

Учебная дисциплина
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ
МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

ТЕМА № 3

Полупроводниковые материалы

ЛЕКЦИЯ № 5

Свойства полупроводниковых материалов

Учебные цели

- 1. Знать свойства германия, кремния и карбида кремния.**
- 2. Знать перспективы развития полупроводниковых материалов.**

Учебные вопросы

Введение

1. Германий.

2. Кремний.

3. Карбид кремния.

Заключение

Список рекомендуемой литературы

- 1. Привалов Е.Е. Электроматериаловедение: Пособие. СтГАУ, АГРУС, 2012. – 196с.**
- 2. Привалов Е.Е. , Гальвас А.В. Электротехнические материалы: Пособие. СтГАУ, АГРУС, 2011. – 192с.**
- 3. Привалов Е.Е. Электроматериаловедение: Лабораторный практикум. Тесты. СтГАУ, АГРУС, 2012. – 196с.**
- 4. Справочники по ЭТМ в 3 томах /Под ред. Ю. В. Корицкого – М.: Энергоатомиздат Т.1,1986 – 308с.;Т.2,1987. – 296с.; Т.3,1988 – 728с.**

Введение

Свойствами п.п. обладают вещества:

- **неорганические и органические;**
- **кристаллические и аморфные;**
- **твердые и жидкие;**
- **немагнитные и магнитные.**

П.п. объединены общей способностью сильно изменять свои электрические свойства под влиянием небольших внешних энергетических воздействий.

Свойства п.п. проявляют 12 химических элементов, находящихся в средней части Периодической системы Д. И. Менделеева.

Ведущее место среди п.п. по совокупности электрофизических свойств, разработанности технологических процессов, количеству и номенклатуре выпускаемых приборов занимают кремний и германий.

Структурная схема классификации п.п. показана на рисунке 1.

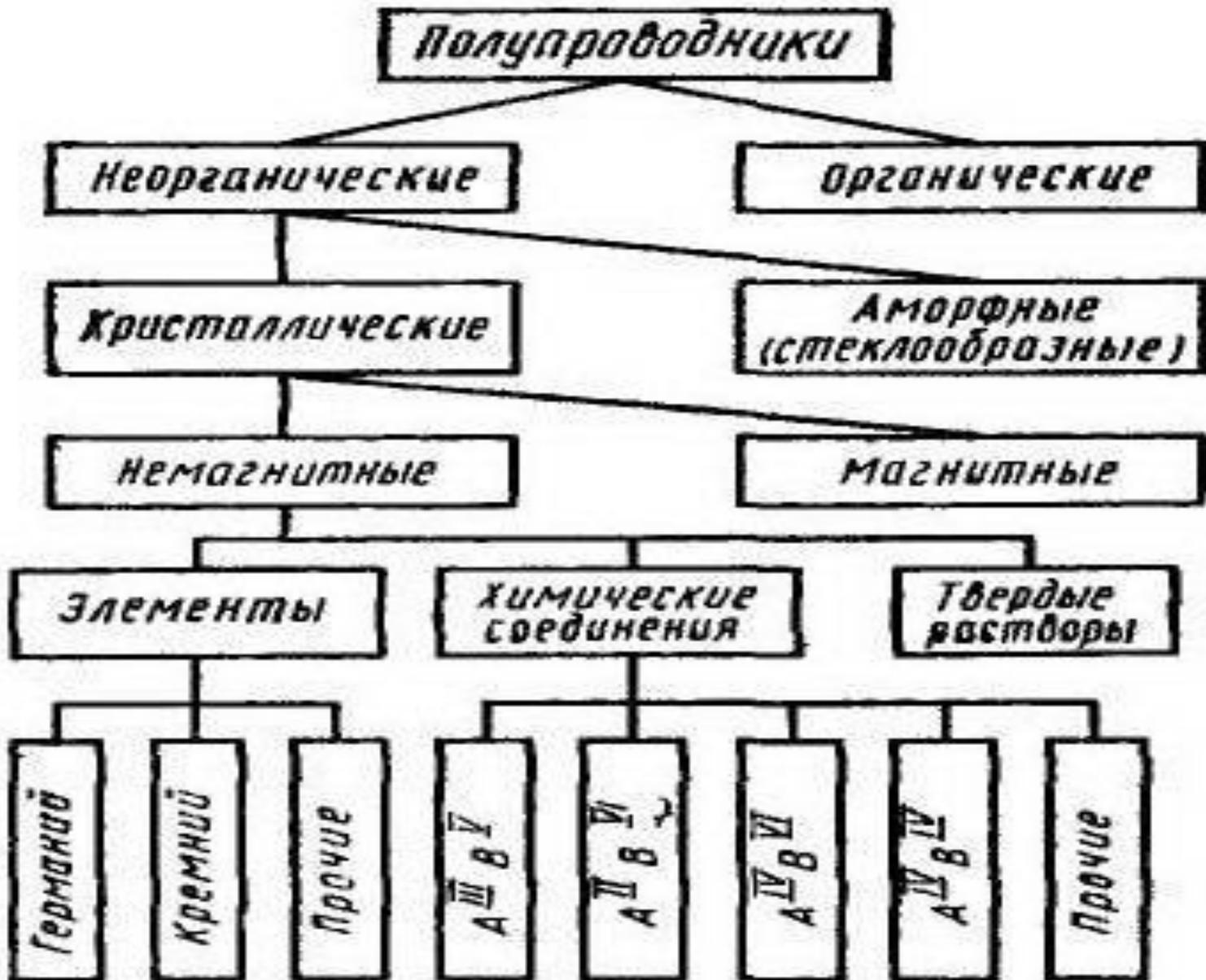


Рисунок 1 – Классификация п.п. материалов

Таблица 1 - Значения ширины запрещенной зоны элементарных п.п. в эВ

Элемент	ΔE	Элемент	ΔE
Бор	1,1	Мышьяк	1,2
Углерод (алмаз)	5,6	Сурьма	0,12
Кремний	1,12	Сера	2,5
Германий	0,665	Селен	1,8
Олово (α -Sn)	0,08	Теллур	0,36
Фосфор	1,5	Йод	1,25

1. Германий

Существование и свойства п.п. предсказал в 1870г. Д. И. Менделеев. Только в 1886г. немецкий химик К. Винклер обнаружил новый элемент и назвал германием (Ge).

Открытие Ge - торжество Периодического закона Д. И. Менделеева.

Содержание Ge в земной коре - 0, 0007% (равно природным запасам олова и свинца).

Получение Ge затруднено.

Источники промышленного получения Ge - побочные продукты цинкового производства.

Физико-химические и электрические свойства

Ge обладает металлическим блеском, высокой твердостью и хрупкостью.

Подобно Si кристаллизуется в структуре алмаза, элементарная ячейка которого содержит восемь атомов.

Кристаллический Ge химически устойчив на воздухе при комнатной температуре.

Из-за нестабильности свойств собственный окисел на поверхности Ge не служит надежной защитой от разрушения.

Ge при $T = 20^{\circ}\text{C}$ не растворяется в воде, соляной и серной кислотах.

Растворители Ge - смесь азотной и плавиковой кислот, а также раствор перекиси водорода.

При нагревании Ge интенсивно взаимодействует с галогенами, серой и её соединениями.

Ge обладает температурой плавления 936°C и малым давлением насыщенного пара, что упрощает очистку и выращивание монокристаллов.

Даже в расплавленном состоянии Ge не взаимодействует с графитом и стеклом.

Ширина запрещенной зоны при $T > 200\text{K}$ изменяется по линейному закону.

При $T = 20^{\circ}\text{C}$ подвижность электронов в два раза превышает подвижность дырок (при изменении температуры соотношение меняется).

Основные физические свойства германия приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства основных п.п. материалов

Свойства	Германий	Кремний	Селен
Период решетки $\times 10$, нм	5,66	5,42	4,36
Плотность при 20°C, Мг/м ³	5,3	2,3	4,8
Температурный коэффициент линейного расширения (0—100°C), К ⁻¹	$6 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$25 \cdot 10^{-6}$
Удельная теплопроводность Вт/(м·К)	55	80	3
Удельная теплоемкость (0 — 100°C), Дж/(кг·К)	333	710	330
Температура плавления, °С	936	1414	220
Теплота плавления, Дж/кг	$4,1 \cdot 10^6$	$1,6 \cdot 10^8$	$6,4 \cdot 10^4$
Коэффициент поверхностного натяжения при температуре плавления, Н/м	0,6	0,72	0,1
Собственное удельное сопротивление при температуре 20°C, Ом·м	0,47	$2 \cdot 10^3$	—
Собственная концентрация носителей заряда, м ⁻³	$2,5 \cdot 10^{19}$	10^{16}	—
Ширина запрещенной зоны, эВ:			
при 0 К	0,746	1,165	2,5
при 300 К	0,665	1,12	2,0
Подвижность электронов, м ² /(В·с)	0,39	0,14	—
Подвижность дырок, м ² /(В·с)	0,19	0,05	$0,2 \cdot 10^{-4}$
Работа выхода электронов, эВ	4,8	4,3	2,85
Первый ионизационный потенциал, В	8,1	8,14	9,75
Диэлектрическая проницаемость	16	12,5	6,3

Рассмотрим зависимость сопротивления ρ_e от концентрации примесных атомов при $T = 20^{\circ}\text{C}$ (рисунок 5.4).

При невысокой концентрации примеси (влияние еще не сказывается на изменении подвижности носителей заряда) зависимость носит линейный характер (прямая a).

Линейность нарушается в области сильного легирования, что является следствием уменьшения подвижности носителей заряда.

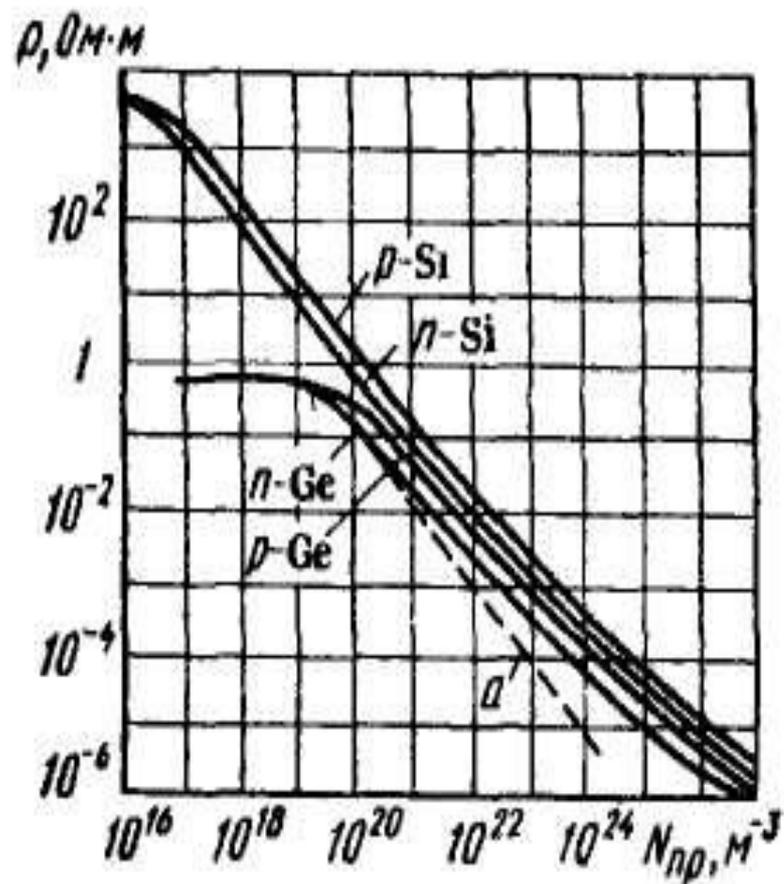


Рис. 5.4. Зависимость удельного сопротивления кремния и германия от концентрации примеси при $20^\circ C$

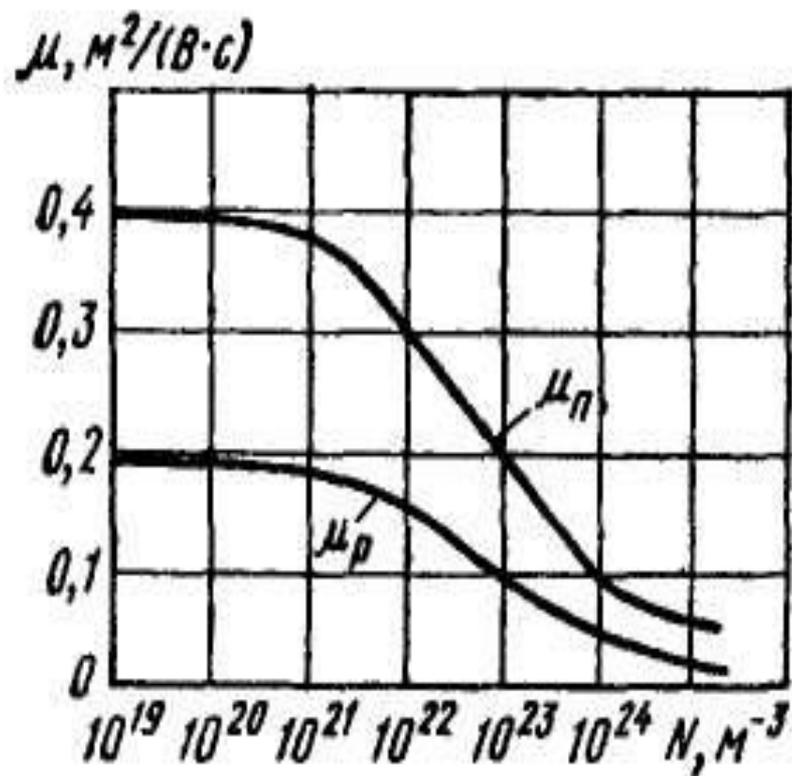


Рис. 5.5. Зависимость подвижности основных носителей заряда в германии от концентрации легирующей примеси

Зависимость подвижности электронов и дырок от концентрации примесей (рисунок 5.5).

При одинаковой степени легирования подвижность дырок в Ge p - типа меньше подвижности электронов в Ge n – типа.

Зависимость удельного сопротивления от концентрации легирующих примесей для Ge p - типа идет выше, чем аналогичная зависимость для Ge n - типа.

На основе Ge выпускают диоды и транзисторы (плоскостные диоды и сплавные биполярные транзисторы).

Плоскостные диоды пропускают токи (0,3...1000)А при падении напряжения не более 0,5 В.

Недостаток Ge диодов – малые допустимые обратные напряжения.

Нанесением пленочной изоляции из Si O₂ изготавливают транзисторы по планарной технологии.

Ge используется в туннельных и точечных диодах.

Благодаря высокой подвижности носителей заряда Ge применяют в датчиках Холла.

Выпускают Ge фототранзисторы и фотодиоды, оптические фильтры, модуляторы света и коротких радиоволн.

Недостаток. Небольшой рабочий диапазон температур Ge приборов (от - 60 до + 70°C).

Невысокий верхний предел рабочей температуры главный недостаток Ge.

2. Кремний

Si - один из распространенных элементов в земной коре (29,5% по массе). Занимает 2 место после кислорода.

Песок и глина, образующие минеральную часть почвы - соединения Si, например - двуокись кремния SiO_2).

Свободная SiO_2 встречается в виде минерала кварца (чистота кварцевого песка до 99,9%).

Si в свободном состоянии в природе не встречается.

В элементарном виде Si был получен в 1811г., но нашел применение в 20 столетии после разработки современных методов очистки.

По сравнению с Ge кремний:

- 1. Кристаллизуется в структуре алмаза с меньшим периодом идентичности решетки.**
- 2. Меньшие расстояния между атомами в решетке обуславливают более сильную ковалентную химическую связь и широкую запрещенную зону.**

Химические свойства

1. Кристаллический при $T = 20^{\circ}\text{C}$ - инертное вещество нерастворимое в воде.

2. Не реагирует с кислотами. Растворяется в смеси азотной и плавиковой кислот.

3. Устойчив на воздухе при $T < 900^{\circ}\text{C}$, а выше - окисляется с образованием двуокиси Si O_2 .

4. Растворим в расплавленных металлах (Al, Au, Ag и др.), а с рядом металлов (Fe, Si, Mg и др.) образует соединения - силициды.

5. Обладает высокой температурой плавления и в расплавленном состоянии - химически активен.

6. Кварц и графит взаимодействуют с Si при высоких температурах (реакция с углеродом (C) дает карбид кремния Si C).

Si - базовый п.п. для планарных транзисторов и интегральных микросхем.

П.п. интегральные микросхемы применяют в схемах автоматики ЭУ и в преобразовательной технике (выпрямители, стабилизаторы, инверторы, конверторы).

Si плоскостные диоды выдерживают обратные напряжения до 1500В и ток до 1500А, а стабилитроны напряжение от 3 до 400В.

В схемах автоматики ЭУ применяют Si фотодиоды и фотоэлементы.

Солнечные батареи используют в системах питания зданий (к.п.д. батареи 10 - 12%).

Изготавливают датчики Холла и тензодатчики (сильная зависимость удельного сопротивления от механических деформаций).

Достоинства

Благодаря тому, что Si имеет более широкую запрещенную зону, чем германий, Si - приборы работают при более высоких температурах, чем германиевые.

Верхний температурный предел работы кремниевых приборов достигает $(180...220)^\circ\text{C}$.

Si плоскостные диоды выдерживают обратные напряжения до 1500В.

3. Карбид кремния

SiC - единственное бинарное соединение среди п. п. приборов. В природе встречается редко и в ограниченных количествах.

По типу химической связи SiC относится к ковалентным кристаллам (сильные химические связи между атомами Si и C; высокая химическая и температурная стабильность и твердость).

Свойства распространенных политипов SiC систематизированы в таблице 3.

Таблица 3 - Электрофизические свойства основных поли типов карбида кремния

Модификация	β -SiC	α -SiC			
Символ поли типа	3C	15 R	6H	4H	2H
Период решетки $\times 10$, нм	4,359	3,073 (a) 37,3(c)	3,081 15,12	3,076 10,05	— —
Ширина запрещенной зоны, эВ	2,39	2,986	3,023	3,265	3,333
Подвижность электронов, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	0,1	0,05	0,033	0,07	—
Подвижность дырок, $\text{м}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006

У политипов α и β - карбида кремния различные значения ширины запрещенной зоны и подвижности электронов.

SiC - очень твердое вещество (твердость по минералогической шкале 9,5).

Устойчив против окисления до $T = 1400^{\circ}\text{C}$.

При $T = 20^{\circ}\text{C}$ не взаимодействует ни с какими кислотами (при нагревании растворяется в расплавах щелочей).

**Электропроводность при $T = 20^{\circ}\text{C}$ примесная (тип проводимости и окраска зависят от примесей).
Чистый SiC бесцветен.**

Избыток Si приводит к электронной электропроводности SiC, а C - к дырочной.

Собственная электропроводность с $T = 1400^{\circ}\text{C}$.

Проводимость порошкообразного SiC зависит от проводимости зерен исходного материала, их размера, степени сжатия порошка, напряженности электрического поля и температуры.

Особенность SiC - способность к люминесценции в видимой области спектра. Используют при создании светодиодов (принцип инжекционной электролюминесценции).

Основой светодиода является р-п-переход. Диффузию проводят при температуре 2000°C.

Распространены светодиоды желтого излучения (диффузия бора в SiC р-типа, легированного азотом).

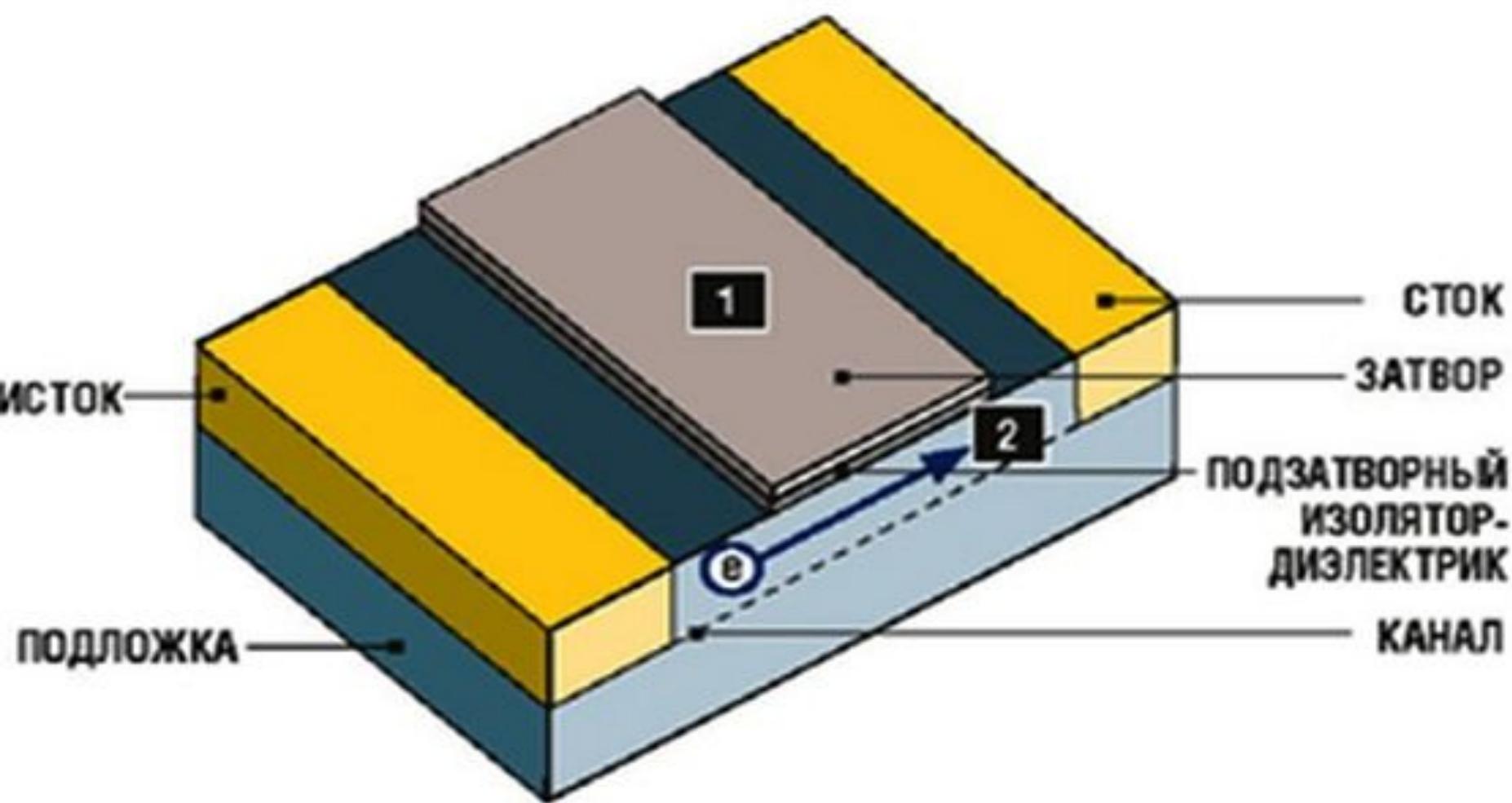
Недостаток светодиодов – невысокий КПД при преобразовании электрической энергии в световую.

Преимущество - стабильность характеристик и отсутствие старения материала.

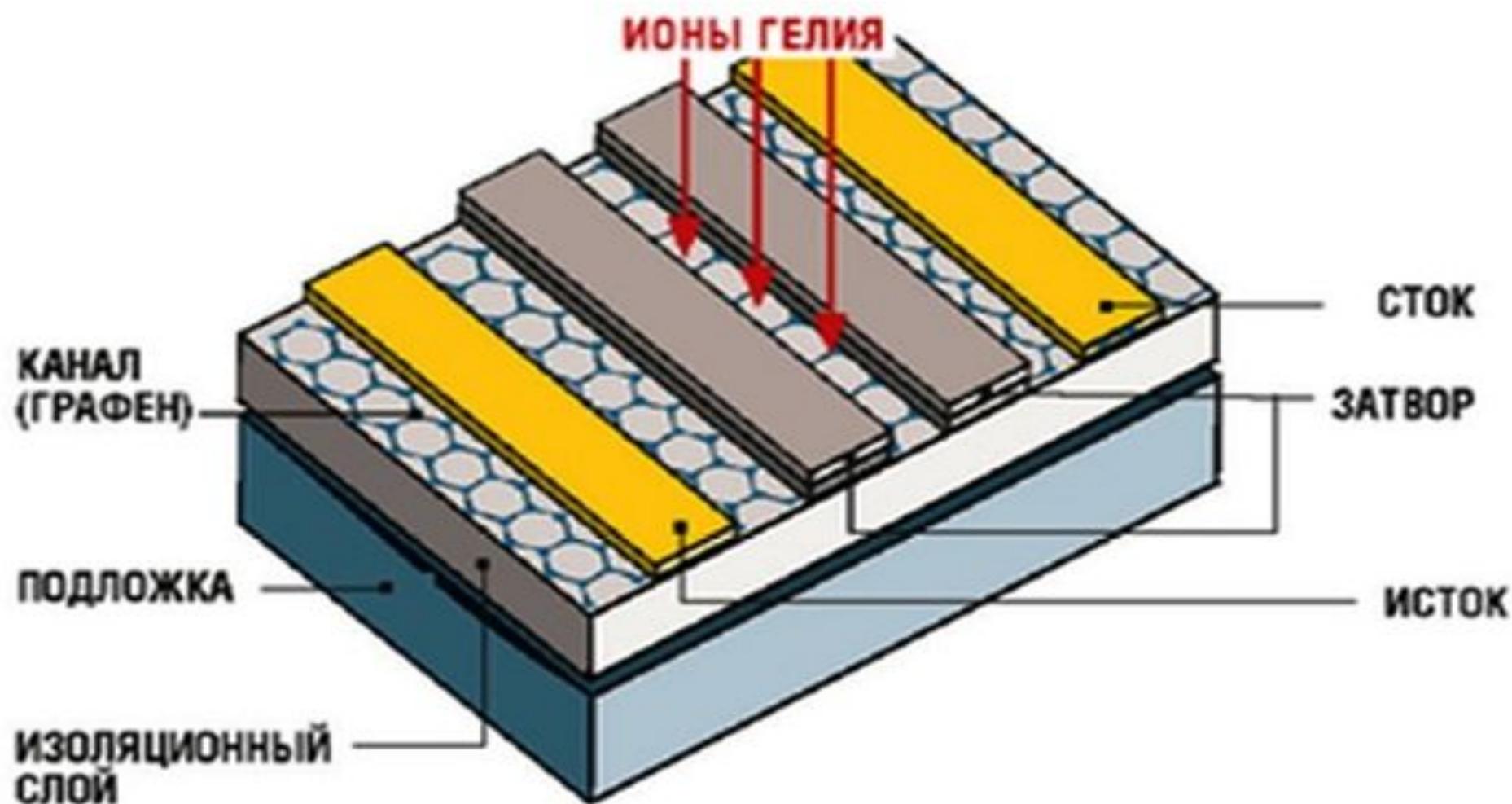
Светодиоды применяют в качестве опорных источников света в автоматике ЭУ.

Рассмотрим влияние активных примесей на смещение спектра электролюминесценции светодиодов на основе политипа бН (рисунок 6).

ОТ КРЕМНИЕВОГО ТРАНЗИСТОРА К ГРАФЕНОВОМУ



Кремниевый транзистор переключается в тот момент, когда на затвор подается напряжение **1**. При этом в подложке открывается канал, по которому электроны перемещаются от истока к стоку **2**.



Чтобы иметь возможность переключения, графеновый транзистор нуждается в двух затворах. Дополнительно в целях получения запрещенной зоны графеновая решетка подвергается бомбардировке ионами гелия.

«ДОРОЖНАЯ КАРТА» ГРАФЕНА

Группа ученых, возглавляемая лауреатом Нобелевской премии Константином Новоселовым, выдвинула прогноз относительно сроков появления первых продуктов на основе графена. Все начнется с дисплеев, затем появятся высокочастотные транзисторы для беспроводной связи, а также логические транзисторы для компьютерных процессоров.



Применение

- 1. Мощные диоды и высокотемпературные тензорезисторы преобразовательной техники.**
- 2. Полевые транзисторы, термисторы и другие приборы автоматики ЭУ.**
- 3. Варисторы (нелинейные полупроводниковые резисторы) и высокотемпературные нагреватели для схем автоматики ЭУ на производстве.**
- 4. Механическая обработка твердых и особо твердых материалов.**