

# Продолжение истории: 1933 г., Ленинград (Питер)

2 важных события:

- 1) вышла первая монография по п/п (Иоффе)
- 2) Яков Ильич Френкель ввел понятие о дырочной проводимости. Он объяснил знак ЭДС Холла в некоторых случаях, кот. соответствуют движению (+) зарядов, а не (-) эл-нов. Он показал, что движение эл-нов в почти заполненной ВЗ можно описать как движ. (+) зарядов, находящихся в пустых местах ВЗ.

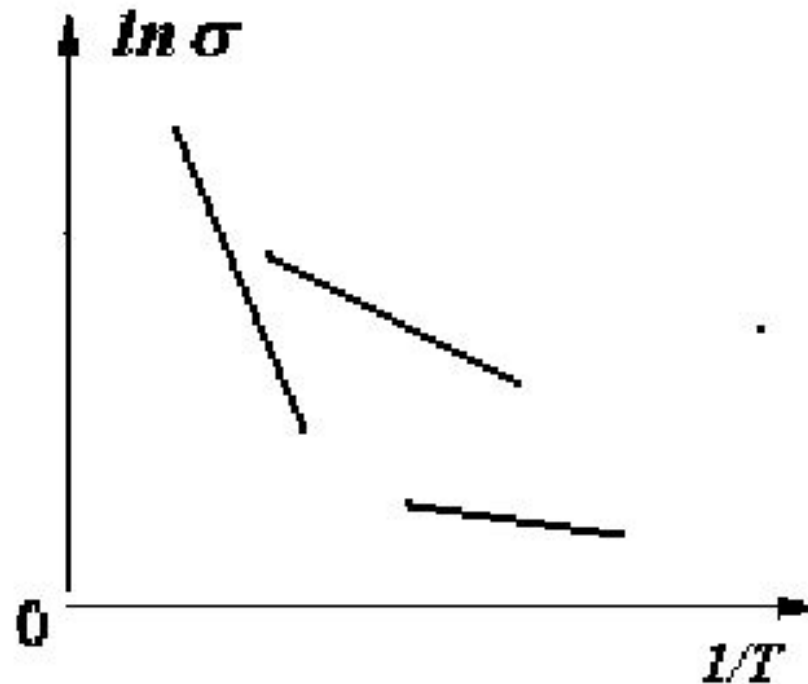


**Электронные  
полупроводники**



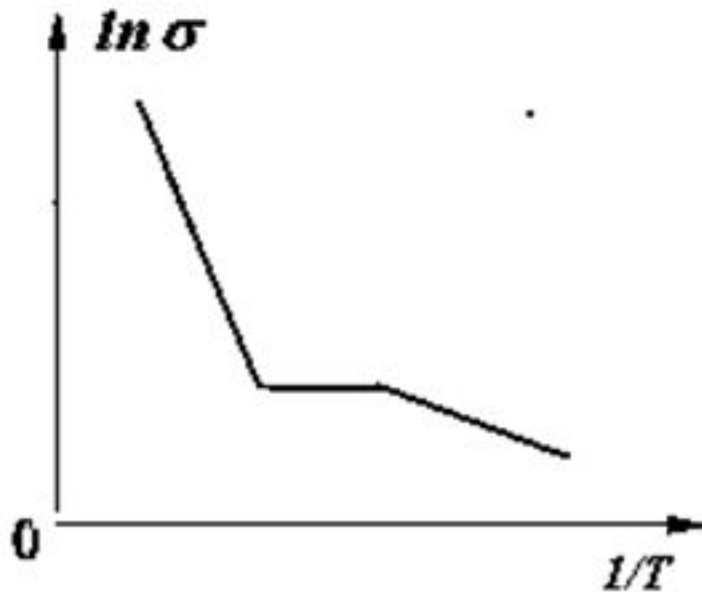
А. Ф. Иоффе

# 1934 г., обзор Гуддена



Выводы Кенигсбергера основаны на произвольной подборке данных: на одних и тех же в-вах можно получить разные значения уд. сопр. и разные ТЗ.

# Конец 30-х: дополнения к списку Кенигсбергера



8. сильная зав-т. св.-в п/п от примесей в очень маленьких концентрациях, высокотемп. часть ТЗ определяется св-ми самого п/п в-ва; два др. уч-ка - полочка и низкотемп. наклонный уч-к - зависят от

конц. и типа примесей.

9. специфические явления на контактах п/п др. с др. и с металлами.



# Технология монокристаллических полупроводников

Для воспроизводимости св-в п/п нужно научиться:

- 1) очищать их от примесей;
- 2) делать их однородными (в соседних кусочках содержание примесей не должно отличаться).

Эти условия вместе хорошо выполняются, если в-во монокристаллическое.

В 30-40 гг. наибольшие успехи в выращивании монокристаллов были достигнуты для ЩГК. Но они не были п/п, а среди п/п **наилучшие монокристаллы были у Ge.**

# Приборы на монокристаллическом Ge

Уильям Шокли – п/п диоды конец 30-х;

---

Уильям Шокли

1947 г.

Джоном Бардин

Транзистор

Уильям Браттейн

Нобел. премия 1956

Толчок к развитию технологии других п/п материалов

# Другие п/п материалы

50-е г.г. - технология Si, ближ. аналога Ge, приборы на Si,

1953 г. - В.П.Жузе, Н.А.Горюнова и А.Р.Регель открыли новый класс п/п - соедин.  $A^3B^5$  (GaAs, GaP, InSb) и их твердые растворы типа  $Al_xGa_{1-x}As$ ,

50-е г.г. - Н.А.Горюнова и Б.Т.Коломиец открыли аморфные (стеклообр.) п/п, а А.Р.Регель и А.Ф.Иоффе - жидкие.

В конце 70-х - аморфный Si.



# Полупроводниковая техника

50-е гг. - полевые транзисторы (тот же Шокли);

60-е гг. - техническое применения  $A^3V^5$  и исследование широкозонных п/п;

60 гг. - отд. транзисторы стали объединяться. в ИС → БИС → совр. компьютеры (с 1975).

60 гг. - п/п лазеры;

70 гг. - эффективные лазеры на гетеропереходах (Нобел. премия 2000г., Жорес Иванович Алферов);

70-80 гг. – эффективные солнечные элементы;

90 гг. – новый способ управления свойствами п/п – низкоразмерные системы, квантовые ямы, нити и точки.



# Максвелловское время релаксации

Перейдем от шкалы уд. сопр. к шкале более фундаментальной величины - максвелловского времени релаксации  $\tau_M$ .

Типичное значение диэл. проницаемости равно 10  $\rightarrow \epsilon\epsilon_0 = 10^{-10}$  Ф/м, и при  $\rho = 10^{-6} - 10^8$  Ом м значения  $\tau_M$  для п/п попадают в диапазон  $10^{-16} - 10^{-2}$  с.

Смысл: если время измерения  $> \tau_M$  (низкая частота измерительного сигнала), то п/п ведет себя, как проводник; если время измерения  $< \tau_M$ , то как диэлектрик.

# Классификация на основе ширины ЗЗ



нет ЗЗ – металл;

малое перекрытие ВЗ и ЗП – полуметалл;

ВЗ и ЗП касаются др. др. - бесщелевой п/п (серое Sn, HgCdTe);

маленькая ЗЗ - узкозонные п/п (PbTe, SnTe, InSb);

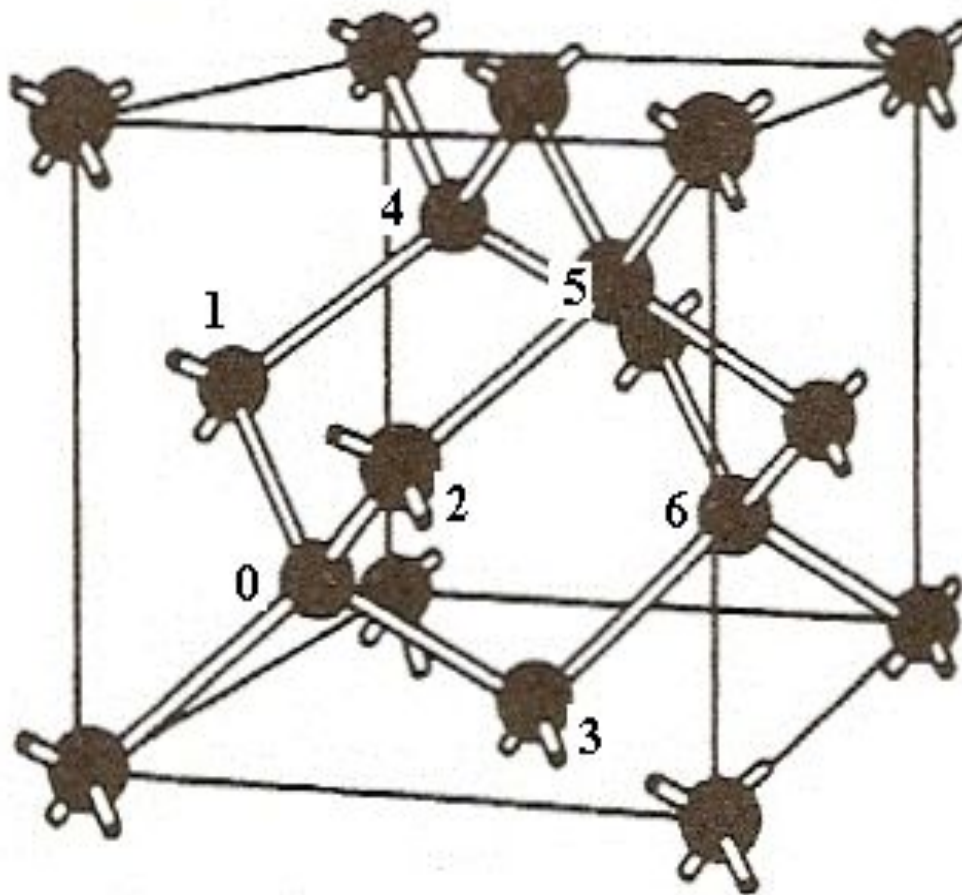
ЗЗ от 0.5 до 2.2 эВ - п/п (без эпитета, стандартные, Ge, Si, GaAs, GaP);

ЗЗ > 2.2 эВ - широкозонные п/п;

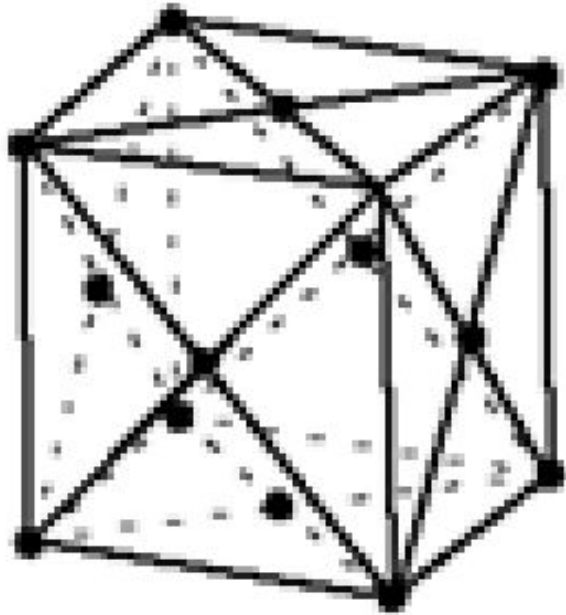
ЗЗ > 3.5 эВ – диэлектрики.

Границы – условные.

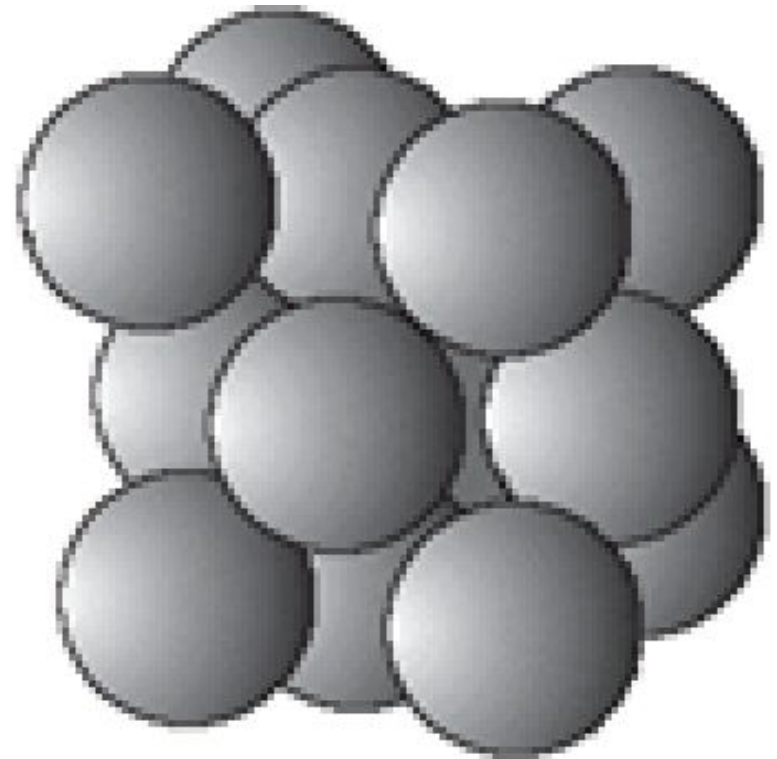
Ge, Si и серое олово,  
решетка типа алмаза



# Ячейки



**ГЦК решетка, из кот.  
производится решетка  
алмаза**



**Ячейка с правильным  
соотношением размера  
атома и ребра куба**

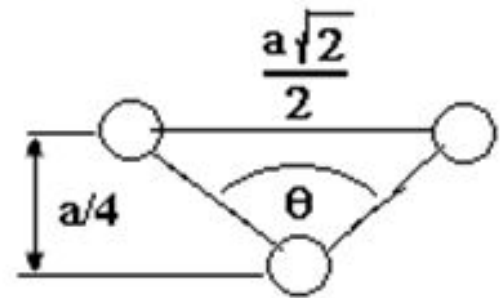


# Описание решетки алмаза

Решетку алмаза легко представить как 2 одинаковых ГЦК подрешетки, сдвинутых др. отн. др. вдоль пространственной диагонали куба на  $1/4$  ее длины.

Все узлы решетки алмаза эквивалентны. Окружение каждого атома - правильный тетраэдр из таких же атомов (КЧ Ge = 4Ge). Угол м. направлениями на сосед. атомы  $109.5$  град. - тетраэдрический угол - удовлетворяет соотношению:

$$\operatorname{tg} \frac{\theta}{2} = \sqrt{2}$$



# Число атомов и вакансий на элементарную ячейку

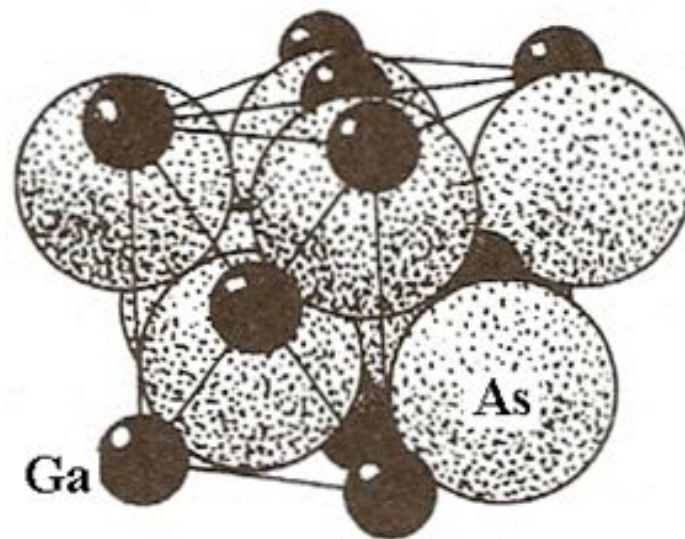
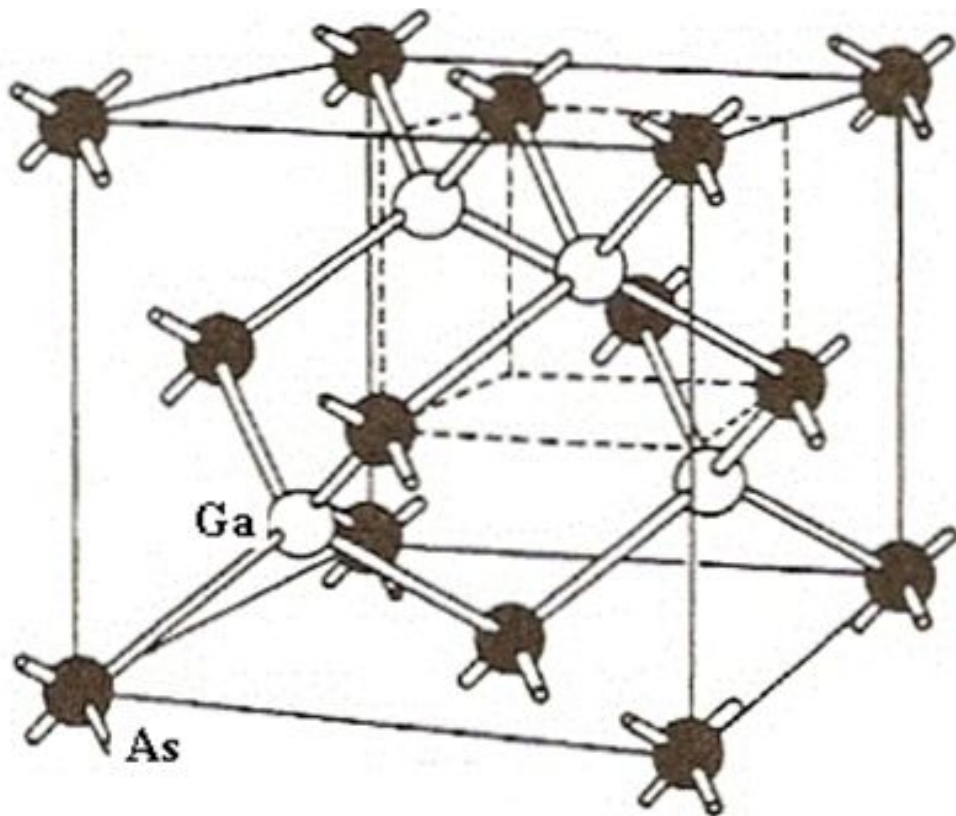
На элемент. яч-ку приходится 8 атомов: 4 внутренних + 8 в вершинах/8 ячеек + 6 в центрах граней/2 ячейки =  
=  $4+1+3 = 8$

Межатомное расстояние  $d = 1/4$  простр. диагонали =  
 $= \frac{\sqrt{3}a}{4} = 0.433a$

Решетка не плотноупакованная, в ней 8 тетраэдр. междоузлий на ячейку: 4 пустых октанта + 1 центр куба + 12 середин ребер/4 ячейки =  $4+1+3 = 8$

Кроме того, говорят об октаэдр. МУ (КЧ = 6, как в октаэдре, но сильно искаженном). Оно находится в центре призмы, образованной атомами с NN 1-6.

# Соединения $A_3B_5$ : решетка типа сфалерита $ZnS$ , алмазоподобная



# Описание решетки типа сфалерита

Главное отличие от решетки типа алмаза – исходные ГЦК подрешетки содержат разные атомы (напр., катионная под-ка Ga и анионная As).

В ячейке по 4 атома каждого сорта и по 4 тетра-МУ каждого сорта.

КЧ Ga = 4 As и КЧ As = 4 Ga.



Постоянные решетки  $a$  и межатомные расстояния  $d$   
(в ангстремах) для некоторых алмазоподобных  
полупроводников.

	алмаз	Si	Ge	$\alpha$ -Sn	GaAs	GaP	InAs	InSb
$a$	3.56	5.43	5.63	6.46	5.63	5.44	6.06	6.46
$d$	1.54	2.35	2.44	2.80	2.44	2.36	2.62	2.80