

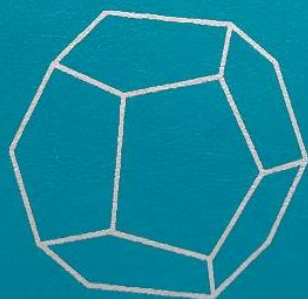
Відкрита лабораторія: Можливості сучасних цифрових мікроскопів з CCD- та CMOS- матрицями



День народження Олександра Смакули
09 вересня 2019 року,
Центр науки, м. Тернопіль

Олександр
СМАКУЛА

МОНОКРИСТАЛИ



Technische Physik in Einzeldarstellungen

Herausgegeben von W. Meissner und M. Nábauer

Band 14

Einkristalle

Wachstum, Herstellung und Anwendung

Von

Dr. phil. Alexander Smakula

Associate Professor of Crystal Physics
Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Mass.

Mit 240 Abbildungen



Springer-Verlag / Berlin · Göttingen · Heidelberg

J. F. Bergmann / München

1962

Олександр
СМАКУЛА

МОНОКРИСТАЛИ

вирощування, виготовлення
та застосування

Переклад з німецької
Надії МЕЛЬНИК і Павла ТРОЦЕНКА

За редакцією
Володимира КОЗИРСЬКОГО
і
Василя ШЕНДЕРОВСЬКОГО

Київ
Видавництво «Рада»
2000

Друга частина

Методи виготовлення монокристалів

Виготовлення монокристалів у великих обсягах започатковано ще наприкінці XIX-го століття, коли французові Верною вдалося отримати штучні шпательні камені (спосіб пловинного топлення). Його способом у промисловості виготовляються тепер корунд, шпінель, рутил та багато інших монокристалів. Інший шлях синтезу кристалів описав італієць Спеція 1905 року (гідротермальна синтеза), яку запроваджено останніми роками для вирощування кристалів кварцу. У виготовленні кристалів з розчину великого кристалів кварцу. У виготовленні кристалів з розчину великого успіху досягли лабораторії компанії Браш Девелопмент та Белл Телефон лише під час останньої війни, коли було одержано велику кількість п'єзокристалів (сегнетова сіль, дигідрогенфосфат амонію, етилендіамінтарtrat). Паралельно з вирощуванням кристалів з розчину кристали виготовлялися з розтопу. У розвиток цієї методи зробила внески низка дослідників, як-от Накен, Чохральський, Тамманн, Штобер, Бриджмен і Киропулос. Спершу цю методу запроваджено для вирощування йонних кристалів та кристалів металів. Як найвище досягнення тут варто згадати виготовлення Стокберджером штучного CaF_2 . Останнім часом вирощування з розтопів набуло великого значення у виготовленні ковалентних кристалів, як наприклад Ge, Si та інших напівпровідників. Нещодавно набуло ваги вирощування з парової фази, за допомогою якого насамперед виготовляються кристали CdS. Нарешті треба згадати про вирощування кристалів з топного розчину (Ремейка), що зумовило успішне вирощування BaTiO_3 .

Після цього короткого історичного вступу до справи вирощування кристалів зараз йтиметься виключно про окремі методи.

IX. Вирощування кристалів з розчину

Кристалізація з розчину використовується хеміками з давніх часів для розділення й очищення сполук. У цьому разі отримані кристали як правило дуже малі і їхні кристалографічні площини здебільшого можна розпізнати лише під мікроскопом і вони ніколи не бувають добре вироблені. Для деяких цілей ці кристалики вже є доволі великими. Більшість застосовань потребує кристалів значних розмірів. Поряд з величиною суттєве значення має і якість. Щоб отримати великі якісні кристали, вихідний матеріал достатньої чистоти та методу виготовлення під час кристалізації потрібно піддавати бездоганному контролю.

Дуже важливу роль у кристалізації відіграють домішки, які можуть впливати на якість кристала та на швидкість росту. Домішки, які є разом з кристалом ізоморфними, мають бути видалені,

бисмутом. Залізоїтрийовий гранат виготовляється зараз завбільшки до 1 см.¹

Деякі ферити, як-от $\text{CoO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ чи $\text{MnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ кристалізуються з розтопу бораксу.²

Розтопи індію і галію придатні для виготовлення кристалів кремнію та германію.³ Домішки через розчинні розтопи становили лише 10^{-5} . Отримували кристали завдовжки до 15 мм. Кристали германію з арсеном виготовлялися з розтопу арсену.⁴ Малі кристали кубічного SiC можна отримувати зі збагачених кремнієм розтопів.^{5,6}

Монокристали напівпровідникових сполук III-V-ої груп близько 12 мм завдовжки та 1,5 мм завтовшки вдається виготовити з 10-20% топних розчинів фосфору, арсену чи антимону в алюмінії, галії чи індії шляхом охолодження.⁷

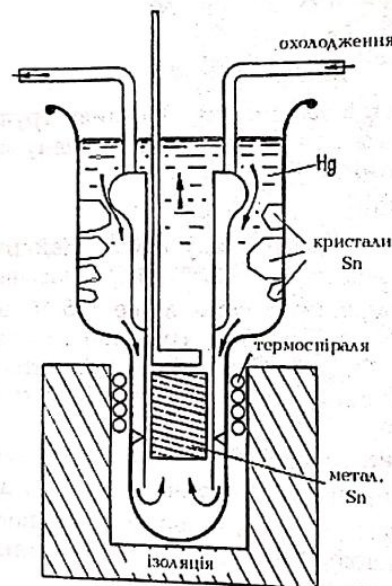


Рис. 86. Виготовлення монокристалів сірої цини з розчину амальгами (за Евальдом і Туфте⁸).

Монокристали сірої цини через свої напівпровідникові властивості становлять особливий інтерес. Найліпші кристали завбільшки до 2 см виготовляють з рідкої амальгами.⁸ Апаратуру зображено на рис. 86. Метода ґрунтується на принципі циркуляції. У долішній камері міститься шматок білої цини, по якій перетікає живосрібло за температури -20°C і насичується Sn. Горішня камера має температуру -30°C . З перенасиченого розчину на стінках виділяється Sn у формі кристалів. Для одержання великих кристалів до 2 см потрібен місяць. Зародковий кристал не є остаточний, проте перші кристали мають гексагональну форму і складаються правдоподібно з HgSn_2 .

¹ KRAMARSKY, B.: Proc. I.R.E. 47, 42 A (1959).

² TIMOFEEVA, V. A. und A. V. ZALESKII: Rost Kristallov 2, 69 (1959).

³ KECK, P. H. und J. BRODER: Phys. Rev. 90, 521 (1953).

⁴ TRUMBORE, F. A. und E. M. FORBANSKY: J. Appl. Phys. 31, 2068 (1960).

⁵ HALDEN, F. A.: Silicon Carbide, Proc. of the Conference on Silicon Carbide, Boston, Mass. April 2-3, 1959, Oxford-London, Pergamon Press, 1960, p. 115.

⁶ ELLIS, R. C. Jr.: ibid. p. 124.

⁷ WOLFF, G. A., P. H. KECK und J. D. BRODER: Phys. Rev. 94, 753 (1954).

⁸ EWALD, A. W. und O. N. TUFTE: J. Appl. Phys. 29, 1007 (1958).

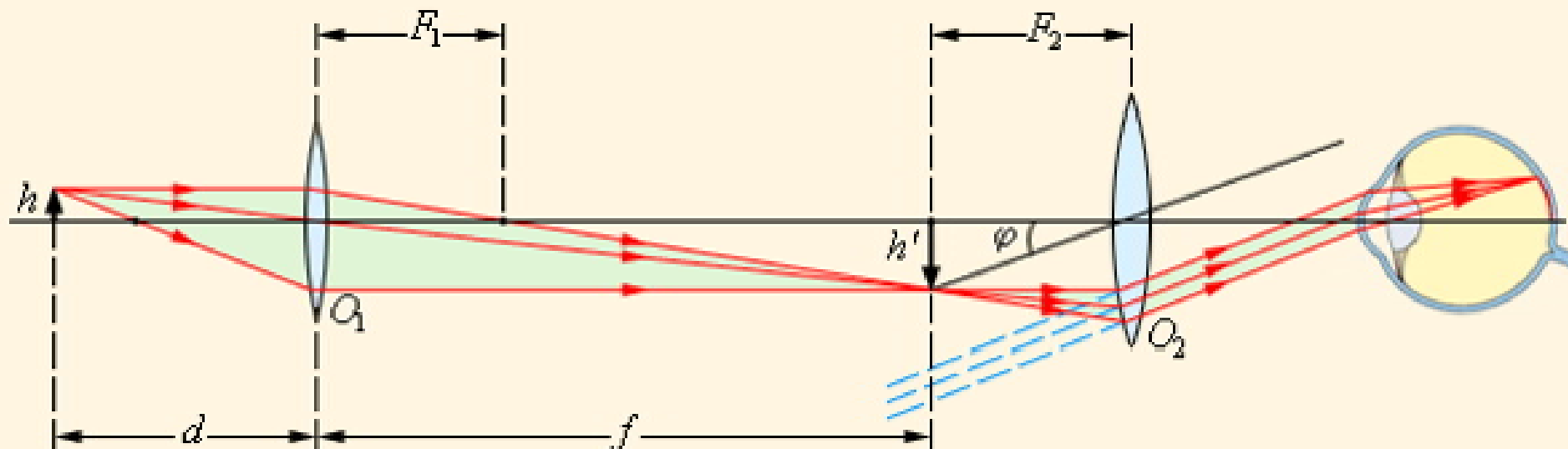


Мікроскоп - прилад для розглядання дрібних, невидимих для неозброєного ока, предметів у збільшеному зображенні.



- Ганс Ліпперсгей, Захаріас Янсен (1590, Мідделбург, Нідерланди);
- Галілео Галілей (1624, осchiolino)
- Роберт Гук (1665, відкриття клітин);
- Антоні ван Левенгук (1675, дослідження водяних крапель).

Оптичний мікроскоп - мікроскоп, в конструкції якого використовується набір лінз, які при перегляді збільшують зображення дрібних об'єктів. Побудоване за допомогою лінз зображення проектується в окуляр.



• Найпростіший мікроскоп складається із двох лінз - **об'єктива** і **окуляра**, з'єднаних трубою - **тубусом**.

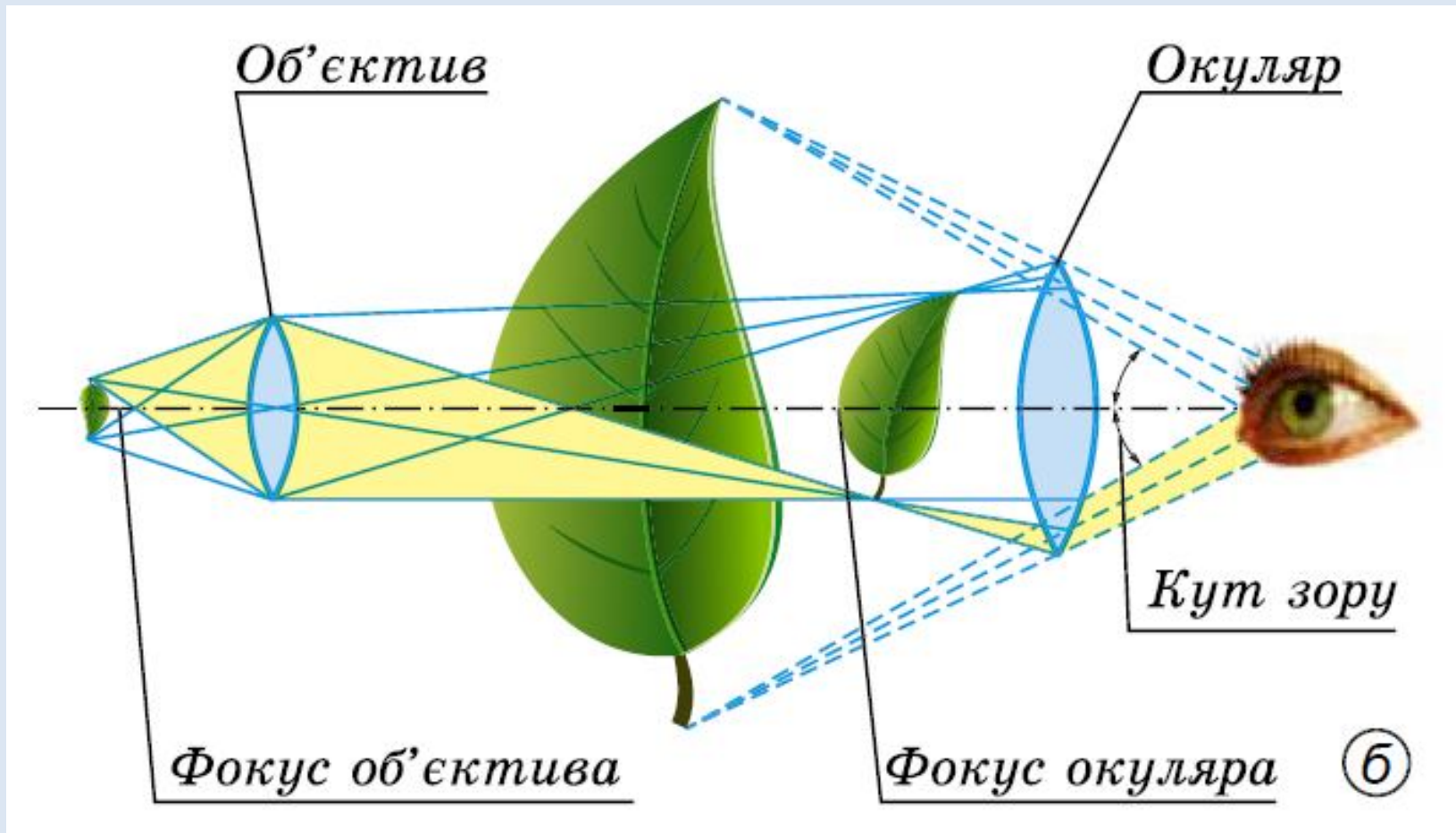
• **Об'єктив** - лінза із дуже малою фокусною відстанню. Він підноситься близько до об'єктної площини, на якій лежить призначений для вивчення об'єкт. Об'єктив забезпечує велике збільшення і створює обернене дійсне зображення.

• Це зображення ще раз перевертається **окуляром**, через який його розглядає дослідник.

• Основну роль в системі освітлення відіграє **конденсор** - короткофокусна лінза або система лінз (дзеркал), що збирає і спрямовує промені від джерела світла на об'єкт.



✓ Перше збільшення зображення предмета дає об'єктив. *Предмет у мікроскопі розміщується трохи далі від фокуса об'єктива.* У результаті цього отримується збільшене і обернене (перевернуте) зображення предмета.



<https://pidruchnyk.com.ua/1018-syrotyuk-fmzyka-9-klas.html>

✓ Отримане зображення збільшується ще раз лінзою-окуляром: воно слугує для окуляра предметом. *Окуляр, подібно до лупи, розміщують на відстані, меншій від фокусної, від проміжного зображення.*

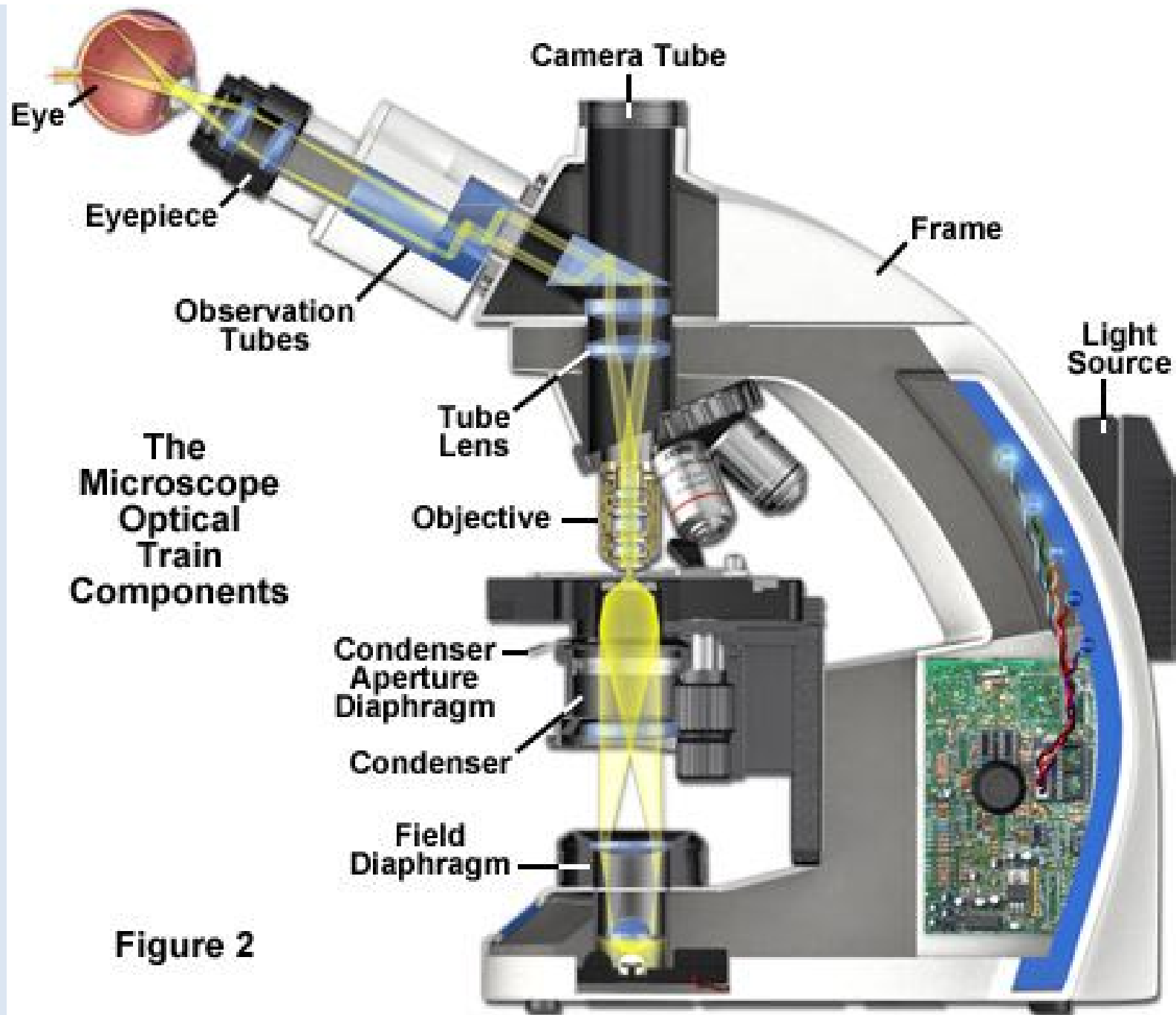


Figure 2

Цифровий мікроскоп - мікроскоп, в якому зображення отримують за допомогою вбудованої електронної відеокамери (на основі ПЗЗ- або КМОН-сенсора). У таких мікроскопах, як правило, не передбачено окуляр для спостереження за об'єктами людським оком (зображення виводиться на екран).

Напрямки застосування:

- ✓ **дефектоскопія;**
- ✓ **мікроремонтні роботи (плати, годинники тощо);**
- ✓ **медицина (офтальмологія, дерматологія тощо);**
- ✓ **контроль якості та захист від підробок (справжність документів, грошових знаків, ювелірних виробів, друкованої продукції тощо);**
- ✓ **криміналістика (дактилоскопія);**
- ✓ **освіта;**
- ✓ **біологія;**
- ✓ **ветеринарія;**
- ✓ **реставрація картин, текстилю, скульптур тощо;**
- ✓ **філателія та нумізматики.**



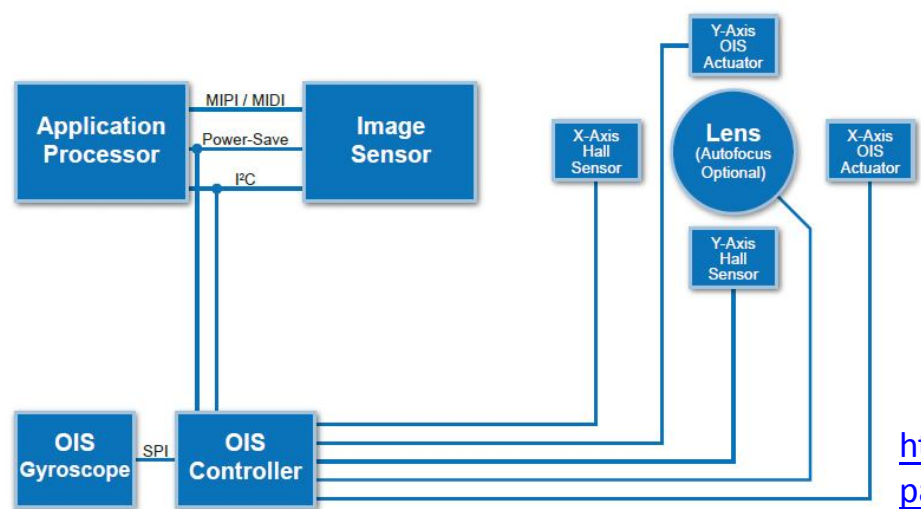
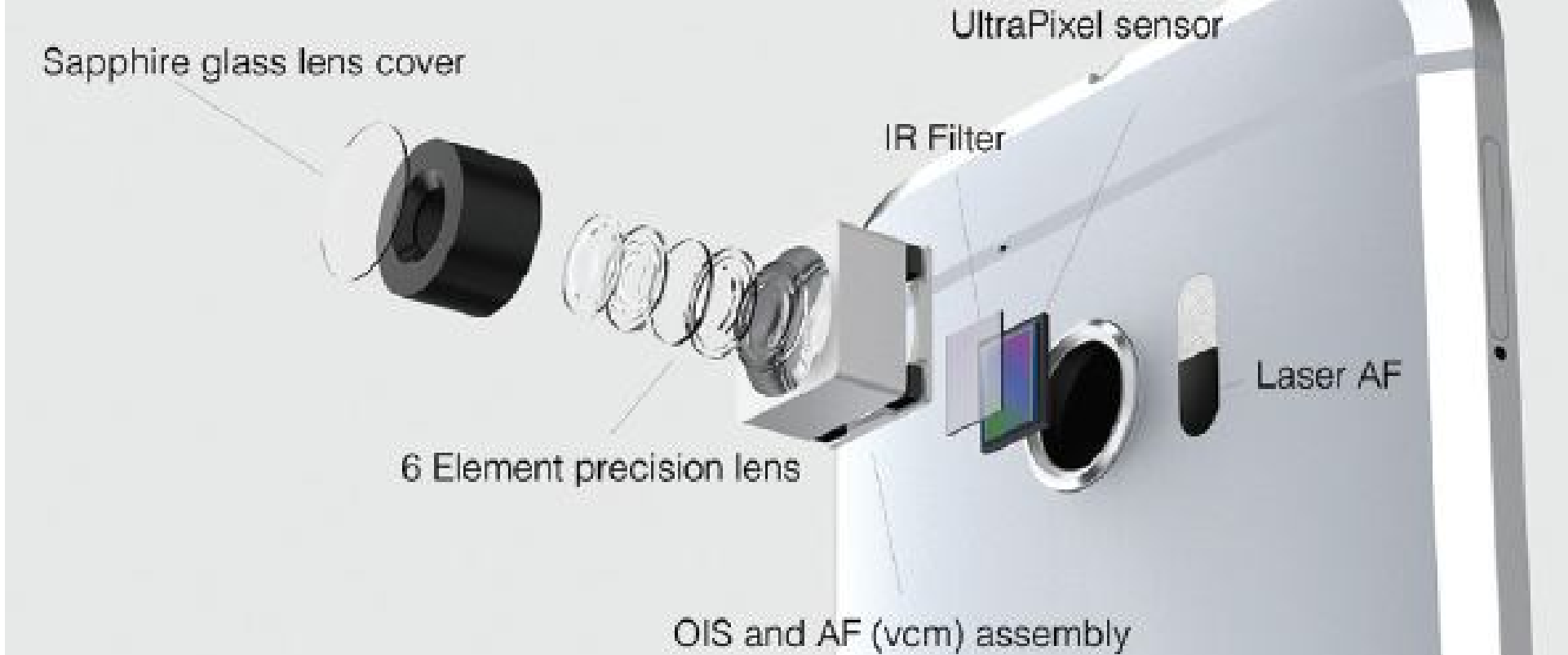
Цифрова камера (смартфона, планшета, цифрового мікроскопа) з боку виглядає як пластмасове віконце, але насправді представляє собою складну багатокомпонентну систему.

Головні елементи - матриця і об'єктив. Крім них в пристроях часто присутня композитна механіка для стабілізації та автофокусу, можливі лазерні далекоміри, RGB-датчики та різні види підсвітки та спалахів.



HTC 10 12-UltraPixel rear camera

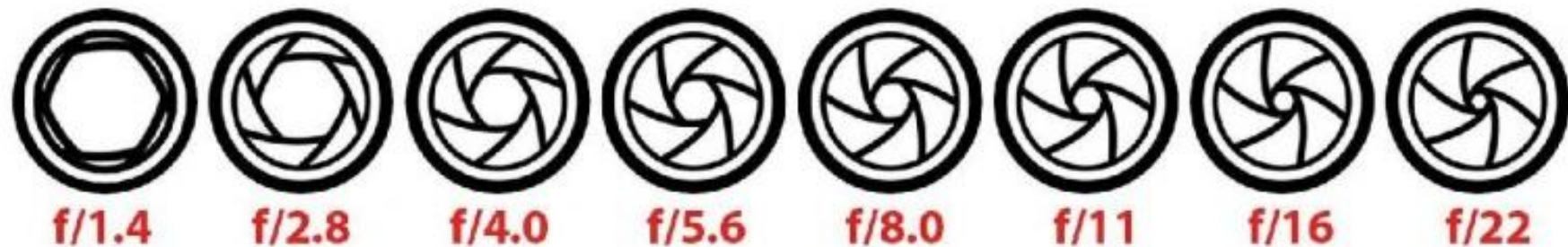
<https://siliconangle.com/2016/04/14/new-htc-10-vs-galaxy-s7-lg-g5-huawei-p9-android-fans-spoilt-for-choice/>



<https://www.rohm.com/documents/11308/12928/OIS-white-paper.pdf>

Ще один важливий параметр об'єктиву – діафрагмове число (f). Ця величина обернена до значення відношення розміру отвору об'єктива до фокусної віддалі об'єктива. Тобто, чим меншим є діафрагмове число, тим більшим є отвір - об'єктив пропустить більше світла, матриці доведеться менше підсилювати сигнал (більше можливостей робити якісні знімки вночі).

APERTURE SCALE



Wide Aperture ← → Small Aperture

More Light Reaching Image Sensor ← → Less Light Reaching Image Sensor

Shallow Depth of Field ← → Deep Depth of Field

FOCUS

Більшість камер в смартфоні мають значення діафрагми f/2 або f/2.2.

Деякі камери можуть похвалитися кращим показником f/1.8 чи f/1.7.

<https://c.mi.com/thread-592515-1-0.html>

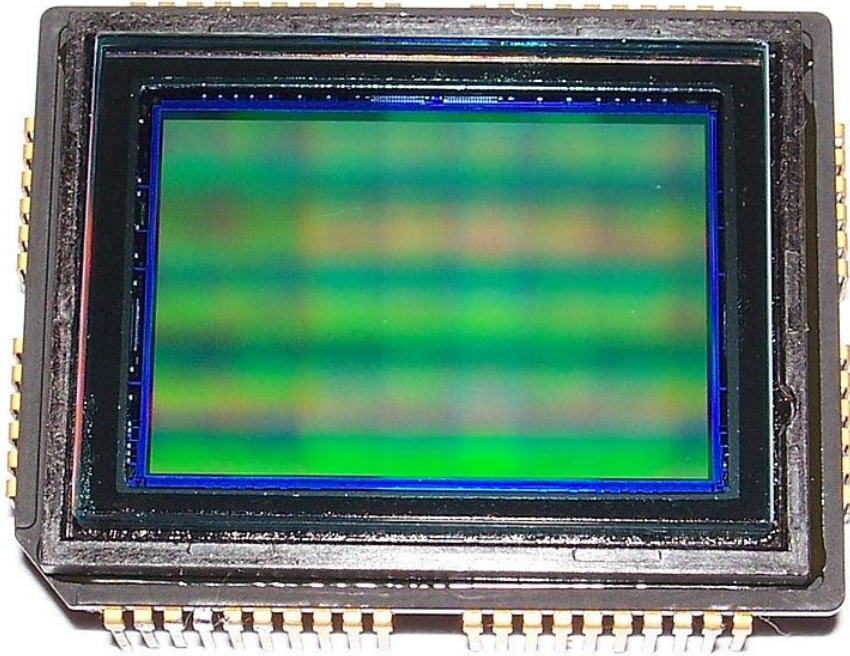


Levenhuk DTX 90

<http://www.levenhuk.ua/products/levenhuk-microscope-dtx-90/>

Тип мікроскопа	цифрові
Тип насадки	цифровий дисплей / монітор ПК
матеріал оптики	оптичне скло
Збільшення, крат	10-300
фокусування	ручна, в межах від 0 мм до 150 мм
підсвічування	світлодіодна
регулювання яскравості	є
Джерело живлення	5 В постійного струму через кабель USB 2.0
число мегапікселів	5
Можливість запису відео	є
ПО, драйвери	ПО для захоплення і редагування фото і відео, з функцією вимірювання об'єктів
вихід	USB 2.0
Системні вимоги	ОС Windows XP / Vista / 7/8/10, Mac 10.6 ~ 10.10, ЦПУ від P4 1,8 ГГц, ОЗУ від 512 МБ, відеокарта від 64 МБ, роз'єм USB 2.0, CD-ROM
корпус	прогумований чорний
Для оператора	для початківців
фото	* .Jpeg, 2592x1944, 2320x1744, 2048x1536, 1920x1080, 1280x1024
Відео	* .Avi, 2592x1944, 2320x1744, 2048x1536, 1920x1080, 1280x1024
Розташування підсвічування	верхня

Charge-coupled device (CCD) - пристрій із зарядовим зв'язком (ПЗЗ), в якому застосовується технологія керованого переносу заряду в об'ємі напівпровідника. CCD-матриця або ПЗЗ-матриця - спеціалізована аналогова інтегральна мікросхема, що складається з світлочутливих фотодіодів на основі кремнію, з використанням технології пристроїв із зарядовим зв'язком.



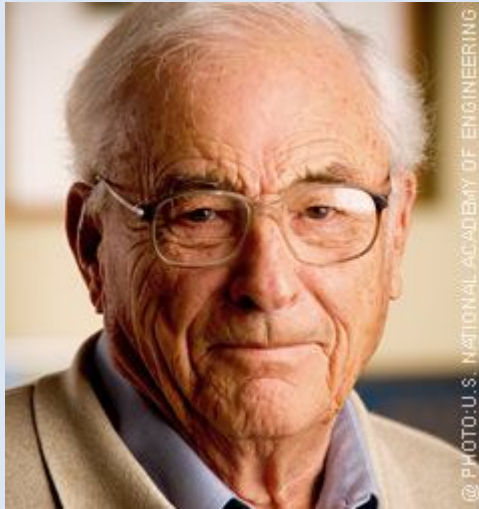
https://en.wikipedia.org/wiki/Charge-coupled_device#/media/File:CCD_SONY_ICX493_AQA_sensor_side.jpg



https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/multimedia/images/kepler-focal-plane-assembly.html

Kepler's telescope CDD matrix: the focal plane consists of an array of 42 charge coupled devices (CCDs), 2008.

Each CCD is 2.8 by 3.0 cm with 1024 by 1100 pixels. The entire focal plane contains 95 mega pixels.



Початок робіт - 1969 р.



NOKIA Bell Labs

Willard Boyle

Canadian and US citizen.
Born 1924 in Amherst, NS,
Canada.

Willard Boyle was born in Nova Scotia, Canada, and was educated at home by his mother until the age of 15. He began to work at Bell Labs in 1953, and in the 1960's he joined the 400,000 scientists in the USA whose efforts were to put the first man on the moon on 20 July 1969.

George Smith

US citizen. Born 1930 in
White Plains, NY, USA.

George Smith was hired at Bell Labs in 1959, and took out thirty patents during his time at the company. When he retired in 1986, he could finally dedicate himself fully to his life-long passion – sailing on the great seas, which has brought him around the globe many times.

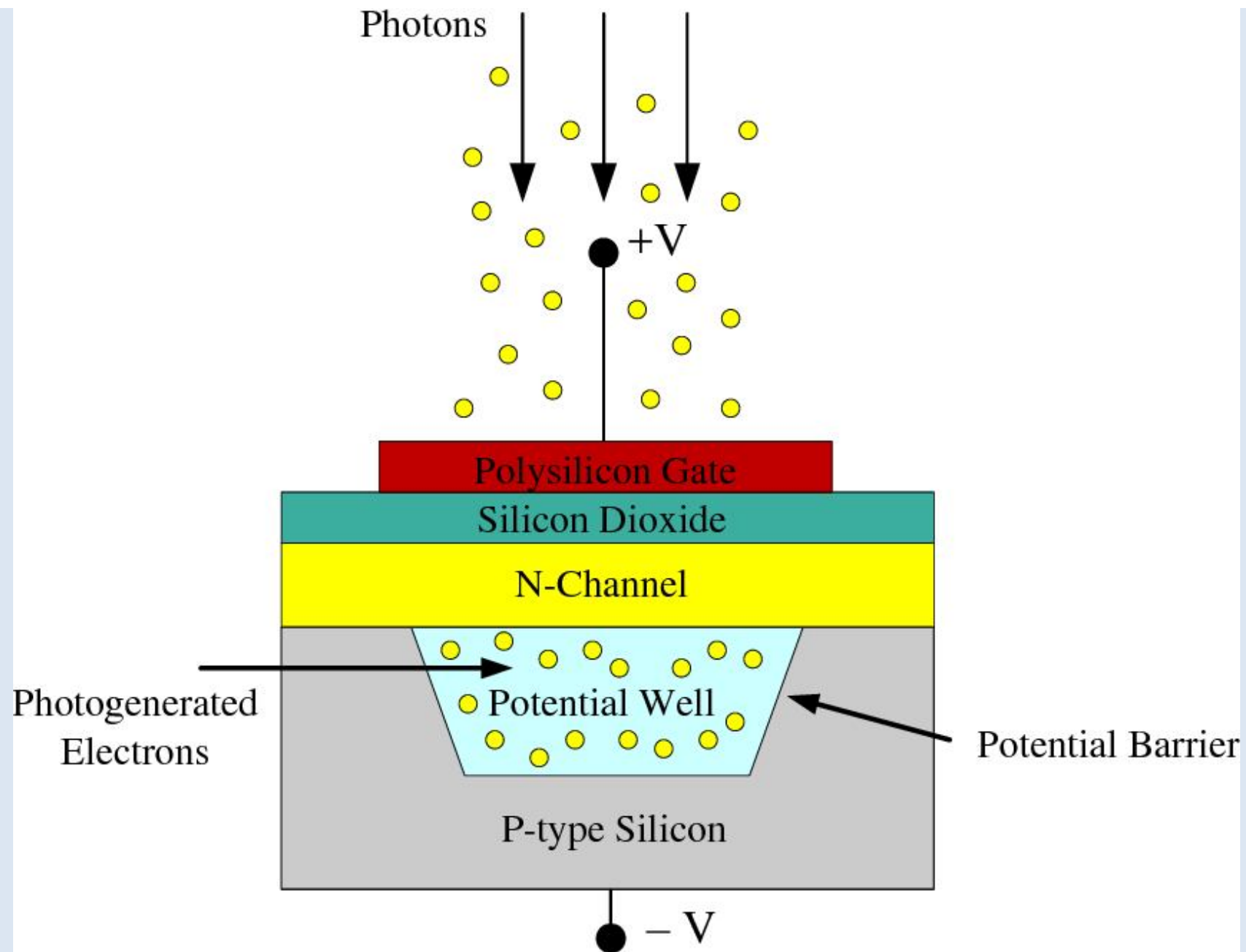
Nobel Prize in Physics for 2009

**Willard S. Boyle and
George E. Smith**

***"for the invention of an
imaging semiconductor circuit
– the CCD sensor"***

**"За винахід
напівпровідникової схеми
для отримання зображень -
ПЗЗ-сенсора"**

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2009/illustrated-information/>



[https://www.semanticscholar.org/paper/A-High-Voltage-Charge-Coupled-Device-\(CCD\)-ASIC-for-Chun/4bceb2f351025c1f4688f56640d23cc0493654e5](https://www.semanticscholar.org/paper/A-High-Voltage-Charge-Coupled-Device-(CCD)-ASIC-for-Chun/4bceb2f351025c1f4688f56640d23cc0493654e5)

1) фотони світла, що пройшли через об'єктив фотоапарата;

2) мікролінза субпікселя;

3) **R-червоний** (G- або B-) світлофільтр субпікселя, фрагмент фільтра Байера;

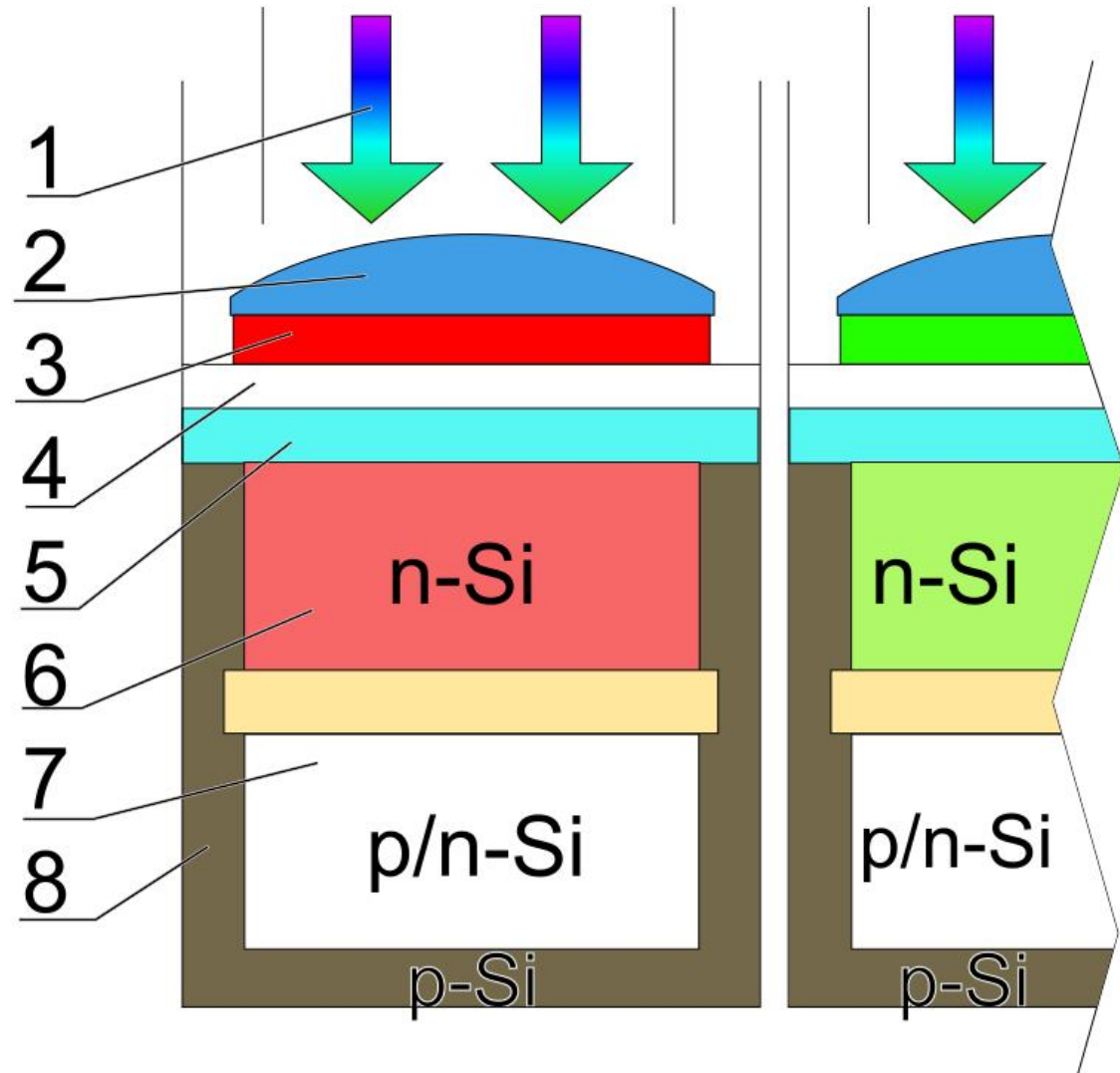
4) прозорий електрод з полікристалічного кремнію або сплаву індію та оксиду олова;

5) оксид кремнію;

6) кремнієвий канал *n*-типу: зона генерації носіїв (зона внутрішнього фотоефекту);

7) зона потенціальної ями (кишеня *n*-типу), де збираються електрони з зони генерації носіїв заряду;

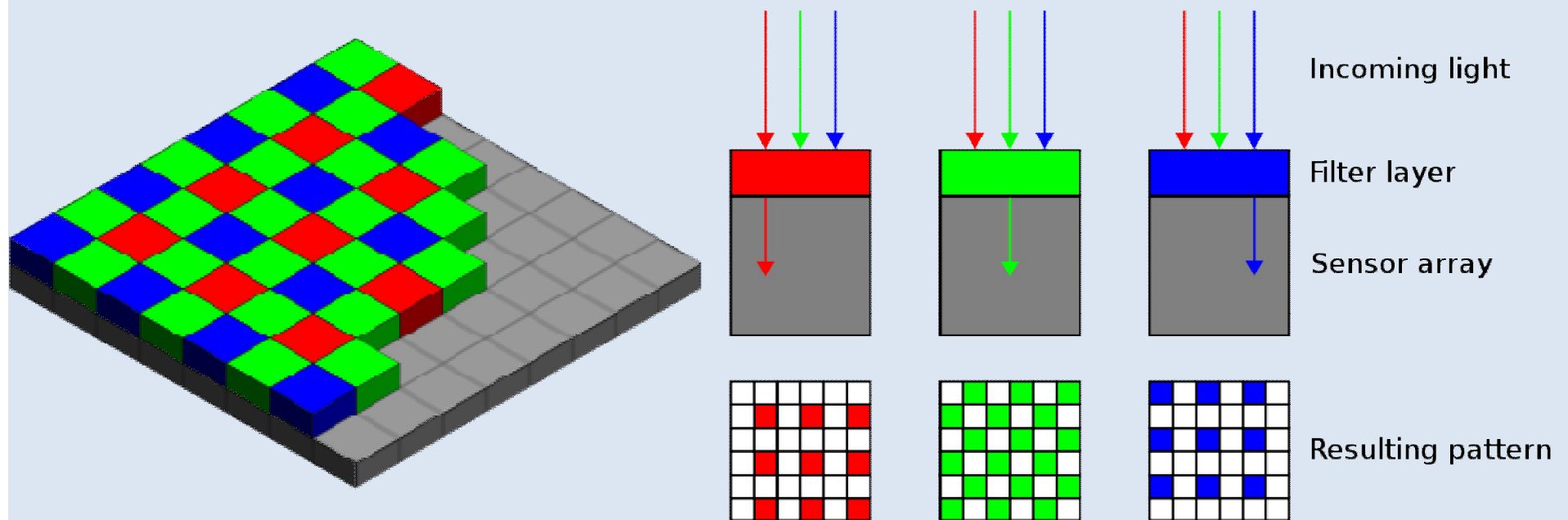
8) кремнієва підкладка *p*-типу.

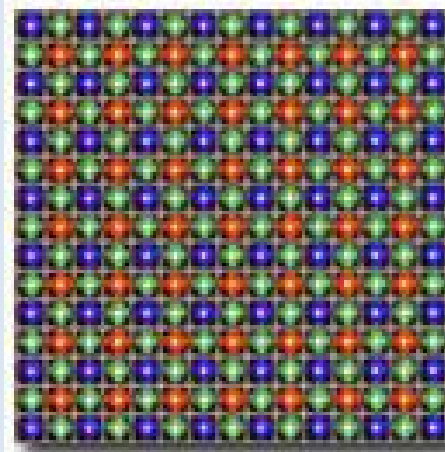
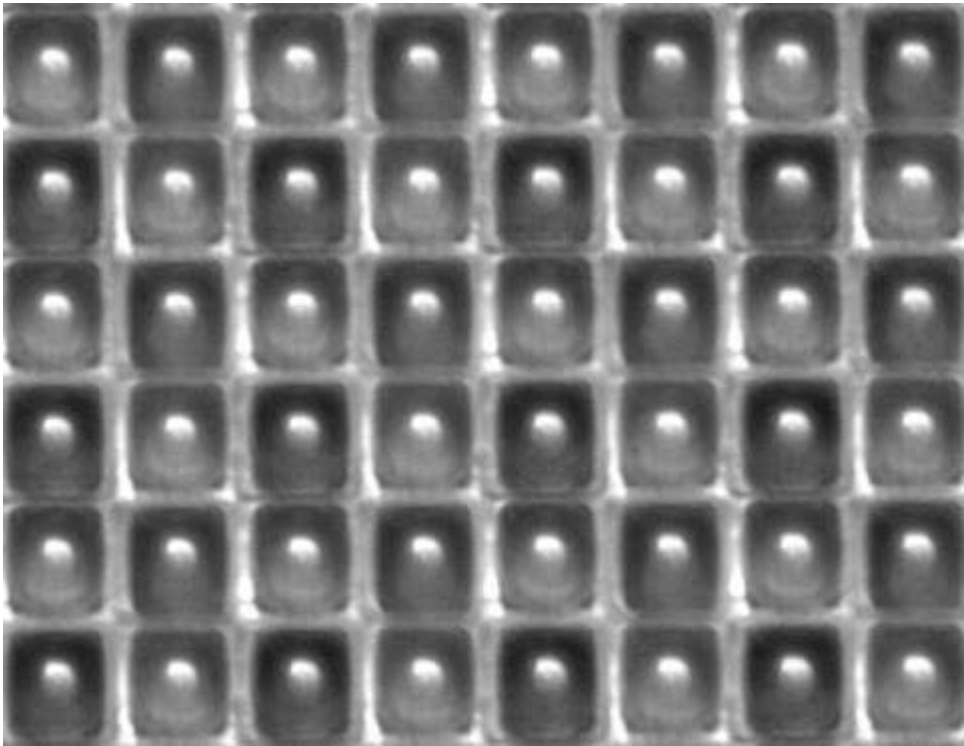


Фільтр Байєра (шаблон Байєра) - це масив кольорових (RGB) фільтрів у комірках матриці, якими накрито фотосенсори (названо на честь доктора Брайса Байєра (Kodak)).

Фільтр використовують у фотоматрицях цифрових фотоапаратів, відеокамер та сканерів для одержання кольорового зображення.

Масив фільтру складається з **25 % червоних елементів**, **25 % синіх** і **50 % зелених елементів**.





Кожен світлочутливий елемент сприймає лише частину колірної інформації, а решта відсікається фільтром.

Відсутня інформація про колір видобувається з сусідніх світлочутливих комірок. Після цього процесор розраховує дані про колір на підставі даних оточуючих осередків і тільки після цього формує кінцеве значення кольорового пікселя, тобто *у формуванні інформації стосовно освітленості одного пікселя беруть участь кілька фотодіодів матриці.*

Metal Oxide Semiconductor (MOS) Capacitor

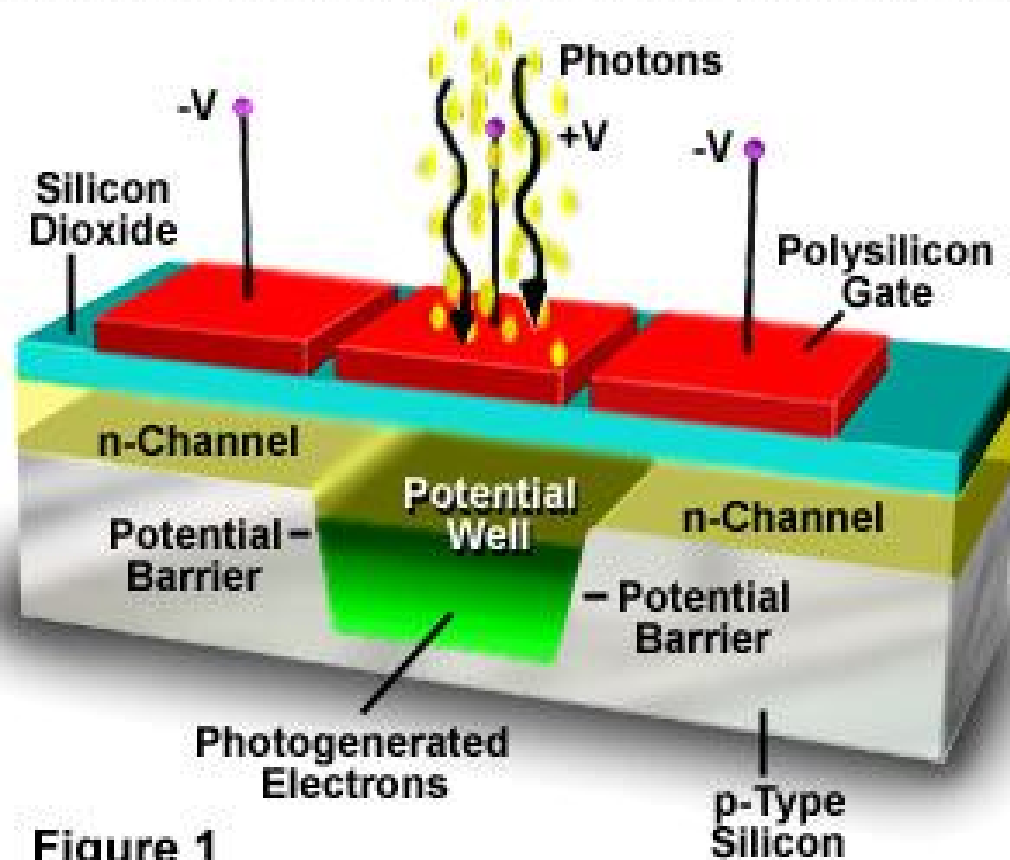
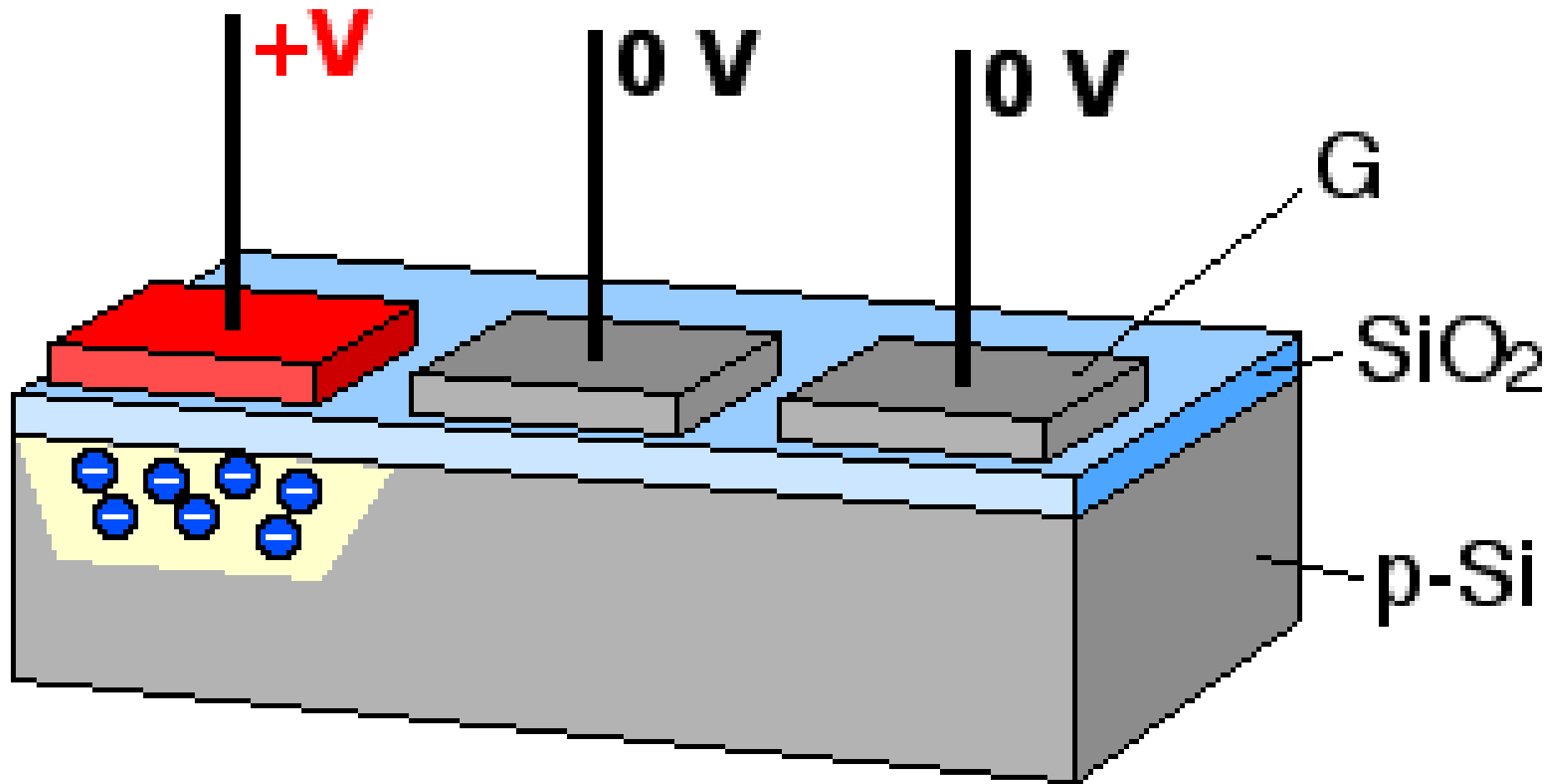


Figure 1

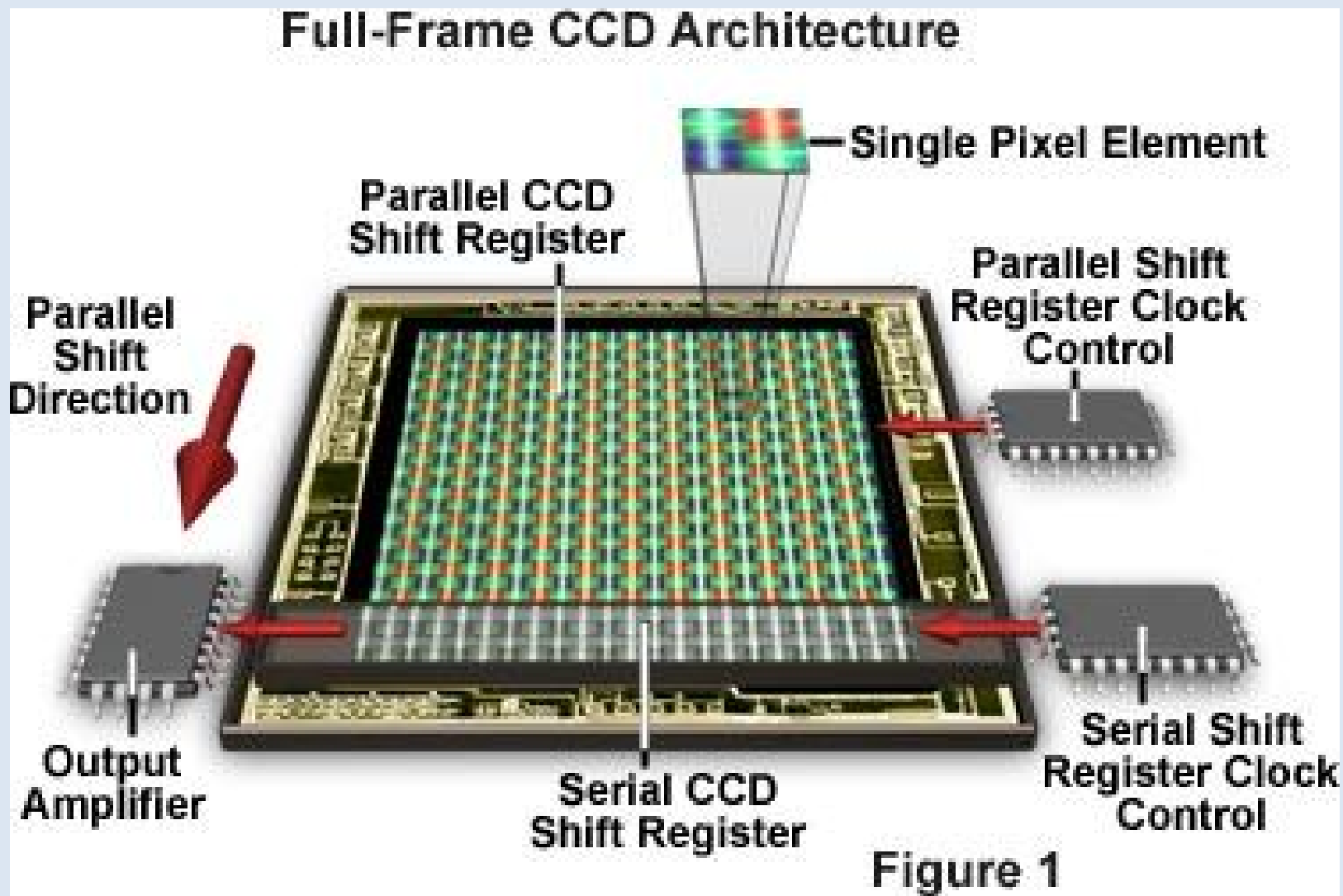
На кремнієву підложку *p*-типу наносяться канали з напівпровідника *n*-типу. Над каналами створюються електроди з полікристалічного кремнію з діелектричним прошарком з оксиду кремнію.

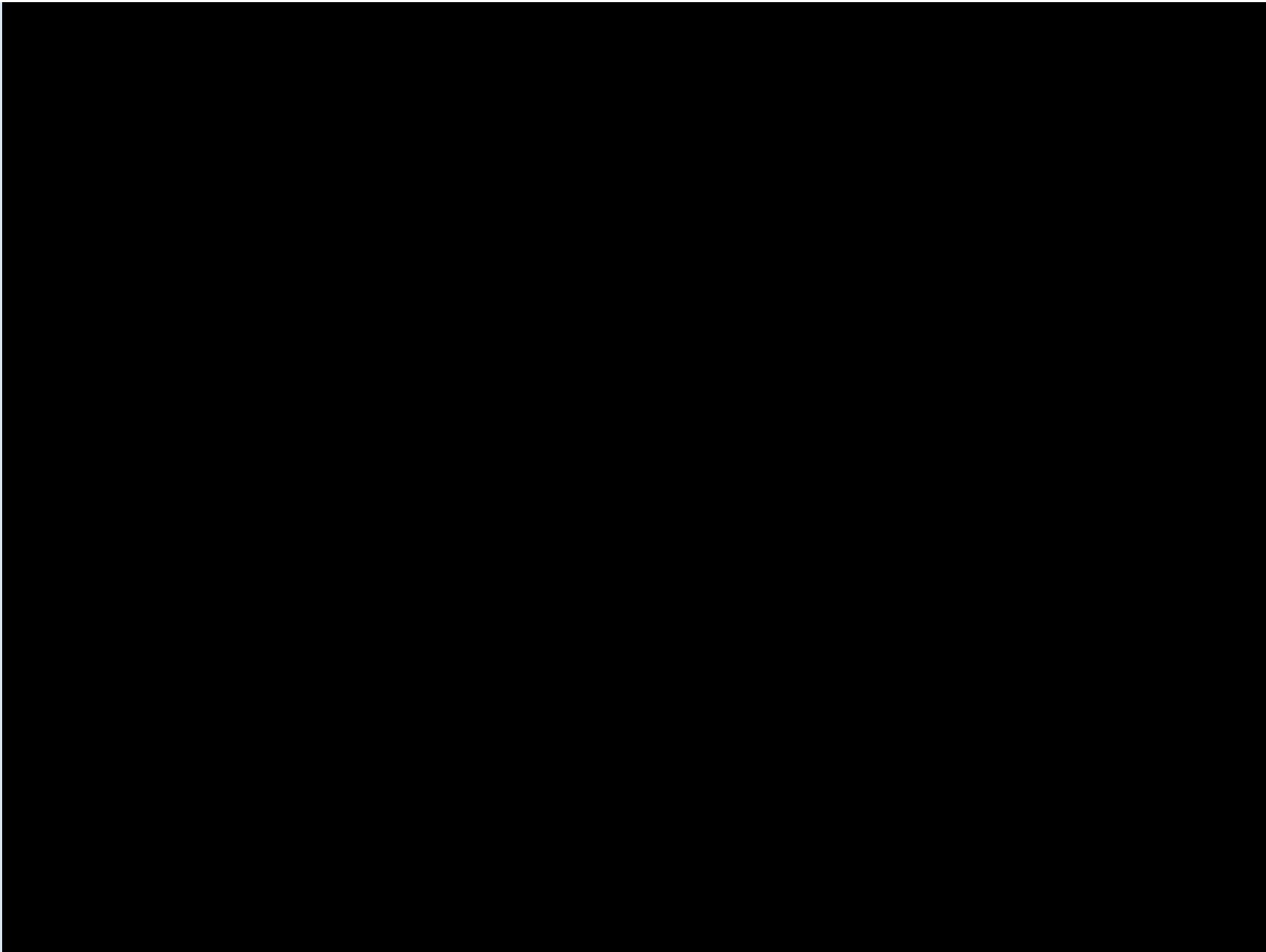
Після подачі на такий електрод електричного потенціалу, у збідненій зоні під каналом *n*-типу створюється потенціальна яма для збереження електронів. Фотони, що проникають у кремній, зумовлюють генерацію електронів, які накопичуються у потенціальній ямі (більше фотонів – більше електронів), далі заряд зчитується та підсилюється.



Як працює CCD-матриця

Зчитування фотострумів ПЗЗ-елементів здійснюється так званими послідовними регістрами зсуву, які перетворюють рядок зарядів на вході в серію імпульсів на виході. Дана серія є аналоговим сигналом, який надалі надходить на підсилювач.

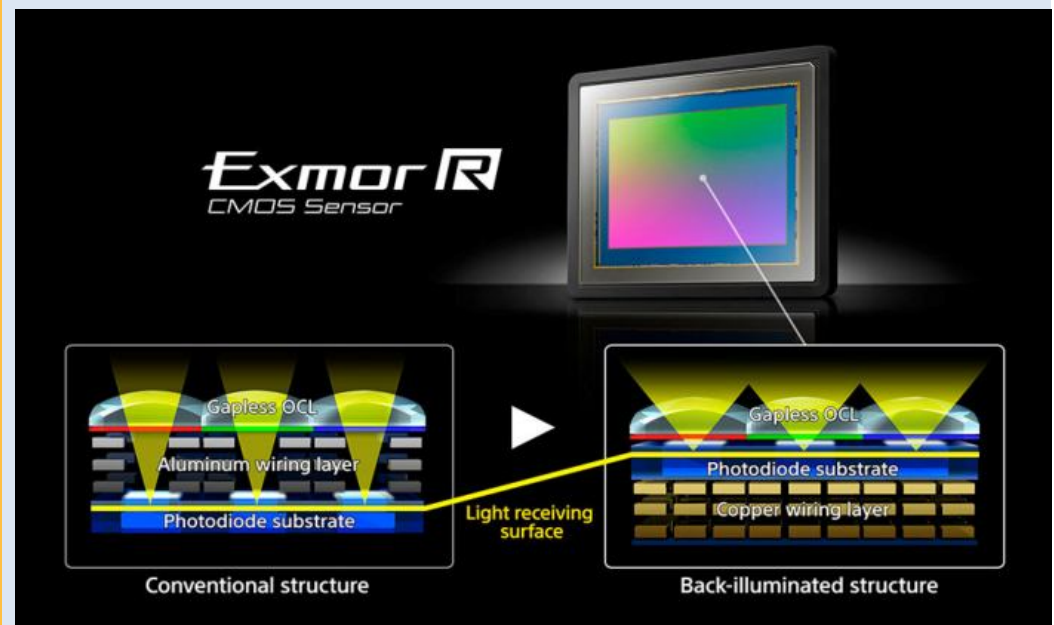




Raymond Siri <https://vimeo.com/103279733>

Історично однією з найкращих за якістю вважалася CCD-технологія, але з вагомих причин визначальну частку на ринку захопила технологія CMOS. Цей тип матриць має низку особливостей, найбільш важливих для мобільних пристроїв:

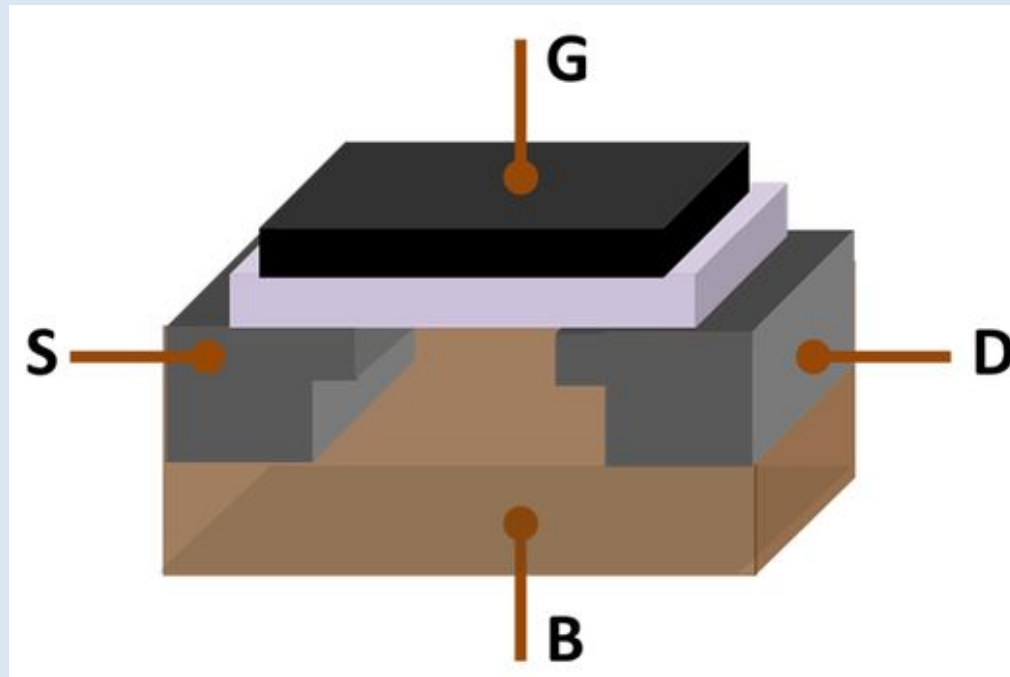
- ✓ CMOS-сенсори мають низьке енергоспоживання;
- ✓ дозволяють розміщувати підсилювачі всередині пікселя (що покращує якість при поганому освітленні);
- ✓ більш дешеві у виробництві;
- ✓ забезпечують високу швидкість роботи при формуванні зображення і зйомці в реальному часі.



CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor) – це технологія побудови логічних електронних схем КМОН

(комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник).

У технології КМОН використовуються комплементарні пари МДН (метал-діелектрик-напівпровідник) польових транзисторів з ізольованим затвором з каналами різної провідності.

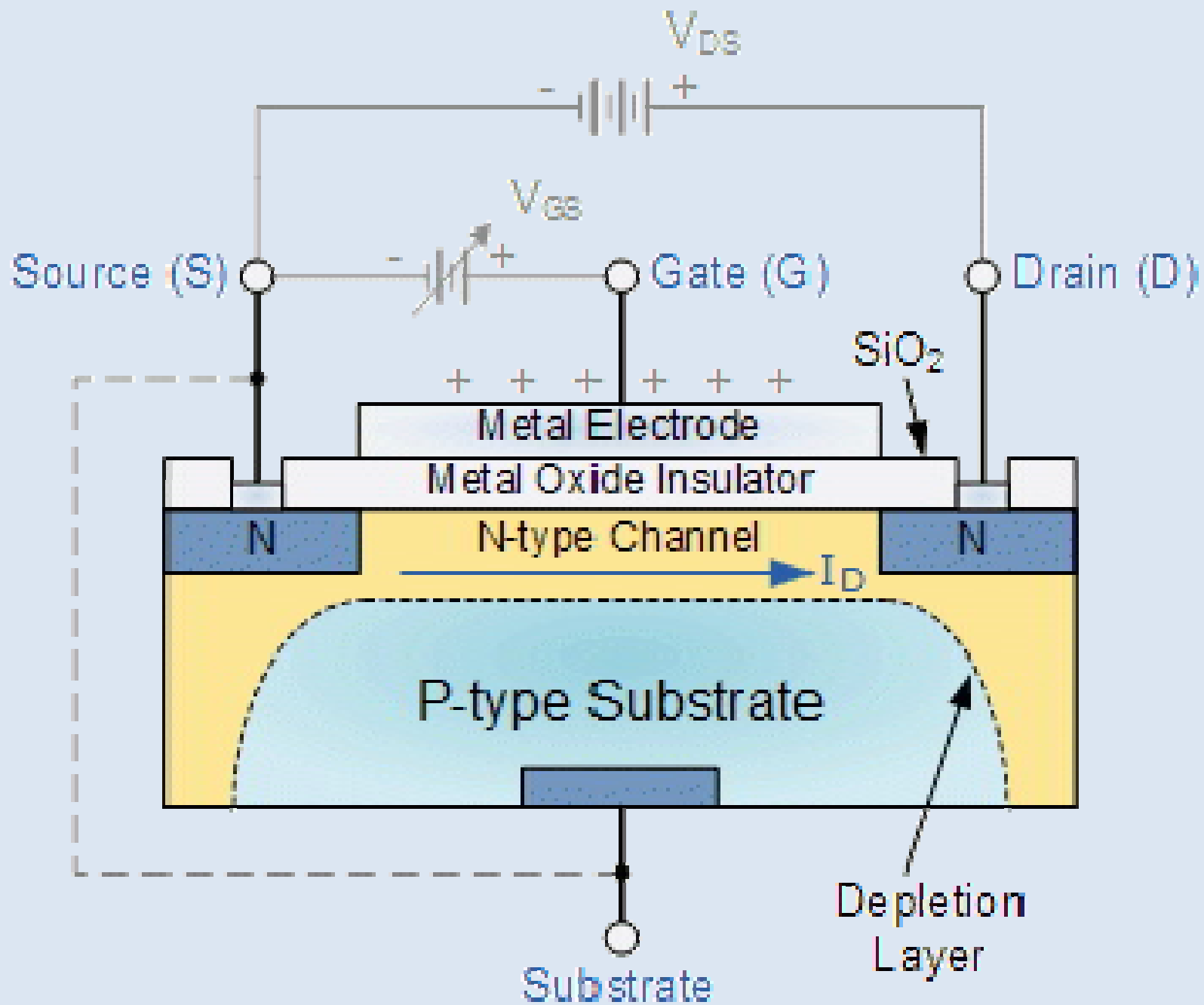


MOSFET, showing gate (G), body (B), source (S) and drain (D) terminals. The gate is separated from the body by an insulating layer .

*Mohamed Atalla and Dawon Kahng
(at Bell Labs in November 1959)*

<https://en.wikipedia.org/wiki/MOSFET>

Польові транзистори управляються полем (величиною напруги прикладеної до затвора), а не струмом, що протікає через базу (як в біполярних транзисторах), а тому споживають значно менше енергії, що особливо актуально в схемах пристроїв з певним типом очікуванням, а також в схемах малого споживання та енергозбереження (реалізація сплячих режимів).

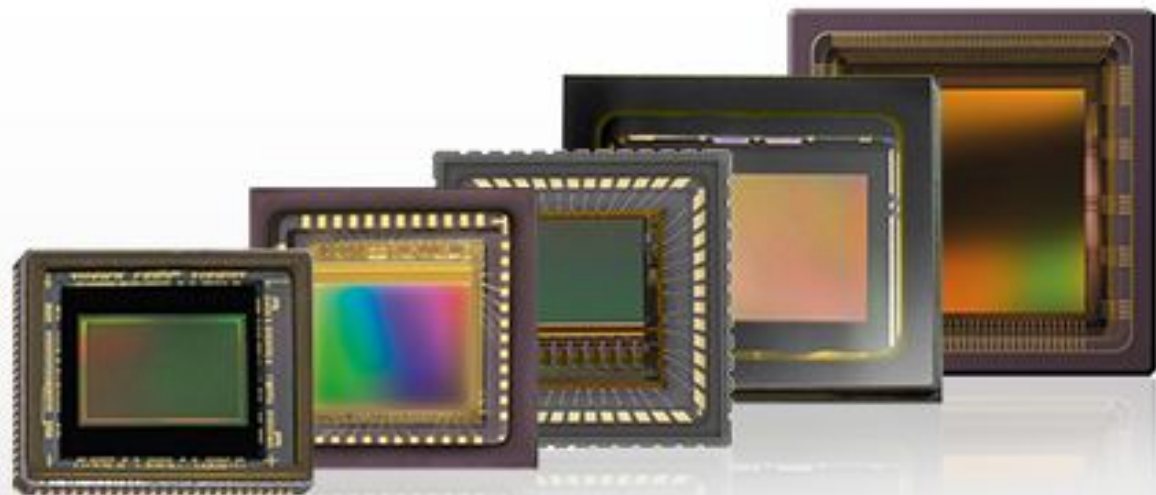


КМОН-матриця (CMOS sensor) - світлочутлива матриця, побудована на основі КМОН-транзисторів.

✓ Кожен піксель такої матриці містить фотодетектор і підсилювач (за конструкцією вона нагадує оперативну пам'ять з довільним доступом, оскільки заряд з кожного фотодетектора не переноситься одразу на запам'ятовуючий регістр), тобто є сенсором з активними пікселями (Active pixel sensor, APS, створені NASA Jet Propulsion Laboratory у 1990 рр.).

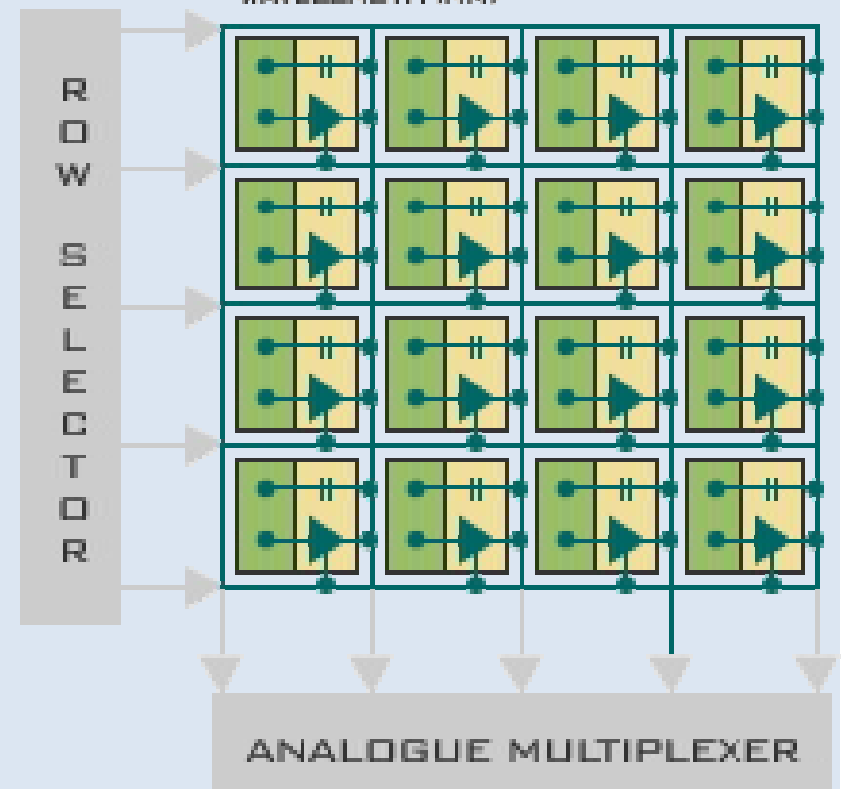
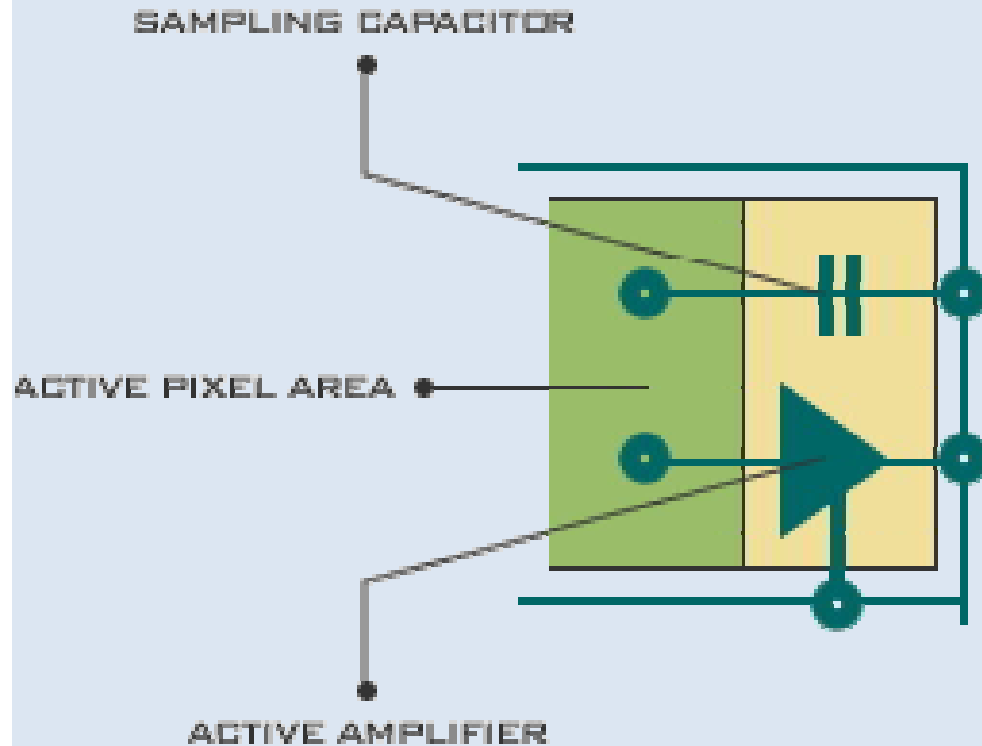
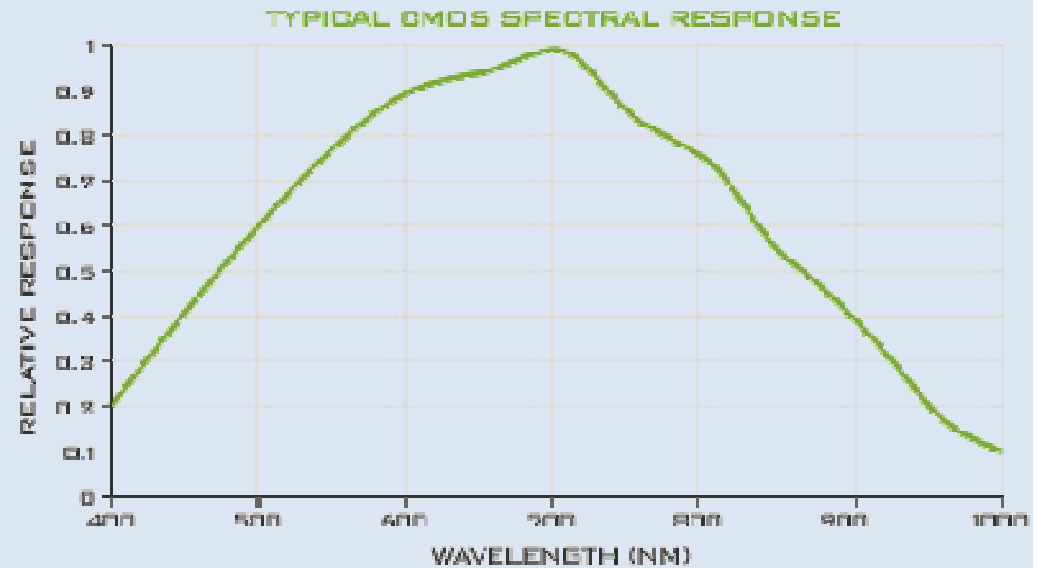
✓ Кожен елемент КМОН-матриці адресується окремо від інших.

**WE TRUST IN CMOS.
YOU TOO? CONGRATULATIONS.**



Принцип роботи:

- ✓ До зйомки подається сигнал скидання;
- ✓ В процесі експозиції відбувається накопичення заряду фотодіодом;
- ✓ У процесі зчитування відбувається вибірка значення напруги на конденсаторі



CMOS Image Sensor Integrated Circuit Architecture

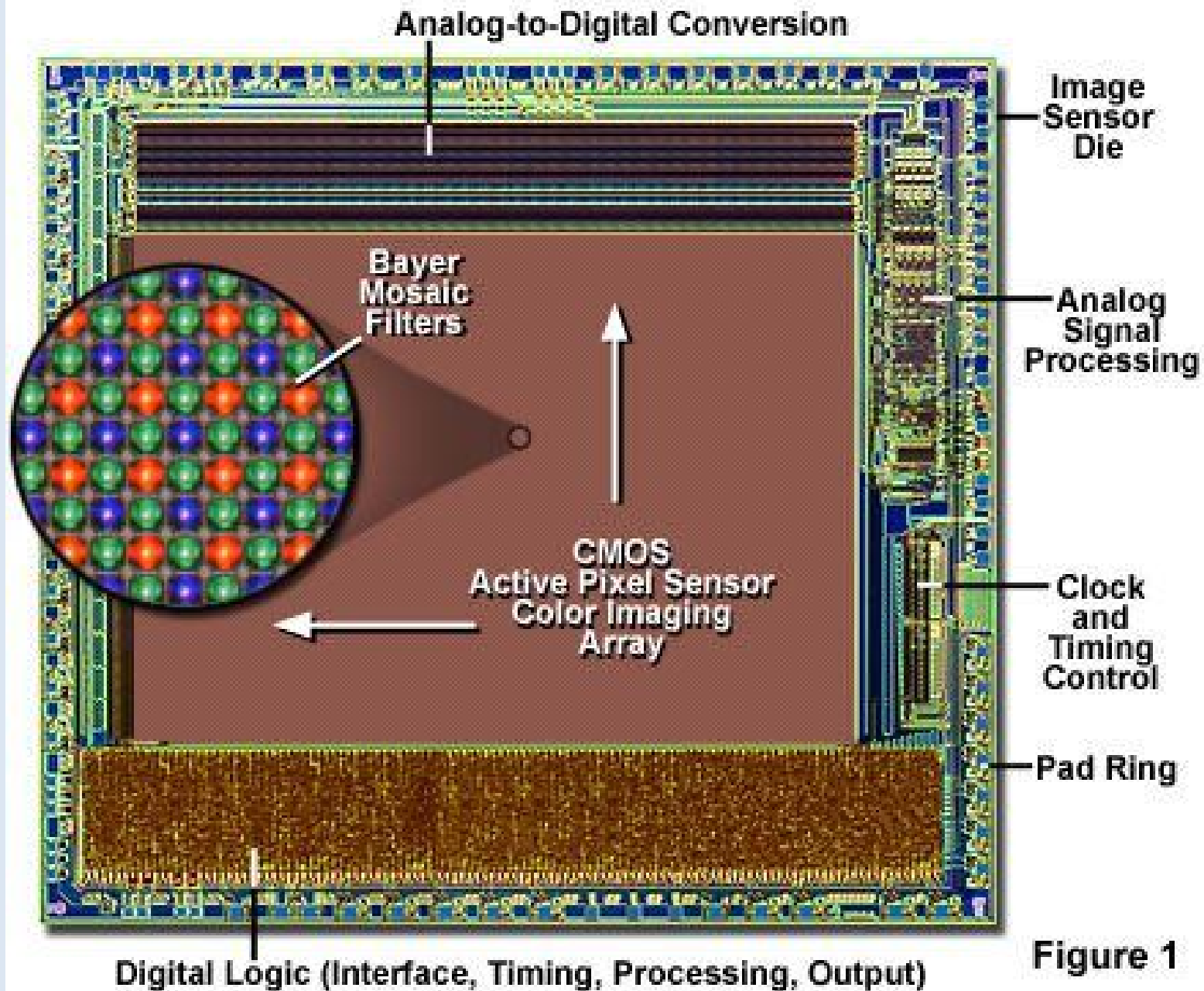


Figure 1

Anatomy of the Active Pixel Sensor Photodiode

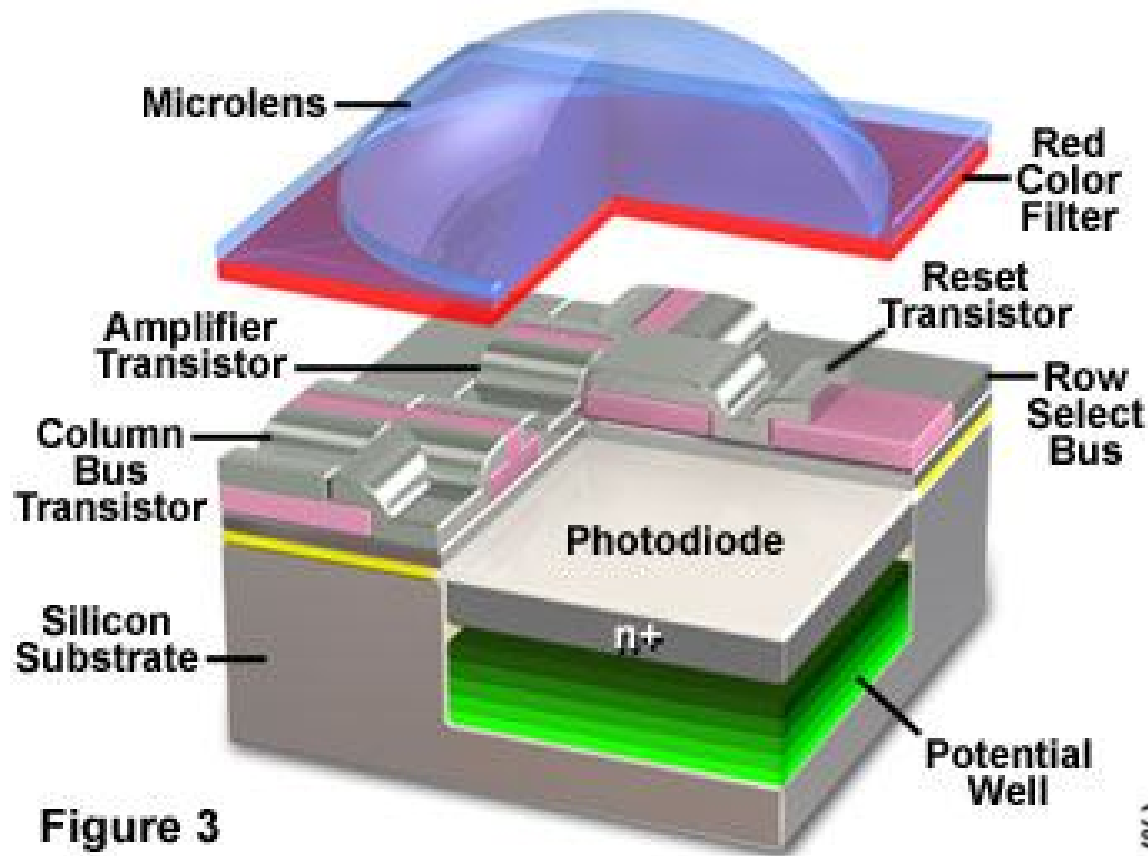
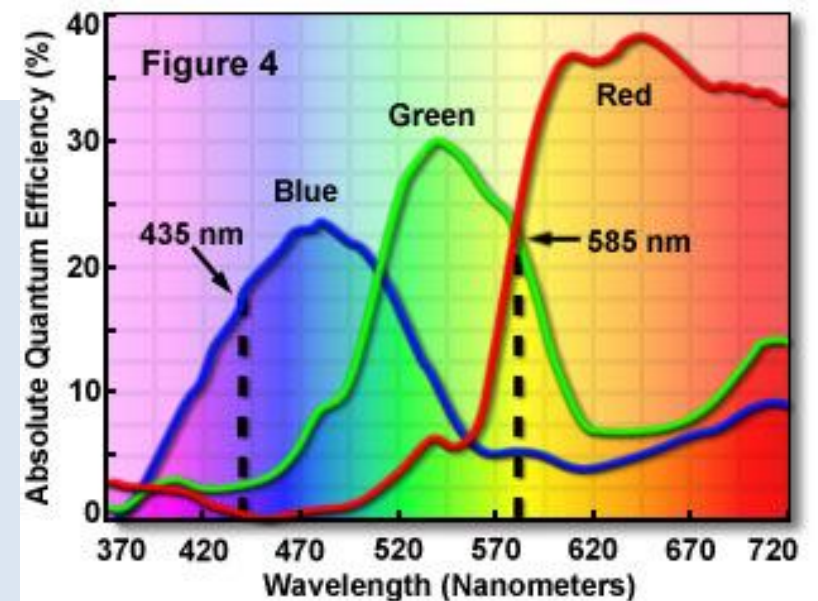


Figure 3

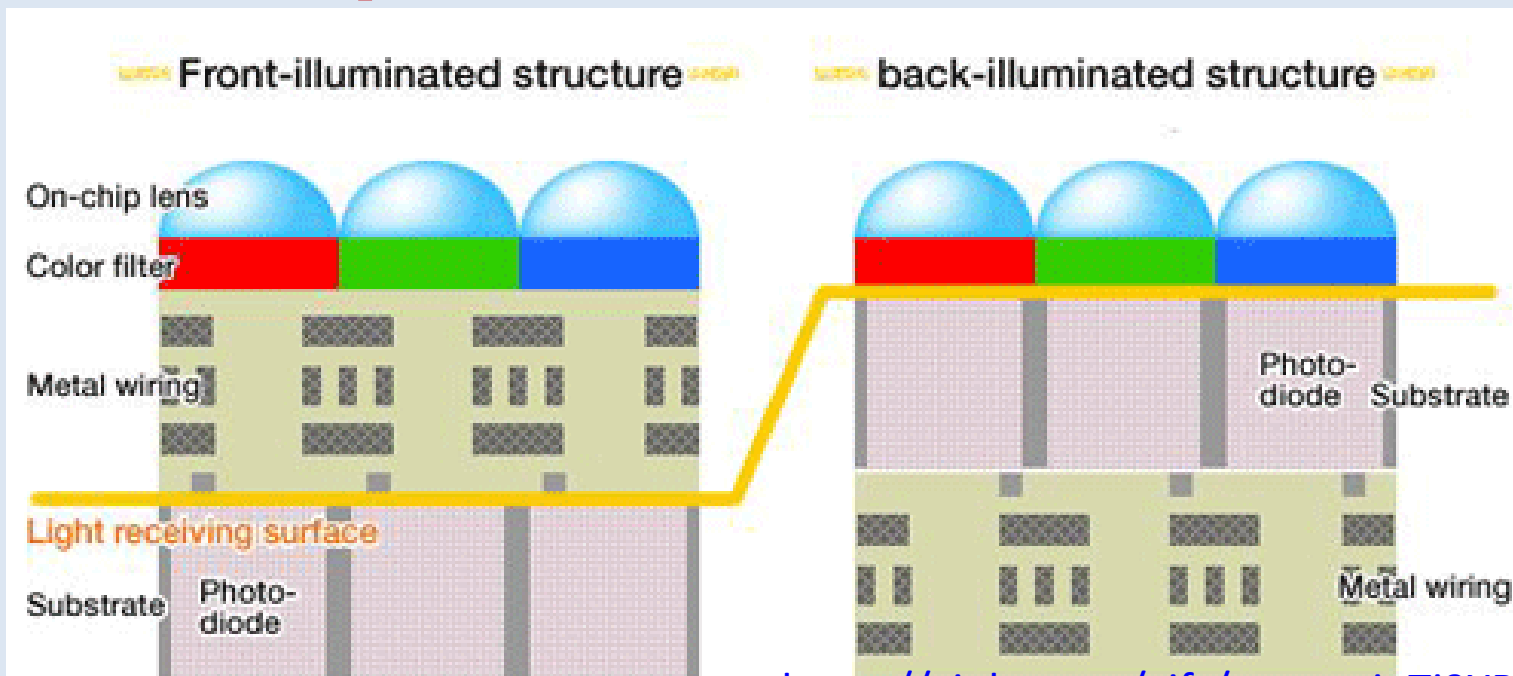
<https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/digitalimaging/cmosimagesensors/>

Bayer Filter Transmission Spectral Profiles

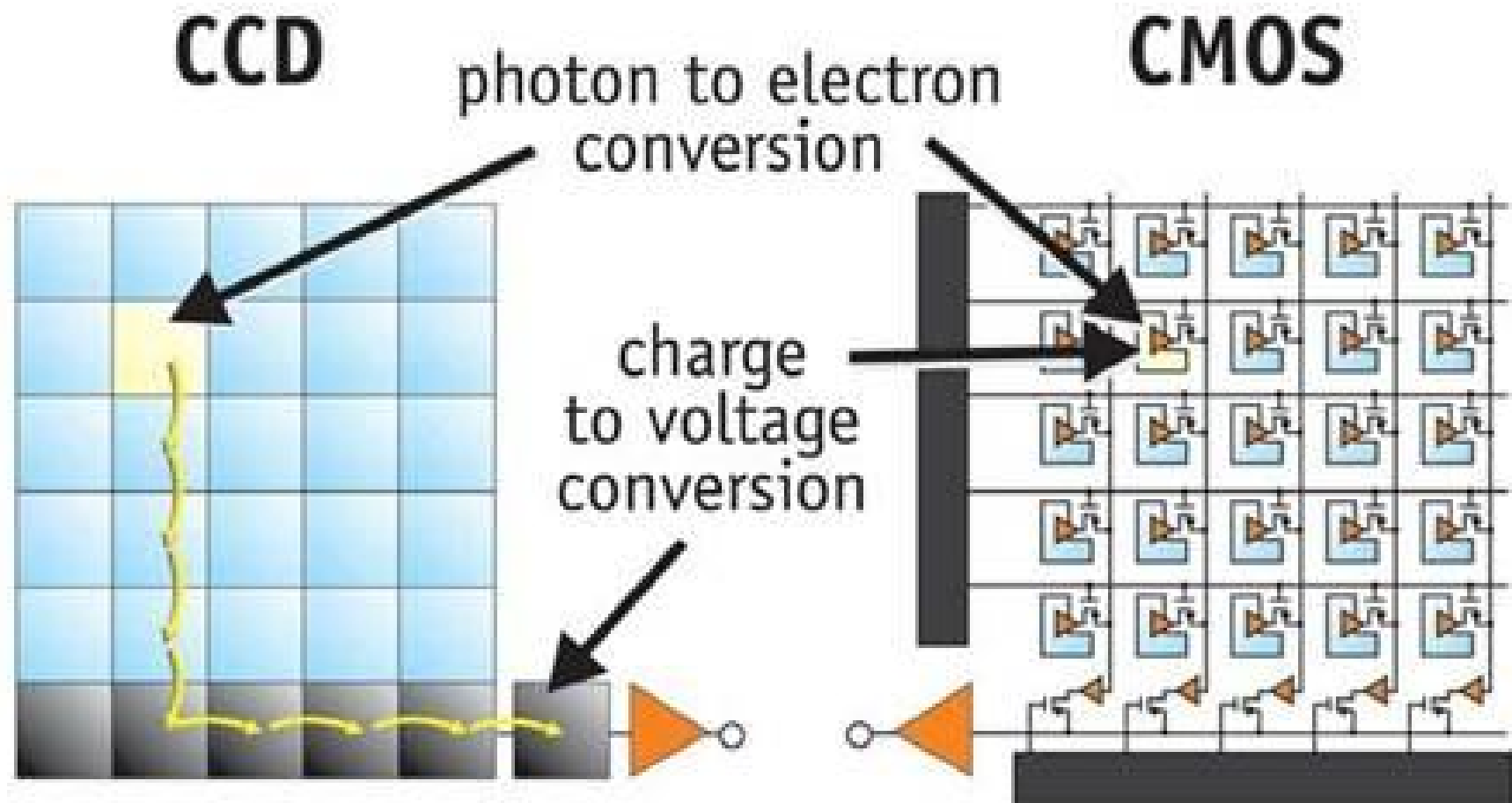


Переваги CMOS-сенсорів:

- Подолано проблему низької світлочутливості (розвиток технологій, 2007-2009 рр., Sony, EXMOR, Backlight illumination).
- Можливості об'єднання на одному кристалі аналогової, цифрової та розрахункової частин.
- Низьке енергоспоживання в статичному стані.
- За допомогою механізму довільного доступу можна виконувати зчитування обраних груп пікселів (кадроване зчитування).
- В додаток до підсилювача всередині пікселя, підсилювальні схеми можуть бути розміщені в будь-якому місці на шляху проходження сигналу.
- Дешевизна та мініатюризація.

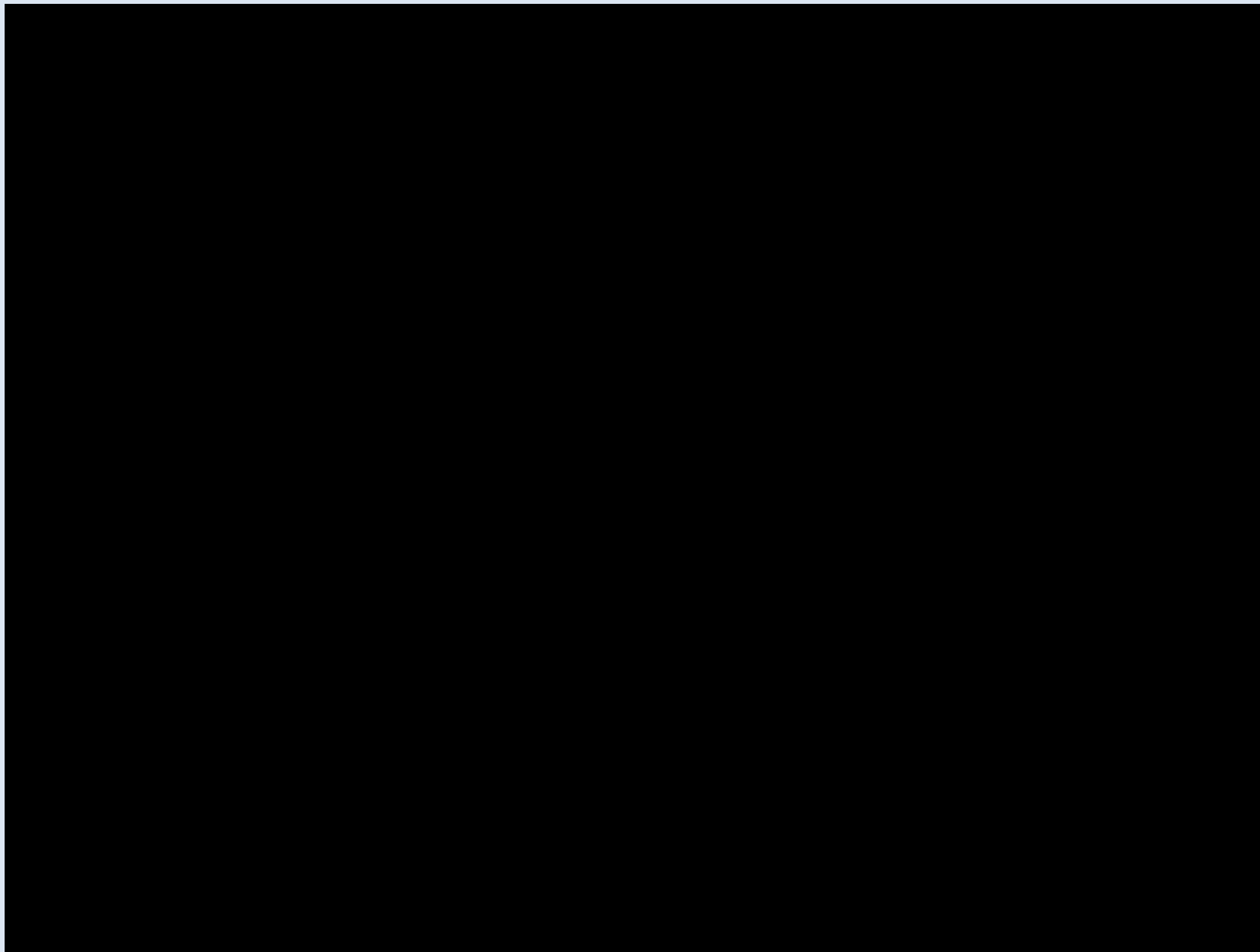


<https://giphy.com/gifs/sensor-jpTi9YRNVKslW>

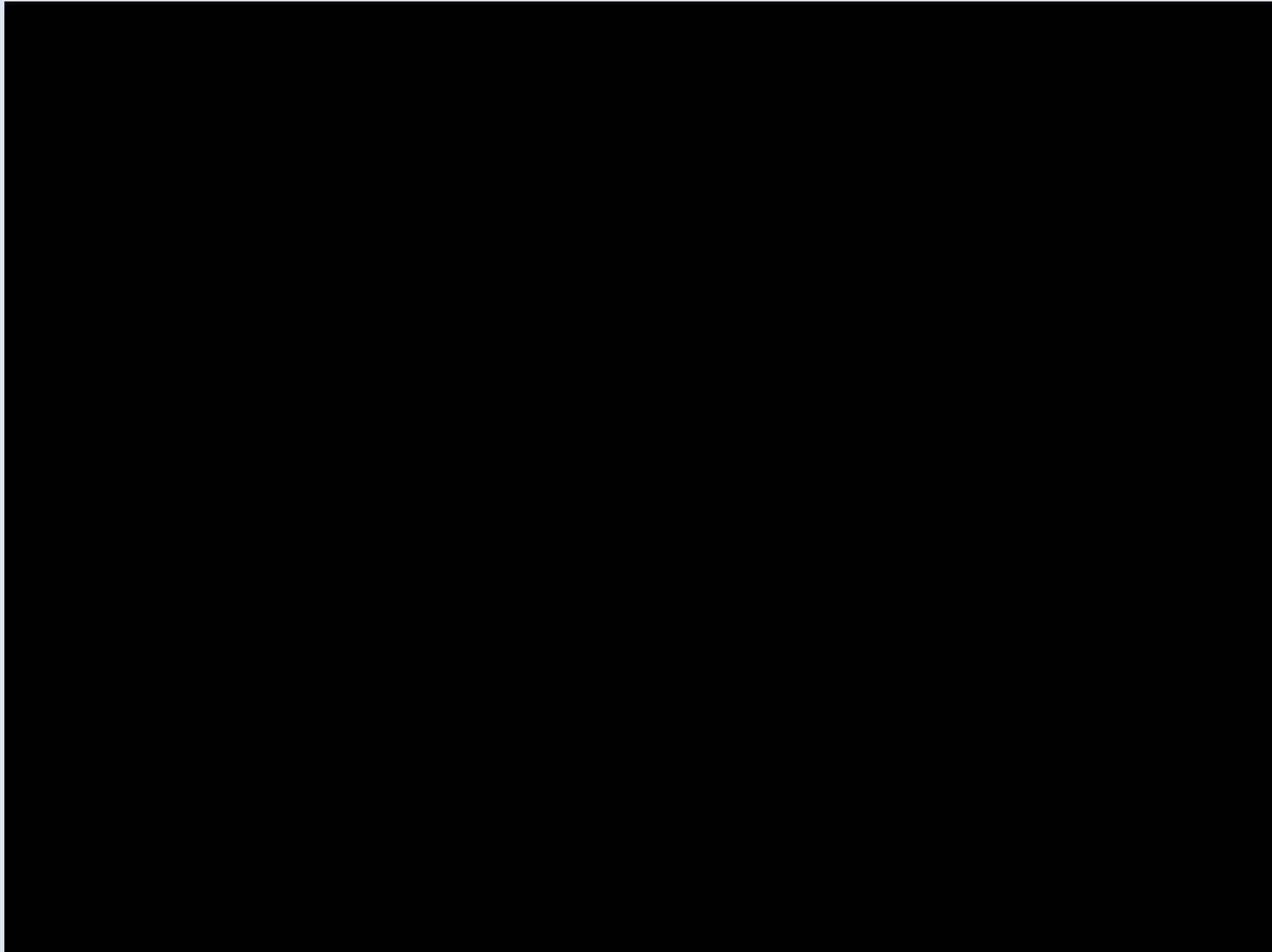


http://meroli.web.cern.ch/lecture_cmos_vs_ccd_pixel_sensor.html

Як працює CMOS-матриця



Raymond Siri <https://vimeo.com/103279734>

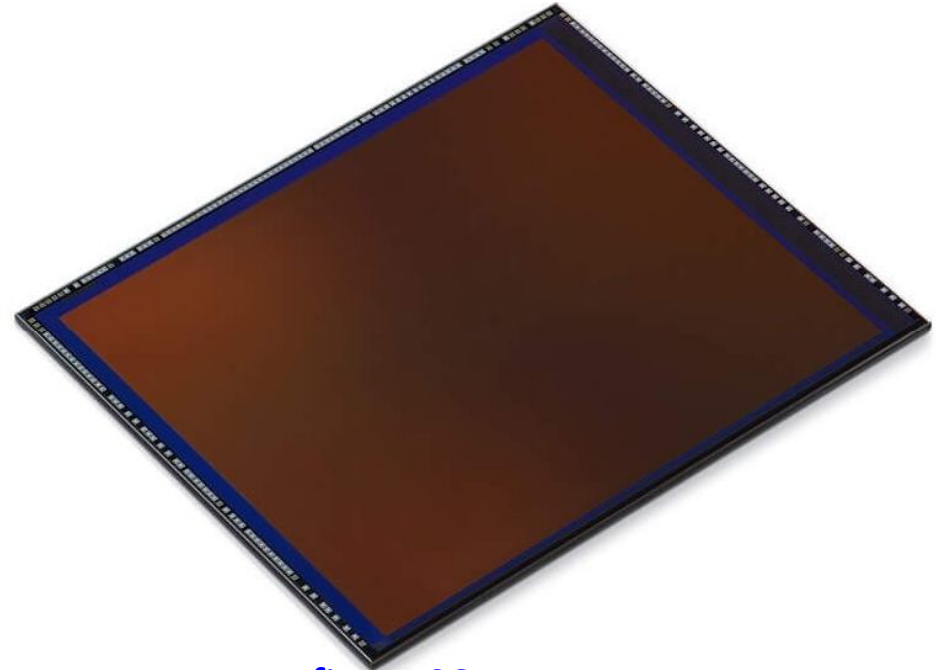
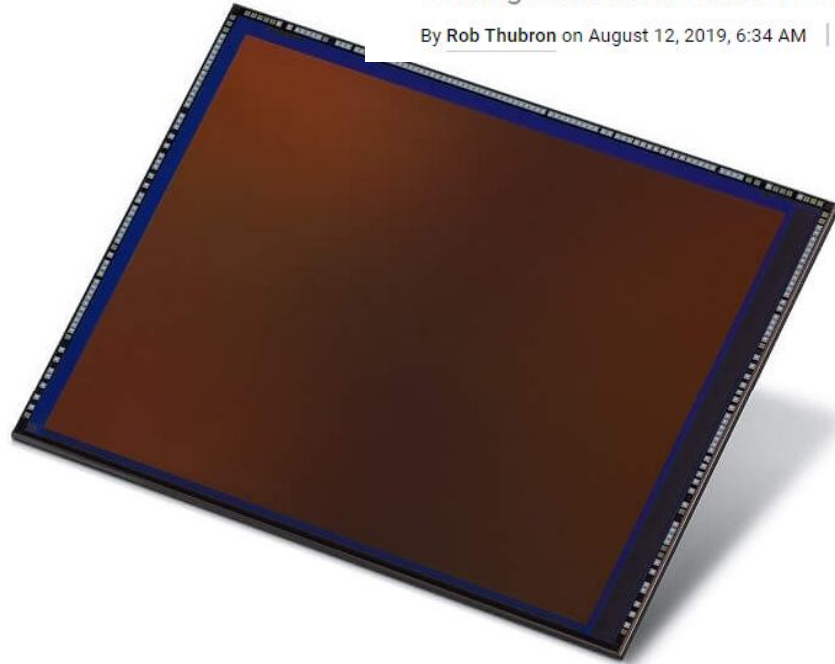


https://www.youtube.com/watch?time_continue=45&v=sj-YDRfCBig

Samsung announces the first 108MP camera sensor designed for smartphones

Coming to a Xiaomi handset soon

By Rob Thubron on August 12, 2019, 6:34 AM | [7 comments](#)



<https://www.techspot.com/news/81394-samsung-announces-first-108mp-camera-sensor-designed-smartphones.html>

Samsung Electronics, a world leader in advanced semiconductor technology, today introduced **108 megapixel** (Mp) **Samsung ISOCELL Bright HMX**, the first mobile image sensor in the industry to go beyond 100 million pixels. With the latest addition, Samsung will expand its 0.8 μ m image sensor offerings from its recently announced ultra-high 64Mp to 108Mp

<https://www.techspot.com/news/81394-samsung-announces-first-108mp-camera-sensor-designed-smartphones.html>



The new 1/1.33-inch sensor is another to utilize pixel-merging Tetracell technology, which merges four pixels into one, allowing it to take 27MP photos in low-light environments. It also uses smart ISO technology and can record lossless 6K video (6,016 x 3,384) at 30fps.

Samsung says it worked in close collaboration with **Xiaomi** during the development of the sensor, adding that mass production will begin later this month. The Chinese company last week announced that it would be releasing a 108MP phone, possibly the Mi Mix 4 or the Mi 10.



<http://www.levenhuk.ua/products/levenhuk-microscope-dtx-90/>



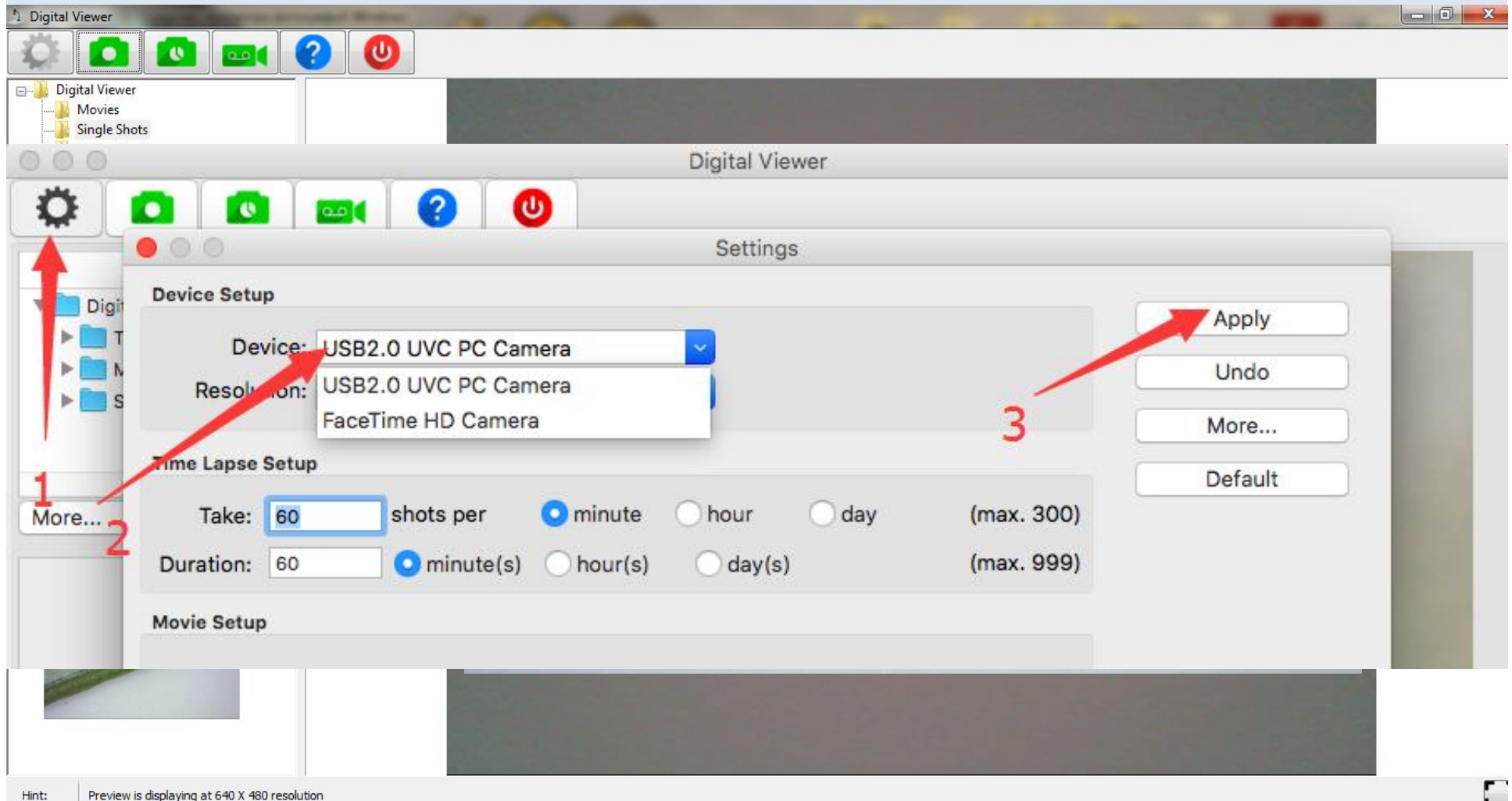
Levenhuk DTX 90

<http://www.levenhuk.ua/products/levenhuk-microscope-dtx-90/>

Тип мікроскопа	цифрові
Тип насадки	цифровий дисплей / монітор ПК
матеріал оптики	оптичне скло
Збільшення, крат	10-300
фокусування	ручна, в межах від 0 мм до 150 мм
підсвічування	світлодіодна
регулювання яскравості	є
Джерело живлення	5 В постійного струму через кабель USB 2.0
число мегапікселів	5
Можливість запису відео	є
ПО, драйвери	ПО для захоплення і редагування фото і відео, з функцією вимірювання об'єктів
вихід	USB 2.0
Системні вимоги	ОС Windows XP / Vista / 7/8/10, Mac 10.6 ~ 10.10, ЦПУ від P4 1,8 ГГц, ОЗУ від 512 МБ, відеокарта від 64 МБ, роз'єм USB 2.0, CD-ROM
корпус	прогумований чорний
Для оператора	для початківців
фото	* .Jpeg, 2592x1944, 2320x1744, 2048x1536, 1920x1080, 1280x1024
Відео	* .Avi, 2592x1944, 2320x1744, 2048x1536, 1920x1080, 1280x1024
Розташування підсвічування	верхня

PLUGABLE DIGITAL VIEWER

<https://plugable.com/drivers/microscope/>



Micro Capture Pro Software

<https://www.celestron.com/pages/drivers-and-software>



Використані ресурси:

- Шендеровський В. Нелегкий шлях повернення великого українця // Нехай не гасне світ науки / В. Шендеровський; за ред. Е. Бабчук. — К., 2004. — С. 294—300.
- <http://www.levenhuk.ua/>
- **Introduction to CMOS Image Sensors** <https://www.olympus-lifescience.com/en/microscope-resource/primer/digitalimaging/cmosimagesensors/>
- http://meroli.web.cern.ch/lecture_cmos_vs_ccd_pixel_sensor.html
- <https://www.nasa.gov/>
- <https://plugable.com/drivers/microscope/>
- <https://www.celestron.com/pages/drivers-and-software>
- <https://www.techspot.com/news/81394-samsung-announces-first-108mp-camera-sensor-designed-smartphones.html>

Дякую за увагу!

