

半导体能带工程

电子系 汪莱

办公室：罗姆楼2-305

Email: wanglai@tsinghua.edu.cn

助教：孙辰洋

办公室：罗姆楼2-205

Email: suncy22@mails.tsinghua.edu.cn

作业和考试

- 作业~30%
- 调研展示~30%
- 期末随堂考试~40%

绪论

- **什么是半导体能带工程**
- **半导体能带工程的应用**
- **本课程的章节安排**

绪论

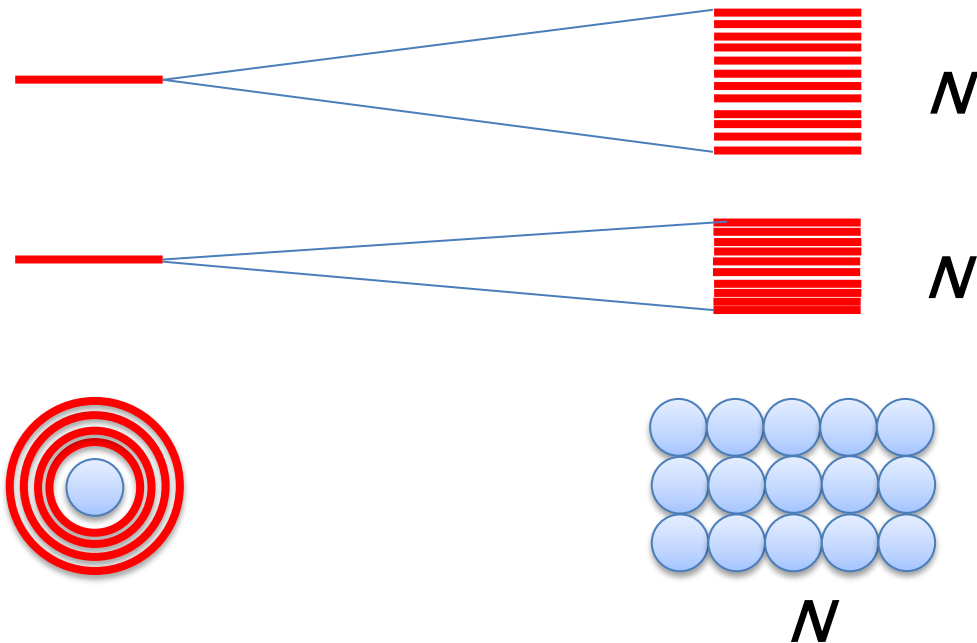
- 什么是半导体能带工程
- 半导体能带工程的应用
- 本课程的章节安排

能带

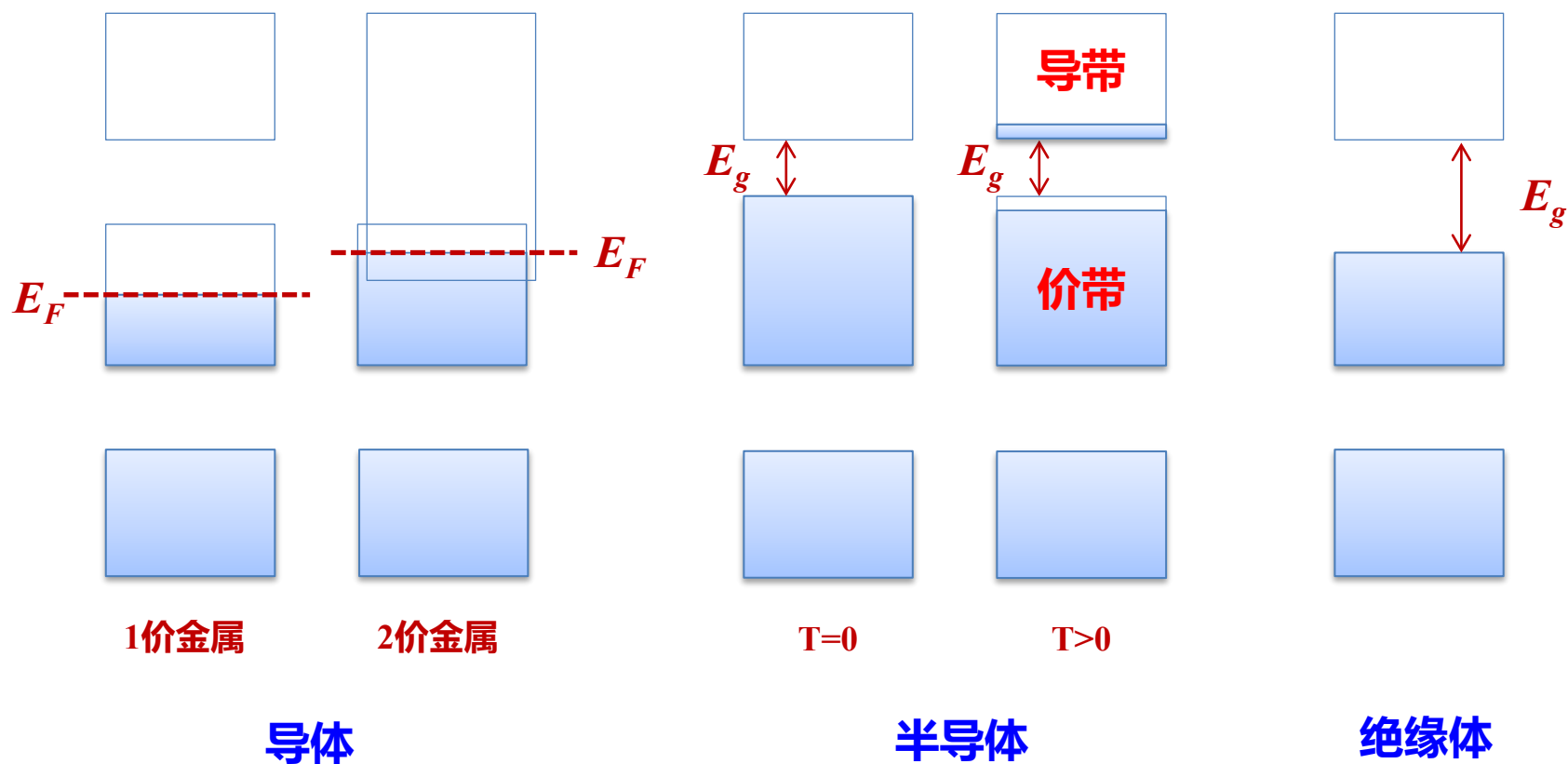
- 孤立原子外围的电子轨道构成了电子的能级
- 当大量原子周期性排列起来以后，原来的分立能级由于“排斥效应”形成了能带

孤立原子的能级

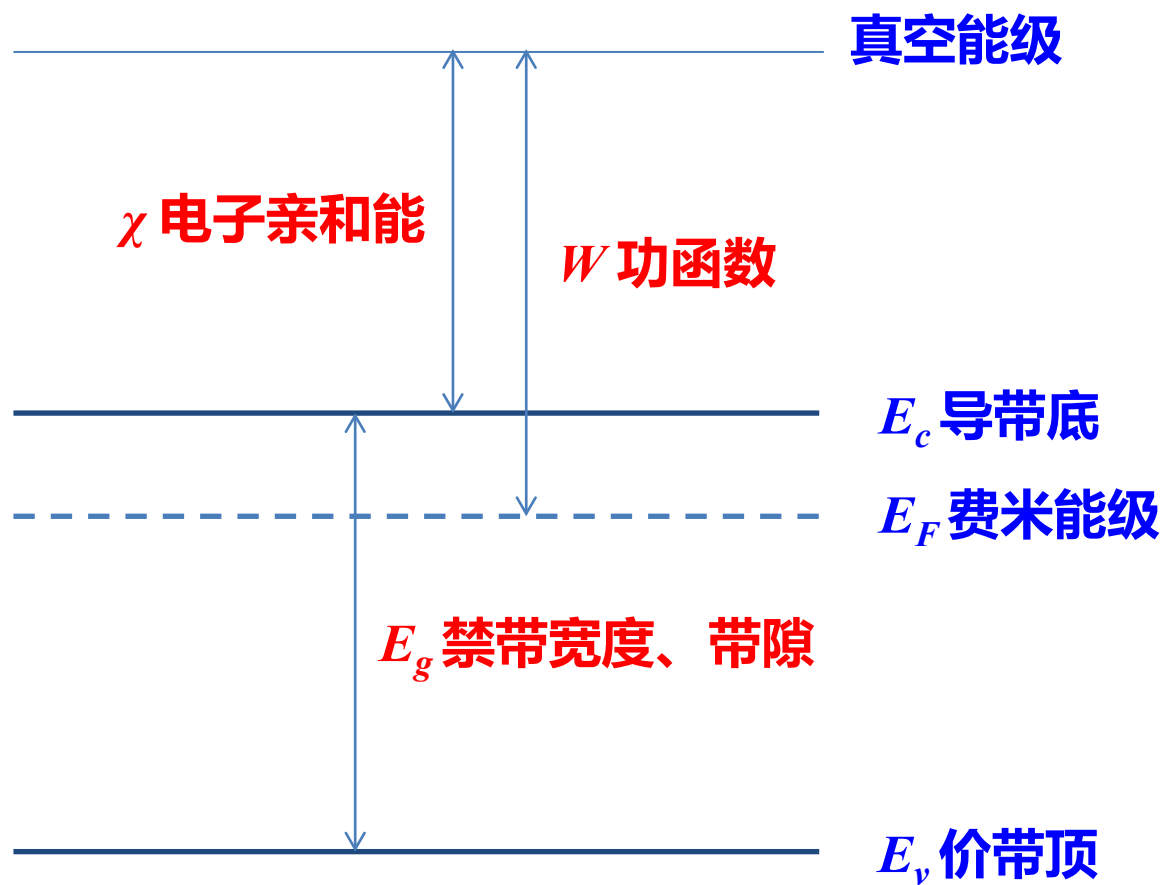
晶体中能级扩展成能带



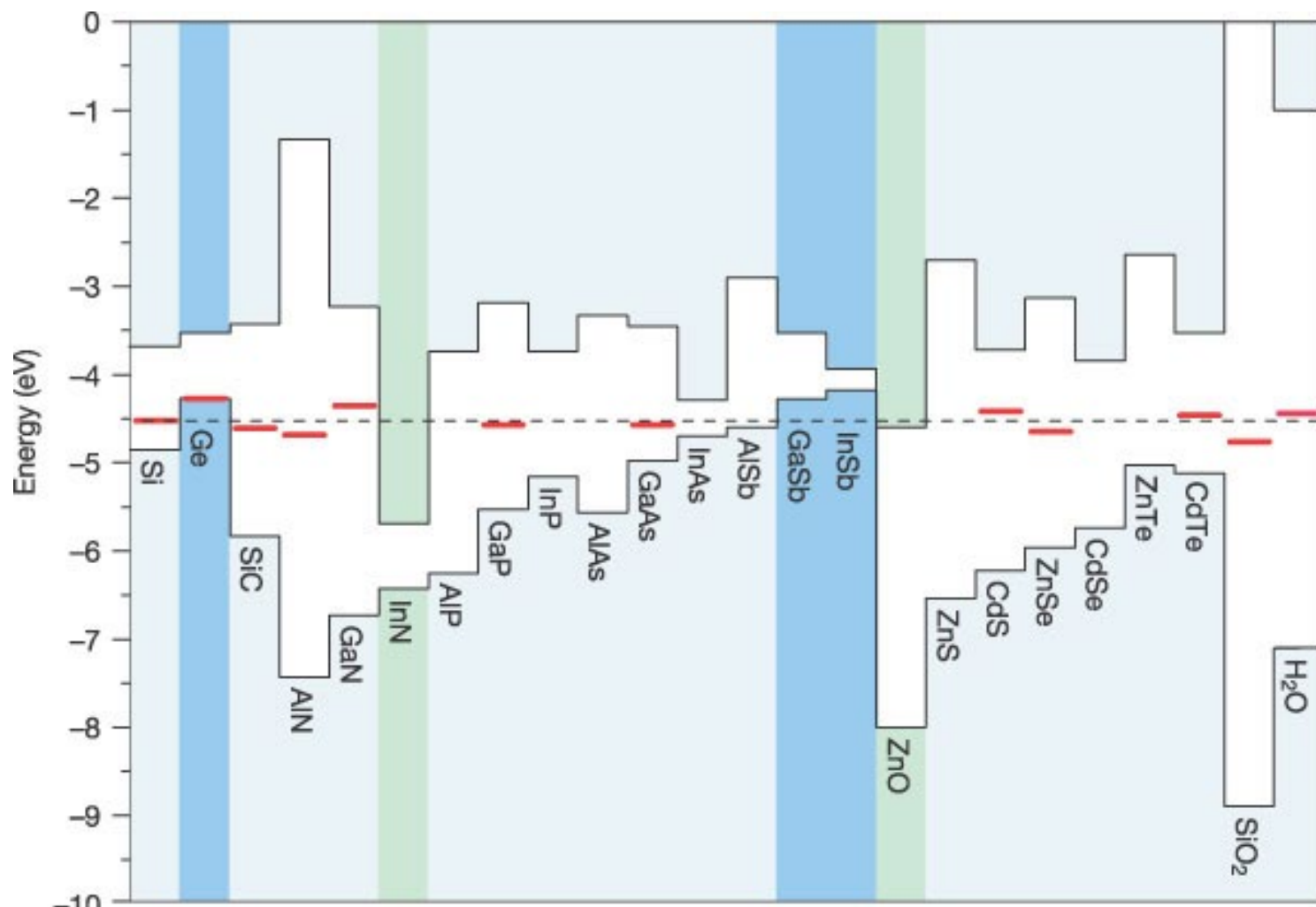
导体、半导体、绝缘体的能带



半导体能带 (E - z) 的重要参数



各种半导体的能带图



能带工程概念的提出

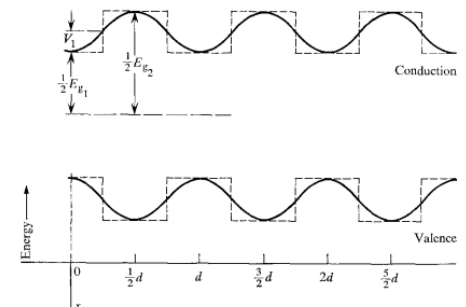
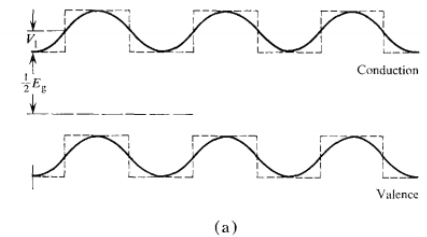
1970年美国IBM实验室的江崎和朱兆祥提出了超晶格的概念。他们设想如果用两种晶格匹配很好的材料交替地生长周期性结构，每层材料的厚度在10nm以下，如图所示，则电子沿生长方向的运动将会产生振荡，可用于制造微波器件。他们的这个设想两年以后在一种分子束外延设备上得以实现。

Communication

L. Esaki
R. Tsu

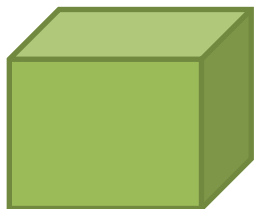
Superlattice and Negative Differential Conductivity in Semiconductors*

Abstract: We consider a one-dimensional periodic potential, or "superlattice," in monocrystalline semiconductors formed by a periodic variation of alloy composition or of impurity density introduced during epitaxial growth. If the period of a superlattice, of the order of 100\AA , is shorter than the electron mean free path, a series of narrow allowed and forbidden bands is expected due to the subdivision of the Brillouin zone into a series of minizones. If the scattering time of electrons meets a threshold condition, the combined effect of the narrow energy band and the narrow wave-vector zone makes it possible for electrons to be excited with moderate electric fields to an energy and momentum beyond an inflection point in the E - k relation; this results in a negative differential conductance in the direction of the superlattice. The study of superlattices and observations of quantum mechanical effects on a new physical scale may provide a valuable area of investigation in the field of semiconductors.

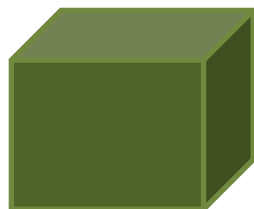


能带工程

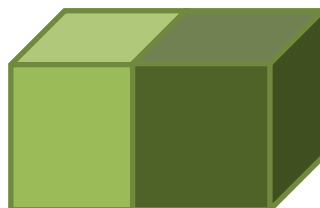
半导体材料



合金组分



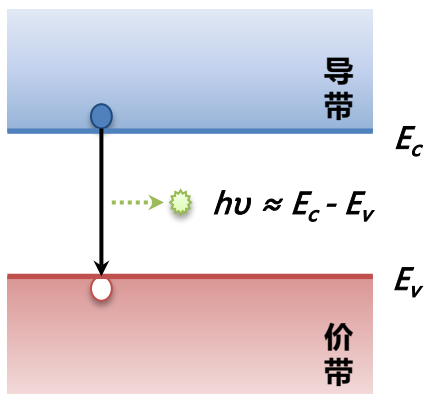
异质结



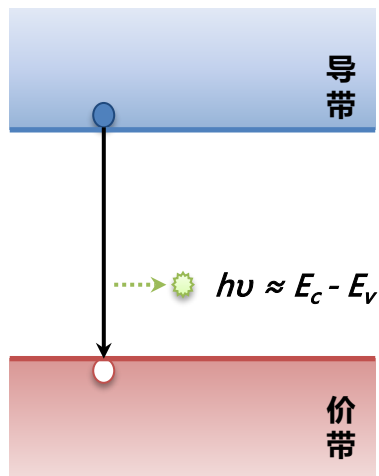
量子阱



半导体材料的能带

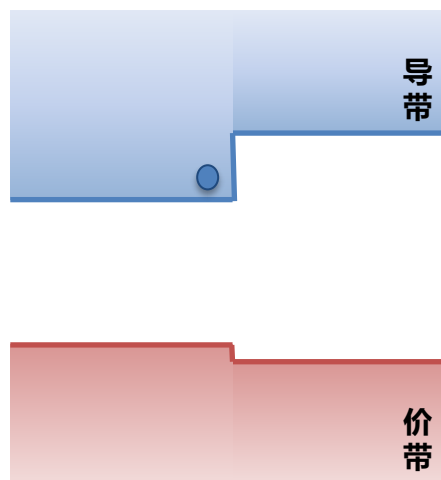


带隙工程

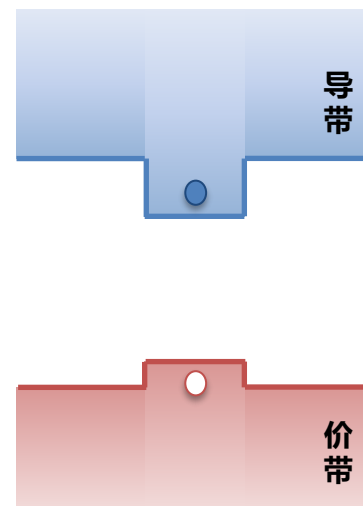


半导体能带工程

带偏移工程



带结构工程



能带工程的拓展

- **掺杂工程**
 - 电离杂质可以改变电场；重掺杂可形成杂质带
- **极化工程**
 - 极化产生极化电场，导致能带倾斜
- **应力工程**
 - 应力改变晶格常数和E-k关系
 - 应力引起压电极化
- **低维结构**
 - 纳米线、量子点

能带工程

- 通过对半导体材料的**组分**、**尺度**、以及不同半导体材料之间的**界面**等参数进行调控，来调控半导体的**能带结构**，进而调控**电子运动**的行为（分布、输运、产生、复合），从而改变半导体材料的**宏观特性**
- 主要分为：**带隙工程**；**带偏移工程**；**带结构工程**；...
- 能带工程建立在半导体材料的发展基础之上，尤其是材料制备技术的突破使得对能带的调控成为可能。
- 能带工程已广泛应用于半导体电子和光电子器件的研制中，对开发新材料和新器件具有重要的指导作用

你觉得半导体能带工程应用在手机的哪些器件中？

☒ A 闪光灯

☒ B 功放

☒ C 屏幕

☐ D 电池

提交

绪论

- 什么是半导体能带工程
- 半导体能带工程的应用
- 本课程的章节安排

你认为20世纪最重要的发明是什么？

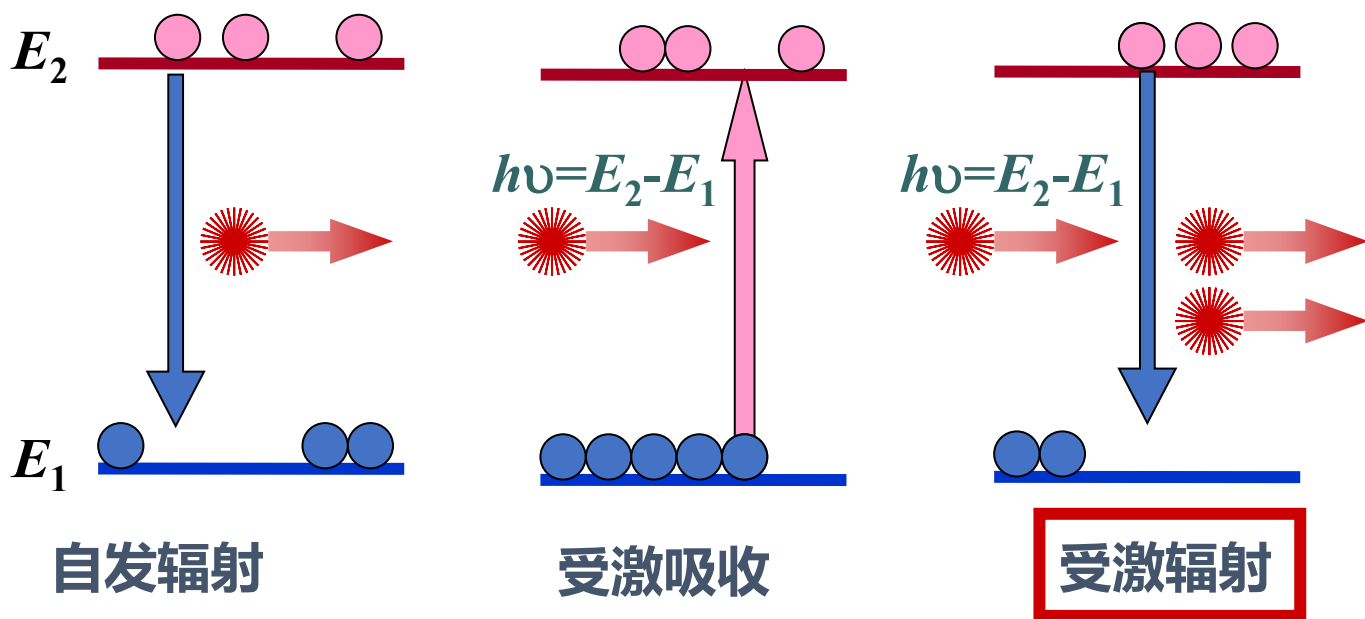
- ☐ A 集成电路
- ☐ B 互联网
- ☐ C 原子弹
- ☐ D 激光器

提交

异质结激光器

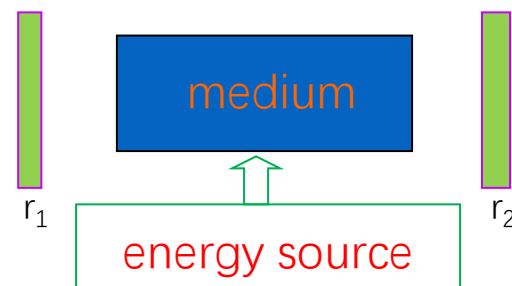
激光器的工作原理

Einstein 跃迁理论——二能级原子



激光三要素和激光器的三部分

- 1、增益 > 损耗——工作物质
- 2、粒子数反转——激励源（泵浦源）
- 3、自激振荡——光学谐振腔



激光工作原理

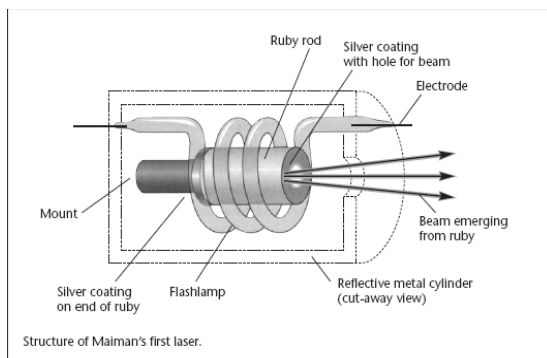
优酷

THE LASER

All the animations and explanations on
www.toutestquantique.fr

1960：美国休斯公司实验室西奥多.哈罗德.梅曼 (T.H.Maiman)世界上第一台红宝石固态激光器诞生

1960年5月的某一天.梅曼和往常一样来到实验室.他打开了泵浦源的开关,让脉冲氙灯的电能量输入红宝石中,此时,这台装置中发射出了第一束闪光.梅曼平静地写下了实验记录:红色,波长694.3纳米.这束光,色单纯,所有的波都在同一个方向上;发射到几千英里以外也不会因发散而失去作用;聚焦到某一点上可以达到极大的能量,甚至可以超过太阳表面的温度值.这束光,就是激光;梅曼做成这个“**受激辐射光放大器**”就是世界上第一台激光器.



激光(LASER)

Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation

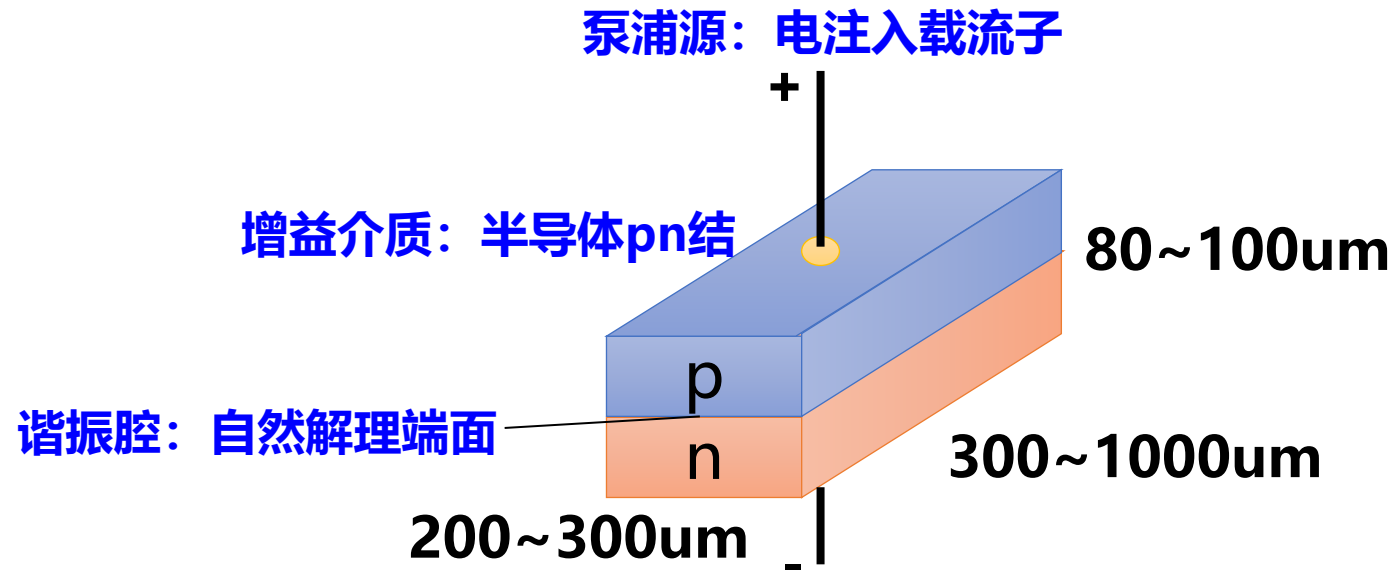
- 1、方向性/空间相干性
- 2、单色性/时间相干性
- 3、高亮度（提高功率）

强相干光；
极高的光子简并度

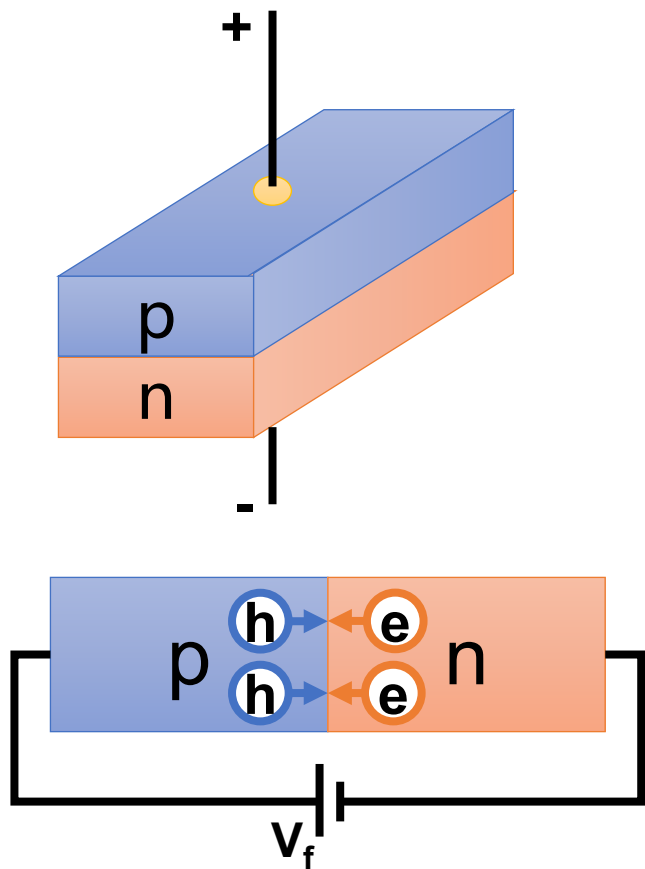
半导体激光器 (LD, Laser Diode)

- 1962年，霍尔(R. N. Hall)、内森(M. I. Nathan)、奎斯特(T. M. Quist)等研究小组在液氮温度下实现了半导体激光器的激射。
- 1970年，通过实现双异质pn结，前苏联科学家Alferov实现了GaAs/ $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结激光器的室温连续工作
- 半导体激光器已经成为光纤通信系统的必选光源

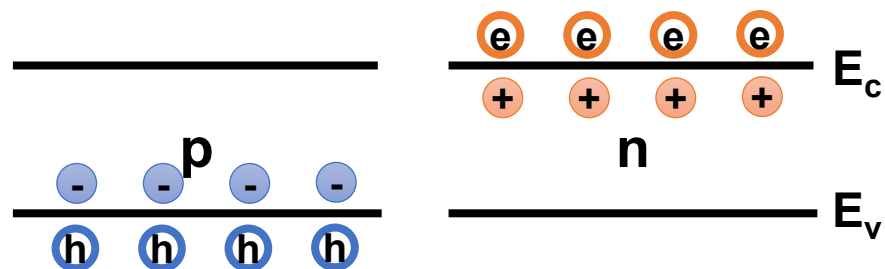
半导体激光器 (LD)



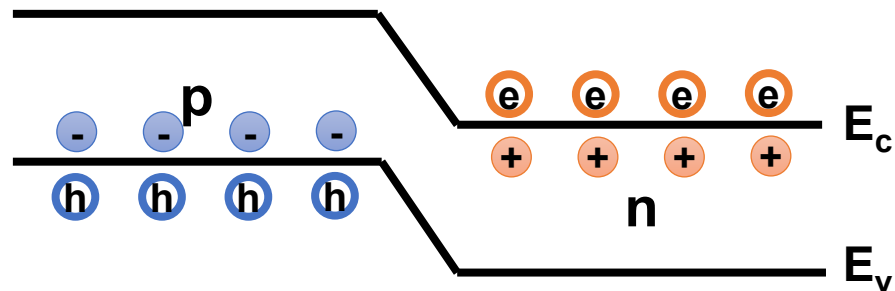
PN结



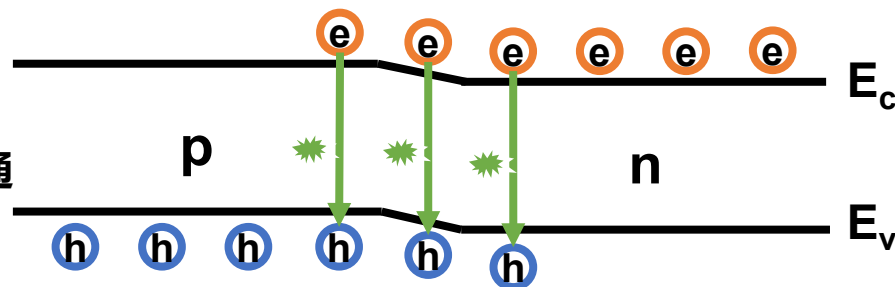
未形成PN结时



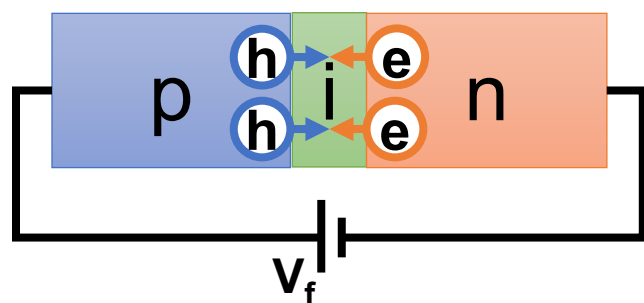
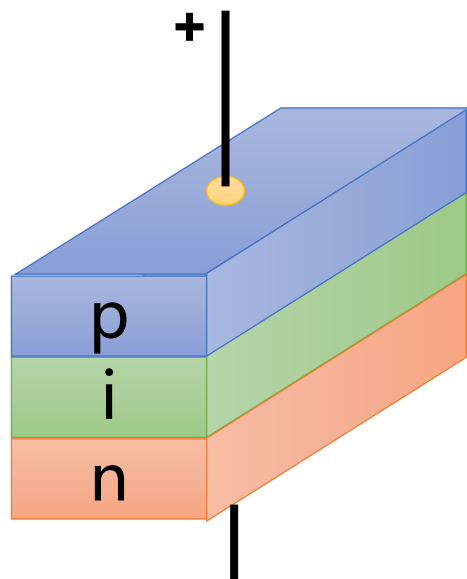
形成PN结
 $V_f=0$ 时



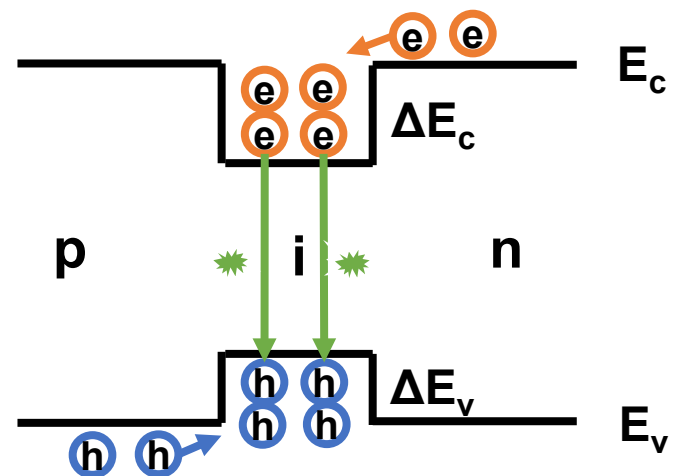
形成PN结
正向注入导通



双异质PN结



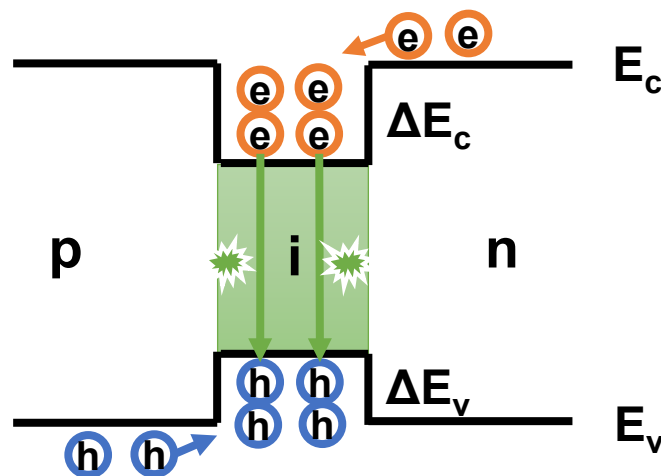
p和n是禁带较宽的半导体
i (非掺杂) 是禁带较窄的半导体



带阶形成电子和空穴的限制 (势阱)
i区电子和空穴浓度高, 更容易实现粒子数反转

双异质结—光场的制约作用

势阱区折射率大，大部分光场被制约在势阱区内

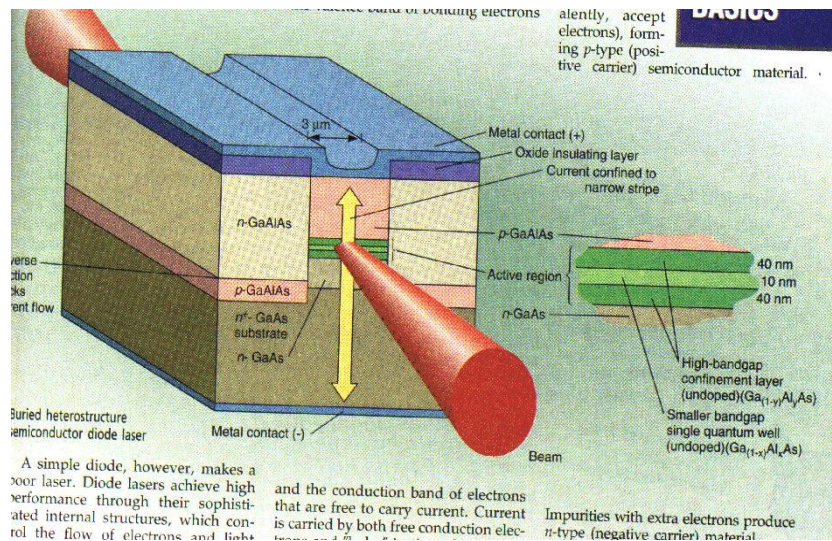


同时对光和载流子实现限制作用

双异质结半导体激光器

1962 以同质pn结为基础,为了实现激射,必须注入很大的电流,而且只能在极低的温度下工作

1970 双异质pn结引入, 实现了
 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结激光器的室温连续工作



获得2000年诺贝尔物理学奖

2000年诺贝尔物理学奖



若雷斯·阿尔费罗夫 赫伯特·克勒默

"for developing semiconductor heterostructures used in high-speed- and optoelectronics"



杰克·基尔比

"for his part in the invention of the integrated circuit"

Kroemer(异质结理论的提出者):

I wrote up a paper describing the DH idea, along with a patent application. The paper was submitted to *Applied Physics Letters*, where it was rejected. I was urged not to fight the rejection, but to submit the paper to the *Proceedings of the IEEE* instead, where it was published, but largely ignored. The patent was issued in 1967. It is probably a better paper than the *Proc. IEEE* letter. It expired in 1985.²¹

Alferov(异质结激光器的实验先锋):

won a Lenin Prize. While some physicists were skeptical of Alferov's small heterostructure group, Gaev made sure he had an office, rooms, and assistants. When Alferov asked him why he could rely on Gaev's support, Gaev replied "I don't understand what, precisely, you are doing, but I understand what you did earlier and I am certain this won't turn out to be nonsense."³⁵ Alferov told me several reasons for his turning to this problem: he knew transistors inside and out, he understood semiconductor materials fluently, he had had enough of rectifiers, and his recent divorce had left him somewhat adrift. "Lasers excited me," he said. Having read about Anderson's work on heterostructures at IBM, he decided to design heterostructure lasers. He and others made rapid progress, achieving adequate

石墨烯

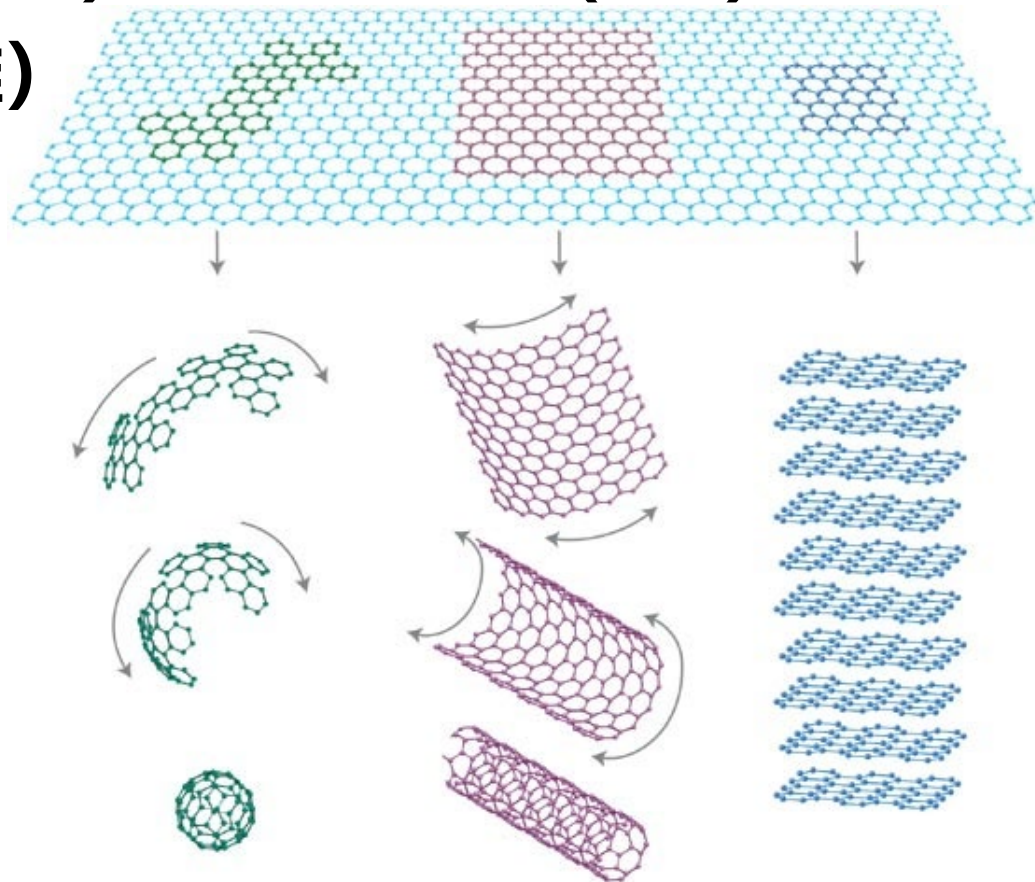
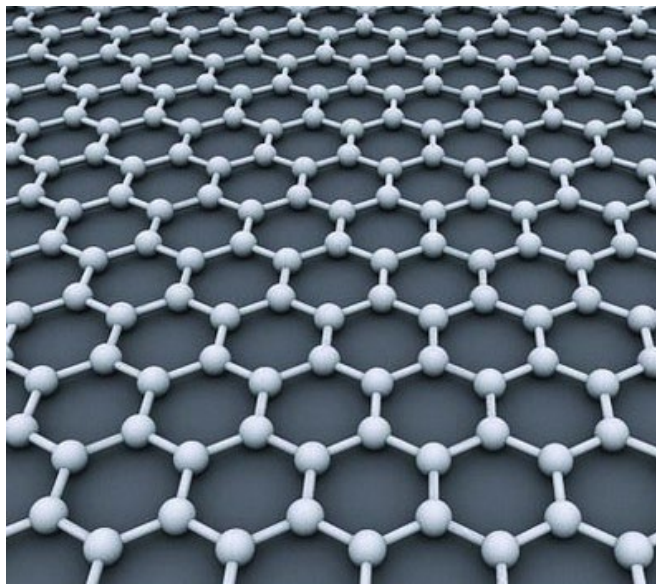
石墨烯 (graphene)

- 曾经被认为是不可能存在的材料！
 - 1930s, 派尔斯 和 朗道
- 2004年成功制备
 - 安德烈·海姆, 康斯坦丁·诺沃肖洛夫
- 2010年获诺贝尔奖



什么是石墨烯？

- 平面单层碳原子层，一种 **“二维晶体”**
 - 卷曲->富勒烯（0维）、碳纳米管（1维）
 - 堆叠->石墨（3维）



汗水+幸运=石墨烯

- **机械剥离法**

- “粘胶带法”

- **巧合还是必然？**

- 通常情况下，用光学显微镜看不见单层原子层
 - 使用电子显微镜寻找石墨烯不异于“大海捞针”
 - 把石墨烯放在300nm的SiO₂上，光学可见！
 - 最多5%的厚度起伏（例如315nm），不可见！

出色的物理性质

- **超强导电性**

- 石墨烯的电子迁移率是硅的10倍
- IBM已经研制出100GHz的石墨烯场效应晶体管

- **超强硬度**

- 比钻石还要硬，强度比世界上最好的钢铁还要强100倍，是目前最薄最硬的材料。

- **良好导热性**

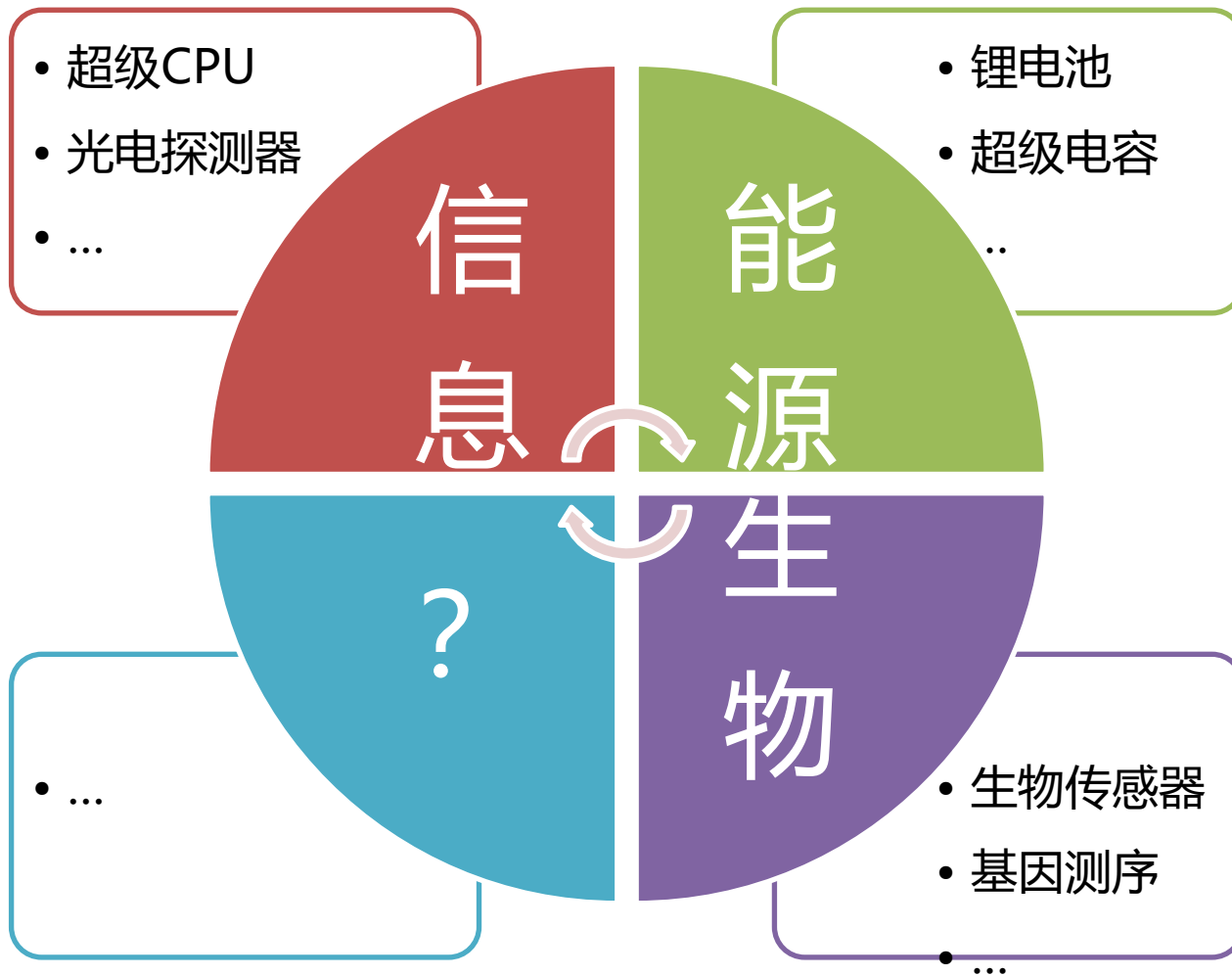
- **较好的透明特性**（可见光透过率>97%）

令人着迷的物理现象

- 导体还是半导体？
 - 零带隙半导体
- 接近光速
 - 载流子的费米速率 $v_F \approx 10^6 \text{m/s}$ ，即光速的1/300
- 独特的量子霍尔效应
-

A. K. GEIM and K. S. NOVOSELOV, “The rise of graphene” , *Nature*, 2007,6(3):183-191.

应用前景



K. S. NOVOSELOV, V. I. FAL PRIME KO, L. COLOMBO, P. R. GELLERT, M. G. SCHWAB and K. KIM,
“A roadmap for graphene” , *Nature*, 2012,490(7419):192-200.

你认为石墨烯会在多久取代硅成为微电子的主流材料？

- ☐ A 10年
- ☐ B 20年
- ☐ C 30年
- ☐ D 别开玩笑

提交

蓝光发光二极管

2014.10.7

三位日本(裔)科学家获得诺贝尔物理学奖



赤崎勇(Isamu Akasaki)
1929-



天野浩(Hiroshi Amano)
1960-

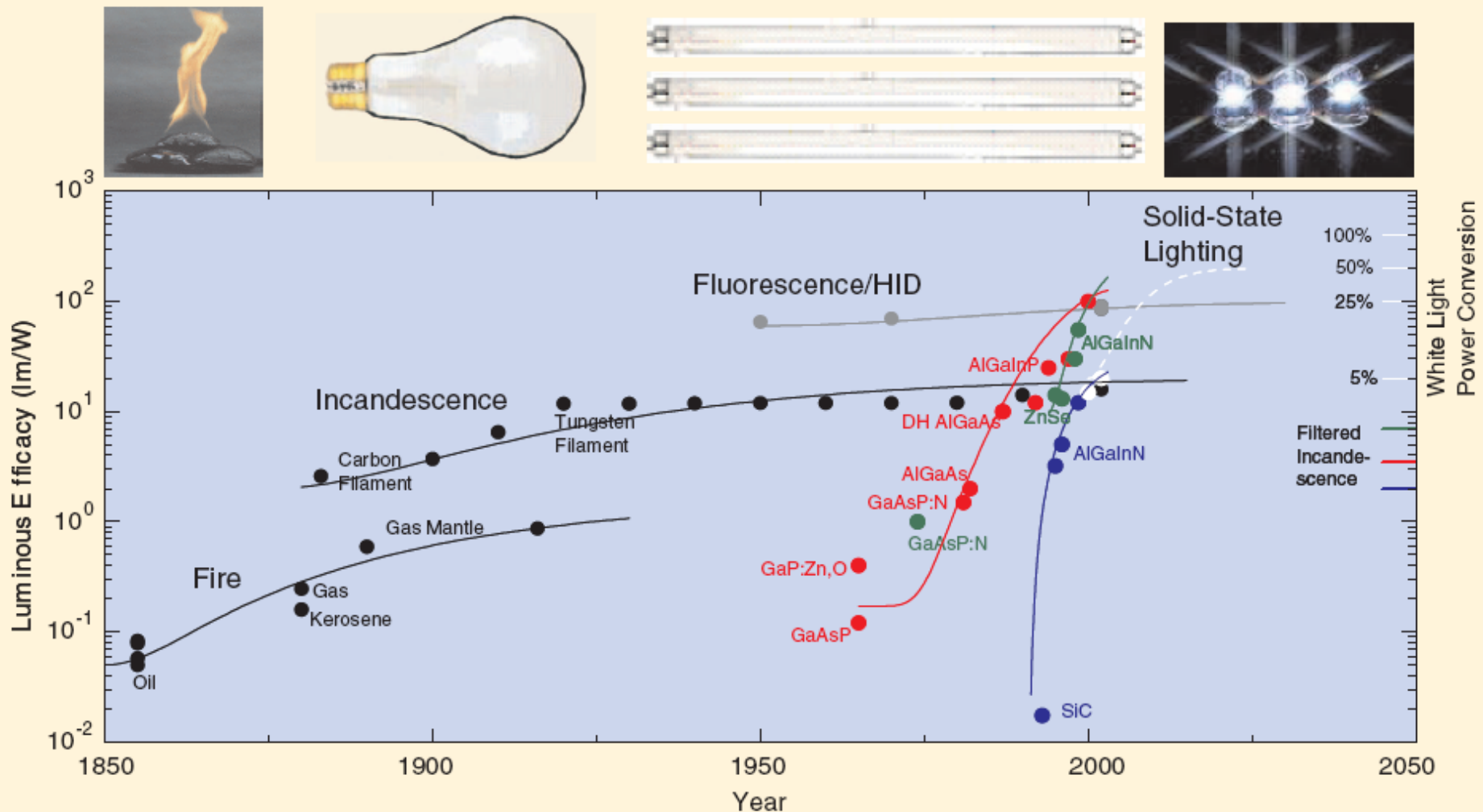


中村修二(Shuji Nakamura)
1954-

官方获奖理由

for the invention of efficient **blue light-emitting diodes** which has enabled bright and energy-saving **white light sources**

蓝光“LED”造就了人类照明历史的革命



1. 200-year evolution of luminous efficacy for various lighting technologies.

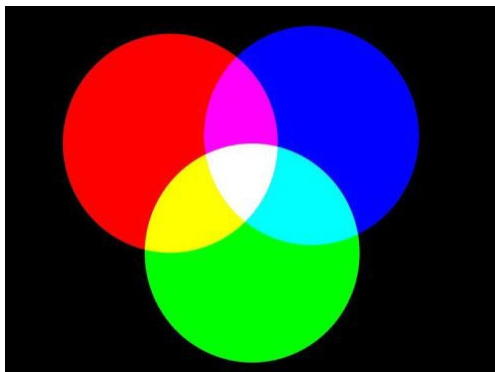
“蓝光”的重要性及LED相比传统照明光源的优势

获奖的是“蓝光LED”的发明人而非“LED”的发明人

不同照明光源之间光效的比较

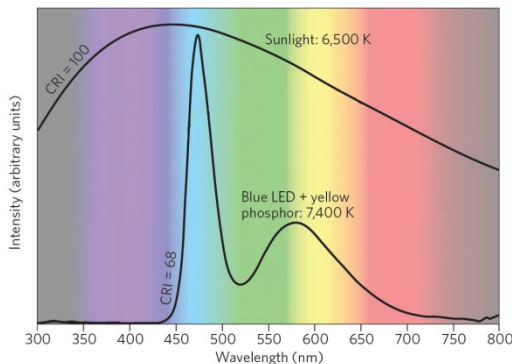
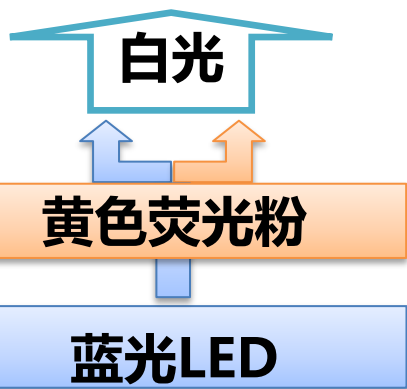
白炽灯	荧光灯	LED
15 lm/W	70 lm/W	150 lm/W

三基色——红、绿、蓝



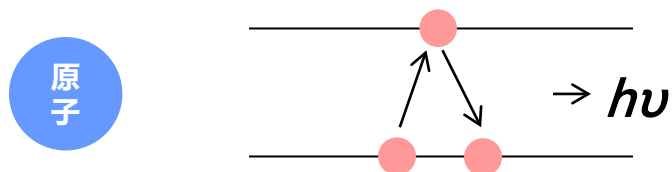
蓝光波长最短，光子能量最高，利用荧光转化，很容易把蓝光转变为长波长可见光

- 照明用电占社会总用电量的**15%**，使用LED此比例可降至**4%**
- 以我国2013年数据测算，如照明用电节省50%相当于再造**4**个三峡大坝，同时减少二氧化碳排放**4000万吨**

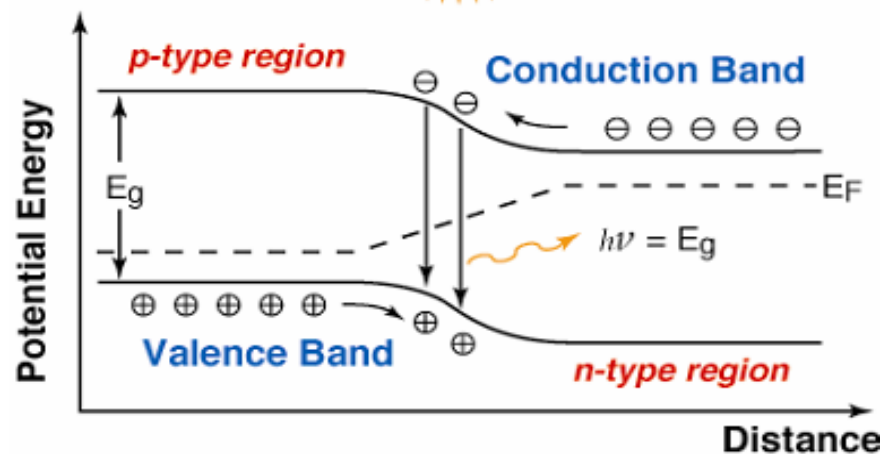
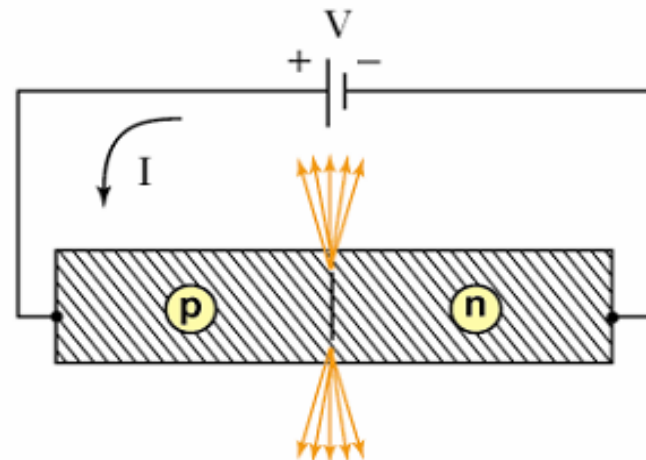
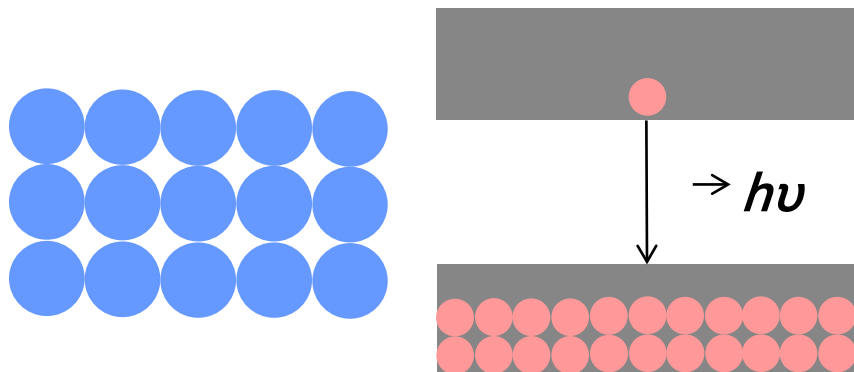


LED的基本原理

孤立原子中电子从高能级跃迁到低能级，
放出光子

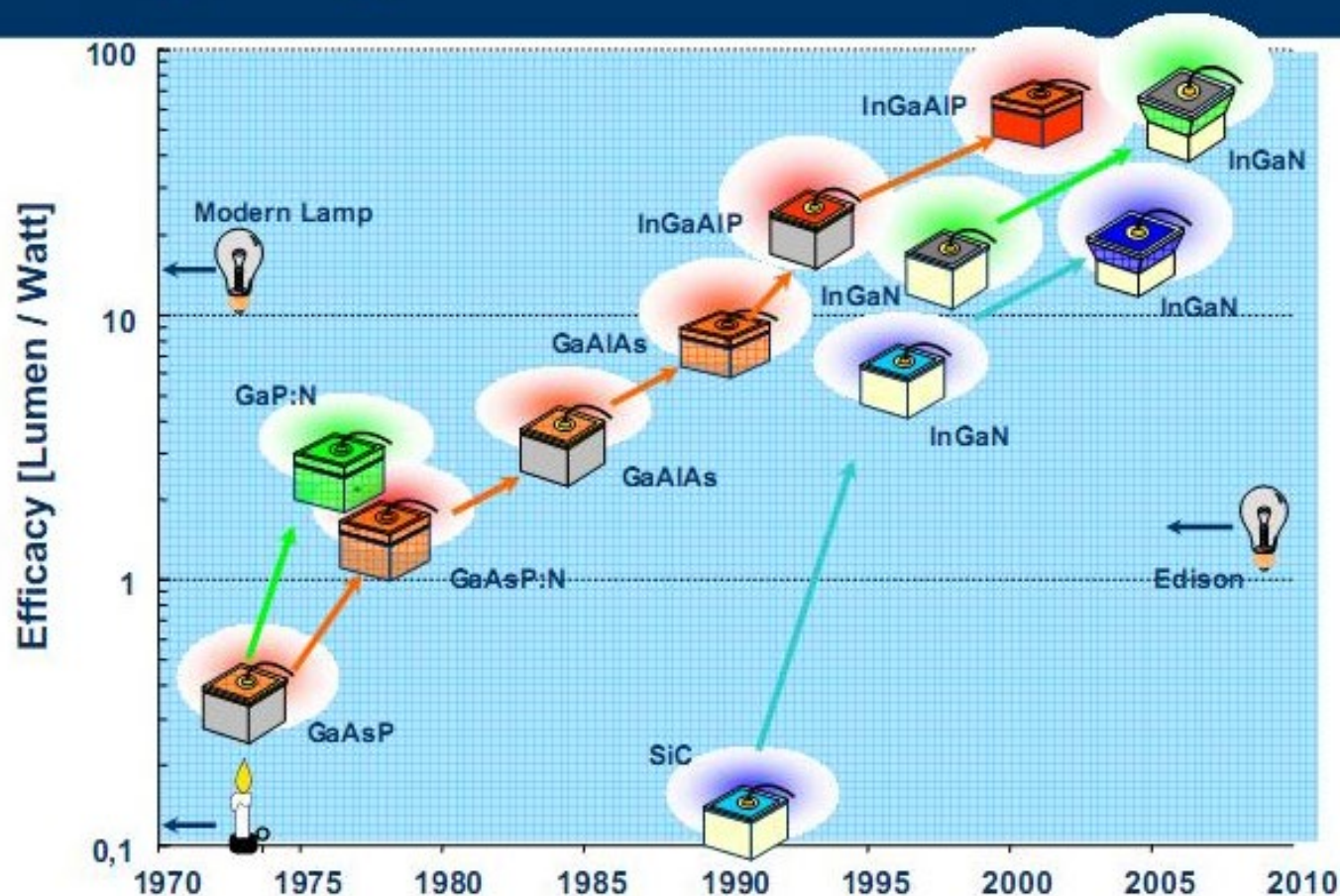


晶体中电子从高能带（导带）跃迁到低能带（价带），放出光子



不同颜色LED的发展

Roadmaps - Brightness Evolution of LEDs



蓝光LED一度被认为是20世纪不可能完成的任务

	A	B
直接带隙	√	√
晶格匹配的衬底	√	×
位错密度	$<10^3\text{ cm}^{-2}$	$>10^{10}\text{ cm}^{-2}$
n型掺杂	√	√
p型掺杂	×	×
可形成异质结	√	√

如果你是一名从事半导体器件研究的科学家，你是选择哪种材料来进行蓝光LED的研发？

A A

B B

	A	B
直接带隙	√	√
晶格匹配的衬底	√	×
位错密度	$<10^3 \text{ cm}^{-2}$	$>10^{10} \text{ cm}^{-2}$
n型掺杂	√	√
p型掺杂	×	×
可形成异质结	√	√

蓝光LED一度被认为是20世纪不可能完成的任务

	ZnSe	GaN
直接带隙	√	√
晶格匹配的衬底	√	×
位错密度	$<10^3\text{ cm}^{-2}$	$>10^{10}\text{ cm}^{-2}$
n型掺杂	√	√
p型掺杂	×	×
可形成异质结	√	√
研究人数	>10000	<10

三位科学家的贡献



名古屋师生：赤崎勇、天野浩

- 蓝宝石衬底上异质生长高质量GaN——AlN缓冲层
- 低能电子束辐照激活p-GaN
- 世界上第一支蓝光LED



小公司的工程师：中村修二

- 改用GaN缓冲层，获得更高的质量
- 改用热退火激活p-GaN
- 开发出InGaN/GaN双异质结蓝光LED并实现商业化，比当时市售的SiC蓝光LED亮100倍
- 世界上第一支高亮度蓝光LED、绿光LED、蓝紫光激光二极管

绪论

- 什么是半导体能带工程
- 半导体能带工程的应用
- 本课程的章节安排

主要内容

- **绪论**

- 什么是半导体能带工程
- 基于能带工程的一些应用

- **第一章 半导体物理基础**

- 1.1 半导体的晶格结构
- 1.2 半导体的电子状态和能带结构
- 1.3 半导体中的杂质与缺陷
- 1.4 载流子输运和复合

- **第二章 带隙工程**

- 2.1 化合物半导体
- 2.2 半导体固溶体及带隙工程
- 2.3 化合物半导体的外延生长

- **第三章 半导体异质结**

- 3.1 能带偏移工程
- 3.2 半导体异质结的能带图

- 3.3 半导体异质结的电学特性
- 3.4 半导体异质结的光电特性

- **第四章 半导体量子阱和超晶格**

- 4.1 应变与能带结构工程
- 4.2 量子阱和超晶格的定义
- 4.3 量子阱和超晶格的能带和电子态
- 4.4 量子阱发光器件
- 4.5 半导体光检测器

- **第五章 能带工程前沿**

- 5.1 新型的半导体材料制备方法
- 5.2 低维半导体：二维材料、纳米线、量子点
- 5.3 宽带隙与窄带隙半导体
- 5.4 光催化材料
- 5.5 有机材料，钙钛矿材料

上课时间安排

• 调研题目：能带工程前沿

5.1 新型的半导体材料制备方法

5.2 低维半导体：二维材料、纳米线、量子点

5.3 宽带隙与窄带隙半导体

5.4 光催化材料

5.5 有机材料，钙钛矿材料

1	二	26	27	28	29			
2	三	4	5	6	7	1	2	3
3		11	12	13	14	15	16	17
4		18	19	20	21	22	23	24
5		25	26	27	28	29	30	31
6	四	1	2	3	4	5	6	7
7		8	9	10	11	12	13	14
8		15	16	17	18	19	20	21
9		22	23	24	25	26	27	28
10	五	29	30					
11				1	2	3	4	5
12		6	7	8	9	10	11	12
13		13	14	15	16	17	18	19
14	六	20	21	22	23	24	25	26
15		27	28	29	30	31		
16							1	2
17		3	4	5	6	7	8	9
18		10	11	12	13	14	15	16
19		17	18	19	20	21	22	23

确定调研报告题目

报告展示

随堂考试