$5 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-1}$
160	260	$2 \cdot 10^{-1}$	$7 \cdot 10^{-2}$
180	150	20	$1 \cdot 10^{-2}$
210	100	60	$4 \cdot 10^{-3}$
250	80	600	$1 \cdot 10^{-3}$

270	70	1700	$6 \cdot 10^{-4}$
280	60	2600	$8 \cdot 10^{-5}$
300	50	3250	$1 \cdot 10^{-4}$
320	40	4200	$2 \cdot 10^{-4}$

В таблице-3 приведены изменения пороговых параметров ( $E_p$ ,  $f_p$  и  $I_p$ ) предлагаемого датчика температур на основе компенсированного кремния. Как видно, предлагаемый датчик температуры работает в широком интервале температур ( $T=77-350$  К). С ростом температуры пороговое поле уменьшается в  $10 \div 15$  раз, а значение пороговой частоты и амплитуды меняются почти на 6 и 4 порядка соответственно. Регулярные и стабильные автоколебания тока в таких генераторах можно получать при напряженности приложенного электрического поля больше чем пороговой напряженности ( $E > E_p$ ) как в темноте, так и при освещении интегральным светом в интервале интенсивности  $I=10^{-3} \div 50$  лк или монохроматическим светом в области длины волны  $\lambda=1 \div 3$  мкм. При этом установлено, что с ростом интенсивности освещения независимо от длины волны частота автоколебания меняется линейно. Из анализа полученных данных показано, что твердотельные генераторы на основе компенсированного кремния легированного примесными атомами марганца, цинка, селена или серы, также можно использовать в качестве ИК- фотоприёмника с частотно-амплитудным выходом.

Принцип работы обычных полупроводниковых магнитодатчиков основан на изменении удельного сопротивления материала или ВАХ диодов при наличии магнитного поля ( $H$ ). Максимальное изменение их параметров при наличии магнитного поля  $H=20 \div 25$  кЭр составляет около  $\sim 30 \div 50\%$  от исходных. Чувствительность магнитодатчиков на основе автоколебаний тока определяется изменением пороговой напряженности электрического поля, также по амплитуде и частоте. Установлено, что параметры автоколебаний тока в компенсированном кремнии сильно зависят от величины магнитного поля. Следует отметить, что в отличие от обычных датчиков, работающих только при наличии поперечного магнитного поля ( $H_{\perp}$ ), предлагаемые датчики магнитного поля на основе автоколебаний чувствуют также продольное магнитное поле ( $H_{||}$ ). Из экспериментальных результатов установлено, что в исследуемом интервале магнитного поля амплитуда меняется в 18 раз, а частота автоколебаний тока почти в два раза независимо от направления магнитного поля ( $H_{\perp}$  и  $H_{||}$ ). Форма автоколебаний при этом практически не меняется. При большей напряженности магнитного поля ( $H > 25$  кЭр) происходит срыв автоколебаний тока.

### Заключение

Приведённые результаты показывают, что на основе полученных результатов можно создать принципиально новый класс датчиков физических величин, чувствительность которых значительно больше, чем у существующих.

Второй важной стороной применения результатов исследований на практике является то, что созданные твердотельные генераторы на основе автоколебаний тока могут работать как многофункциональные универсальные датчики внешних воздействий.

В таблице-4 приведены значения чувствительности основных параметров и пороговой напряженности электрического поля  $E_p$  твердотельных генераторов на основе компенсированного кремния, легированного примесными атомами селена при различных внешних воздействиях.

Таблица-4.

Область применения	Коэффициент чувствительности			
	По пороговому полю	По пороговой частоте	По амплитуде колебаний	По частоте колебаний
Термодатчик	$-(2\div 5) \text{ В/см}\cdot\text{К}$	$(2\div 4)\cdot 10^2 \text{ Гц/К}$	$(2\div 5)\cdot 10^{-6} \text{ А/К}$	$(2\div 4)\cdot 10^2 \text{ Гц/К}$
Фотодатчик	$-(4\div 6) \text{ В/см}\cdot\text{лк}$	$(3\div 5)\cdot 10^2 \text{ Гц/лк}$	$(3\div 5)\cdot 10^{-6} \text{ А/лк}$	$-(3\div 5) \text{ Гц/лк}$
Тензодатчик	$-(3\div 5)\cdot 10^{-8} \text{ В/см}\cdot\text{Па}$	$(2\div 5)\cdot 10^{-8} \text{ Гц/Па}$	$(2\div 5)\cdot 10^{-10} \text{ А/Па}$	$-(1\div 3)\cdot 10^{-5} \text{ Гц/Па}$
Магнитодатчик	$-(2\div 5)\cdot 10^{-3} \text{ В/см}\cdot\text{Эр}$	$-(5\div 6)\cdot 10^{-3} \text{ Гц/Эр}$	$-(5\div 7)\cdot 10^{-11} \text{ А/Эр}$	$(3\div 5)\cdot 10^{-2} \text{ Гц/Эр}$

Следует отметить, что коэффициенты чувствительности каждого из физических видов воздействия были определены при постоянных других внешних воздействиях. Как видно, предлагаемый датчик обладает достаточно высокой чувствительностью к различным внешним воздействиям, является многофункциональным и из-за модулированного выходного сигнала по частоте и амплитуде также может работать в дистанционном режиме.

### Литература

1. Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. О возможности рекомбинационной неустойчивости в полупроводниках. ФТП, 1965, т. 7, № 3, с. 750-758.
2. Балкерей Ю., Голик Л.Л., Елинсон М.И. автоволновые среды. Использование в электронике. Радиоэлектронная связь. Знание, 1983.
3. Викулина Л.Ф. Измеритель направления магнитного поля. Приборы и техника эксперимента. 2000, № 4, с. 133-136.
4. Завдский Ю.И., Корнилов Б.В. Термоосциллисторной функциональный датчик температуры. ФТП, 1969 г., т. 3, в. 10, с. 1441-1446.
5. Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф., Аюпов К.С., Кадырова Ф.А. термодинамические условия возбуждения стабильных и воспроизводимых автоколебаний с заданными параметрами в компенсированном кремнии. ЭОМ, 2004, № 3, с. 84-88.
6. Bakhadyrkhanov M.K., Azimkhuzaev Kh., Zikrillaev N.F., Sadullaev A.B., Arzikulov E. Control of the Excitation Conditions and the Parameters of Self-Sustained Oscillations of Current in Compensated Silicon doped with Manganese. Semiconductors, 2000, No 2, pp. 171-173.
7. Bakhadirkhanov, M.K., Zikrillaev, N.F., Ayupov, K.S., ...Kadirova, F.A., Il'Khomzhonov, N. Spectral range of current self-oscillation in manganese-doped silicon. Technical Physics, 2006, 51(9), pp. 1235-1236.
8. Bakhodirkhonov, M.K., Zikrillaev, N.F., Egamberdiev, B.E. Self-sustained oscillation in compensated silicon. Radiotekhnika i Elektronika, 1998, 43(3), pp. 300-308.
9. Бахадырханов М.К., Болтакс Б.И., Куликов Г.С. Диффузия электроперенос и растворимость примеси марганца в кремнии. ФТП, 1972, т. 14, в. 6, с. 1671.
10. Зикриллаев Н.Ф., Шоабдурахимова М.М., Аюпов К.С., Исамов С.Б., Вахобов К.И. Управление электроактивными концентрациями примесных атомов в кремнии. Приборы, 2022, №8 (266), с. 45.
11. Шейнкман М.К., Шик А.Я. Долговременные релаксации и остаточная проводимость в полупроводниках. ФТП, 1976, т. 10, в. 2, с. 209.
12. Bakhadirkhanov, M. K.; Tursunov, A.; Askarov, Sh. I.; Zikrillaev, N. F. Temperature-electric instability in inhomogeneous semiconductors. Phys. and Technic. of Semicon. 1987, Volume 21(2), p. 379.
13. Zikrillayev, N.F., Ayupov, K.C., Valiyev, S.A., Sherg'oziyev, S.B., Mavlonov, G.'X. Functional possibilities of strong compensated leggie Si with the different deep energetic levels impurities in electronics. Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, 2020, 12(7 Special Issue), pp. 2751-2758.
14. Bakhadirkhanov, M.K., Zikrillaev, N.F., Narkulov, N., ...Turdi, Umar, Ayupov, K.S. About concentration of electroactive atoms of elements of transition groups in silicon. Elektronnaya Obrabotka Materialov, 2005, (2), pp. 86-88.