

ANNA ZAWADZKA

**CIENKIE WARSTWY
I NANOSTRUKTURY
CIENKOWARSTWOWE –
EKSPERYMENTALNE METODY
WYTWARZANIA I BADANIA
WŁAŚCIWOŚCI**



WYDAWNICTWO NAUKOWE
UNIWERSYTETU MIKOŁAJA KOPERNIKA

Toruń 2016

Recenzent
prof. Bouchta Sahraoui

Redakcja wydawnicza
Elżbieta Kossarzecka

Projekt okładki
Krzysztof Skrzypczyk

Na okładce:
„Obraz AFM nanostrukturalnej warstwy ftalocyjaniny cynku (ZnPc) na podłożu krzemowym”,
wynik badań własnych autorki

ISBN: 978-83-231-3513-5

© Copyright by Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika
Toruń 2016

Książka powstała dzięki stypendium na pisanie monografii
przyznanego przez JM Rektora Uniwersytetu Mikołaja Kopernika

WYDAWNICTWO NAUKOWE UNIWERSYTETU MIKOŁAJA KOPERNIKA

Redakcja: ul. Gagarina 5, 87-100 Toruń

tel. 56 611 42 95, fax 56 611 47 05

e-mail: wydawnictwo@umk.pl

www.wydawnictwoumk.pl

Dystrybucja: ul. Mickiewicza 2/4, 87-100 Toruń

tel./fax 56 611 42 38

e-mail: books@umk.pl

Druk: Drukarnia Wydawnictwa Naukowego Uniwersytetu Mikołaja Kopernika

Oprawa: Abedik Sp. z o.o.

ul. Glinki 84, 85-861 Bydgoszcz

SPIS TREŚCI

Wprowadzenie	9
--------------------	---

Rozdział I

METODY OTRZYMYWANIA CIENKICH WARSTW I NANOSTRUKTUR

1.1. Cienka warstwa – definicja pojęcia.	13
1.2. Wytwarzanie warstw z fazy ciekłej – proces zol-żel	17
1.2.1. Chemiczne i fizyczne podstawy procesu zol-żel	24
1.2.2. Hydroliza i kondensacja prekursorów nieorganicznych	25
1.2.3. Hydroliza i kondensacja prekursorów organicznych	28
1.2.4. Rola katalizatorów w procesie zol-żel	30
1.2.5. Wieloskładnikowe warstwy tlenkowe	32
1.2.6. Ceramiczne warstwy tlenkowe	34
1.2.7. Warstwy tlenkowe o strukturze mieszanej	36
1.2.8. Warstwy organiczno-nieorganiczne	37
1.2.9. Przebieg nanoszenia warstwy w procesie zol-żel	40
1.2.9.1. Technika zanurzeniowa	41
1.2.9.2. Wpływ struktury prekursora	45
1.2.9.3. Wpływ prędkości wynurzania podłoża	48
1.2.9.4. Technika wirowa (spin-coating)	50
1.2.9.5. Wpływ warunków zewnętrznych na proces nanoszenia	52
1.3. Wytwarzanie warstw z fazy gazowej – proces PVD	55
1.3.1. Podstawy fizyczne procesu fizycznego osadzania z fazy gazowej	58
1.3.2. Adsorpcja	61
1.3.2.1. Adsorpcja fizyczna	61
1.3.2.2. Adsorpcja chemiczna	64



1.3.3. Dwuwymiarowe przejścia fazowe w cienkich warstwach adsorpcyjnych.	68
1.3.4. Model wzrostu cienkiej warstwy	75
1.3.4.1. Kapilarny model zarodkowania	83
1.3.4.2. Szybkość zarodkowania	87
1.3.4.3. Atomowa teoria zarodkowania	89
1.3.4.4. Wzrost warstwy – podsumowanie	92
1.3.5. Źródła par w procesie fizycznego osadzania z fazy gazowej.	94
1.3.6. Proces naparowywania próżniowego.	96
1.3.7. Parametry wpływające na grubość osadzonej powłoki.	98
1.3.7.1. Szybkość parowania.	100
1.3.7.2. Przestrzenny rozkład par	101
1.3.8. Monitorowanie grubości warstw w trakcie procesu PVD	103
1.3.9. Mikrostruktura warstw w procesie PVD.	105
1.4. Ablacja laserowa – PLD	106
1.4.1. Oddziaływanie wiązki lasera ze źródłem	108
1.4.2. Powstawanie i właściwości obłoku plazmy.	110
1.4.2.1. Neutralność plazmy	111
1.4.2.2. Podstawowe procesy zachodzące w plazmie.	114
1.4.2.3. Absorpcja promieniowania	115
1.4.2.4. Wzbudzenie i jonizacja	116
1.4.2.5. Rekombinacja	118
1.4.2.6. Temperatura plazmy	120
1.4.3. Rola plazmy w procesie wytwarzania warstw	123
1.4.3.1. Reakcje zachodzące w plazmie	124
1.4.3.2. Krystalizacja warstw w procesie ablacji laserowej	126
1.4.3.3. Mikrostruktura warstw w procesie ablacji laserowej	128

Rozdział II

NIEORGANICZNE ZWIĄZKI TIENKOWE

2.1. Tlenek cynku	131
2.1.1. Struktura krystalograficzna	132
2.1.2. Parametry sieci.	137
2.1.3. Struktura pasmowa tlenku cynku ZnO (II)	138
2.1.4. Defekty punktowe tlenku cynku ZnO (II)	143
2.2. Tlenek glinu	145
2.2.1. Produkcja przemysłowa – termiczny rozkład gibbsytu	147
2.2.2. Termiczny rozkład bemitu	149



2.2.3. Termiczny rozkład diasporu	150
2.2.4. Struktura krystalograficzna faz tlenku glinu Al_2O_3	150
2.2.5. Struktura elektronowa faz tlenku glinu Al_2O_3	156
2.3. Wytwarzanie cienkich warstw tlenkowych	161
2.3.1. Wytwarzanie cienkich warstw ZnO metodą zol-żel	162
2.3.2. Wytwarzanie cienkich warstw Al_2O_3 metodą zol-żel.	164
2.3.3. Wytwarzanie cienkich warstw ZnO i Al_2O_3 metodą PLD.	166

Rozdział III

ORGANICZNE ZWIĄZKI KOMPLEKSOWE

3.1. Kompleksy metaloorganiczne	179
3.2. Porfiryny, ftalocyjaniny, metaloftalocyjaniny i ich chlorki	181
3.2.1. Budowa cząsteczki porfiryny i ftalocyjaniny	183
3.2.2. Synteza ftalocyjaniny, metaloftalocyjanin i ich chlorków	193
3.2.3. Struktura i morfologia	196
3.2.4. Znaczenie i zastosowanie ftalocyjanin i ich pochodnych	202
3.3. Fizyczne osadzanie z fazy gazowej cienkich warstw i nanostruktur cienkowarstwowych metaloftalocyjanin i ich pochodnych	204

Rozdział IV

CHARAKTERYSTYKA STRUKTURY WARSTW I NANOSTRUKTUR CIENKOWARSTWOWYCH

4.1. Dyfrakcja Rentgenowska	210
4.1.1. Fizyczne podstawy dyfrakcji rentgenowskiej.	211
4.1.2. Matematyczne metody analizy profilu linii dyfrakcyjnej	216
4.1.3. Analiza widm dyfrakcyjnych	220
4.2. Mikroskopia Sił Atomowych	229
4.2.1. Fizyczne podstawy AFM.	230
4.2.2. Metody pomiarowe AFM	235
4.2.2.1. Metoda statyczna.	236
4.2.2.2. Metoda dynamiczna	239
4.3. Analiza obrazów AFM.	244

Rozdział V

LINIOWE WŁAŚCIWOŚCI OPTYCZNE

5.1. Transmisja, odbicie i absorpcja	256
5.1.1. Transmisja i odbicie w materiałach objętościowych	256
5.1.2. Transmisja i odbicie w cienkich warstwach	259



5.1.2.1. Metoda obwiedni dla widma odbicia	265
5.1.2.2. Metoda obwiedni dla widma transmisji.	269
5.2. Metoda pryzmatu sprzęgającego	297
5.2.1. Wprowadzenie do metody pryzmatu sprzęgającego	298
5.2.2. Podstawowe zależności metody pryzmatu sprzęgającego	303
5.2.2.1. Dwa obserwowane mody	306
5.2.2.2. Trzy lub więcej obserwowanych modów	307
5.2.3. Analiza widm eksperymentalnych	310
5.2.3.1. Cienka warstwa Al_2O_3	311
5.2.3.2. Cienka warstwa ZnO	313

Rozdział VI

NIELINIOWE WŁAŚCIWOŚCI OPTYCZNE

6.1. Nieliniowa podatność elektryczna.	317
6.1.1. Tensor nieliniowej podatności elektrycznej drugiego rzędu $\chi^{(2)}$	317
6.1.2. Tensor nieliniowej podatności elektrycznej trzeciego rzędu $\chi^{(3)}$	319
6.2. Nieliniowe zjawiska drugiego rzędu	324
6.2.1. Generacja Drugiej Harmonicznej.	325
6.2.1.1. Model porównawczy	328
6.2.1.2. Model Hermana – Haydena	329
6.2.2. Eksperymentalne widma Generacji Drugiej Harmonicznej (SHG).	333
6.2.2.1. Widma SHG dla ZnO	334
6.2.2.2. Widma SHG dla metaloftalocyanin i ich chlorków.	337
6.3. Nieliniowe zjawiska trzeciego rzędu	348
6.3.1. Generacja Trzeciej Harmonicznej.	349
6.3.1.1. Model porównawczy	350
6.3.1.2. Model Rentjesa	351
6.3.2. Eksperymentalne widma Generacji Trzeciej Harmonicznej (THG)	354
6.3.2.1. Widma THG dla ZnO	355
6.3.2.2. Widma THG dla Al_2O_3	362
6.3.2.3. Widma THG dla metaloftalocyanin i ich chlorków	371
Podsumowanie.	381
Spis oznaczeń.	383
Spis akronimów	393
Literatura	395



WPROWADZENIE

„Throughout much if not all of his existence, man has been motivated to build things. The very first objects built by man: weapons, shelters and tools, were certainly motivated by the need to survive. Man is not alone in this endeavor. Birds build nests. Beavers build dams. Chimpanzees build and use tools. The advance of man’s ability to build objects of increasing sophistication has enabled him to satisfy motivations beyond survival, motivations such as bettering the quality of life and expansion of knowledge. What I want to talk about today is the achievement of a milestone in man’s ability to build things. That milestone is the ability to build things using individual atoms as the building blocks; the ability to build from the bottom up, by placing the atoms where we want them”.

Don Eigler,

From the Bottom Up: Building Things with Atoms.

In G.L. Timp, editor, *Nanotechnology*, Chap. 11, p. 425,
Springer-Verlag, Heidelberg, 1999.

Akt tworzenia małych obiektów składających się z kilku lub kilkuset atomów można osiągnąć przez użycie indywidualnych atomów do budowy struktury bądź manipulując materią na prawie atomowym poziomie. Pytaniem jest, jak duże mogą być te pierwsze i jak małe mogą być te drugie. Aby uzyskać odpowiedź, należy przede wszystkim szukać rozwiązań eksperymentalnych, ponieważ rozwój tej gałęzi nauki ma kluczowe znaczenie dla współczesnej technologii. Obecny kierunek rozwoju techniki wymusza miniaturyzację wykorzystywanych urządzeń i przyrządów przy jedno-



czesnym zachowaniu wszelkich parametrów związanych z ich użytecznością. Z tego też względu istnieje zapotrzebowanie na nowoczesne materiały o ściśle określonych właściwościach fizyko-chemicznych. Cel ten można osiągnąć, poszukując całkowicie nowych materiałów lub wykorzystując nowoczesne metody otrzymywania, które nawet znanym i obecnie stosowanym materiałom nadają pożądane właściwości mechaniczne, elektryczne czy optyczne. Obserwowany w ostatnich latach ogromny postęp w opracowywaniu metod i doskonaleniu technologii otrzymywania cienkich warstw i nanostruktur cienkowarstwowych o specyficznych i jednocześnie pożądanych właściwościach jest spowodowany dynamicznym rozwojem nauki i ogromnymi potrzebami aplikacyjnymi w wielu dziedzinach.

Światowy postęp techniki zawdzięczany jest przede wszystkim pracom badawczym, których celem jest opracowanie nowych rozwiązań technologicznych pozwalających osiągnąć większą wydajność, szybkość i niezawodność pracy urządzeń elektronicznych, energetycznych, mechanicznych itp. Miniaturyzacja urządzeń, zwłaszcza w elektronice, z jednej strony charakteryzuje się niezaprzeczalnymi walorami estetycznymi, a z drugiej główną jej zaletą jest znaczne zmniejszenie zużycia energii w porównaniu do urządzeń tradycyjnych. Wśród tych prac ważne miejsce zajmują badania zmierzające do wytworzenia i określenia właściwości nowych materiałów.

Cienkie warstwy oraz nanostruktury cienkowarstwowe wytwarzane metodami próżniowymi lub wykorzystującymi procesy żelowania roztworów koloidalnych stanowią niezwykle ciekawą i użyteczną grupę tak zwanych materiałów funkcjonalnych. Materiały te znalazły i ciągle znajdują praktyczne zastosowania w wielu dziedzinach techniki z wyraźnym ukierunkowaniem na opto- i mikroelektronikę oraz budowę różnego rodzaju czujników. Tym, co wyróżnia wymienione powyżej metody uzyskiwania cienkich warstw i nanostruktur cienkowarstwowych, jest niewysoka temperatura ich wytwarzania, umożliwiającą użycie tworzyw sztucznych oraz składników organicznych jako podłoży oraz jako komponentów na wszystkich etapach wytwarzania. Przede wszystkim jednak metody te pozwalają na wytwarzanie nowoczesnych materiałów funkcjonalnych bez tworzenia ubocznych, szkodliwych substancji chemicznych na wszystkich etapach procesów wytwarzania, przez co są one przyjazne środowisku. Dodatkowo ich problematyka jest interesująca sama w sobie.

Pojawienie się nowych źródeł światła o bardzo dużych natężeniach i o wysokim stopniu koherencji – laserów, umożliwiło nie tylko powstanie nowych optycznych metod wytwarzania cienkich warstw i nanostruktur cienkowarstwowych, ale również poprawiło zdolność rozdzielczą technik badania ich właściwości optycznych liniowych względem natężenia padającego promieniowania. Jednak przede wszystkim umożliwiło badanie zupełnie nowych, niedostępnych dla klasycznych źródeł światła, zjawisk fizycznych, które występują przy silnym oddziaływaniu promieniowania laserowego z materią – właściwości optycznych nieliniowych względem natężenia padającego promieniowania.



Doskonalenie źródeł promieniowania, urządzeń detekcyjnych i coraz większe możliwości kontrolowania warunków eksperymentu z jednej strony oraz rozwój zaawansowanych metod teoretycznych i obliczeniowych z drugiej pozwoliły na przejście do jakościowego i ilościowego porównania wyników teoretycznych i doświadczalnych. Otworzyły się też możliwości jeszcze precyzyjniejszych badań dotyczących zachodzących procesów w nowych, coraz bardziej złożonych układach fizycznych. Przesunęła się zatem nie tylko granica zbadania i poznania struktury wewnętrznej materiału, mechanizmu oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z materią, ale również pojawiły się zupełnie nowe możliwości w różnych technikach badawczych. Przyczyniło się to z kolei do rozwoju wielu nowoczesnych technik zwiększających zakres stosowania materiałów oraz umożliwiających ich miniaturyzację.

Niniejsza monografia poświęcona jest systematycznemu przedstawieniu procesów wytwarzania, ich podstaw teoretycznych oraz właściwości otrzymywanych cienkich warstw i nanostruktur cienkowarstwowych. Zgodnie z profilem dotychczasowych badań autorki szczególny nacisk położony został na badania strukturalne, liniowe i nieliniowe właściwości optyczne oraz wzajemne korelacje występujące pomiędzy strukturą i właściwościami badanego materiału. Opisy zjawisk zachodzących w różnych eksperymentach fizycznych mają charakter modelowy. Rozważane modele są wystarczająco złożone, aby odtworzyć zasadnicze cechy przedstawianych procesów, ale jednocześnie na tyle proste, że pozwalają na otrzymanie wielu wyników analitycznych i ich jakościową analizę.

Konsekwencją tak założonego charakteru monografii jest jej konstrukcja. Obszerny rozdział I rozpoczyna przedstawienie używanego formalizmu. Następnie prezentowane są szczegółowo techniki wytwarzania cienkich warstw i nanostruktur cienkowarstwowych ze szczególnym uwzględnieniem wszelkich czynników zewnętrznych panujących podczas tych procesów. Zdefiniowane są podstawowe wielkości charakteryzujące procesy oraz ich wpływ na parametry otrzymywanych warstw. Przy omawianiu kolejnych metod szczególny nacisk położony został na wyjaśnienie podstaw fizycznych, a wybrane przykłady ilustrują możliwości opisywanych technik. Rozdziały II i III dotyczą odpowiednio nieorganicznych związków tlenkowych oraz organicznych związków kompleksowych, których cienkie warstwy lub nanostruktury cienkowarstwowe uzyskano przy zastosowaniu różnych technik ich osadzania. Opisane zostały podstawowe właściwości dotyczące struktury używanych materiałów, możliwych form lub faz powstających w warunkach panujących podczas eksperymentów ich wytwarzania oraz istotne z punktu widzenia monografii czynniki wpływające na ich właściwości fizyko-chemiczne oraz parametry optyczne. Rozdział IV poświęcony jest charakteryzacji struktur amorficznych, polikrystalicznych i nanostrukturalnych cienkich warstw. Opisane tu zostały podstawy teoretyczne oraz wyniki eksperymentalne dotyczące dyfrakcji rentgenowskiej i mikroskopii sił atomowych. Rozdziały V i VI poświęcone są wybranym liniowym i nieliniowym właściwościom



optycznym uzyskanych struktur. W rozdziale V omówione są procesy transmisji, odbicia i absorpcji promieniowania w cienkich warstwach oraz praktyczne aspekty wykorzystania widm eksperymentalnych w celu wyznaczenia ich parametrów optycznych, takich jak: współczynniki załamania i ekstynkcji, optyczna przerwa energetyczna czy siły wzajemnego oddziaływania cząstek tworzących warstwę oraz grubość uzyskanej warstwy. W rozdziale VI opisano techniki badania wybranych właściwości nieliniowych będących konsekwencją oddziaływania silnego promieniowania elektromagnetycznego z materią. Przy omawianiu poszczególnych technik wyjaśniono ich podstawy fizyczne, przedstawiono opis aparatury pomiarowej oraz możliwości badawcze. Zaprezentowano modele teoretyczne umożliwiające interpretację uzyskiwanych widm eksperymentalnych oraz uzyskane wartości nieliniowej podatności drugiego i trzeciego rzędu.

Przedstawione wyniki eksperymentalne dotyczące metod wytwarzania cienkich warstw i nanostruktur cienkowarstwowych, wszystkie prezentowane widma i obrazy ich struktury oraz liniowych i nieliniowych właściwości optycznych stanowią prace własne autorki niniejszej monografii.

Monografia ta z pewnością nie wyczerpuje tematyki badań dotyczących cienkich warstw i nanostruktur cienkowarstwowych, pomimo że przedstawione w niej zostało wiele metod eksperymentalnych. Tematyka ta wciąż dynamicznie się rozwija. Trudno dziś wyobrazić sobie granicę postępującej miniaturyzacji urządzeń i rozwoju wielu nowoczesnych technik. Prawdopodobnie zawsze będą pojawiały się nowe zadania, które będą wymagały nowych rozważań teoretycznych i rozwiązań eksperymentalnych.



LITERATURA

Rozdział I

- [1.1] F.L.O. Wadsworth, A Determination of the Specific Resistance and Temperature Coefficient of Oil in Thin Films, and the Application of these Results to the Measurement of the Thickness of the Oil Film in Journal Boxes, *Phys. Rev. (Series I)* **5**, 75, 1897.
- [1.2] F. Keller and R.H. Brown, Symposium on Practical Aspects of Diffusion – Diffusion of Alclad 24S-T Sheet, *Metals Technology (AIME)*, Publ. No.1659, p.1, 1944.
- [1.3] Ch. Kittel, Theory of the Structure of Ferromagnetic Domains in Films and Small Particles, *Phys. Rev.* **70**, 965, 1946.
- [1.4] L. Holland, The production, properties and uses of thin films condensed in vacuo, *Vacuum* **1**(1), 23, 1951.
- [1.5] H.B. Briggs, Optical Effects in Bulk Silicon and Germanium, *Phys. Rev.* **77**, 287, 1950.
- [1.6] J.W. Rohlfs, *Modern Physics from a to Z0*, Wiley, 1994.
- [1.7] V.L. Ginzburg and L.D. Landau, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **20**, 1064 (1950), English translation in: L. D. Landau, *Collected papers*, 546, Oxford: Pergamon Press, 1965.
- [1.8] W. Kohn, Interaction of Charged Particles in a Dielectric, *Phys. Rev.* **110**, 857, 1958.
- [1.9] H. Haken, H.C. Wolf, *Atomy i kwanty*, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa 1997.
- [1.10] M. Ébelmen, *Comptes rendus, Acad. Sci. Fr.*, 21, 502, 1845.
- [1.11] W. Geffecken, E. Berger, *Deutsches Reichspatent* 736, 411; Maj 6, 1939.



- [1.12] Prospect Glas ohne Reflexe. Deutsche Spezialglas AG, Grünenplan, FRG.
- [1.13] Sol-Gel Technology and Products, CHEMAT GROUP, USA – China – Europe, www.chemat.com, 2011.
- [1.14] H. Bala, Wstęp do chemii materiałów, WNT, Warszawa, 2003.
- [1.15] L. Pajdowski, Chemia ogólna, PWN, Warszawa, 2002.
- [1.16] źródło niestandardowe: Zeolite, <http://zeolite.com.pl/>, 2014.
- [1.17] J.D. Wrigth, N.A.J.M. Sommerdijk, Sol-Gel Materials, Chemistry and Applications, Gordon and Breach Science Publishers, Amsterdam, 2001.
- [1.18] J. Głuszek, Tlenkowe powłoki ochronne otrzymywane metodą sol-gel, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 1998.
- [1.19] M. Ardon, A. Bino, K. Michelson, Olation and structure, J.Am. Chem. Soc. **109**, 1986, 1987.
- [1.20] M. Freedman, Polimerization of anions: The hydrolysis of sodium tungstate and of sodium chromate, J.Am. Chem. Soc. **106**, 3395, 1984.
- [1.21] L. Hubert-Pfalzgraf, Aloxides as molecular precursors for oxide-based organic materials: opportunity for new materials, New J. Chem. **11**, 663, 1987.
- [1.22] H. Bach, H. Schroeder, Thin Solid Films **1**, 255, 1967/68.
- [1.23] źródło niestandardowe: http://www.schott.com/advanced_optics/english/products/optical-materials/zerodur-extremely-low-expansion-glass-ceramic, 2014.
- [1.24] H. Dislich, Thranformation of organometallics into common and exotic materials, Ed. R. Laine, NATO ASI Series E, no 141, Nijhof, Dordrecht, 236, 1988.
- [1.25] C.J. Brinker, G.C. Frye, A.J. Hurd, C.S. Ashley, Thin Solid Films **201**, 97, 1991.
- [1.26] R.P. Spiers, C. V. Subaram, W. L. Wilkinson, Chem. Eng. Sci. **29**, 389, 1974.
- [1.27] L.D. Landau, B.G. Levich, Acta Physiochim. U.R.S.S. **17**, 42, 1942.
- [1.28] I. Strawbridge, P.F. James, J. Non-Cryst. Solids **82**, 366, 1986.
- [1.29] C.J. Brinker, W. Scherer, Sol-gel science. The physics and chemistry of sol-gel processing, San Diego, Ac. Press., 1990.
- [1.30] L.E. Scriven, Better Ceramics Through Chemistry III, Ed. C.J. Brinker i in., Mat. Res. Soc., Pittsburgh, 1988.
- [1.31] C.J. Brinker, A.J. Hurd, K.J. Ward, Ultrastructure processing of advances Ceramics, Ed. J.D. Mackenzie, D.R. Ulrich, Wiley, New York, 223, 1988.
- [1.32] B.J. Ackerson, J. Rheol. **34**, 553, 1990.
- [1.33] Y. Dong, Q. Zhao, S. Wu, X. Lu, Journal of Rare Earths 28/Suppl. **1**, 446, 2010.
- [1.34] M. Seo, Y. Akutsu, H. Kagemoto, Ceramics International **33/4**, 625, 2007.
- [1.35] M. Langlet, A Kim, M Audier, C Guillard, J.M Herrmann, Thin Solid Films **429**, 13, 2003.
- [1.36]. K. Hwang, Jongeun Song, B. Kang, Y. Park, Surface and Coatings Technology **123**, 252, 2000.
- [1.37] E. Szalkowska, J. Masalski, J. Głuszek, Inżynieria Materiałowa **23**, 503, 2002.



- [1.38] K. Yao, W. Zhu, *Thin Solid Films* **408**, 11, 2002.
- [1.39] Livage, D. Ganguli, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **68**, 365, 2001.
- [1.40] D. Chen, *Solar Energy Materials and Solar Cells* **68**, 313, 2001.
- [1.41] C. Mai, H. Militz, *Wood Science and Technology* **37**, 339, 2004.
- [1.42] M.A. Kim, W.-Y. Lee, *Analytica Chimica Acta* **479**, 143, 2003.
- [1.43] K. Kailasam, J.D. Epping, A. Thomas, S. Losse, H. Junge, *Energy Environ. Sci.* **4**, 4668, 2011.
- [1.44] J.N. Isrealachvili, D. Tabor, *Prog. Surf. Membrane Sci.* **7**, 1, 1973.
- [1.45] E. Zaremba, W. Kohn, *Phys. Rev. B* **15**, 1769, 1977.
- [1.46] T.B. Grimley, *Theory of Chemisorption, The chemical Physics of Solid Surface and Heterogenous Catalysis* **2**, 333, 1983.
- [1.47] R.H. Fowler, E.A. Guggenheim, *Statistical Thermodynamics*, Cambridge Univ. Press., Cambridge, 1949.
- [1.48] J. Behm, K. Christmann, G. Ertl, *Solid State Commun.* **25**, 763, 1978.
- [1.49] A.R. Kortan and R.L. Park, *Phys. Rev. B* **23**, 6340, 1981.
- [1.50] R.W. Zwanzig, *J. Chem. Phys.* **32**, 1172, 1960.
- [1.51] J. Żmija, *Postawy teorii wzrostu nomokryształów*, PWN, Warszawa, 1987.
- [1.52] A. Zawadzka, P. Płóciennik, J. Strzelecki, M. Pranaitis, S. Dabos-Seignon, B. Sahraoui, *Thin Solid Films* **545**, 429, 2013.
- [1.53] J.A. Venables, G.D.T. Spiller, *Surface Mobility of Solid Surface*, ed. T. Bink, Plenum, New York, 1981.
- [1.54] M.A. Herman, H. Sitter, *Molecular Beam Epitaxy*, 2nd edn., Springer Ser. Mat. Sci. Vol. 7., Springer, Berlin, 1996.
- [1.55] E. Bauer, H. Popper, *Thin Solid Films* **12**, 167, 1972.
- [1.56] A. Michalski, *Fizykochemiczne metody otrzymywania powłok z fazy gazowej*, Oficyna Wydawnicza PW, Warszawa, 2000.
- [1.57] S. Stojanov, D. Kashchiev, *Current Topics in Materials Science*, **7**, 69, North-Holland, Amsterdam, 1981.
- [1.58] T.N. Rhodin, D. Walton, *Single Crystal Films*, ed. M.H. Francombe, H. Sato, Pergamon, Oxford, 1964.
- [1.59] źródło niestandardowe: <http://www.rdmthis.com/>, 2014.
- [1.60] *Handbook of thin film technology*, ed. L.I. Meissel, R. Glang, McGraw-Hill Handbooks, 1970.
- [1.61] C. Wesołowska, *Ćwiczenia Laboratoryjne z Fizyki Cienkich Warstw*, Wrocław 1975
- [1.62] B.A. Movcan, A.V. Demchishin, *Phys. Met. Metallogr.* **28**, 83, 1969.
- [1.63] H.M. Smith, A.F. Turner, *Applied Optics* **4**, 147, 1965.
- [1.64] D. Dijkkamp, A.S. Gozdz, T. Venkatesan, X. D. Wu, *Phys. Rev. Lett.* **58**, 2142, 1987.
- [1.65] Y. Zhang, H. Gu, S. Iijima, *Appl. Phys. Lett.* **73**, 3827, 1998.
- [1.66] D.B. Geohegan, A.A. Puretzky, D.L. Rader, *Appl. Phys. Lett.* **74**, 3788, 1999.



- [1.67] T.J. Goodwin, V.L. Leppert, S.H. Risbud, I.M. Kennedy, H.W.H. Lee, *Appl. Phys. Lett.* **70**, 3122, 1997.
- [1.68] D.B. Chrisey, A. Piqué, R.A. McGill, J.S. Horwitz, B.R. Ringeisen, D.M. Bubb, P.K. Wu, *Chem. Rev.* **103**, 553, 2003.
- [1.69] C.M. Lieber, C-C Chen, *Solid State Physics* **48**, 109, 1994.
- [1.70] Y. Eliezer, S. Eliezer, *The Fourth State of Matter: An Introduction to the Physics of Plasma*, Adam Hilger, 1989.
- [1.71] R. Rumianowski, *Badanie strumienia plazmy oraz struktur cienkowarstwowych*, praca doktorska na UMK, Toruń 2002
- [1.72] J.K. Franklin, J.G. Dillard, H.M. Rosenstock, J.T. Heron, K. Draxl, F.H. Field, Ionization potentials, appearance potentials and heats of formation of gaseous positive ions, *Nat. Stand. Ref. Data Ser.*, **26**, US National Bureau of Standards, Washington, 1969.
- [1.73] S. Veprak, *Thin Solid Films* **130**, 135, 1985.
- [1.74] M. Nastasi, J. Mayer, J.K. Hirvonen, *Ion-Solid Interactions: Fundamentals and Applications* (Cambridge Solid State Science Series), ed. D.E. Clarke, S. Suresh, I.M. Ward, Cambridge 1996.
- [1.75] J.J. Thomson, *Conduction of electricity through gases*, Cambridge University press., Cambridge, 1906.
- [1.76] I. Rusanov, *J. Colloid Interface Sci.* **68**, 32, 1972.
- [1.77] A. Michalski, Z. Romanowski, *J. Crystal Growth* **61**, 675, 1983.
- [1.78] R. Messier, A.P. Giri, R.A. Roy, *J. Vac. Sci. Technol. A* **2**, 500, 1984.

Rozdział II

- [2.1] K. Takahashi, A. Yoshikawa, A. Sandhu, *Wide bandgap semiconductors: fundamental properties and modern photonic and electronic devices*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2007.
- [2.2] Awwad Akl, *Green Synthesis of Zinc Oxide Nanoparticles at Ambient Temperature*, LAP Lambert Academic Publishing, 2013.
- [2.3] C. Jagadish, S. Pearton, *Zinc Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures (Processing, Properties, and Applications)*, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2006
- [2.4] S.S. Alias, A.A. Mohamad, *Synthesis of Zinc Oxide by Sol-Gel Method for Photoelectrochemical Cells*, (Springer Briefs in Materials), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2007
- [2.5] T. Minami, H. Sato, H. Nanto, S. Takata, *Japanese Journal of Applied Physics* **24**, L781, 1985.
- [2.6] B.J. Lokhande, P.S. Patil, M.D. Uplane, *Physica B* **302–303**, 59, 2001.



- [2.7] J. Ma, F. Ji, D.H. Zhang, H.L. Ma, S.Y. Li, *Thin Solid Films* **357**, 98, 1999.
- [2.8] F. Tuomisto, V. Ranki, K. Saarinen, D.C. Look, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **91**, 205502, 2003.
- [2.9] C.H. Park, S.B. Zhang, S.-H. Wei, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **66**, 073202, 2002.
- [2.10] M. Leszczyński, Common crystal structure of the group III-nitrides, in *Properties, Processing and Applications of Gallium Nitride and Related Semiconductors* (eds J.H. Edgar, S. Strite, I. Akasaki, H. Amano and C. Wetzel), EMIS Datareviews Series No. 23, INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, Stevenage, UK, 1999.
- [2.11] O. Ambacher, J. Majewski, C. Miskys, A. Link, M. Hermann, M. Eickhoff, M. Stutzmann, F. Bernardini, V. Fiorentini, V. Tilak, B. Schaff, L.F. Eastman, *Journal of Physics: Condensed Matter* **14**, 3399, 2002.
- [2.12] M. Leszczyński, T. Suski, P. Perlin, H. Teisseyre, I. Grzegory, M. Bockowski, J. Jun, S. Porowski, K. Pakula, J.M. Baranowski, C.T. Foxon, T.S. Cheng, *Applied Physics Letters* **69**, 73, 1996.
- [2.13] E. Kisi, M.M. Elcombe, *Acta Crystallographica Section C. Crystal Structure Communications* **45**, 1867, 1989.
- [2.14] S. J. Pearton, D. P. Norton, K. Ip, Y. W. Heo, T. Steiner, *Prog. Mater. Sci.* **50**, 293, 2005.
- [2.15] T. Kogure, Y. Bando, *Journal of Electron Microscopy* **47**, 7903, 1993
- [2.16] A.B.M.A. Ashrafi, A. Ueta, A. Avramescu, H. Kumano, I. Suemune, Y.-W. Ok, T.-Y. Seong, *Applied Physics Letters* **76**, 550, 2000.
- [2.17] S.-K. Kim, S.-Y. Jeong, C.-R. Cho, *Applied Physics Letters* **82**, 562, 2003.
- [2.18] C.H. Bates, W.B. White R. Roy, *Science* **137**, 993, 1962.
- [2.19] L. Gerward, J.S. Olsen, *Journal of Synchrotron Radiation* **2**, 233, 1995.
- [2.20] J.M. Recio, M.A. Blanco, V. Luaña, R. Pandey, L. Gerward, J. Staun Olsen, *Physical Review B: Condensed Matter* **58**, 8949, 1998.
- [2.21] H. Karzel, W. Potzel, M.K. öfferlein, W. Schiessl, M. Steiner, U. Hiller, G.M. Kalvius, D.W. Mitchell, T.P. Das, P. Blaha, K. Schwarz, M.P. Pasternak, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **53**, 11425, 1996.
- [2.22] M. Catti, Y. Noel, R. Dovesi, *Journal of Physics and Chemistry of Solids* **64**, 2183, 2003.
- [2.23] S. Desgreniers, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **58**, 14102, 1998.
- [2.24] R.R. Reeber, *Journal of Applied Physics* **41**, 5063, 1970.
- [2.25] J.E. Jaffe, A.C. Hess, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **48**, 7903, 1993.
- [2.26] Y. Noel, C.M. Zicovich-Wilson, B. Civalleri, D. Arco, R. Dovesi, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **65**, 014111, 2001.
- [2.27] J.M. Recio, R. Pandey, V. Luaña, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **47**, 3401, 1993.
- [2.28] U. Rössler, *Physical Review* **184**, 733, 1969.



- [2.29] R. Ahuja, L. Fast, O. Eriksson, J.M. Wills, B. Johansson, *Journal of Applied Physics* **83**, 8065, 1998.
- [2.30] M. Wilson, P.A. Madden, *Molecular Physics* **90**, 75, 1997.
- [2.31] D.W. Langer, C.J. Vesely, *Physical Review B: Condensed Matter* **2**, 4885, 1970.
- [2.32] R.A. Powell, W.E. Spicer, J.C. McMenamin, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **6**, 3056, 1972.
- [2.33] R.T. Girard, O. Tjernberg, G. Chiaia, S. Söderholm, U.O. Karlsson, C. Wigren, H. Nylen, I. Lindau, *Surface Science* **373**, 409, 1997.
- [2.34] P. Schörer, P. Kröger, J. Pollmann, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **47**, 6971, 1993.
- [2.35] J.L. Martins, N. Troullier, S.H. Wei, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **43**, 2213, 1991.
- [2.36] Y.-N. Xu, W.Y. Ching, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **48**, 4335, 1993.
- [2.37] W.R.L. Lambrecht, A.V. Rodina, S. Limpijumnong, B. Segall, B.K. Meyer, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **65**, 075207, 2002.
- [2.38] D. Vogel, P. Kröger, J. Pollmann, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **52**, R14316, 1995.
- [2.39] C. Klingshirn, *Phys. Stat. Sol. (B)* **244**, 3027, 2007.
- [2.40] J.E. Jaffe, J.A. Snyder, Z. Lin, A.C. Hess, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **62**, 1660, 2000.
- [2.41] D.C. Reynolds, D.C. Look, B. Jogai, C.W. Litton, G. Cantwell, W.C. Harsch, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **60**, 2340, 1999.
- [2.42] N.A. Hill, U. Waghmare, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **62**, 8802, 2000.
- [2.43] F. A. Kröger, *The Chemistry of Imperfect Crystals*, 2nd Edition, North Holland, Amsterdam, 1974.
- [2.44] K. Ellmer, R. Mientus, *Thin Solid Films* **516**, 5829, 2008.
- [2.45] L. Pauling, S.B. Hendricks, *J. Am. Chem. Soc.* **47**, 781, 1925.
- [2.46] K. Wefers, C. Misra, *Oxides and Hydroxides of Aluminum*, Alcoa Laboratories, Aluminum Company of America, Pittsburgh, 1987.
- [2.47] K. Grjotheim, B. J. Welch, *Aluminum Smelter Technology, A Pure and Applied Approach*, Aluminium-Verlag GMBH, Düsseldorf, 1997.
- [2.48] K. R. Nagabhushana, B. N. Lakshminarasappa, F. Singh, *Bull. Mater. Sci.* **32**, 515, 2009.
- [2.50] M. Falconieri, S. Baccaro, G. Sharma, K. S. Thind, D. P. Singh, *Phys. Stat. Solidi (A)* **209**, 1438, 2012
- [2.51] I. Levin, D. Brandon, *J. Am. Ceram. Soc.* **81**, 1995, 1998.
- [2.52] C. Corbato, R.T. Terttenhorst, G.G. Cristoph, *Clays Clay Miner.* **33**, 71, 1985.
- [2.53] C. Volverton, K. Hass, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **63**, 24102, 2001
- [2.54] Y. Kim T. Hsu, *Surface Science* **258**, 131, 1991.
- [2.55] R. W. G. Wyckoff, *Crystal Structures*, 2nd ed. ~Wiley, New York, 1964.
- [2.56] R.-S. Zhou, R. L. Snyder, *Acta Crystallogr., Sect. B: Struct. Sci.* **47**, 617, 1991.



- [2.57] E. Husson, Y. Repelin, *Eur. J. Solid State Inorg. Chem.* **33**, 1223, 1996.
- [2.58] S-D. Mo, W-Y. Ching, *Phys. Rev. B* **57**, 15219, 1998.
- [2.59] A.P. Borosy, B. Silvi, M. Allavena, P. Nortier, *J. Phys. Chem.* **98**, 13189, 1994.
- [2.60] H. Saalfeld, B. Mehrotra, "Electron-Diffraction Study of Aluminum Oxides", *Berichte der Deutschen Keramischen Gesellschaft* **42**, 161, 1965.
- [2.61] C.S. John, V.C.M. Alma, G.R. Hays, *Applied Catalysis* **6**, 341, 1983.
- [2.62] H. Shirasuka, H. Yanagida, G. Yamaguchi, "The Preparation of η Alumina and its Structure", *Yogyo Kyokai Shi (Journal of the Ceramic Assoc. of Japan)* **84**, 610, 1976.
- [2.63] Y. Yourdshahyan, C. Ruberto, L. Bengtsson, B.I. Lundqvist, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **55**, 8721, 1997.
- [2.64] S.J. Mousavi, M.R. Abolhassani, S.M. Hosseini, S.A. Sebt, *Chinese J. Phys.* **47**, 862, 2009.
- [2.65] M. Yazdanmehr, S.J. Asadabadi, A. Nourmohammadi, M. Ghasemzadeh, M. Rezvanian, *Nanoscale Research Letters* **7**, 488, 2012.
- [2.66] Y.-N. Xu W.Y. Ching, *Phys. Rev. B* **43**, 4461, 1991.
- [2.67] K. Shiiki, M. Igorashi, H. Kaijyu, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 1* **42**, 5185, 2003.
- [2.68] J. Robertson, *J. Appl. Phys.* **92**, 4712, 2002.
- [2.69] I.A. Brytov, Yu. N. Romashchenko, *Sov. Phys. Solid State* **20**, 384, 1978.
- [2.70] R.H. French, *J. Am. Ceram. Soc.* **73**, 477, 1990.
- [2.71] R.H. French, H. Mullejans, D.J. Jones, *J. Am. Ceram. Soc.* **81**, 2549, 1998.
- [2.72] B. Holm, R. Ahuja, Y. Yourdshahyan, B. Johansson, B.I. Lundqvist, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **59**, 12777, 1999.
- [2.73] Y. Sato, S. Akimoto, *J. Appl. Phys.* **50**, 5285, 1979.
- [2.74] Y. Yourdshahyan, C. Ruberto, M. Halvarsson, L. Bengtsson, V. Langer, B.I. Lundqvist, S. Rупpi, U. Rolander, *J. Am. Ceram. Soc.* **82**, 1365, 1999.
- [2.75] H.P. Pinto, R.M. Nieminen, S.D. Elliott, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **70**, 125402, 2004.
- [2.76] B. Ealet, M.H. Elyakhloufi, E. Gillet, M. Ricci, *Thin Solid Films* **250**:92, 1994.
- [2.77] K. Sankaran, G. Pourtois, R. Degraeve, M.B. Zahid, G-M. Rignanese, J.V. Houdt, *Appl Phys Lett.* **97**, 212906, 2010.
- [2.78] E. Menéndez-Proupin, G. Gutiérrez, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **72**, 035116, 2005
- [2.79] R. Ahuja, J. M. Osorio-Guillen, J. Souza de Almeida, B. Holm, W. Y. Ching, B. Johansson, *J. Phys.: Condens. Matter* **16**, 2891, 2004.
- [2.80] M. Yazdanmehr, S. J. Asadabadi, A. Nourmohammadi, M. Ghasemzadeh, M. Rezvanian, *Nanoscale Research Letters*, **7**, 488, 2012.
- [2.81] A. Zawadzka, P. Płóciennik, J. Strzelecki, *Opt. Quantum Electron.*, **46**, 87, 2014.
- [2.82] A. Zawadzka, P. Płóciennik, J. Strzelecki, B. Sahraoui, *Opt. Mater.*, **37**, 327, 2014.



- [2.83] A. R. Phani, S. Santucci, *Journal of Non-Crystalline Solids*, **352**, 4093, 2006.
- [2.84] M. Zieliński, R.S. Dygdała, K. Karasek, A. Zawadzka, *Rev. Sci. Instrum.* **71**, 2577, 2000.
- [2.85] A. Zawadzka, R.S. Dygdała, A. Raczyński, J. Zaremba, J. Kobus, *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **35**, 1801, 2002.
- [2.86] R.S. Dygdała., M. Zieliński, P. Płóciennik, A. Zawadzka, R. Rumianowski, *Surf. Coat. Technol.* **203**, 2328, 2009.

Rozdział III

- [3.1] I. Langmuir, A. Werner, *Science* **51**, No. 1329, 607, 1920.
- [3.2] B. M. Ramachandran, Y. Wang, S. O. Kang, P. J. Carroll, L. G. Sneddon, *Organometallics* **23**, 2989, 2004.
- [3.3] M. Cieślak-Golonka, J. Starosta, M. Wasielewski, *Wstęp do chemii koordynacyjnej*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2013.
- [3.4] H. Jahn, E. Teller, *Stability of Polyatomic Molecules in Degenerate Electronic States. I. Orbital Degeneracy*, *Proceedings of the Royal Society A* **161**, 220, 1937.
- [3.5] A.D. McNaught, A. Wilkinson, *Organometallic compounds: IUPAC. Compendium of Chemical Terminology*. Wyd. 2. Oksford: Blackwell Scientific Publications, 1997.
- [3.6] R.H. Crabtree, *The Organometallic Chemistry of the Transition Metals*, Wiley, 2005.
- [3.7.] W. C. Zeise, *Von der Wirkung zwischen Platinchlorid und Alkohol, und von den dabei entstehenden neuen Substanzen*, *Ann. der Physik* **97**, 497, 1831.
- [3.8] D. Seyferth, *Zinc Alkyls – Edward Frankland and the Beginnings of Main-Group Organometallic Chemistry*, *Organometallics* **20**, 2940, 2001.
- [3.9] L. Mond, C. Langer, *On iron carbonyls*, *J. Chem. Soc., Trans.* **59**, 1090, 1891.
- [3.10] V. Grignard, *Sur quelques nouvelles combinaisons organométalliques du magnésium et leur application à des synthèses d'alcools et d'hydrocarbures (On some new organometallic compounds of magnesium and their application to syntheses of alcohols and hydrocarbons)*. *Compt. Rend.* **130**, 1322, 1900.
- [3.11] T.J. Kealy, P.L. Pauson, *A New Type of Organo-Iron Compound*, *Nature* **168**, 1039, 1951).
- [3.12] G. Natta, F. Danusso, *Stereoregular Polymers and Stereospecific Polymerizations*, Pergamon Press, 1967.
- [3.13] W. Küster, *Z. Physiol. Chem.* **82**, 463, 1913.
- [3.14] A. Braun, J. Tcherniac, *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft* **40**, 2709, 1907.



- [3.15] H. de Diesbach, E. von der Weid, *Helvetica Chimica Acta* **10**, 886, 1927.
- [3.16] A.G. Dandridge, H.A. Drescer, J. Thomas (to Scottish Dyes Ltd.), British Patent 322, 169 (18.11.1929).
- [3.17] R.P. Linstead, *Brit. Assoc. Advance. Sci., Rep.* 465-466, 1933.
- [3.18] R.P. Linstead, *J. Chem. Soc.* 1016-1017, 1934.
- [3.19] R.P. Linstead, A.R. Lowe, *J. Chem. Soc.* 1022-1027, 1934.
- [3.20] R.P. Linstead, A.R. Lowe, *J. Chem. Soc.* 1031-1033, 1934.
- [3.21] J.M. Robertson, *J. Chem. Soc.* 615-621, 1935.
- [3.22] J.M. Robertson, *J. Chem. Soc.* 1195-1209, 1936.
- [3.23] J.M. Robertson, R.P. Linstead, C.E. Dent, *Nature* **135**, 506, 1935.
- [3.24] J.M. Robertson, I. Woodward, *J. Chem. Soc.* 219-230, 1937.
- [3.25] J.M. Robertson, I. Woodward, *J. Chem. Soc.* 36-48, 1940.
- [3.26] Źródło niestandardowe: <http://www.colorantshistory.org/PhthaloDiscover.html>, czerwiec 2014
- [3.27] M. Trytek, M. Makarska, K. Polska, S. Radzki, J. Fiedurek, *Porfiryny i ftalocyjaniny. Cz. I. Właściwości i niektóre zastosowania*, *Biotechnologia* **4** (71), 109, 2005.
- [3.28] Źródło niestandardowe: <http://slideplayer.pl/slide/61054/#>, lipiec 2014.
- [3.29] A.L. Thomas, *Phthalocyanine Research and Application*, CRC Press, Boca Raton, 1990.
- [3.30] M.L.H. Green, *Journal of Organometallic Chemistry* **500**, 127, 1995.
- [3.31] J.M. Hornback, *Organic Chemistry*, 2nd ed., Brooks/Cole Cengage Learning, 2006.
- [3.32] T.M. Krygowski, B. T. St pień, *Chem. Rev.* **105**, 3482, 2005.
- [3.33] M.S. Liao, S. Scheiner, *J. Chem. Phys.* **114**, 9780, 2001.
- [3.34] V. Mastryukov, C. Ruan, M. Fink, Z. Wang, R. Pachter, *J. Mol. Struct.* **556**, 225, 2000.
- [3.35] D. R. Tackley, G. Dent, W. Ewen Smith, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **3**, 1419, 2001.
- [3.36] A. Zawadzka, P. Płóciennik, I. Czarnecka, J. Sztupecka, Z. Łukasiak, *Opt. Mater.* **34**, 1686, 2012
- [3.37] J. Janczak, R. Kubiak, *Polyhedron* **20**, 2901, 2001.
- [3.38] A. Zawadzka, P. Płóciennik, J. Strzelecki, M. Pranaitis, S. Dabos-Seignon, B. Sahraoui, *Thin Solid Films* **545**, 429, 2013.
- [3.39] W.R. Scheidt, W. Dow, *J. Am. Chem. Soc.* **99**, 1101, 1977.
- [3.40] A. Mihill, W. Buell, M. Fink, *J. Chem. Phys.* **99**, 6416, 1993.
- [3.41] D.R. Tackley, G. Dent, W. Ewen Smith, *Phys. Chem. Chem. Phys.* **2**, 3939, 2001.
- [3.42] A. Gerlach, T. Hosokai, S. Duhm, S. Kera, O.T. Hofmann, E. Zojer, J. Zegenhagen, F. Schreiber, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 156102, 2011.
- [3.43] H.-Y. Wang, J.B. Lando, *Langmuir* **10**, 790, 1994.



- [3.44] M. Szybowicz, W. Bała, K. Fabisiak, K. Paprocki, M. Drozdowski, *J Mater Sci* **46**, 6589, 2011.
- [3.45] K. Xiao, Y. Liu, G. Yu, D. Zhu, *App. Phys. A* **77**, 367, 2003.
- [3.46] R. Resel, M. Ottmar, M. Hanack, J. Keckes, G. Leising, *J. Mater. Res.* **15**, 934, 2000.
- [3.47] S. Senthilarasu, S.J. Baek, S.D. Chavhan, J. Lee, S H. Lee, *J. Nanosci. Nanotechnol.* **8**, 5414-7, 2008.
- [3.48] M.M. El-Nahass, F.S.Bahabri, A.A. AL Ghamdi, S.R.Al-Harbi, *Egypt. J. Sol.* **25**, **307**, 2002.
- [3.49] S. D. Wang, X. Dong, C.S. Lee, S.T. Lee, *J. Phys. Chem. B* **108**, 1529, 2004.
- [3.50] J. Mizuguchi, *J. Phys. Chem. A* **105**, 1121, 2001.
- [3.51] M. S. Mindorff, D. E. Brodie, *Can. J. Phys.* **59**, 249, 1981.
- [3.52] D.-J. Liu, R.L. Blumberg Selinger, J.D. Weeks, *J. Chem. Phys.* **105**, 4751, 1996.
- [3.53] P. Erk, H. Hengelsberg, M.F. Haddow, R. van Gelder, *Cryst. Eng. Comm.* **6**, 475, 2004.
- [3.54] R. Mason, G.A. Williams, P.E. Fielding, *J. Chem. Soc., Dalton Trans.* 676, 1979.
- [3.55] C.J. Brown, *J. Chem. Soc. A*, 2488, 1968.
- [3.56] A. Graja, A.R. Ferchmin, *Przemiany fazowe*, Ośrodek Wydawnictw Naukowych Poznań 2003.
- [3.57] A. Endo, S. Matsumoto, J. Mizuguchi, *J. Phys. Chem. A* **103**, 8193, 1999.
- [3.58] W. Waclawek, G. Dyrda, *Redoksove przemiany oscylacyjne diftalocyjanin lantanowców pod wpływem protonodonorów i elektronoakceptorów*, *Chemia, Dydaktyka, Ekologia* **1-2**, 21, 2006.
- [3.59] P. Gregory, *J. Porphyr. Phtalocyan.* **4**, 432, 2000.

Rozdział IV

- [4.1] Wilhelm Conrad Röntgen – Facts, W: *The Nobel Prize in Physics 1901* [online]. Nobel Media AB. [http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1901/rontgen-bio.html], 11.01.2015.
- [4.2] W. Bragg, *Nature* **115** (2886), 266, 1925.
- [4.3] B.D. Cullity, R.S Stock, *Elements of X-Ray Diffraction*, Addison-Wesley, 1956.
- [4.4] Y. Waseda, E. Matsubara, K. Shinoda, *X-Ray Diffraction Crystallography: Introduction, Examples and Solved Problems*, Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2011.
- [4.5] P. Luger: *Rentgenografia strukturalna monokryształów*, PWN, 1989.
- [4.6] P. Debye, *Annalen der Physik* **351**, 809, (1915).
- [4.7] A.B Greninger, *Zeitschrift fur Kristallographie* **91**, 424, 1935.



- [4.8] J.A. Bearden, *Reviews of Modern Physics* **39**, 78, 1967.
- [4.9] R. Delhez, Th. H. de Keijser, E.J. Mittemeijer, *X-Ray and Neutron Structure Analysis in Materials Science* (ed. J. Hasek), Plenum Press, New York, 1989.
- [4.10] K. Shih, *X-Ray Diffraction: Structure, Principles and Applications* (Materials Science and Technologies), Nova Science Pub Inc, 2013.
- [4.11] T.J. Davis, D. Gao, T.E. Gureyev, A.W. Stevenson, *Nature* **373**, 595, 1995.
- [4.12] P. Mach, R. Pindak, A.-M. Levelut, P. Barois, H. T. Nguyen, C.C. Huang, L. Furenliid, *Phys. Rev. Lett.* **81**, 1015, 1998.
- [4.13] H.P. Klug, L.E. Alexander, *X-Ray Diffraction Procedures: For Polycrystalline and Amorphous Materials*, 2nd Edition, Wiley-VCH, 1974.
- [4.14] A.M. Smith, A.M. Mohs, S. Nie, *Nature Nanotechnology* **4**, 56, 2009.
- [4.15] J. Chen, L. Lu, K. Lu, *Scripta Materialia* **54**, 1913, 2006.
- [4.16] K Lu, J Lu, *Materials Science and Engineering: A* **375–377**, 38, 2004.
- [4.17] M. H. Frey, D. A. Payne – *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **54**, 3158, 1996.
- [4.18] G.J. Soler-Illia, C Sanchez, B Lebeau, J Patarin, *Chem. Rev.* **102**, 4093, 2002.
- [4.19] K-D Liss, A. Bartels, A. Schreyer, H. Clemens, *Textures and Microstructures* **35**, 219, 2003.
- [4.20] F.H. Chung, *J. Appl. Cryst.* **7**, 519, 1974.
- [4.21] H. Stragier, J.O. Cross, J.J. Rehr, L.B. Sorensen, C.E. Bouldin, J.C. Woicik, *Phys. Rev. Lett.* **69**, 3064, 1992.
- [4.22] P. Thibault, M. Dierolf, A. Menzel, O. Bunk, C. David, F Pfeiffer, *Science* **321**, 379, 2008.
- [4.23] B.B. He, *Two-dimensional X-ray Diffraction*, Wiley, New Jersey, 2009.
- [4.24] A. Barty, C. Caleman, A. Aquila, N. Timneanu, L Lomb i in, *Nature Photonics* **6**, 35, 2012.
- [4.25] źródło niestandardowe: http://pl.wikipedia.org/wiki/Sie%C4%87_krystaliczna, styczeń 2015.
- [4.26] M.H. Rietveld, *Acta Cryst.* **20**, 508, 1966.
- [4.27] M.H. Rietveld, *Acta Cryst.* **22**, 151, 1967.
- [4.28] R.A. Young, *The Rietveld Method*, Oxford University Press, 1993.
- [4.29] źródło niestandardowe: http://en.wikipedia.org/wiki/Scherrer_equation, styczeń 2015.
- [4.30] D. Kuhlmann-Wildsdorf, *Dislocations in Solids*, (ed. F.R.N. Nabarro, M.S. Du), Tom 11, Elsevier, Holandia, 2002.
- [4.31] A. Khorsand Zak, W.H. Abd. Majid, M.E. Abrishami, R. Yousefi, *Solid State Sciences* **13**, 251, 2011.
- [4.32] A. Zawadzka, P. Płóciennik, J. Strzelecki, *Opt. Quantum Electron.* **46**, 87, 2014.
- [4.33] A. Zawadzka, P. Płóciennik, J. Strzelecki, B. Sahraoui, *Opt. Mater.* **37**, 327, 2014.



- [4.34] A. Zawadzka, A. Karakas, P. Płóciennik, J. Szatkowski, Z. Łukasiak, A. Kapceoglu, Y. Ceylan, B. Sahraoui, *Dyes Pigm.* **112**, 116, 2015.
- [4.35] G. Binnig, C. F. Quate, C. Gerber, *Phys. Rev. Letters*, **56**, 930, 1986/
- [4.36] P. Eaton, P. West, *Atomic Force Microscopy*, Oxford University Press, New York, 2010.
- [4.37] D. Bonnell, *Scanning Probe Microscopy and Spectroscopy; Theory, Techniques and Applications*, Second Edition, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2000.
- [4.38] J.N. Sneddon, *Int. J. Erg. Sci.* **3**, 47, 1965.
- [4.39] K.L. Johnson, K. Kendall, A.D. Roberts, *Proc. Roy. Soc. London A* **324**, 301, 1971.
- [4.40] H. Hertz, *J. Reine, Angew. Math.* **92**, 156, 1881.
- [4.41] D. Maugis, *J. Colloid Interface Sci.* **150**, 243, 1992.
- [4.42] Y. Martin, C.C. Williams, H. K. Wickramasinghe, *J. Appl. Phys.* **61**, 4723, 1987.
- [4.43] F.J. Giessibl, *Science* **267**, 68, 1995.
- [4.44] S. Kitamura, M. Iwatsuki, *Jpn. J. Appl. Phys.* **35**, 668, 1995.
- [4.45] G. Binnig, H. Rohrer, *Helv. Phys. Acta* **55**, 726, 1982.
- [4.46] J.P. Cleveland, B. Anczykowski, A.E. Schmid, V.B. Elings, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 2613, 1998.
- [4.47] T.R. Albrecht, P. Grütter, D. Horne, D. Rugar, *J. App. Phys.* **69**, 668, 1991.
- [4.48] J.B. Marion. *Classical Dynamics of Particles and Systems*. New York: Academic, 1970.
- [4.49] J.P. Cleveland, B. Anczykowski, A.E. Schmid, V.B. Elings, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 2613, 1998.
- [4.50] Y. Seo, W. Jhe, *Rep. Prog. Phys.* **71**, 016101, 2008.
- [4.51] F.J. Giessibl, *Rev. Mod. Phys.* **75**, 949, 2003.
- [4.52] L. Nony, A. Baratoff, D. Schär, O. Pfeiffer, A. Wetzel, E. Meyer, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **74**, 23, 2006.
- [4.53] F.J. Giessibl, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **56**, 24, 1997.

Rozdział V

- [5.1] J.I. Pankove, *Zjawiska optyczne w półprzewodnikach*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1974.
- [5.2] W. Romanowski, *Cienkie warstwy metaliczne*, PWN, 1974.
- [5.3] C. Wesołowska, *Ćwiczenia Laboratoryjne z Fizyki Cienkich Warstw*, Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1975.
- [5.4] J.C. Manificier, J. Gasiot, J.P. Fillard, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **9**, 1002, 1976



- [5.5] I. Chambouleyron, J.M. Martinez, A.C. Moretti, M. Mulato, *Applied Optics*, **36**, 8238, 1997.
- [5.16] źródło niestandardowe http://fp.optics.arizona.edu/Milster/optiscan/DOCUMENTATION/Thin-film%20calculator%20from%20%20Dissertation_JunZhang_080110_optimized.pdf, styczeń 2015.
- [5.7] O.S. Heavens, *Optical Properties of Thin Solid Films*, general Publishing Company, Toronto, 1991.
- [5.8] N. Bouchenak Khelladi, N.E. Chabane Sari, *American Journal of Optics and Photonics*, **1**, 1, 2013.
- [5.9] H.A. Macleod, *Thin-Film Optical Filters*, CRC Press, 2010.
- [5.10] M.H. Francombe, R.W. Hoffman, *Physics of Thin Films: Advances in Research and Development*, Tom 6, Elsevier, 2013.
- [5.11] źródło niestandardowe http://www.perkinelmer.com/CMSResources/Images/44-153901APP_Thin-films.pdf, styczeń 2015.
- [5.12] E.G. Birgin, I. Chambouleyron, J.M. Martínez, S.D. Ventura, *Applied Numerical Mathematics* **47**, 109, 2003.
- [5.13] D.A. Minkov, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **22**, 1157, 1989.
- [5.14] E.G. Birgin, I. Chambouleyron, J.M. Martinez, *Journal of Computational Physics* **151**, 862, 1999.
- [5.15] D. Poelman, P.F. Smet, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **36**, 1850, 2003.
- [5.16] R. Swanepoel, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **16**, 1214, 1983.
- [5.17] J.C. Manifacier, J. Gasiot, J. Fillard, *J. Phys. E: Sci. Instrum.* **9**, 1002, 1976.
- [5.18] źródło niestandardowe: <http://refractiveindex.info/?shelf=main&book=ZnO&page=Bond-o>, styczeń 2015.
- [5.19] F.E. Ghodsi, H. Absalan, *Acta Physica Polonica A* **118**, 659, 2010.
- [5.20] N.R. Aghamalyan, I.A. Gambaryan, E.Kh. Goulanian, R.K. Hovsepyan, R.B. Kostanyan, S.I. Petrosyan, E.S. Vardanyan, A.F. Zerrouk, *Semicond. Sci. Technol.* **18**, 525, 2003.
- [5.21] źródło niestandardowe: http://en.wikipedia.org/wiki/Sellmeier_equation#cite_note-4, styczeń 2015.
- [5.22] N.F. Mott, R.W. Gurney, *Electronic Processes in Ionic Crystals*, Oxford Univ. Press, London, 1940.
- [5.23] F. Urbach, *Phys Rev.* **92**, 1324, 1953.
- [5.24] J. Bardeen, F.J. Blatt, L.H. Hall, *Photoconductivity Conference*, New York, Wiley, 1956.
- [2.25] J. Tauc, *Materials Research Bulletin* **3**, 37, 1968.
- [5.26] M.M. El-Nahass, M.M. Abd El-Raheem, A.A. Atta, A.M. Hassanien, *Radiat. Phys. Chem.* **103**, 227, 2014.
- [5.27] M. Di Giulio, G. Micocci, R. Rella, P. Siciliano, A. Tepore, *Phys. Status Solidi A* **136**, K101, 1993.



- [5.28] M.M. El-Nahassa, A.A. M. Farag, M. El-Metwally, F.S.H. Abu-Samaha, E. Elesh, Synth. Met. **195**, 110, 2014.
- [5.29] A. Zawadzka, P. Płóciennik, I. Czarnecka, J. Sztupecka, Z. Łukasiak, Opt. Mater. **34**, 1686, 2012.
- [5.30] L. Gaffo, M.R. Cordeiro, A.R. Freitas, W.C. Moreira, E.M. Giroto, V. Zucolotto, J. Mater. Sci. **45**, 1366, 2010.
- [5.31] R. Al Asmar, G. Ferblantier, F. Mailly, P. Gall-Borrut, A. Foucaran, Thin Solid Films. **473**, 49, 2005.
- [5.32] J. Petykiewicz, Podstawy fizyczne optyki scalonej, PWN Warszawa 1989.
- [5.33] P.K. Tien, R. Ulrich, R.J. Martin, Appl. Phys. Lett. **14**, 291, 1969.
- [5.34] J.H. Harris, R. Shubert, J.N. Polky, J. Opt. Soc. Am. **60**, 1007, 1970.
- [5.35] P.K. Tien, R. Ulrich, J. Opt. Soc. Am. **60**, 1325, 1970.
- [5.36] F. Zernike, E.L. Sloan, J.C. Webster, R.B. McGraw, W.L. Knecht, Topical Meeting on Integrated Optics, Guided Waves, Materials, and Devices, Las Vegas, Nevada, 1972.
- [5.37] źródło niestandardowe: <http://refractiveindex.info/?shelf=main&book=A-l2O3&page=Malitson-o>, styczeń 2015.

Rozdział VI

- [6.1] S. Kielich, Molekularna optyka nieliniowa, PWN, 1977.
- [6.2] P.N. Prasad, D.J. Williams, Nonlinear optical effects in organic materials, John Wiley and Sons Inc. 1991
- [6.3] P. Chmela, Wprowadzenie do optyki nieliniowej, PWN, 1987.
- [6.4] Y.R. Shen, The principales of nonlinear optics, John Wiley and Sons Inc. 1984.
- [6.5] źródło niestandardowe http://en.wikipedia.org/wiki/Pockels_effect, luty 2015.
- [6.6] F. Brown, M. Matsuoka. Physical Review **185**, 3, 1969.
- [6.7] źródło niestandardowe http://en.wikipedia.org/wiki/Second-harmonic_generation, luty 2015.
- [6.8] T. Verbiest, K. Clays, V. Rodriguez, Second – Order Nonlinear Optical Characterization Techniques, Taylor & Francis Inc, 2009.
- [6.9] F.S. Pavone, P.J. Campagnola, Second Harmonic Generation Imaging, CRC Press, 2013.
- [6.10] źródło niestandardowe http://en.wikipedia.org/wiki/Kerr_effect, luty 2015.
- [6.11] M. Melnichuk, L.T. Wood, Phys. Rev. A **82**, 013821, 2010.
- [6.12] G. New, Introduction to Nonlinear Optics, Cambridge University Press, 2014.
- [6.13] F.C. De La Rosa, Harmonics and Power Systems, CRC Press, 2006.
- [6.14] R.W. Boyd, Nonlinear Optics, Elsevier Science, 2008.



- [6.15] R.B. Miles, Optical Third Harmonic Generation in Metal Vapors, Department of Electrical Engineering, Stanford University, 1972.
- [6.16] P. Shiv Halasyamani, K. R. Poeppelmeier, *Chem. Mater.* **10**, 2753, 1998.
- [6.17] D.A. Kleinman, *Phys. Rev.* **126**, 1977, 1962.
- [6.18] D.A. Kleinman, *Phys. Rev.* **128**, 1761, 1962.
- [6.19] R.D. Guenther, *Modern Optics*, Ed. John Wiley and Sons, 1990.
- [6.20] M. Braun, F. Bauer, T. Vogtmann, S. Schwoerer, *J. Opt. Soc. Am. B* **14**, 1699, 1997.
- [6.21] J.P. Bourdin, P.X. Nguyen, G. Rivoire, J.M. Nunzi, *Nonlinear Opt.* **7**, 1, 1994.
- [6.22] B. Sahraoui, X. Nguyen Phu, T. Nozdryn, J. Cousseau, *Synth. Met.* **115**, 261, 2000.
- [6.23] P. Franken, A. Hill, C. Peters, G. Weinreich, *Phys. Rev. Lett.* **7**, 118, 1961.
- [6.24] P.D. Maker, R.W. Terhune, M. Nisenoff, C.M. Savage, *Phys. Rev. Lett.* **8**, 21, 1962.
- [6.25] A.J. Giordmaine, *Phys. Rev. Lett.* **8**, 19, 1962.
- [6.26] G. Maroulis, T. Bancewicz, B. Champagne, *Atomic and Molecular Nonlinear Optics: Theory, Experiment and Computation*, IOS Press VB, 2010.
- [6.27] B.S. Mendoza, *J. Phys.: Condens Matter* **5**, A181, 1993.
- [6.28] M. Guillaume, E. Botek, B. Champagne, F. Castet, L. Ducasse, *J. Chem. Phys.* **121**, 7390, 2004.
- [6.29] P.N. Butcher, D. Cotter, *The elements of non-linear optics*, Cambridge University Press, 1990.
- [6.30] N. Bloembergen, R.K. Chang, S.S. Jha, C.H. Lee, *Phys. Rev.* **174**, 813, 1968.
- [6.31] G.J. Lee, S.W. Cha, S.J. Leon, J.I. Jin, J.S. Yoon, *J Korean Phys. Soc.* **39**, 912, 2001
- [6.32] R.A. Myers, N. Mukherjee, S.R.J. Brueck, *Opt. Lett.* **16**, 1732, 1991.
- [6.33] F. Kajzar, Y. Okada-Shudo, C. Meritt, Z. Kafafi, *Synth. Met.* **117**, 189, 2001.
- [6.34] N. Mongwaketsi, S. Khamlich, M. Pranaitis, B. Sahraoui, F. Khammar, G. Garab, R. Sparrow, M. Maaza, *Materials Chemistry and Physics* **134**, 646, 2012.
- [6.35] A. Chaieb, O. Halimi, A. Bensouici, B. Boudine, B. Sahraoui, *J. Optoelectron. Adv. Mater.* **11**, 104, 2009.
- [6.36] W. Herman, L. Hayden, *J. Opt. Soc. Am. B* **12**, 416, 1995.
- [6.37] X.H. Wang, D.P. West, N.B. McKeown, T.A. King, *J. Opt. Soc. Am. B* **15**, 1895, 1998.
- [6.38] S.K. Kurtz, T.T. Perry, *J. Appl. Phys.* **39**, 3798, 1968.
- [6.39] F. Kajzar, J. Messier, *Phys. Rev. A* **32**, 2352, 1985.
- [6.40] J. Jerphagnon, S. Kurtz, *J. Appl. Phys.* **40**, 1667, 1970.
- [6.41] K. Kubodera, H. Kobayashi, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **182**, 103, 1990.
- [6.42] źródło niestandardowe: http://refractiveindex.info/?shelf=glass&book=fused_silica&page=Malitson, luty 2015.



- [6.43] C. Bosshard, U. Gubler, P. Kaatz, W. Mazerant, U. Meier, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **61**, 10688, 2000.
- [6.44] U. Gubler, C. Bosshard, *Phys. Rev. B: Condensed Matter* **61**, 10702, 2000.
- [6.45] J.F. Reintjes, *Nonlinear Optical Parametric Processes in Liquids and Gases*, Academic Press Inc., Quantum Electronics, Principles and applications, 1984.
- [6.46] A. Zawadzka, P. Płóciennik, J. Strzelecki, A. Korcala, A.K. Arof, B. Sahraoui, *Dyes & Pigments* **101**, 212, 2014.
- [6.47] A. Zawadzka, P. Płóciennik, J. Strzelecki, . B. Sahraoui, *Opt. Mater.* **37**, 327, 2014.
- [6.48] A. Zawadzka, P. Płóciennik, Z. Łukasiak, A. Korcala, H. El Ouazzani, B. Sahraoui, Laser ablation and thin film deposition, *IEEE ICTON 2011*, E-ISBN: 978-1-4577-0880-0, Th.A2.1 (2011); 1 – 4, DOI: 10.1109/ICTON.2011.5970839
- [6.49] A. Zawadzka, P. Płóciennik, J. Strzelecki, M. Pranaitis, S. Dabos-Seignon, B. Sahraoui, *Thin Solid Films* **545**, 429, 2013.
- [6.50] A. Zawadzka, A. Karakas, P. Płóciennik, J. Szatkowski, Z. Łukasiak, A. Kapceoglu, Y. Ceylan, B. Sahraoui, *Dyes & Pigments* **112**, 116, 2015.

