

IV НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ



**МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВАЯ БАЗА МЕТАЛЛОВ
ВЫСОКИХ ТЕХНОЛОГИЙ**

ОСВОЕНИЕ, ВОСПРОИЗВОДСТВО, ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Москва, ФГБУ «ВИМС», 3–4 декабря 2025

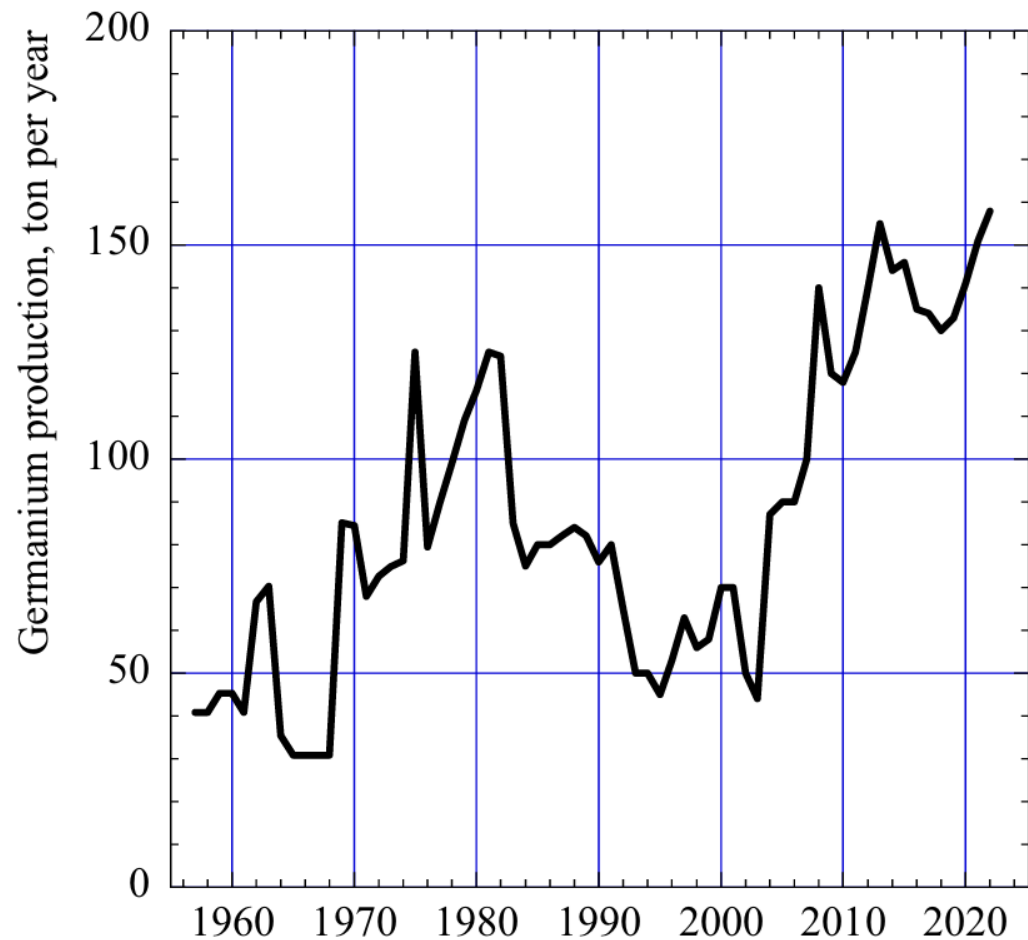


**Перспективы применения
германия в оптоэлектронике.**

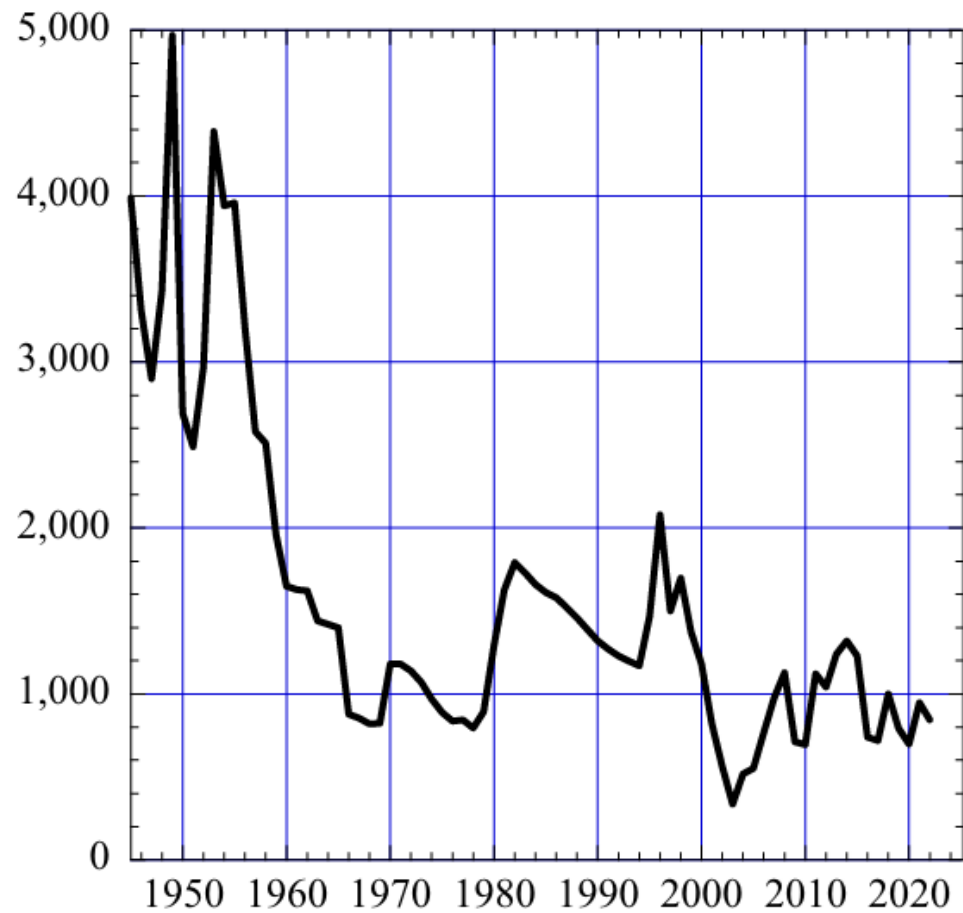
А.В. Наумов

АСТРОН

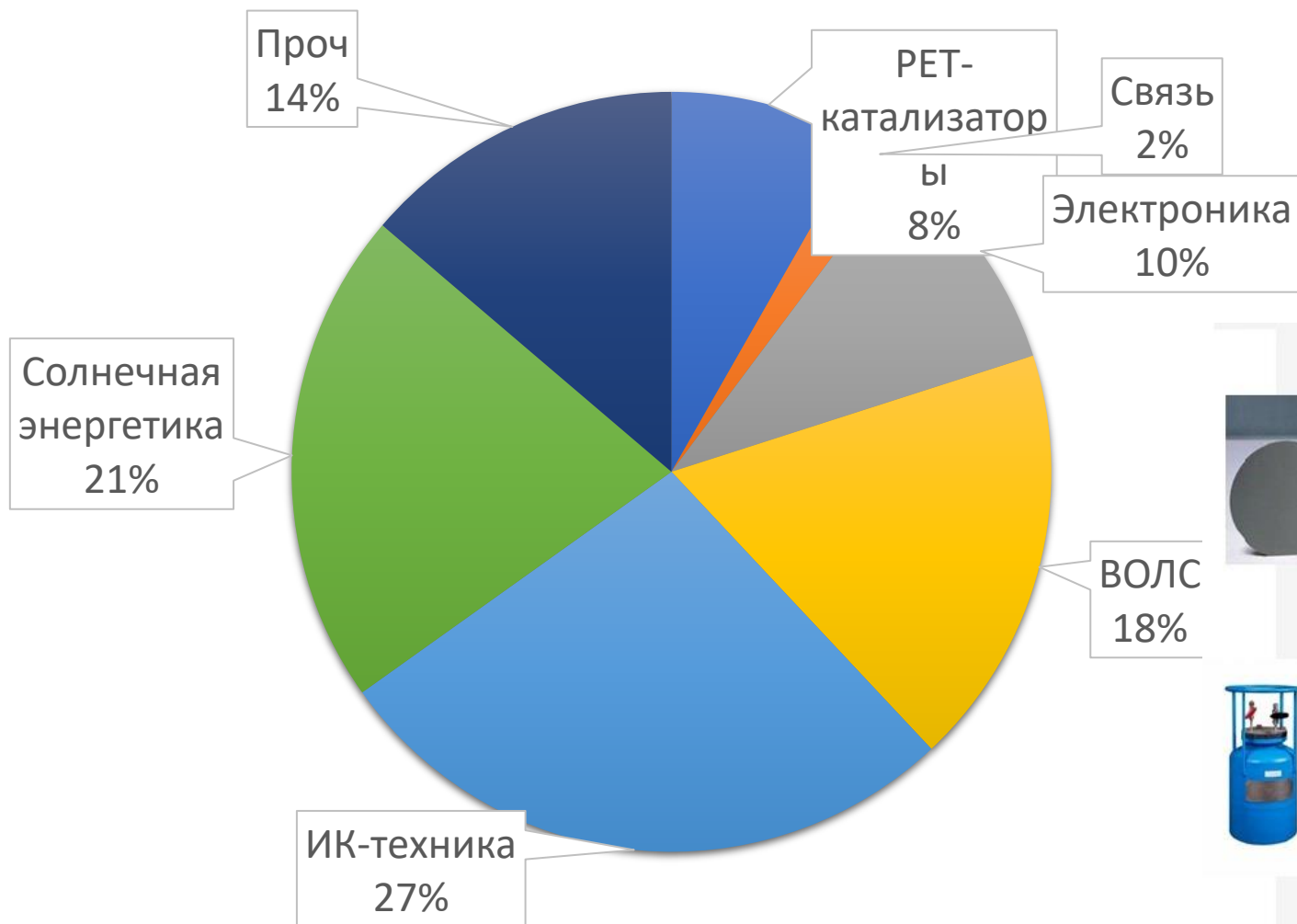




Динамика мирового производства
германия 1960-2023 гг.



Динамика мировых цен на германий
1960-2023 гг.

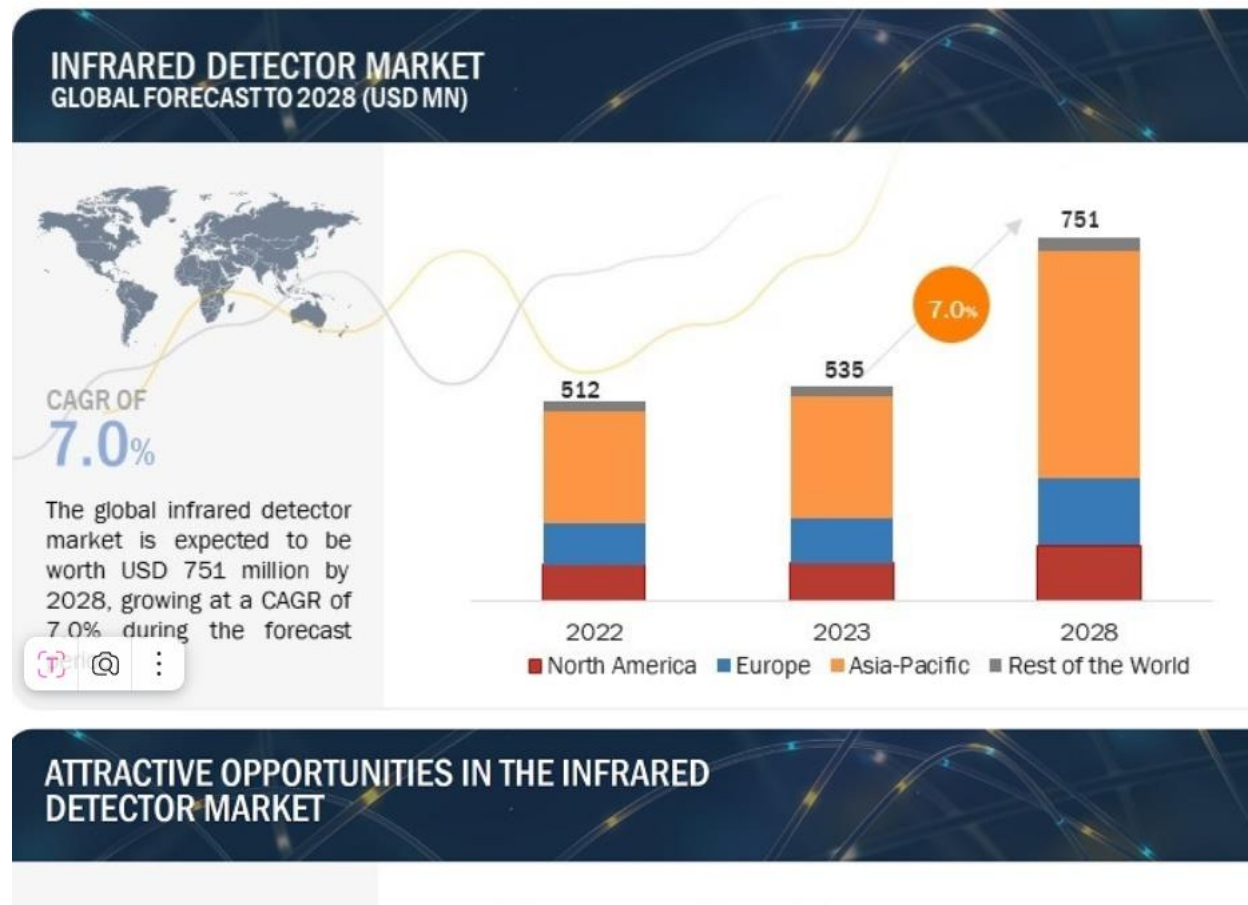


Структура потребления германия в последние годы

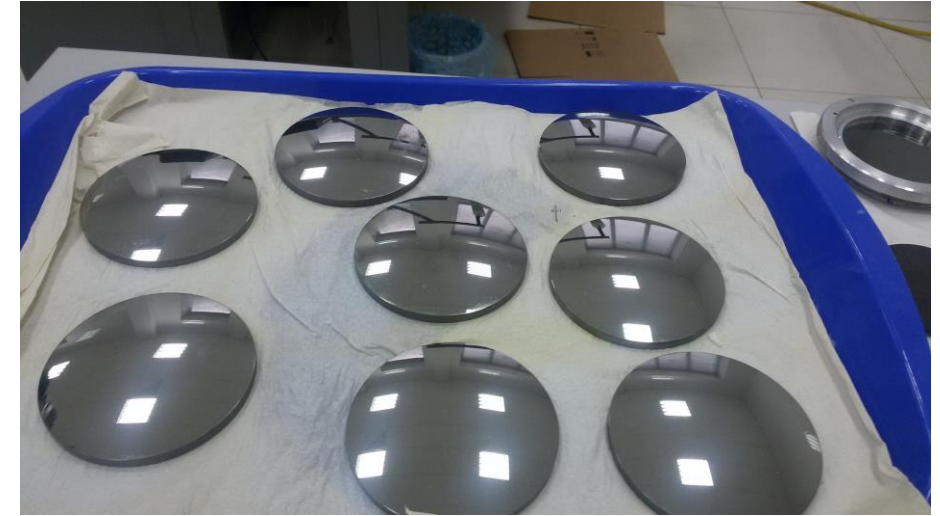




Германий для инфракрасной техники

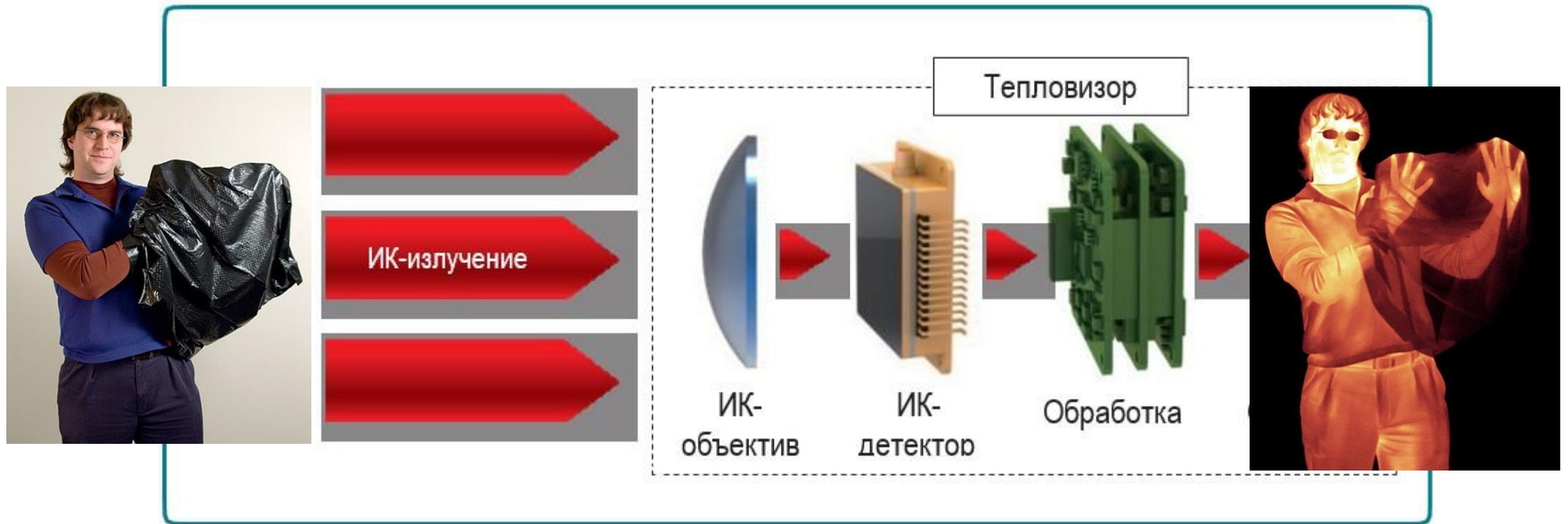


Германий в ИК-технике используется в виде линз, окон и прочих оптических элементов
из моно- или поли-кристаллов



Преимущественный метод получения – метод Чохральского

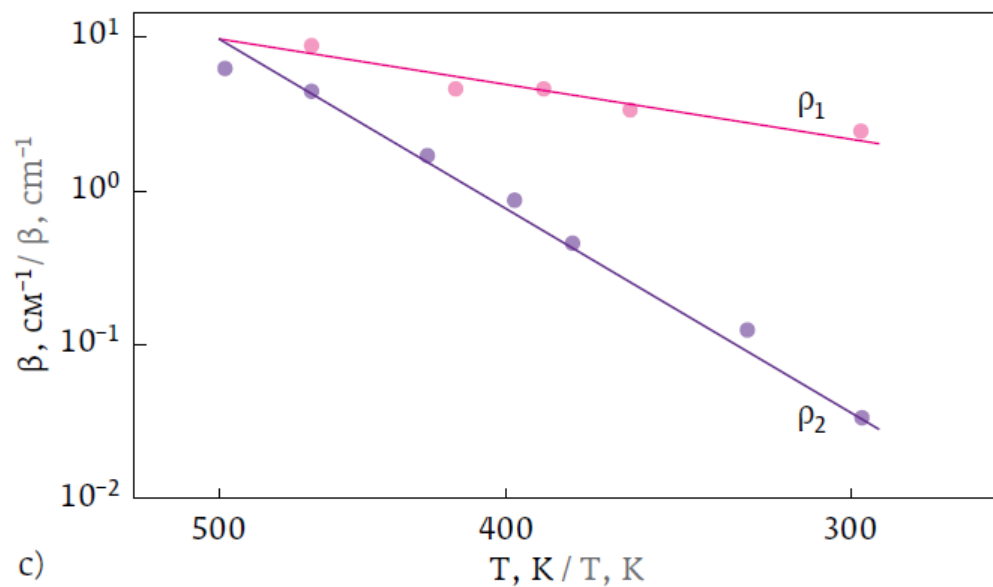
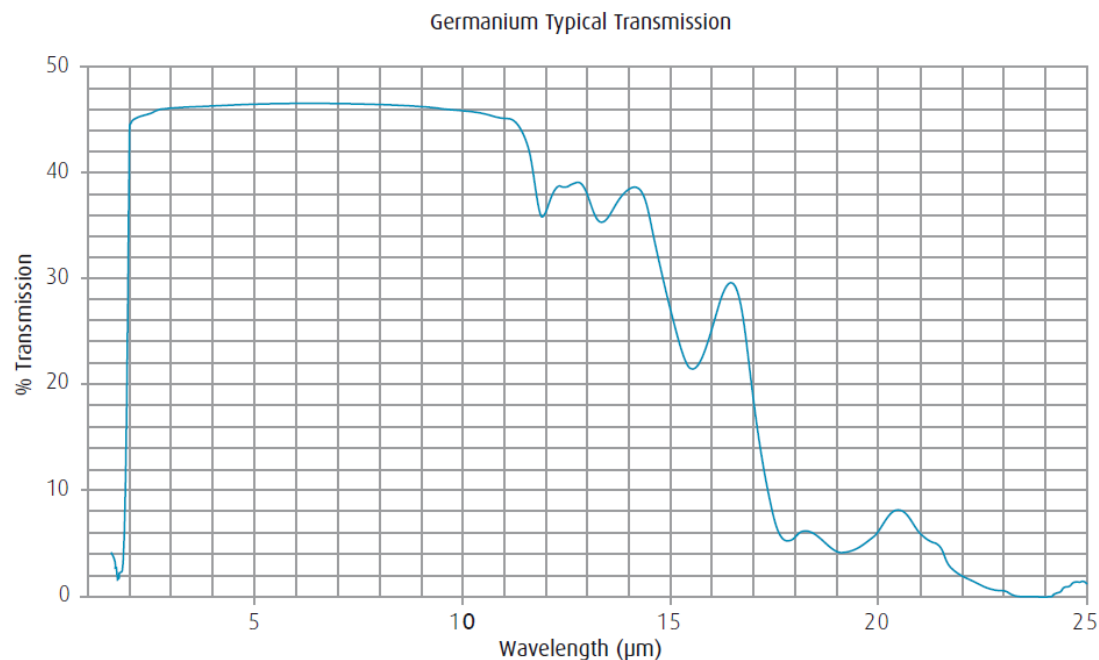
Использование германия в ИК-технике



Принцип работы и структура тепловизора

Германий – прекрасный материал для ИК-оптики, но есть недостатки

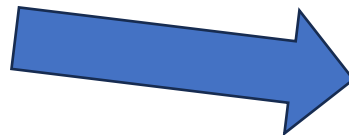
Пропускание германия в ИК-области



Зависимость коэффициента
поглощения Ge температуры и уд.
сопротивления



Альтернатива – халькогенидные стекла ?



Стекло	Область пропускания, $\mu\text{м}$ (на уровне коэффициента поглощения 1 см^{-1})	$T_g, ^\circ\text{C}$	$T_c - T_g, ^\circ\text{C}$	n (λ , $\mu\text{км}$)	n_2 $\times 10^{-18}$ $\text{м}^2/\text{Вт}$
As_2S_3	0.62-11.53	185	-	2.42 (3)	4-6
As_2Se_3	0.85-17.5	178	147	2.83 (3)	14-30
$\text{As}_{40}\text{S}_{30}\text{Se}_{30}$	0.75-12.5	180	-	2.61 (3)	14.5
$\text{As}_{40}\text{Se}_{40}\text{Te}_{20}$	1.23-18.52	140	-	2.9 (5)	>20
GeSe_4	0.75-17	163	-	2.48 (1.55)	13
$\text{Ge}_{25}\text{Sb}_{10}\text{S}_{65}$	0.65-11.0	315	>200	2.25 (1.55)	2-5
Ge-As-Se-Te $\text{Ge}_{30}\text{As}_{10}\text{Se}_{30}\text{Te}_{30}$	1.2-17.0	260	225	2.8 (10.6)	>20
$\text{Ge}_{21}\text{Te}_{76}\text{Se}_3$	2 -20	160	123		
$\text{Ge}_{15}\text{Ga}_{10}\text{Te}_{75}$	2 - 25	172	≥ 113	3.415	



Достоинства и недостатки - Ge vs. ХГС

№ п/п	Параметр	Халькогенидная оптика	Германиевая оптика
1.	Спектральный диапазон	<p><u>Сходство:</u> Оба материала являются классическими материалами для среднего (MWIR, 3-5 мкм) и длинноволнового (LWIR, 8-14 мкм) инфракрасного диапазона. Они пропускают излучение там, где обычные силикатные стёкла (видимый диапазон) и даже кварц непрозрачны.</p> <p><u>Отличие:</u> Некоторые марки халькогенидных стёкол могут расширять диапазон пропускания в дальнюю ИК-область (вплоть до 20 мкм), где германий уже становится непрозрачным.</p>	
2.	Тепловые свойства (критически важный параметр для ИК-оптики)	Обладают крайне низким термооптическим коэффициентом (dn/dT). Оптическая система на основе таких стёкол значительно менее чувствительна к перепадам температур и может сохранять фокусировку без сложных и дорогих систем атермализации. Это упрощает и удешевляет конструкцию прибора.	<p>Обладает очень высоким термооптическим коэффициентом (dn/dT). При нагреве линзы показатель преломления (n) очень сильно увеличивается. Это приводит к сильной расфокусировке и абберациям оптической системы при изменении температуры окружающей среды.</p> <p>Германиевые линзы практически всегда требуют атермализации (комплексирования с другими материалами или механической компенсации) в приборах, работающих в широком температурном диапазоне (например, военная техника, наружные камеры).</p>

Достоинства и недостатки - Ge vs. ХГС

3.	Технологичность и стоимость	<p>Изготавливаются по стекольной технологии (плавление шихты и литье). Это позволяет наладить крупносерийное и дешевое производство методом прессования.</p> <p>Заготовки линз (преформ) можно отливать и прессовать с высокой точностью, минимизируя последующую механообработку.</p>	<p>Производится методом Чохральского (монокристалл), что является дорогим методом.</p> <p>Обработка (шлифовка, полировка) сложна и трудоемка из-за хрупкости материала.</p> <p>Высокая стоимость сырья и обработки делает германиевые элементы дорогими.</p>
4.	Механические и эксплуатационные свойства	<p>Мягкие (легко поцарапать) и в разной степени гигроскопичные (некоторые составы требуют защитных покрытий от влаги).</p> <p>Механическая и климатическая стойкость обычно ниже, чем у германия</p>	<p>Твердый, но хрупкий материал. Не гигроскопичен, обладает хорошей химической стойкостью в большинстве сред</p>
5.	Вес	<p>Имеет плотность ниже, чем у германия, поэтому линзы из халькогенидных стекол имеют меньший вес, что может быть важно для создания облегченных оптических систем</p>	<p>Имеет высокую плотность, что делает его самым тяжелым из распространенных ИК-материалов</p>

Итог – ХГС займут значительную долю рынка ИК- оптики, но...

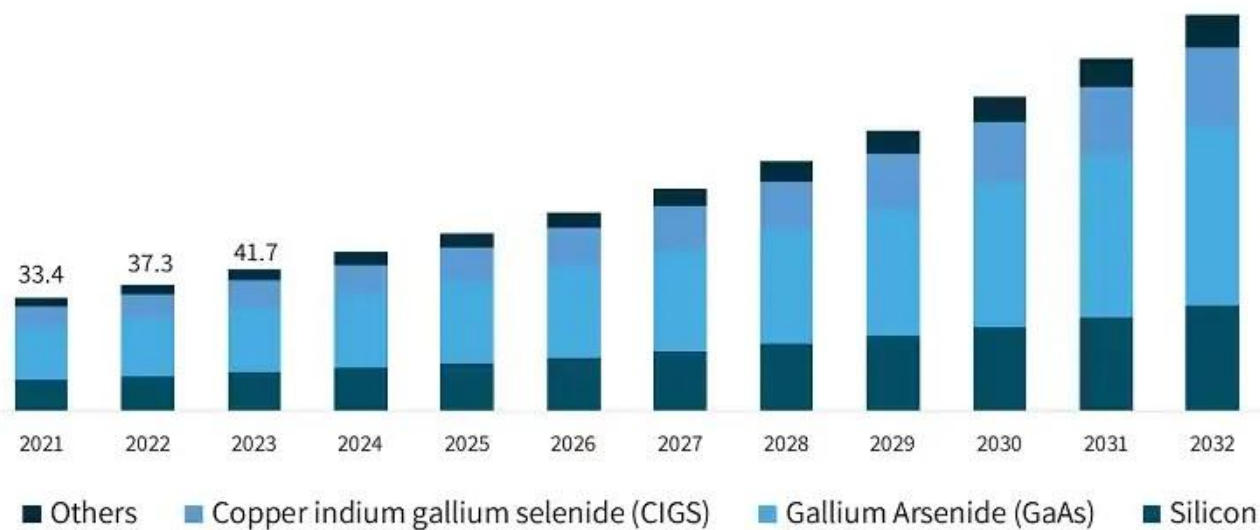
Спецификация 3. Сравнение стоимости германия и халькогенидных стекол различных составов

ИК- материал						Цена	(Ge:1) Процент
	Ge	As	Se	<u>Te</u>	Sb		
Ge	100%	-	-	-	-	\$1,760	100%
	\$1,760	-	-	-	-		
Ge/As/Se (1)	33%	12%	55%	-	-	\$608	34.5%
	\$581	\$0.2	\$26.7				
Ge/As/Se (2)	10%	40%	50%	-	-		
				-	-		
Ge/As/Se/ <u>Te</u>	30%	13%	32%	25%	-	77.00	
					-		
Ge/Sb/Se	28%		60%		12%	\$525	29.8%
	\$493		\$30.2		\$0.9		
As/Se	-	40%	60%	-	-	\$30.9	1.8%
	-	\$0.7	\$30.2	-	-		

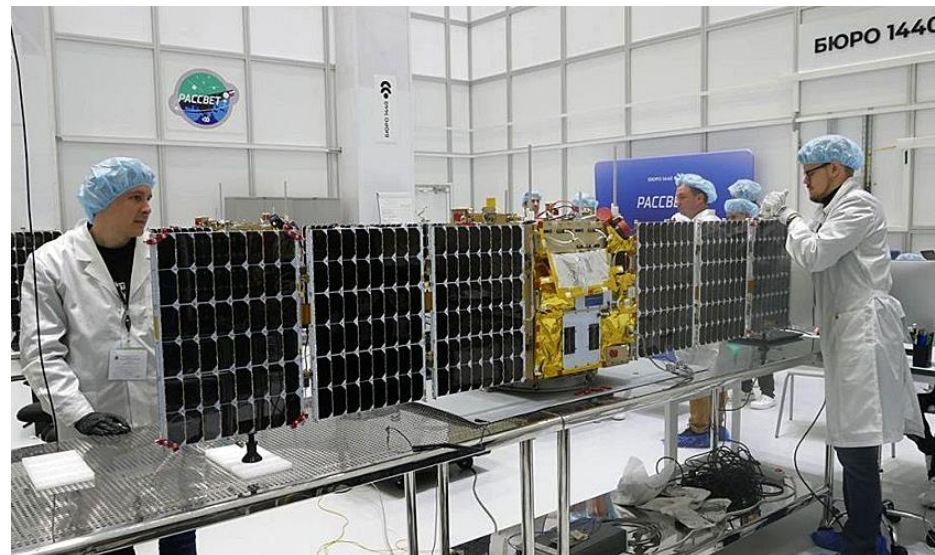
германий, как материал, все равно будет нужен.....

Германий для космической солнечной энергетики и оптоэлектроники

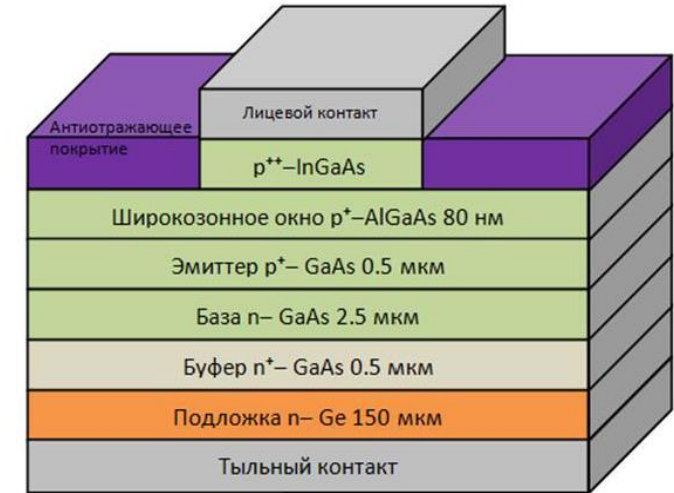
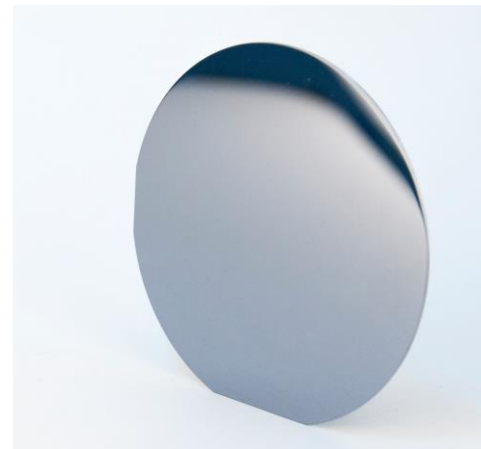
Satellite Solar Cell Materials Market Size, By Material, 2021 - 2032 (USD Million)



Source: www.gminsights.com



Германий в оптоэлектронике и солнечной энергетике используется в виде малодислокационных подложек из монокристаллов



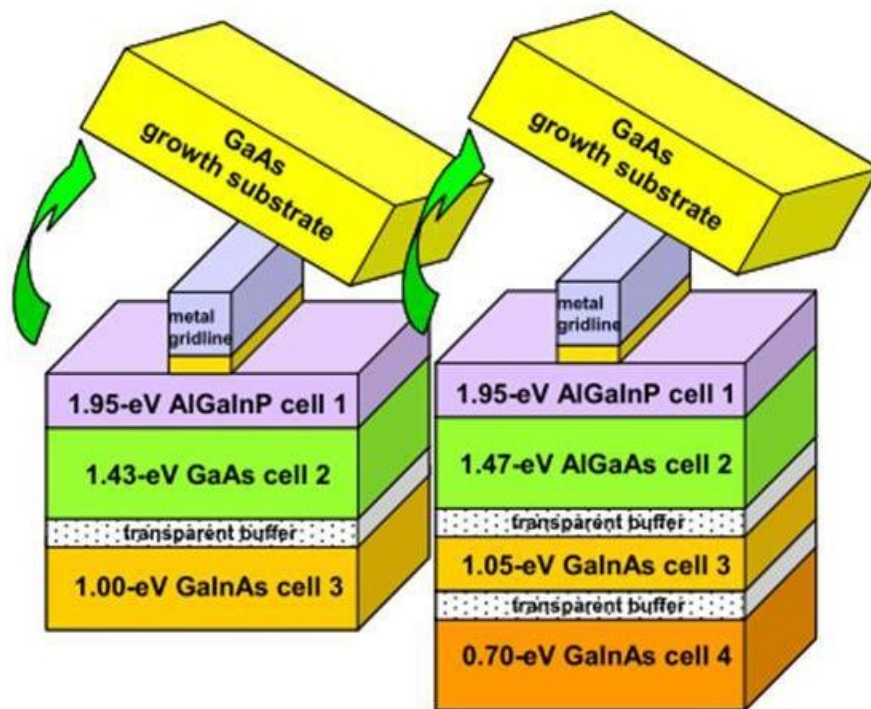
Преимущественный метод получения – метод Чохральского, либо ВНК



КОСМИЧЕСКАЯ ФОТОВОЛЬТАИКА: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ

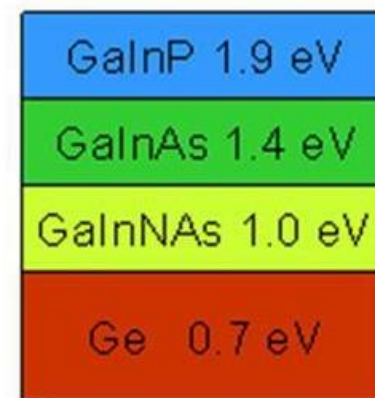
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ КАСКАДНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Схематическое изображение поперечного сечения трехпереходного (а) и четырехпереходного ФЭП на основе вертированной метаморфной структуры



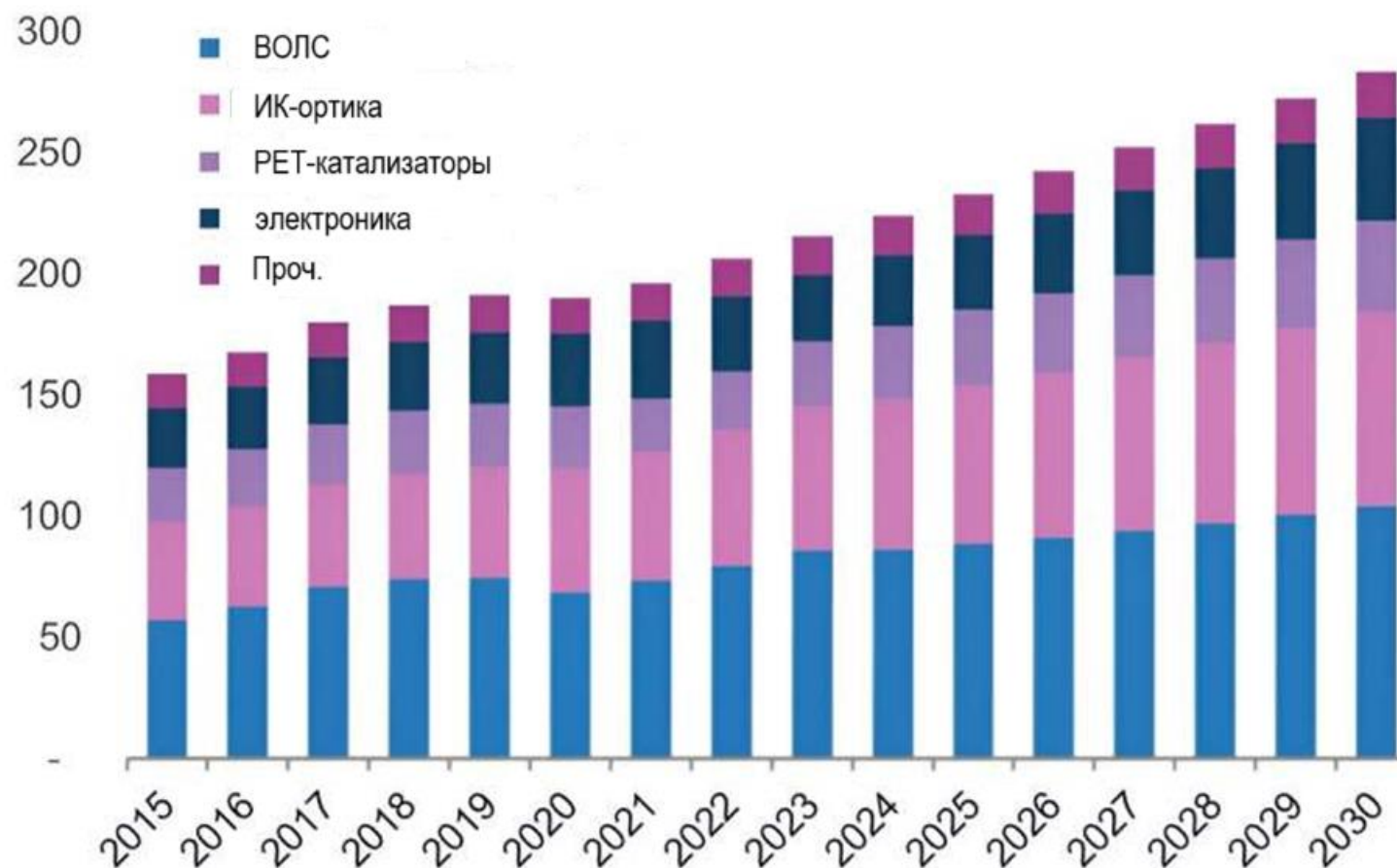
Возможный путь развития каскадных ФЭП с азотом в сторону 5-ти и 6-ти переходов

$$V_{oc} \sim 5 \text{ V}$$



Германий будет нужен и вопрос обеспечения сырьевыми источниками является критически важным для РФ

Потребление германия, тонн





Спасибо за внимание

