

«Приборы и применения фотоники»

Лектор

**профессор факультета лазерной фотоники и
оптоэлектроники Университета ИТМО**

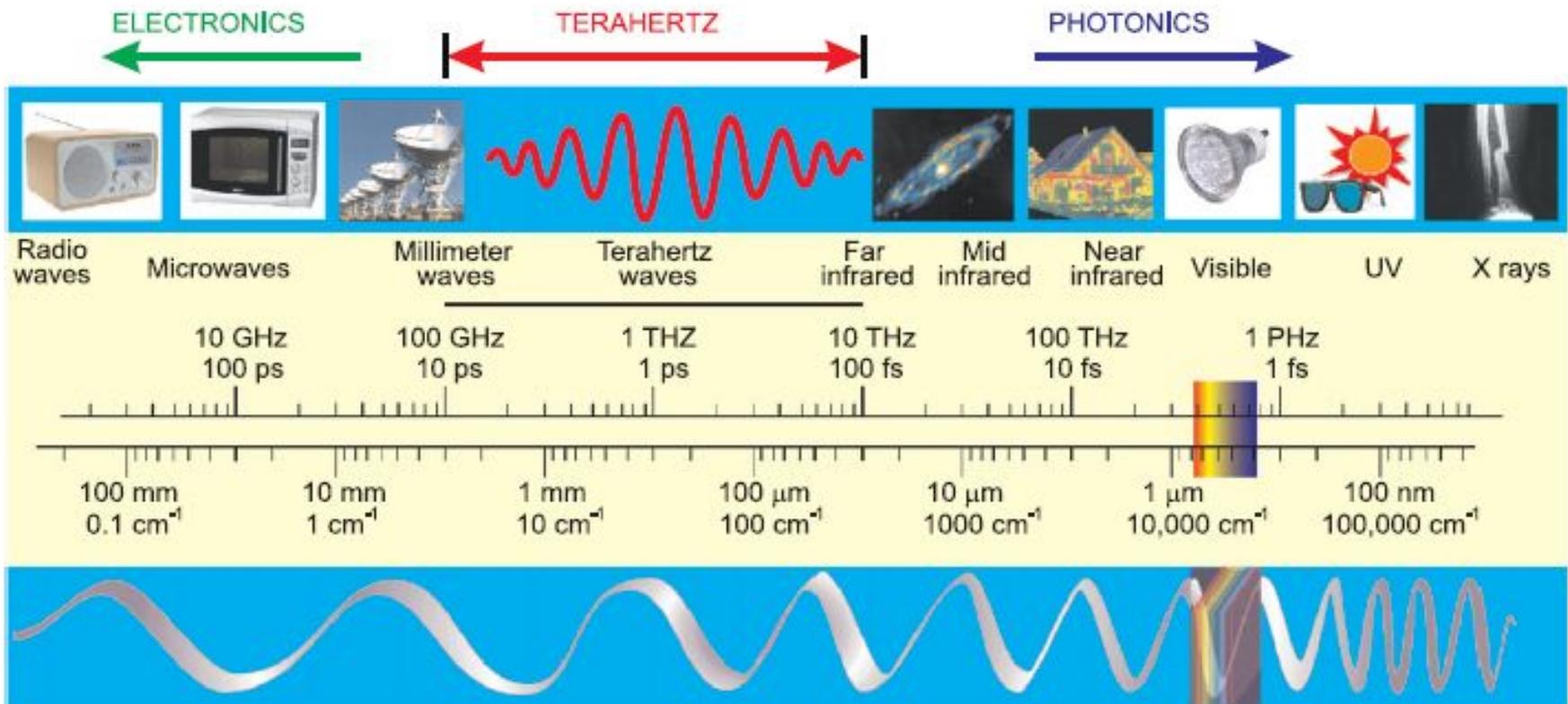
Мынбаев Карим Джафарович

karim.mynbaev@niuitmo.ru

Фотони́ка — дисциплина, занимающаяся фундаментальными и прикладными аспектами работы с оптическими сигналами, а также созданием на их базе устройств различного назначения.

Фотоника:

- изучает генерацию и детектирование фотонов, а также управление ими в видимом и ближних к нему диапазонах спектра электромагнитного



- **Фотоника** занимается контролем и преобразованием оптических сигналов в другие виды сигналов и наоборот (микроволновое излучение, электрические сигналы и т.п.)
- **Принципы фотоники** используются в широком спектре оптических, электрооптических и оптоэлектронных устройств, имеющих самые разнообразные применения. Ключевые области исследований фотоники включают волоконную и интегральную оптику, в том числе нелинейную оптику, физику и технологию полупроводниковых соединений, полупроводниковые лазеры, оптоэлектронные устройства, фотоэлектронные устройства.

Оптоэлектроника

Раздел науки и техники, рассматривающий процессы преобразования электрических сигналов в оптические, процессы распространения излучения в видимой, инфракрасной и ультрафиолетовой областях спектра в различных средах, а также процессы взаимодействия электромагнитных излучений оптического диапазона с веществом.

Фотоэлектроника

Раздел науки и техники, изучающий вопросы создания, исследования и принципы работы приборов и систем, преобразующих оптические сигналы в электрические. Главным первичным элементом таких приборов является фотоприемник. В фотоэлектронике рассматривают физико-технологические проблемы создания фоточувствительных материалов и элементов, систем охлаждения и обработки изображений

Фотоэлектрони

Обычно становление фотоэлектроники как науки связывают с открытием в 1800 году Вильямом Гершелем инфракрасного излучения. Однако, невзирая на важность этого открытия, Гершеля нельзя считать основоположником фотоэлектроники, поскольку он в своих опытах использовал в качестве приемника излучения термометр, который не превращает оптический сигнал в электрический, т.е. не является фотоэлектрическим прибором. Поэтому эра фотоэлектроники берет свое начало со времени изобретения первого фотоэлектрического приемника излучения.

Некоторые специалисты считают датой рождения фотоэлектроники 1821 год, когда немецкий физик Томас Иоган Зеебек (Thomas Johann Seebeck, 1770-1831) впервые наблюдал термоэлектрический эффект (эффект Зеебека) – возникновение электродвижущей силы в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных разных материалов, когда контакты этих материалов имеют разную температуру. То есть Зеебек изготовил термопару. Для повышения чувствительности термопары итальянский физик Леопольд Нобили (Leopoldo Nobili, 1784-1835) сначала соединяет последовательно несколько термопар в термобатарейку, а затем подбирает эффективные материалы – висмут и сурьму (1830 год), а в 1834 году итальянский физик Македонио Меллони (Macedonio Melloni, 1798-1854) использовал такую термопару для регистрации теплового излучения.

Другим тепловым приемником является болометр, появление которого (1878 год) связывают с именем американского ученого Самуэля Пирпонта Ленгли (Samuel Pierpont Langley, 1834-1906). В 1881 году Ленгли выполнил поразительные опыты – с помощью болометра и собирающего зеркала зарегистрировал на значительном расстоянии тепловое излучение от живого объекта. Очевидно, это был прообраз тепловой системы обнаружения. Болометрические приемники излучения до сих пор активно используются в технике.

Фотоэлектрони

Эпохальным в развитии фотоэлектроники можно считать открытие внутреннего фотоэффекта. Это открытие принадлежит английскому инженеру Виллоби Смиту (Willoughby Smith, 1828-1891), который, исследуя электрические свойства селена (1873 год), обнаружил зависимость его сопротивления от освещенности. Так было открыто явление фотопроводимости, основанное на **внутреннем** фотоэффекте, и которое лежит в основе работы целого класса полупроводниковых фотонных приемников излучения – фоторезисторов. Открытие Смита стало толчком для начала эры полупроводниковой фотоэлектроники.

Следовательно, у твердотельной фотоэлектроники существуют две даты рождения: 1821 год – открытие термоэлектричества и начало создания тепловых приемников оптического излучения и 1873 год – открытие фотопроводимости и начало создания фотонных приемников.

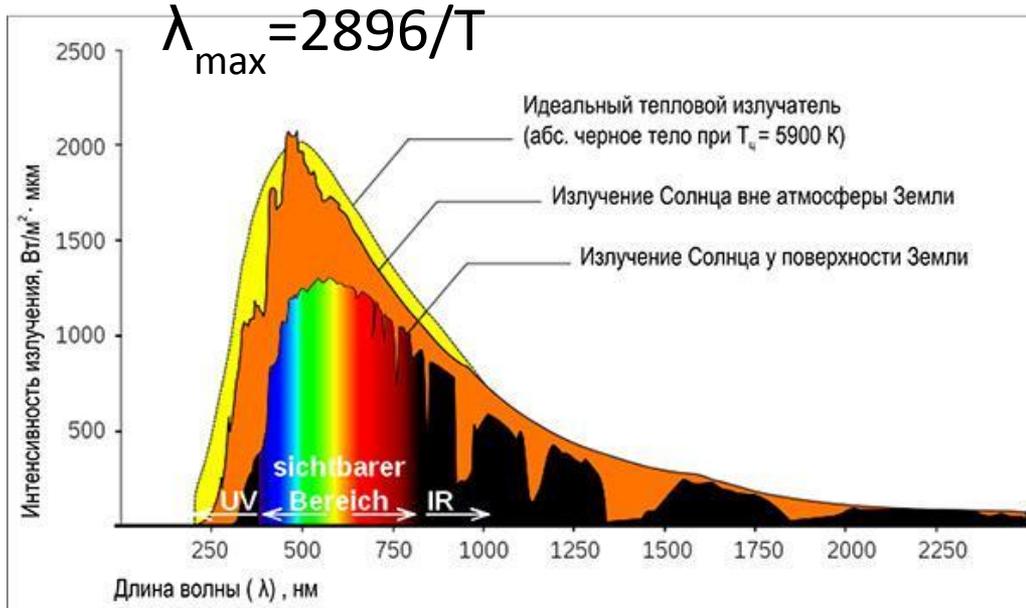
Работа приборов вакуумной фотоэлектроники основана на **внешнем** фотоэффекте. Еще в 1839 году французский физик Александр Беккерель (Alexander Bekkerel, 1820-1891) наблюдал явление фотоэффекта в электролите. Проводя серию экспериментов по исследованию электричества, Беккерель погрузил два металлических электрода в проводящий раствор и осветил солнечным светом. Между электродами возникла небольшая разность потенциалов. Потом эффект изучал немецкий физик Генрих Рудольф Герц (Heinrich Rudolf Hertz, 1857-1894). В 1887 году, работая с открытым резонатором, обнаружил, что подсветка цинковых разрядников ультрафиолетом заметно облегчает возникновение разряда. Исследование фотоэффекта показало, что вопреки классической электродинамике энергия фотоэлектрона всегда строго связана с частотой падающего излучения и практически не зависит от интенсивности излучения. В 1888-1890 годах фотоэффект изучал русский физик Александр Столетов (1839-1896). Он сделал несколько важных открытий в этой области, в частности, вывел первый закон внешнего фотоэффекта. В 1905 году Альберт Эйнштейн (Albert Einstein, 1879-1955) объяснил фотоэффект на основании гипотезы Макса Планка (Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858-1947) о квантовой природе света, за что получил Нобелевскую премию 1921 года.

ка

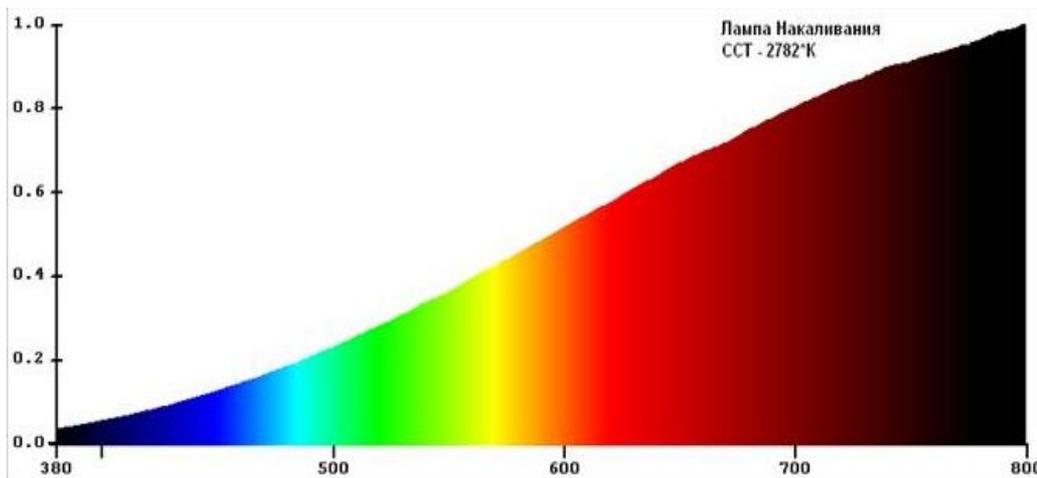
Первым этапом развития оптоэлектроники можно считать развитие оптики и осознание природы света сначала как потока частиц (например, теория «истечения»), а затем и волновых представлений о свете. Вершиной «классического» этапа развития оптики и представлений о природе света явилась электромагнитная теория, обобщенная в виде системы дифференциальных уравнений Максвелла.

Второй этап тесно связан с теми революционными преобразованиями, которые претерпела физика в начале XX в. Изучение оптических спектров поглощения и испускания привело к необходимости введения понятий о квантовых скачках и кванте действия как минимальном действии, которые ввел в 1900 г. М. Планк для объяснения спектра излучения черного тела. Впоследствии постоянная h , имеющая размерность «действия» [Дж с], была названа постоянной Планка. В 1905 г. А. Эйнштейн на основе теории Планка возродил в новой форме корпускулярную теорию света, предположив, что планковские кванты энергии $E = h\nu$ существуют в виде реальных частиц, названных им световыми квантами, или фотонами. Таким образом Эйнштейну удалось объяснить открытый ранее фотоэффект (за что он и получил Нобелевскую премию по физике). Применяв эти понятия к атому, Нильс Бор в 1913 г. объяснил простую связь частоты излучения с разницей энергий между уровнями.

Фундаментальную роль для последующего развития квантовой электроники сыграла работа А. Эйнштейна (1917 г.), в которой он на основании рассмотрения термодинамического равновесия системы молекул ввел понятие об индуцированном излучении. В 1954 г. советские ученые Н. Г. Басов и А. М. Прохоров разработали проект, а американский физик Ч. Таунс создал действующий мазер на пучке молекул аммиака. Это был первый прибор, работавший на квантовых принципах, в основе которого лежало явление усиления электромагнитных колебаний с помощью индуцированного излучения. За эти работы им была присуждена Нобелевская премия. Таким образом, 1954 г. может быть назван годом рождения квантовой электроники как самостоятельной науки.

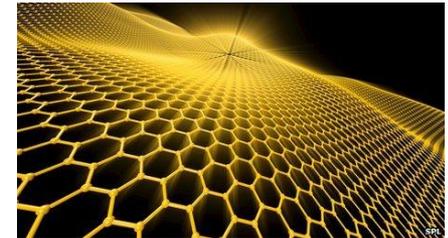


Для получения видимого излучения необходимо, чтобы температура излучающего тела превышала 570°C (температура начала красного свечения, видимого человеческим глазом в темноте). Для зрения человека, оптимальный, физиологически самый удобный, спектральный состав видимого света отвечает излучению абсолютно чёрного тела с температурой 5770 K . В телах накаливания современных ламп накаливания применяется тугоплавкий и недорогой металлический вольфрам — элемент, рекордный по высоте температуры плавления. Рабочие температуры вольфрамовых нитей ламп накаливания лежат в пределах $2000\text{-}2800^\circ\text{C}$ (при температуре плавления 3410°C) и спектр смещён в красную часть.



Лампы накаливания – от бамбука до графена

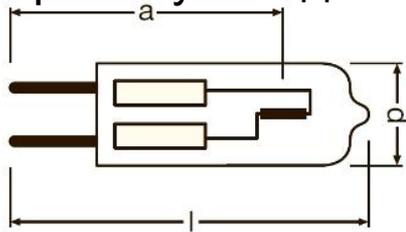
- 1840 англичанин Деларю производит первую лампу накаливания (с платиновой спиралью).
- 1854 немец Гёбель разработал первую «современную» лампу: обугленную бамбуковую нить в вакуумированном сосуде.
- 1874 А.Н. Лодыгин: угольный стержень, помещённый в вакуумированный сосуд (4-10 Лм/Вт, 5-20 часов).
- 1875—1876 П.Н. Яблочков: каолин - «нить накала» надо разогреть до высокой температуры, чтобы лампа зажглась. В первых лампах «нить накала» подогревалась спичкой, впоследствии стали использовать электрические нагреватели.
- 1878 Суон: угольное волокно в разреженной кислородной атмосфере, что позволяло получать очень яркий свет.
- 1879 Эдисон: платиновая нить. 1880 год: угольное волокно (время жизни 40 часов).
- 1890-е годы А.Н. Лодыгин: нити накала из тугоплавких металлов (в т.ч. вольфрам, молибден).
- 1890-е годы: окиси магния, тория, циркония, иттрия, осмия, тантала.
- 1900-е годы: вольфрам, заполнение аргоном. 1909 – зигзагообразная нить, 1913 – «современная лампа».



Световой выход – до 16% (светоотдача от 8 до 30 Лм/Вт)

Яркость от 10^6 кд/м² до 3×10^7 кд/м²

Срок службы до 2000 часов



Срок службы может быть повышен до 8000—12 000 часов. Светоотдача до 25 Лм/Вт.



В галогенной лампе окружающий тело накала йод (совместно с остаточным кислородом) вступает в химическое соединение с испарившимися атомами вольфрама, препятствуя осаждению последних на колбе. Этот процесс является обратимым — при высоких температурах вблизи тела накала соединение распадается на составляющие вещества. Атомы вольфрама высвобождаются таким образом либо на самой спирали, либо вблизи неё. В результате атомы вольфрама возвращаются на тело накала, что позволяет повысить рабочую температуру спирали (для получения более яркого света), продлить срок службы лампы, а также уменьшить габариты по сравнению с обычными лампами накаливания той же мощности.

Газоразрядные лампы

Газоразрядная лампа — источник света, излучающий энергию в видимом диапазоне.

Физическая основа — электрический разряд в газах

По источнику света, выходящего наружу и используемого человеком, газоразрядные лампы делятся на:

- люминесцентные лампы (ЛЛ), в которых в основном наружу выходит свет от покрывающего лампу слоя люминофора, возбуждаемого излучением газового разряда;
- газосветные лампы, в которых наружу выходит сам свет от газового разряда;
- электродосветные лампы, в которых используется свечение электродов, возбуждённых газовым разрядом.

В разрядных лампах могут использоваться разные газы: пары металлов (ртути или натрия), инертные газы (неон, ксенон и другие), а также их смеси. Наибольшей эффективностью обладают натриевые лампы, они работают в парах натрия и имеют эффективность 150 лм/Вт. Подавляющее большинство разрядных ламп — это ртутные лампы, они работают в парах ртути. Среди ртутных ламп можно упомянуть дуговые ртутные люминесцентные лампы (ДРЛ). Кроме этого, широко распространены металлогалогенные лампы (МГЛ или ДРИ) — в них используется смесь паров ртути, инертных газов и галогенидов металлов. Меньше распространены безртутные разрядные лампы, содержащие инертные газы: ксеноновые лампы, неоновые лампы и другие.

Газоразрядные лампы

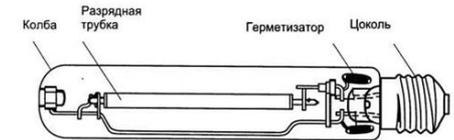
Срок службы от 3000 часов до 20000 часов.

Эффективность от 40 до 220 лм/Вт.

Цветовая температура излучения: от 2200 до 20000 К

Цветопередача: хорошая (3000 К: $R_a > 80$), отличная (4200 К: $R_a > 90$)

Компактные размеры излучающей дуги позволяют создавать световые пучки высокой интенсивности



Xe

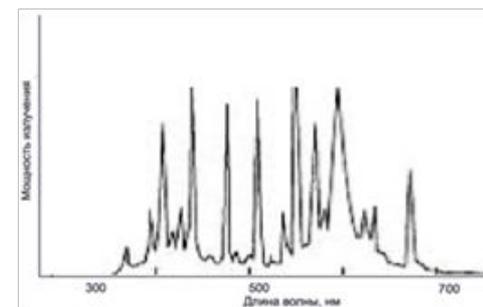
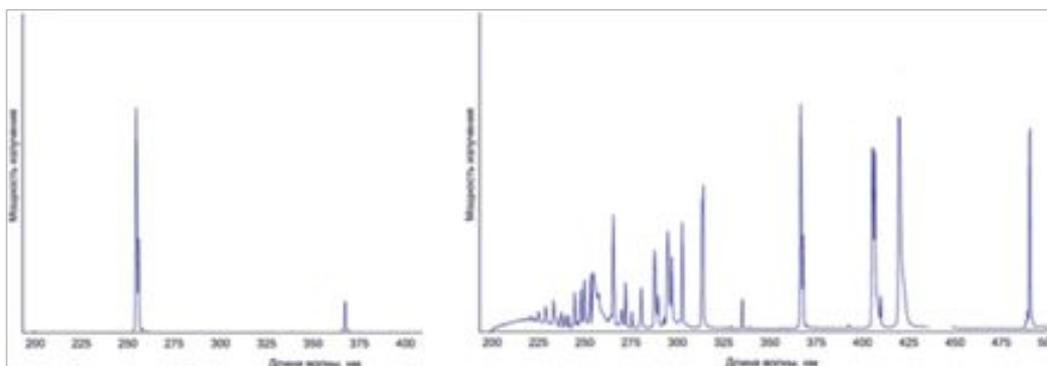
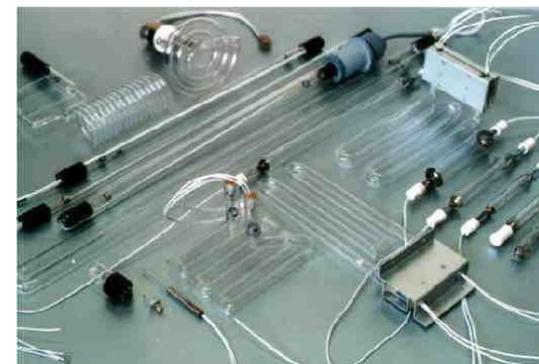


Hg



Na

Газоразрядные лампы



Давление в ртутной лампе →

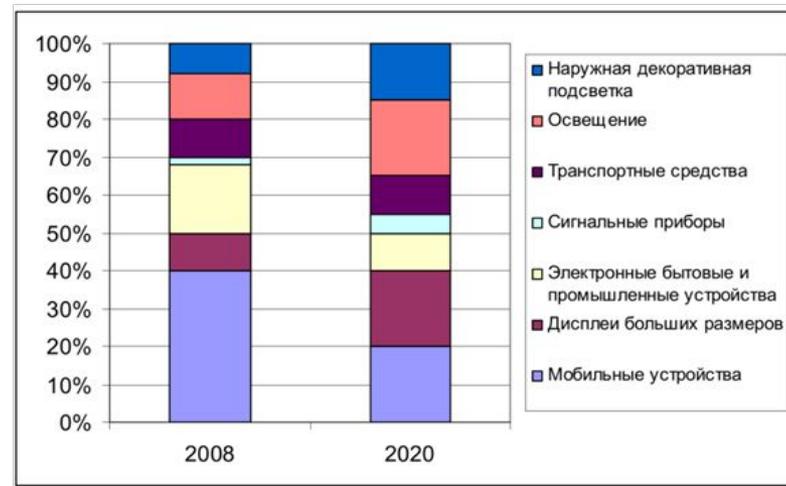
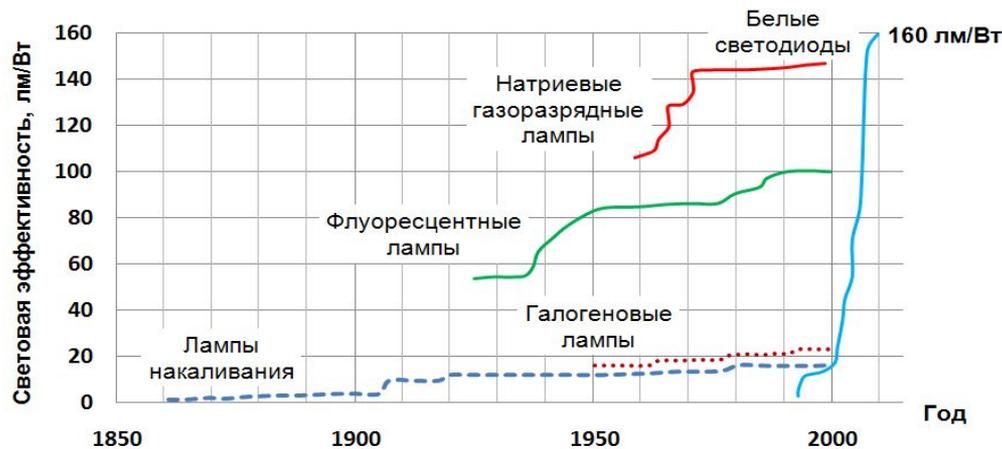
Низкое давление 0,2 атм – тлеющий или дуговой разряд, холодные электроды

Высокое давление (0,2-15 атм) и сверхвысокое давление (до 100 атм) - дуговой разряд, активируемые или самонакаливающиеся электроды

Освещение: ртутные лампы низкого давления, резонансные линии 253,7 и 184,9 нм возбуждают свечение люминофора:

- галофосфат кальция $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \text{Ca}(\text{Cl},\text{F})_2:(\text{Sb}, \text{Mn})$
- фосфат-ванадат иттрия $\text{YVO}_4\text{-YPO}_4:\text{Eu}$

Оптоэлектроника светодиодов



Не все из нас пока пользуются в каждодневной жизни лазерами, но большинство из нас всё время сталкивается со светодиодами, даже не подозревая об этом. История появления светодиодов (электролюминесценции полупроводников) ведет свой отчет с начала 20 века. Первое известное сообщение об излучении света твёрдотельным диодом было сделано в 1907 году британским экспериментатором Генри Раундом из лаборатории Маркони. В 1923 г. наш соотечественник О.В. Лосев, проводя радиотехнические исследования, заметил голубоватое свечение, испускаемое некоторыми полупроводниковыми детекторами. При этом разогрева элементов конструкции не было, свет рождался внутри карбидкремниевого кристалла вследствие неизвестных тогда электронных превращений. Однако интенсивность излучения была столь ничтожной, что научная общественность фактически «не увидела» его, по крайней мере, в переносном смысле, так как в электронике тех дней (всё ещё вакуумной) происходили вещи более значимые.

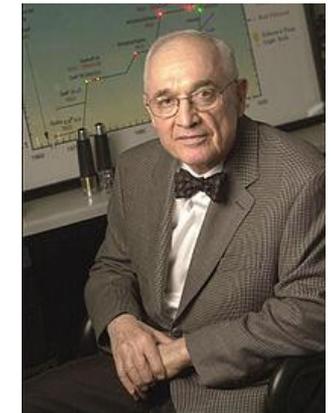
Оптоэлектроника

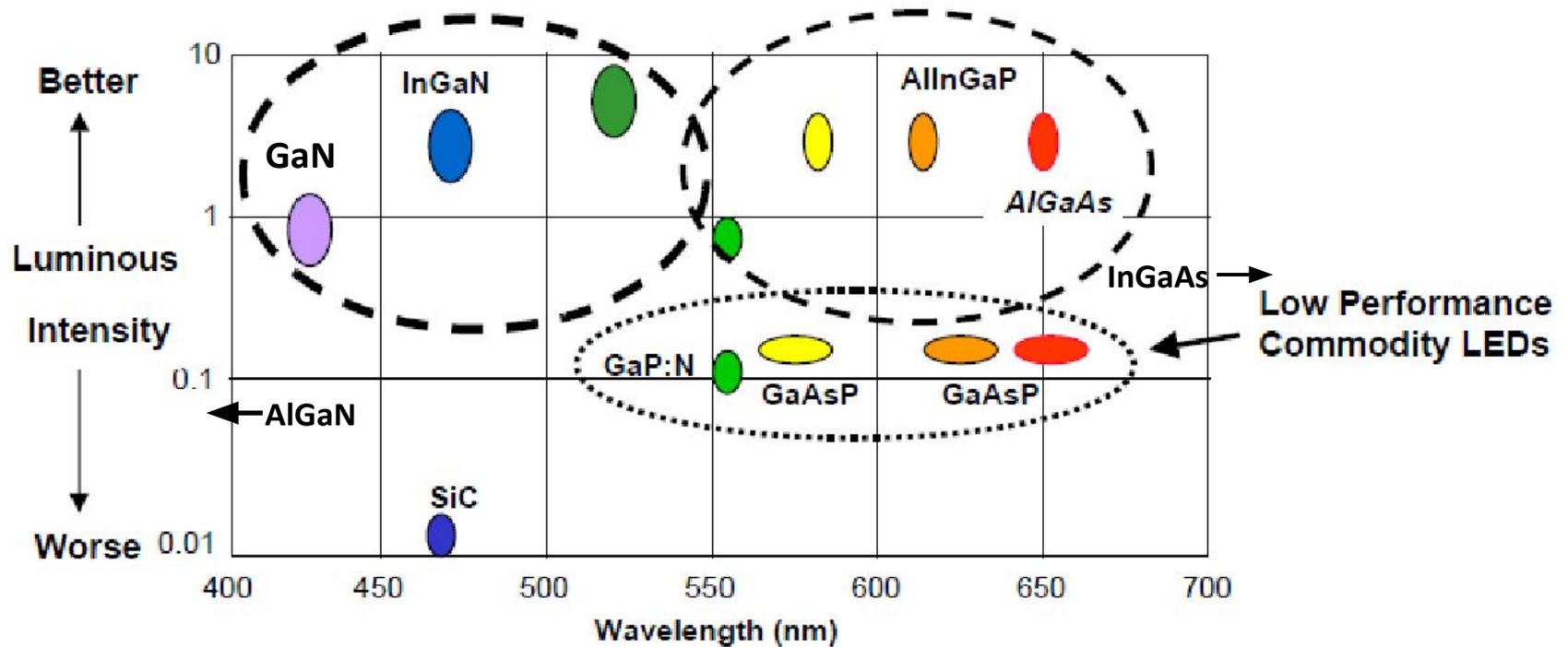
светодиодов

Итак, в 1923 году Олег Владимирович Лосев, работая в Нижегородской радиолaborатории, наблюдал излучение света, исходящее из кристаллов карбида кремния SiC (карборунда). О. В. Лосев вполне оценил практическую значимость своего открытия, позволявшего создавать малогабаритные твёрдотельные (безвакуумные) источники света с очень низким напряжением питания (менее 10 В) и очень высоким быстродействием. Полученные им два авторских свидетельства на «Световое реле» (первое заявлено в феврале 1927 г.) формально закрепили за Россией приоритет в области светодиодов, утраченный в 1960-гг. в пользу США после изобретения современных светодиодов, пригодных к практическому применению.



«Отцом» современных светодиодов считается Ник Холоньяк. В 2006 году Американский институт физики по случаю своего 75-летия выбрал пять наиболее важных статей, опубликованных в своих журналах. Две из этих пяти статей, опубликованных в журнале *Applied Physics Letters*, были написаны Холоньяком. Первая, написанная в соавторстве с С. Ф. Бевакуа в 1962 году, сообщала о создании первого светодиода видимого света (инфракрасные светодиоды появились на год раньше). В февральском номере *Reader's Digest* в 1963 г. Холоньяк предсказал, что светодиоды заменят традиционные лампы накаливания, поскольку превосходят их по качеству и эффективности.

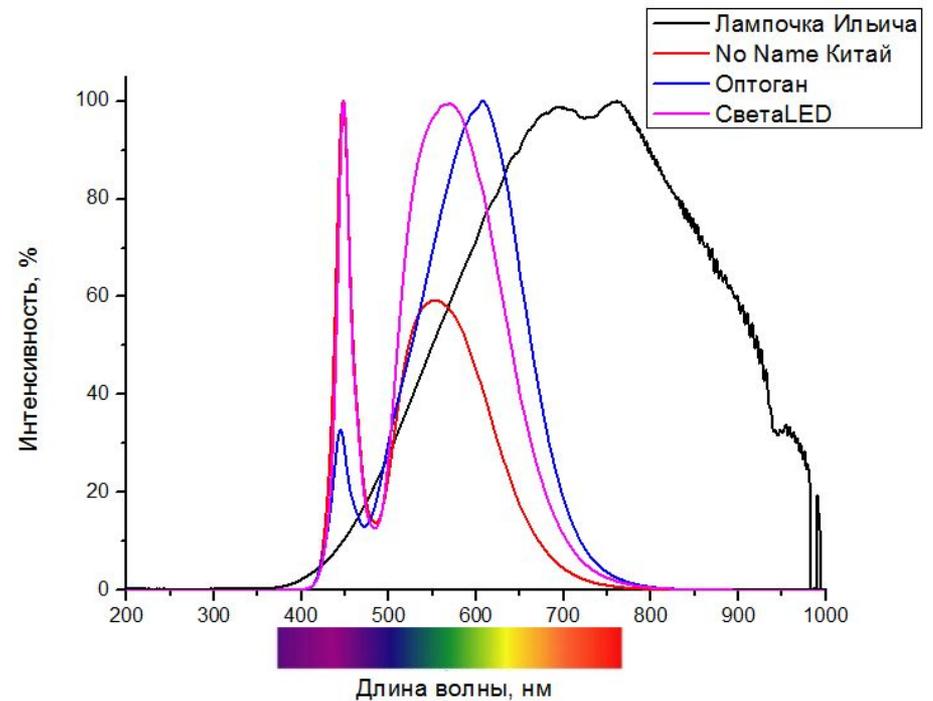
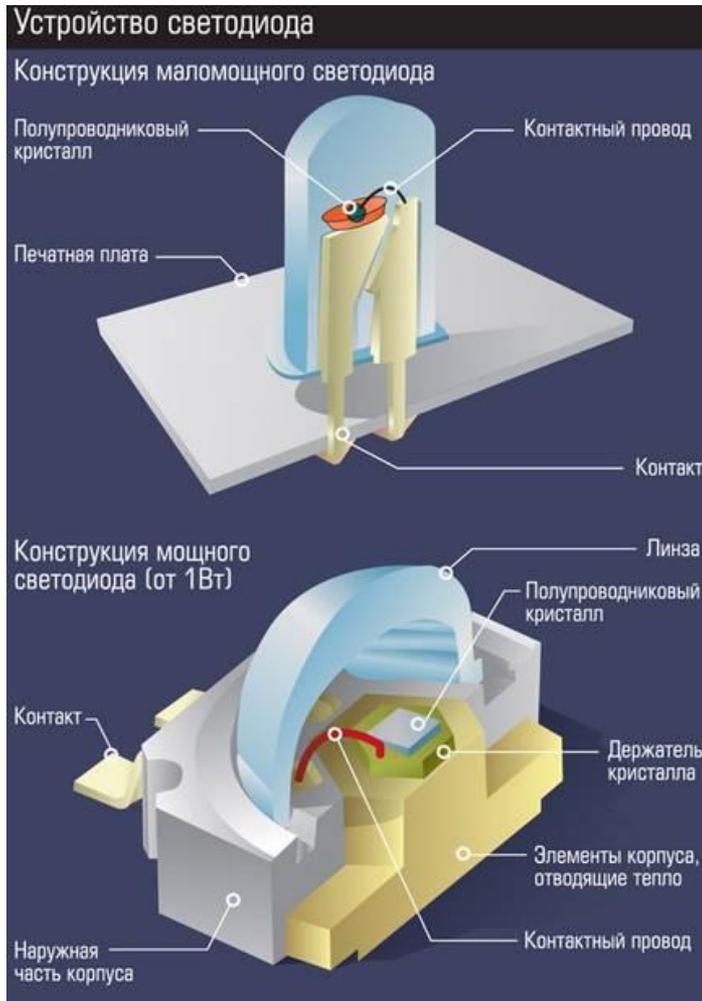




Color: Ultra-violet Blue Green Yellow Orange Red Infra-Red

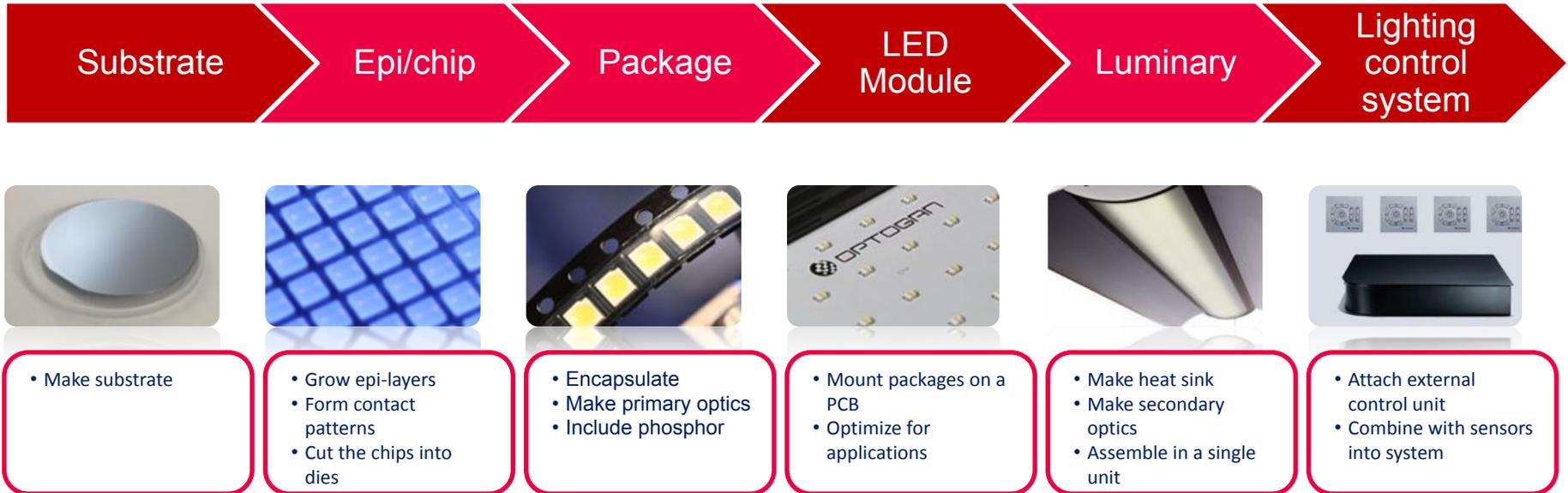
Оптоэлектроника

светодиодов

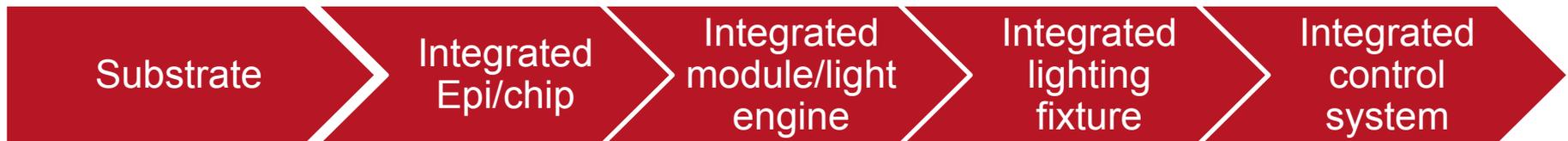


СВЕТОДИОДОВ

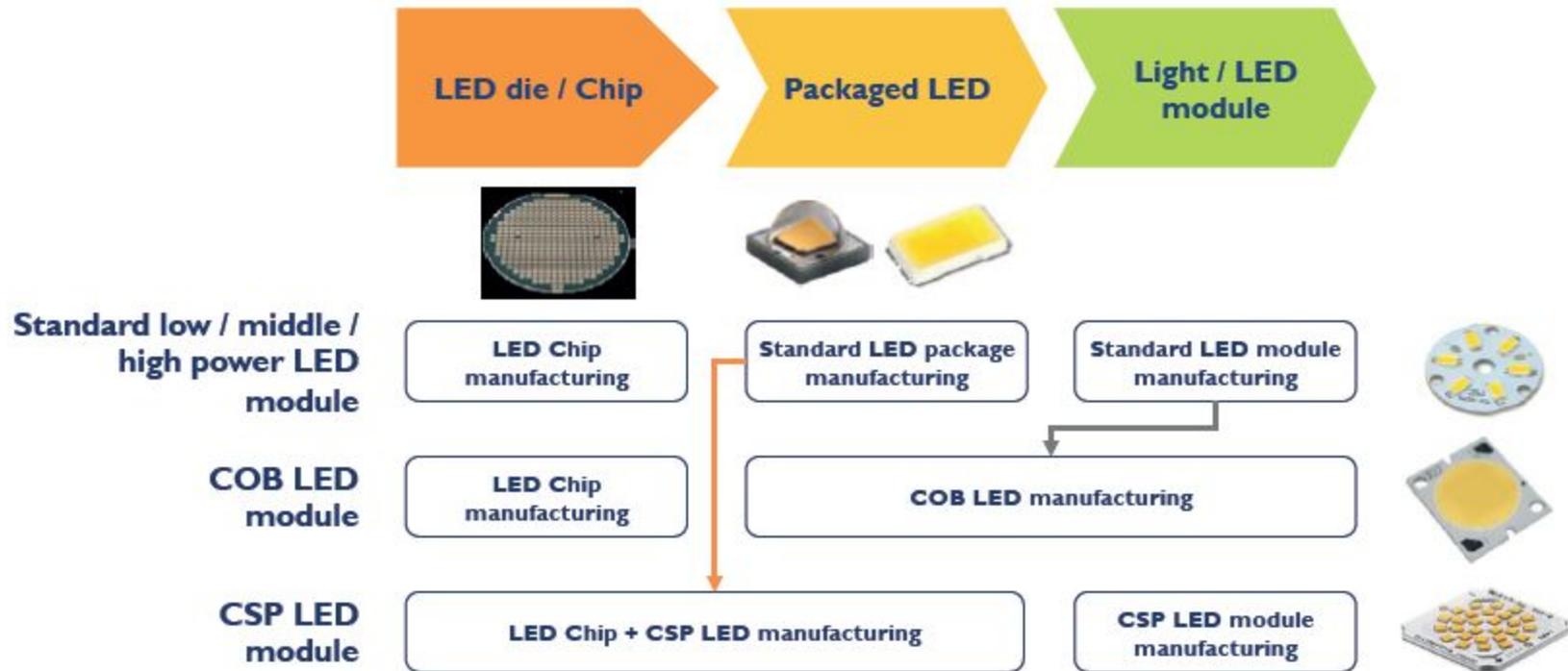
Основной современный подход к производству приборов фото- и опто-электроники: интеграция элементов, что требует совместимости материалов



Integration as an important innovative factor



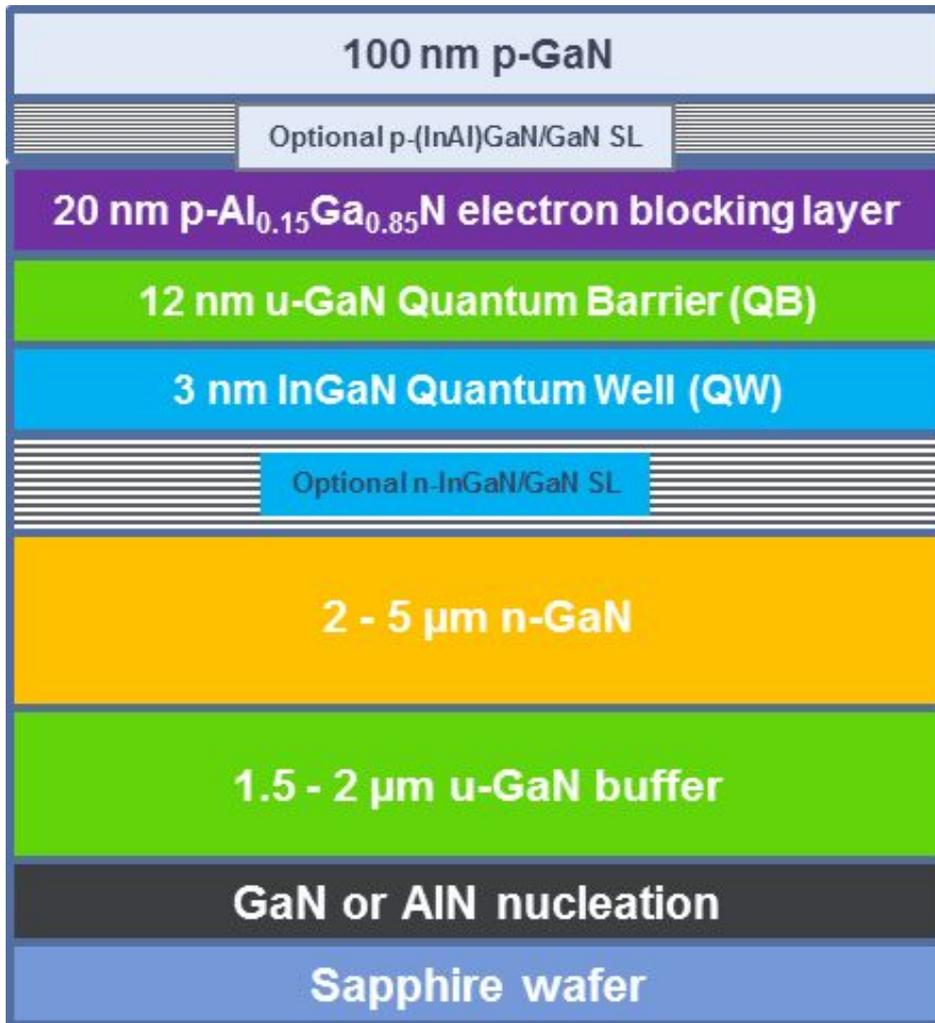
Comparison between standard, COB and CSP LED module manufacturing chain



→ COB is considered as a module itself. Therefore, there is no need for a module manufacturer in the manufacturing chain.

→ CSP LEDs can be made by chip manufacturers because most of the package steps are removed. However, additional expertise is required, for example in applying phosphores

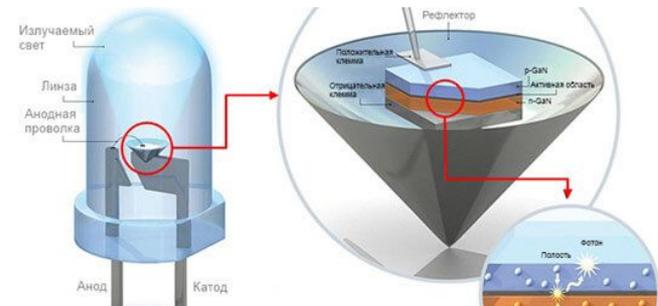
Оптоэлектроника светодиодов



P-side (doped with Mg)

6x – 10x periods MQW
active region. MQW consists of 25 Å well of
In_{0.15}Ga_{0.85}N with 75 Å GaN
barrier layers

N-side (doped with Si)



Органические светодиоды (OLEDs)

Органические соединения — класс химических соединений, в состав которых входит углерод (за исключением карбидов, угольной кислоты, карбонатов, оксидов углерода и цианидов). Органические соединения, кроме углерода, чаще всего содержат водород, кислород, азот, реже — серу, фосфор, галогены и некоторые металлы (порознь или в различных комбинациях).

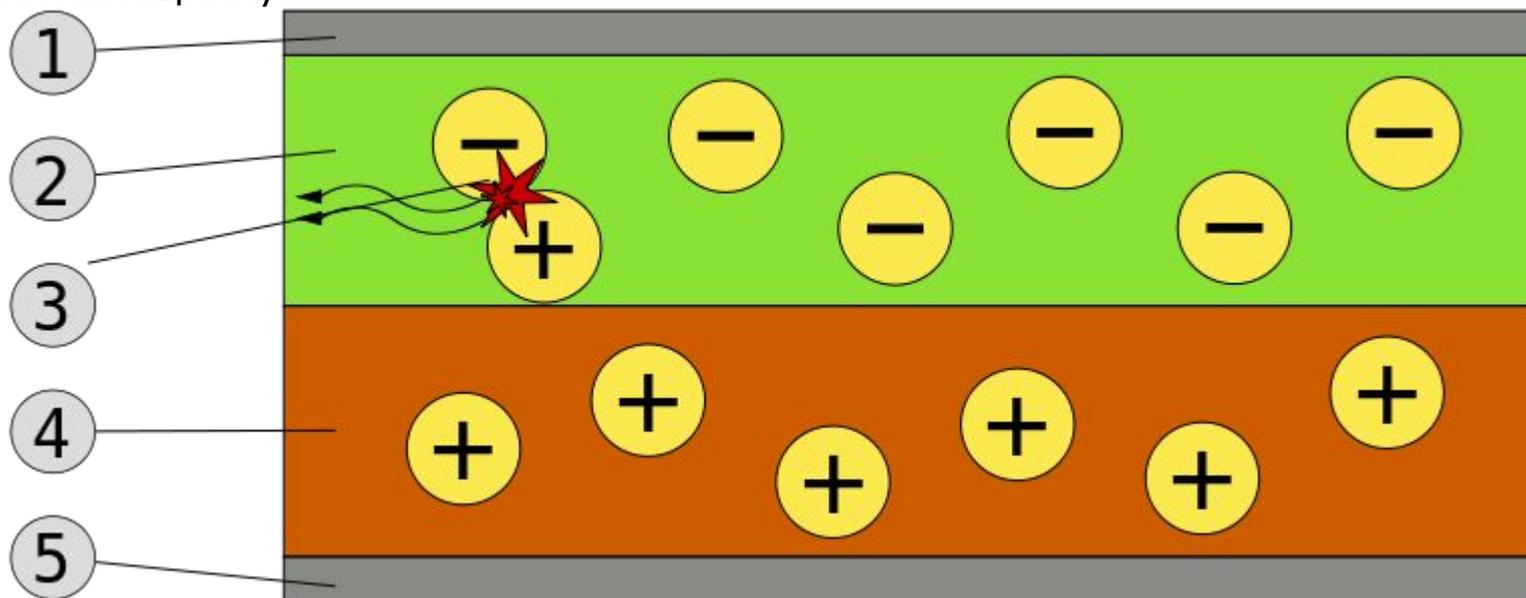


Схема двухслойной OLED-панели: 1. Катод(-), 2. Эмиссионный слой, 3. Испускаемое излучение, 4. Проводящий слой, 5. Анод (+)

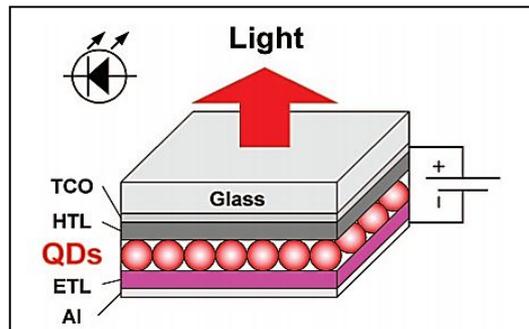
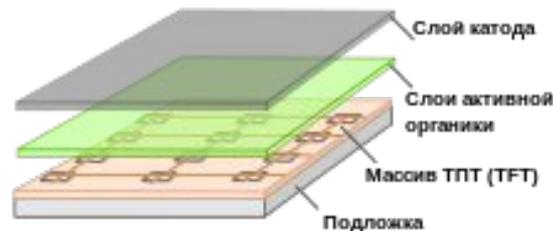
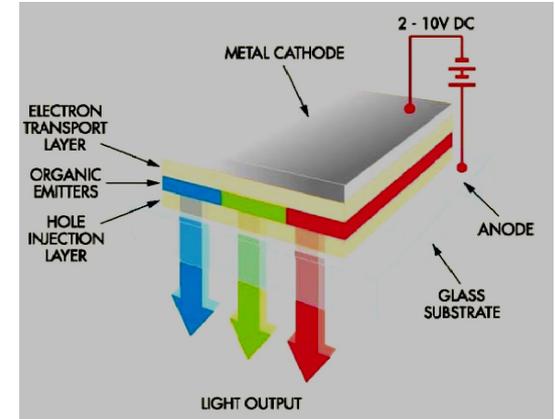
Органические светодиоды

Таблица 1. Планы по снижению себестоимости OLED-панелей

Показатель	Листовой процесс		Ленточный процесс	
	2011 г.	2014/15 гг.	2011 г.	2014/15 гг.
Долл./м ²	900	90	995	84
Долл./к/м	300	9	320	8,4

Таблица 2. Оптимистический прогноз до 2020 г. относительно технико-экономических показателей OLED-панелей

Показатель	2009	2010	2012	2015	2020
Светоотдача панели, лм/Вт	45	50	70	105	157
Стоимость OEM-панели, долл./к/м	Нет данных	450	45	9	6
Стоимость OEM-панели, долл./м ²		1200	270	90	80
Срок службы панели, 1000 ч		5	25	50	
Светимость		3000	6000	10000	



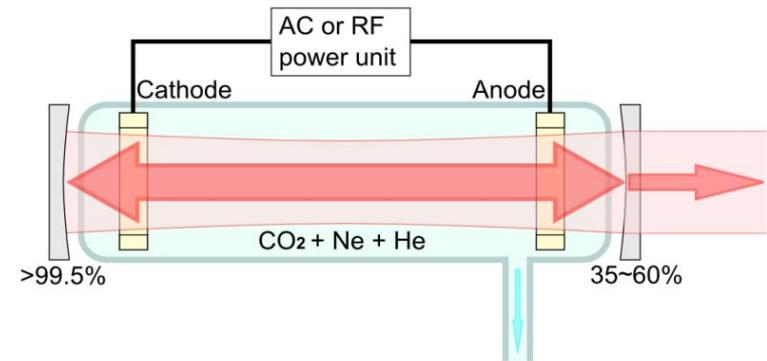
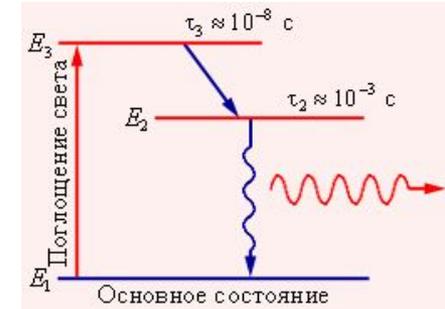
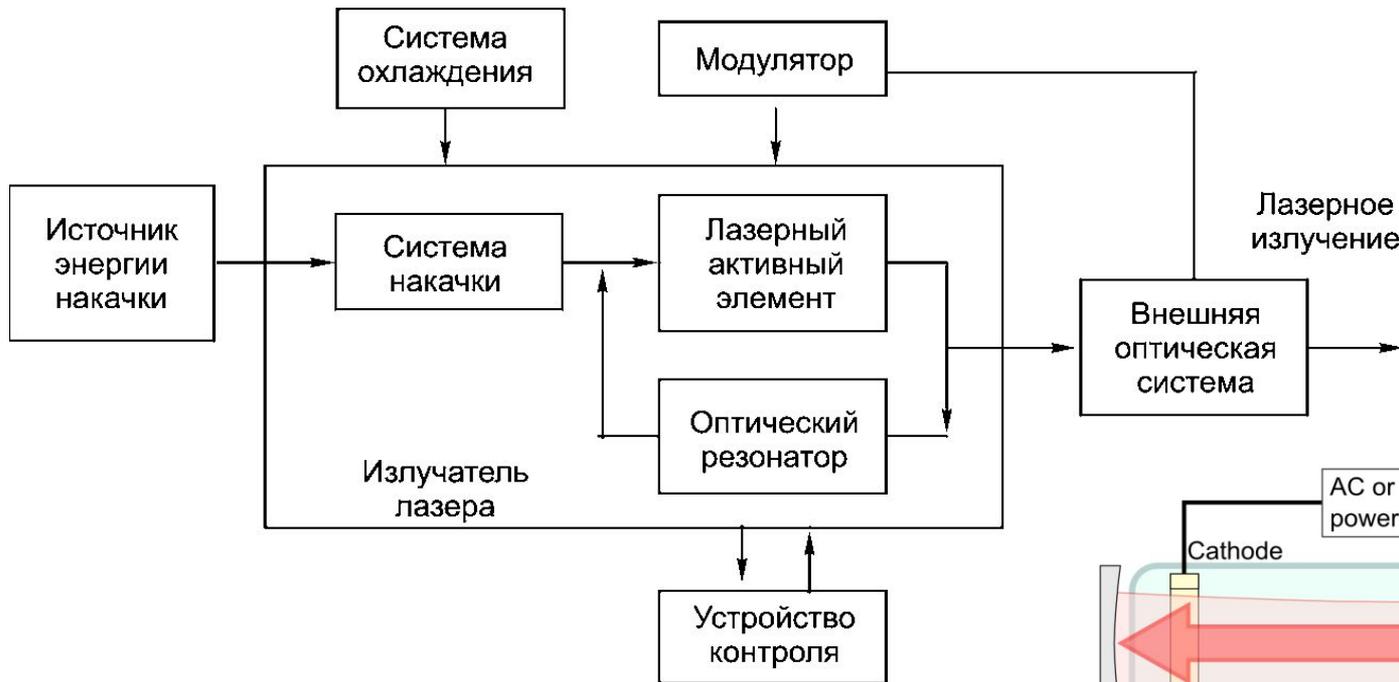
Cathode	Cathode	Cathode
EBL-1	EBL-1	EBL-1
ETL-1	ETL-1	ETL-1
Phosphorescent-Red	Phosphorescent-Red	Phosphorescent-Red
Phosphorescent-Green	Phosphorescent-Green	Phosphorescent-Green
EBL-1	EBL-1	EBL-1
EBL-2	EBL-2	EBL-2
HTL-1	HTL-1	HTL-1
HIL-1	HIL-1	HIL-1
EIL-2	EIL-2	EIL-2
ETL-2	ETL-2	ETL-2
Fluorescent-Blue	Fluorescent-Blue	Fluorescent-Blue
HTL-2	HTL-2	HTL-2
HIL-2	HIL-2	HIL-2
SRL	SRL	SRL
Anode	Anode	Anode
	IES	
Glass Substrate	Glass Substrate	Glass Substrate
	EES	

(a)

(b)

(c)

Лазеры



Виды накачки лазера:

- оптическая — возбуждение лазера оптическим излучением (источник — газоразрядная лампа, светоизлучающий диод, лазер и др.);
- электрическая — накачка электрической энергией (инжекционные лазеры);
- электронная — накачка электронным пучком;
- химическая — вызываемая химическими реакциями в лазерном веществе.

Газовые лазеры

- Гелий-неоновый лазер (HeNe) может быть настроен на 160 различных длин волн путем изменения добротности резонатора. Наиболее популярен He-Ne лазер, работающий на длине волны 633 нм (красный свет), он широко используется в учебных лабораториях и при проведении исследований.
- Лазер на двуокиси углерода, или CO₂ лазер, выдает мощность в десятки киловатт на длинах волн 9.6 мкм и 10.6 мкм и ранее широко использовался в промышленности для сварки и резки.
- Аргоновые лазеры излучают в диапазоне длин волн 351–528.7 нм. Наиболее часто используются линии излучения на длинах волн 458 нм, 488 нм и 514.5 нм.
- Азотный лазер способен излучать УФ на длине волны 337.1 нм.
- Лазеры на парах меди выдают две спектральные линии с зеленым (510.6 нм) и желтым (578.2 нм) светом, и являются наиболее мощными лазерами с высокой эффективностью в видимом диапазоне длин волн.
- Лазеры на ионах металлов обычно выдают излучение в УФ области спектра. Примерами таких лазеров являются гелий-серебряный лазер (HeAg) с длиной волны излучения 224 нм, гелий-медный лазер (HeCu), работающий на длине волны 248 нм и гелий-кадмиевый лазер (HeCd), работающий на длине волны 325 нм.

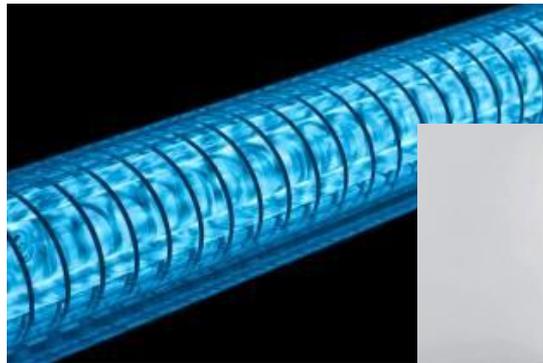


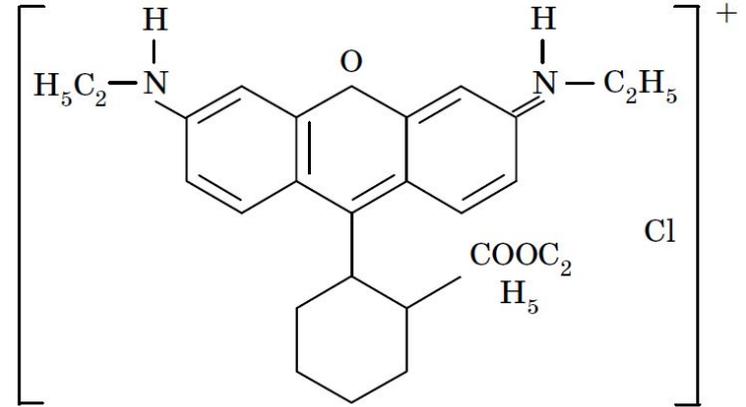
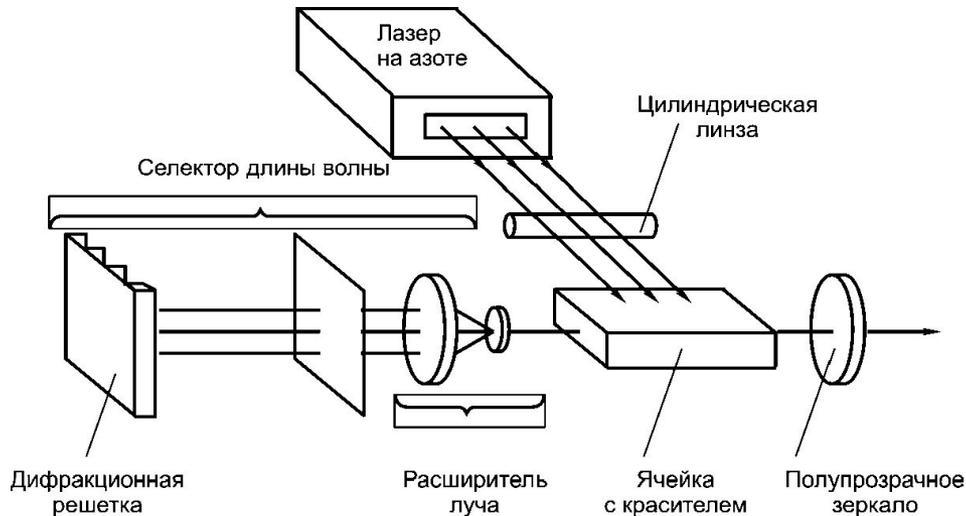
й в

Экимерные лазеры

Экимер (англ. excited dimer) обозначает возбуждённый димер. благородные газы, такие как ксенон или криптон, высокоинертны и обычно не образуют химических соединений. В возбуждённом состоянии (вызванном электрическим разрядом), они могут образовывать молекулы друг с другом (димеры) или с галогенами, такими как фтор или хлор. Появление молекул в возбуждённом связанном состоянии автоматически создаёт инверсию населённостей между двумя энергетическими уровнями. Такая молекула, находящаяся в возбуждённом состоянии, может отдать свою энергию в виде излучения, в результате чего молекула переходит в основное состояние, а затем очень быстро (в течение пикосекунд) распадается на составляющие атомы. Несмотря на то, что термин «димер» относится только к соединению одинаковых атомов, а в большинстве эксимерных лазеров используются смеси благородных газов с галогенами, название прижилось и используется для всех лазеров аналогичной конструкции. Длина волны эксимерного лазера зависит от состава используемого газа, и обычно лежит в УФ области.

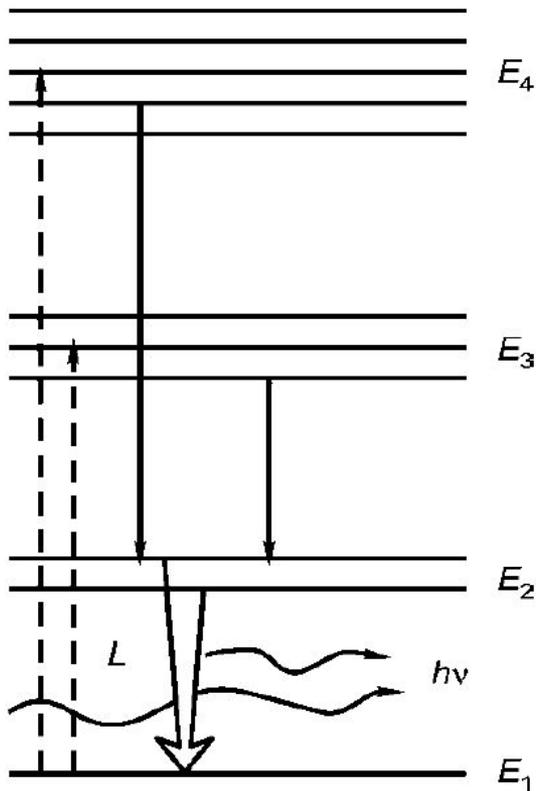
Экимер	Длина волны
F_2	157 нм
ArF	193 нм
KrF	248 нм
XeBr	282 нм
XeCl	308 нм
XeF	351 нм





Среда – жидкие диэлектрики с примесными рабочими атомами. В сочетании с набором красителей жидкостные лазеры перекрывают диапазон длин волн от 0,34 до 1,17 мкм. КПД современных лазеров на органических красителях достигает 30% при накачке лазерным излучением и 1% — при накачке импульсными лампами.

При непрерывном режиме выходная мощность жидкостных лазеров достигает нескольких ватт, при импульсных режимах — от 10 Вт до нескольких мегаватт; если длительность импульса 20 нс и частота повторения до 200 Гц, расходимость лазерного пучка составляет 2...2,5 мрад. В режиме синхронизации мод возможна генерация очень коротких световых импульсов



Свет мощной лампы (или лазерных диодов) переводит электроны с основного уровня E_1 на возбужденные уровни E_3 и E_4 , образующие две широкие полосы. Примерно через 10 нс электроны падают на уровень E_2 , называемый метастабильным. Здесь они могут находиться примерно 10^{-3} с. Энергия $E_3 - E_2$ превращается в теплоту. На уровне E_2 происходит накопление электронов и создается инверсная населенность по отношению к уровню E_1 .

Свет с частотой ν согласно условию $h\nu = E_2 - E_1$ вызывает вынужденные переходы с уровня E_2 на уровень E_1 .

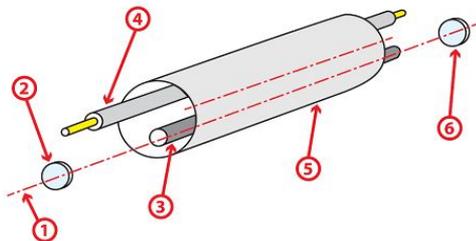
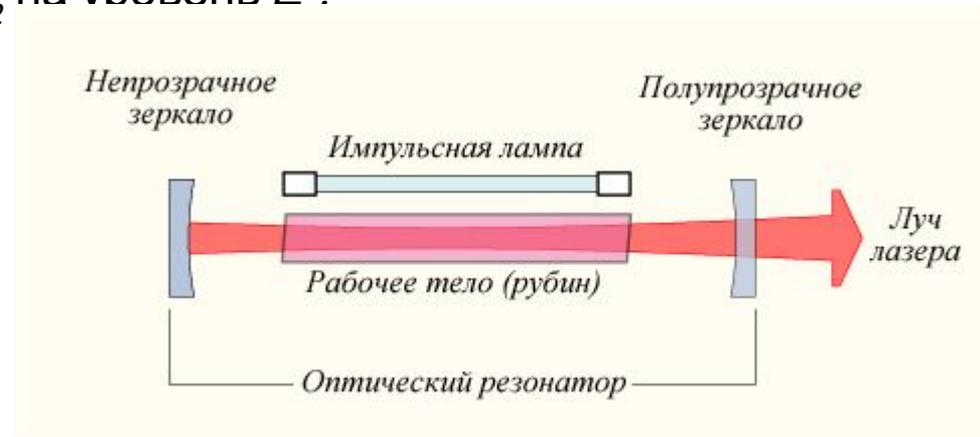


Схема твердотельного лазера:

- 1 – луч лазера,
- 2 – частично прозрачное зеркало,
- 3 – активное тело,
- 4 – лампа накачки,
- 5 – осветительная камера,
- 6 – отражающее зеркало

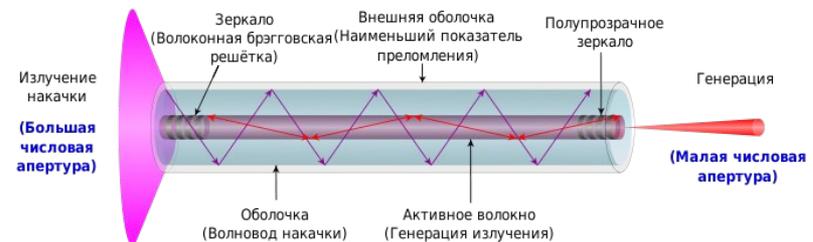
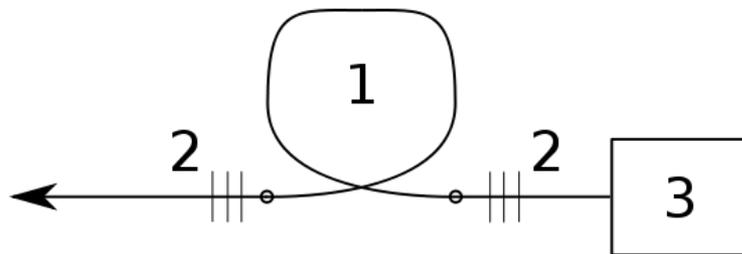


Твердотельные лазеры

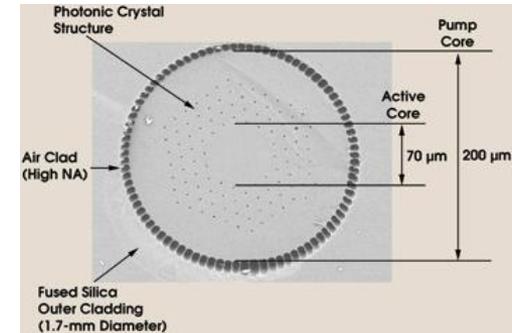
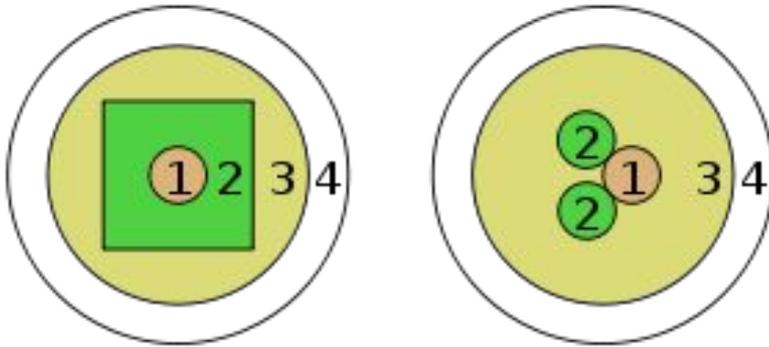
Рубиновый лазер	694,3 нм
Алюмо-иттриевые лазеры с легированием неодимом (Nd:YAG)	1,064 мкм, (1,32 мкм)
Лазер на фториде иттрия-лития с легированием неодимом (Nd:YLF)	1,047 и 1,053 мкм
Лазер на ванадате иттрия (YVO ₄) с легированием неодимом (Nd:YVO)	1,064 мкм
Лазер на неодимовом стекле (Nd:Glass)	~1,062 мкм (Силикатные стёкла), ~1,054 мкм (Фосфатные стёкла)
Титан-сапфировый лазер	650—1100 нм
Алюмо-иттриевые лазеры с легированием тулием (Tm:YAG)	2,0 мкм
Алюмо-иттриевые лазеры с легированием иттербием (Yb:YAG)	1,03 мкм
Алюмо-иттриевые лазеры с легированием гольмием (Ho:YAG)	2,1 мкм
Церий-легированный литий-стронций (или кальций)- алюмо-фторидный лазер (Ce:LiSAF, Ce:LiCAF)	~280-316 нм
Лазер на александрите с легированием хромом	Настраивается в диапазоне от 700 до 820 нм
Лазеры на фториде кальция , легированном ураном (U:CaF ₂)	2,5 мкм

Волоконный лазер — лазер, активная среда и, возможно, резонатор которого являются элементами оптического волокна. При полностью волоконной реализации такой лазер называется цельноволоконным, при комбинированном использовании волоконных и других элементов в конструкции лазера он называется волоконно-дискретным или гибридным.

Волоконный лазер состоит из модуля накачки 3 (как правило, светодиоды или лазерные диоды), световода 1, в котором происходит генерация, и резонатора 2. Световод содержит активное вещество (легированное оптическое волокно — сердцевина без оболочки, в отличие от обычных оптических волноводов) и волноводы накачки. Резонаторы: типа Фабри — Перо или кольцевые.

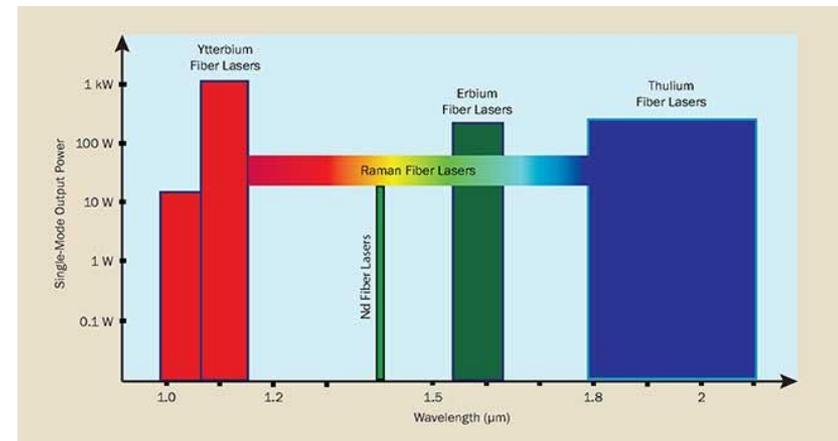


Сверхчистый плавленый кварц, который является основным материалом оптических волокон, обладает высокой прозрачностью (оптические потери — несколько % на километре длины). Примеси, вводимые в кварц легированием, превращают его в активную среду. Исходя из требований на частоту излучения (инфракрасный диапазон для телекоммуникаций) и малую пороговую мощность накачки, как правило, легирование выполняют редкоземельными элементами группы лантаноидов. Одним из распространённых типов волокон является эрбиевое, используемое в лазерных и усилительных системах, рабочий диапазон которых лежит в интервале длин волн 1530—1565 нм. Степень легирования редкоземельными ионами обычно зависит от длины изготавливаемого активного волокна. В пределах до нескольких десятков метров она может составлять от десятков до тысяч ppm, а в случае километровых длин — 1 ppm и менее.

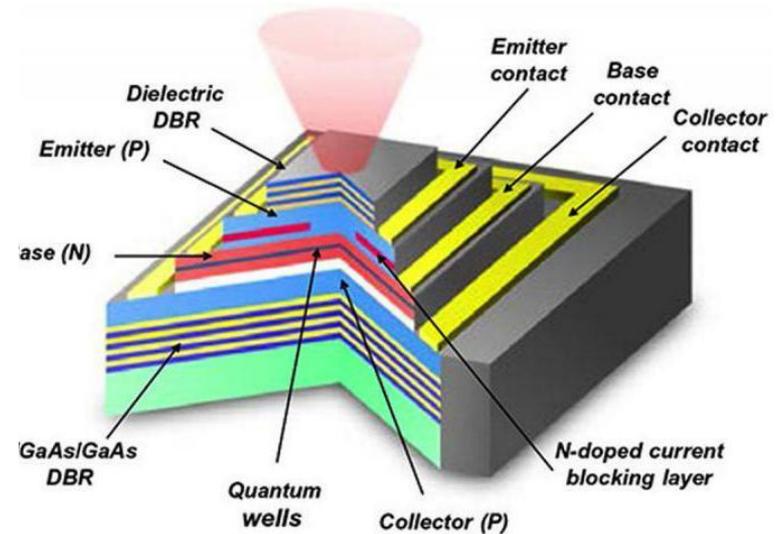
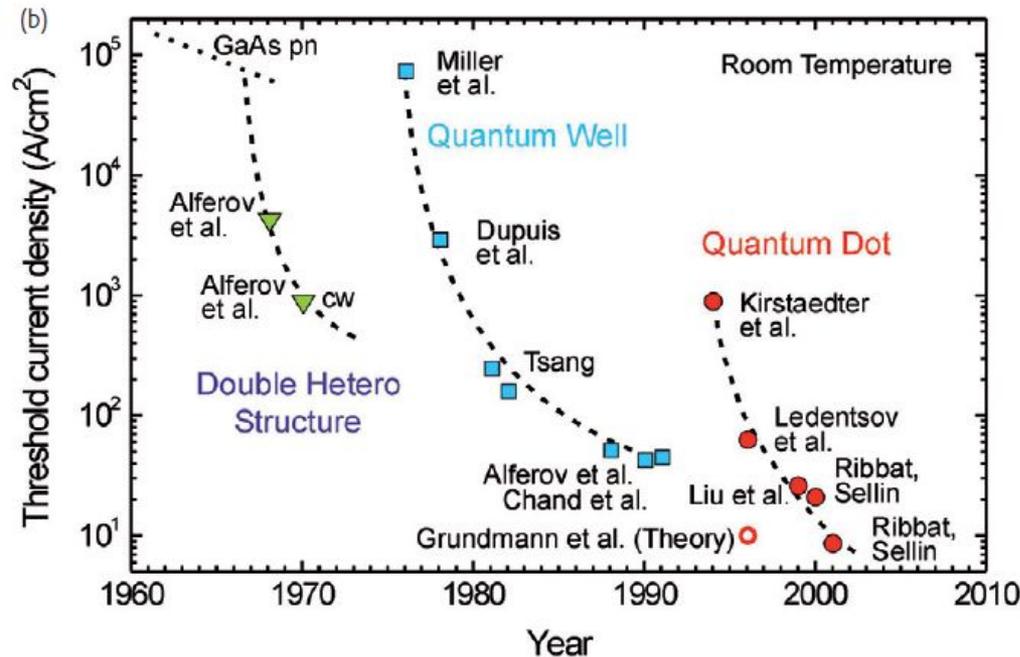
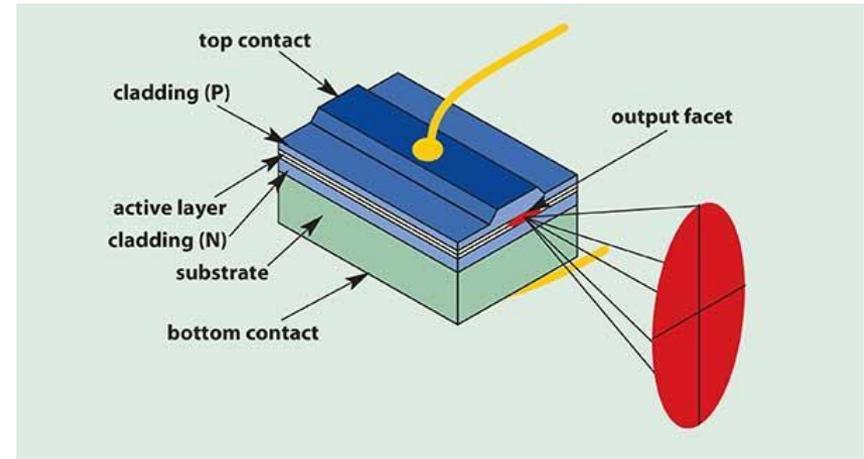
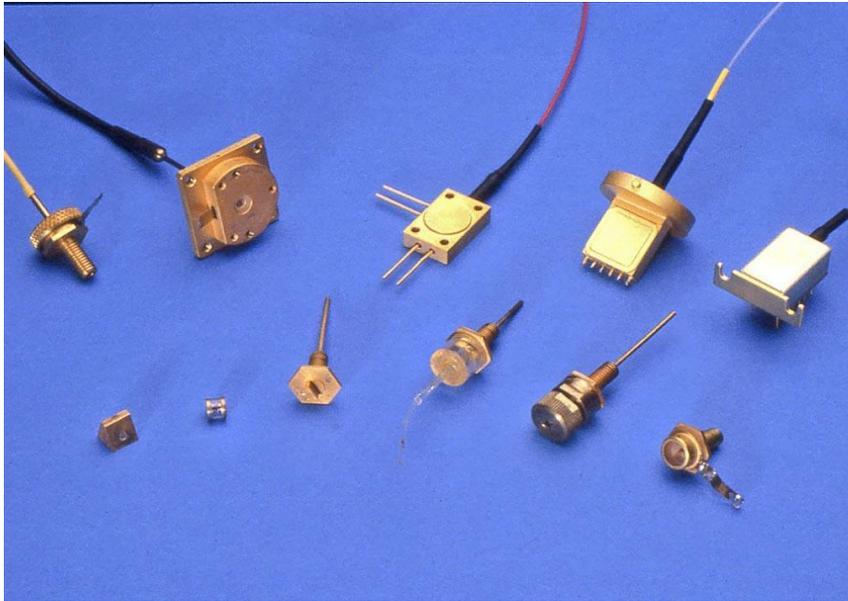


В микроструктурированном или фотонно-кристаллическом оптическом волокне (ФКОВ) светопередающая структура образуется воздушными каналами 2 (например, цилиндрической формы), окружающими сплошную (или полую) сердцевину волокна 1 — они образуют двумерный фотонный кристалл. Волноводные моды в них формируются не путём внутреннего отражения луча при распространении вдоль волокна, а вследствие появления запрещённых зон в спектре пропускания микроструктуры. В типичном ФКОВ микроструктура образуется гексагонально упакованными воздушными каналами. Главной особенностью такого волокна является поддержка только основной моды независимо от длины волны или диаметра сердцевины. Поэтому микроструктуры позволяют создавать оптическое волокно с любой заданной числовой апертурой (от очень маленьких для активной сердцевины до очень больших для волноводов накачки) при сравнительно большом диаметре сердцевины.

Для накачки редкоземельных ионов в срезе ФКОВ создаётся структура, напоминающая оптическое волокно с двойным покрытием. Вокруг внутреннего фотонного кристалла, окружающего активную сердцевину, на некотором расстоянии формируется ещё один слой воздушных каналов (типично вытянутых в срезе волокна в радиальном направлении).

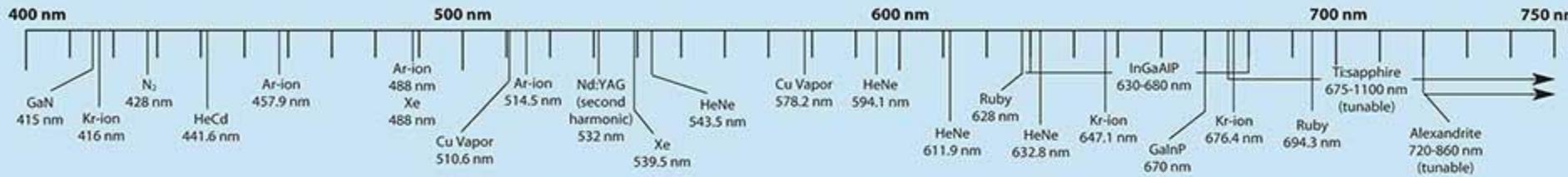


Полупроводниковые лазеры

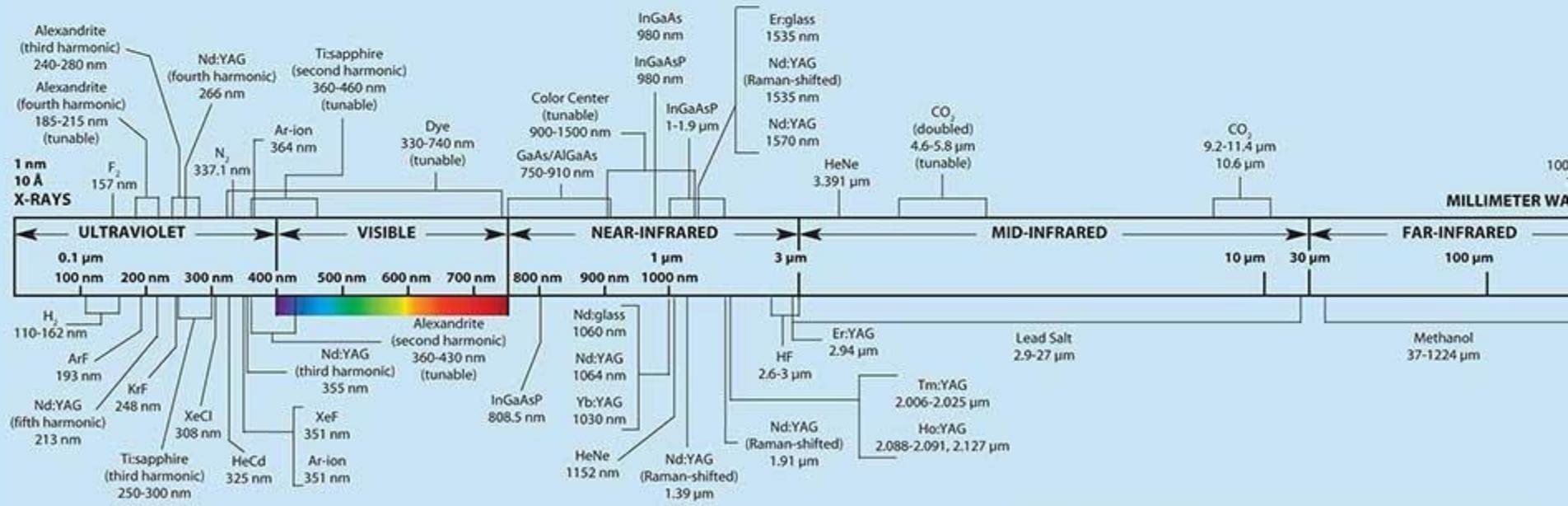


The wavelength spectrum from VUV to far-IR with laser lines from 1 nm to 100 μm

VISIBLE

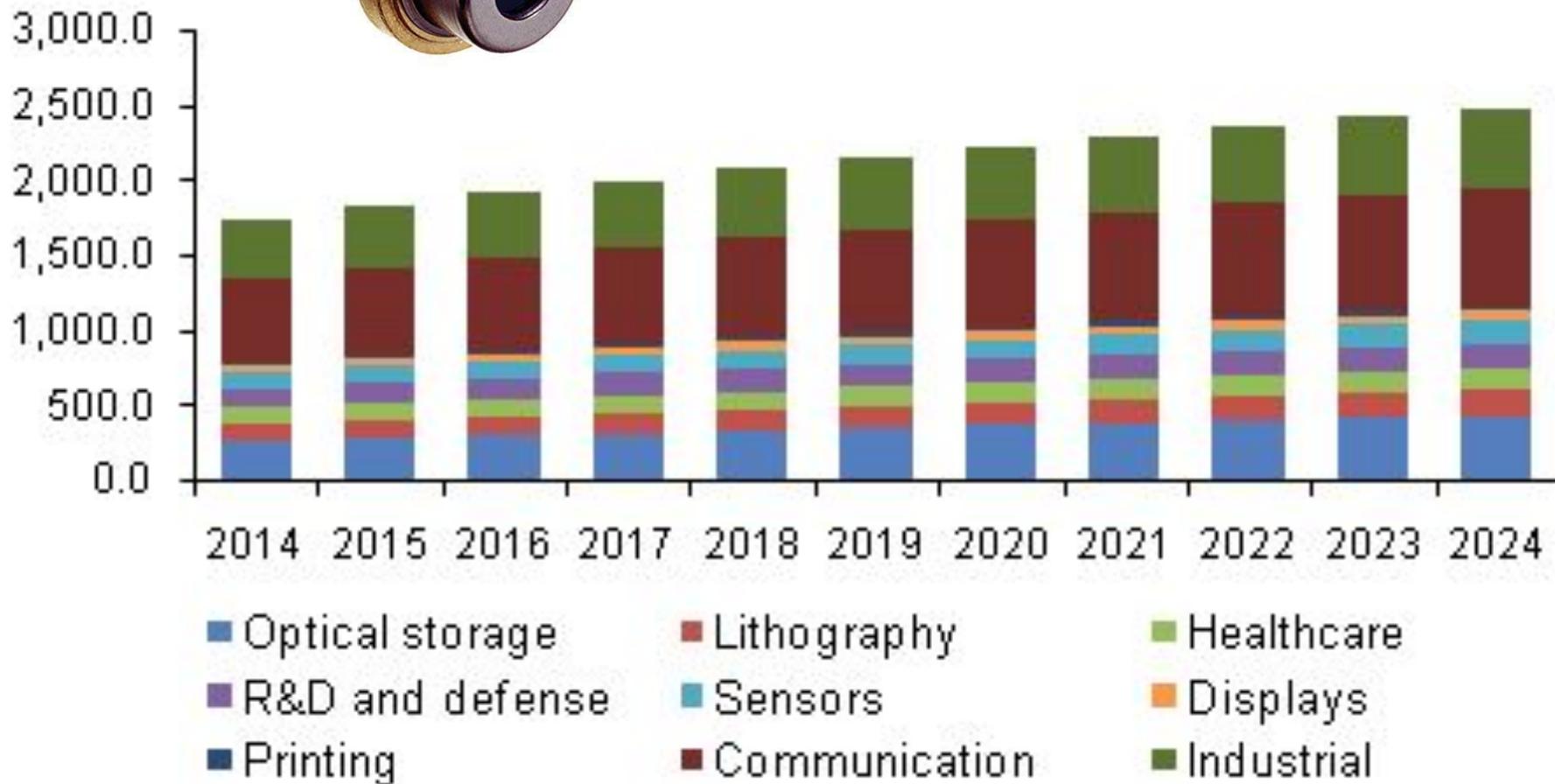


The photonics spectrum reference chart displays the major commercial laser lines in the ultraviolet to the far-infrared and beyond. Space limitations make it impossible to include all available lasing media, and, particularly in the crowded areas of the visible spectrum and the near-infrared, we were forced to limit their multiple secondary lines to the more familiar. In drawing the full spectrum band, legibility received a higher priority than accurate scale or proportion.

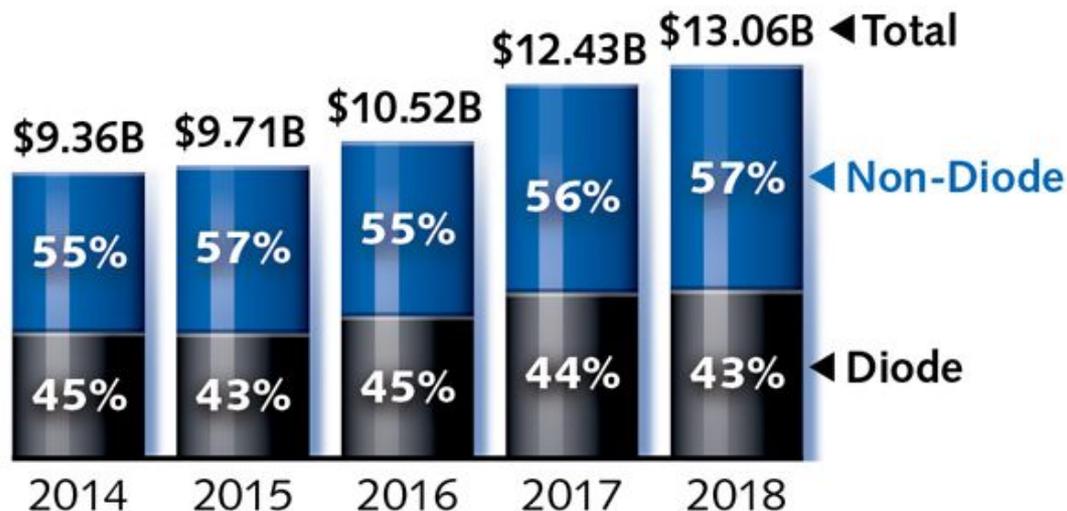


THE PHOTONICS SPECTRUM AND COMMERCIAL LASER LINES (wavelength increases left to right)

Полупроводниковые лазеры

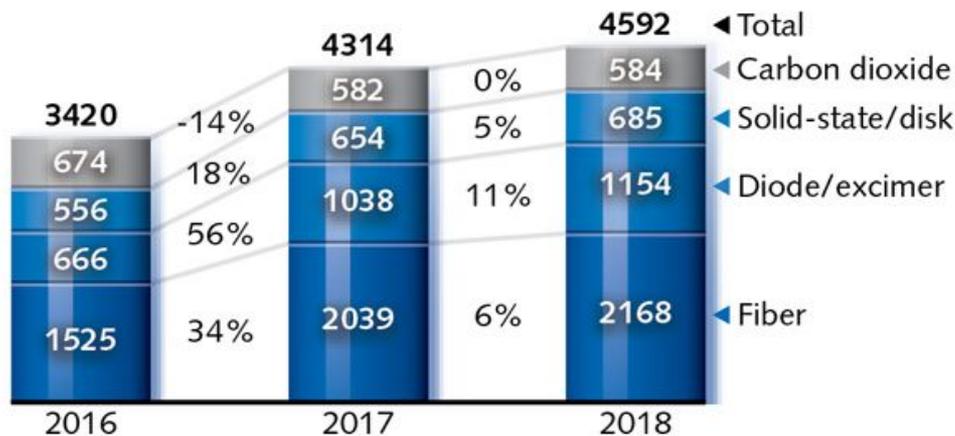


Laser revenues and 2018 forecast



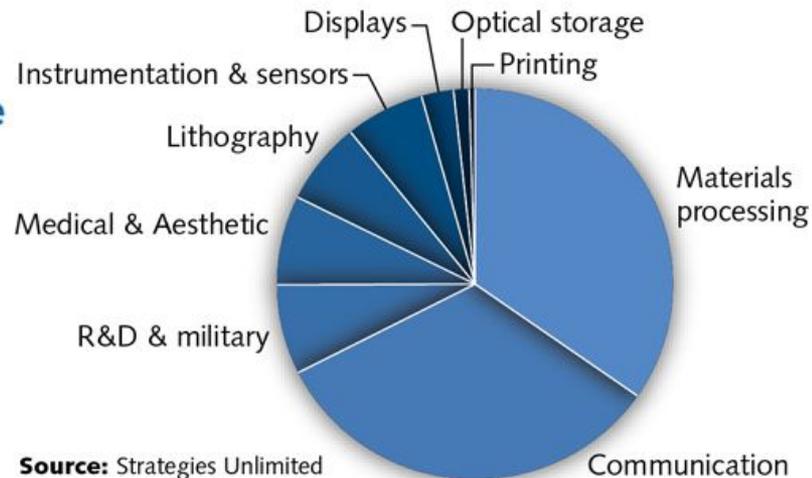
Source: Strategies Unlimited

Industrial laser revenues (US\$M)



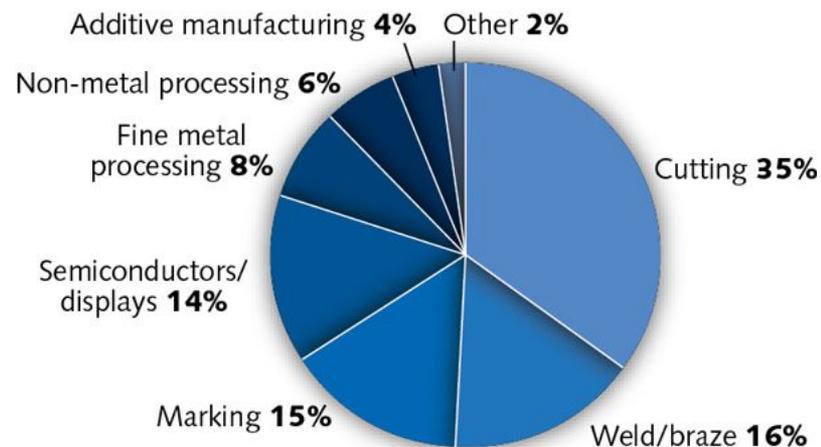
Source: Strategies Unlimited

Laser segments 2017 Total laser sales: \$12.3 billion



Source: Strategies Unlimited

Industrial laser applications 2017

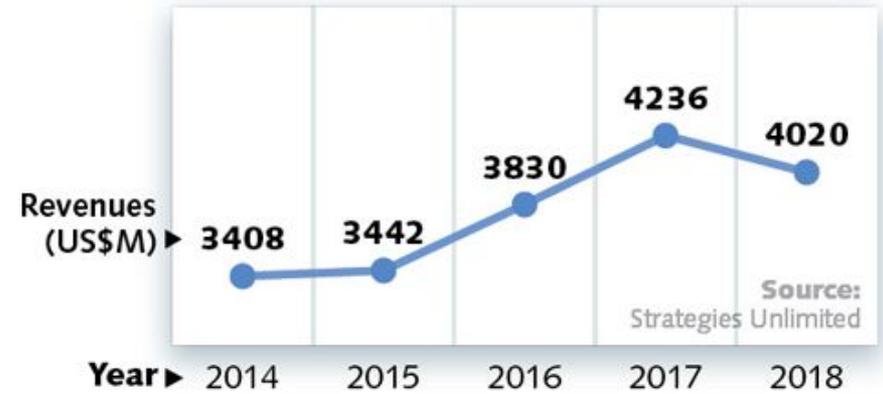


Source: Strategies Unlimited

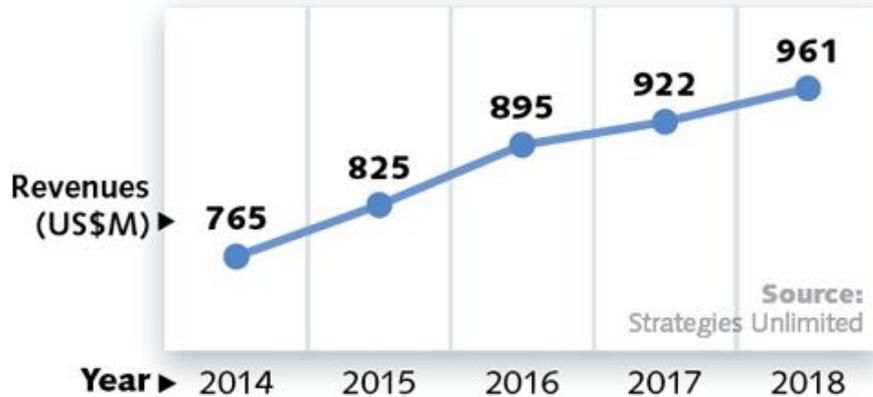
MATERIALS PROCESSING & LITHOGRAPHY



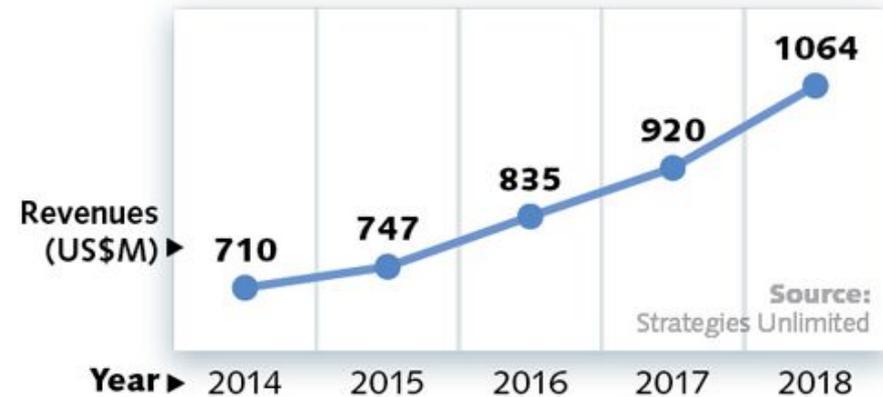
COMMUNICATIONS & OPTICAL STORAGE



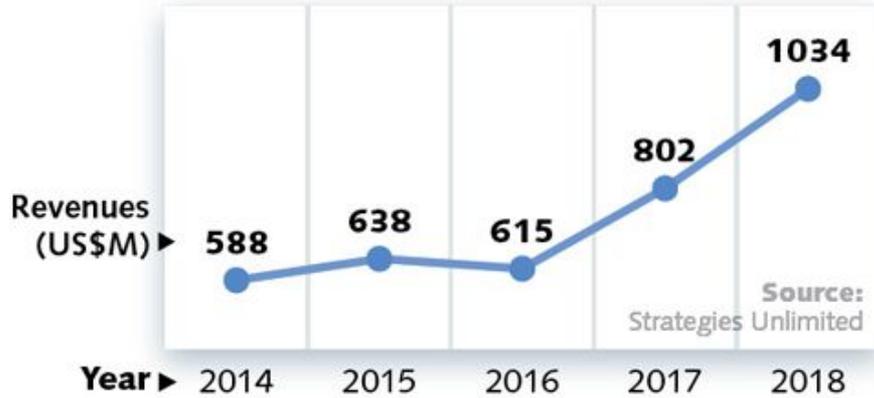
SCIENTIFIC RESEARCH & MILITARY



MEDICAL & AESTHETIC



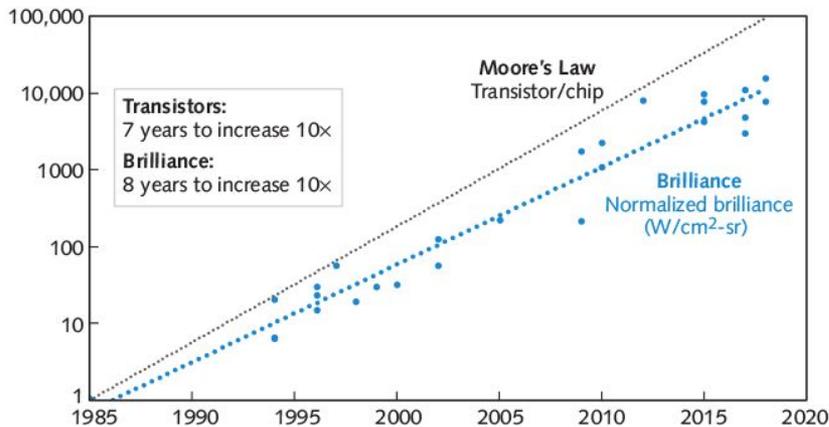
INSTRUMENTATION & SENSORS



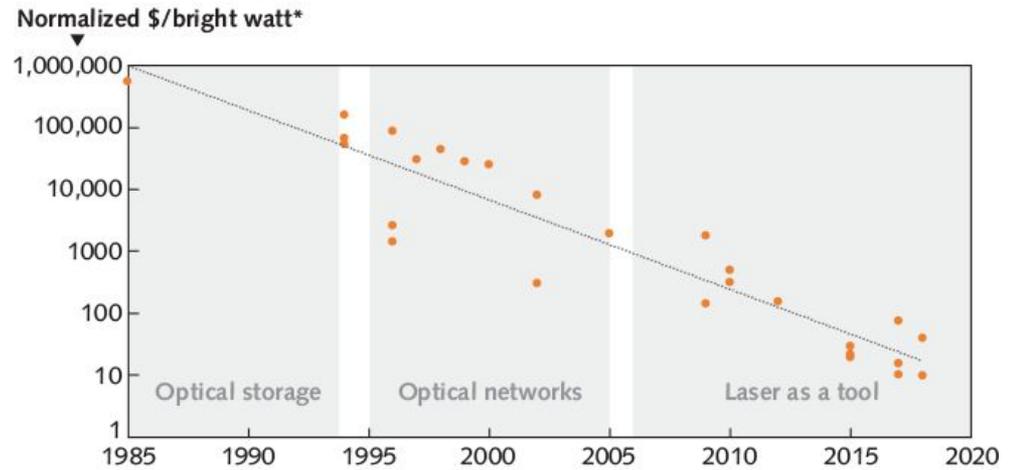
ENTERTAINMENT, DISPLAYS & PRINTING



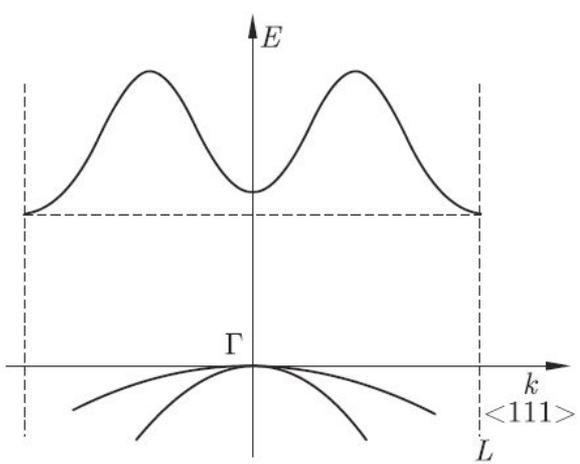
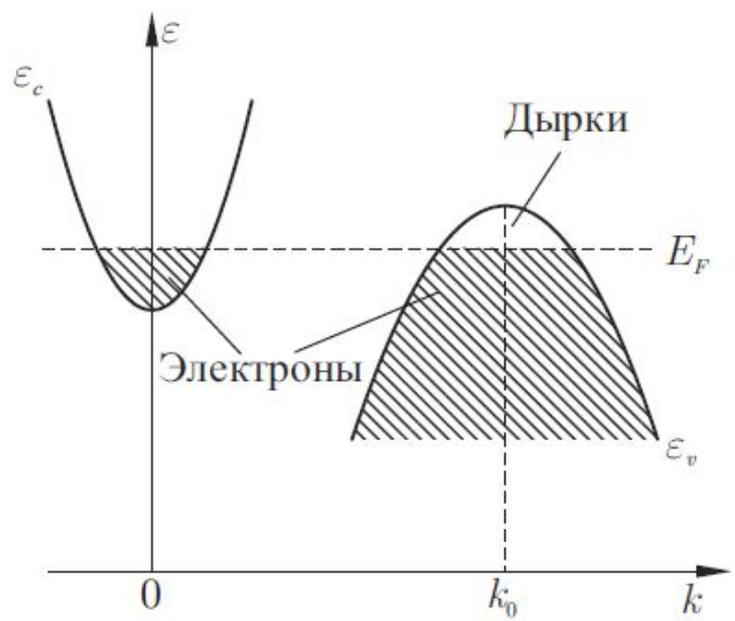
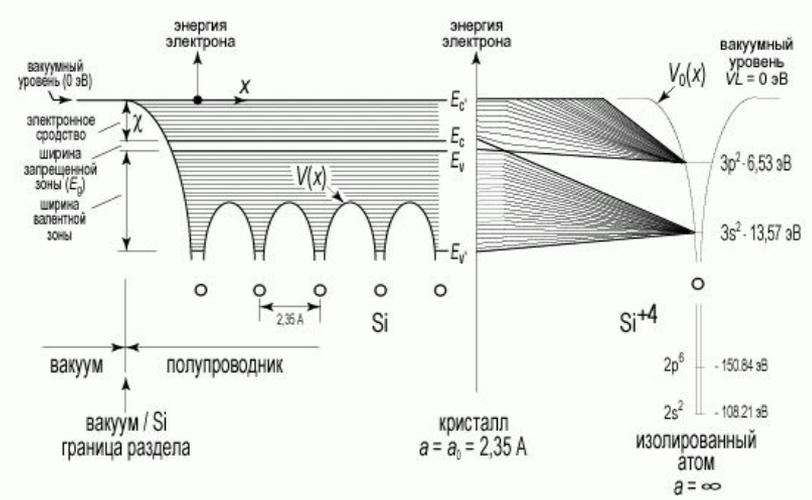
High-power semiconductor laser brilliance and Moore's Law



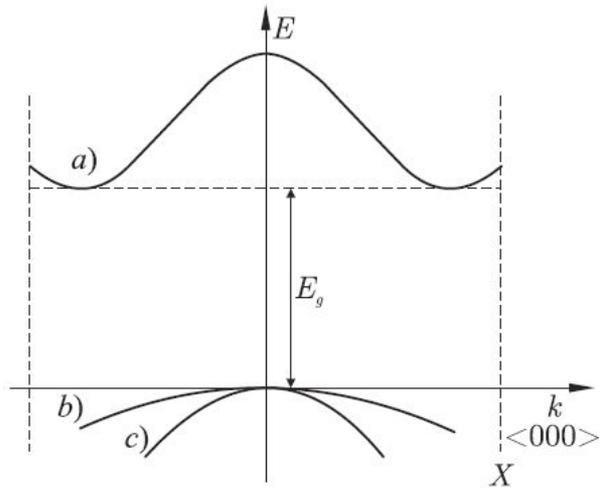
High-power semiconductor laser brilliance



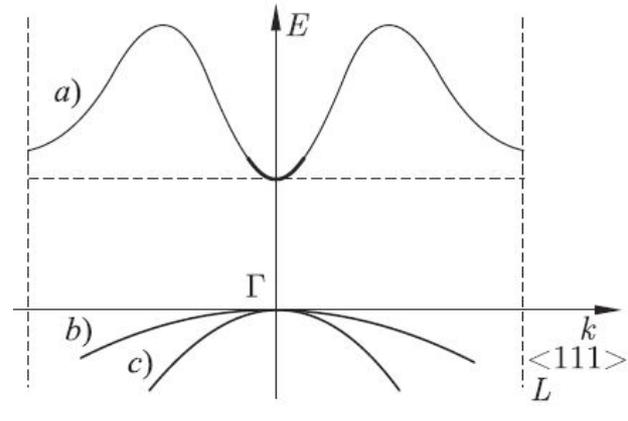
* Bright watt = Brilliance (W/cm²-sr)



Ge

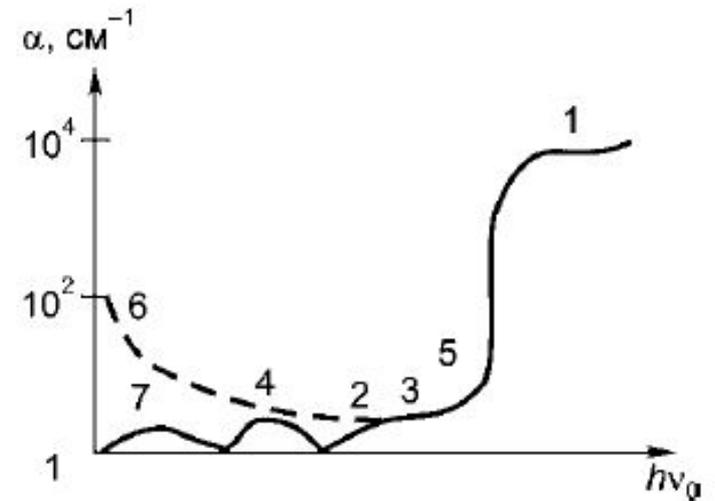
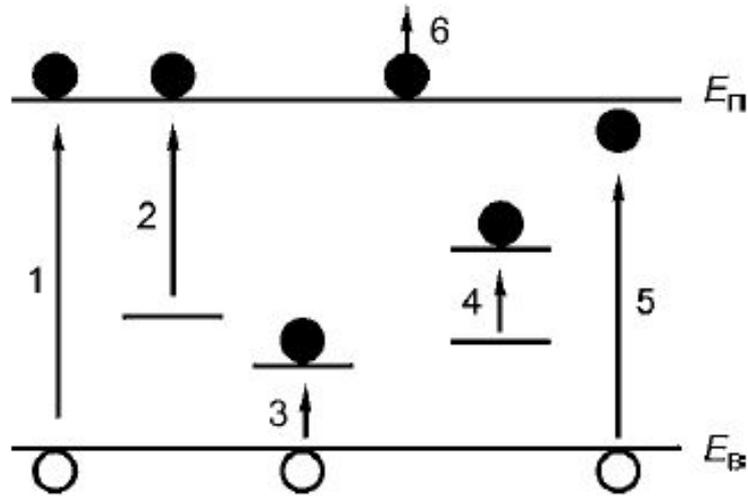


Si



GaAs

Фотоэлектроны

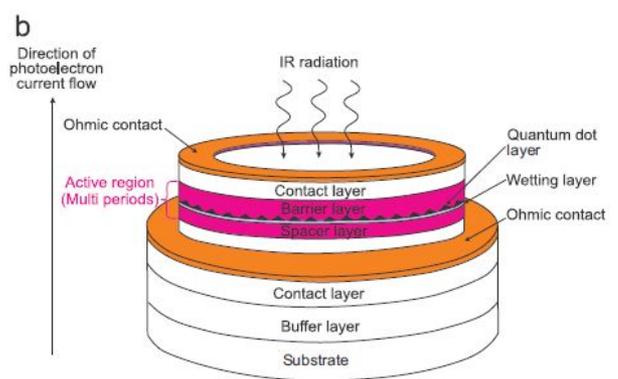
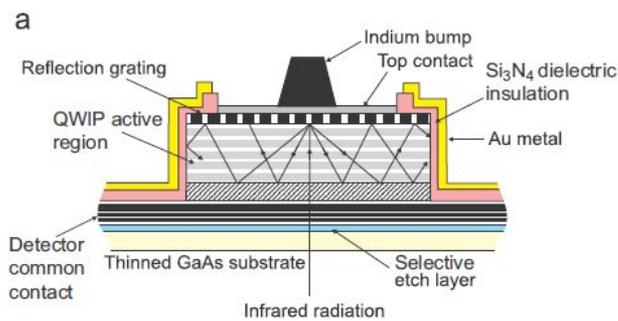
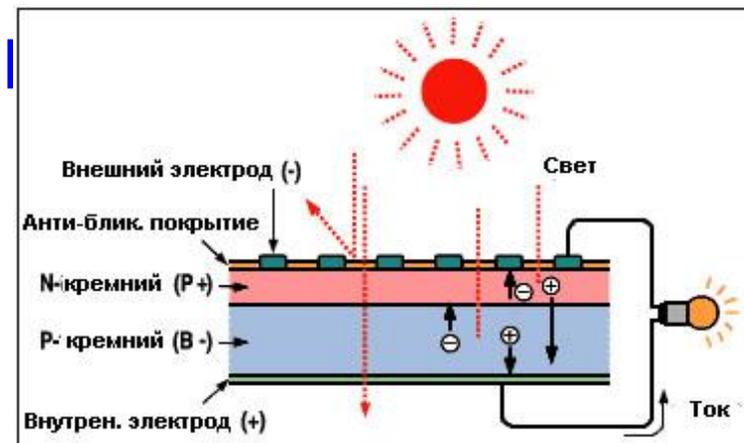


Характеристики примесных Ge и Si как материалов для фоторезисторов

Полупроводник: примесь	Рабочая температура T , К	Энергия активации уровня \mathcal{E}_i , эВ	Граничная длина волны λ_0 , мкм
Ge:Au	77	0,15	8,3
Ge:Hg	38	0,09	14
Ge:Cd	35	0,06	21
Ge:Cu	25	0,04	30
Ge:Zn	20	0,033	38
Ge:B	4,2	0,010	120
Si:In	77	0,155	8
Si:Ga	40	0,072	17
Si:Bi	40	0,07	18
Si:Al	40	0,068	19
Si:P	25	0,045	28
Si:B	25	0,044	29

Фотоэлектрони

Характеристика материала				Легирующая примесь	
Тип материала	Химическая формула	Ширина запрещенной зоны, эВ	Показатель преломления	p-типа	n-типа
A ^{III} B ^V	GaP	2,25	3,3	Zn, Cd	Se, Te
	GaAs	1,43	3,6	Zn, Cd	Se, Te
	GaN	3,25	2,1...2,4	Zn, Cd	Se, Te
	InN	2,4	2,9	Zn, Cd	Se, Te
	AlN	3,8	2,0	Zn, Cd	Se, Te
	AlP	2,45	—	Zn, Cd	Se, Te
	Ga _{1-x} In _x P	1,35...2,25	2,9...3,3	Zn, Cd	Se, Te
	Ga _{1-x} As _x P	1,43...2,25	3,3...3,6	Zn, Cd	Se, Te
	AlAs _{1-x} P _x	2,16...2,45	—	Zn, Cd	Se, Te
	Al _{1-x} In _x P	1,30...2,45	—	Zn, Cd	Se, Te
	Ga _{1-x} Al _x P	2,25...2,45	—	Zn, Cd	Se, Te
	GaAlN	3,25...3,8	—	Zn, Cd	Se, Te
	Ga _{1-x} In _x As _{1-y} P _y	0,36...2,25	2,9...3,3	Zn, Cd	Se, Te
	Ga _{1-x} AlAs _{1-y} P _y	1,43...2,45	2,9...3,2	Zn, Cd	Se, Te
Al _{1-x} In _x As _{1-y} P _y	0,36...2,45	3,0...3,2	Zn, Cd	Se, Te	
A ^{III} B ^{VI}	ZnS	3,8	2,4	Cu, P	Ai, Br, Cl
	CdS	2,9	2,5	Cu, P	Al, In, Ga, Br
	ZnSe	2,7	2,9	—	Al, Br, In, Ga
	CdSe	1,8	2,6	—	Cl, Br, I
	ZnTe	2,3	3,6	Cu, Ag, P	Al, Cl, Ga
	CdTe	1,6	2,8	Li, Sb, P	Al, Cl, In
	Zn _{1-x} Cd _x S	2,9...3,8	2,4...2,5	Cu, P	Al, In, Br, Ga
	Zn _{1-x} Cd _x Se	1,8...2,7	2,6...2,9	—	Br, Ga, In, Al
	ZnSe _{1-x} S _x	2,7...3,8	2,4...2,9	—	Al, Br, Cl
	Cd _{1-x} Se _x S	1,8...2,9	2,5...2,6	—	Al, Br, Cl
CdTe _{1-x} S _x	1,6...2,9	2,5...2,7	Cu, P, Sb	Cl, In, I	
A ^{IV} B ^{VI}	SiC	2,8...3,3	2,5...2,7	Al, In	N
Другие материалы	Si	1,1	3,5	B, Ga, Al	As, P, Sp
	CuAlS ₂	3,5	—		
	GaS	3,4	—		
	ZnSe-GaP	2,25...2,70	2,9...3,3		
	ZnS-GaP	2,25...3,80	2,4...3,3		



Германий и кремний

Ge

Ширина запрещённой зоны (300 K) $E_g = 0,67$ эВ.

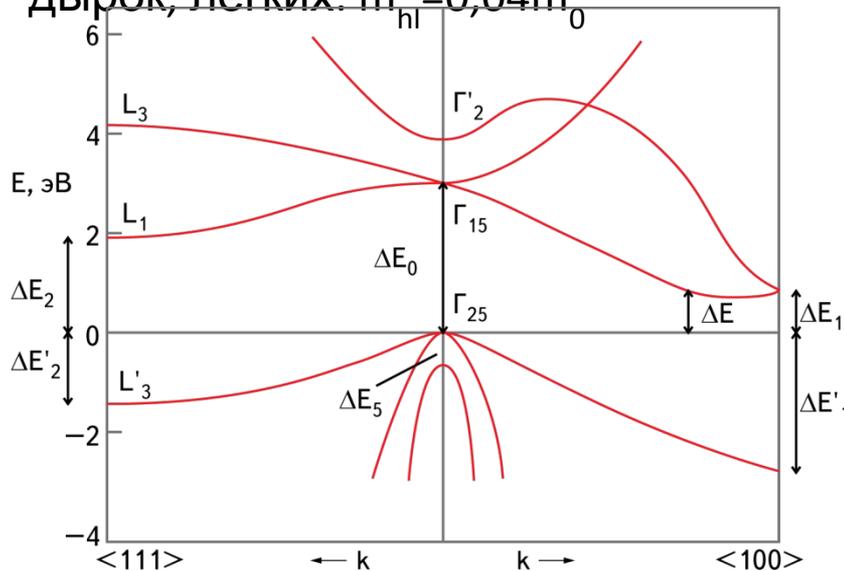
Собственная концентрация $n_i = 2,33 \cdot 10^{13}$ см⁻³.

Эффективная масса:

электронов: $m = 0,08m_0$

дырок, тяжелых: $m_{hh} = 0,38m_0$

дырок, легких: $m_{lh} = 0,04m_0$



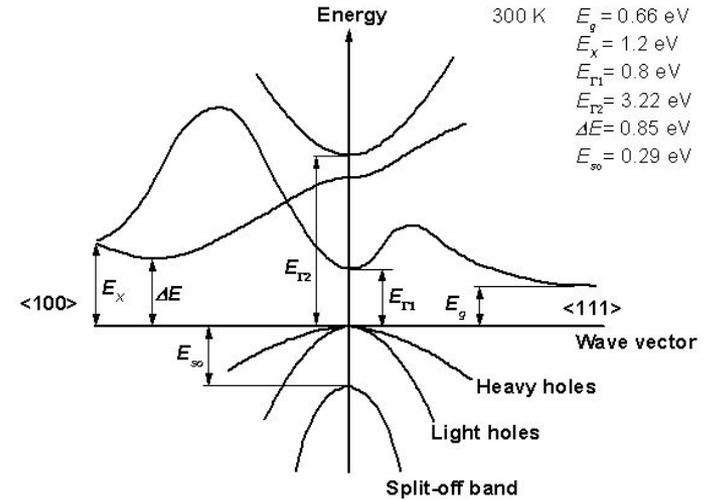
Схематическое изображение зонной структуры Si.

Ширины запрещенных зон равны:

$\Delta E = 1,12$ эВ, $\Delta E_0 = 3,4$ эВ, $\Delta E_5 = 0,035$ эВ,

$\Delta E_1 = 1,2$ эВ, $\Delta E'_1 = 3,1$ эВ,

$\Delta E_2 = 1,9$ эВ, $\Delta E'_2 = 2,2$ эВ.



300 K $E_g = 0.66$ eV
 $E_x = 1.2$ eV
 $E_{\Gamma_1} = 0.8$ eV
 $E_{\Gamma_2} = 3.22$ eV
 $\Delta E = 0.85$ eV
 $E_\infty = 0.29$ eV

Si

Ширина запрещённой зоны (300 K) 1,12 эВ.

Собственная концентрация $n_i = 1,1 \cdot 10^{10}$ см⁻³.

Эффективная масса:

электронов: $m = 0,36m_0$

дырок, тяжелых: $m_{hh} = 0,49m_0$

дырок, легких: $m_{lh} = 0,16m_0$

Германий и кремний

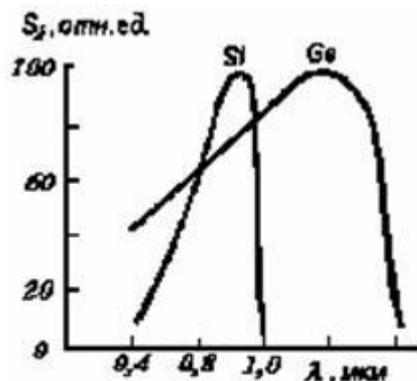


Рис. 1. Типичные относительные спектральные характеристики фотодиодов

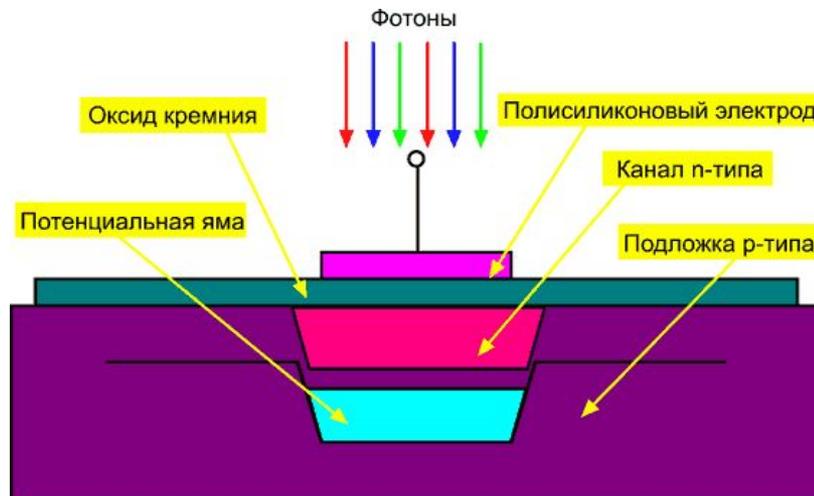


Таблица 1.

Основные параметры кремниевого фотодиода ФД-265-02 при температуре 20°C.

Наименование параметра. Единица измерения	Норма
Размер фоточувствительной площадки, мм	1,45x1,45
Диапазон спектральной чувствительности, мкм	0,4...1,1
Длина волны в максимуме чувствительности, мкм	0,85
Темновой ток, мкА, не более	0,005
Интегральная чувствительность (источник Тцв = 2850К), мкА/лк, не менее	4x10 ⁻²
Диапазон рабочих температур, °С	от -60 до +85
Габаритные размеры корпуса, мм, не более	∅ 4,05x7,5
Масса, г, не более	0,15
Материал корпуса	пластик, желтый



Арсенид галлия

Преимущества Si над GaAs:

- Доступность и дешевизна, механическая прочность и теплопроводность
- Наличие прекрасного собственного окисла и возможность управления свойствами интерфейса «полупроводник/диэлектрик»
- Более высокая подвижность дырок ($500 \text{ vs } 400 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$).

При изготовлении солнечных батарей:

- Более низкий коэффициент поглощения Si – толстые слои, но нет необходимости в подложке. Для GaAs требуются единицы микрометров толщины, но нужна подложка.
- У кремния нет проблем со стехиометрией....
- Совершенная решетка, низкая концентрация примесей и технология 16 нм... У GaAs обычно трудно избавиться от остаточных примесей и технология на уровне 100 нм.

Области применения в оптоэлектронике:

1. Инфракрасные светодиоды, инфракрасные лазеры с 1962 г.
2. Фотоприемники.
3. Солнечные батареи: тонкопленочные – дорогие, но высокоэффективные. В 1980-х годах их эффективность превзошла эффективность кремниевых, и в 1990 они заменили кремниевые в космических приложениях. Затем двух и трех-переходные (с Ge и InGaP) достигли эффективности в 32% и могут работать с концентрированным излучением до 2000 солнц (на Марсе трудятся). Рекорд эффективности в 30%.

AlGaAs: Является широкозонным полупроводником, ширина запрещенной зоны при 300 К плавно изменяется в зависимости от мольной доли компонентов от 1,42 эВ у GaAs до 2,16 эВ у AlAs. В диапазоне x от 0 до 0,4 является прямозонным полупроводником. Постоянная решётки этого соединения практически не зависит от параметра x , и, соответственно, совпадает с таковой у GaAs.

Применение: обкладки КЯ в гетероструктурах GaAs/AlGaAs в лазерных и фотодиодных структурах, “пассивация” GaAs.

InGaAs: Ширина запрещенной зоны E_g при 300 К плавно изменяется в зависимости от x от 0,354 эВ у InAs до 1,42 эВ у GaAs.

Применение: оптические приемники и излучатели ИК диапазона. Обладает большей по сравнению с кремнием и арсенидом галлия подвижностью носителей заряда.

Варьируя состав (x), можно оптимизировать спектры излучения и чувствительности приёмников в ближнем ИК, что находит применение в оптоволоконных технологиях передачи данных, использующих ИК-излучение с длиной волн 1300 и 1550 нм.

Нитрид галлия

GaN: Прямозонный полупроводник с широкой запрещённой зоной — 3,4 эВ (при 300 К).

Используется в качестве полупроводникового материала для изготовления оптоэлектронных приборов ультрафиолетового диапазона. Начал широко использоваться в светодиодах с 1990 года, а также мощных и высокочастотных полупроводниковых приборах. Имеет повышенную устойчивость к ионизирующему излучению (также, как и для другие полупроводниковые материалы — нитриды III группы), что перспективно для создания длительно работающих солнечных батарей космических аппаратов.

Из-за того, что транзисторы из нитрида галлия могут сохранять работоспособность при более высоких температурах и напряжениях, чем транзисторы из арсенида галлия, этот материал становится всё более привлекательным для создания приборов применяемых в усилителях мощности СВЧ.

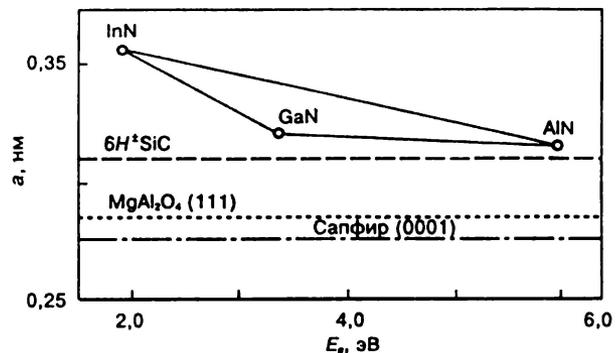
Нитриды галлия, индия и алюминия

Кроме светодиодов, твердые растворы AlInGaN , используются для изготовления:

- Солнечных батарей
- Приемников УФ излучения (в т.ч. т.н. солнечно-слепых)

В первом случае возможно выращивание нескольких слоев с изменением ширины запрещенной зоны, двухслойный солнечный элемент с ширинами запрещенной зоны в 1.1 и 1.7 эВ способен работать с эффективностью до 50%, от многослойных элементов ожидается эффективность до 70%.

Во втором случае, многослойные гетероструктуры позволяют при помощи изменения ширины запрещенной зоны отсекалть более коротковолновое излучение солнечного спектра и выделять только необходимые для детектирования длины волн.



Параметр	Материал			
	<i>AlN</i>	<i>GaN</i>	<i>InN</i>	Сапфир
<i>c</i> , нм	0,4980	0,5185	0,5705	1,2991
<i>a</i> , нм	0,3111	0,3182	0,3540	0,4785
$\Delta c/c$, $10^{-6} / \text{K}$	a)	3,17 (300–700 К) 7,75 (700–900 К)	2,70–3,70	5,8
$\Delta a/a$, $10^{-6} / \text{K}$	b)	5,59	3,40–5,70	5,8

Эпитаксия

$\epsilon\pi$ – на , $\tau\alpha\xi\iota\sigma$ – упорядоченность

Эпитаксия – контролируемое упорядоченное выращивание монокристаллического слоя вещества на поверхности монокристаллической подложки с наследованием ее кристаллической структуры и ориентации

(нестрогое определение)

Фаза 2 - область снабжения
материалом для роста.

— Поверхность - граница раздела

Фаза 1 - растущий кристалл

“Вакуумная эпитаксия” - МВЕ

Газофазная эпитаксия

Жидкофазная эпитаксия

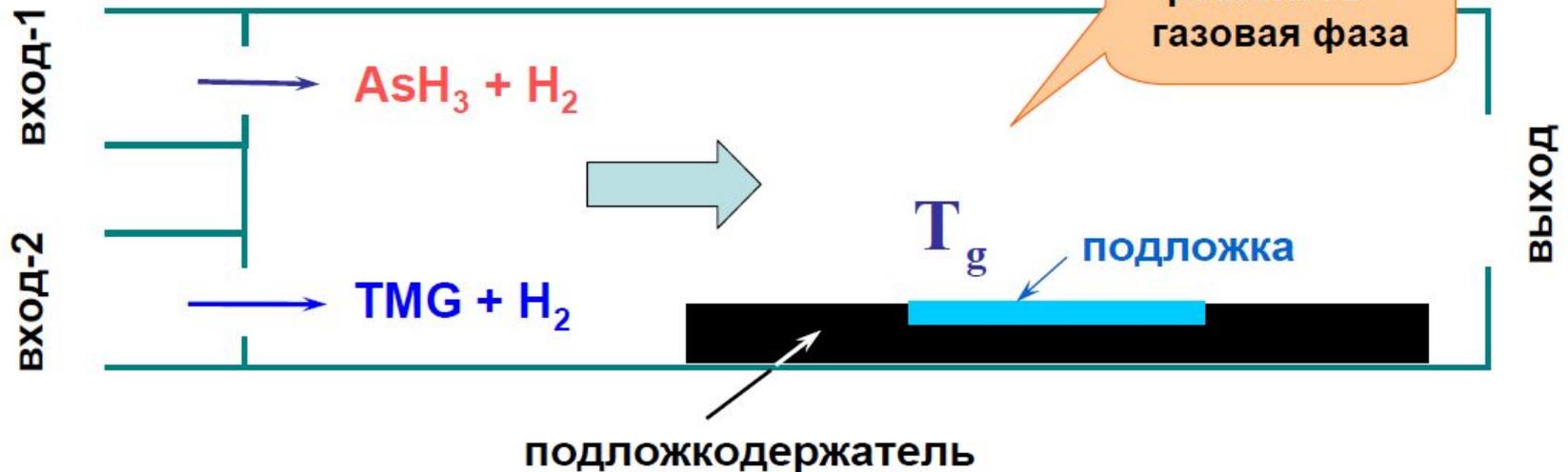
“Твердофазная эпитаксия”

«Агрегатное состояние»

фазы 2 определяет процессы
массопереноса.

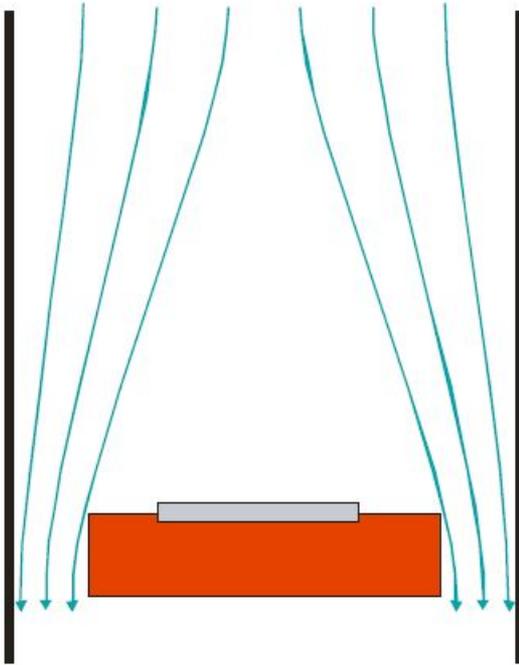
Газофазная эпитаксия

конвекция и диффузия - основные механизмы
транспорта реагентов

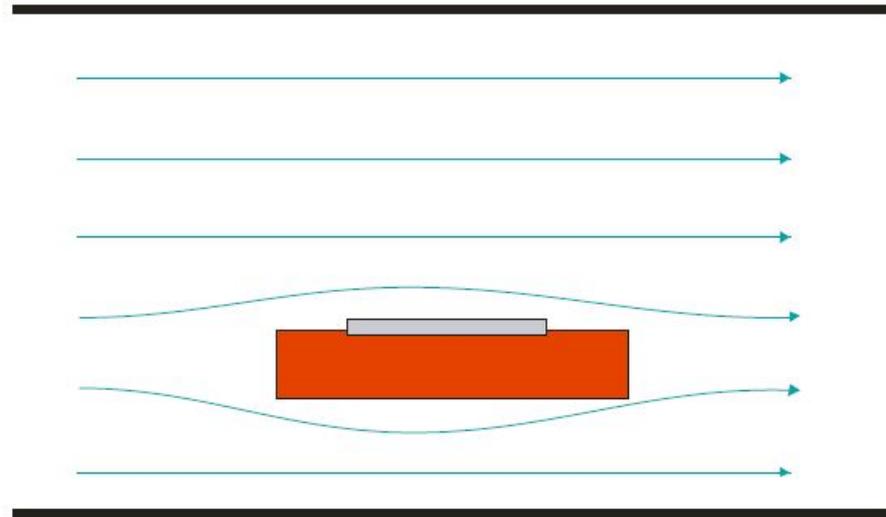


- непрерывная подача реагентов
- возможность использования предельно высоких температур роста
- простота контроля расхода реагентов (и, тем самым, скорости роста) в широком диапазоне
- простота удаления из реактора отходов
- относительно низкие требования к чистоте и герметичности
- относительно малые размеры промышленных установок
- абсолютное доминирование в промышленности

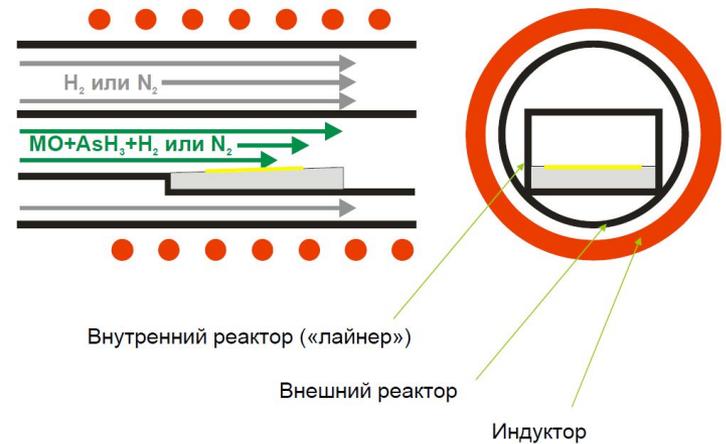
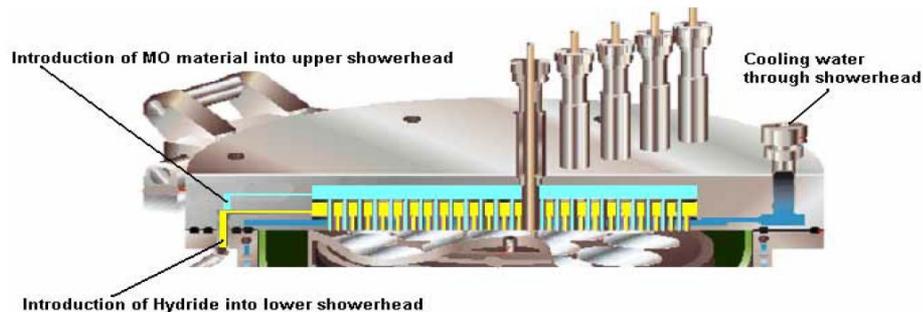
Реакторы



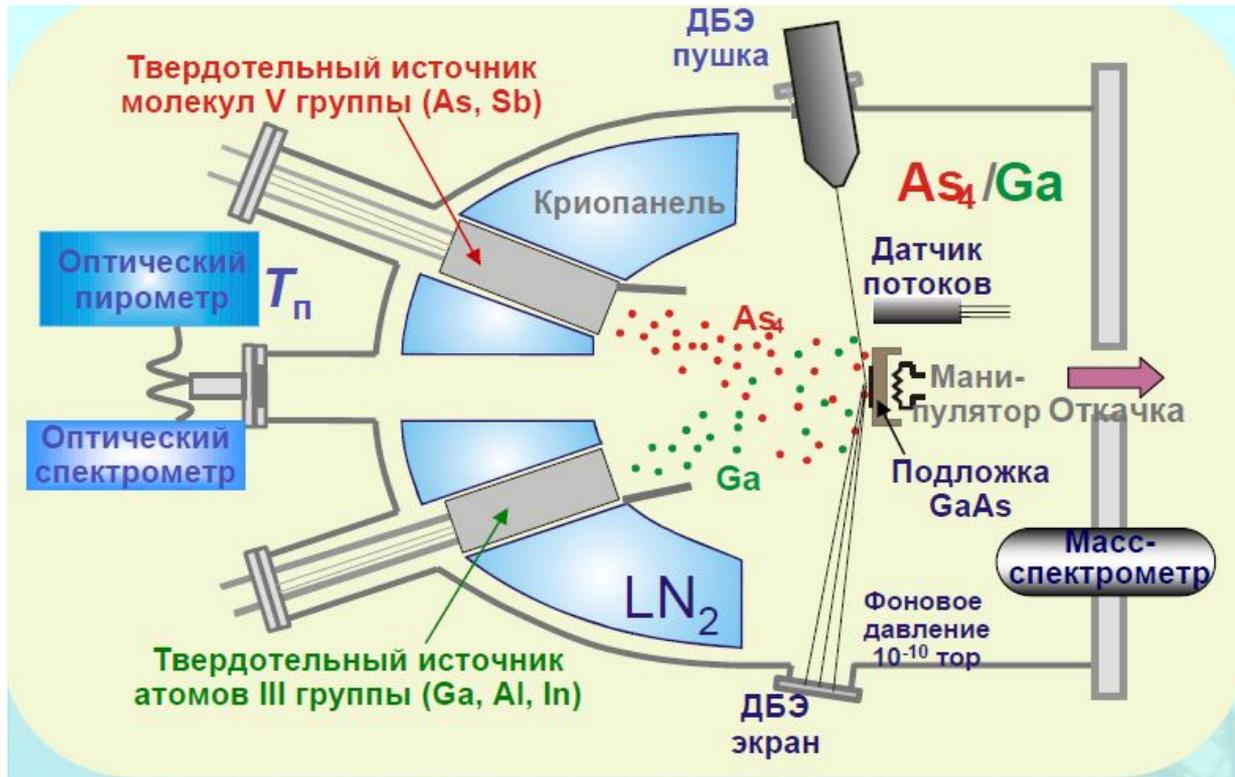
«Вертикальный»



«Горизонтальный»



Молекулярно-пучковая эпитаксия



Основные элементы:

- ✓ вакуумная камера (10^{-10} мм.рт.ст) с изолированной шлюзовой камерой
- ✓ средства индив. откачки
- ✓ источники молекулярных пучков (ИМП)
- ✓ заслонки источников
- ✓ многостепенной манипулятор с держателем образца и нагревателем
- ✓ средства контроля роста

Основные характеристики МПЭ

- Малая скорость роста ~ 1 мкм/ч;
- Относительно низкая температура роста ($150-200^\circ\text{C}$ меньше, чем в МО ГФЭ);
- Возможность резкого прерывания и возобновления роста с помощью заслонок для каждого компонента - контроль профилей состава и легирования выращиваемых структур на монослойном и субмонослойном уровне;
- Широкие возможности варьирования состава и легирования выращиваемых соединений за счет введения новых ИМП (до 12 в исследовательских установках);

MOVPE vs MBE A^{III}-B^V.

Преимущества и недостатки.

Близость поверхностных процессов при MBE и MOCVD GaAs приводит к тому, что различия между этими технологиями носят вторичный и инженерный характер.

1. В случае MBE анализ и расчеты намного проще.
2. Температура роста при MBE заметно ниже.
3. В MBE установке возможно использование HEED (ДБЭ).
4. В MOCVD системе избыток вещества V группы уносится потоком газа.
5. В MOCVD смена источников занимает часы (иногда смена возможна «на ходу», без прерывания процесса), в MBE – дни.
6. В газовой атмосфере MOCVD проще и однороднее нагрев подложки.
7. В MOCVD процессе намного легче обеспечить заданный (и резкий, и плавный) профиль состава.
8. MOCVD установка на 1 двухдюймовую подложку намного больше аналогичной MBE установки, а промышленная многоподложечная MOCVD установка уже меньше аналогичной MBE установки. С другой стороны, увеличение площади подложек в MBE – только вопрос размеров камеры и объема источников, а в MOCVD увеличение реактора зачастую принципиально влияет на рост.

Преимущества и недостатки.

Области принципиального преимущества MBE технологии:

- II – VI, InN и InGaN с высоким содержанием In - благодаря меньшей допустимой температуре роста.
- III-As структуры с квантовыми точками, каскадные лазеры и иные структуры, для которых принципиально важен контроль поверхности на уровне субмонослоев – благодаря применимости HEED.

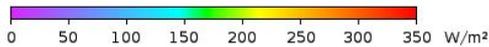
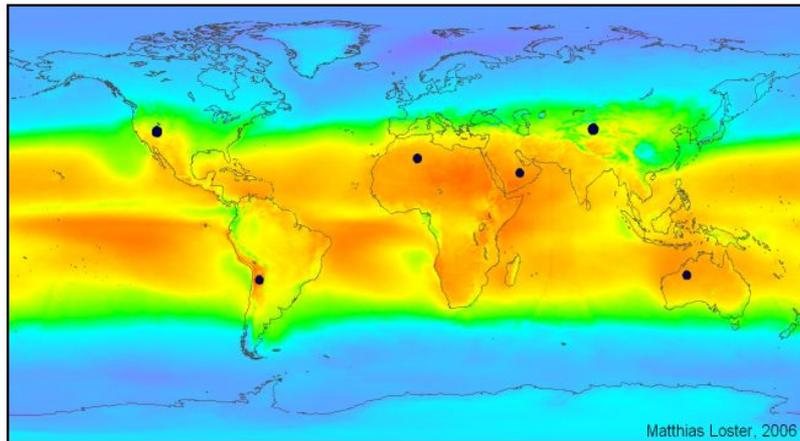
Области принципиального преимущества MOCVD технологии:

- InGaAlP (LED, DVD лазеры, верхний каскад солнечных батарей) благодаря намного более простой работе с фосфором.
- InGaAsP (телекоммуникационные лазеры).
- III-N материалы, кроме InGaN и AlGaN с малым содержанием Ga, благодаря более высокому парциальному давлению «активного азота» и более простой возможности управления обратимостью эпитаксиального процесса.

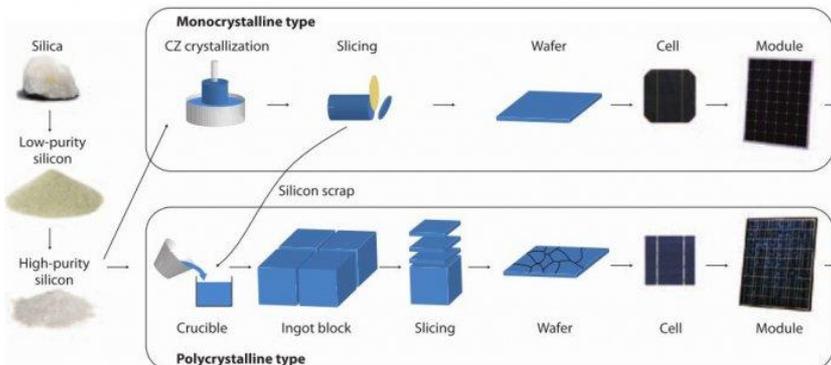
Области эквивалентных возможностей:

HEMT (при MBE – все таки проще), мощные InGaAlAs лазеры.

Кремний



$\Sigma \bullet = 18 \text{ TWe}$



Три поколения ФЭП:

Кристаллические (первое поколение):

монокристаллические кремниевые;

поликристаллические

(мультикристаллические) кремниевые;

технологии выращивания тонкостенных заготовок: EFG (Edge defined film-fed crystal growth technique),

тонкослойный поликремний (Apex).

Тонкоплёночные (второе поколение):

кремниевые: аморфные,

микrokристаллические,

нанокристаллические, CSG (crystalline silicon on glass);

на основе теллурида кадмия (CdTe);

на основе селенида меди-индия-(галлия) (CIGS);

ФЭП третьего поколения:

фотосенсибилизированные красителем (dye-sensitized solar cell, DSC);

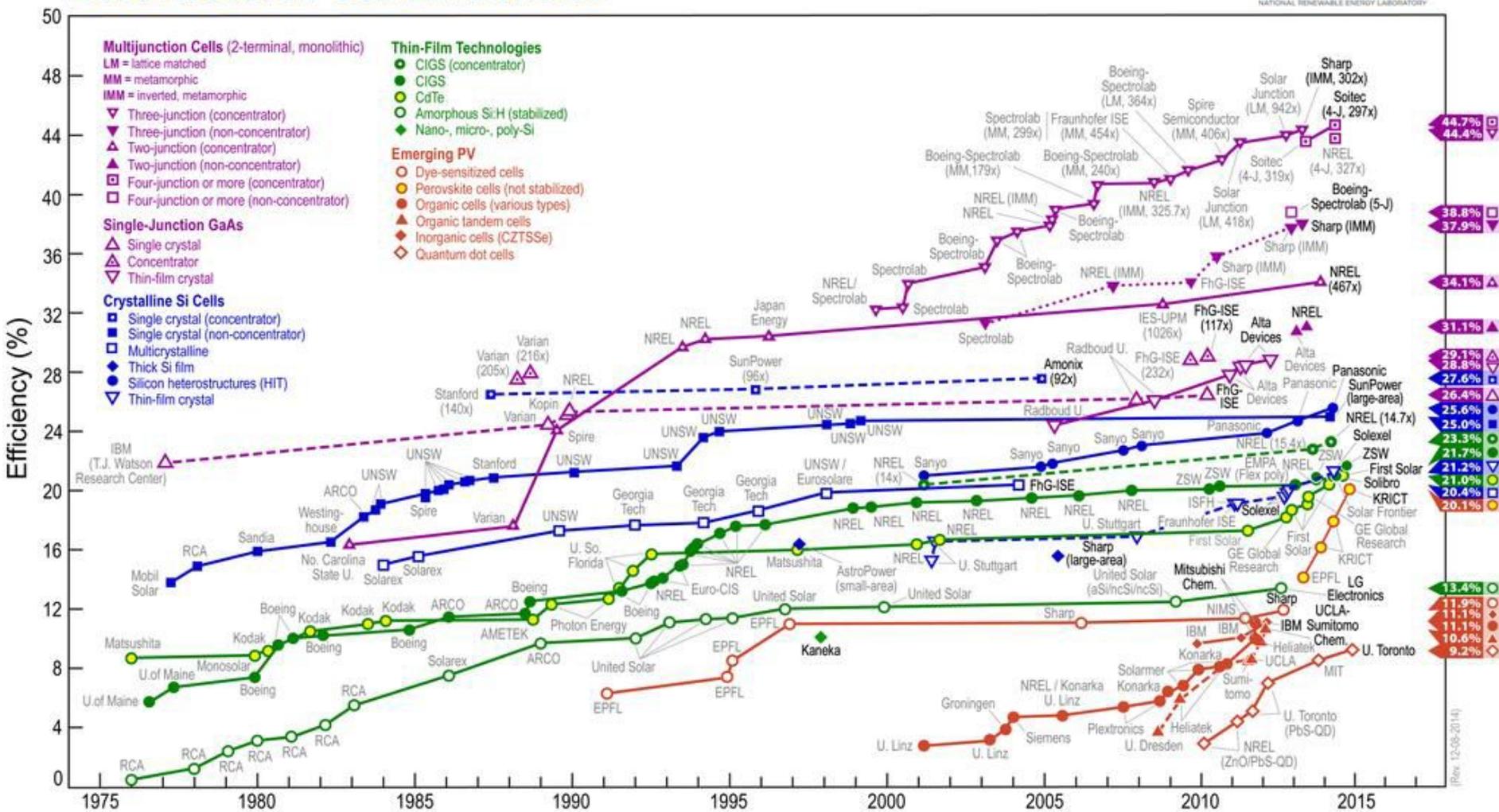
органические (полимерные) ФЭП (OPV);

неорганические ФЭП (CTZSS);

ФЭП на основе каскадных структур.

Эффективность фотопреобразователей

Best Research-Cell Efficiencies



(Rev. 12-05-2014)

Конец первой части