Chapitre I. Propriété des Semi-conducteurs

I- Les cristaux :

On peut classer la matières en deux catégories.

- Celle où l'état est désordonné : gaz, liquide, solide amorphe ; Cet état est caractérisé par l'arrangement aléatoir des atomes.
- Celle où l'état est ordonné : l'état cristallin où les atomes sont disposés de manière ordonnée.

Il existe différents types des cristaux :

a) Les cristaux ioniques :

Caractérisé par l'association d'atomes fortement électro-positif (en général un seul atome périphérique) Exple: Li, Na, K, Rb, Cs) Avec des atomes fortement électro-négatif (en général cette état 7 électrons périphériques exple: F, Cl, B, I).

Expl: LiF, NaCl, KBr

Ces cristaux sont très durs étant donné la très forte énergie de liaison, Il n'y a pas d'électrons libres : ils sont des isolants.

b) Les cristaux métalliques :

Formés par les atomes électro-positif, qui sont les métaux alcalins (Na, K, Rb, Cs) ou bien les métaux nobles (Al, Ag, Au, Cu). Les électrons périphériques sont libérés, le cristal est ainsi formé d'un réseau d'ions positifs et d'un gaz d'électrons libre. Ce sont des conducteurs.

c) Les cristaux covalents :

Ce sont, au bien, les atomes de la colonne IV (C, Si, Ge, Sn) où chaque atome participe avec 4 électrons périphérique et accepte 4 électrons des atomes voisins pour former 4 liaisons covalentes.

Ou bien, les atomes des colonne (III, V) ou (II, VI) exple

exple; AsGa; InP; CdS

Ces cristaux (excepté le carbone et l'étain) sont caractérisé par des énergies de liaison beaucoup moin forte que pour les cristaux ionique.

II- Les semi-conducteurs (SC) :

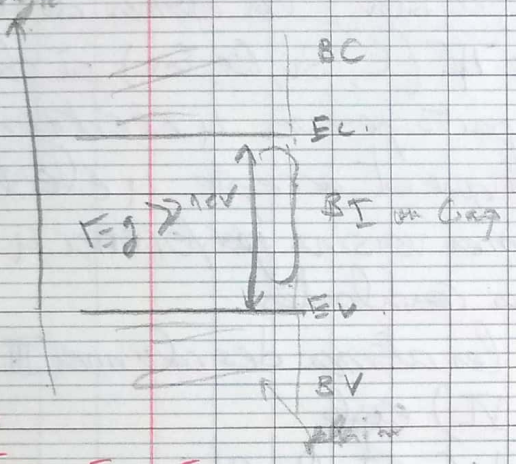
Le semi-conducteurs que nous allons étudier sont des matériaux qui se trouve sous forme de cristaux covalant et qui sont caractérisés par une valeur de resistivité intermédiaire entre celle des isolant (10^8 - 10^{16}) $\Omega \cdot cm$.

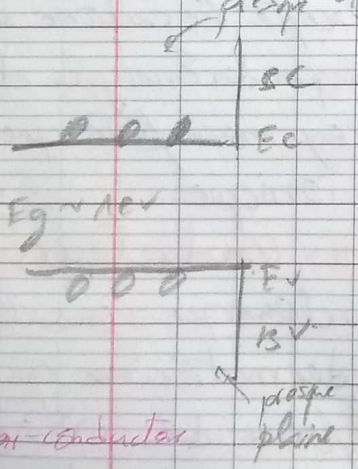
Scanné avec CamScanner

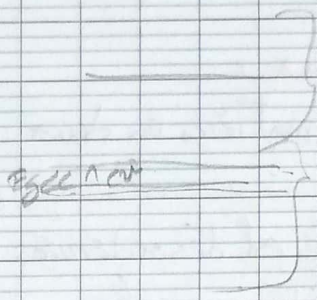
et celle de conducteurs (10^{-8} 10^{-8}) S.I.
⇒ semi-conducteurs [10^{-3}, 10^{8}] S.I.

Les bandes d'énergie

Dans la structure cristalline, les électrons périphériques peuvent avoir des énergie qui appartiennent à deux bandes :
La bande de valance et la bande de conduction séparée par une bande interdite ou gap.







Eg :
La bande d'énergie est en réalité composée des niveaux discrets qui sont tellement proche que l'on peut considérer comme continue.

Conduction dans les semi-conducteurs

Lorsque la température est assez basse (proche de 0 absolu) les électrons sont bien liés au atome et la conduction n'est pas possible.
Lorsque la température s'élève, les vibration thermique peuvent provoquer la cassure des liaisons covalente et donc la libération (ou génération) d'électrons qui peuvent se déplacer et donc donne lieu à un courant.
Lorsque l'électron quitte l'atome de réseau, il laisse une lacune qui peut être vue comme une charge négative (égale à la valeur absolue de la charge d'électron) : On l'appelle Trou.

Scanné avec CamScanner

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

Table of Selected Radioactive Isotopes

Selected Radioactive Isotopes

Naturally occurring radioactive elements are designated by a mass number in blue (although some are also manufactured). Listed in order of relative abundance (for those elements found in nature). Half-lives below the parentheses, where s, min, h, d, and y stand respectively for seconds, minutes, hours, days, and years. The listed half-lives are according to the most recent information. Isotopes that have been proposed, although not to be discovered but with half-lives exceeding 10^{-9} y have not been included. Symbols in parentheses mainly (no longer used) indicate isotopes; many others have been proposed. Isotopes known to be radioactive but with undetermined half-lives are not listed. Symbols in parentheses are generally accompanied by gamma radiation.

- n — neutron
- p — proton
- e — beta particle (electron); emission
- β^+ — positron emission
- EC — orbital electron capture
- IT — isomeric transition (from upper to lower isomeric state)
- SF — spontaneous fission

Estimated Values

GROUP IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	IB	IIB
1 1.00794 1 1 H Hydrogen									
3 6.941 4 2 1 Li Lithium 1615 1342 $^{1}S_{0}$ 0.53	4 9.01218 2 2 Be Beryllium 2471 1287 $^{1}S_{0}$ 1.85								
11 22.98977 12 3 1 Na Sodium 1156 $^{2}S_{1/2}$ 0.97	12 24.305 8 3 2 Mg Magnesium 922 650 $^{1}S_{0}$ 1.74								
19 39.0983 20 4 1 K Potassium 1033 336 $^{2}S_{1/2}$ 0.86	20 40.078 12 4 2 Ca Calcium 1757 1112 $^{1}S_{0}$ 1.55	21 44.9559 20 4 3 Sc Scandium 3104 1814 $^{2}D_{3/2}$ 2.99	22 47.88 10 4 4 Ti Titanium 3560 1941 $^{3}F_{2}$ 4.54	23 50.9415 23 4 5 V Vanadium 3650 2173 $^{4}F_{3/2}$ 6.11	24 51.996 24 4 6 Cr Chromium 2945 2130 $^{7}S_{3}$ 7.19	25 54.9380 25 4 7 Mn Manganese 2235 1518 $^{6}S_{5/2}$ 7.44	26 55.847 26 4 8 Fe Iron 3023 1809 $^{5}D_{4}$ 7.874	27 58.9332 27 4 9 Co Cobalt 3143 1768 $^{4}F_{9/2}$ 8.90	28 58.6934 28 4 10 Ni Nickel 3005 1728 $^{3}F_{4}$ 8.90	29 63.546 29 4 11 Cu Copper 2840 1356.6 $^{2}S_{1/2}$ 8.96	30 65.39 30 4 12 Zn Zinc 1180 692.73 $^{1}S_{0}$ 7.13
37 85.4678 91 5 1 Rb Rubidium 1072 312.63 $^{2}S_{1/2}$ 1.532	38 87.62 52 5 2 Sr Strontium 1655 1042 $^{1}S_{0}$ 2.54	39 88.9059 5 5 3 Y Yttrium 3611 1795 $^{2}D_{3/2}$ 4.47	40 91.224 5 5 4 Zr Zirconium 4682 2128 $^{3}F_{2}$ 6.51	41 92.9064 5 5 5 Nb Niobium 5018 2744 $^{6}D_{1/2}$ 8.57	42 95.94 5 5 6 Mo Molybdenum 4912 2890 $^{7}S_{3}$ 10.22	43 (98) 5 5 7 Tc Technetium 4538 2427 $^{6}S_{5/2}$ 11.5	44 101.07 5 5 8 Ru Ruthenium 4423 2610 $^{5}F_{5}$ 12.37	45 102.9055 5 5 9 Rh Rhodium 3970 2236 $^{4}F_{9/2}$ 12.41	46 106.42 5 5 10 Pd Palladium 3240 1825 $^{1}S_{0}$ 12.0	47 107.868 5 5 11 Ag Silver 2436 1235.08 $^{2}S_{1/2}$ 10.50	48 112.41 5 5 12 Cd Cadmium 1040 594.26 $^{1}S_{0}$ 8.65
55 132.9054 9 6 1 Cs Caesium 944 301.54 $^{2}S_{1/2}$ 1.87	56 137.33 10 6 2 Ba Barium 2078 1002 $^{1}S_{0}$ 3.59	57 138.9055 11 6 3 La Lanthanum 3737 1191 $^{2}D_{3/2}$ 6.15	72 178.49 ★ 6 6 4 Hf Hafnium 4603 2501 $^{3}F_{2}$ 13.31	73 180.9479 ★ 6 6 5 Ta Tantalum 5731 3293 $^{4}F_{3/2}$ 16.65	74 183.85 6 6 6 W Tungsten 5828 3695 $^{5}D_{0}$ 19.3	75 186.207 6 6 7 Re Rhenium 5869 3459 $^{6}S_{5/2}$ 21.0	76 190.2 6 6 8 Os Osmium 5300 3306 $^{5}D_{4}$ 22.6	77 192.22 6 6 9 Ir Iridium 4100 2720 $^{4}F_{9/2}$ 22.65	78 195.08 6 6 10 Pt Platinum 4100 2041.4 $^{3}D_{3}$ 21.45	79 196.9665 6 6 11 Au Gold 3130 1337.58 $^{2}S_{1/2}$ 19.3	80 200.59 6 6 12 Hg Mercury 630 234.31 $^{1}S_{0}$ 13.55
87 (223) 9 7 1 Fr Francium 950 300 $^{2}S_{1/2}$	88 226.0254 5 7 2 Ra Radium 1411 973 $^{1}S_{0}$ 5.0	89 (227) 5 7 3 AC Actinium 3472 1324 $^{2}D_{3/2}$ 10.07	104 (261) Rf Rutherfordium [Rn]5f^{14}6d^{2}7s^{2}	105 (262) Ha Hahnium [Rn]5f^{14}6d^{3}7s^{2}	106 (263) Sg Seaborgium [Rn]5f^{14}6d^{4}7s^{2}	107 (262) Uns Unnilseptium [Rn]5f^{14}6d^{5}7s^{2}	108 (265) Uno Unniloctium [Rn]5f^{14}6d^{6}7s^{2}	109 (266) Une Unnilennium [Rn]5f^{14}6d^{7}7s^{2}	110 (272) Uun Ununnilium [Rn]5f^{14}6d^{8}7s^{2}		

★	58 140.12 3,4 6.77 1071 3716 Ce Cerium [Xe]4f^{1}5d^{1}6s^{2}	59 140.9077 3,4 6.77 1204 3785 Pr Praseodymium [Xe]4f^{3}6s^{2}	60 144.24 3 7.01 1294 3347 Nd Neodymium [Xe]4f^{4}6s^{2}	61 (145) 3 7.22 1315 3300 Pm Promethium [Xe]4f^{5}6s^{2}	62 150.36 3,2 7.52 1347 2067 Sm Samarium [Xe]4f^{6}6s^{2}	63 151.965 3,2 5.24 1095 1800 Eu Europium [Xe]4f^{7}6s^{2}	64 157.25 3 7.90 1585 3546 Gd Gadolinium [Xe]4f^{7}5d^{1}6s^{2}	65 158.9253 3,4 8.23 1629 3500 Tb Terbium [Xe]4f^{9}6s^{2}	66 162.50 3 8.55 1685 2840 Dy Dysprosium [Xe]4f^{10}6s^{2}	67 164.9303 3 8.80 1747 2968 Ho Holmium [Xe]4f^{11}6s^{2}	68 167.26 3 9.07 1802 3140 Er Erbium [Xe]4f^{12}6s^{2}	69 168.9342 3,2 9.32 1818 2223 Tm Thulium [Xe]4f^{13}6s^{2}	70 173.04 2,3 6.97 1092 1469 Yb Ytterbium [Xe]4f^{14}6s^{2}	71 174.967 3 9.84 1936 3668 Lu Lutetium [Xe]4f^{14}5d^{1}6s^{2}
★★	90 232.0381 4 11.72 5060 4790 Th Thorium [Rn]6d^{2}7s^{2}	91 231.0359 5,4 15.4 4900 1845 Pa Protactinium [Rn]5f^{2}6d^{1}7s^{2}	92 238.029 6,5,4,3 18.95 4402 1405 U Uranium [Rn]5f^{3}6d^{1}7s^{2}	93 237.0482 6,5,4,3 20.3 4127 912 Np Neptunium [Rn]5f^{4}6d^{1}7s^{2}	94 (244) 6,5,4,3 19.84 3505 913 Pu Plutonium [Rn]5f^{6}7s^{2}	95 (243) 6,5,4,3 13.7 2880 1449 Am Americium [Rn]5f^{7}7s^{2}	96 (247) 3 13.5 3810 1613 Cm Curium [Rn]5f^{7}6d^{1}7s^{2}	97 (247) 4,3 14 — — Bk Berkelium [Rn]5f^{9}7s^{2}	98 (251) 3 — 1173? — Cf Californium [Rn]5f^{10}7s^{2}	99 (252) — 1133? — Es Einsteinium [Rn]5f^{11}7s^{2}	100 (257) — 1800? — Fm Fermium [Rn]5f^{12}7s^{2}	101 (258) — 1100? — Md Mendelevium [Rn]5f^{13}7s^{2}	102 (259) 3 1100? — No Nobelium [Rn]5f^{14}7s^{2}	103 (260) 3 1900? — Lr Lawrencium [Rn]5f^{14}7s^{2}7p^{1}

	VIIIA	IA	IIA	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIII	VIII	VIII	IB	IIB
1	2 4.0026 H Helium												
2	10 20.1797 Ne Neon	9 18.9984 F Fluorine	8 15.9994 O Oxygen	7 14.0067 N Nitrogen	6 12.011 C Carbon	5 10.811 B Boron							
3	18 39.948 Ar Argon	17 35.4527 Cl Chlorine	16 32.066 S Sulfur	15 30.97376 P Phosphorus	14 28.0855 Si Silicon	13 26.98154 Al Aluminum							
4	36 83.80 Kr Krypton	35 79.904 Br Bromine	34 78.96 Se Selenium	33 74.9216 As Arsenic	32 72.61 Ge Germanium	31 69.723 Ga Gallium	30 65.39 Zn Zinc	29 63.546 Cu Copper	28 58.6934 Ni Nickel	27 58.9332 Co Cobalt	26 55.847 Fe Iron	25 54.9380 Mn Manganese	24 51.996 Cr Chromium
5	54 131.29 Xe Xenon	53 126.9045 I Iodine	52 127.60 Te Tellurium	51 121.757 Sb Antimony	50 118.710 Sn Tin	49 114.82 In Indium	48 112.41 Cd Cadmium	47 107.868 Ag Silver	46 106.42 Pd Palladium	45 102.9055 Rh Rhodium	44 101.07 Ru Ruthenium	43 (98) Tc Technetium	42 95.94 Mo Molybdenum
6	86 (222) Rn Radon	85 (210) At Astatine	84 (209) Po Polonium	83 208.9804 Bi Bismuth	82 207.2 Pb Lead	81 204.383 Tl Thallium	80 200.59 Hg Mercury	79 196.9665 Au Gold	78 195.08 Pt Platinum	77 192.22 Ir Iridium	76 190.2 Os Osmium	75 186.207 Re Rhenium	74 183.85 W Tungsten
7	118 (294) Uuo Ununoctium	117 (294) Uus Ununseptium	116 (292) Uuh Ununhexium	115 (288) Uup Ununpentium	114 (289) Uuq Ununquadium	113 (284) Uut Ununtrium	112 (285) Uub Ununbium	111 (280) Uuu Unununium					

	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	IB	IIB
1	5 10.811 2,3 B Boron 2453 2365 $^{2}P_{1/2}$ 2.34	6 12.011 4,2 C Carbon 3927 3915 $^{3}P_{0}$ 2.26	7 14.0067 4,3,2,1 N Nitrogen 63.14 77.344 $^{4}S_{3/2}$ 1.251	8 15.9994 -2 O Oxygen 54.8 90.188 $^{3}P_{2}$ 1.4291	9 18.9984 -1 F Fluorine 53.55 85.03 $^{2}P_{3/2}$ 1.6951	10 20.1797 0 Ne Neon 24.56 27.10 $^{1}S_{0}$ 0.9001		
2	13 26.9815 3 Al Aluminum 933 2740 $^{2}P_{1/2}$ 2.70	14 28.0855 4,2 Si Silicon 1683 2630 $^{3}P_{0}$ 2.33	15 30.97376 5,3,4 P Phosphorus 317.3 553 $^{4}S_{3/2}$ 1.82	16 32.066 6,4,2 S Sulfur 392.3 717.82 $^{3}P_{2}$ 2.07	17 35.4527 -1,+3,+5,+7 Cl Chlorine 172.17 239.18 $^{2}P_{3/2}$ 3.214	18 39.948 0 Ar Argon 83.95 87.45 $^{1}S_{0}$ 1.7841		
3	31 69.723 3 Ga Gallium 302.93 2478 $^{2}P_{1/2}$ 5.91	32 72.61 4 Ge Germanium 1210.4 3107 $^{3}P_{0}$ 5.32	33 74.9216 5,3 As Arsenic 1090 876 $^{4}S_{3/2}$ 5.78	34 78.96 6,4,2 Se Selenium 494 958 $^{3}P_{2}$ 4.79	35 79.904 5,3,1 Br Bromine 265.85 331.85 $^{2}P_{3/2}$ 3.12	36 83.80 0 Kr Krypton 116 209.4 $^{1}S_{0}$ 3.74		
4	49 114.82 3 In Indium 429.78 2350 $^{2}P_{1/2}$ 7.31	50 118.710 4,2 Sn Tin 505.12 2879 $^{3}P_{0}$ 7.31	51 121.757 5,3 Sb Antimony 903.91 1860 $^{4}S_{3/2}$ 6.68	52 127.60 6,4,2 Te Tellurium 722.72 1261 $^{3}P_{2}$ 6.24	53 126.9045 7,5,1 I Iodine 386.7 457.5 $^{2}P_{3/2}$ 4.93	54 131.29 0 Xe Xenon 161.39 165.1 $^{1}S_{0}$ 5.001		
5	81 204.383 1,3 Tl Thallium 577 1746 $^{2}P_{1/2}$ 11.85	82 207.2 4,2 Pb Lead 600.65 2023 $^{3}P_{0}$ 11.35	83 208.9804 5,3 Bi Bismuth 544.59 1837 $^{4}S_{3/2}$ 9.78	84 (209) 6,4,2 Po Polonium 527 ? $^{3}P_{2}$ 9.3	85 (210) 7,5,3,1 At Astatine 575 ? 302 $^{2}P_{3/2}$ 9.23	86 (222) 0,2 Rn Radon 211.4 377.37 $^{1}S_{0}$ 9.001		
6	113 (284) Uut Ununtrium 700 ? ? ? 5.5	114 (289) Uuq Ununquadium 340 ? ? ? 10.4	115 (288) Uup Ununpentium 670 ? ? ? 13.5	116 (292) Uuh Ununhexium 637 ? ? ? 12.9	117 (294) Uus Ununseptium 673 ? ? ? 7.2	118 (294) Uuo Ununoctium 325 ? ? ? 4.9		

	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIII	VIII	VIII	IB	IIB
4	21 44.9559 2,3 Sc Scandium 1814 3104 $^{2}D_{3/2}$ 2.99	22 47.88 4,3 Ti Titanium 1941 3560 $^{3}F_{2}$ 4.54	23 50.9415 5,4,3,2 V Vanadium 2163 3650 $^{4}F_{3/2}$ 6.11	24 51.996 6,3,2 Cr Chromium 2130 2945 $^{7}S_{3}$ 7.19	25 54.9380 7,6,4,3,2 Mn Manganese 1518 2235 $^{6}S_{5/2}$ 7.44	26 55.847 3,2 Fe Iron 1809 3023 $^{5}D_{4}$ 7.874	27 58.9332 3,2 Co Cobalt 1768 3143 $^{4}F_{9/2}$ 8.90	28 58.6934 3,2 Ni Nickel 1728 3005 $^{3}F_{4}$ 8.90	29 63.546 2,1 Cu Copper 1356.6 2840 $^{2}S_{1/2}$ 8.96	30 65.39 2 Zn Zinc 692.73 1180 $^{1}S_{0}$ 7.13
5	39 88.9059 3 Y Yttrium 1795 3611 $^{2}D_{3/2}$ 4.47	40 91.224 4 Zr Zirconium 2128 4682 $^{3}F_{2}$ 6.51	41 92.9064 5 Nb Niobium 2744 5018 $^{6}D_{1/2}$ 8.57	42 95.94 6 Mo Molybdenum 2890 4912 $^{7}S_{3}$ 10.22	43 (98) 7 Tc Technetium 2427 4538 $^{6}S_{5/2}$ 11.5	44 101.07 4 Ru Ruthenium 2610 4423 $^{5}F_{5}$ 12.37	45 102.9055 3 Rh Rhodium 2236 3970 $^{4}F_{9/2}$ 12.41	46 106.42 4 Pd Palladium 1825 3240 $^{1}S_{0}$ 12.0	47 107.868 3 Ag Silver 1235.08 2436 $^{2}S_{1/2}$ 10.50	48 112.41 3 Cd Cadmium 594.26 1040 $^{1}S_{0}$ 8.65
6	57 138.9055 3 La Lanthanum 1191 3737 $^{2}D_{3/2}$ 6.15	72 178.49 ★ 4 Hf Hafnium 2501 4603 $^{3}F_{2}$ 13.31	73 180.9479 ★ 5 Ta Tantalum 3293 5731 $^{4}F_{3/2}$ 16.65	74 183.85 6 W Tungsten 3695 5828 $^{5}D_{0}$ 19.3	75 186.207 7,6 Re Rhenium 3459 5869 $^{6}S_{5/2}$ 21.0	76 190.2 4,3,2 Os Osmium 3306 5300 $^{5}D_{4}$ 22.6	77 192.22 4,3 Ir Iridium 2720 4100 $^{4}F_{9/2}$ 22.65	78 195.08 4,2 Pt Platinum 2041.4 4100 $^{3}D_{3}$ 21.45	79 196.9665 3,1 Au Gold 1337.58 3130 $^{2}S_{1/2}$ 19.3	80 200.59 2,1 Hg Mercury 234.31 630 $^{1}S_{0}$ 13.55
7	89 (227) 3 Ac Actinium 1324 3472 $^{2}D_{3/2}$ 10.07	104 (261) Rf Rutherfordium [Rn]5f^{14}6d^{2}7s^{2}	105 (262) Ha Hahnium [Rn]5f^{14}6d^{3}7s^{2}	106 (263) Sg Seaborgium [Rn]5f^{14}6d^{4}7s^{2}	107 (262) Uns Unnilseptium [Rn]5f^{14}6d^{5}7s^{2}	108 (265) Uno Unniloctium [Rn]5f^{14}6d^{6}7s^{2}	109 (266) Une Unnilennium [Rn]5f^{14}6d^{7}7s^{2}	110 (272) Uun Ununnilium [Rn]5f^{14}6d^{8}7s^{2}		

	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIII	VIII	VIII	IB	IIB
4	57 138.9055 11 6 3 La Lanthanum 3737 1191 $^{2}D_{3/2}$ 6.15	58 140.12 3,4 6.77 1071 3716 Ce Cerium [Xe]4f^{1}5d^{1}6s^{2}	59 140.9077 3,4 6.77 1204 3785 Pr Praseodymium [Xe]4f^{3}6s^{2}	60 144.24 3 7.01 1294 3347 Nd Neodymium [Xe]4f^{4}6s^{2}	61 (145) 3 7.22 1315 3300 Pm Promethium [Xe]4f^{5}6s^{2}	62 150.36 3,2 7.52 1347 2067 Sm Samarium [Xe]4f^{6}6s^{2}	63 151.965 3,2 5.24 1095 1800 Eu Europium [Xe]4f^{7}6s^{2}	64 157.25 3 7.90 1585 3546 Gd Gadolinium [Xe]4f^{7}5d^{1}6s^{2}	65 158.9253 3,4 8.23 1629 3500 Tb Terbium [Xe]4f^{9}6s^{2}	66 162.50 3 8.55 1685 2840 Dy Dysprosium [Xe]4f^{10}6s^{2}
5	89 (227) 3 10.07 1324 3472 Ac Actinium [Rn]6d^{1}7s^{2}	90 232.0381 4 11.72 5060 4790 Th Thorium [Rn]6d^{2}7s^{2}	91 231.0359 5,4 15.4 4900 1845 Pa Protactinium [Rn]5f^{2}6d^{1}7s^{2}	92 238.029 6,5,4,3 18.95 4402 1405 U Uranium [Rn]5f^{3}6d^{1}7s^{2}	93 237.0482 6,5,4,3 20.3 4127 912 Np Neptunium [Rn]5f^{4}6d^{1}7s^{2}	94 (244) 6,5,4,3 19.84 3505 913 Pu Plutonium [Rn]5f^{6}7s^{2}	95 (243) 6,5,4,3 13.7 2880 1449 Am Americium [Rn]5f^{7}7s^{2}	96 (247) 3 13.5 3810 1613 Cm Curium [Rn]5f^{7}6d^{1}7s^{2}	97 (247) 4,3 14 — — Bk Berkelium [Rn]5f^{9}7s^{2}	98 (251) 3 — 1173? — Cf Californium [Rn]5f^{10}7s^{2}

NOTES:
(1) Black — solid
Red — gas
Blue — liquid

(2) Based upon carbon-12. ( ) indicates most stable or best known isotope.
(3) Entries marked with ? appear later in this table.

SARGENT-WELCH

VWR

Scanné avec CamScanner

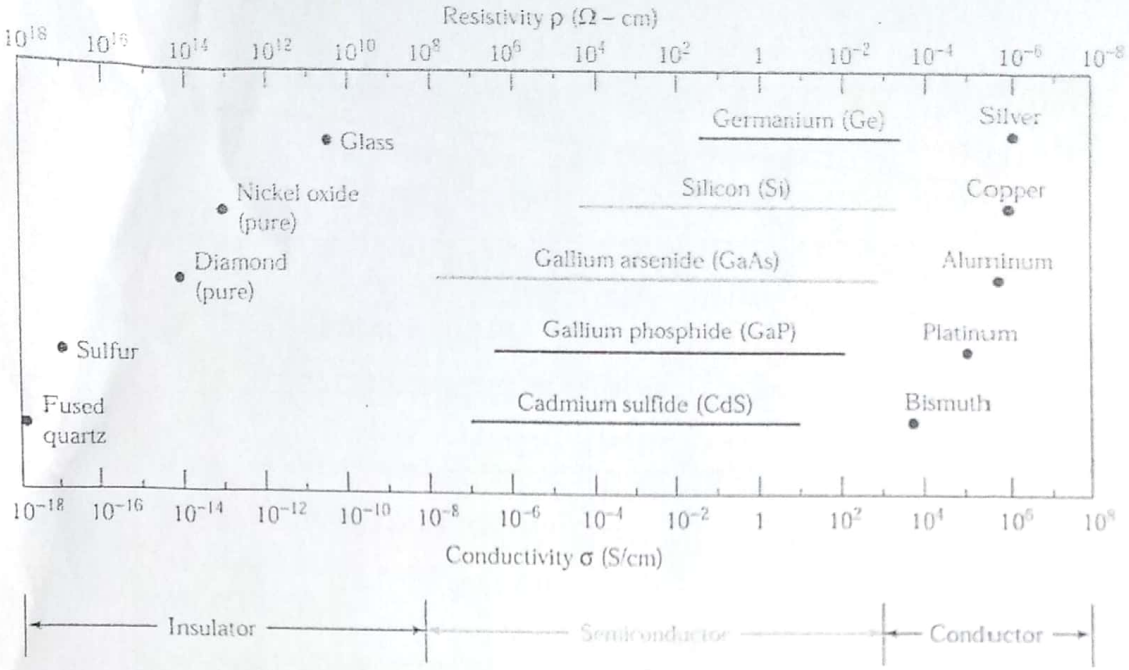


Fig. 9 Gamme typique de conductivités pour les isolants, les semi-conducteurs et les conducteurs.

TABLE 2 Semiconductor Materials[2]

General Classification	Semiconductor	
	Symbol	Name
Element	Si	Silicon
	Ge	Germanium
Binary compound		
IV-IV	SiC	Silicon carbide
III-V	AlP	Aluminum phosphide
	AlAs	Aluminum arsenide
	AlSb	Aluminum antimonide
	GaN	Gallium nitride
	GaP	Gallium phosphide
	GaAs	Gallium arsenide
	GaSb	Gallium antimonide
	InP	Indium phosphide
	InAs	Indium arsenide
	InSb	Indium antimonide
II-VI	ZnO	Zinc oxide
	ZnS	Zinc sulfide
	ZnSe	Zinc selenide
	ZnTe	Zinc telluride
	CdS	Cadmium sulfide
	CdSe	Cadmium selenide
	CdTe	Cadmium telluride
	HgS	Mercury sulfide
IV-VI	PbS	Lead sulfide
	PbSe	Lead selenide
	PbTe	Lead telluride
Ternary compound	$Al_xGa_{1-x}As$	Aluminum gallium arsenide
	$Al_xIn_{1-x}As$	Aluminum indium arsenide
	$GaAs_{1-x}P_x$	Gallium arsenic phosphide
	$Ga_xIn_{1-x}N$	Gallium indium nitride
	$Ga_xIn_{1-x}As$	Gallium indium arsenide
	$Ga_xIn_{1-x}P$	Gallium indium phosphide
Quaternary compound	$Al_xGa_{1-x}As_ySb_{1-y}$	Aluminum gallium arsenic antimonide
	$Ga_xIn_{1-x}As_{1-y}P_y$	Gallium indium arsenic phosphide

Scanné avec CamScanner

TABLE OF PERIODIC PROPERTIES OF THE ELEMENTS

Percent Ionic Character of a Single Chemical Bond

Difference in electronegativity		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2
Percent ionic character	%	0.5	1	2	4	6	9	12	15	19	22	26	30	34	39	43	47	51	55	59	63	67	70	74	76	79	82	84	86	88	89	91	92

DATA CONCERNING THE MORE STABLE ELEMENTARY (SUBATOMIC) PARTICLES

	Neutron	Proton	Electron*	Neutrino*	Photon
Symbol	n	p	e (e-)	ν	γ
Rest mass (kg)	1.67495×10^{-27}	1.67265×10^{-27}	9.1095×10^{-31}	~0	0
Relative atomic mass (^{12}C=12)	1.008665	1.007276	5.48580×10^{-4}	~0	0
Charge (C)	0	1.60219×10^{-19}	-1.60219×10^{-19}	0	0
Radius (m)	8×10^{-16}	8×10^{-16}	$< 1 \times 10^{-16}$	~0	0
Spin quantum number	1/2	1/2	1/2	1/2	1
Magnetic Moment†	$-1.913\ \mu_N$	$2.793\ \mu_N$	$1.001\ \mu_B$	0	0

* The positron (e^+) has properties similar to those of the (negative) electron or beta particle except that its charge has opposite sign (+). The antineutrino ($\bar{\nu}$) has properties similar to those of the neutrino except that its spin (or rotation) is opposite in relation to its direction of propagation.

An antineutrino accompanies release of an electron in radioactive β (particle) decay, whereas a neutrino accompanies the release of a positron in β^+ decay.

† μ_B=Bohr magneton and μ_N=Nuclear magneton.

GROUP IA	IIA	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIIIA	VIIIA	VIIIA	IB	IIB	IIIB	IVB	VB	VIB	VIIB	VIII
H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac**	Rf	Ha	Sg	Uns	Uno	Une	Uun								

The A & B subgroup designations, rows 4, 5, 6 and 7, are those recomm[ended by the International] Union of Pure and Applied Chemistry.

★	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
★★	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

KEY

Zn: 1.25, 1.65, 1.53, 115.30, 9.20, 7.38, 9.394, 16.9, 0.388, 116

- SYMBOL
- CRYSTAL STRUCTURE (2)
- ACID-BASE PROPERTIES (1)
- ELECTRONEGATIVITY, (Pauling's)
- COVALENT RADIUS, Å
- ATOMIC RADIUS, Å (7)
- ATOMIC VOLUME, cm³/mol (8)
- FIRST IONIZATION POTENTIAL V
- SPECIFIC HEAT CAPACITY, $J g^{-1} K^{-1}$ (3)
- THERMAL CONDUCTIVITY, $W m^{-1} K^{-1}$ (3)
- ELECTRICAL CONDUCTIVITY $10^6 \Omega^{-1} m^{-1}$ (6)
- HEAT OF FUSION kJ / mol (5)
- HEAT OF VAPORIZATION kJ / mol (4)

NOTES: (1) For representative oxides (higher valence) of group. Oxide is acidic if color is red, basic if color is blue and amphoteric if both colors are shown. Intensity of color indicates relative strength.

(2) Cubic, face centered; cubic, body centered; cubic; hexagonal; rhombohedral; tetragonal; orthorhombic; monoclinic.

(3) At 300 K (27°C)
(4) At boiling point
(5) At melting point
(6) Generally at 293 K (20°C) for polycrystalline material
(7) Quantum mechanical value for free atom
(8) From density at 300 K (27°C) for liquid and solid elements; values for gaseous elements refer to liquid state at boiling point

VWR Sargent Welch Scientific Products
P.O. Box 5229, Buffalo Grove, IL 60089-5229
1-800-727-4368 FAX 1-800-676-2540

© Copyright 1979
© Copyright 1980
© Copyright 1992
© Copyright 1993
© Copyright 1994
© Copyright 1995
© Copyright 1996 SARGENT-WELCH/VWR SCIENTIFIC PRODUCTS

Catalog Number S-18806

Un autre électron libre peut combler cette lacune (on dit qu'il se combine). Ceci peut être vu comme un déplacement de trou. C'est pour cette raison que dans la représentation de diagramme d'énergie des semi-conducteurs nous avons mis des trous dans la bande de valence et des électrons dans la bande de conduction.

Rq :
Nous allons utiliser dans ce cours la masse effective de l'électron m_n (au lieu de la masse propre m_e) pour tenir compte de l'effet de réseau cristallin ($m_e \vec{\gamma} = \vec{F}_{R+} + \vec{F}_e$)
$\Rightarrow m_n \vec{\gamma} = \vec{F}_e$
Il en est de même pour les trous avec la masse effective m_p

III - Population des porteurs :

III-1- Densité des états :

La densité des états c'est le nombre d'état (ou niveaux) d'énergie par unité de volume compris entre E et $E + dE$.
On montre que :

$$D_n(E) = 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2}$$

pour les électrons

dans BC ; h : cte de Planck.

pour les Trous

$$D_p(E) = 4\pi \left(\frac{2m_p}{h^2}\right)^{3/2} (E_v - E)^{1/2}$$

dans BV.

$D(E) = 0$ dans la BI

Exercice : Quel est le nombre d'états dans BC possible compris entre E_c et $E_c + kT$.
(k cte de Boltzmann $= 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K)

$$N = \int_{E_c}^{E_c + kT} D_n(E)\, dE$$

III-2- Semi-conducteur intrinsèque - Fonction Fermi - Dirac :

À une température donnée, l'agitation thermique provoque l'excitation de certains électrons lesquelles passent de la bande de valence à la bande de conduction, laissant autant de trous dans la bande de valence.
Un semi-conducteur intrinsèque est un semi-conducteur sans impuretés.
Dans la pratique ces impuretés existent mais ils sont en faible proportion, par exemple le Si on arrive à la $10^{\text{ème}}$ atome d'impuretés/cm^3
As Ca ... $10^{?}$ ... /cm^3
Dans 1 cm^3
Rappel : 1 cm^3 de SC on a 10^{22} atome

Donc l'effet des contraintes est minime.

Les états d'énergie disponible pour l'électron ne sont pas tous occupés, ils sont régis par une loi de probabilité : la fonction de Fermi-Dirac :

$$F_n(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

E_F s'appelle le niveau de Fermi. C'est un niveau dont la probabilité est égale à $1/2$

$0 \leqslant F_n(E) \leqslant 1$

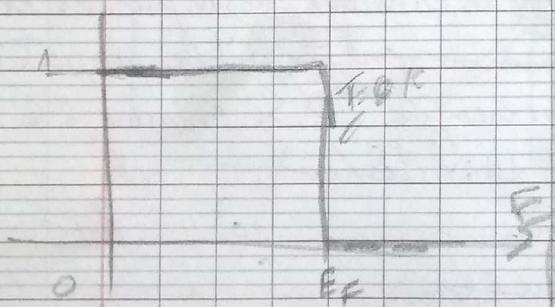
k est la constante de Boltzmann.

$k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K.

kT est exprimé plutôt en eV.

$1\,eV = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J.

à $T = 300K$ (température ambiante) on a $kT = 0,0259$ eV.



à $T = 0K$ $F_n(E) = \begin{cases} 1 & \text{pour } E < E_F \\ 0 & E > E_F \end{cases}$

Si :

$E - E_F = 3kT \Rightarrow F_n(E) = 0,05$

$E - E_F = -3kT$, $F_n(E) \simeq 1$.



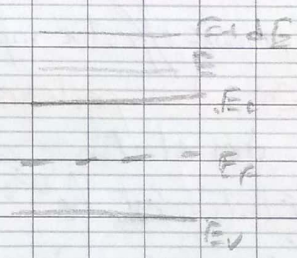
Si $E - E_F > 3kT$

$$F_n(E) \simeq \exp\left(-\frac{(E - E_F)}{kT}\right)$$

Par le Trou : $F_p(E) = 1 - F_n(E)$.

III-3- Concentration des porteurs dans sc intrinsèque :

a- concentration des électrons dans la bande de conduction :



$dN = D_n(E) F_n(E)\, dE$

$$n = \int_{E_c}^{+\infty} D_n(E) F_n(E)\, dE$$

Ex : Rq $n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$

identifions N_c.

Sachant que $\int_0^{+\infty} x^{1/2} e^{-x}\, dx = \frac{\sqrt{\pi}}{2}$

Rappel : $D_n = 4\pi \left(\frac{2 m_n}{h^2}\right)^{3/2} (E - E_c)^{1/2}$

LES LIGNES DE TRANSMISSION

$$\frac{\partial \underline{U}}{\partial z} = -R'\underline{I} - L'\frac{\partial \underline{I}}{\partial t}$$

$$\frac{\partial \underline{I}}{\partial z} = -G'\underline{U} - C'\frac{\partial \underline{U}}{\partial t}$$

Equations des télégraphistes

$$\frac{\partial^2 \underline{U}}{\partial z^2} - \frac{\partial^2 \underline{U}}{\partial t^2} L'C' - \frac{\partial \underline{U}}{\partial t}[R'C' + L'G'] - R'G'\underline{U} = 0$$

Régime sinusoïdal

$$\underline{U}(z,t) = \underline{u}(z)e^{j\omega t}$$

$$\frac{\partial \underline{u}}{\partial z} = -(R' + j\omega L')\underline{i}$$

$$\frac{\partial \underline{i}}{\partial z} = -(G' + j\omega C')\underline{u}$$

$$\frac{\partial^2 \underline{u}}{\partial z^2} = (R' + j\omega L')(G' + j\omega C')\underline{u}$$

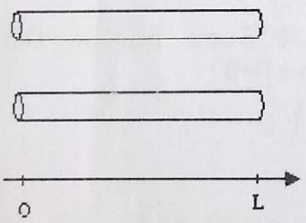
$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta$$

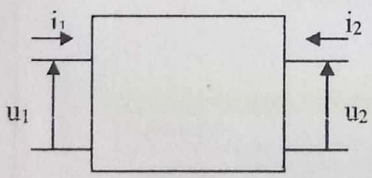
$$\underline{u}(z) = \underline{u}_+ e^{-\underline{\gamma} z} + \underline{u}_- e^{+\underline{\gamma} z}$$

$$\underline{i}(z) = \underline{Y}_c(\underline{u}_+ e^{-\underline{\gamma} z} - \underline{u}_- e^{+\underline{\gamma} z})$$

$$\underline{Z}_c = \frac{\underline{u}_+}{\underline{i}_+} = -\frac{\underline{u}_-}{\underline{i}_-} = \sqrt{\frac{(R' + j\omega L')}{(G' + j\omega C')}}$$

Une ligne de transmission de longueur L est équivalente à un quadripôle :





$$\begin{pmatrix} \underline{u}_2 \\ \underline{i}_2 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \cosh(\underline{\gamma}L) & -\underline{Z}_c \sinh(\underline{\gamma}L) \\ -\underline{Y}_c \sinh(\underline{\gamma}L) & \cosh(\underline{\gamma}L) \end{pmatrix}}_{\text{matrice de chaine}} \begin{pmatrix} \underline{u}_1 \\ \underline{i}_1 \end{pmatrix}$$

Coefficient de reflection :

$$\underline{\rho}(z) = \frac{\underline{u}_-}{\underline{u}_+} e^{2\underline{\gamma} z}$$

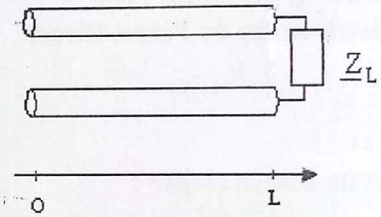
$$\underline{u}(z) = \underline{u}_+ e^{-\underline{\gamma} z}[1 + \underline{\rho}(z)]$$

$$\underline{i}(z) = \underline{Y}_c \underline{u}_+ e^{-\underline{\gamma} z}[1 - \underline{\rho}(z)]$$

$$\underline{Z}(z) = \underline{Z}_c \frac{1 + \underline{\rho}(z)}{1 - \underline{\rho}(z)}$$

$$\underline{\rho}(z) = \frac{\underline{Z}(z) - \underline{Z}_c}{\underline{Z}(z) + \underline{Z}_c}$$

LIGNE TERMINEE PAR UNE CHERGE



$$\underline{\rho}(z) = \underline{\rho}_L e^{2\underline{\gamma}(z-L)}$$

$$\underline{Z}(z) = \underline{Z}_c \frac{\underline{Z}_L - \underline{Z}_c \tanh(\underline{\gamma}(z-L))}{\underline{Z}_c - \underline{Z}_L \tanh(\underline{\gamma}(z-L))}$$

Cas d'une ligne adaptée :

$$\underline{Z}_L = \underline{Z}_c \Rightarrow \underline{\rho}_L = 0; \underline{u}_- = 0; \underline{\rho}(z) = 0;$$

$$\underline{Z}(z) = \underline{Z}_c$$

Cas d'une ligne terminée par un court-circuit(cc)

$$\underline{Z}_L = 0; \underline{u}_L = 0; \underline{\rho}_L = -1; \underline{\rho}(z) = -e^{2\underline{\gamma}(z-L)};$$

$$\underline{Z}(z) = -\underline{Z}_c \tanh[\underline{\gamma}(z-L)]$$

Cas d'une ligne terminée par un circuit ouvert(co)

$$\underline{Z}_L = \infty; \underline{i}_L = 0; \underline{\rho}_L = +1; \underline{\rho}(z) = +e^{2\underline{\gamma}(z-L)};$$

$$\underline{Z}(z) = -\underline{Z}_c \coth[\underline{\gamma}(z-L)]$$

Scanné avec CamScanner

Semiconducteur intrinsèque

$n=p=n_i$; $n = N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right)$; $p = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$

Ex : montrer que $E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln \frac{N_v}{N_c}$

$n = p \Rightarrow N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$

$\Rightarrow \frac{N_v}{N_c} = \exp\left(\frac{\quad}{kT}\right) \Rightarrow \ln \frac{N_v}{N_c} = \ldots\ldots$

$\Rightarrow E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right)$

A la température ambiante, le second terme est très faible devant le premier $\Rightarrow$ le niveau de Fermi intrinsèque est presque au milieu de la BI

Loi d'action de masse :

$\boxed{np = n_i^2}$ (on a $n = n_i$ et $p = n_i \Rightarrow np = n_i^2$)

à l'équilibre thermique

Ex : Montrer que

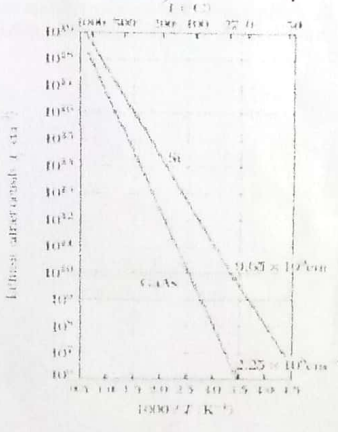
$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left[-\left(\frac{E_g}{2kT}\right)\right] \; ; \; E_g = E_c - E_v$$

Solution

on utilise $np = n_i^2 \Rightarrow N_c \exp\left(-\frac{E_c - E_F}{kT}\right) \times N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right) = n_i^2$

$\Rightarrow n_i^2 = N_c N_v \exp\left[-\left(\frac{E_c - E_v}{kT}\right)\right]$

$\Rightarrow n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left[-\left(\frac{E_g}{2kT}\right)\right]$



Remarque

lorsque $T \nearrow$ $E_g \searrow$ et $n_i \nearrow$

IV Semiconducteurs extrinsèques

IV-1-Généralités

Lorsqu'on introduit des impuretés d'une manière volontaire, dans un semiconducteur après l'avoir purifié, on dit qu'**on le dope**. La proportion d'imputretés est de l'ordre de 10^{-8}-10^{-6}; le semiconducteur est alors dit **extrinsèque**. Ainsi, pour cristal semiconducteur Si par ex, dans un cm^3, on a, à peu près, 10^{22} atomes de semiconducteur, dont 10^{10} atomes sont les impuretés involontaires qui se trouvent là forcément et dont l'effet perturbateur est négligeable; et il y a 10^{16} (par exemple) d'impuretés introduites volontairement dans le processus de dopage.

IV-2-Semiconducteur extrinsèque de type N:

Lorsque le semiconducteur appartient à la colonne IV du tableau périodique (Si par ex), et lorsque l'élément dopant appartient à la colonne V (P ou As par ex), alors un atome As remplace un atome Si dans le réseau cristallin;

Scanné avec CamScanner

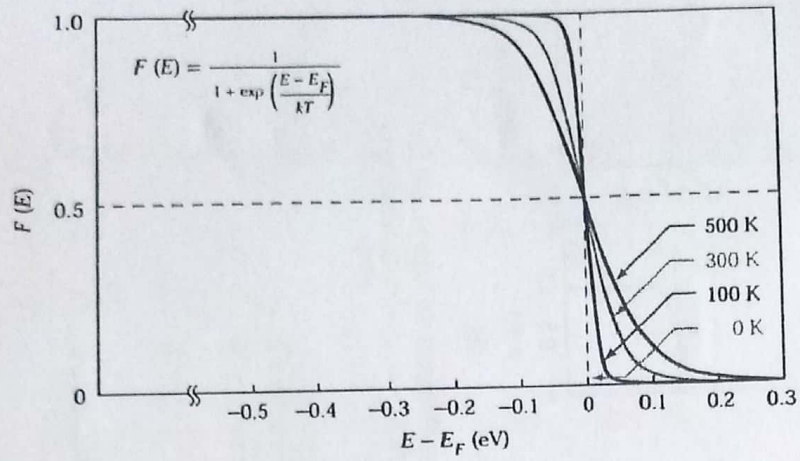


Fig. 14 Fonction de distribution de Fermi F(E) en fonction de (E - E_F) pour différentes températures.

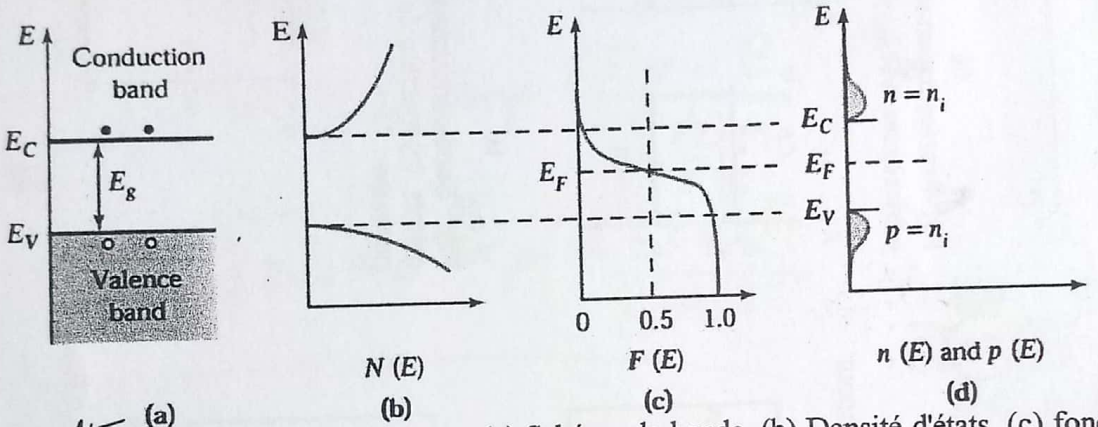
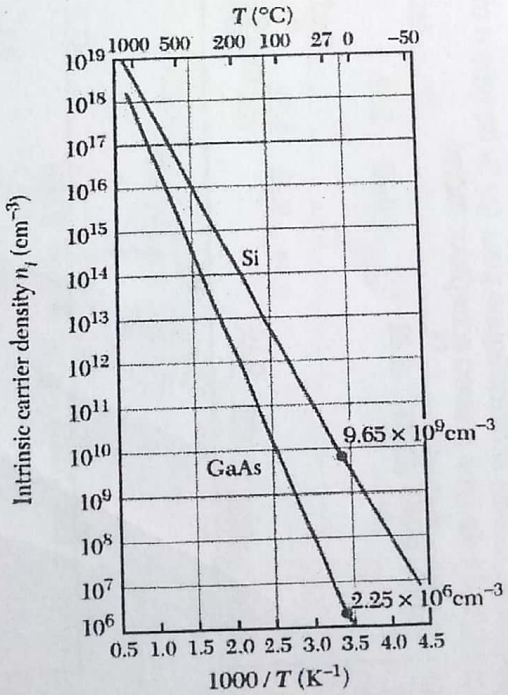


Fig. 15 Semi-conducteur intrinsèque. (a) Schéma de bande. (b) Densité d'états. (c) fonction de distribution de Fermi. d) Concentration de la porteuse.



16

Fig. Densité de porteurs intrinsèques en Si et AsGa en fonction de l'inverse de la température.

Scanné avec CamScanner

$$n = \int_{E_c}^{+\infty} D_n(E)\, F_n(E)\, dE$$

$$= \int_{E_c}^{+\infty} 4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{3/2} (E-E_c)^{3/2} \exp\left(-\frac{E-E_F}{kT}\right) dE$$

$$4\pi \left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{3/2} \int_{E_c}^{+\infty} \left(\frac{E-E_c}{kT}\right)^{1/2} \exp\left(-\frac{(E-E_c)-(E_F-E_c)}{kT}\right)$$

$$4\pi (kT)^{3/2} \left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{E_F-E_c}{kT}\right) \int_0^{+\infty} x^{1/2} e^{-x}\, dx$$

$$4\pi (kT)^{3/2} \left(\frac{2m_n}{h^2}\right)^{3/2} \exp\left(\frac{E_F-E_c}{kT}\right) \frac{\sqrt{\pi}}{2}$$

avec $N_c = \frac{2}{h^3} (2\pi m_n kT)^{3/2}$

b) Concentration des Trous.

on peut montrer de même que:

$$p = N_v \exp\left(-\frac{E_F - E_v}{kT}\right)$$

avec $N_v = \frac{2}{h^3} (2\pi m_p kT)^{3/2}$

à titre indicatif.

	Si	As Ga
N_v cm^{-3}	$1,04 \cdot 10^{19}$	$7,0 \cdot 10^{18}$

N_c s'appelle densité effective des états dans la B de C

N_v s'appelle densité effective des états dans la B de V

Rq importante:

Dans un semi-conducteur intrinsèque on a: $n = p = n_i$

n_i : concentration intrinsèque.

Ex: Montrer que un sc intrinsèque on a:

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_v}{N_c}\right)$$

Scanné avec CamScanner

Chapitre I Les lignes de transmission

I- Introduction :

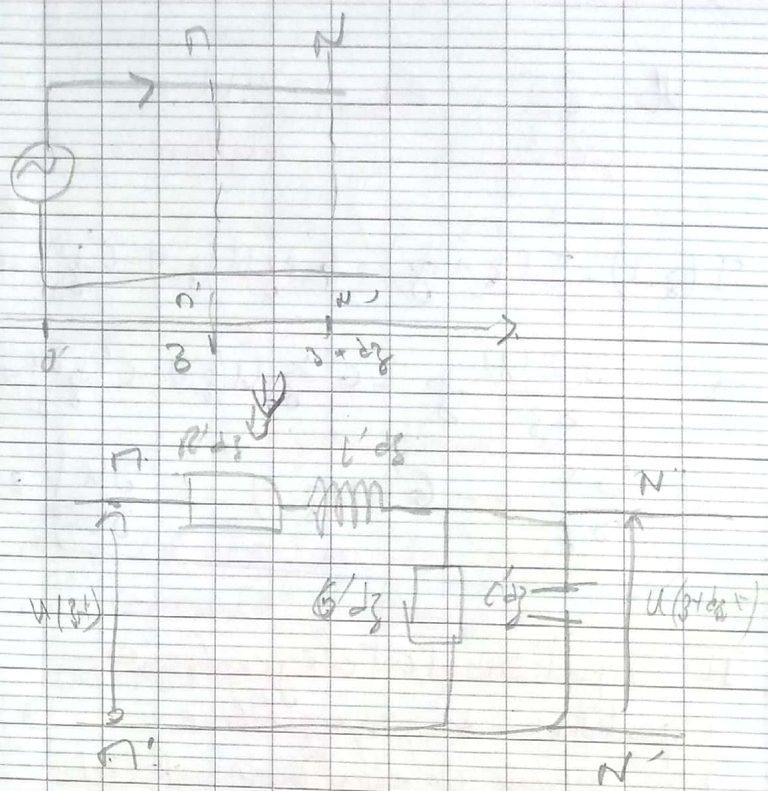
Lorsqu'un conducteur est parcouru par un signal dont la longueur d'onde est comparable à la longueur du conducteur, on doit prendre en compte le fait qu'en deux points différent de ce conducteur on n'a pas la même tension ni le même courant

$\lambda = \frac{c}{f}$, $f = 1\,MHz \Rightarrow \lambda = \frac{3.10^8}{10^8} = 3.10^{-1}\,m$

$f = 1\,GHz = 10^9\,Hz \Rightarrow \lambda = \frac{3.10^8}{10^9} = 0,3\,m = 30\,cm$

hyperfréquences = micro-ondes :

Cette prise en compte se traduit dans le cas d'une ligne à deux conducteurs (exple : ligne bifilaire, ligne coaxiale, ligne triplaque ...) homogène dans sa direction longitudinal, par la modélisation de chaque portion de longueur dz par le quadripôle à constantes localisées suivants :



R' : résistance linéique de la ligne (en Ω/m)

L' : self inductance linéique de la ligne (en H/m)

G' : conductance linéique en (Ω^{-1}/m)

C' : capacité linéique (en F/m)

Appliquons les lois des circuit à ce quadripôle.

a) Loi des mailles :

$u(z,t) - R' dz\, I(z,t) - L' dz \frac{\partial I}{\partial t} - u(z+dz,t) = 0$

$\Rightarrow -\frac{\partial u(z,t)}{\partial z} dz - R' dz\, I(z,t) - L' dz \frac{\partial I}{\partial t} = 0$

$\rightarrow \boxed{\frac{\partial u}{\partial z} = -R' I(z,t) - L' \frac{\partial I}{\partial t}} \quad (1)$

b) Loi des noeuds :

$\underline{U} = -Z\underline{I} \longleftrightarrow \underline{I} = -Y\underline{U}$

rapide — admittance

$I(z,t) - I(z+dz) - G' dz\, u(z,t) - C' dz \frac{\partial u}{\partial t} = 0$

$\Rightarrow -\frac{\partial I(z)}{\partial z} dz - G' dz\, u(z,t) - C' dz \frac{\partial u}{\partial t} = 0$

$\Rightarrow \boxed{\frac{\partial I}{\partial z} = -G' u(z,t) - C' \frac{\partial u}{\partial t}} \quad (2)$

II - Equations des télégraphistes - equations de propagation :

Ex : combien les equations (1) et (2) pour obtenir une equation en U seulement

En supposant que $\frac{\partial^2 I}{\partial t \partial z} = \frac{\partial^2 I}{\partial z \partial t}$

$\frac{\partial}{\partial z}(1) \Rightarrow \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -R' \frac{\partial I}{\partial z} - L' \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial z}$

$\frac{\partial}{\partial t}(2) \Rightarrow \frac{\partial^2 I}{\partial t \partial z} = -G' \frac{\partial u}{\partial t} - C' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$

$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -R' \left[-G' u - C' \frac{\partial u}{\partial t}\right] - L' \left[-G' \frac{\partial u}{\partial t} - C' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}\right]$

$\Rightarrow \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - R'G'u - [R'C' + L'G'] \frac{\partial u}{\partial t} - L'C' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$

Cette equation s'appelle equation des télégraphistes en U

Ex : Pq qu'on obtient une équation semblable en I.

En régime sinusoïdal (ou harmonique) on utilise la notation complexe.

$u(z,t) \to \underline{u}(z) e^{j\omega t}$

$I(z,t) \to \underline{i}(z) e^{j\omega t}$

Réécrivons les equations (1) et (2) dans ce cas là.

$(1) \Rightarrow \frac{d\underline{u}(z) e^{j\omega t}}{dz} = -R' \underline{i}(z) e^{j\omega t} - L' j\omega \underline{i}(z) e^{j\omega t}$

$\boxed{\frac{d\underline{u}(z)}{dz} = -(R' + j\omega L') \underline{i}(z)} \quad (1)'$

$(2) \Rightarrow \boxed{\frac{d\underline{i}(z)}{dz} = -(G' + j\omega C') \underline{u}(z)} \quad (2)'$

$(1)'\,d(2)' \Rightarrow \frac{d^2 \underline{u}}{dz^2} = -(R' + j\omega L') \frac{d\underline{i}(z)}{dz}$

$\Rightarrow \frac{d^2 \underline{u}}{dz^2} = (R' + j\omega L')(G' + j\omega C') \underline{u}(z)$

C'est l'eq de propagation en $\underline{u}(z)$

On pose $\underline{\gamma}^2 = (R' + j\omega L')(G' + j\omega C')$

$\Rightarrow \boxed{\frac{d^2 \underline{u}}{dz^2} = \underline{\gamma}^2 \underline{u}} \quad (3b)$

Scanné avec CamScanner

Ex: obtenir une éq en $i(z)$ seulement pour ce cas là :

$$\frac{\partial^2 \underline{i}(z)}{\partial z^2} = \underline{\gamma}^2 \underline{i}(z) \quad (3C)$$

III/ Résolution des équations de Propagation :

$$\frac{d^2 \underline{u}}{dz^2} - \underline{\gamma}^2 \underline{u} = 0.$$

$$\Rightarrow \underline{u}(z) = \underline{u}_+ e^{-\underline{\gamma} z} + \underline{u}_- e^{\underline{\gamma} z}$$

$\underline{u}_+$ et $\underline{u}_-$: 2 constantes qui ont la dimension d'une tension.

$$\frac{d^2 \underline{u}(z)}{dz^2} - \underline{\gamma}^2 \underline{u}(z) = 0$$

$$\Rightarrow \underline{u}(z) = \underline{i}_+ e^{-\underline{\gamma} z} + \underline{i}_- e^{\underline{\gamma} z} \quad (4A)$$

$\underline{i}_+$, $\underline{i}_-$ sont 2 constantes homogènes à un courant.

Supposons on a une ligne infinies

en incorporant la dépendance temporelle on aura :

$$\underline{u}(z) e^{j\omega t} = \underbrace{\underline{u}_+ e^{(-\underline{\gamma} z + j\omega t)}}_{\text{onde aller}} + \underbrace{\underline{u}_- e^{(\underline{\gamma} z + j\omega t)}}_{\text{onde retour}} \quad (2\underline{\gamma} z)$$

$$\underline{u}_+ e^{-\alpha z} e^{-j(\beta z + \omega t)}$$

ici $\underline{u}_- = 0$: pas d'onde de retour.

$e^{-\alpha z}$ c'est une fonction $\searrow$: elle représente l'atténuation.

$e^{j(\omega t - \beta z)}$: se présente une onde progressive dans le sens des z $\nearrow$

Exercice :

l'onde progressive a une double périodicité

$\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$; λ : période spaciale longueur d'onde.

$\omega = \frac{2\pi}{T}$; T : période temporelle.

Ex : Dq.

$$\frac{\underline{u}_+}{\underline{i}_+} = \frac{-\underline{u}_-}{\underline{i}_-} = \underline{Z}_c$$

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

Scanné avec CamScanner

indication: utiliser (1)' et (2)'

$(1)' \Rightarrow \frac{du}{dz} = -(R' + j\omega L')\, i(z)$

$\frac{d}{dz}\left(\underline{i}_+ e^{-\gamma z} + \underline{i}_- e^{\gamma z}\right)$

$=$

$\underline{\gamma}\left(-\underline{u}_+ e^{-\gamma z} + \underline{u}_- e^{\gamma z}\right)$

$= -(R' + j\omega L')\left(\underline{i}_+ e^{-\gamma z} + \underline{i}_- e^{\gamma z}\right)$

$\begin{cases} -\underline{\gamma}\,\underline{u}_+ = -(R' + j\omega L')\,\underline{i}_+ \\ \underline{\gamma}\,\underline{u}_- = -(R' + j\omega L')\,\underline{i}_- \end{cases}$

$\Rightarrow \frac{\underline{u}_+}{\underline{i}_+} = \frac{R' + j\omega L'}{\underline{\gamma}}$

$\Rightarrow \frac{\underline{u}_-}{\underline{i}_-} = \frac{-R' + j\omega L'}{\underline{\gamma}}$

$\frac{R' + j\omega L'}{\underline{\gamma}} = \frac{R' + j\omega L'}{\sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}}$

$= \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} = Z_c$

Z_c : impédance caractéristique de la ligne.

Il s'en suit que :

$\underline{u}(z) = \frac{1}{Z_c}\left(\underline{u}_+ e^{-\gamma z} - \underline{u}_- e^{\gamma z}\right)$ (4b)

$\frac{1}{Z_c} = Y_c$

Ex

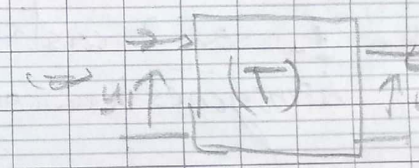
1) utiliser l'égalité

$\underline{\gamma} = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')} = \alpha + i\beta$

pour obtenir une expression de α et une de β en fonction de R', G', C', L' et ω.

2) Dans le cas de faible pertes où $G' \ll C'\omega$ et $R' \ll L'\omega$ simplifier les expressions de α et β.

II/ Quadripôles Equivalents :



Il s'en suit que :

$\underline{u}(z) = \frac{1}{Z_c}\left(\underline{u}_+ e^{-\gamma z} + \underline{u}_- e^{\gamma z}\right)$ (4b)

$\underline{u}(z) = \underline{u}_+ e^{-\gamma z} + \underline{u}_- e^{\gamma z}$ (4a)

Scanné avec CamScanner

V QUELQUES DEFINITIONS RELATIVES A UNE LIGNE DE TRANSMISSION:

V.1 Coefficient de Reflexion $\underline{\rho}(\beta)$:

$$\underline{\rho}(\beta) = \frac{\underline{u}_+ \exp(\underline{\gamma}\beta)}{\underline{u}_- \exp(-\underline{\gamma}\beta)} = \frac{\underline{u}_-}{\underline{u}_+} \exp(2\underline{\gamma}\beta) \quad \frac{\underline{u}_+}{\underline{u}_-} = \underline{\rho}(0) \Rightarrow \underline{\rho}(\beta) = \underline{\rho}(0) \exp(2\underline{\gamma}\beta)$$

d'où

$$\underline{u}(\beta) = u_+ \exp(-\gamma\beta)[1 + \underline{\rho}(0)]$$

$$\underline{i}(\beta) = Y_c u_+ \exp(-\gamma\beta)[1 - \underline{\rho}(\beta)]$$

V.2 Impédance Localisée

$$\underline{Z}(\beta) = \frac{\underline{u}(\beta)}{\underline{i}(\beta)} = Z_c \frac{1 + \underline{\rho}(\beta)}{1 - \underline{\rho}(\beta)}$$

Ex : Montrer que $\underline{\rho}(\beta) = \dfrac{\underline{Z}(\beta) - Z_c}{\underline{Z}(\beta) + Z_c}$

V.3 Puissance Complexe:

$$\underline{\mathcal{P}}(\beta) = \frac{1}{2}\underline{u}(\beta)\underline{i}^*(\beta) = P(\beta) + jS(\beta)$$

P est la puissance active → puissance consommée (par effet joule / rayonnement)

S est la puissance réactive → puissance stockée

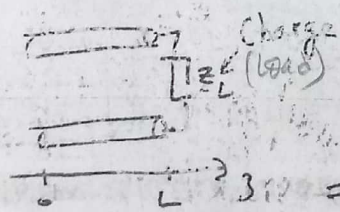
Ex : Montrer que lorsque Y_c est réelle pure alors.

$$P(\beta) = Y_c\left[|u_+|^2(\exp - 2\alpha\beta) - |u_-|^2\exp(2\alpha\beta)\right]$$

$$S(\beta) = Y_c\, 2\,\mathrm{Im}\left[\ldots \exp(2j\beta\beta)\right]$$

VI LIGNE TERMINÉE PAR UNE CHARGE:

VI-1 Coefficient de reflexion et impédance localisée



du fait de la continuité de $\underline{u}$ et de $\underline{i}$, on écrit

$$\underline{Z}(L) = \underline{Z}_L = Z_c \frac{1 + \underline{\rho}_L}{1 - \underline{\rho}_L}$$

$$\Rightarrow \underline{\rho}(L) = \underline{\rho}_L = \underline{\rho}(0)\exp(2\underline{\gamma}L) = \frac{\underline{Z}_L - Z_c}{\underline{Z}_L + Z_c}$$

et $\underline{\rho}(\beta) = \underline{\rho}(0)\exp(2\underline{\gamma}\beta) = \underline{\rho}_L \ldots \exp 2\underline{\gamma}(\beta - L)$

$$\underline{Z}(\beta) = Z_c \frac{1 + \underline{\rho}(\beta)}{1 - \underline{\rho}(\beta)} = Z_c \frac{Z_L + Z_c \tanh[\underline{\gamma}(\beta - L)]}{Z_L - Z_c \tanh[\underline{\gamma}(\beta - L)]}$$

Scanné avec CamScanner

Ex. soit un L.S qui a les données suivantes :

$\underline{Z}_{cc}(f_0) = j\,62{,}93\ \Omega$

$\underline{Z}_{co}(f_0) = -j\,89{,}38$

1) Calculer Z_c.

Réponse : $\sqrt{62{,}93 \times 89{,}38} = 75\ \Omega$

2) On a $\underline{Z}_L = (135 - j\,195)\ \Omega$

Déduire $\underline{f}$ $\Rightarrow$ $\underline{f} = \dfrac{Z_c - Z_L}{Z_c + Z_L} = ?$

$\underline{f} = 0{,}6012 + j\,0{,}3693 \Rightarrow |\underline{f}_L| = 0{,}705$

$\angle f_L = 0{,}5508\ \text{rad} = 31{,}56^\circ$

Scanné avec CamScanner

$$\begin{pmatrix} \underline{U}(z) \\ \underline{I}(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \frac{1}{Z_c} \end{pmatrix} \underline{U}_+ e^{\frac{\gamma z}{}} + \begin{pmatrix} 1 \\ -\frac{1}{Z_c} \end{pmatrix} \underline{U}_- e^{\frac{\gamma z}{}}$$

$$= \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ \frac{1}{Z_c} & -\frac{1}{Z_c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-\gamma z} & 0 \\ 0 & e^{\gamma z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_+ \\ \underline{U}_- \end{pmatrix} \quad (*)$$

Ex: 1) Ecrire la relation $(*)$ pour $z = 0$

2) " " " pour $z = L$

3) obtenir $(*)$ Eq $\begin{pmatrix} \underline{U}(z=L) \\ \underline{I}(z=L) \end{pmatrix} = [T] \begin{pmatrix} \underline{U}(z=0) \\ \underline{I}(z=0) \end{pmatrix}$

$$[T] = \begin{pmatrix} \cosh(\underline{\gamma} L) & -Z_c \sinh(\underline{\gamma} L) \\ -\frac{1}{Z_c} \sinh(\underline{\gamma} L) & \cosh(\underline{\gamma} L) \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} a & b \\ b & d \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{\det} \begin{pmatrix} d & -c \\ -b & a \end{pmatrix}$$

$$\frac{\partial U}{\partial z} = -RI(z,t) - L' \frac{\partial I}{\partial t} \quad (1) \qquad i = \frac{\partial q}{\partial t}$$

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -G' U(z,t) - C' \frac{\partial U}{\partial t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z} = R \cdot G' U(z,t) + RC' \frac{\partial U}{\partial t} \qquad \frac{\partial I}{\partial t \partial z}$$

$$+ L' G' \frac{\partial^2 U(z,t)}{\partial z}$$

$$\Rightarrow \frac{\partial^2 U(z,t)}{\partial z^2} (1 + L'G') = RC' \frac{\partial U}{\partial t} + RG' U(z,$$

$$\frac{d \underline{i}(z)}{dz} = -(G' + j\omega C') \underline{U}(z) \quad (*)$$

$$\frac{d^2 \underline{i}(z)}{dz^2} = -(G' + j\omega C') \frac{d \underline{U}(z)}{dz}$$

$$\frac{\partial^2 \underline{i}(z)}{\partial z^2} = (G' + j\omega C')(R + j\omega L') i(z)$$

Scanné avec CamScanner