

# Источники оптического когерентного излучения для информационных систем I

"Кто, кто здесь?" -- дико закричал Гарин, и в это же время ослепительный луч, не толще вязальной иглы, соскочил со стены и резнул Тыклинского наискосок через грудь и руку.

Толстой Алексей Николаевич  
Гиперболоид инженера Гарина

Общий обзор лазерных  
систем

# ЛЕКЦИЯ 9

Индуцированные и спонтанные переходы, коэффициенты Эйнштейна.  
Балансные уравнения. Двух, трех и четырех уровневые системы.

... **Laser... inter eximia naturae dona  
numeratum plurimis compositionibus inseritur**

... Лазер—один из чудеснейших даров  
природы, имеющий множество применений  
*Плиний Старший, «Естественная история»,  
XXII, 49*

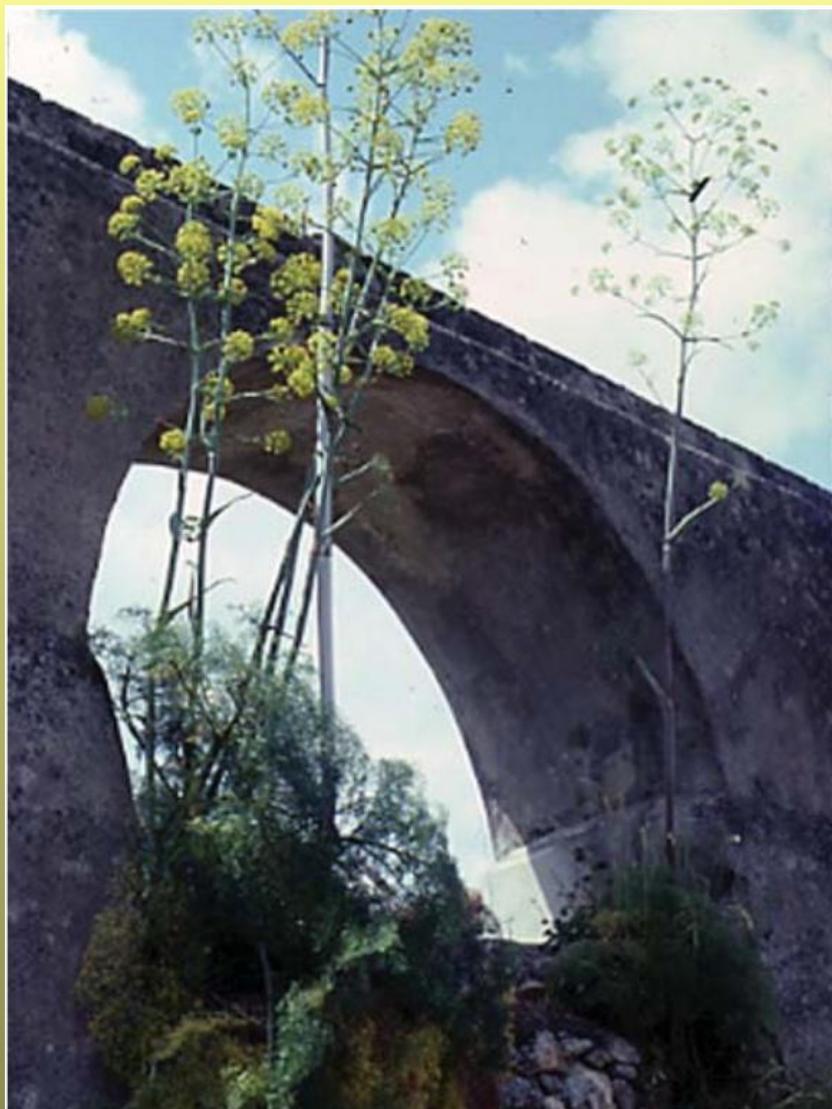
(1 в. н. э.)

Plinius, *Naturalis historia*, XXII, 49 (first century  
A.D.)

**Light Amplification Stimulated Emission of Radiation**

**Усиление света вынужденным испусканием излучения**

(*microwave amplification by stimulated emission of radiation*) — было предложено в 1954 году  
американцем Ч. Таунсом)



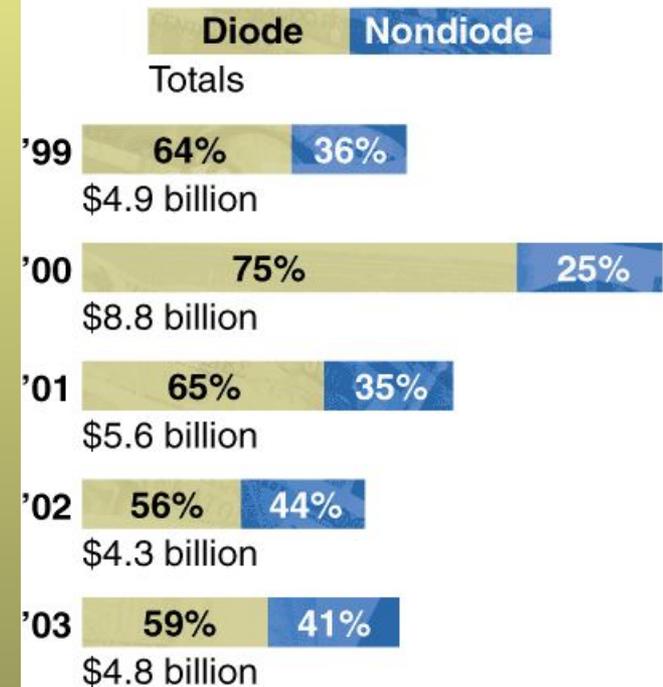
Золотая драхма Кирены, Laser (Silphion)

# Доход от продаж лазеров в период 1999 – 2008 г.

Figure 1.  
Worldwide commercial laser revenues 2004 to 2008



Worldwide commercial laser revenues 1999 to 2003



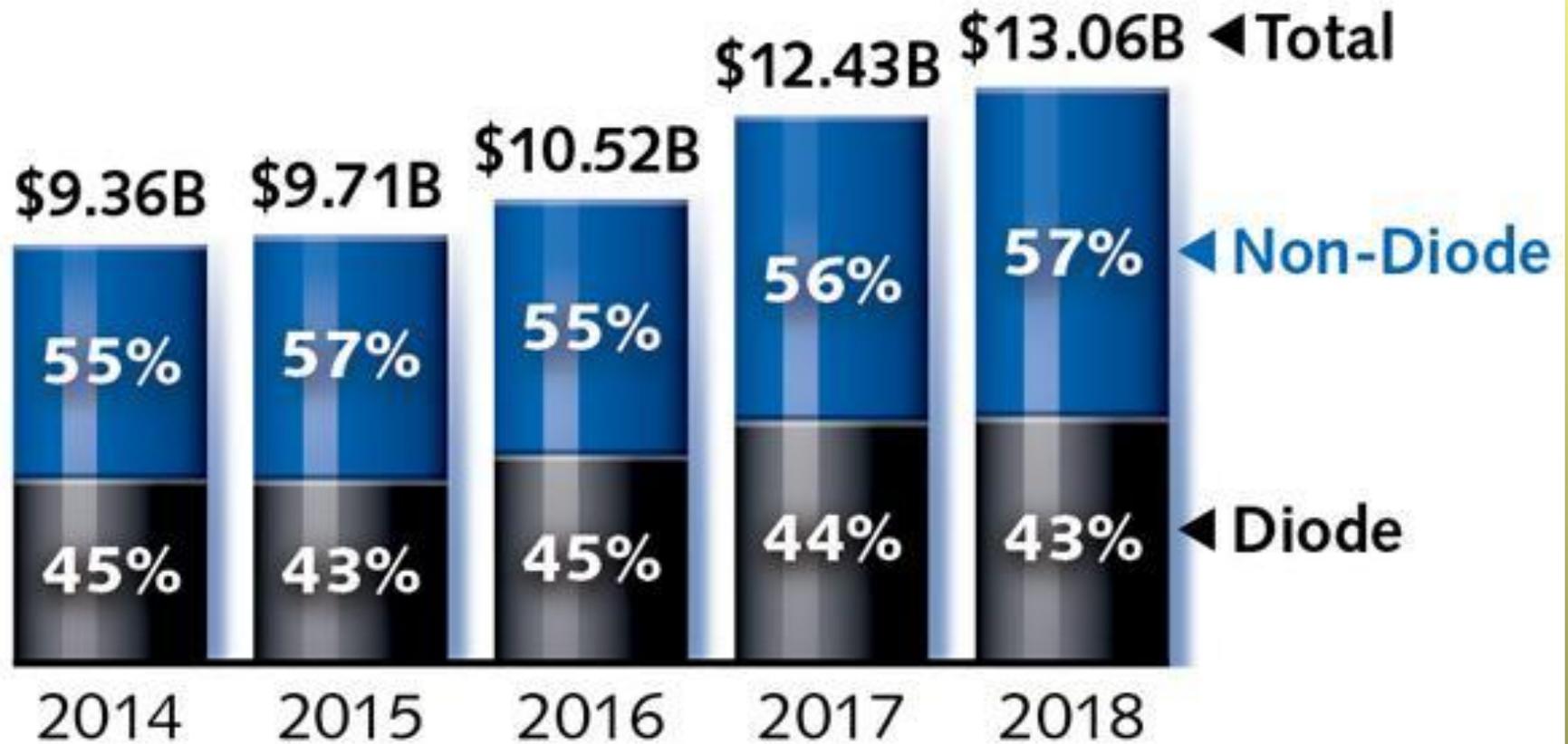
Данные фирмы  
Strategies Unlimited,  
Laser Focus // 2008  
No.1

# Worldwide commercial laser revenues



Laser Focus // 2011  
No.1

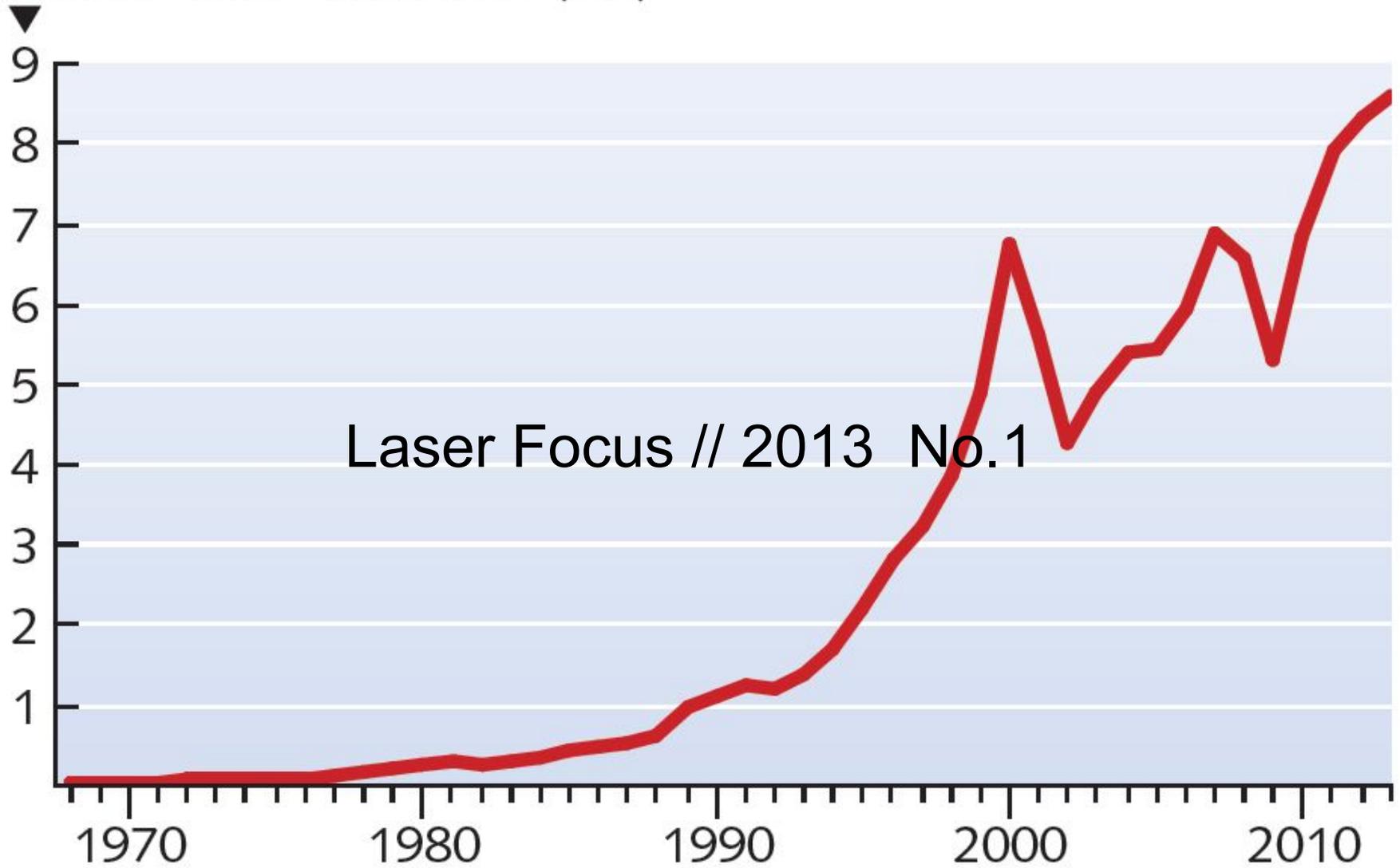
# Laser revenues and 2018 forecast



**Source:** Strategies Unlimited

Laser Focus // 2018  
No.1

# Historic laser revenue (\$B)



Laser Focus // 2013 No.1

Source: Strategies Unlimited

*Coherent (Santa Clara, CA):* Net sales for the year were \$1.7 billion.

*Han's Laser (Shenzhen, China):* With reported sales of RMB 3.1 billion (\$452 million) in the first half of 2016 and growing 22.7% year over year, Han's Laser is expected to reach the billion-dollar mark in 2017.

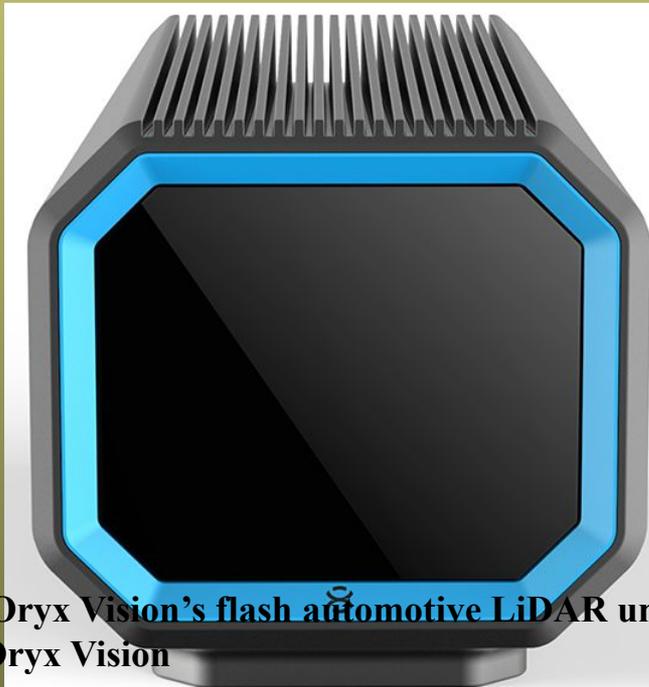
*IPG Photonics (Oxford, MA):* This fiber-laser manufacturer's third quarter revenues of \$392.6 million represented a 48% year-over-year increase, pushing its nine-month revenues over \$1 billion, up from \$726 million in the same quarter in 2016.

*Trumpf (Ditzingen, Germany) :* The Trumpf Group also saw a significant uptick in its 2016/2017 financials, with pre-tax profits up 11.3% to nearly \$398 million and sales up 10.8% to a record-breaking \$3.6 billion.

Assembling an iPhone involves a dozen or more laser-based processes, including cutting glass, engraving parts, and drilling circuit boards.

The iPhone X is also the first iPhone (although not the first smartphone) to feature an organic light-emitting diode (OLED) display.

Many smartphones—including the iPhone 8—contain VCSELs for 3D sensing and ranging applications -Lidar



Oryx Vision's flash automotive LiDAR unit. Source: Oryx Vision



Velodyne's long-range unit. Source: Velodyne.

popular applications for lidar sensors in 2017

Field drainage/flood maps and patterns

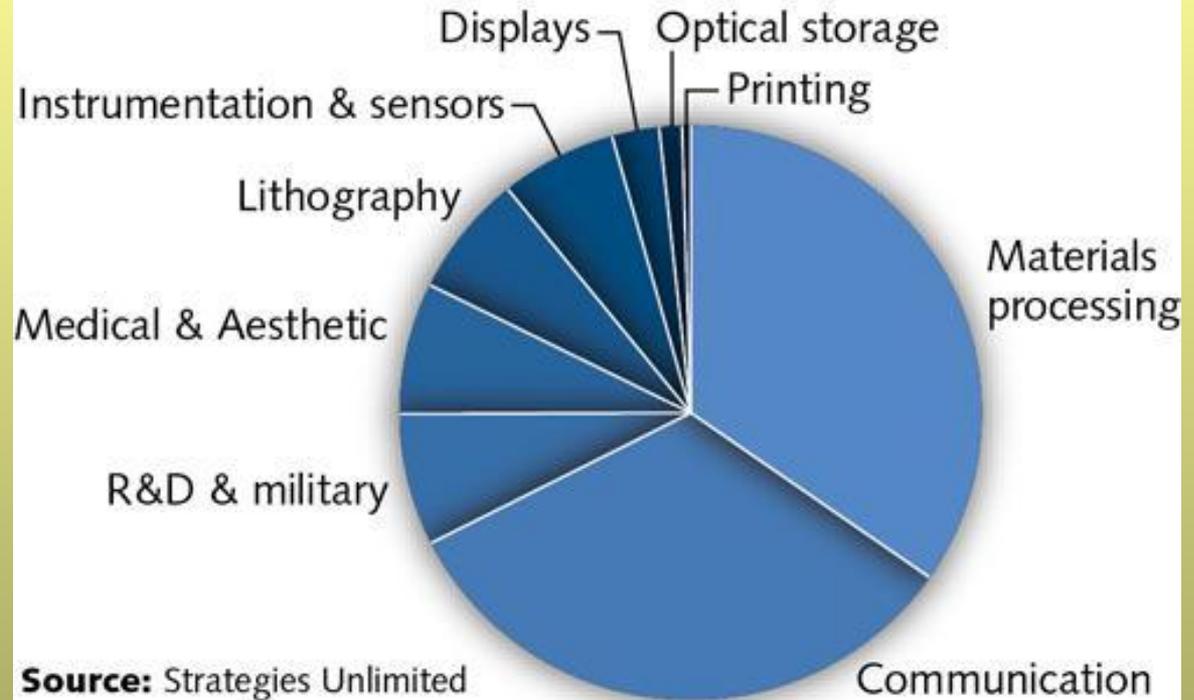
- Self-driving vehicles
- Drone technology
- Commercial aviation
- NASA auto piloting equipment



## German quantum initiative QUTEGA starts with optical single ion clock

Worldwide revenues for the augmented reality and virtual reality (AR/VR) market are forecast to increase by 100% or more over each of the next four years

## Laser segments 2017 Total laser sales: \$12.3 billion

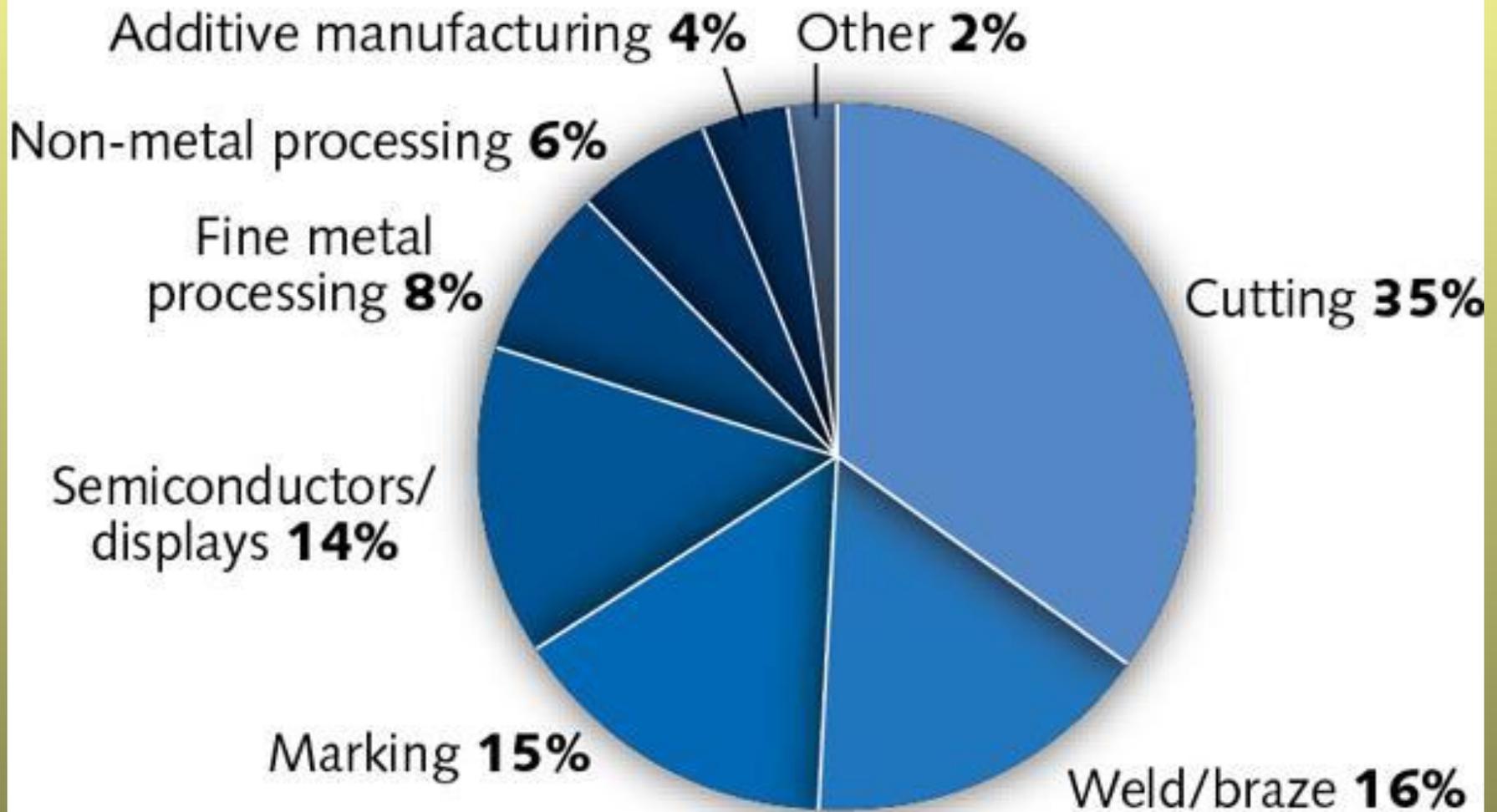


### Industrial laser revenues (US\$M)



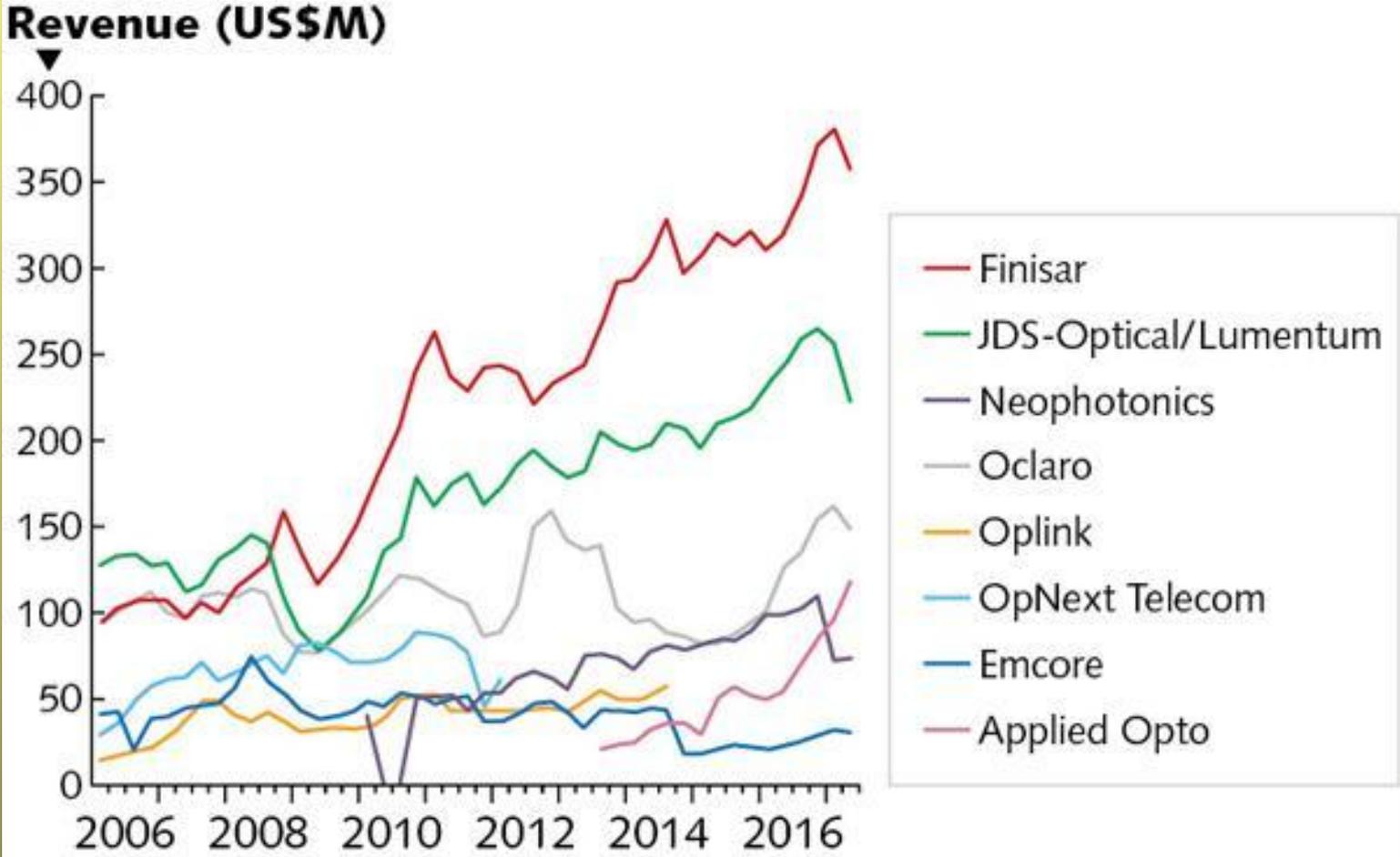
Данные фирмы  
Strategies Unlimited,  
Laser Focus // 2018  
No.1

# Industrial laser applications 2017



**Source:** Strategies Unlimited

# COMMUNICATIONS AND OPTICAL STORAGE



Finisar (Sunnyvale, CA) saw [record revenue](#) of \$1.45 billion in its fiscal year through April 2017—a 14.7% jump over the prior fiscal year; Oclaro (San Jose, CA) saw [phenomenal 47% growth](#) to \$601 million for its fiscal year ended July 1, 2017; and Lumentum revenue for its fiscal year ended July 1, 2017 grew 11% to reach a record \$1 billion.

# **ENTERTAINMENT, DISPLAYS & PRINTING**

100 all-laser cinema  
multiplexes installed  
worldwide



**Projection system at the  
AMC Universal Citywalk  
movie theatre**

# World's largest laser light show sets new **GUINNESS WORLD RECORD**, lighting up Nevada skyline



- 314 individual laser fixtures create spectacular laser light show
- 12 tonnes of equipment valued at £2.6 million
- 1,377 watts of laser power lit up the Las Vegas skyline
- British company ER Productions set record, which has supported The X Factor, Zayn Malik, Calvin Harris, Metallica and Katy Perry

# ОСНОВНЫЕ ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

1. Металлообработка — сварка, резка, упрочнение.
2. Микроэлектроника — обработка пленок, интегральная оптика, нанесение пленочных слоев, микрооптика, микрохимия, **микромеханика**, литография, подстройка параметров.
3. Полиграфия — изготовление печатных форм, лазерная печать (принтеры).
4. Оптическая связь и волоконные технологии.
5. Химические технологии: разделение изотопов, катализ и т.д.
6. Звуко- и видеозапись и воспроизведение.
7. Измерения и контроль в технологических процессах, дефектоскопия.
8. Дистанционные измерения, экологический мониторинг.
9. Оптическая локация, навигация, дальнометрия, батиметрия.
10. **Лазерная спектроскопия.**
11. **Клиническая медицина — хирургия, терапия** и диагностика, и биология (все направления клинической медицины).
12. Голография.
13. Реставрация художественных произведений.
14. Трехмерное моделирование.

# ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ЛАЗЕРОВ

## Космос

### – лазерные реактивные двигатели

- разведка и добыча полезных ископаемых на космических телах;
- удаление космического «мусора» с Земли или из космоса.

## Энергетика

- передача энергии на большие расстояния (из космоса);
- разделение изотопов,– термоядерный синтез,– рентгеновские лазеры;
- управление грозowymi разрядами.

## Строительство

- резка бетона, скал, камня, стали, стекла и т.п.;
- поверхностная обработка дерева и других строительных материалов;
- проходка туннелей и скважин;
- **очистка скульптуры и архитектуры.**

## Экология — очистка среды

- ликвидация разливов нефтепродуктов;
- ликвидация аварий и разрезка ядерных реакторов (дистанционная);– ликвидация аварий : жд, авто и др. — разрезка на мобильных лазерах.

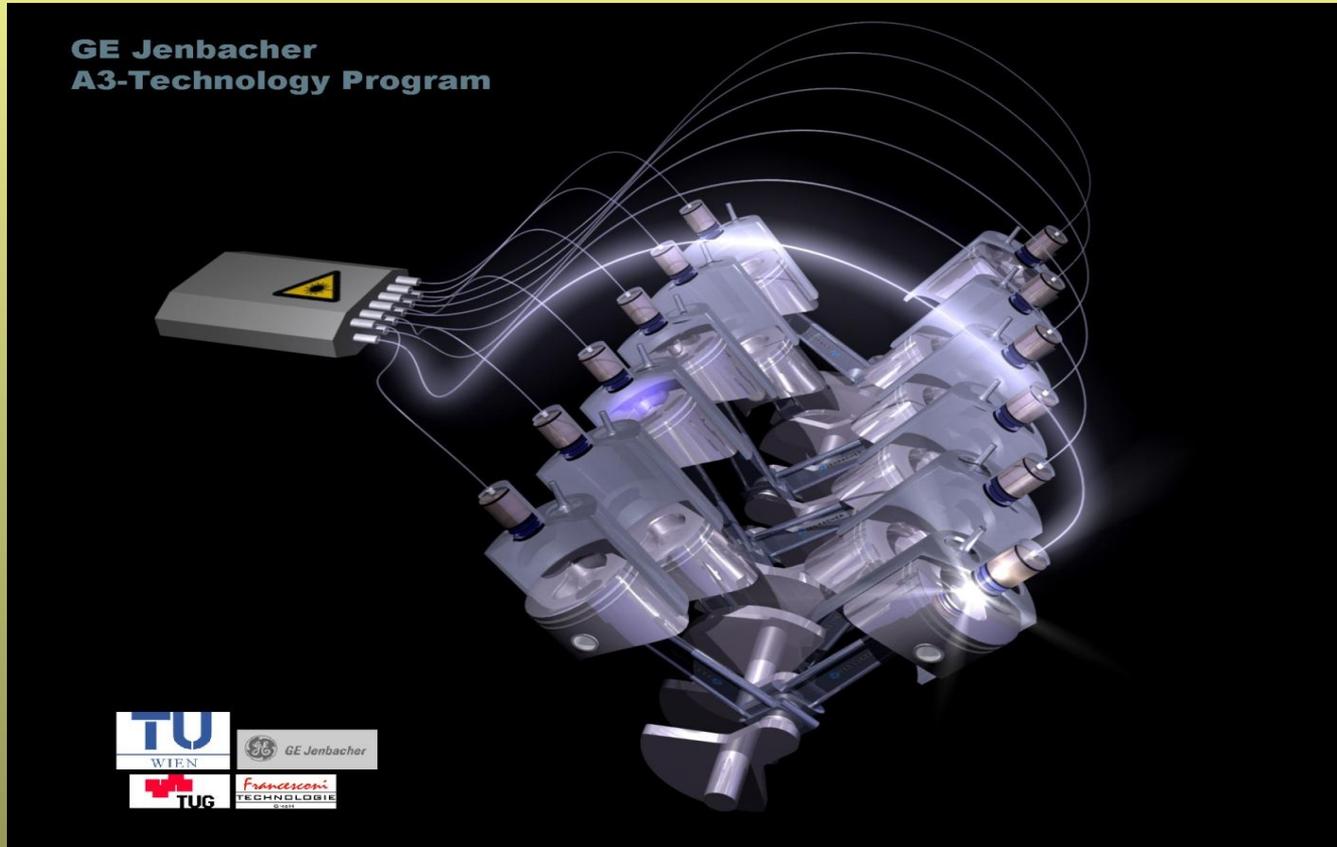
## Лазерное оружие

- космическое – противоракетное, ослепляющее.

## Наука

- оптоинформатика, ближнепольная оптика.

# ЛАЗЕРНОЕ ЗАЖИГАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ



D:\ΑίεοιΑίου2\  
άσρúά όάσρτεάεε άύς

# Shingled Magnetic Recording

## Conventional Writes



Figure 1. Conventional Track Spacing

The reader and writer elements of today's perpendicular magnetic recording HDDs have reached a physical limitation. Without future recording technologies, they cannot become smaller, nor can the tracks they read and write.

SMR achieves higher areal densities by squeezing tracks closer together. Tracks overlap one another, like shingles on a roof, allowing more data to be written to the same space. As new data is written, the drive tracks are trimmed, or shingled. Because the reader element on the drive head is smaller than the writer, all data can still be read off the trimmed track without compromise to data integrity or reliability. In addition, traditional reader and writer elements can be used for SMR. This does not require significant new production capital to be used in a product, and will enable SMR-enabled HDDs to help keep costs low.

## SMR Writes

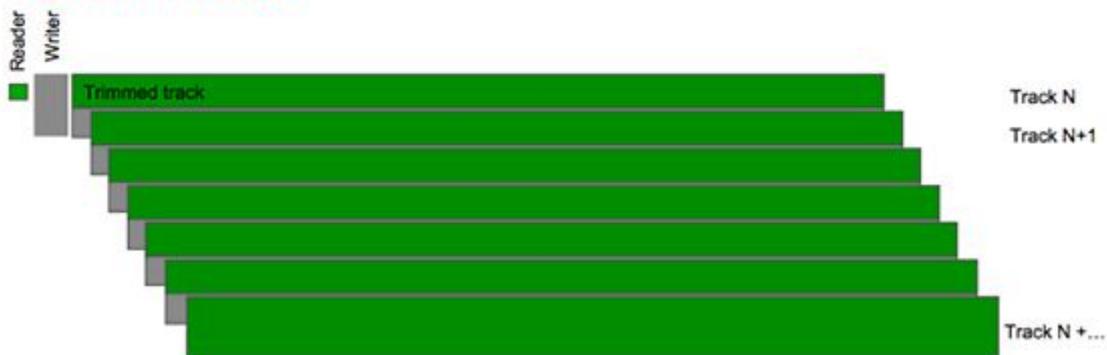
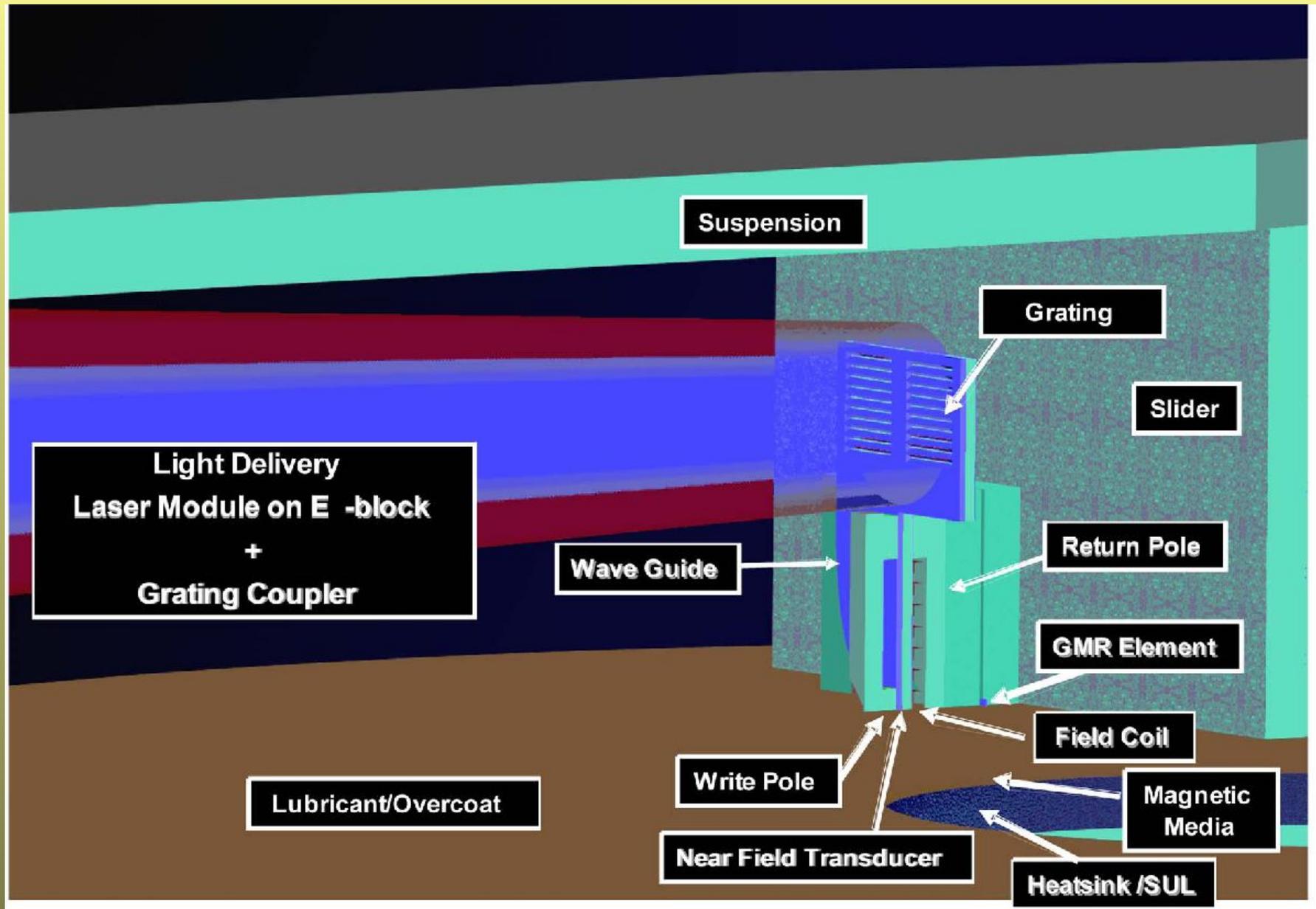
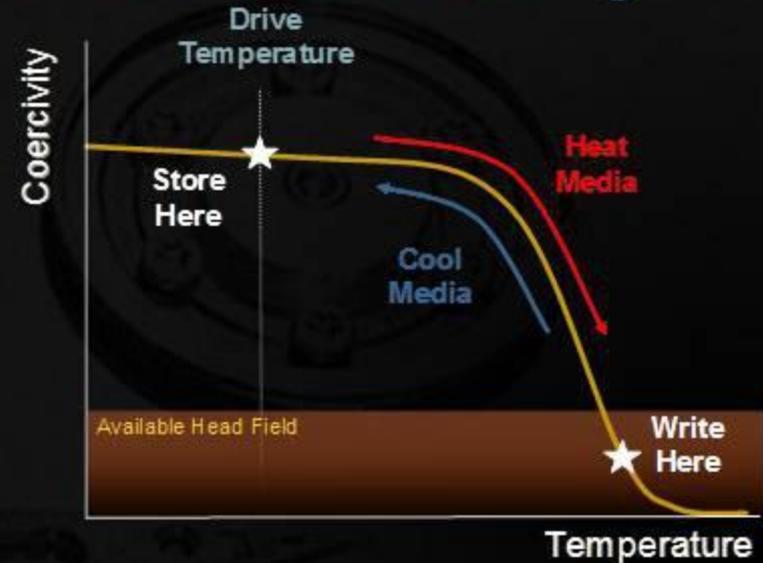
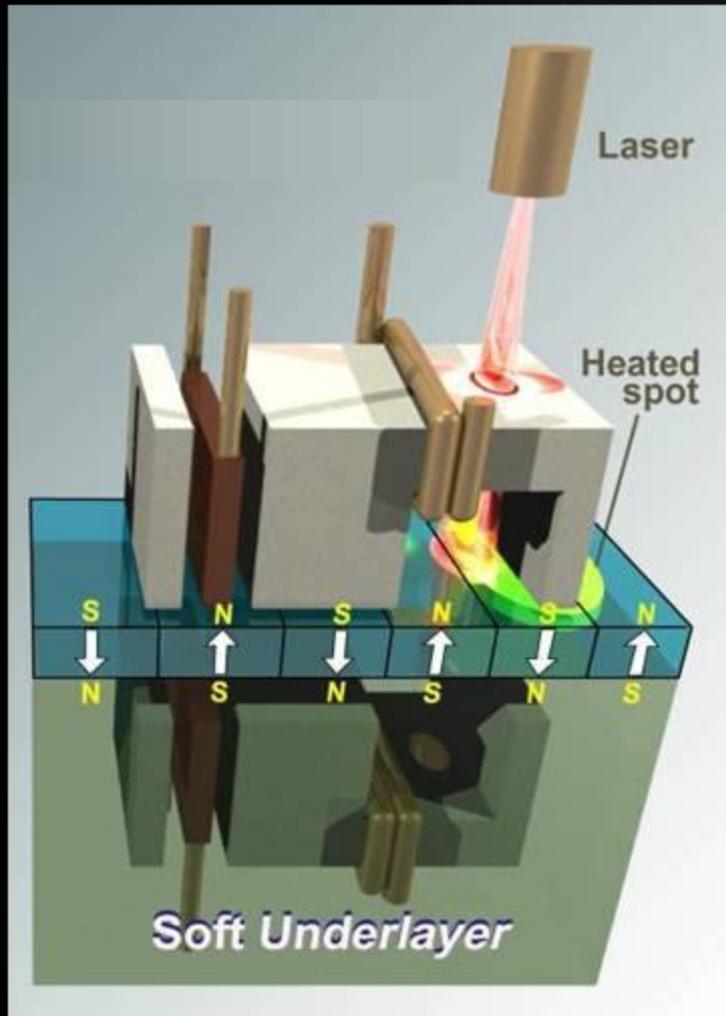


Figure 2. Track Spacing Enabled by SMR Technology

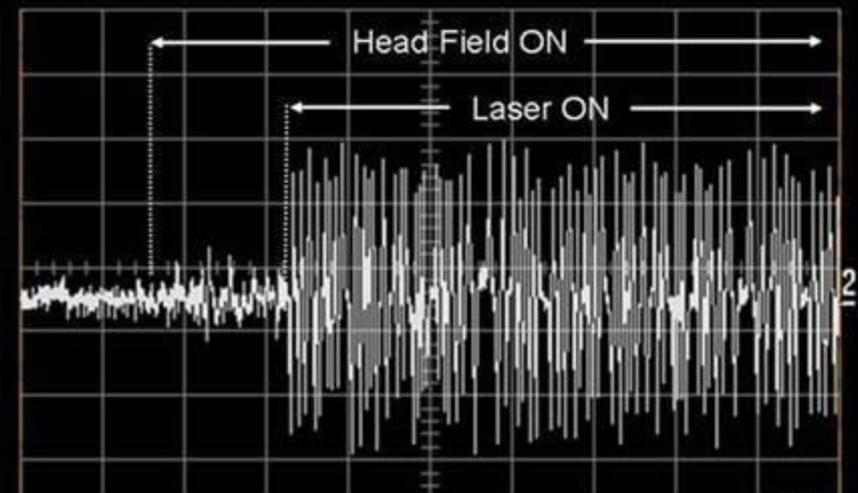
# Heat Assisted Magnetic Recording



# Heat Assisted Magnetic Recording



127-bit Pseudo Random Sequence



Writer above, laser below configuration

- At the TMRC conference in Tokyo in August 2013 it seemed many of the HDD designers didn't expect HAMR drives until at least 2018 so the 2020 20 TB target appears reasonably likely.

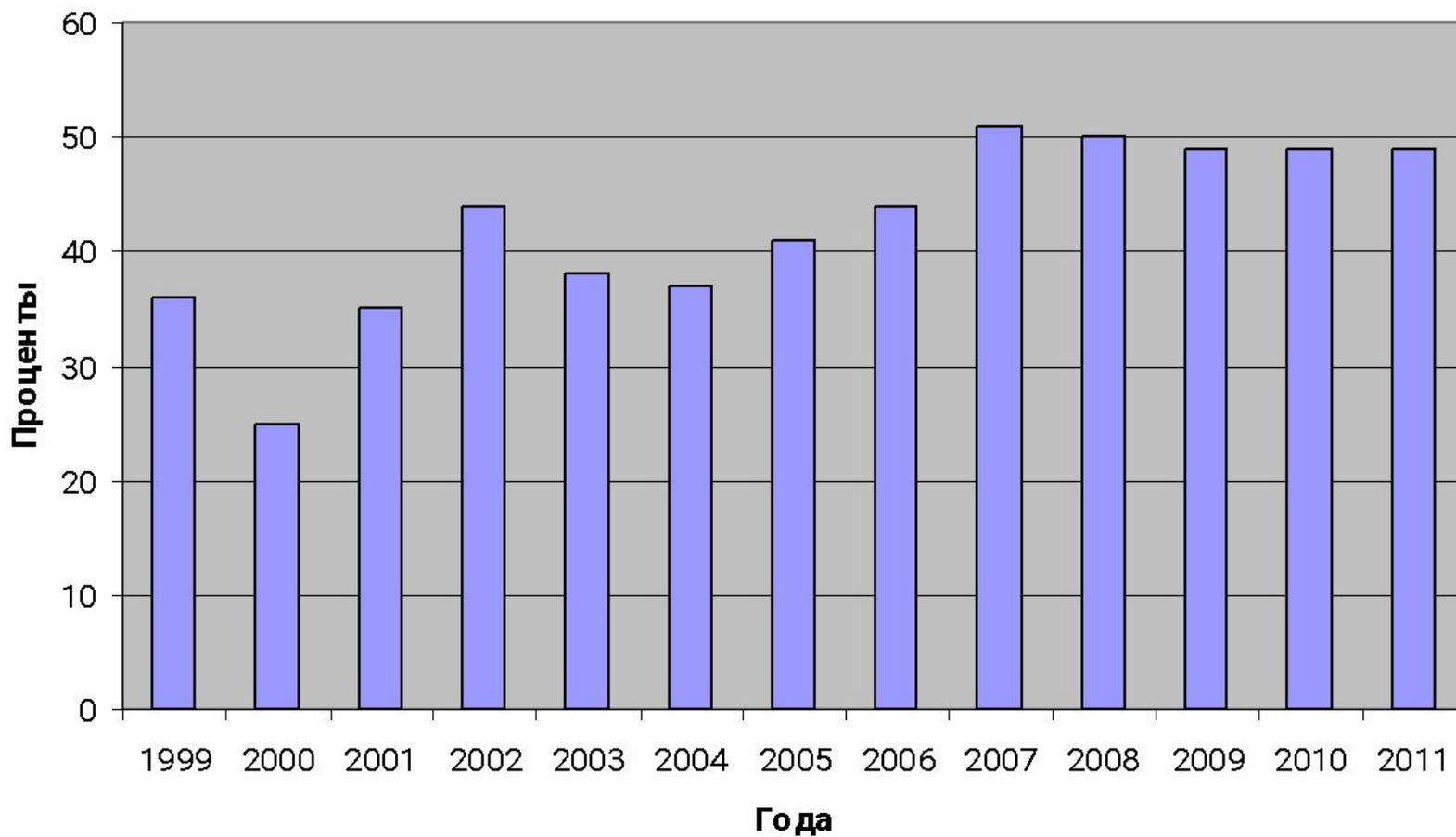
В 2017 г. изготовлено

~1 200 000 000 п/п лазеров

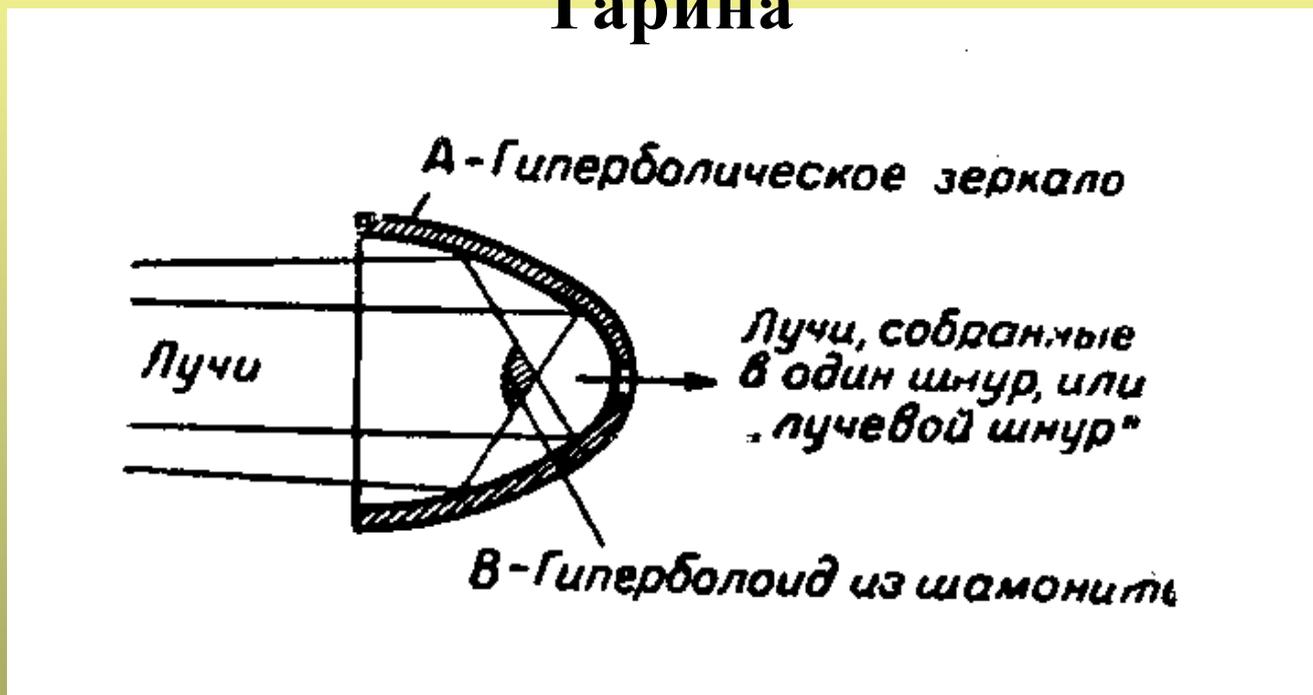
~ 150 000 не п/п лазеров

44% 56%

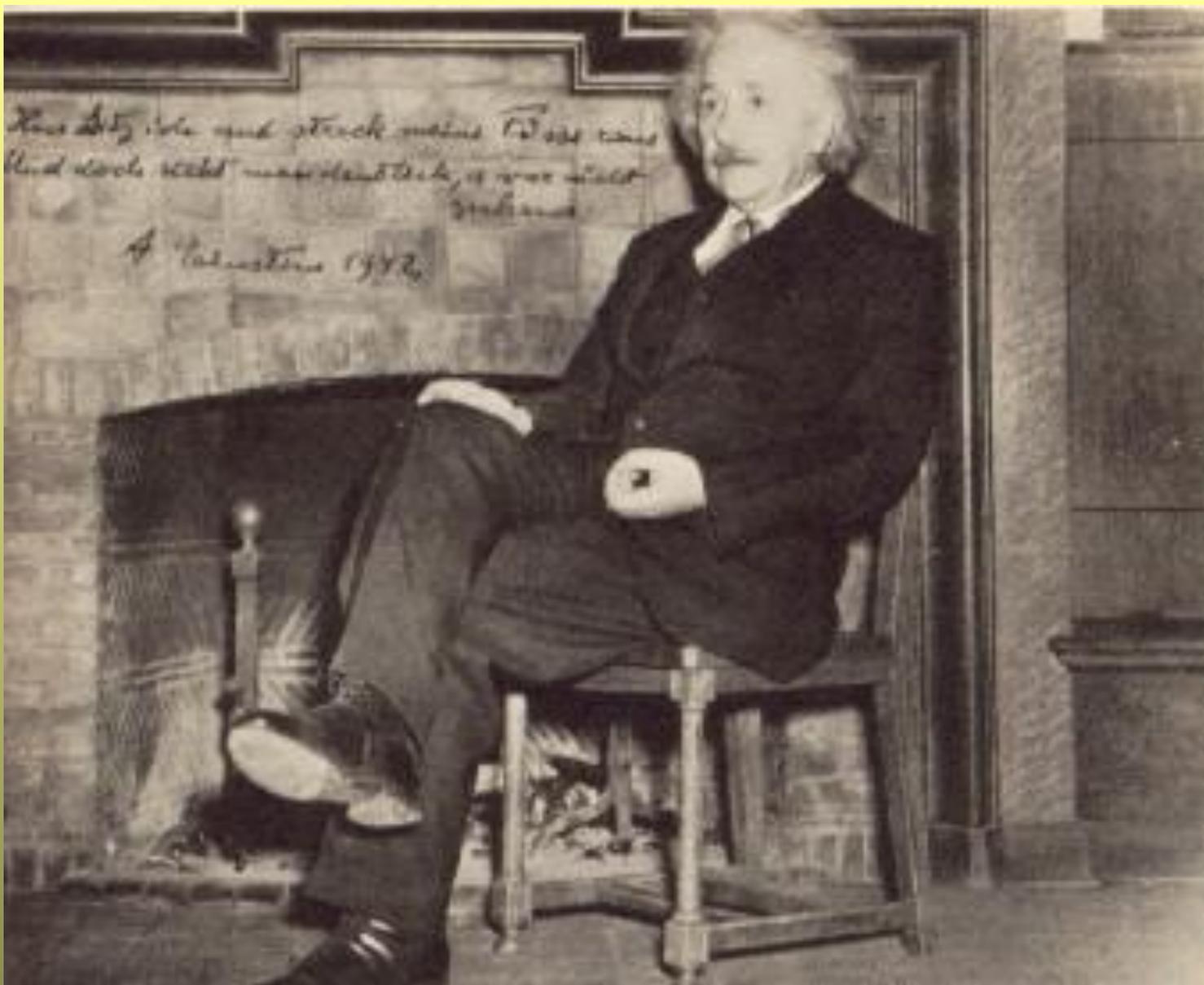
## Доля доходов по недиодным лазерам в %



# Гиперболоид инженера Гарина



"Кто, кто здесь?" -- дико закричал Гарин, и в это же время ослепительный луч, не толще вязальной иглы, соскочил со стены и резнул Тыклинского наискосок через грудь и руку. Толстой Алексей Николаевич



A. Einstein. Zur Quantentheorie der Strahlung.//  
Phys.Z., **18** (1917) 121

### 3. Zur Quantentheorie der Strahlung

von A. Einstein.

[1]

Die formale Ähnlichkeit der Kurve der chromatischen Verteilung der Temperaturstrahlung mit dem Maxwell'schen Geschwindigkeits-Verteilungsgesetz ist zu frappant, als daß sie lange hätte verborgen bleiben können. In der Tat wurde bereits W. Wien in der wichtigen theoretischen Arbeit, in welcher er sein Verschiebungsgesetz

$$\rho = \nu^3 f\left(\frac{\nu}{T}\right) \quad (1)$$

[2] ableitete, durch diese Ähnlichkeit auf eine weitergehende Bestimmung der Strahlungsformel geführt. Er fand hiebei bekanntlich die Formel

$$\rho = \alpha \nu^3 e^{-\frac{h\nu}{kT}} \quad (2)$$

welche als Grenzgesetz für große Werte von  $\frac{\nu}{T}$  auch heute als

[3] richtig anerkannt wird (Wien'sche Strahlungsformel). Heute wissen wir, daß keine Betrachtung, welche auf die klassische Mechanik und Elektrodynamik aufgebaut ist, eine brauchbare Strahlungs-

[4] formel liefern kann, sondern daß die klassische Theorie notwendig auf die Reileigh'sche Formel

$$\rho = \frac{k}{h} \alpha \nu^2 T \quad (3)$$

[5] führt. Als dann Planck in seiner grundlegenden Untersuchung seine Strahlungsformel

$$\rho = \alpha \nu^3 \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (4)$$

auf die Voraussetzung von diskreten Energie-Elementen gegründet [6] hatte, aus welcher sich in rascher Folge die Quantentheorie entwickelte. geriet jene Wien'sche Überlegung, welche zur Gleichung (2) geführt hatte, naturgemäß wieder in Vergessenheit.

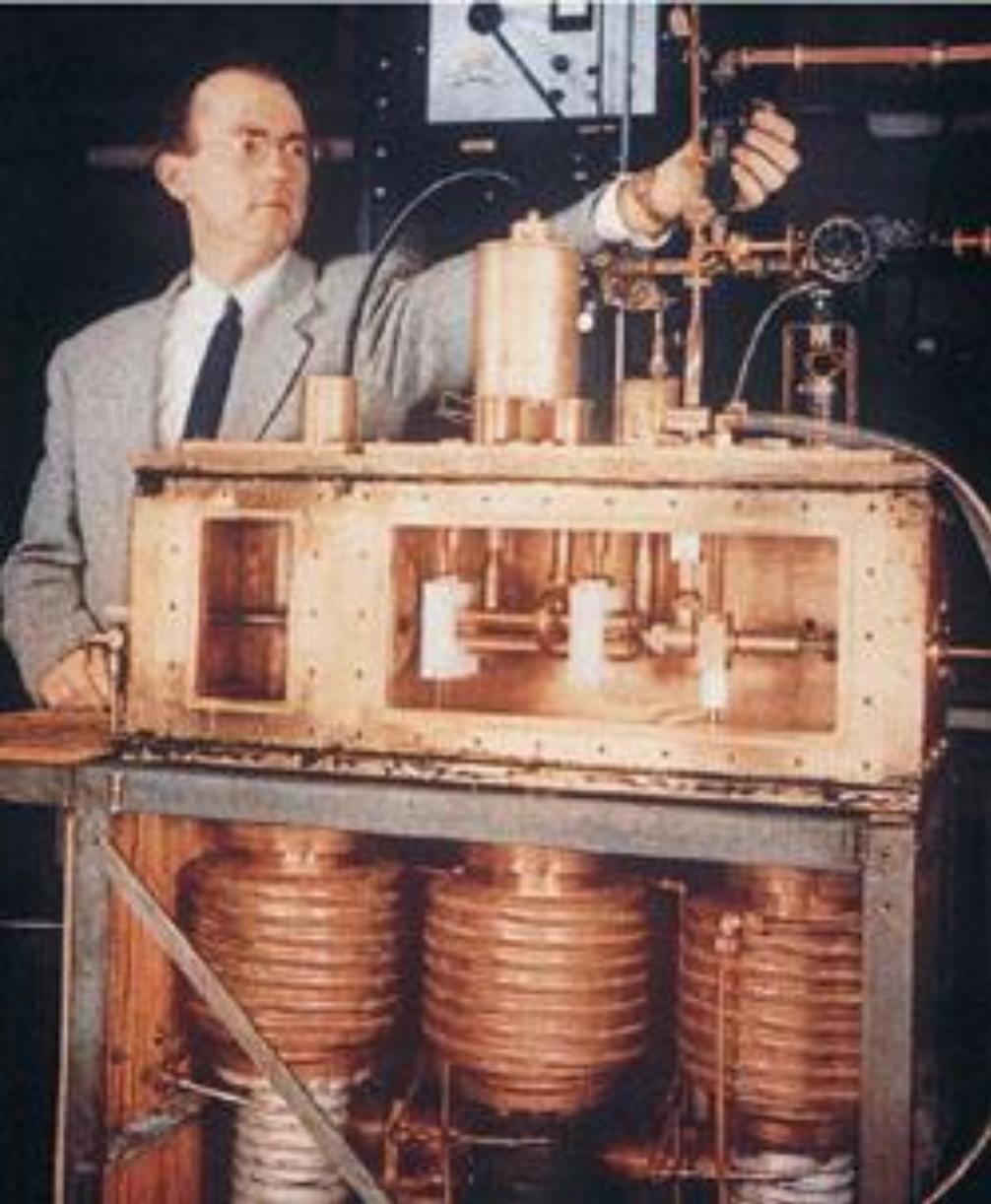
Vor kurzem nun fand ich eine der ursprünglichen Wien'schen Betrachtung <sup>1)</sup> verwandte, auf die Grundvoraussetzung der Quanten-

[7] <sup>1)</sup> Verh. d. deutschen physikal. Gesellschaft, Nr. 13/14, 1916, S. 318. In der vorliegenden Untersuchung sind die in der eben zitierten Abhandlung gegebenen Überlegungen wiederholt.

# История создания лазеров

- 1900 – М. Планк (квант)
- 1916 – А. Эйнштейн (вынужденное излучение)
- 1924 – Ш. Бозе, А. Эйнштейн (статистика фотонов)
- 1927 – П.А.М. Дирак (квантовая теория)
- 1939 – В.А. Фабрикант (усиление в газах)
- 1951 – Ч. Таунс, А. Шавлов (мазер)
- 1954 – Н.Г. Басов и А.М. Прохоров (генерация)
- 1960 – Т. Мейман (рубин), Е. Снитцер (Nd:glass)
- 1961 – А. Джаван (He-Ne)
- 1962 – Р. Холл (GaAs)
- 1968 – Ж.И. Алферов (гетероструктуры)

1. Н.Г. Басов, А.М. Прохоров. Применение молекулярных пучков для радиоспектроскопического изучения вращательных спектров молекул. // ЖЭТФ, **27** (1954) 431.
2. J.P. Gordon, H. J. Zeiger and C. H. Townes. The maser A-type of microwave amplifier, frequency standard, and spectrometer.// Phys. Rev., **95** (1954) 282.
3. A.L. Schawlow, C.H. Townes. Infrared and optical masers.// Phys. Rev., **112** (1958) 1940.
4. T.H. Maiman Stimulated optical radiation in ruby masers. // Nature, **1** (1960) 674.
5. A. Javan, W.B.J. Bennett, D.R. Herriott. Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixtures.// Phys. Rev. Letts, **6** (1961)106.
6. R.N. Hall, G.E. Fenner, J.D. Kingsley, T.J. Soltys, R.O. Carlson. Coherent light emission from GaAs junctions.// Phys. Rev. Letts, **9** (1962)366.
7. Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.И. Корольков, Е.Л. Портной, Д.Н. Третьяков. // Когерентное излучение в эпитаксиальных структурах с гетеропереходами в системе AlAs-GaAs.// ФТП **2** (1968) 1545



Н.Г. Басов



Ч. Таунс



А.М. Прохоров

## **Основу лазерной физики составляют три фундаментальных положения:**

— энергия электромагнитного излучения состоит из дискретных порций энергии, называемых **световыми квантами или фотонами**. Эта дискретность проявляется прежде всего при взаимодействии излучения с веществом, когда фотоны поглощаются или излучаются;

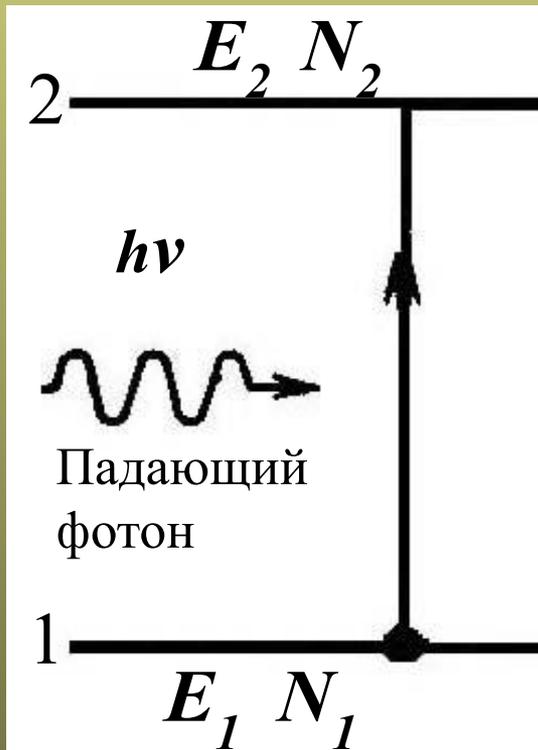
— излучение фотонов при достаточно высокой интенсивности потока определяется эффектом их индуцированного испускания. При этом кванты индуцирующего и индуцируемого излучений тождественны, а вероятность испускания пропорциональна интенсивности излучения;

— кванты электромагнитного излучения подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна. Поэтому **число квантов, которые могут приходиться на одну моду поля, неограниченно**. При заполнении одной моды большим числом неразличимых квантов формируется классическая когерентная электромагнитная волна.

В квантовых системах, обладающих дискретными уровнями энергии, существуют три типа переходов между энергетическими состояниями: **переходы, индуцированные электромагнитным полем, спонтанные переходы и безызлучательные релаксационные переходы.** Свойства вынужденного (индуцированного) излучения определяют когерентность излучения и его усиление или поглощение. Спонтанное излучение обуславливает наличие шумов, служит затравочным толчком в процессе усиления и возбуждения колебаний.

**Вероятность индуцированных переходов** отлична от нуля только для внешнего поля резонансной частоты, энергия кванта которого  $h\nu$  совпадает с разностью энергий двух рассматриваемых изолированных состояний (двух уровней с энергиями  $E_2$  и  $E_1$ ) и пропорциональна плотности энергии внешнего поля в единичном спектральном интервале (спектральной объемной плотности энергии)  $\rho(\nu)$ , [Дж/см<sup>3</sup>Гц]

**ОСНОВНОЕ СОСТОЯНИЕ** квантовой системы - состояние, при котором квантовая система (атом, молекула, ион и др.) наиболее устойчива благодаря тому, что ее внутренняя энергия минимальна. Переход квантовой системы в возбужденное состояние происходит при увеличении ее внутренней энергии, что эквивалентно переходу квантовой системы с основного уровня с минимальной энергией на один из возможных возбужденных уровней. Находящаяся в основном состоянии квантовая система может только поглощать излучение, переходя в возбужденное состояние.



Скорость перехода 1  $\rightarrow$  2 и вероятность поглощения  $W_{12}$  связаны уравнением:

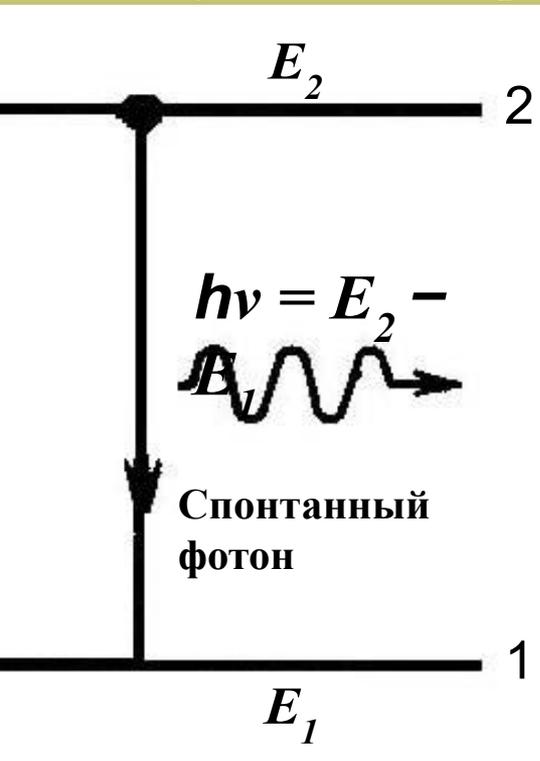
$$dN_1/dt = -W_{12}N_1$$

где  $N_1$  – число атомов в единице объема, которые находятся на уровне 1. Можно записать

$$W_{12} = B_{12}\rho(\nu)$$

Где –  $\rho(\nu)$  спектральная плотность энергии в падающей волне, а  $B_{12}$  – коэффициент Эйнштейна, сечение поглощения.

**СПОНТАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** - электромагнитное излучение, обусловленное спонтанными переходами, происходящими в атомах, молекулах, ионах и в других квантовых системах, **находящихся в возбужденном состоянии.** Спонтанные переходы происходят самопроизвольно, случайно во времени, аналогично радиоактивному распаду. Спонтанное излучение не зависит от воздействия на квантовую систему внешнего электромагнитного излучения, и его закономерности определяются исключительно свойствами самой системы. Момент спонтанного перехода принципиально не может быть предсказан, и потому можно говорить лишь о вероятности такого перехода.



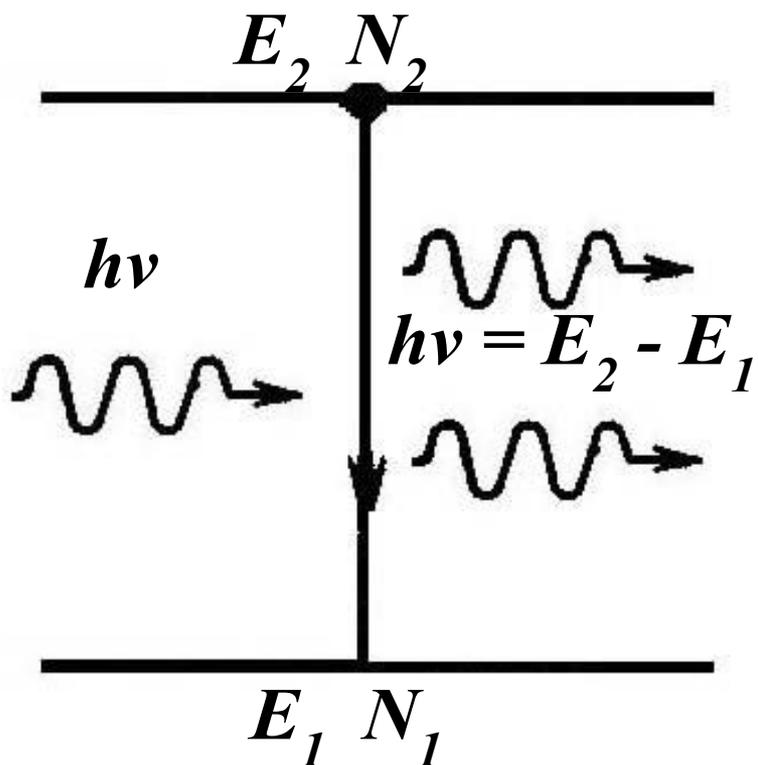
$(dN_2/dt)_{sp} = -A_{21} N_2$ , где  $A$  – вероятность перехода – коэффициент Эйнштейна.

Случайность спонтанных переходов приводит к тому, что различные атомы (квантовые системы) излучают независимо и несинхронно.

**Поэтому спонтанное излучение ненаправленно, некогерентно, неполяризованно и немонохроматично.**

Система может переходить в состояние 1 и безизлучательно, при этом разность энергий может выделиться в виде кинетической энергии.

**ВЫНУЖДЕННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ** - электромагнитное излучение, испускаемое квантовой системой, находящейся в возбужденном, т.е. неравновесном состоянии, под действием внешнего электромагнитного излучения. При вынужденном излучении частота, фаза, поляризация и направление распространения испущенной электромагнитной волны полностью совпадают с соответствующими характеристиками волны вынуждающей. Поэтому вынужденное излучение полностью когерентно с вынуждающим излучением. Акт вынужденного излучения является обратным акту поглощения; вероятности процессов вынужденного излучения и поглощения равны.



Скорость перехода 2->1 за счет вынужденного и излучения  

$$(dN_2/dt)_{\text{вын}} = - W_{21} N_2$$

вероятность вынужденного перехода  

$$W_{21} = B_{21} \rho(\nu)$$
 где  $B_{21}$  – сечение вынужденного излучения.

# ВЫВОД КОЭФФИЦИЕНТОВ ЭЙНШТЕЙНА

Общая скорость переходов  $2 \rightarrow 1$  (направленных вниз) — это сумма скоростей индуцированного и спонтанного процессов:

$$W'_{21} = B_{21}\rho(\nu) + A_{21}.$$

Общая скорость переходов  $1 \rightarrow 2$  (направленных вверх)

$$W'_{12} = (W'_{12})_{\text{инд}} = B_{12}\rho(\nu).$$

Пусть все

атомы находятся в тепловом равновесии с тепловым полем излучения абсолютно черного тела при температуре  $T$ . В этом случае плотность излучения

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi n^3 h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/(kT)} - 1}. \quad (\text{Формула Планка})$$

Так как при тепловом равновесии средние населенности уровней 2 и 1 не меняются со временем, число переходов  $2 \rightarrow 1$  в данном временном интервале равно числу переходов  $1 \rightarrow 2$ , т. е.

$$N_2 W'_{21} = N_1 W'_{12},$$

$$N_2 [B_{21}\rho(\nu) + A_{21}] = N_1 B_{12}\rho(\nu).$$

$$N_2 \left[ B_{21} \frac{8\pi n^3 h \nu^3}{c^3 (e^{h\nu/(kT)} - 1)} + A_{21} \right] = N_1 \left[ B_{12} \frac{8\pi n^3 h \nu^3}{c^3 (e^{h\nu/(kT)} - 1)} \right].$$

Так как атомы находятся в тепловом равновесии, из уравнения Больцмана следует, что

$$N_2/N_1 = e^{-h\nu/(kT)}.$$

$$\frac{8\pi n^3 h\nu^3}{c^3 (e^{h\nu/(kT)} - 1)} = \frac{A_{21}}{B_{12}e^{h\nu/(kT)} - B_{21}}.$$

Последнее равенство удовлетворяется только при выполнении условий:

$$B_{12} = B_{21},$$
$$A_{21}/B_{21} = 8\pi n^3 h\nu^3 / c^3.$$

Последние два уравнения впервые были получены Эйнштейном

А. Эйнштейн показал, что **вероятности вынужденного излучения и поглощения равны друг другу**, или равны сечения вынужденного излучения и поглощения.

**Вероятность спонтанного излучения** пропорциональна коэффициенту Эйнштейна для индуцированного вынужденного излучения  $A_{21} \sim B_{21}$

(B) stattfinden als von den Typen (A) und (B') zusammen. Diese Bedingung liefert vermöge (5), (A), (B), (B') für die der Indexkombination (m, n) entsprechenden Elementarprozesse die Gleichung

$$p_n e^{-\frac{\varepsilon_n}{kT}} B_n^m \varrho = p_m e^{-\frac{\varepsilon_m}{kT}} (B_m^n \varrho + A_m^n)$$

Soll ferner  $\varrho$  mit  $T$  ins Unendliche wachsen, was wir annehmen wollen, so muß zwischen den Konstanten  $B_n^m$  und  $B_m^n$  die Beziehung

$$p_n B_n^m = p_m B_m^n \quad (6)$$

bestehen. Wir erhalten, dann als Bedingung des dynamischen Gleichgewichtes aus unserer Gleichung

$$\varrho = \frac{\frac{A_m^n}{B_m^n}}{\frac{\varepsilon_m - \varepsilon_n}{e^{kT}} - 1} \quad (7)$$

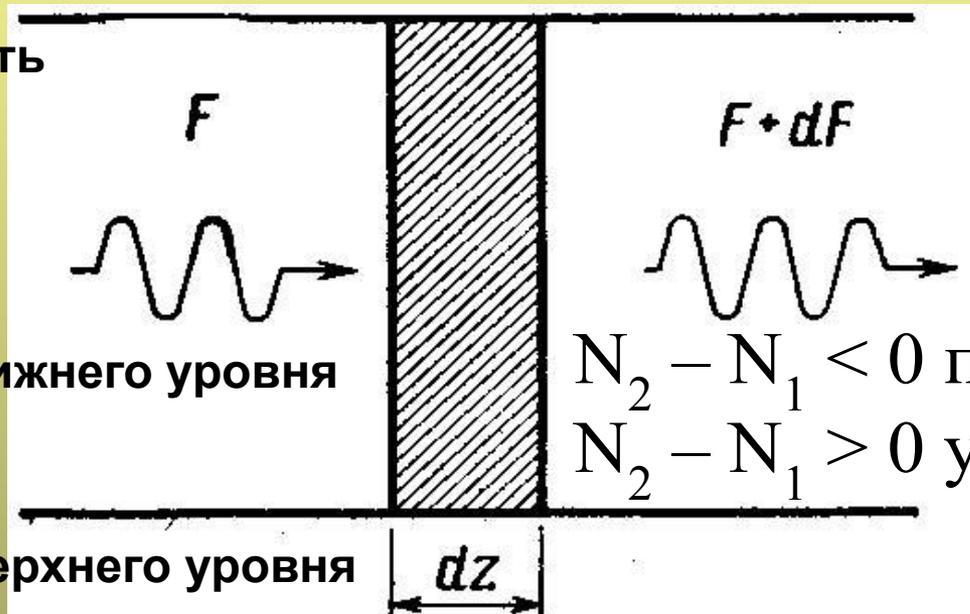
Es ist dies die Abhängigkeit der Strahlungsdichte von der Temperatur gemäß dem Planck'schen Gesetze. Aus dem Wienschen Verschiebungsgesetze (1) folgt hieraus sofort, daß

$$\frac{A_m^n}{B_m^n} = \alpha \nu^3 \quad (8)$$

$$\text{und} \quad \varepsilon_m - \varepsilon_n = h \nu \quad (9)$$

# Усиление (поглощение) излучения

$F = \rho(\nu)$  – плотность  
потока фотонов



$N_1$  – населенность нижнего уровня

$N_2 - N_1 < 0$  поглощение

$N_2 - N_1 > 0$  усиление

$N_2$  – населенность верхнего уровня

$B_{12} = B_{21} = \sigma$  сечение вынужденного  
излучения

Изменение плотности потока фотонов  $dF$  при прохождении плоской электромагнитной волны через слой вещества толщиной  $dz$ .

$$dF = \sigma F (N_2 - N_1) dz$$

## Закон Бугера — Ламберта — Бера

Закон Бугера — Ламберта — Бера экспериментально открыт французским учёным Пьером Бугером в 1729 году, подробно рассмотрен немецким учёным И. Г. Ламбертом в 1760 году  
проверен на опыте немецким учёным А. Бером в 1852 году

$$F = F_0 \exp[\sigma(N_2 - N_1)l]$$

$N_2 - N_1 < 0$  поглощение

$N_2 - N_1 > 0$  усиление

# Принципы лазерной генерации

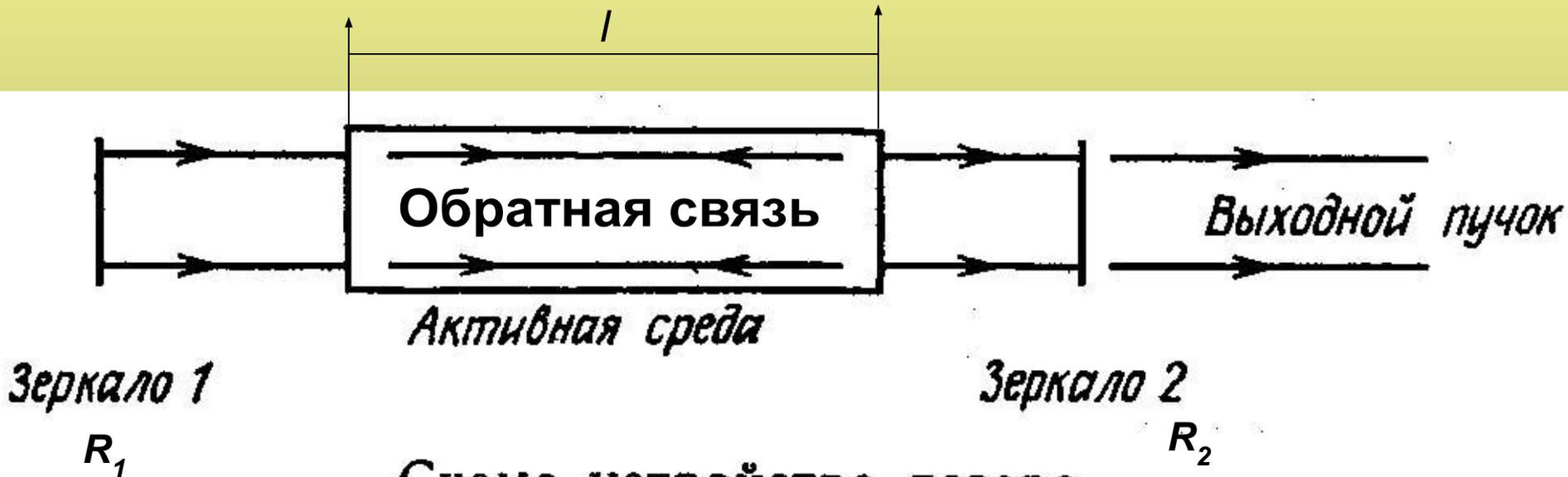


Схема устройства лазера.

$$(N_2 - N_1)_{кр} = - \ln (R_1 R_2) / 2\sigma l.$$

Критическая инверсия

Условие генерации в резонаторе Фабри-Перо (потери только на зеркалах)

$$R_1 R_2 \exp[2\sigma (N_2 - N_1)l] = 1$$

## Три условия лазерной генерации:

- активная среда с инверсной заселенностью
- обратная связь
- превышение усиления над потерями

Лазерная генерация начнется тогда, когда усиление активной среды компенсирует потери в нем, усиление излучения за один проход в активной среде (т. е. отношение выходной и входной плотностей потока фотонов) равно

$\exp[\sigma(N_2 - N_1)l]$ , где  $l$  — длина активной среды.

Если потери в резонаторе определяются только пропусканием зеркал, то порог генерации будет достигнут при выполнении условия

$R_1 R_2 \exp [2\sigma (N_2 - N_1)l] = 1$ , где  $R_1$  и  $R_2$  — коэффициенты отражения зеркал по интенсивности. Это условие показывает, что порог достигается тогда, когда инверсия населенностей приближается к *критической*.

Как только достигнута критическая инверсия, генерация разовьется из спонтанного излучения. Действительно, фотоны, которые спонтанно испускаются вдоль оси резонатора, будут усиливаться. Этот механизм и лежит в основе лазерного генератора, называемого обычно просто лазером.