

Санкт-петербургский политехнический университет Петра
Великого



Институт энергетики и транспортных систем



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем

Электротехническое материаловедение

К.т.н., доцент Белько Виктор Олегович



Основная литература

№	Автор, название, место издания, издательство, год (годы) издания	Год изд.	К-во экз.	Место хранения
1.	Электротехническое материаловедение. Диэлектрики, проводники, сверхпроводники: учебное пособие / Ю.А. Полонский (и др.). – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2014. – 190 с.	2014	10	Учебная библиотека СПбПУ
2.	Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учебник для вузов / Колесов С.Н., Колесов И.С. - Москва, Высшая школа, 2004. – 519 с.	2004	100	Учебная библиотека СПбПУ

Дополнительная литература

№	Автор, название, место издания, издательство, год (годы) издания	Год изд.	К-во экз.	Место хранения
1.	Пасынков, Владимир Васильевич. Материалы электронной техники : учеб. для вузов по спец. электронной техники / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин .— Изд. 5-е, стер .— Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2003 .— 367 с.	2003	4	Учебная библиотека СПбПУ
2.	Материаловедение : учебник для вузов по направлению подготовки и специальностям в области техники и технологии / [Б. Н. Арзамасов [и др.] ; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина] .— Изд. 8-е, стер. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008 .— 646 с.	2008	8	Учебная библиотека СПбПУ



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Проводники



ПОЛИТЕХ

Институт энергетики
и транспортных систем

Металл	Удельное сопротивление Ом*мм2/м
Серебро	0,015...0,0162
Медь	0,01724...0,018
Золото	0,023
Алюминий	0,0262...0,0295
Иридий	0,0474
Вольфрам	0,053...0,055
Молибден	0,054
Цинк	0,059
Никель	0,069
Железо	0,098
Платина	0,107
Олово	0,12
Свинец	0,217...0,227
Титан	0,5562...0,7837
Висмут	1,2



Проводники с высокой проводимостью



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем

- Серебро
- Медь
- Золото
- Алюминий

Ag

Cu

Au

Al

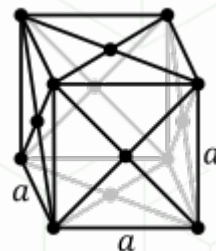


ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Серебро (Ag)



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем



Физические свойства

Плотность	10.5 г/см ³	Т плавления	962 °C
Скорость звука	2680 м/с	Т испарения	2162°C
ТКЛР	18.9 10 ⁻⁶ /К	Твердость	2.5-3

Электрофизические свойства

Уд. сопротивление	0.016 мкОм*м	Магн.проницаемость	диа
-------------------	--------------	--------------------	-----

Теплофизические свойства

Теплопроводность	429 Вт/(м·К)		
Уд.теплоемкость	235 Дж/(кг·град)		



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Теплоемкость веществ



ПОЛИТЕХ

Институт энергетики
и транспортных систем

Вещество	Агрегатное состояние	Уд.теплоемкость, Дж/г*К
Водород	газ	14,304 ^[3]
Аммиак	газ	4,359—5,475
Гелий	газ	5,193 ^[3]
Вода (300 К, 27 °С)	жидкость	4,1806 ^[4]
Литий	твёрдое тело	3,582 ^[3]
Этанол	жидкость	2,438 ^[5]
Лёд (273 К, 0 °С)	твёрдое тело	2,11 ^[6]
Водяной пар (373 К, 100 °С)	газ	2,0784 ^[4]
Воздух (сухой, 300 К, 27 °С)	газ	1,007 ^[7]
Алюминий	твёрдое тело	0,897 ^[3]
Графит	твёрдое тело	0,709 ^[3]
Стекло кварцевое	твёрдое тело	0,703
Алмаз	твёрдое тело	0,502
Железо	твёрдое тело	0,449 ^[3]
Медь	твёрдое тело	0,385 ^[3]
Латунь	твёрдое тело	0,370
Молибден	твёрдое тело	0,251 ^[3]
Ртуть	жидкость	0,140 ^[3]
Вольфрам	твёрдое тело	0,132 ^[3]
Свинец	твёрдое тело	0,130 ^[3]

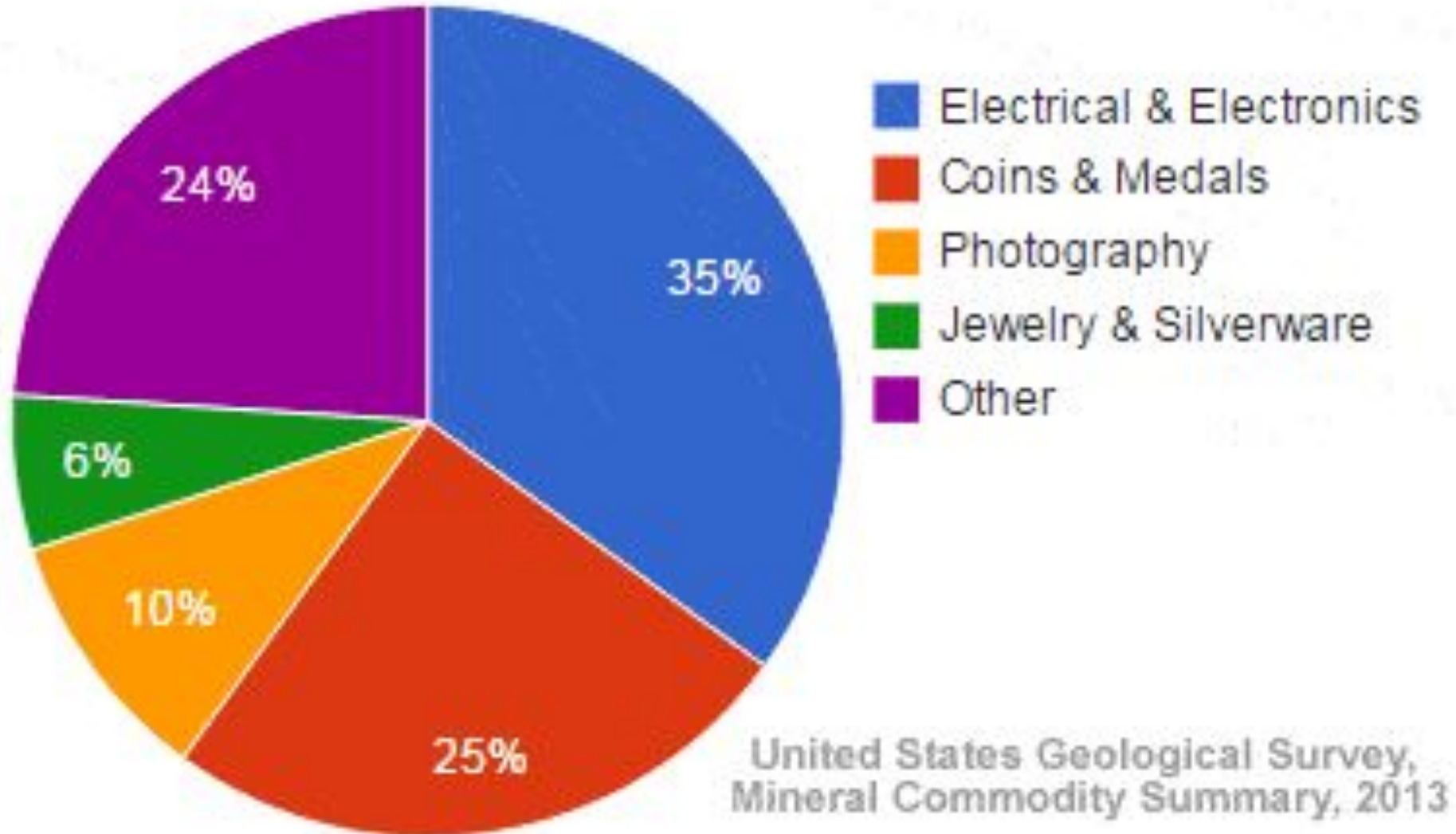


ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Использование серебра



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем





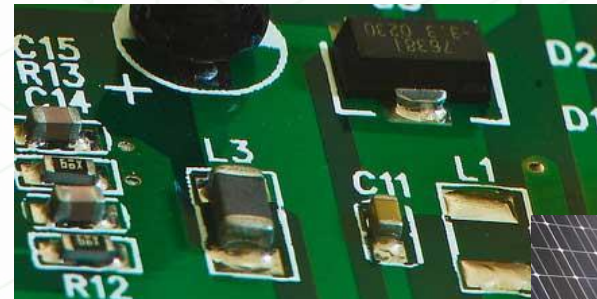
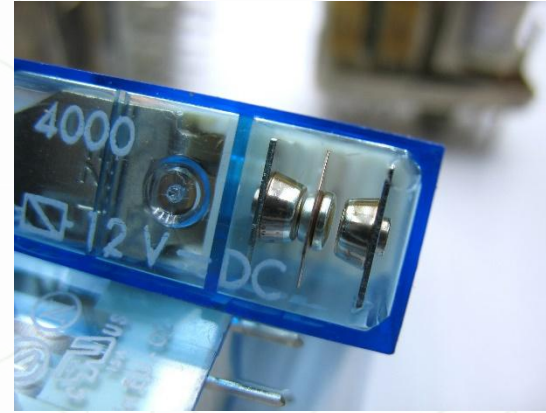
ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Применение серебра



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем

- В виде покрытий проводников в СВЧ технике.
- В сплавах контактных групп.
- В качестве присадки в припоях.
- Проводящие покрытия на диэлектриках («вжигание» серебряных электродов на керамике).
- Компонент электропроводящих клеев и красок.
- Контакты печатных плат.
- RFID-метки.
- PC-соединители.
- Хранение информации (DVD-диски).
- Антибактериальное покрытие.
- Солнечные панели (20 гр.).
- Элементы питания (оксиды серебра, Ag-Zn).
- Топливные ячейки.
- Пленка, фото.
- Зеркала (Al – 90%, Ag – 99%)/
- Музыкальные инструменты.



RFID tags contain ~10mg of silver

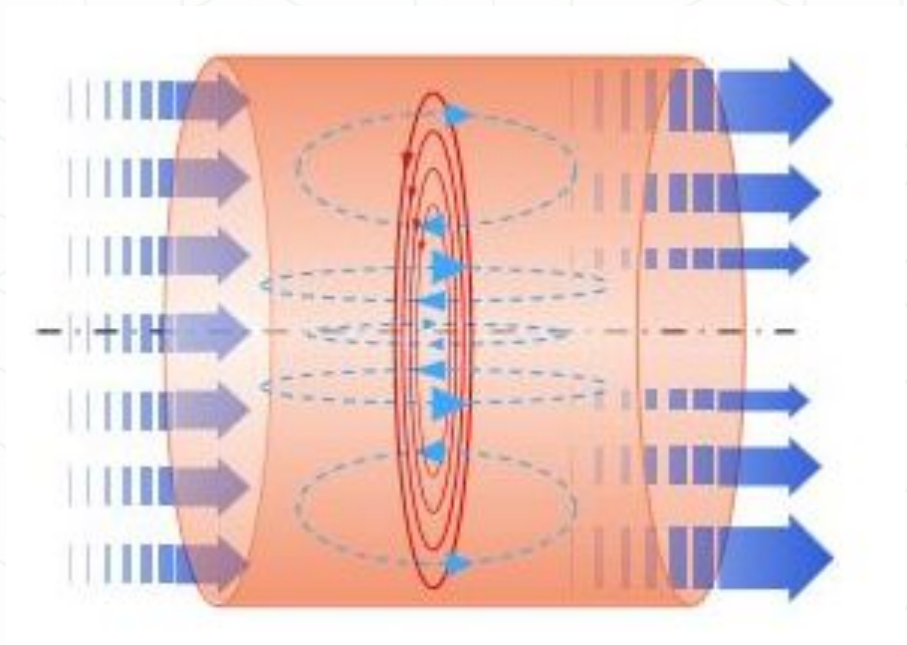




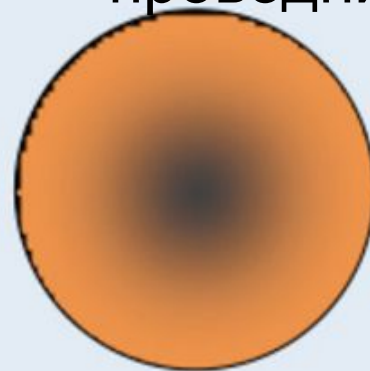
Скин-эффект



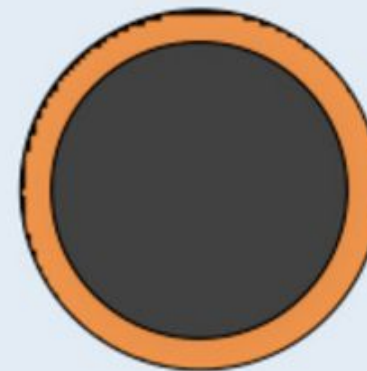
$$\lambda = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \cdot \mu \cdot \sigma \cdot \omega}}$$



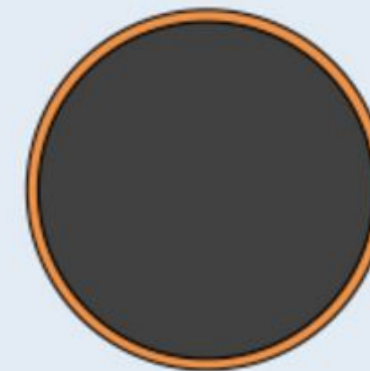
Распределение тока по сечению
проводника



60 Hz



1,000 Hz



300,000 Hz



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Серебряные пули



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем



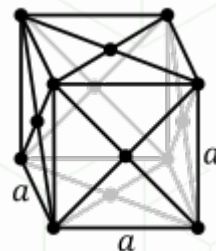


ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Медь (Cu)



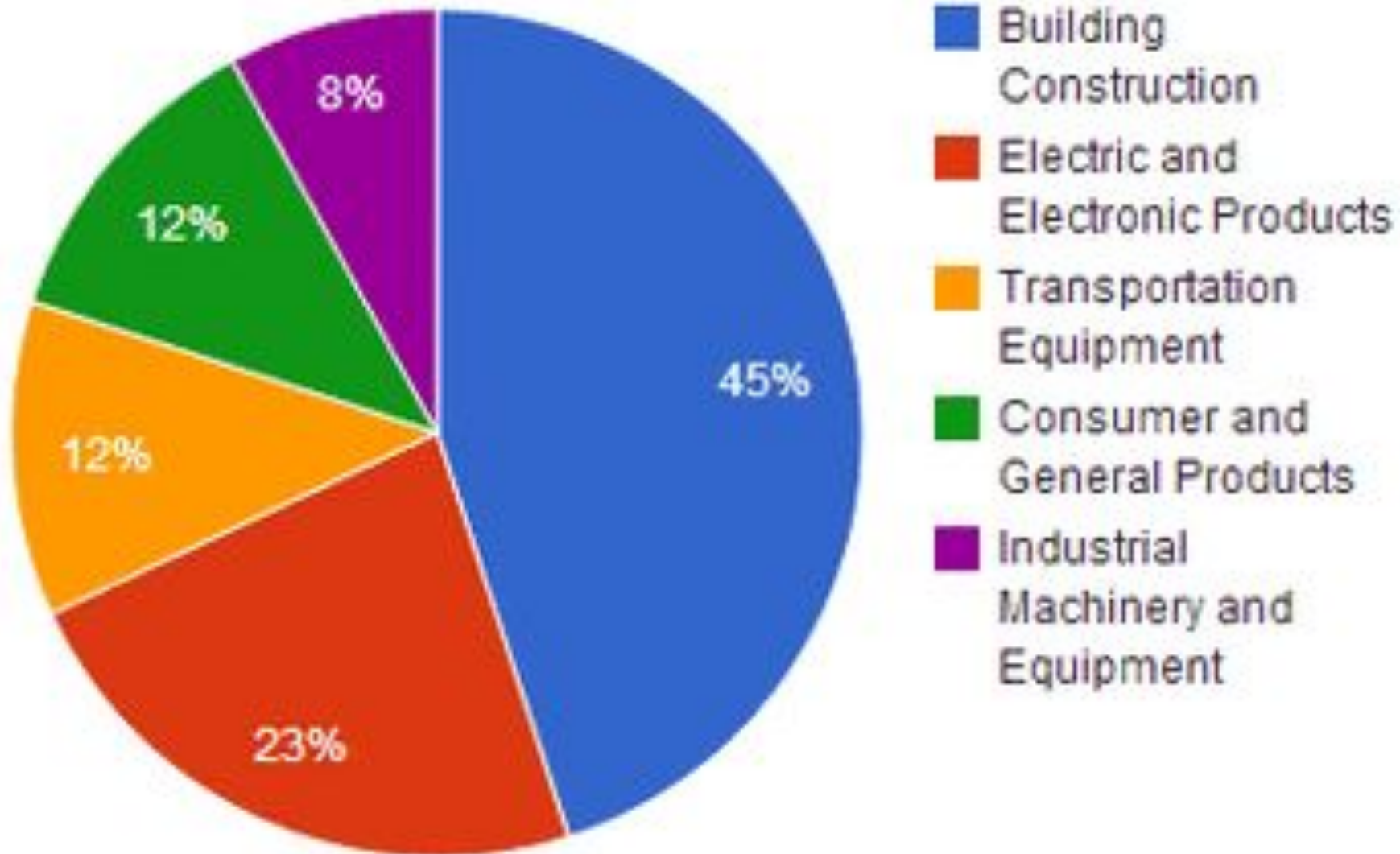
ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем



Физические свойства			
Плотность	8.96 г/см ³	Т плавления	1084 °С
Скорость звука	3810 м/с	Т испарения	2562°С
ТКЛР	16.5 10 ⁻⁶ /К	Твердость	3
Электрофизические свойства			
Уд. сопротивление	0.017 мкОм*м	Магн.проницаемость	диа
Теплофизические свойства			
Теплопроводность	401 Вт/(м·К)		
Уд.теплоемкость	385 Дж/(кг·град)		



Использование меди





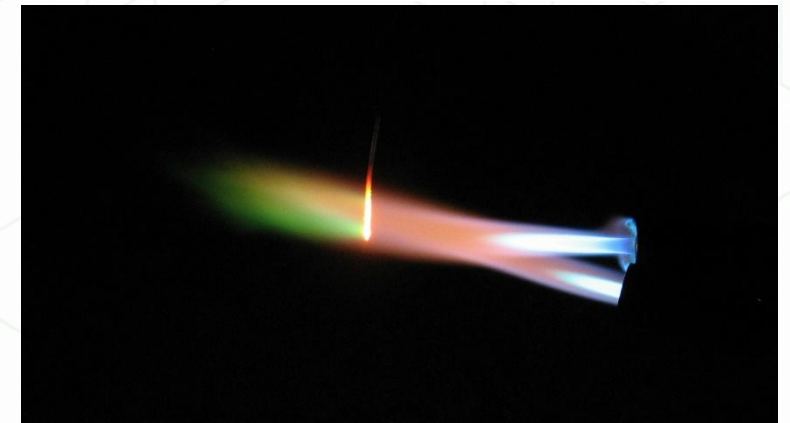
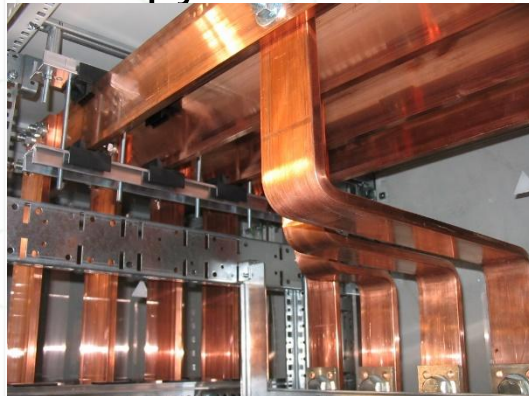
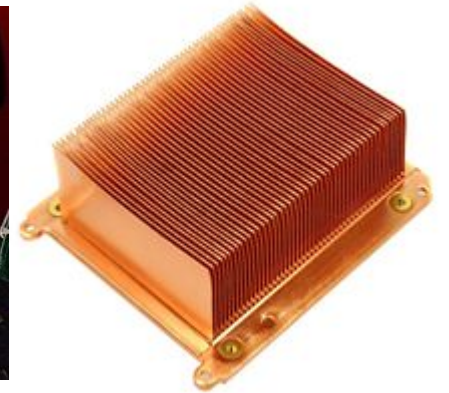
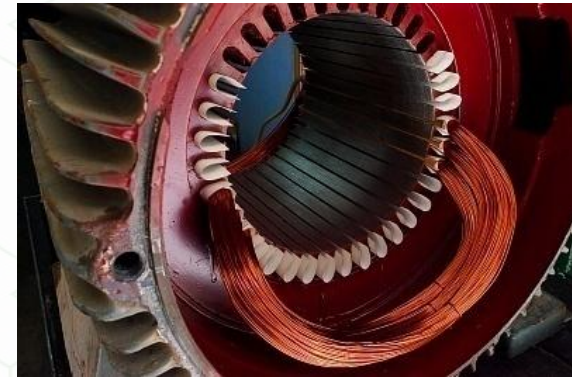
ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Применение меди



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем

Кабели, провода.
Шины, токопроводы.
Телеком (витая пара, РЧ, фидеры)
Обмотки двигателей, трансформаторов.
Теплоотводы.
Фольгированные печатные платы.
Техника сверхвысокого вакуума (только медь и нерж.
сталь).
Аноды рентгеновских трубок.



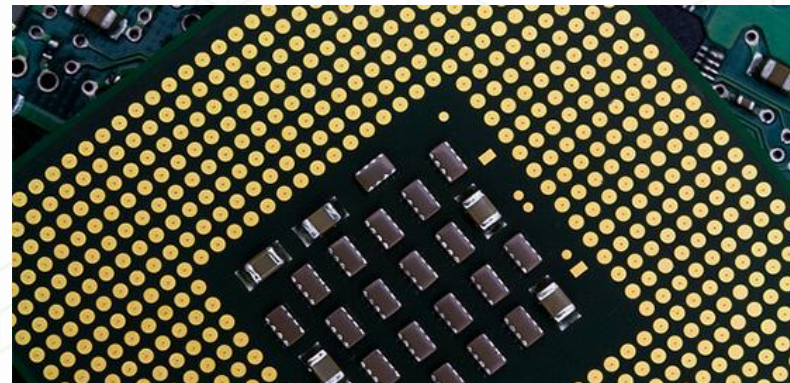
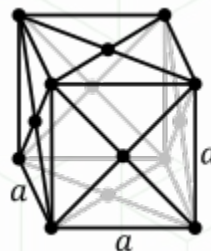


ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Золото (Au)



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем



Физические свойства

Плотность	19.30 г/см ³	Т плавления	1064 °С
Скорость звука	2030 м/с	Т испарения	2970°С
ТКЛР	14.2 10 ⁻⁶ /К	Твердость	2.5

Электрофизические свойства

Уд. сопротивление	0.022 мкОм*м	Магн.проницаемость	диа
-------------------	--------------	--------------------	-----

Теплофизические свойства

Теплопроводность	318 Вт/(м·К)		
Уд.теплоемкость	128 Дж/(кг·град)		



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем

Самый бестолковый драгоценный металл!!!



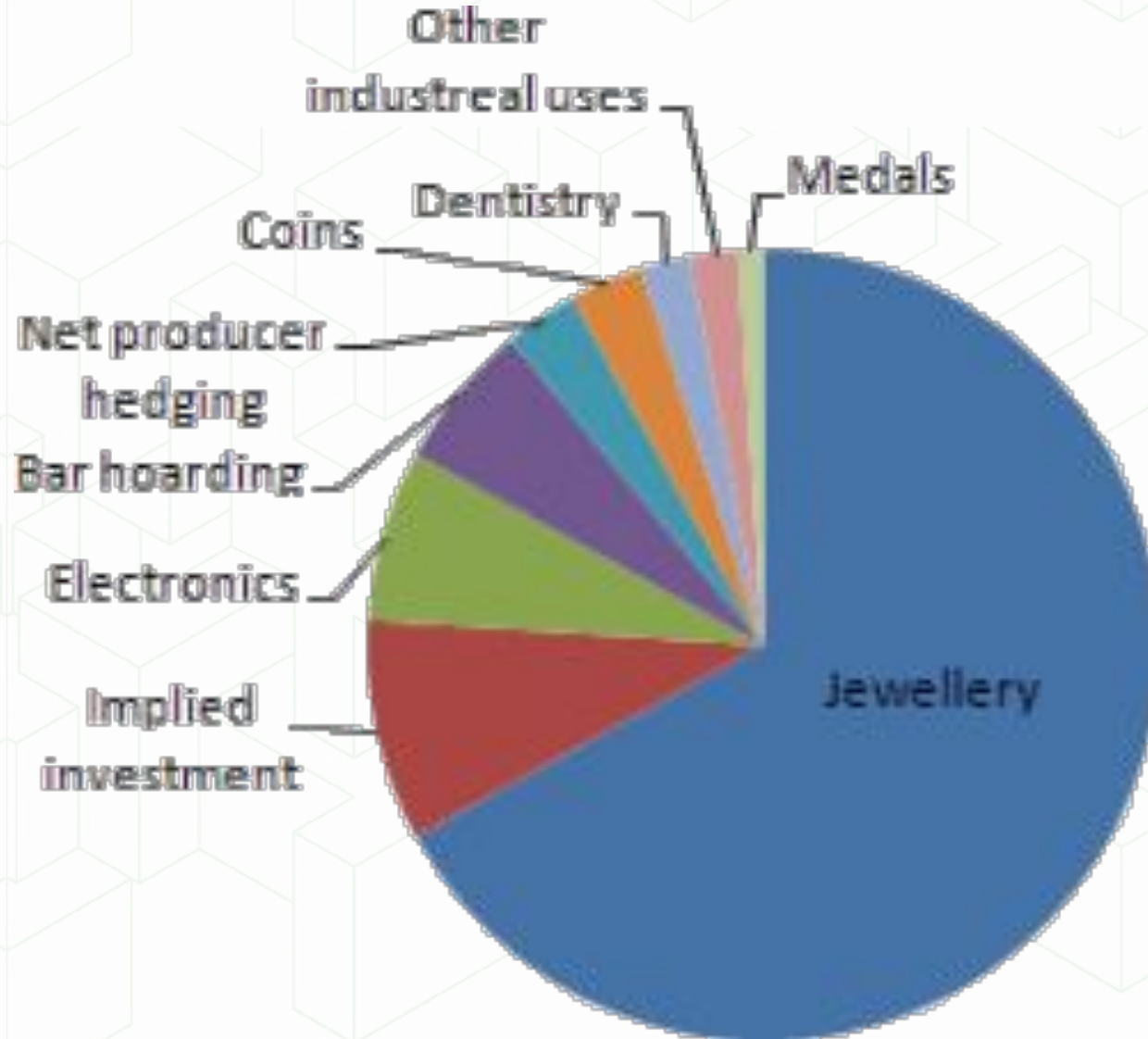


ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Использование золота



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем





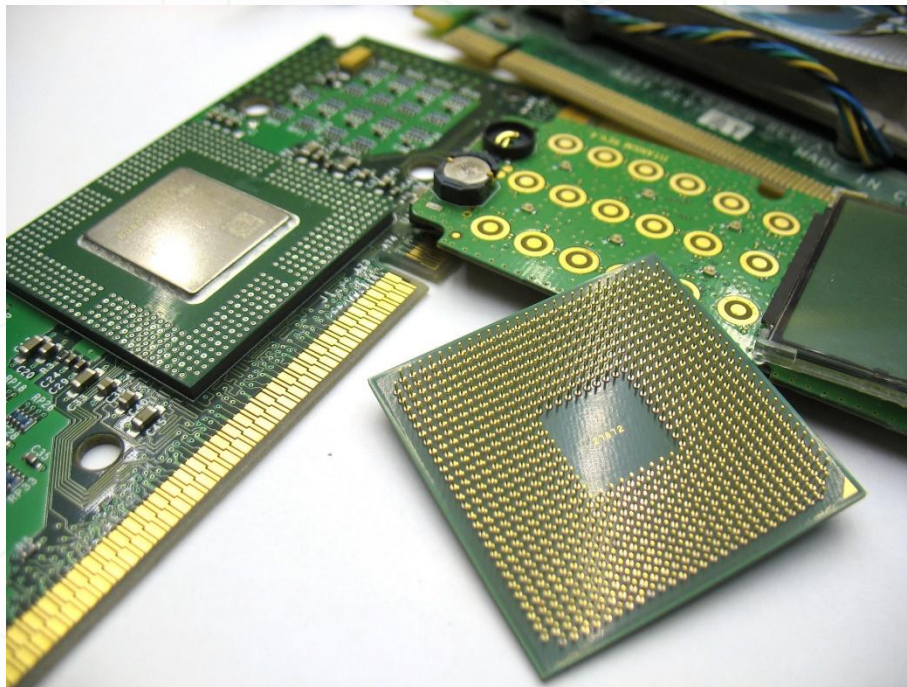
ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Применение золота



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем

Покрyтия
контактов.
Защита от
коррозии.
Ауротерапия.
Еда.
Драгоценности.



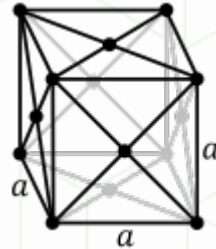


ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Алюминий (Al)



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем



Физические свойства

Плотность	2.70 г/см ³	Т плавления	660 °С
Скорость звука	5000 м/с	Т испарения	2470°С
ТКЛР	23.1 10 ⁻⁶ /К	Твердость	2.75

Электрофизические свойства

Уд. сопротивление	0.027 мкОм*м	Магн.проницаемость	пара
-------------------	--------------	--------------------	------

Теплофизические свойства

Теплопроводность	237 Вт/(м·К)		
Уд.теплоемкость	897 Дж/(кг·град)		

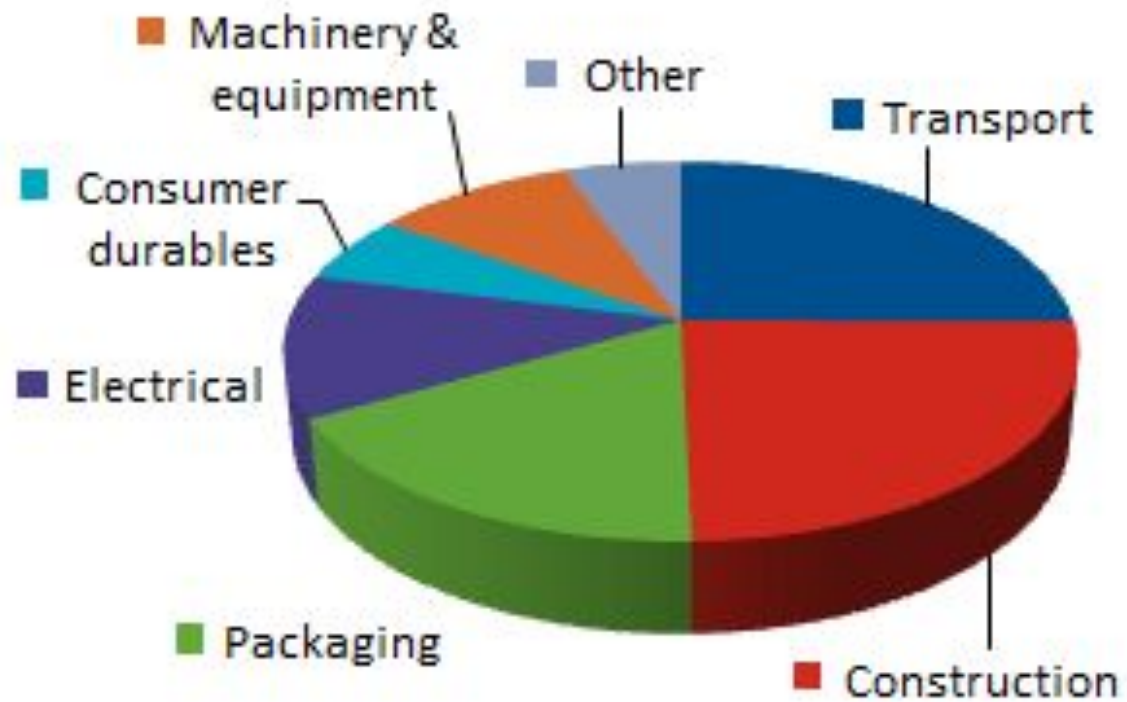


ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Использование алюминия



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем





ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Применение алюминия



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем

Транспорт
Упаковка
Конструкционные материалы
ЛЭП
Напыление
Радиаторы
Корпуса приборов
Экраны
Электроды конденсаторов
Хранение информации (CD)
Монеты
Товары широкого



A2 Production AUDI AG Neckarsulm – Assembly – Hang-on parts





Алюминий и его сплавы



1199. Чистый 99,99% алюминий. Бывает почти исключительно в виде фольги.

1050 и 1060. Чистый 99,5% и 99,6% соответственно. Из-за высокой теплопроводности иногда используется как материал для радиаторов. Мягко, легко гнется. Провода, пищевая фольга, посуда.

6061 и 6082. Сплавы: 6061 — Si 0,6%, Mg 1,0%, Cu 0,28%, 6082 — Si, Mg, Mn. Первый более распространен в США, второй — в Европе. Легко точить, фрезеровать. Прочен. Легко поддается сварке, паяется твердыми припоями. Легко анодируется. Плохо гнется.

6060. Состав: Mg, Si. Более мягко, чем 6061 и 6082.

5083. Сплав с магнием (>4% Mg). Отличная коррозионная стойкость, устойчив в морской воде. Один из лучших вариантов для деталей, работающих под дождем.

44400, он же «**силумин**». Сплав с большим процентом кремния (Si >8%). Литейный. Низкая температура плавления, при пайке твердыми припоями риск расплавить саму деталь. Хрупко, при изгибе ломается. На изломе видны характерные кристаллы.

7075. 2,1-2,9% Mg, 5,1-6,1% Zn, 1,2-1,6% Cu. Очень своеобразный сплав, отличается даже цветом (пленка окислов слегка золотистая). Неожиданно твердый для алюминия, по твердости сравним с мягкой сталью. Плохо анодируется. Не паяется вообще. Не сваривается вообще. Не гнется и не куется вообще. Не годится для литья. Используется для винтов в велосипедах, в оружии (материал многих деталей винтовки M16).



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Переработка и повторное использование



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем

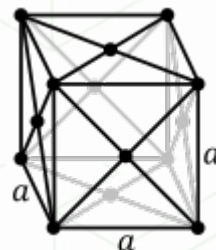


В среднем на каждого человека Земли приходится 80 кг алюминия (350-500 кг в развитых странах, 35 кг в развивающихся)

В Европе перерабатывается 42% алюминиевых банок, 85% конструкционного алюминия и 95% алюминия из транспорта



Никель (Ni)



Физические свойства			
Плотность	8.90 г/см ³	Т плавления	1455 °С
Скорость звука	4900 м/с	Т испарения	2730°С
ТКЛР	13.4 10 ⁻⁶ /К	Твердость	4
Электрофизические свойства			
Уд. сопротивление	0.069 мкОм*м	Магн.проницаемость	ферро
Теплофизические свойства			
Теплопроводность	91 Вт/(м·К)		
Уд.теплоемкость	444 Дж/(кг·град)		



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Применение никеля



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем

Покрытие контактов

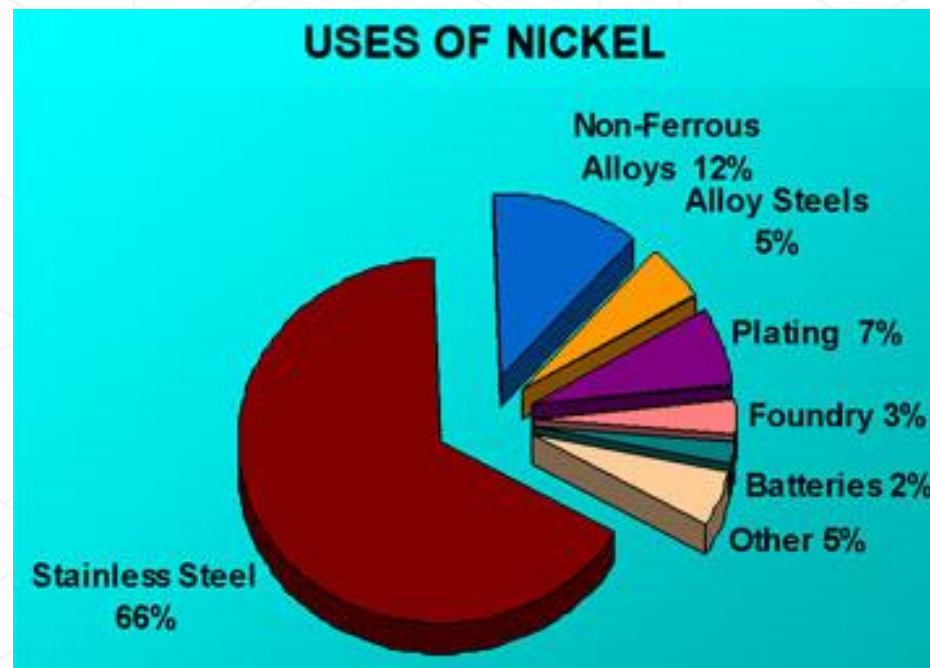
Тоководы у ламп (платинит)

Защитные слои

Монеты

Элементы питания (NiCd,
NiMH)

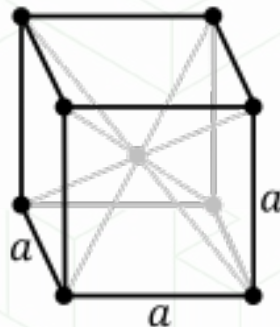
Сплавы:





ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Железо (Fe)



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем

Физические свойства

Плотность	7.87 г/см ³	Т плавления	1538 °С
Скорость звука	5120 м/с	Т испарения	2862°С
ТКЛР	11.8 10 ⁻⁶ /К	Твердость	4

Электрофизические свойства

Уд. сопротивление	0.096 мкОм*м	Магн.проницаемость	ферро
-------------------	--------------	--------------------	-------

Теплофизические свойства

Теплопроводность	80 Вт/(м·К)		
Уд.теплоемкость	449 Дж/(кг·град)		



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Применение железа (стали)

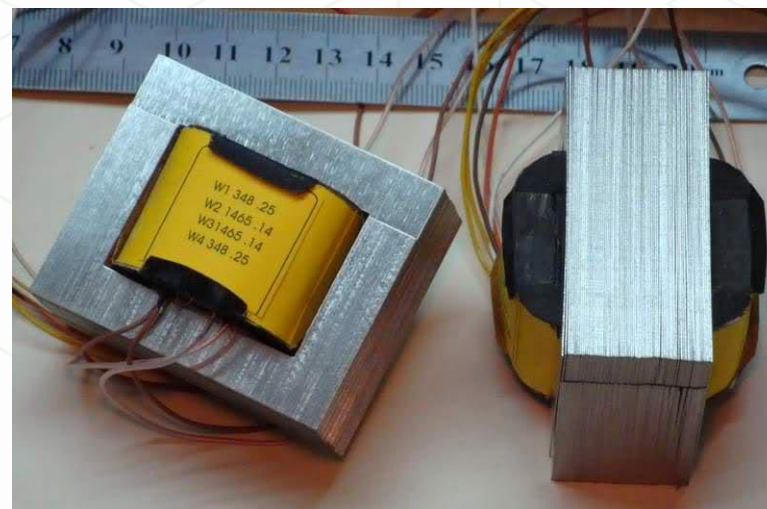


ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем

Метизы
Соединители
Контурсы заземления.
Сердечники трансформаторов,
дросселей

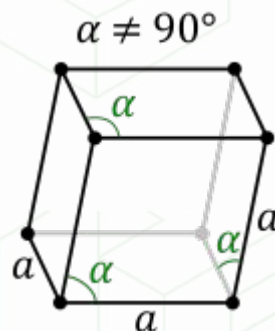


Коррозия





Ртуть (Hg)



Физические свойства

Плотность	13.5 г/см ³	Т плавления	-39 °С
Скорость звука	1451 м/с	Т испарения	356°С
ТКЛР	60.4 10 ⁻⁶ /К	Твердость	-

Электрофизические свойства

Уд. сопротивление	0.069 мкОм*м	Магн.проницаемость	диа
-------------------	--------------	--------------------	-----

Теплофизические свойства

Теплопроводность	8.3 Вт/(м·К)		
Уд.теплоемкость	140 Дж/(кг·град)		



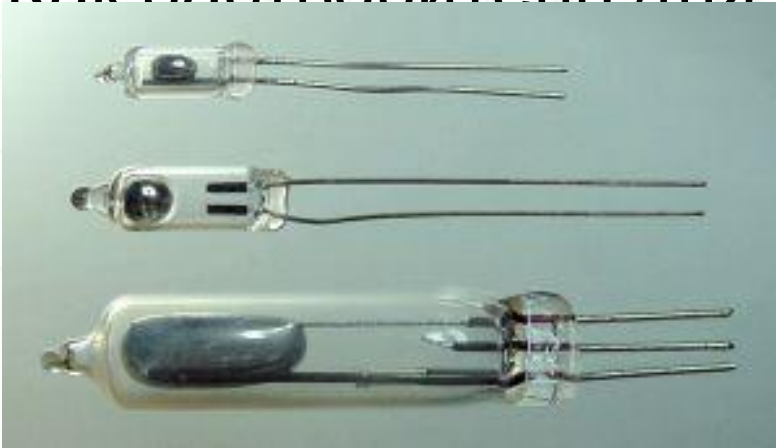
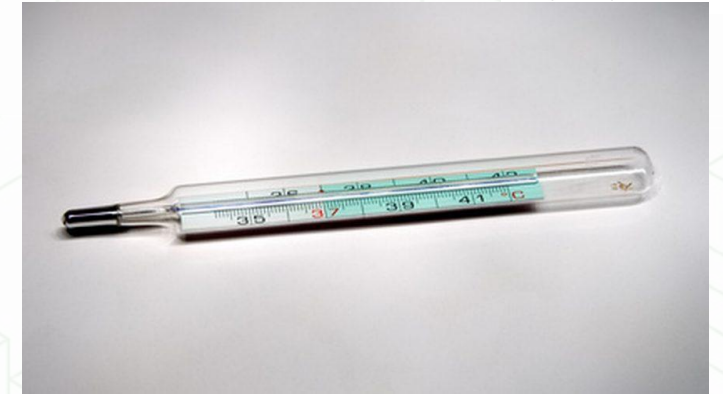
ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Применение ртути



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем

Жидкий контакт.
Люминесцентные лампы.
Вакуумные насосы.
Термометры, датчики
давления.
Как растворитель для



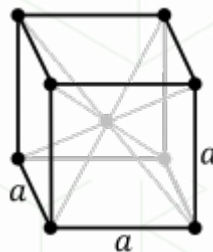
«Микрон ртутного столба» и



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого



Вольфрам (W)



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем

Физические свойства			
Плотность	19.25 г/см ³	Т плавления	3422 °С
Скорость звука	4620 м/с	Т испарения	5930°С
ТКЛР	4.5 10 ⁻⁶ /К	Твердость	7.5
Электрофизические свойства			
Уд. сопротивление	0.052 мкОм*м	Магн.проницаемость	пара
Теплофизические свойства			
Теплопроводность	173 Вт/(м·К)		
Уд.теплоемкость	132 Дж/(кг·град)		



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Применение вольфрама



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем

Нити накала: радиолампы, освещение.

Электроды дуговых ламп и сварочные электроды

Аноды рентгеновских трубок.

Карбид вольфрама – для инструментов (сверла, фрезы, биты).

Хирургические инструменты (сплав «амалой»).

Танковая броня.

Оболочки торпед и снарядов.

Сульфид титана – ВТ смазка.





Твердость материалов



0.2–0.3	caesium , rubidium	5.5	beryllium , molybdenum , hafnium , glass , cobalt
0.5–0.6	lithium , sodium , potassium	6	orthoclase , titanium , manganese , germanium , niobium , rhodium , uranium
1	talc	6–7	fused quartz , iron pyrite , silicon , ruthenium , iridium , tantalum , opal , peridot , tanzanite , jade
1.5	gallium , strontium , indium , tin , barium , thallium , lead , graphite , ice ^[13]	7	osmium , quartz , rhenium , vanadium
2	hexagonal boron nitride , ^[14] calcium , selenium , cadmium , sulfur , tellurium , bismuth , gypsum	7.5–8	emerald , hardened steel , tungsten , spinel
2–2.5	halite (rock salt)	8	topaz , cubic zirconia
2.5–3	gold , silver , aluminium , zinc , lanthanum , cerium , Jet (lignite)	8.5	chromium , silicon nitride , tantalum carbide
3	calcite , copper , arsenic , antimony , thorium , dentin	9	corundum , tungsten carbide , titanium nitride
3.5	platinum	9–9.5	silicon carbide (carborundum), titanium carbide
4	fluorite , iron , nickel	9.5–10	boron , boron nitride , rhenium diboride (<i>a</i> -axis), ^[15] stishovite , titanium diboride
4–4.5	steel	10	diamond , carbonado
5	apatite (tooth enamel), zirconium , palladium , obsidian (volcanic glass)	>10	nanocrystalline diamond (hyperdiamond , ultrahard fullerite), rhenium diboride (<i>c</i> -axis) ^[15]



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого



ПОЛИТЕХ
Институт энергетики
и транспортных систем