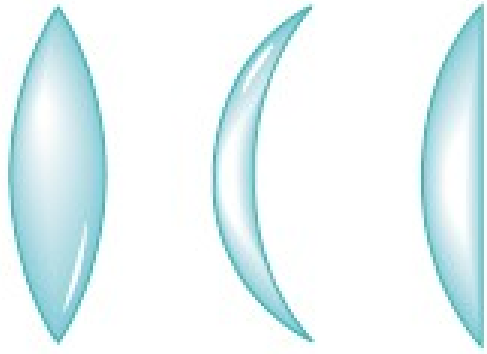


**Що нового в SI, або
внесок Смакули в
розвиток фізики
кристалів та метрології**

*Юрій Скоренький
афедра фізики Тернопільського
національного технічного університету
імені Івана Пулюя*



(a)



Anti-reflective coatings





anti reflective coating



Пошук

Приблизна кількість результатів:
9 240 000 (0,37 сек.)

[Розширений пошу](#)

 Усе
 Більше

[AR Coating Measurement](#)

Рекламні посилання

www.filmetrics.com In seconds measure **AR**
thickness, reflectance, and transmittance.



Alexander Smakula



По

Приблизна кількість результатів:
8 630 (0,31 сек.)

[Розширений](#)

 Усе
 Більше

Порада. [Шукайте результати вибраною мовою:](#)
в меню [Налаштування](#)

Інтернет

[Сторінки українською мовою](#)

[Сторінки з такої країни: Україна](#)

[Alexander Smakula - Wikipedia, the free encyclopedia](#) - [[Перекласти цю сторінку](#)]

Alexander Smakula (Ukrainian: Олександр Теодор Теодорович Смакула) (1900, Dobrovody, Austria-
en.wikipedia.org/wiki/Alexander_Smakula - Кеш -

NONREFLECTING FILMS

1.17

In optical instruments like compound microscopes, cameras, and telescopes, a large number of lenses are employed. When light enters the optical system, about 4% of the incident light is lost in single reflection. The loss is even more for multiple reflections. In a microscope composed of four lenses, 30% of the incident light is reflected under intensity conditions, these losses are undesirable. Therefore, the loss of light due to reflection from an optical surface. To achieve this result, a thin film having a proper thickness is deposited on the glass surface. This film is known as an antireflection film, discovered by the German scientist Alexander Smakula.

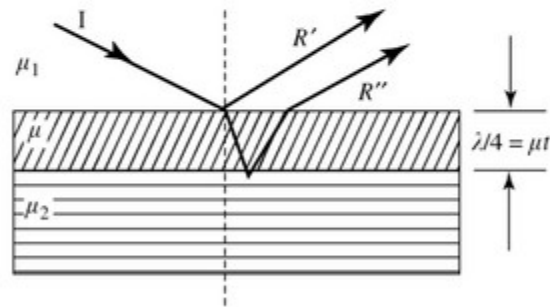


Fig. 1.21 Antireflection coating

For $\mu_1 = 1$ (air medium), $\mu_2 = 1.5$ (glass medium),

$$\frac{I_R}{I} = \left(\frac{1.5 - 1}{1.5 + 1} \right)^2 = 4\%$$

Therefore, 4% of the light intensity is wasted in reflection and 96% of the intensity gets transmitted.

MgF_2 (magnesium fluoride) is an appropriate material for coating. Its refractive index is 1.38, which lies between the refractive index of air and glass. If λ is the wavelength of light used and μ is the refractive index

To understand this fact, let us consider a ray of light incident normally on a glass surface having refractive index μ_2 (Fig. 1.21). If the intensity of the incident light is I and the reflected light is I_R , then according to the law of conservation of energy, that relates the two intensities, we have

$$I = I_R + I_T$$

$$\frac{I_R}{I} = \left(\frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2 + \mu_1} \right)^2$$

Tata McGraw-Hill

Published by Tata McGraw Hill Education Private Limited,
7 West Patel Nagar, New Delhi 110 008

Engineering Physics, 1e

Copyright © 2010, by Tata McGraw Hill Education Private Limited

(1.65)

http://www.zeiss.de/

Contact | Ev



We make it visible.

Search



ne

productfinder



ublisher

Corporate Information

Home

News

Our Solutions

Products

Press Forum

quality of the company's binoculars. In 1935, the Zeiss employee Alexander Smakula (1900–1983) invented the antireflective T-star coating (Carl Zeiss T*®) used to reduce the reflections on glass-to-air surfaces. In this way, the transmission of the binoculars was increased by an astounding 50 %.

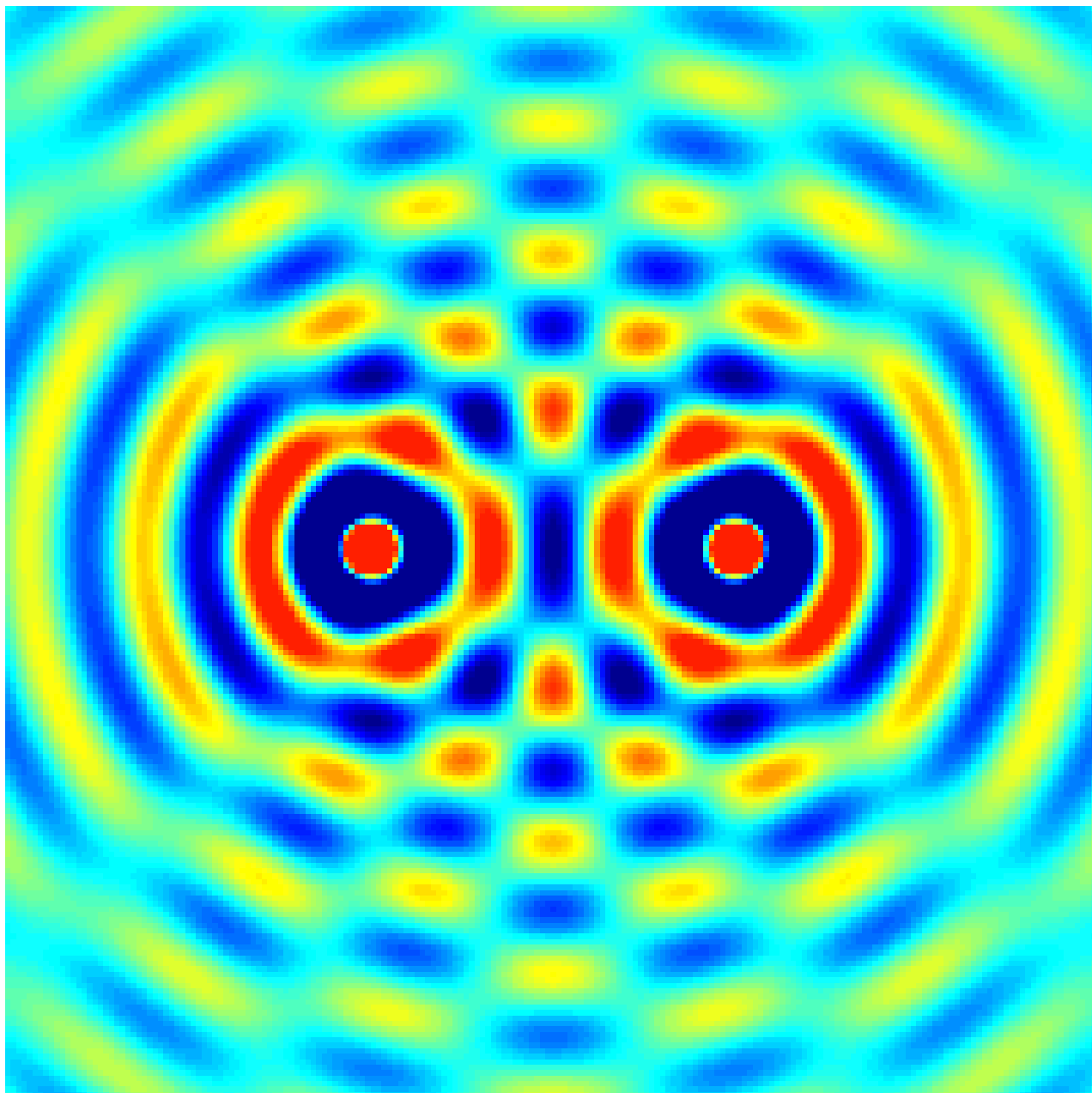
You can find the many other improvements and inventions which have made Carl Zeiss an innovative market leader for many decades under
→ [The History of Binoculars at Carl Zeiss.](#)

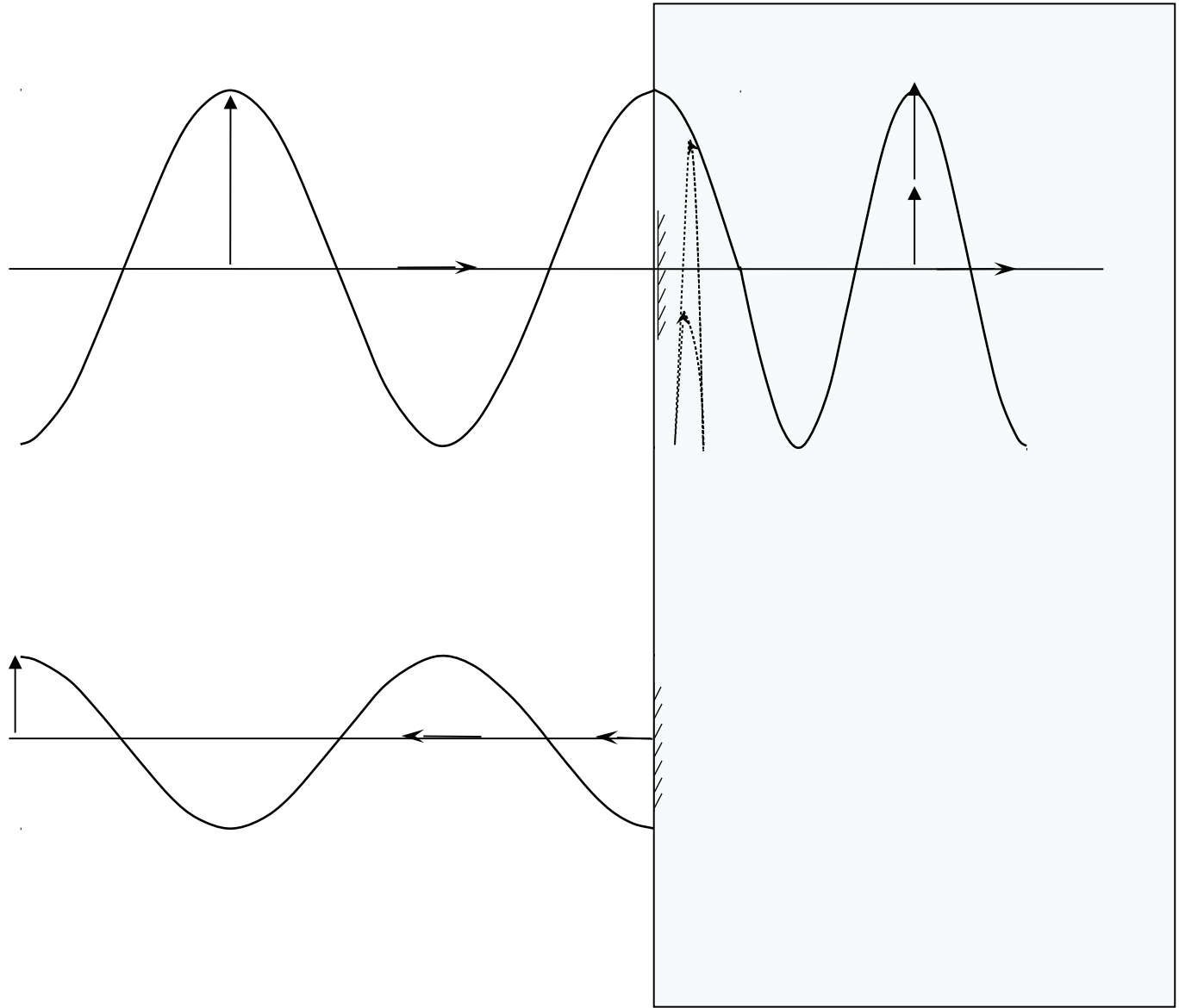


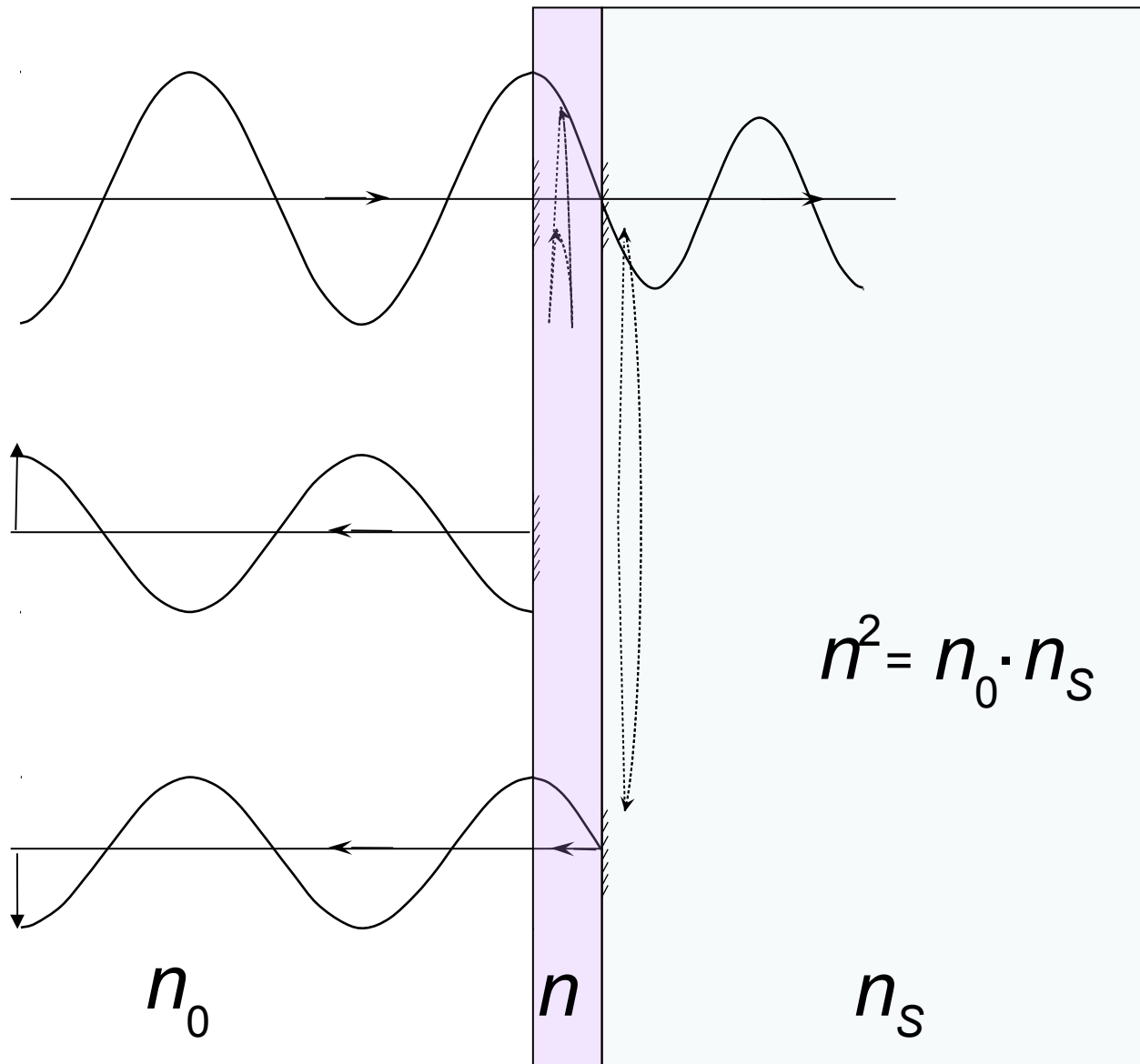
Eye piece

*Porro
prisms*







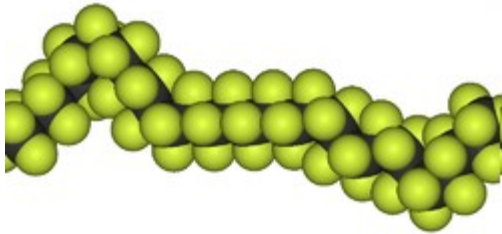


Коефіцієнт відбивання

$$R = \left(\frac{n_0 - n_S}{n_0 + n_S} \right)^2$$

J.S. Rayleigh Proc. London Math. Soc.,
11 (1879) pp. 51-56

фторполімери



silsesquioxane resin

крон $n_0=1,52$

MgF_2 $n_S=1,38$



polyvinylfluoride



polyvinylidene fluoride



polytetrafluoroethylene

$(\text{PhSiO})_{m-1}(\text{OH})_m(\text{HSiO})_{n-1}(\text{OH})_n(\text{MeSiO})_{p-1}(\text{OH})_p$



Espacenet

Patent search

Deutsch English

Change c

DE685767 (C)
Bibliographic data
Description
Claims
Mosaics
Original document
Cited documents
Citing documents
INPADOC legal status
INPADOC patent family

Quick help —

- [What is meant by high quality text as facsimile?](#)
- [What does A1, A2, A3 and B stand for after a European publication number?](#)
- [What happens if I click on "In my patents list"?](#)

Bibliographic data: DE685767 (C) — 1939-12-23

★ In my patents list [📄! Report data error](#)

Verfahren zur Erhoehung der Lichtdurchlaessigkeit optischer Teile durch Erniedrigungdes Brechungsexponenten an den Grenzflaechen dieser optischen Teile

Page bookmark [DE685767 \(C\) - Verfahren zur Erhoehung der Lichtdurchlaessigkeit optischer Teile durch Erniedrigungdes Brechungsexponenten an den Grenzflaechen dieser optischen Teile](#)

Inventor(s):

Applicant(s): ZEISS CARL FA ±

Classification: - international: [G02B1/113](#)
- cooperative: [G02B1/113](#)

Application number: DE1935Z022836D 19351101

Priority number(s): DE1935Z022836D 19351101



Bibliothek
Carl Zeiss Jena

18 JAN 1940

DEUTSCHES REICH



AUSGEBEN AM
23. DEZEMBER 1939

REICHSPATENTAMT
PATENTSCHRIFT

Nr 685 767

KLASSE 42h GRUPPE 1e1

Z 22836 IX a/42 h

Firma Carl Zeiss in Jena

Verfahren zur Erhöhung der Lichtdurchlässigkeit optischer Teile durch Erniedrigung des Brechungs-exponenten an den Grenzflächen dieser optischen Teile

Patentiert im Deutschen Reiche vom 1. November 1935 ab
Patenterteilung bekanntgemacht am 30. November 1939

An jeder Grenze zwischen zwei Medien, deren Brechungs-exponenten verschieden sind, tritt eine Reflexion des Lichtes auf. Das vom ersten in das zweite Medium einfallende Licht wird hierbei in einen das zweite Medium durchsetzenden und in einen an der Grenzfläche der beiden Medien reflektierten Anteil aufgespalten. Das Verhältnis des reflektierten Lichtes zum gesamten einfallenden Licht T nennt man den Reflexionsfaktor R . Das durchgelassene Licht ist dann

$$T_r = T \cdot (1 - R). \quad (1)$$

Um die Schwächung des einfallenden Lichtstromes um den reflektierten Lichtanteil möglichst zu verringern, um die Differenz $1 - R$ nicht zu klein werden zu lassen, sollte also der reflektierte Lichtanteil R so klein wie möglich sein. Bei senkrechtem Strahleneinfall, bei welchem unter sonst gleichen Bedingungen der Reflexionsfaktor ein Minimum erreicht, gilt für R die Formel von Fresnel:

$$R = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (2)$$

worin n der Brechungs-exponent des dichteren Mediums ist. Diese Formel gilt sowohl für den Strahlengang aus Luft (oder Vakuum) in das dichtere Medium als auch für den umgekehrten Strahlenverlauf.

Da nun Reflexion nicht nur an der Vorderfläche, sondern mit dem gleichen Betrag auch an der Rückfläche jeder Linse eintritt, da ferner kompliziertere optische Instrumente oft aus einer großen Zahl reflektierender Einzelteile zusammengesetzt sind, kann die durch Reflexion verursachte Schwächung des einfallenden Lichtstromes beträchtliche Werte erreichen und mehr als 50% betragen. Abgesehen von der Schwächung des einfallenden Lichtes um den Betrag des reflektierten Lichtes kann dieses reflektierte Licht aber auch unerwünschtes Licht zum regulären Strahlenverlauf des Instrumentes hinzubringen. In photographischen Apparaten kann z. B. das reflektierte und wieder zurückreflektierte Licht Verschleierungen des Negativs verursachen.

Taylor, britische Patentschrift 29 561, 1904, hat nun, veranlaßt durch die zufällige Beobachtung an alten Linsen mit teilweise verwitterter Oberfläche, welche in der Durchsicht gegen einen hellen Hintergrund an den verwitterten Stellen lichtdurchlässiger erschienen als an den gut erhaltenen Stellen der polierten Flächen, bereits darauf hingewiesen, daß man durch Veränderungen im Material der Oberflächenschicht einer Linse eine erhöhte Lichtdurchlässigkeit erreichen kann, und hat durch Anführung der Fresnelschen

Alexander *Smakula*:

Über die Erhöhung der Lichtstärke optischer Geräte,
in: Zeitschrift für Instrumentenkunde 60 (1940), S. 33-36

(Про збільшення сили світла в оптичних приладах)

SMAKULA, A.: Über die Reflexionsverminderung an
Grenzflächen zwischen durchsichtigen Körpern.
Glastechn. Ber. 19, 377-386 (1941).

ZEISS C Sonnar T* 50mm f/1.5 ZM Lens

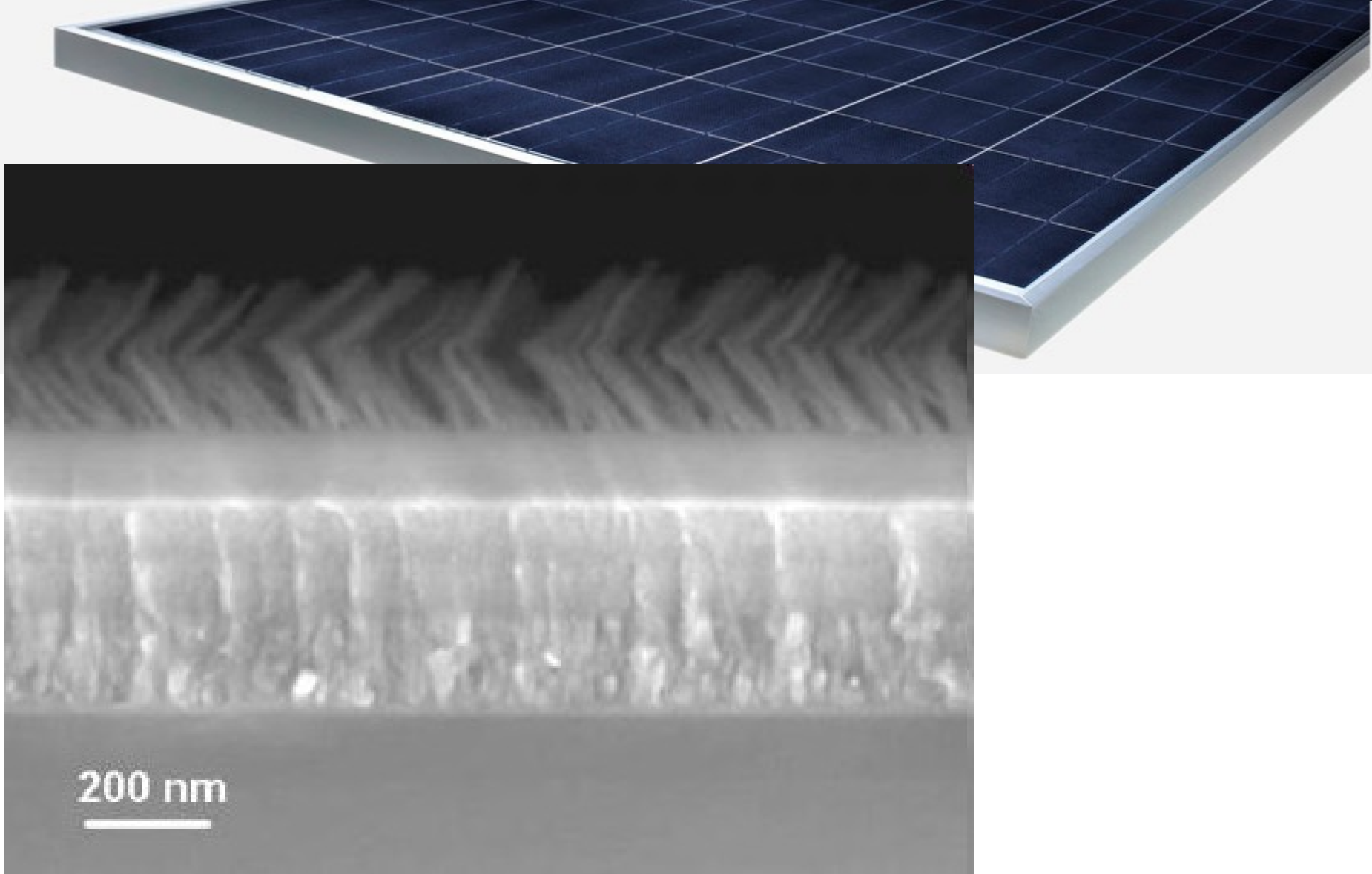


Leica M-Mount Lens
Aperture Range: f/1.5 to f/16
ZEISS T* Anti-Reflective Coating
Manual Focus Design

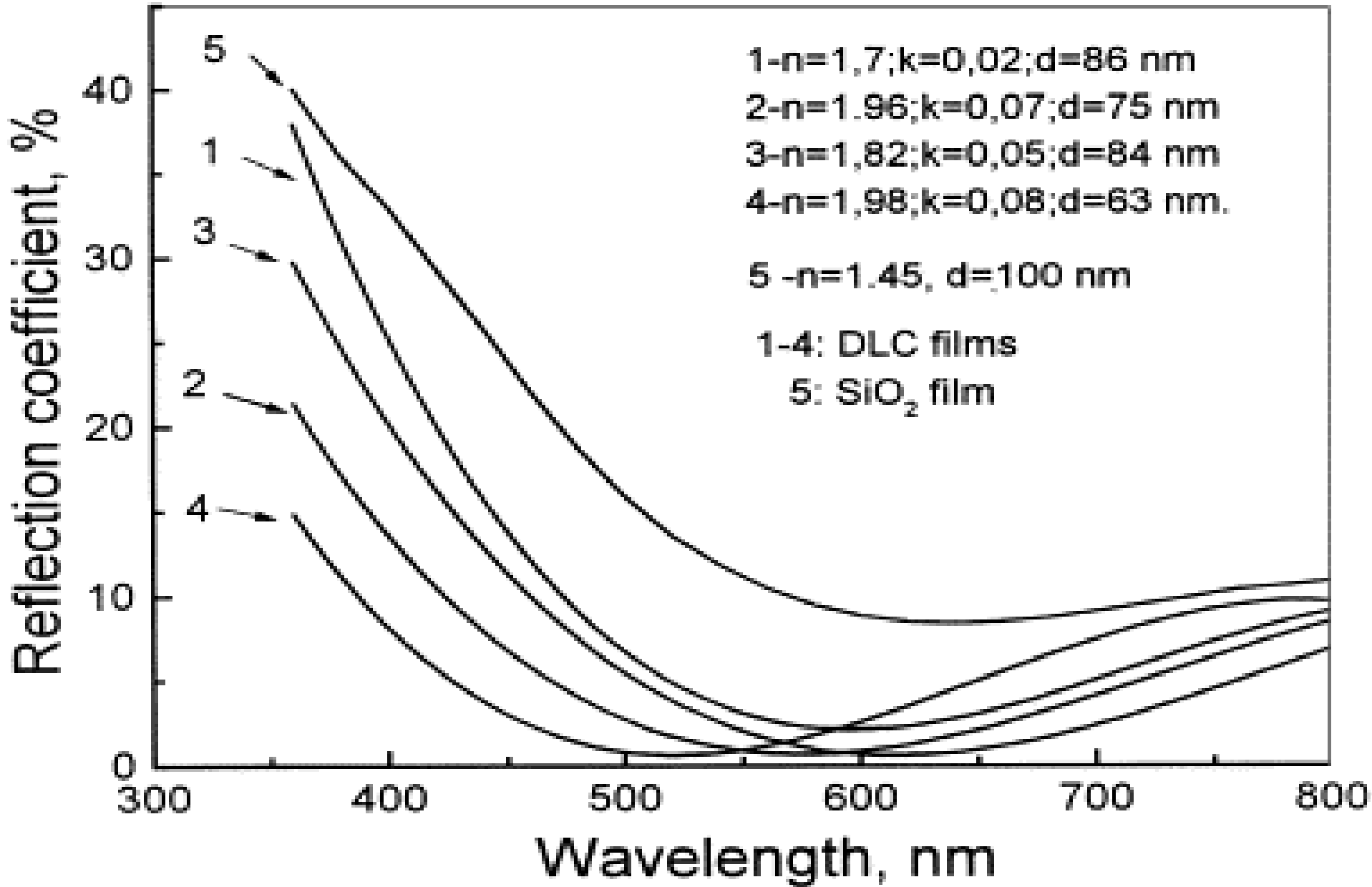
You Pay: **\$1,261.00**



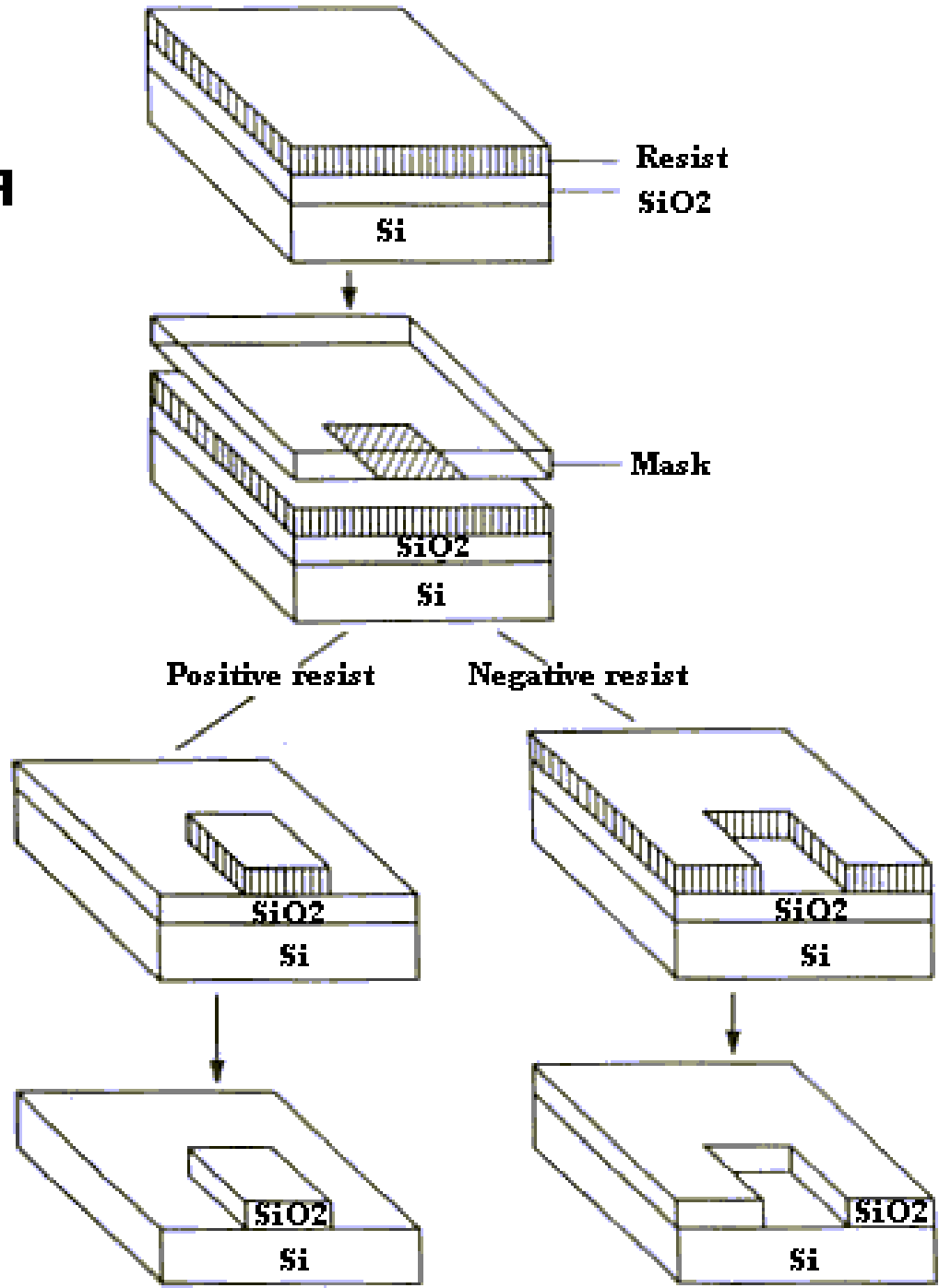
[www.bhphotovideo.com/c/product/446177-EG/
Zeiss_1407_067_50mm_f_1_5_ZM_Lens.html](http://www.bhphotovideo.com/c/product/446177-EG/Zeiss_1407_067_50mm_f_1_5_ZM_Lens.html)



increasing the cell efficiency by 0.5 percent to 0.75 percent



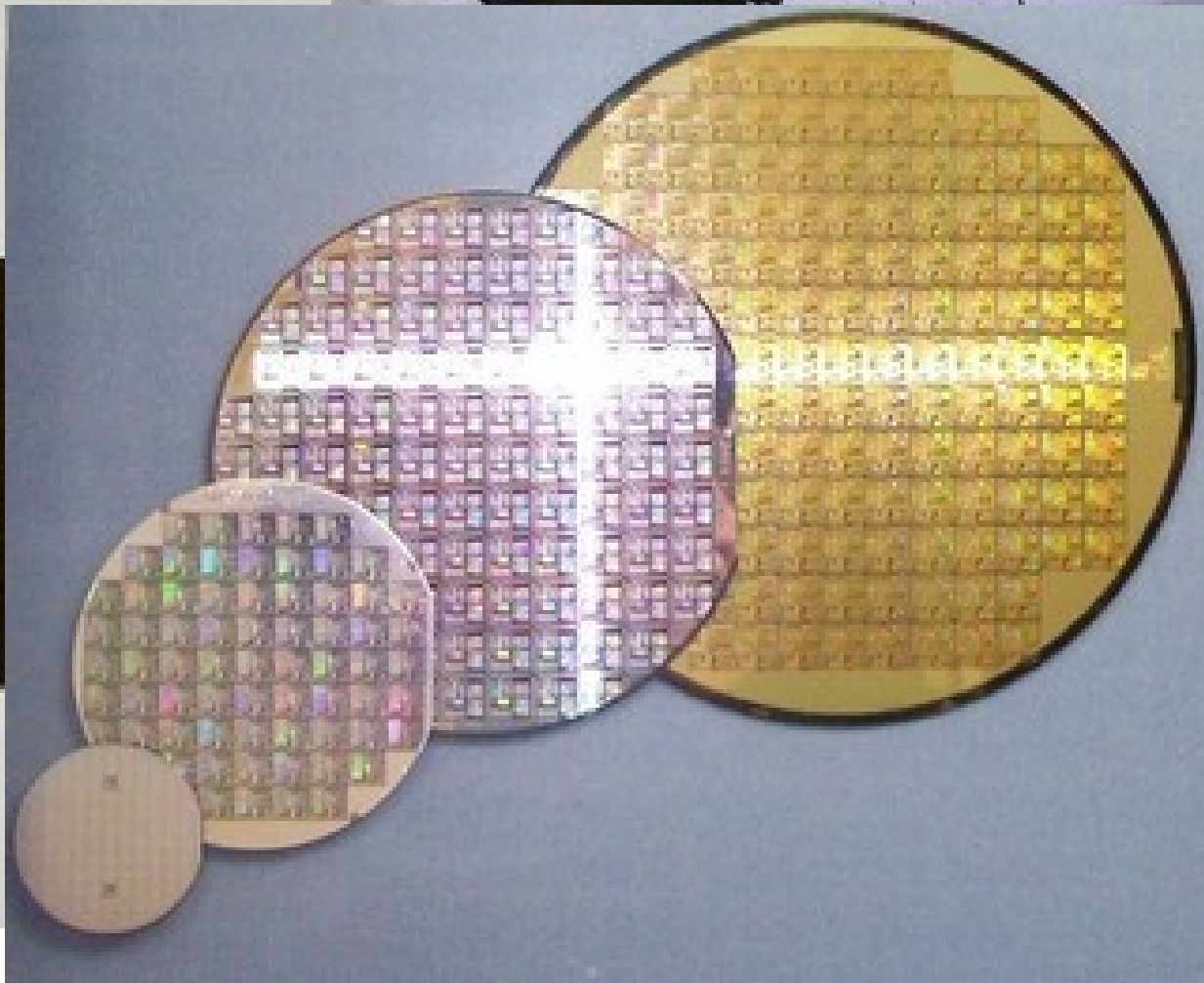
Фотолітографія





commons.wikimedia.org/wiki/File:Single_crystal_silicon_boule.jpg

www.laborpraxis.vogel.de/index.cfm?pid=10703&pk=227222&type=article&fk=200217



<http://www.addisonengineering.com/about-wafers.html>

Magnesium fluoride

From Wikipedia, the free encyclopedia

Magnesium fluoride is an [inorganic compound](#) with the [formula](#) MgF_2 . The compound is a white crystalline [salt](#) and is transparent over a wide range of [wavelengths](#), with commercial uses in [optics](#) that are also used in [space telescopes](#). It occurs naturally as the rare mineral [sellaite](#).

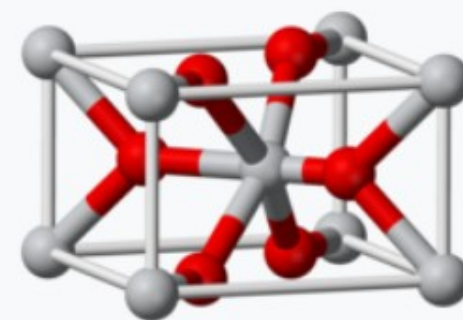
Contents [\[hide\]](#)

- 1 [Production and structure](#)
- 2 [Uses](#)
 - 2.1 [Optics](#)
- 3 [Safety](#)
- 4 [References](#)
- 5 [External links](#)

Production and structure [\[edit\]](#)

Magnesium fluoride is prepared from [magnesium oxide](#) with sources of hydrogen fluoride such as [ammonium bifluoride](#):

Magnesium fluoride^[1]



Names

Other names

[Sellaite](#)

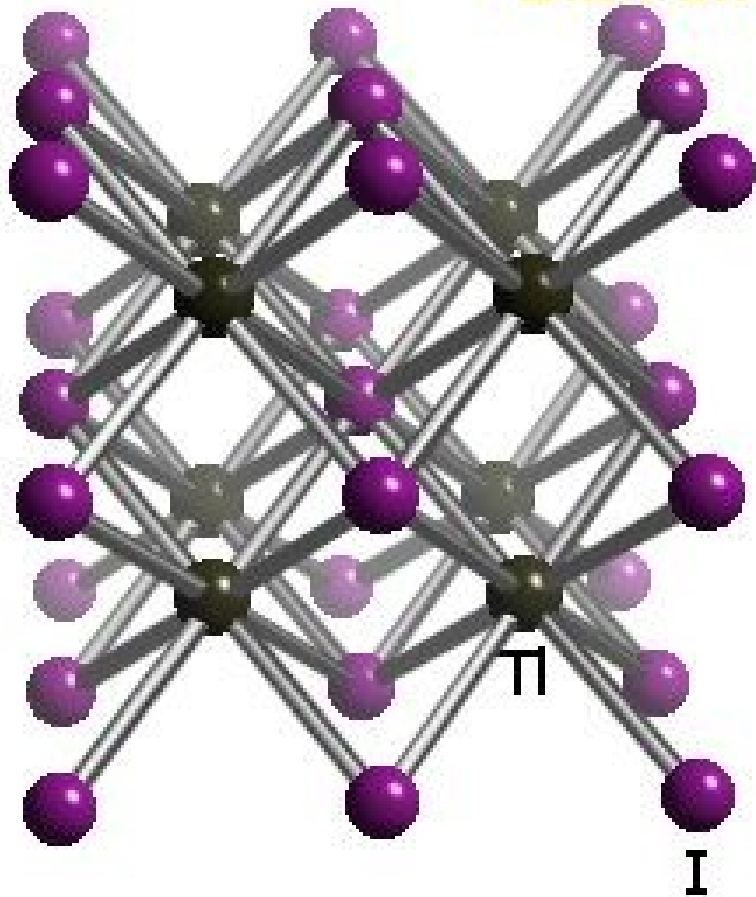
[Irtran-1](#)

Identifiers

CAS Number	7783-40-6 [i] [v]
3D model (JSmol)	Interactive image [i]
ChemSpider	22952 [i] [v]

KRS-5 Thallium Bromide-Iodide

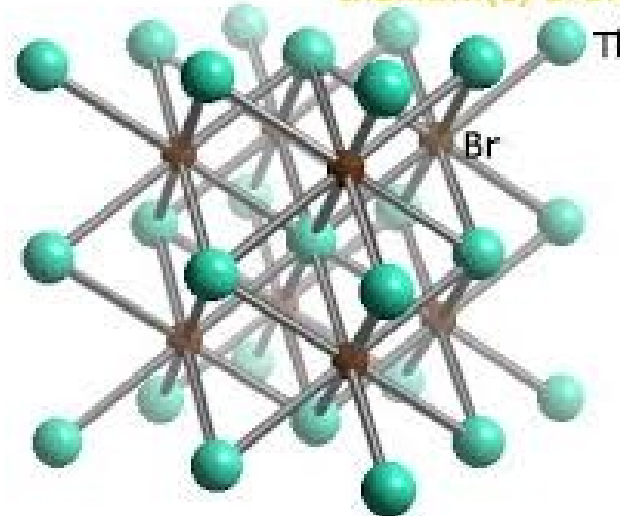
thallium(I) iodide



www.webelements.com/compounds/thallium

(TlBr-TlI)

thallium(I) bromide



www.knightoptical.com

Kristallverwerfungen können werden. Die Berührungsebenen und die Neigungswinkel. In Kristallen von großen Verwerfungen können leicht nachgewiesen werden (Al).

Die bisher genannten würden auch dann auftreten

die Bindung ist, um so kleiner der Radius. Auffallend ist, daß der Unterschied zwischen der (S. 25 näher behandelten) metallischen und der kovalenten Bindung verhältnismäßig klein ist. Außerdem ändert sich der Atomradius mit der Zahl der nächsten Nachbarn in gleichem Abstand (Koordinationszahl $K. Z.$) und zwar nimmt er annähernd ab beim Übergang von³

$K. Z. 12$ zu $K. Z. 8$	um	3%
$K. Z. 12$ zu $K. Z. 6$	um	4%
$K. Z. 12$ zu $K. Z. 4$	um	12%

2.11 Atomradien der van der Waalsschen Bindung

Da die VAN DER WAALSSchen Kräfte sehr schwach sind (rund 1 bis 10% der elektrostatischen Kräfte), sind die Radien verhältnismäßig groß und außerdem stark von den Bindungspartnern abhängig. Die VAN DER WAALSSchen Radien treten in den Gittern der Edelgase und in Molekulkristallen (bei denen Moleküle als Kristallbausteine betrachtet werden

Tabelle 1. *Atomradien für van der Waalssche Bindung in Angström.* (Nach LAVES)

Atom-No.	Symbol	Radius	Temperatur °K
----------	--------	--------	------------------



Abb. 1. N

aufgeb
unrein
Che
einneh
meist
nach
in dies
der K
Wert



, Skrifter
5.

iversity

³ SMAKULA, A. und M. W. KLEIN: J. Opt. Soc. Am. 40, 148 (1950).

Technische Physik in Einzeldarst

Herausgegeben von W. Meissner und M. N

Einkristalle

Von

A. Smakula



Springer-Verlag / Berlin · Göttingen · H

J. F. Bergmann / München

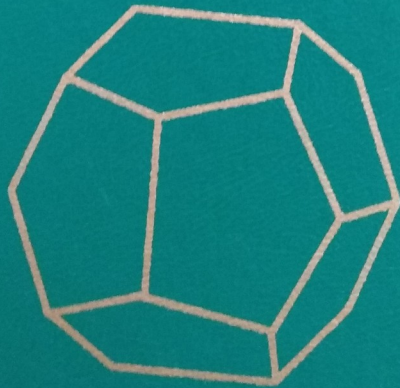
1962

A. Smakula. Einkristalle:
Wachstum, Herstellung und
Anwendung

Tom 14 3 cepii Technische
Physik in Einzeldarstellungen

Олександр
СМАКУЛА

МОНОКРИСТАЛИ



Олександр
СМАКУЛА

МОНОКРИСТАЛИ

вирощування, виготовлення
та застосування

*Переклад з німецької
Надії МЕЛЬНИК і Павла ТРОЦЕНКА*

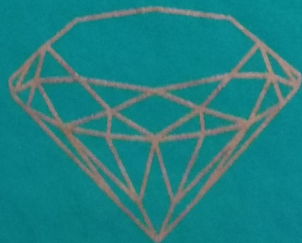
*За редакцією
Володимира КОЗИРСЬКОГО
і
Василя ШЕНДЕРОВСЬКОГО*

Київ
Видавництво «Рада»
2000

Олександр
СМАКУЛА

НАУКОВІ ПРАЦІ

Том I



Наукове товариство імені Шевченка
Громадське об'єднання "Фонд Олександра Смакули"
Тернопільський державний технічний університет
імені І. Пулюя

Олександр
СМАКУЛА

НАУКОВІ ПРАЦІ

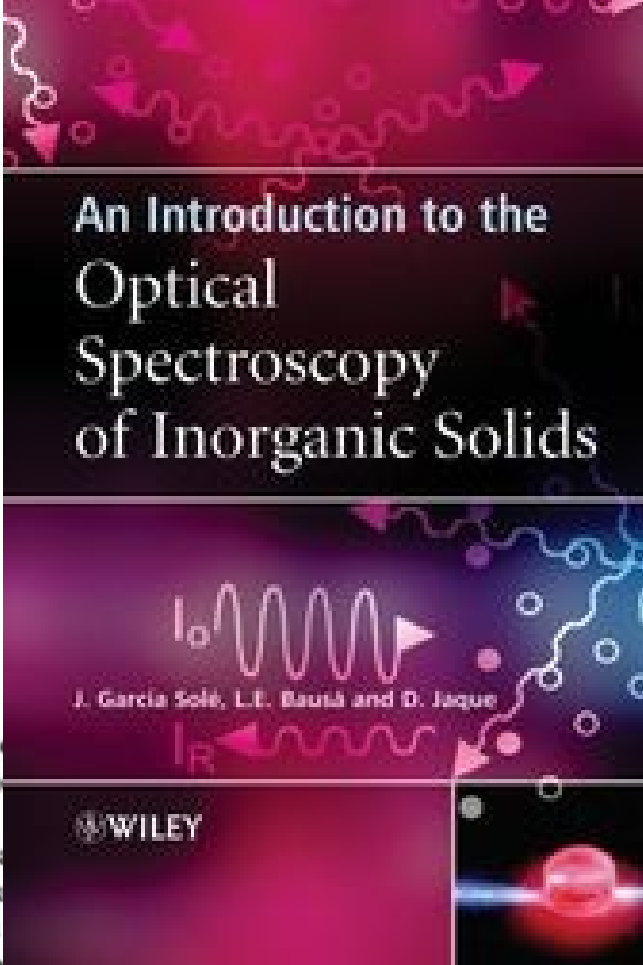
Том I

Тернопіль
2000

ЗМІСТ

ОЛЕКСАНДЕР СМАКУЛА І ЙОГО НАУКОВА СПАДЩИНА	4
I. ФІЗИКА ЦЕНТРІВ ЗАБАРВЛЕННЯ В КРИСТАЛАХ	9
До фосфоризації алькалевих гальоїдів	10
Центри забарвлення у кристалах фтористого кальцію та фтористого барію	15
Знебарвлення кристалів CaF ₂ , забарвлених X-променями	17
Центри забарвлення в кристалах фториду кальцію	19
Забарвлення та центри забарвлення у кристалах фториду кальцію	20
Співвідношення для спектра поглинання центрів забарвлення в кубічних кристалах	26
Забарвлення чистих і легуваних кристалів фториду кальцію при 20°C і -190°C	29
Центри забарвлення у фторидах лужно-земельних металів	38
Центри забарвлення в монокристалах галогенідів цезію	45
Вплив температури на центри забарвлення у фторидах лужно-земельних металів	55
Анізотропія центрів забарвлення у кальциті	59
Центри забарвлення в змішаних лужногалоїдних кристалах	64
II. ВПЛИВ ДЕФЕКТІВ ТА ДОМІШОК НА ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ І ТОНКИХ ПЛІВОК	73
Деякі спектри поглинання лужногалоїдних фосфорів зі сріблом та міддю як активаційними металами	74
Про вплив домішкових йонів на фотохімічні процеси у лужногалоїдних кристалах	82
Недосконалості монокристалів германію	85
Домішки кисню в монокристалах кремнію	86
Дефекти у змішаних кристалах KCl - KBr	92
Дефекти в йонних кристалах	96
Деякі фізичні властивості майже досконалого природного алмазу	103
III. ОПТИЧНІ МАТЕРІАЛИ. ПРОСВІТЛЕННЯ ОПТИКИ	105
Спосіб підвищення пропускання світла оптичними елементами за рахунок зменшення відбивної здатності на межах розділу цих оптичних елементів	106
Про підвищення світлосили оптичних приладів	109
Про винайдення способу зменшення відбивання світла	112
Неоднорідність змішаних кристалів галоїдів талію та її усунення	117
Роздільна здатність призм, виготовлених з однорідних кристалів бромйодиду талію	123
Вплив структури на оптичні властивості кристалів	124
Синтетичні кристали і поляризаційні матеріали	125
Оптичні матеріали та їх виготовлення	137
Властивості NiO і CoO та їх змішаних кристалів в інфрачервоній ділянці спектру	144
Інтерпретація зміцнення твердого розчину за допомогою коливальних спектрів	150
IV. ОПТИКО-СПЕКТРАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОРГАНІЧНИХ РЕЧОВИН ТА ВІТАМІНІВ	156
Ультрафіолетове поглинання геометрично ізомерних стильбенів і корисцевих кислот (β -фенілакрилових кислот)	157
Поглинання ультрафіолетового випромінювання та ізомерія малеїнових і фумарових кислот	164
Фотохімічне перетворення транс-стильба	171
Про фізичні методи у хімічній лабораторії. Поглинання світла і хімічна будова речовини	177
Про визначення молекулярної ваги полістиролів	188
Зауваження до роботи О. Смакули: "про визначення молекулярної ваги полістиролів"	193

Світлопоглинання та подвійний зв'язок. I	194
Світлопоглинання та подвійний зв'язок. II	198
Світлопоглинання та подвійний зв'язок. III	202
Світлопоглинання та подвійний зв'язок. IV	206
V. ТЕХНОЛОГІЯ ТА ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ І ТОНКИХ ПЛІВОК	210
Дослідження росту кристалів методом термічного травлення і орієнтованого нарощування	211
Вирощування та вдосконалення монокристалів	216
Вирощування кристалів хлориду цезію з розчину та розплаву	242
Хімічні та фізичні проблеми виготовлення матеріалів	246
Дефекти в кристалах, вирощених з оксидів перехідних металів	248
Автоепітаксiale зародження центрів кристалізації на поверхні йонних кристалів	255
Пластична деформація та кристалічна орієнтація галоїдів талію	258
Вплив обробки на структуру оптичної поверхні пластичних кристалів	267
Дослідження процесу ковзання в йонних кристалах методом призматичного натискування	270
Діелектричні властивості оксиду кобальту, оксиду нікелю та їхніх змішаних кристалів	278
Температурна залежність діелектричної сталої кристалів лужних і талієвих галоїдів	287
Діелектричні властивості лужно-земельних фтористих монокристалів	289
Діелектричні аномалії в монокристалах кремнію	296
Діелектричні властивості галоїдів талію і їхніх змішаних кристалів	299
Діелектричні властивості напівпровідників при низьких температурах	305
VI. ПРАЦІ З МЕТРОЛОГІЇ	314
Точне визначення сталих ґратки за допомогою дифрактометра X-променів з лічильником ґейгера	315
Точне визначення густини великих монокристалів гідростатичним зважуванням	324
Густина та недосконалості монокристалів	328
Нове визначення числа авоґадро за сталою ґратки та густиною монокристалів	334
Високоточне визначення густини твердих тіл	339
Очевидність похибки в атомній вазі германію	345
Високоточне визначення густини природних алмазів	347
VII. НАУКОВО-ПОПУЛЯРНІ СТАТТІ	355
Дещо про атомістичну будову матерії	356
Помір високоти взнесення літаків при помочи бездротного телеграфу	358
Відшукування металевих руд при помочи електро-магнетних хвиль	360
З технічної літератури	364
Нові досягнення при помочи коротких електричних хвиль	365
Помір питомого опору плинного воздуха	368
Земля і радіоактивність	373
Нові вдосконалення динамомашин	375
Антирадіаційний вітамін	380
Атлантийський перелет	382
Рурковий магнет	384
Електричні прояви при влученні	385
Листи до редакції — "нові вдосконалення динамомашин"	386
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК ПРАЦЬ ОЛЕКСАНДРА СМАКУЛИ	391
СПИСОК ПОВНИХ ТА СКОРОЧЕНИХ НАЗВ ВИДАНЬ, ДЕ ПУБЛІКУВАЛИСЬ ПРАЦІ О. СМАКУЛИ	401



An Introduction to the Optical Spectroscopy of Inorganic Solids

An Introduction to the Optical Spectroscopy of Inorganic Solids

J. García Solé, L.E. Bausá and D. Jaque
Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, Spain

5 Optically Active Centers

- | | | |
|-------|---|-----|
| 5.1 | Introduction | |
| 5.2 | Static Interaction | |
| 5.2.1 | Crystalline Field Theory | |
| 5.2.2 | Molecular Orbital Theory | |
| 5.3 | Band Intensities | |
| 5.3.1 | The Absorption Probability | |
| 5.3.2 | Allowed Transitions | |
| 5.3.3 | Polarized Transitions | |
| 5.3.4 | The Probability of Spontaneous Emission | 166 |
| 5.3.5 | The Effect of the Crystal on the Transition Probabilities | 167 |
| 5.3.6 | Oscillator Strength: Smakula's Formula | 168 |
| 5.4 | Dynamic Interaction: The Configurational Coordinate Diagram | 170 |
| 5.5 | Band Shape: The Huang–Rhys Coupling Parameter | 175 |
| 5.6 | Nonradiative Transitions | 181 |
| 5.6.1 | Multiphonon Emission | 182 |
| 5.6.2 | Energy Transfer | 183 |
| 5.6.3 | The Concentration Quenching of Luminescence | 188 |
| 5.7 | Advanced Topic: The Determination of Quantum Efficiencies | 191 |

WILEY



John Wiley & Sons, Ltd

hal.archives-ouvertes.fr/jpa-00220059/document

Oscillator strengths of defects in insulators : The generalization of Smakula's equation (*)

D. Y. Smith

Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., U.S.A. and Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany

and G. Graham

Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., U.S.A. and Franklin and Marshall College, Lancaster, Pa., U.S.A.

1. **Introduction.** — Smakula's [1] celebrated relation for the strength of a defect's optical absorption has formed the basis of quantitative absorption studies for fifty years. In the commonly used Mollwo-Roos [2] form, Smakula's equation states that for defects with oscillator strength f and density ρ in a host medium of refractive index n_0

$$\rho f = \frac{9}{4\pi} \frac{mc}{e^2 \hbar} \frac{n_0}{(n_0^2 + 2)^2} \mu_{\max} \Gamma, \quad (1)$$

where μ_{\max} and Γ are the maximum absorption coefficient and the full width at half maximum of the defect's absorption band, respectively.

This relation was originally deduced for a dilute solution of absorbing species in a transparent medium with constant refractive index on the assumption that the absorption is Lorentzian and that the field at the absorbing centre is the Lorentz local field.

l'absorption des défauts dans des matériaux ayant une variant rapidement. A titre d'exemple cette généralisation s. On trouve que dans KI coloré additivement, le rapport désaccord qualitatif avec le traitement théorique commun. 2. On discute les raisons possibles de ce désaccord.

- [1] SMAKULA, A., *Z. Phys.* **59** (1930) 603.
- [2] MOLLWO, E. and ROOS, W., *Nachr. Ges. Wiss. Gottingen, Math.-Phys. Kl.* N.F. **1** No. 8 (1934) 107.
- [3] DEXTER, D. L., *Theory of the Optical Properties of Imperfections in Non-metals* in : *Solid State Phys.* Vol. **6**, eds. F. Seitz and D. Turnbull (Academic Press Inc., New York) 1958.
- [4] SMITH, D. Y. and DEXTER, D. L., *Optical Absorption Strengths of Defects in Insulators* in : *Progr. Opt.*, Vol. **10**, ed. E. Wolf (North-Holland, Amsterdam) 1972.
- [5] SMITH, D. Y. and SHILES, E., *Phys. Rev. B* **17** (1978) 4689.
- [5a] DEXTER, D. L., *Nuovo Cimento* **48B** (1967) 409, 415.
- [6] ALTARELLI, M., DEXTER, D. L., NUSSENZVEIG, M. and SMITH, D. Y., *Phys. Rev. B* **6** (1972) 4502.

Usage des Nouvelles Mesures.



16 November 2018, the 26th General Conference on Weights and Measures (CGPM)



www.bipm.org/en/cgpm-2018/

Appendix 3. The base units of the SI






Starting from the new definition of the SI described above in terms of fixed numerical values of the defining constants, definitions of each of the seven base units are deduced by taking, as appropriate, one or more of these defining constants to give the following set of definitions, effective from 20 May 2019:


- The second, symbol *s*, is the SI unit of time. It is defined by taking the fixed numerical value of the caesium frequency $\Delta\nu_{\text{Cs}}$, the unperturbed ground-state hyperfine transition frequency of the caesium 133 atom, to be 9 192 631 770 when expressed in the unit Hz, which is equal to s^{-1} .
- The metre, symbol *m*, is the SI unit of length. It is defined by taking the fixed numerical value of the speed of light in vacuum *c* to be 299 792 458 when expressed in the unit m/s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- The kilogram, symbol *kg*, is the SI unit of mass. It is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant *h* to be $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ when expressed in the unit J s, which is equal to $\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$, where the metre and the second are defined in terms of *c* and $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- The ampere, symbol *A*, is the SI unit of electric current. It is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge *e* to be $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ when expressed in the unit C, which is equal to A s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- The kelvin, symbol *K*, is the SI unit of thermodynamic temperature. It is defined by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant *k* to be $1.380\,649 \times 10^{-23}$ when expressed in the unit J K^{-1} , which is equal to $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, where the kilogram, metre and second are defined in terms of *h*, *c* and $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.
- The mole, symbol *mol*, is the SI unit of amount of substance. One mole contains exactly $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ elementary entities. This number is the fixed numerical value of the Avogadro constant, N_{A} , when expressed in the unit mol^{-1} and is called the Avogadro number.

The amount of substance, symbol *n*, of a system is a measure of the number of specified elementary entities. An elementary entity may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles.
- The candela, symbol *cd*, is the SI unit of luminous intensity in a given direction. It is defined by taking the fixed numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd} , to be 683 when expressed in the unit lm W^{-1} , which is equal to cd sr W^{-1} , or $\text{cd sr kg}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^3$, where the kilogram, metre and second are defined in terms of *h*, *c* and $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.


Генеральна конференція мір і ваг

- Перша** [↗](#)
(1889) Визначено міжнародний **прототип кілограма**, виготовлений із сплаву платини й іридію. Прототип зберігається в Міжнародному бюро мір і ваг. проголошено міжнародний еталон метра.
- Друга** [↗](#)
(1897) Жодних резолюцій не було прийнято.
- Третя** [↗](#)
(1901) Переозначено літр як об'єм кілограма води. Уточнене означення кілограма як одинці маси, означено «стандартну вагу», визначено стандартне прискорення вільного падіння, запроваджено використання грама сили.
- Четверта** [↗](#)
(1907) Прийнято означення карата як 200 мг.
- П'ята** [↗](#)
(1913) Запропоновано міжнародну шкалу температур.
- Шоста** [↗](#)
(1921) Переглянуто метричну конвенцію.
- Сьома** [↗](#)
(1927) Створено консультативну комісію з електрики.
- Восьма** [↗](#)
(1933) Визначено потребу в абсолютних електричних одиницях.
- Дев'ята** [↗](#)
(1948) Визначено ампер, бар, кулон, фарад, генрі, джоуль, ньютон, ом, вольт, ват, вебер. Вибрано назву для градуса Цельсія. Мала літера l затверджена як позначення літра. Як кому, так і крапку було прийнято як позначення десяткової частини. Замінено символи для стера і секунди [1] [↗](#). Пропонувалося, але не було затверджене загальне повернення до довгої системи нумерації.
- Десята** [↗](#)
(1954) Означено кельвін та стандартну атмосферу. Почалося встановлення Міжнародної системи одиниць (метр, кілограм, секунда, ампер, кельвін, кандела).


- 11-та  (1960) Метр перевизначено через довжину хвилі світла. Прийнято одиниці: герц, люмен, люкс, тесла. Нова метрична система отримала назву SI, «the modernized metric system». Підтверджено вживання префіксів піко-, нано-, мікро-, мега-, гіга- та тера-.
- 12-та  (1964) Повернено початкове означення літра як 1 дм³. Затверджено префікси атто- та фемто-.
- 13-та  (1967) **Перевизначено секунду** як тривалість 9 192 631 770 періодів випромінювання, що відповідає переходу між двома надтонкими рівнями основного стану цезію-133 при температурі 0 К. Градус Кельвіна перейменовано в кельвін. Змінено означення кандели.
- 14-та  (1971) Визначено нову основну одиницю SI – **моль**. Затверджено одиниці паскаль, сіменс.
- 15-та  (1975) Затверджено префікси пета- та екса-. Запроваджено радіологічні одиниці грей та бекерель.
- 16-та  (1979) Визначено одиниці кандела, зіверт. Затверджено використання для позначення літра символів l та L.
- 17-та  (1983) Метр визначено через **швидкість світла**.
- 18-та  (1987) Прийнято договірне значення для сталої Джозефсона, K_J , та сталої фон Клітцинга, R_K , готуючись до перевизначення ампера й кілограма.
- 19-та  (1991) Запроваджено нові префікси йокто-, зепто-, зета- та йота-.
- 20-та  (1995) Додаткові одиниці SI радіан та стерадіан стали похідними одиницями.

20-та 
(1995)


Додаткові одиниці SI **радіан** та **стерадіан** стали похідними одиницями.

21-ша 
(1999)


Затверджено нову одиницю SI **катал** = **моль** за секунду для каталітичної активності.

22-га 
(2003)


Підтверджено вживання коми або крапки для позначення десяткової частини, але не для групування символів з метою полегшення читання: «числа можуть бути розділені на трійки для полегшення читання, ні крапки, ні коми не вставляються в проміжки між групами»^[1].

23-тя 
(2007)

Роз'яснення щодо кельвіна та ідеї щодо перевизначення деяких **основних одиниць SI**.

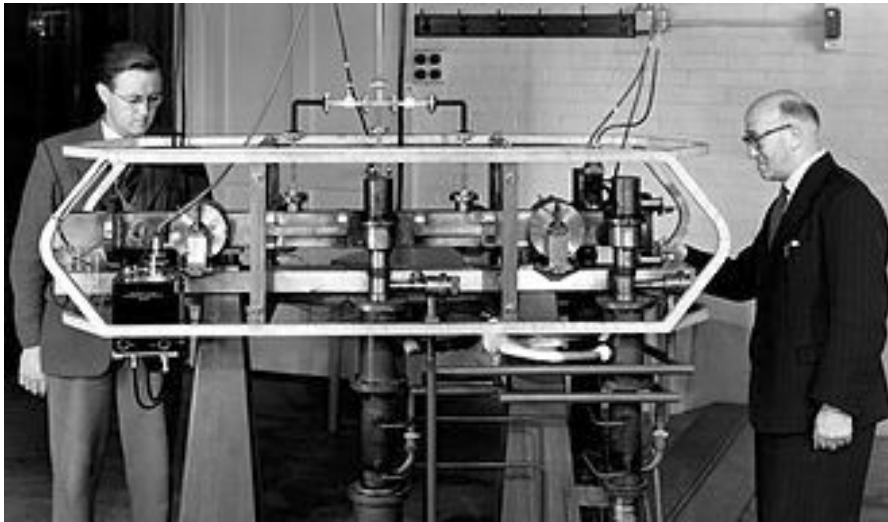
24-та 
(2011)

Затверджено проект майбутнього переозначення основних одиниць SI.

26-та 
(2018)

Переглянуто визначення одиниць SI **кілограм**, **ампер**, **кельвін** та **моль** через відповідні фундаментальні стали: **Планка**, **елементарний заряд**, **Больцмана** та **Авогадро**, оновлені значення яких також було затверджено.^[2]

“Атомні годинники”

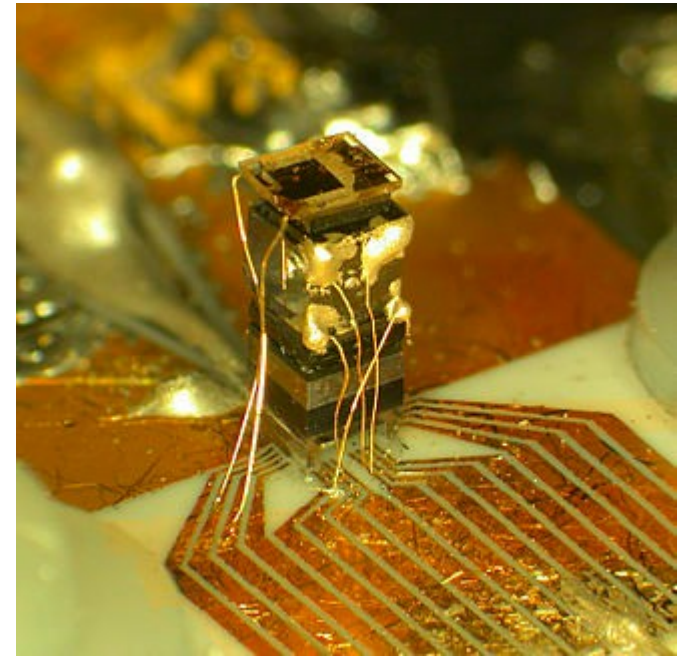


Louis Essen (right) and Jack Parry (left) standing next to the world's first caesium-133 atomic clock.

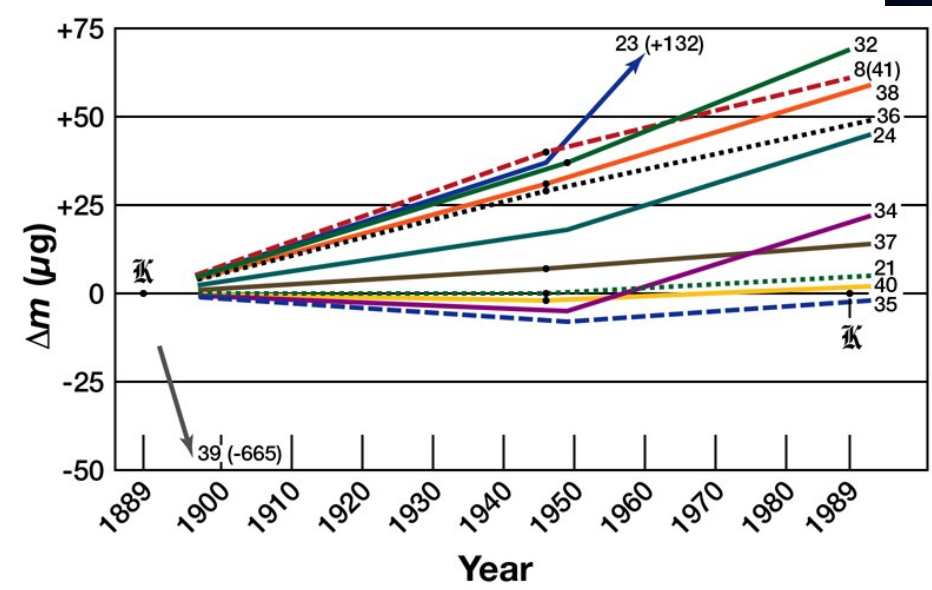
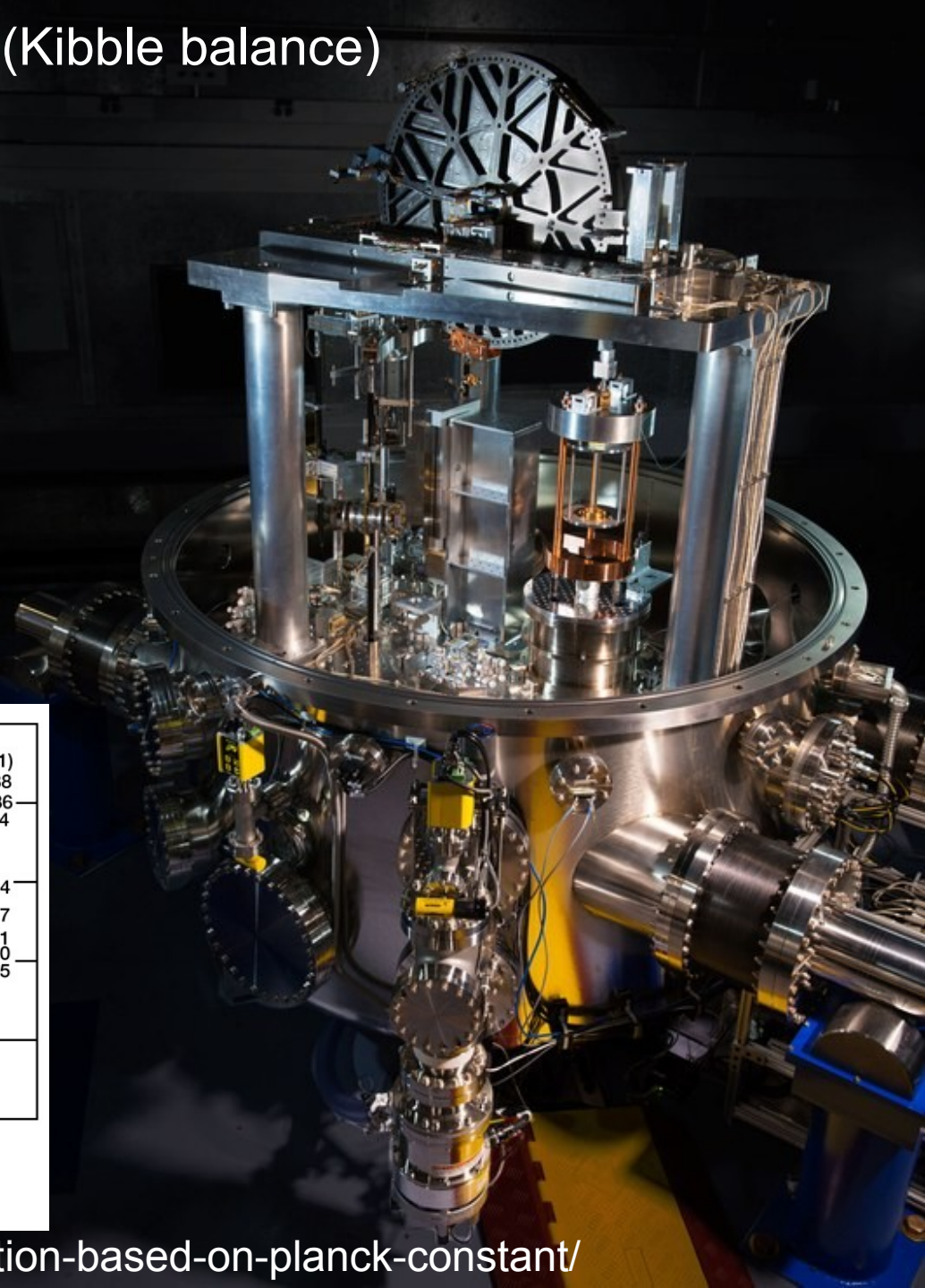


Rb oscillator

Chip-scale atomic clocks, such as this one unveiled in 2004, are expected to greatly improve GPS location.



Одиниця маси і ватові терези (Kibble balance)



Photographs by Brian Resnick



The Kibble balance is the machine that makes the redefinition of the kilogram possible.

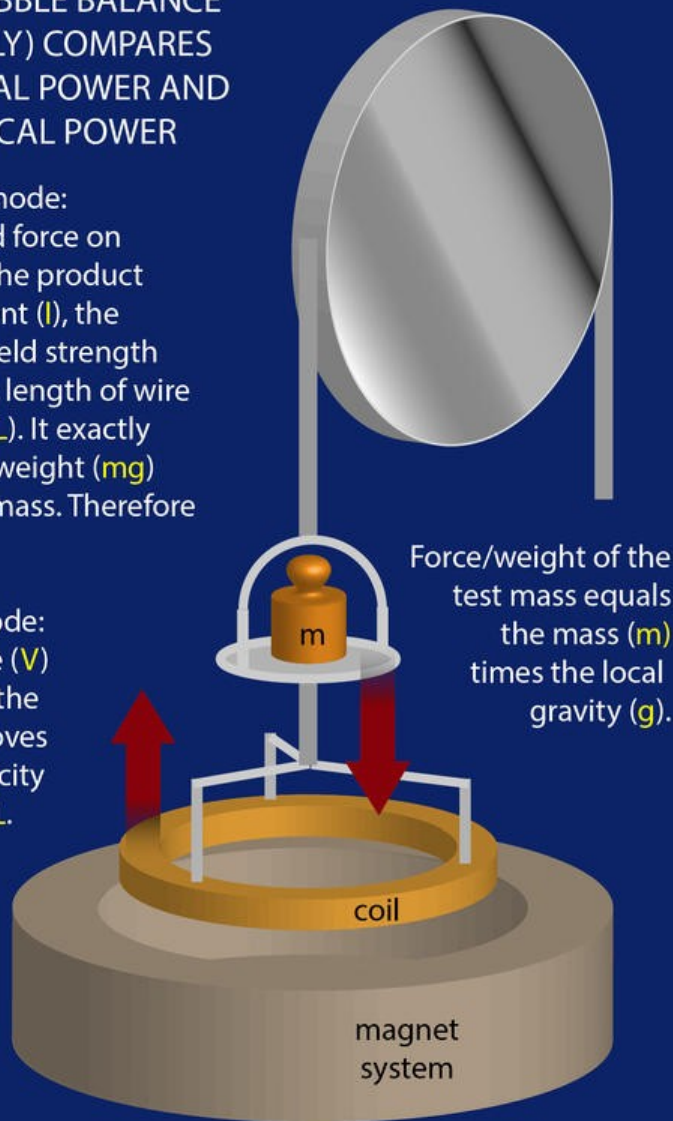
HOW A KIBBLE BALANCE (VIRTUALLY) COMPARES ELECTRICAL POWER AND MECHANICAL POWER

Weighing mode:

The upward force on the coil is the product of the current (I), the magnetic field strength (B), and the length of wire in the coil (L). It exactly equals the weight (mg) of the test mass. Therefore $mg = IBL$.

Velocity mode:

The voltage (V) induced in the coil as it moves equals velocity (v) times BL .

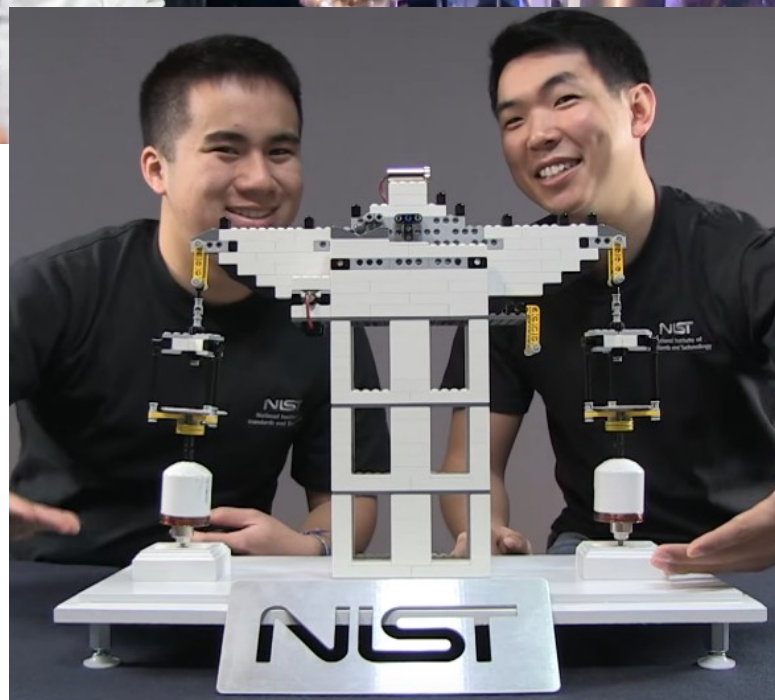
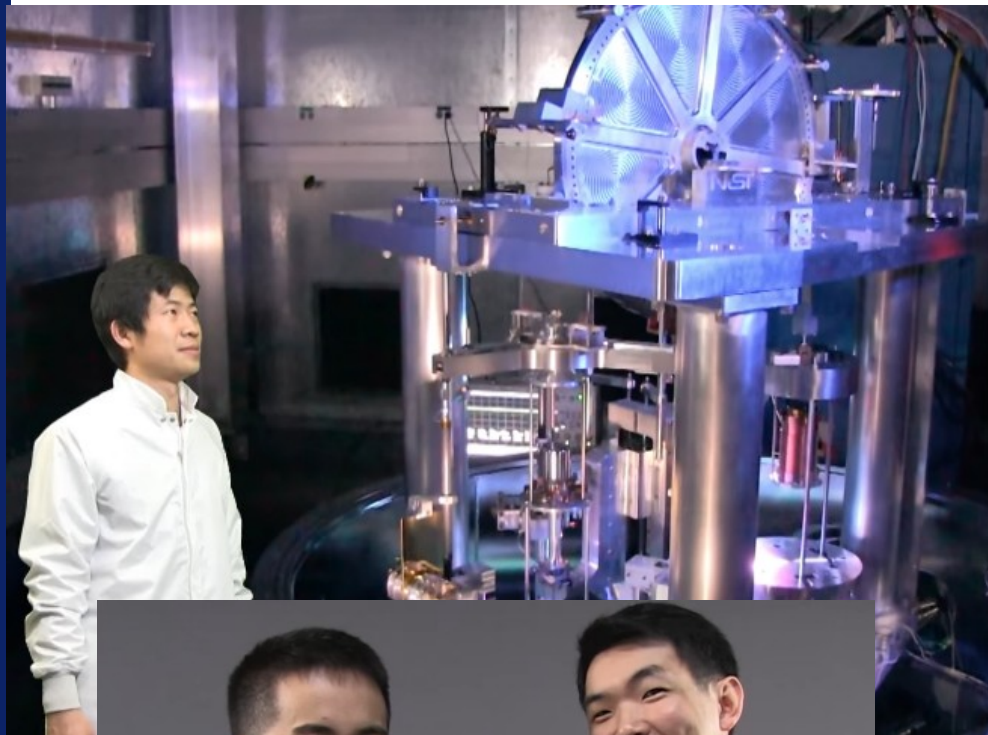


Force/weight of the test mass equals the mass (m) times the local gravity (g).

Weighing Mode: $mg = IBL$ Velocity Mode: $V = vBL$
so $mg/I = BL$ so $V/v = BL$

BL is the same in each case and cancels out. Thus IV (watts elec. power) = mgv (watts mech. power)

- <https://www.nist.gov/si-redefinition/kilogram-kibble-balance>

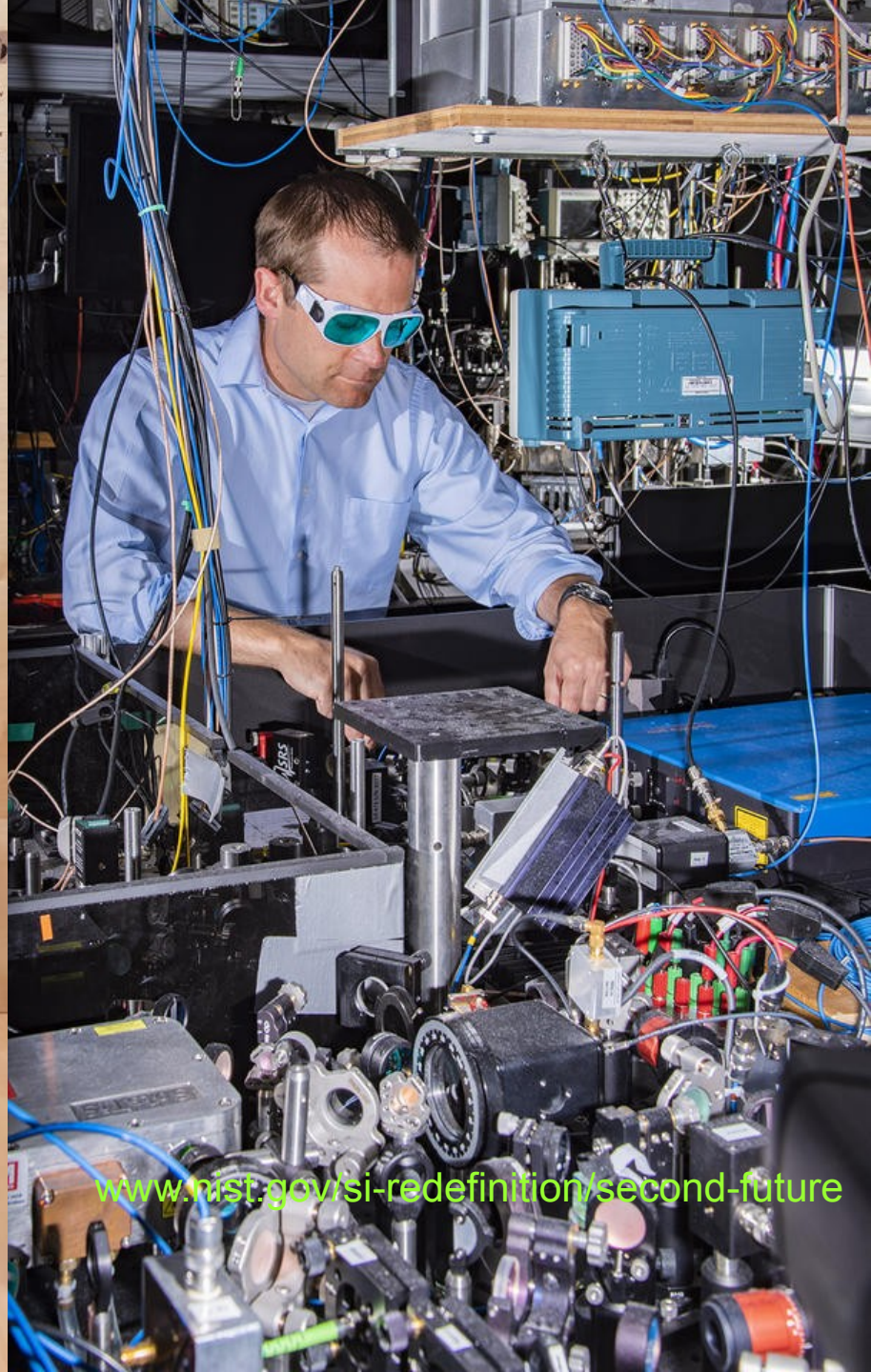




Υδραυλικό ρολόι Κτησίου
Ctesibius' water clock
Μάκης Δ. Χαλκιάρας
Κωνσταντίνος Δ. Λαβρινός

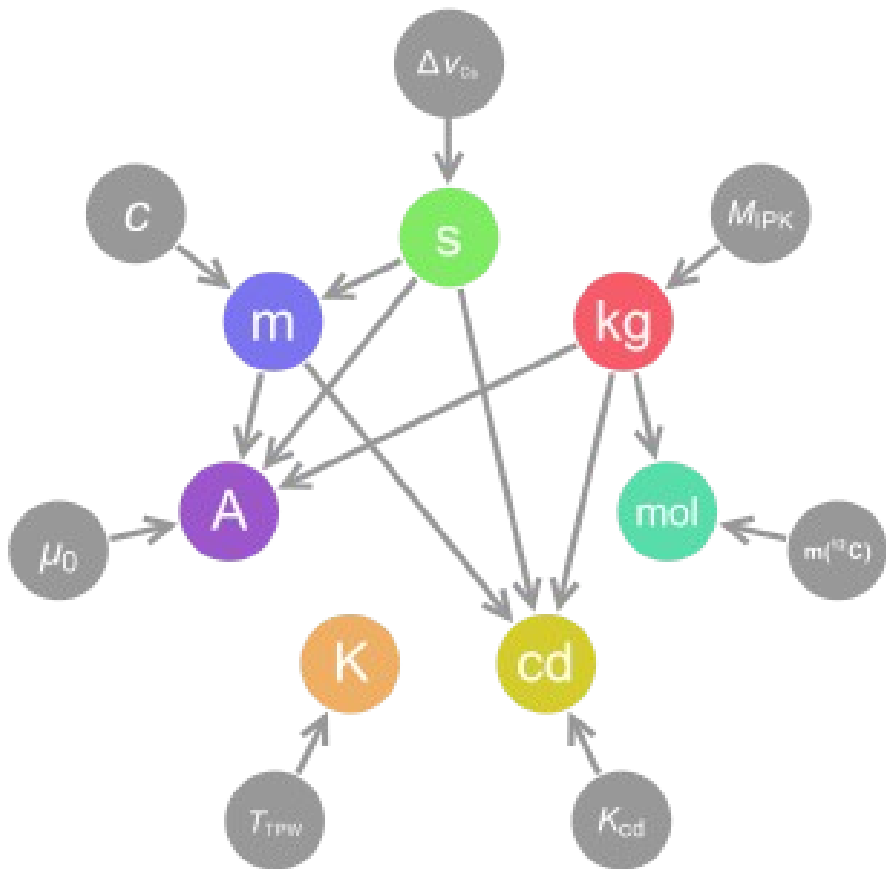
Το υδραυλικό ρολόι του Κτησίου (2^{ος} αιώνας π.Χ.) αποτελεί ένα συνδυασμό βελών, κρονομετρικών μηχανισμών, κλασικής ροής που κινεί ένα βλήτο ως κρονομετρητή και επιφανειακή πίεση που κινεί ένα πλωτικό βλήτο. Ο κλασικός βλήτος λειτουργεί ως κρονομετρητής. Το πλωτικό βλήτο βάζει ανάστρο με τον μηχανισμό, ώστε να κρονομετρήσει με ακρίβεια βολών των βελών παρόμοια κίνηση με τη ροή του νερού. Το ρολόι λειτουργεί με κλάσμα, ο οποίος με βάση την κλίση του κρονομετρητή με βάση τον κρονομετρητή ή τον κλάσμα στο σημείο που κινείται με το κλάσμα στο σημείο κρονομετρητή.

на секундочку ...

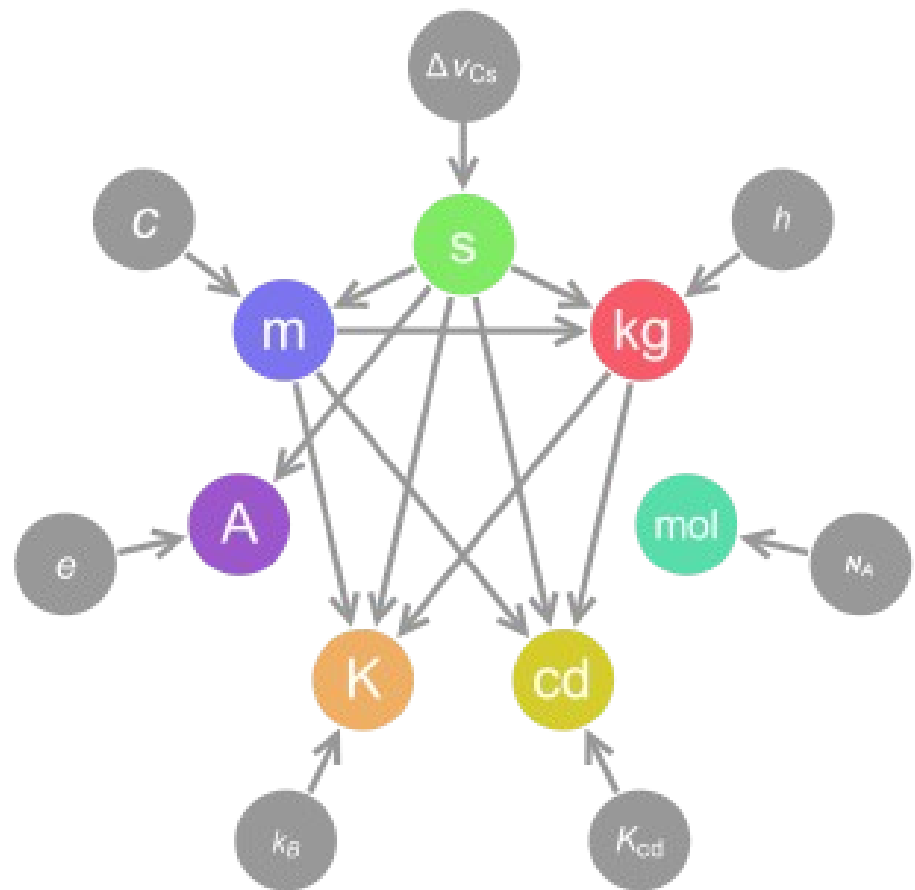


www.nist.gov/si-redefinition/second-future

Old SI



New SI



- The SI system before the redefinition: Dependence of base unit definitions on other base units (for example, the metre is defined in terms of the distance travelled by light in a specific fraction of a second), with the constants of nature and artefacts used to define them (such as the mass of the IPK for the kilogram).

- The SI system after the redefinition: Dependence of base unit definitions on physical constants with fixed numerical values and on other base units that are derived from the same set of constants.

Kilogram is defined by taking the fixed numerical value of the Planck constant to be $6.62607015 \times 10^{-34}$, when expressed in the unit J·s, which is equal to $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, where the metre and the second are defined in terms of c and $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Ampere is defined by taking the fixed numerical value of the elementary charge e to be $1.602176634 \times 10^{-19}$, when expressed in the unit C, which is equal to A·s, where the second is defined in terms of $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

Kelvin is defined by taking the fixed numerical value of the Boltzmann constant k to be 1.380649×10^{-23} , when expressed in the unit J·K⁻¹, which is equal to $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h , c and $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

One **mole** contains exactly $6.02214076 \times 10^{23}$ elementary entities. An elementary entity may be an atom, a molecule, an ion, an electron, any other particle or specified group of particles.

Candela is defined by taking the fixed numerical value of the luminous efficacy of monochromatic radiation of frequency 540×10^{12} Hz, K_{cd} , to be 683 when expressed in the unit $\text{lm} \cdot \text{W}^{-1}$, which is equal to $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{W}^{-1}$, or $\text{cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3$, where the kilogram, metre and second are defined in terms of h , c and $\Delta\nu_{\text{Cs}}$.

- $h = 6.626\,070\,15 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- $e = 1.602\,176\,634 \times 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$
- $k = 1.380\,649 \times 10^{-23} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
- $N_{\text{A}} = 6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

- en.wikipedia.org/wiki/Redefinition_of_SI_base_units $\Delta\nu_{\text{Cs}} = \Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{hfs} = 9\,192\,631\,770 \text{ s}^{-1}$
- $K_{\text{cd}} = 683 \text{ cd} \cdot \text{sr} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$

- ~~uk.wikipedia.org/wiki/
Число_Авогадро~~

~~$N_A = 6.022\,140\,76(4) \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}$~~

$6.022\,140\,76 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}$



Amedeo Avogadro (1776–1856)



Densities and Imperfections of Single Crystals

September 1955 · Physical Review 99(6):1747-1750

DOI: 10.1103/PhysRev.99.1747

A. Smakula · J. Kalnajs · V. Sils

• $6.02368 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$

A new determination of Avogadro's number from lattice constant and density of single crystals

February 1957 · Il Nuovo Cimento 6(S1):214-220

DOI: 10.1007/BF02724776

A. Smakula · J. Kalnajs

- <https://www.nist.gov/si-redefinition/kilogram-silicon-spheres-and-international-avogadro-project>



- $h = 6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
- $e = 1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19} \text{ A}\cdot\text{s}$
- $k = 1.380\ 649 \times 10^{-23} \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$
- $N_A = 6.022\ 140\ 76 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
- $c = 299\ 792\ 458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- $\Delta\nu_{\text{Cs}} = \Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{hfs} = 9\ 192\ 631\ 770 \text{ s}^{-1}$
- $K_{\text{cd}} = 683 \text{ cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{s}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$

$$1\text{C} = \frac{9\ 192\ 631\ 770}{\Delta\nu_{\text{Cs}}}$$

$$1\text{m} = \frac{c \cdot 1\text{C}}{299\ 792\ 458}$$

$$1\text{kg} = \frac{h \cdot 1\text{C}}{6.626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \cdot 1\text{m}^2}$$

$$1\text{K} = \frac{1.380\ 649 \times 10^{-23} \cdot 1\text{m} \cdot 1\text{m}^2}{k_B \cdot 1\text{C}^2}$$

$$1\text{A} = \frac{e}{1.602\ 176\ 634 \times 10^{-19} \cdot 1\text{C}}$$

