

**Oddziaływanie promieniowania jonizującego z materią,
sztuczne barwienie kryształów.**

Opracowanie w ramach przedmiotu Metody i Techniki Jądrowe

ANDRZEJ LIPIEC

0.1 Wstęp

W tym opracowaniu zostały przedstawione podstawy fizyczne dotyczące oddziaływania promieniowania jonizującego z materią. Dodatkowo zawarte zostały informacje na temat efektów zmian w sieciach krystalicznych niektórych minerałów poddanych działaniu na promieniowanie jonizujące. Z tego powodu praca zawiera informacje z pogranicza fizyki jądrowej, fizyki ciała stałego i optyki. Na sam koniec zaprezentowane zostały wyniki badań autora nad wpływem promieniowania γ na zabarwienie kryształów kwarcu, ametystu i fluorytu.

0.2 Podstawy teoretyczne

0.2.1 Promieniowanie jonizujące

Promieniowanie jonizujące jest to strumień cząstek lub fal o energii wystarczającej, by oderwać przynajmniej jeden elektron z powłoki atomu, cząsteczki, bądź całej struktury krystalicznej. Proces odłączania elektronu jest nazywany jonizacją i na poziomie atomowym może się odbywać na kilka sposobów:

- poprzez zderzenie atomu z cząstką o wysokiej energii, np protonem, elektronem lub cząstką α ;
- poprzez wybite elektronu z powłok atomowych w wyniku absorpcji kwantu promieniowania elektromagnetycznego;
- poprzez wyrzucenie z atomu elektronu po wychwycie elektronu przez jądro;
- poprzez nieopisane w pracy: zderzenia obojętnych atomów (jonizacja termiczna) i wielofotonową jonizację powyżej progu.

Poniżej znajduje się opis poszczególnych rodzajów promieniowania jonizującego.

Promieniowanie α

Promieniowanie α jest to emisja cząstek α z rozpadającego się jądra atomowego. Cząstka α składa się z dwóch protonów i dwóch neutronów, stanowiąc de facto jądro atomu helu He^{2+} . Ze względu na dużą masę cząstek α , promieniowanie to bardzo silnie oddziałuje z materią. Z tego powodu jest oddziaływaniem silnie jonizującym, ale za to słabo przenikliwym. Już kilka centymetrów powietrza, albo np karka papieru czy ludzki naskórek są w stanie zatrzymać ten rodzaj promieniowania.

Promieniowanie β

Promieniowanie β powstaje w wyniku rozpadu, podczas którego z jądra atomu zostaje wyemitowany elektron (promieniowanie β^-) bądź antyelektron (promieniowanie β^+). Wraz z tymi cząsteczkami emitowane są także odpowiednio antyneutrino i neutrino elektronowe, które słabo oddziałują z materią, ale niosą ze sobą część energii rozpadu. Podczas emisji cząstki β^- , jeden z neutronów należących do tego jądra zostaje przekształcony w proton. Analogicznie, w przypadku emisji β^+ , proton zostaje przekształcony w neutron. Cząstki β posiadają masę elektronu, więc oddziałują z materią słabiej niż cząstki α . Z tego też powodu, mają większy zasięg - do kilku metrów w powietrzu, bądź zatrzymywane są na cienkiej warstwie metalu.

Promieniowanie γ

Promieniowanie γ jest emisją kwantu promieniowania elektromagnetycznego ze wzbudzonego jądra atomowego. Ponieważ emitowanymi kwantami są fotony, cząstki o zerowej masie spoczynkowej, promieniowanie γ nie jest wynikiem rozpadu jądra, a jedynie obniżeniem jego energii wzbudzenia. Ten rodzaj promieniowania często towarzyszy pozostałym przemianom jądrowym. Oddziaływanie tego promieniowania z materią opiera się na absorpcji kwantów γ przez jądra atomowe, bądź elektrony, które ulegają wzbudzeniu. Promieniowanie γ może przebywać daleką drogę w powietrzu, nawet do setek metrów, a zatrzymywane jest dopiero przez grubą (kilkakilkanaście cm) warstwę ołowiu. Kwantami γ określa się fotony o energii minimum $100keV$. Innym typem elektromagnetycznego promieniowania jonizującego są promienie Roentgena. One także mogą osiągać energię $100keV$, jednak ze względu na swoje źródło, czyli wzbudzone bądź rozprędzone elektrony, nie jest efektem jądrowym. Z tego też powodu w tej pracy nie zostało ono dokładnie opisane.

0.2.2 Oddziaływanie promieniowania z materią

W tej części pracy przedstawione zostały metody oddziaływania różnych typów promieniowań jądrowych z materią. Ze względu na cel tej pracy, jakim jest przedstawienie wpływu promieniowania jonizującego na kolor wybranych kryształów, największą uwagę poświęcono promieniowaniu γ .

Oddziaływanie cząstek α z materią

Cząstki α są nazywane cząstkami ciężkim, gdyż ich masa jest większa od masy elektronu. Przechodząc przez materię, cząstki te oddziałują poprzez swoje pole elektryczne z elektronami, odczepiając je od danych elektronów i wytracając na tym

energię. Zakładając, że energia cząstek α nie jest na tyle duża, by przekroczyć barierę kulombowską jądra, straty energii przejawiają się w postaci:

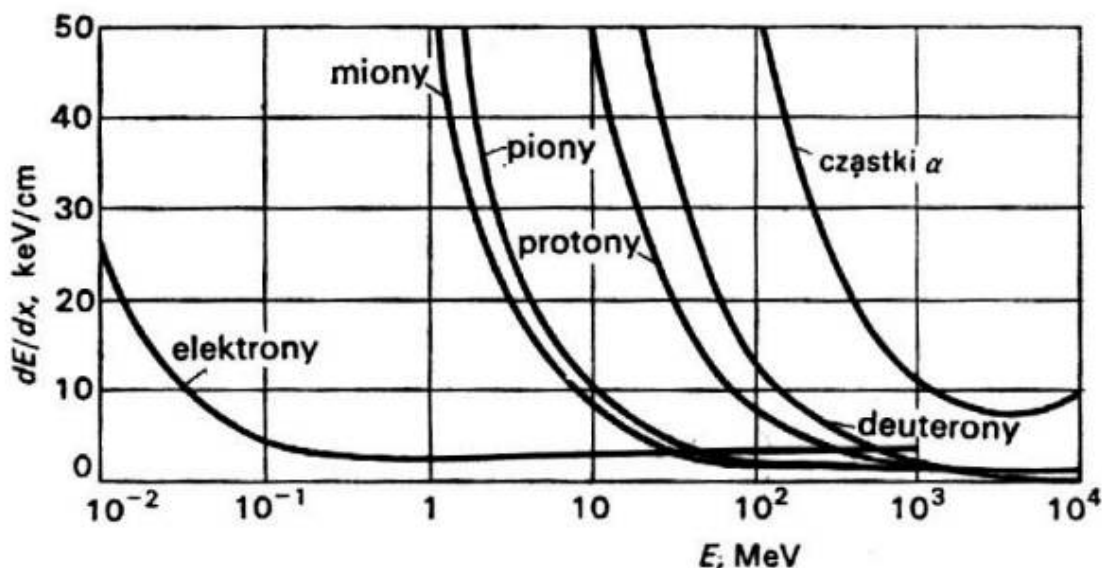
- rozproszenia sprężystego na jądrach (wg. modelu Rutherforda lub Motta)
- promieniowanie hamowania, które powstaje w wyniku wytracania energii podczas zwalniania cząstki w polu jądra
- promieniowania Czerenkowa, które powstaje gdy prędkość cząstki jest większa niż prędkość światła w danym ośrodku
- wybijania elektronów z powłok atomowych w procesie jonizacji.

Straty energii cząstek ciężkich o prędkości v , ładunku z i energii E , przebyłych drogę x w ośrodku o gęstości ρ i średnim potencjale wzbudzającym I , opisuje formuła Bethe-Bloch'a:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi}{m_e} \cdot \frac{nz^2}{v^2} \cdot \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \cdot \left[\ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right) - \beta^2\right]$$

$n = \frac{N_A Z \rho}{M_u}$ gdzie Z to liczba atomowa, N_A to liczba Avogadro a M_u jest stałą.

Wnioskiem z tej formuły jest to, że cząstki o małym stosunku prędkości do swojej masy, szybciej tracą swą energię na jednostkę przebytej odległości. Na rysunku 1 przedstawione zostały straty energii na jednostkę odległości niektórych cząstek.



Rysunek 1: *Straty energii na jednostkę odległości dla wybranych cząstek*[1]

Cząstki α bardzo silnie jonizują materię, ale charakteryzują się bardzo małą przenikliwością. Z tego względu ich wpływ na strukturę sieci krystalicznej jest tylko powierzchniowy.

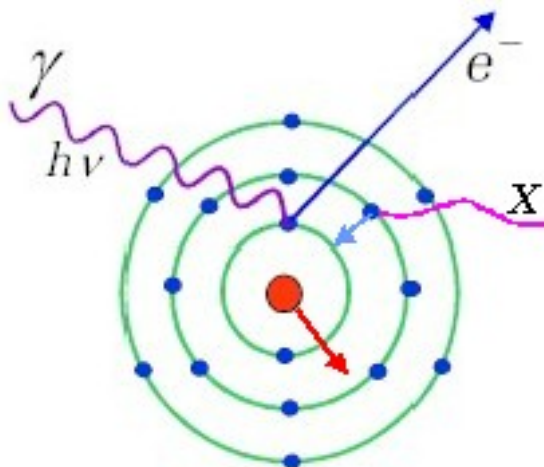
Oddziaływanie cząstek β z materią

Ze względu na to, że cząstki β poruszające się w ośrodku mają taką samą masę spoczynkową jak elektrony na orbitach atomów, trajektorie cząstek promieniowania ulegają dużym zmianom. W wyniku rozpraszania promieniowania β emitowane jest promieniowanie hamowania. Oprócz tego znaczącą rolę odgrywa oddziaływanie kulombowskie między cząstkami a elektronami i jądrami atomów. Warto zaznaczyć, że ze względu na jednoimienność ładunków cząstek β^+ i jąder, promieniowanie to będzie bardziej przenikało materię. Pochłanianie pozytonów zawsze kończy się anihilacją przy zetknięciu z elektronem. Ponieważ to promieniowanie ma mały wpływ na zmiany w sieciach krystalicznych, w tej pracy główna uwaga jest poświęcona promieniowaniu γ .

Oddziaływanie promieniowania γ z materią

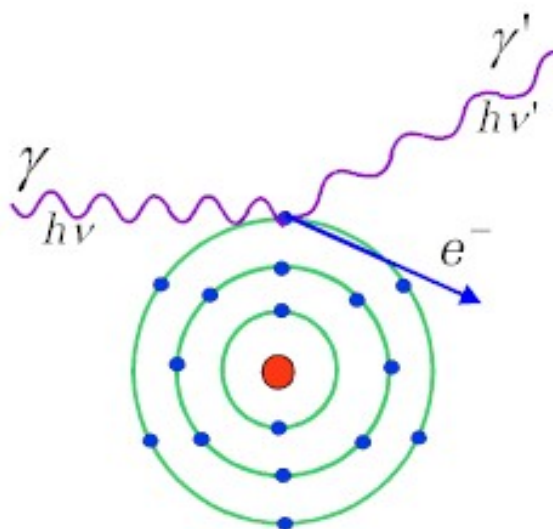
Promieniowanie γ oddziałuje z materią na największych odległościach ze wspomnianych typów promieniowań. Z tego względu jego wpływ na sieć krystaliczną jest objętościowy, a co za tym idzie - największy. Kwanty γ będące fotonami o energii $E_\gamma > 100 \text{ keV}$ w wyniku oddziaływania z materią ulegają absorpcji lub rozproszeniu. W przypadku, gdy energia kwantu rozproszonego jest taka sama jak kwantu pierwotnego, mówimy o rozpraszaniu koherentnym. Gdy energia kwantu rozproszonego jest mniejsza, jest to rozpraszanie niekoherentne. Kwanty γ mogą oddziaływać zarówno z elektronami na powłokach atomowych, jak i z jądrami atomowymi. Poniżej zostały przedstawione efekty związane z oddziaływaniem kwantów γ z materią:

- Wewnętrzny efekt fotoelektryczny, w wyniku którego promieniowanie gamma przekazuje energię elektronom, wzbudzając je, lub odrywając od atomów.



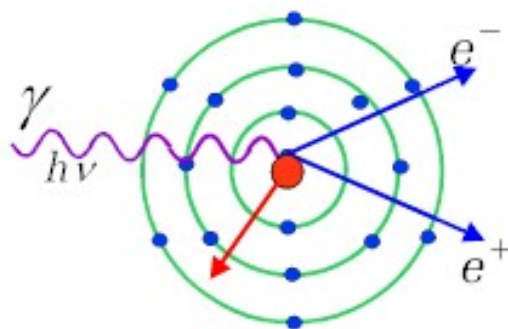
Rysunek 2: Rysunek schematycznie przedstawiający wewnętrzny efekt fotoelektryczny [2]

- Efekt Comptona. W wyniku rozpraszania promieniowania gamma na swobodnych lub słabo związanych elektronach, kwanty γ wytracają swą energię kosztem przyspieszenia elektronów w kierunku rozchodzenia się promieniowania. Rozpraszanie Comptona jest najczęstszym sposobem oddawania energii przez kwanty γ



Rysunek 3: Rysunek schematycznie przedstawiający efekt Comptona[2]

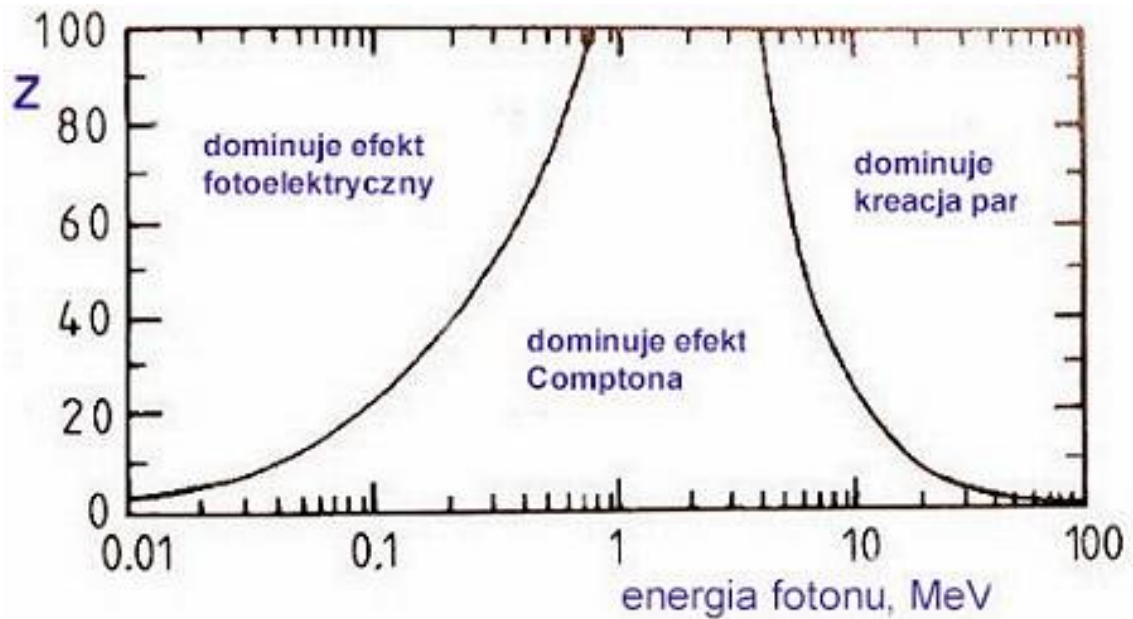
- Krecja par. Gdy kwanty γ uderzając w jądro atomowe posiadają energię większą, niż dwukrotność masy spoczynkowej elektrony (t.j. $> 1.02MeV$) dochodzi do krecji pary elektron-pozyton.



Rysunek 4: Rysunek schematycznie przedstawiający krecję pary e^+e^- [2]

- reakcje fotojądrowe. Kwant γ jest absorbowany trafiając w jądro atomowe, wzbudzając je. Jądra wzbudzone mogą wyemitować kwanty gamma, bądź ulec rozpadowi bądź rozszczepieniu.

Sposób oddziaływania promieniowania gamma z materią zależy przede wszystkim od energii kwantów γ , oraz liczby atomowej absorbenta. Na rysunku ?? zostały przedstawione obszary dominacji poszczególnych efektów.



Rysunek 5: Dominacja poszczególnych rodzajów oddziaływania promieniowania gamma z materią[2]

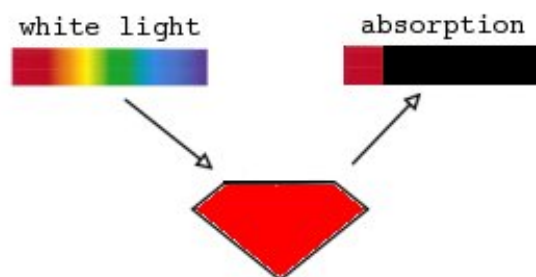
0.3 Pochodzenie koloru w kryształach

W tej części pracy przedstawione zostały podstawy teoretyczne dotyczące pochodzenia koloru w kryształach, oraz opisane zostało zastosowanie promieniowania jonizującego w celu barwienia kryształów.

0.3.1 Postrzeganie koloru kryształów

Światło białe jest mieszanką siedmiu kolorów widocznych w tęczy. Każdy z kolorów odpowiada odpowiedniej energii fotonów, czyli długości fali światła (od ok. 700 nm dla koloru czerwonego, do 400 nm dla fioletowego). Gdy dany foton posiada energię wystarczającą, aby przenieść wolny elektron w wyższy stan energetyczny, to dana długość fali zostaje zaabsorbowana. Gdy substancja absorbuje wszystkie długości światła, poza np. tymi z otoczenia 700 nm, obserwowany kolor po przejściu będzie czerwony, co zostało przedstawione na rysunku 6.

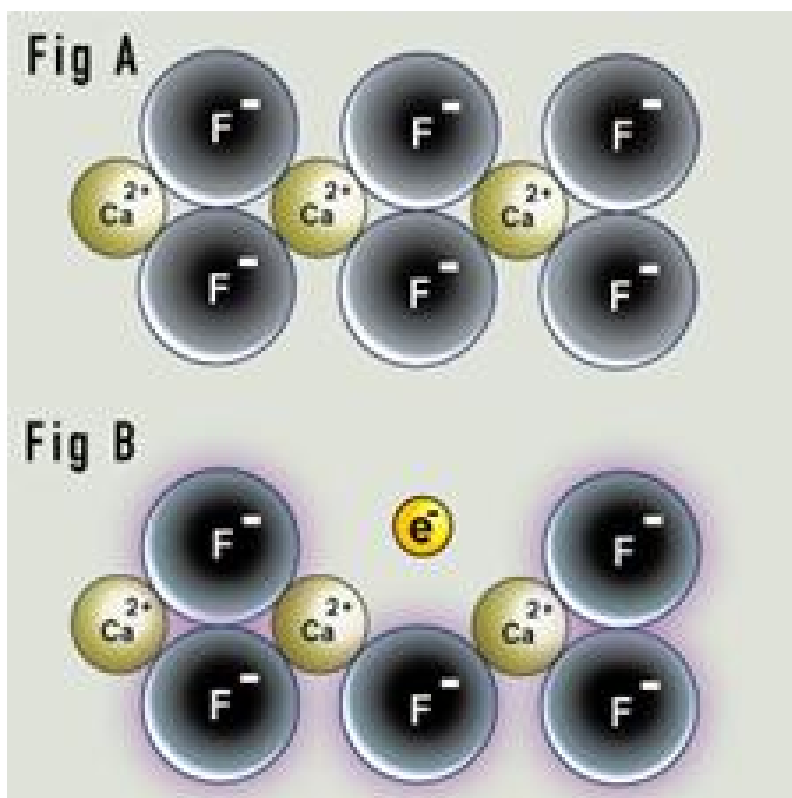
W celu zbadania zabarwienia kryształów wykorzystane zostało widmo transmisyjne, czyli stosunek natężenia światła po przejściu przez kryształ, do natężenia światła pochodzącego ze źródła, w funkcji długości fali. Im ten stosunek jest wyższy, tym więcej światła o konkretnej barwie jest przepuszczane przez kryształ, czyli wzrasta natężenie danego koloru.



Rysunek 6: Absorpcja wszystkich kolorów, poza czerwonym[4]

0.3.2 Electron color centre (f-centre)

Tak jak w większości kryształów, przykłady opisane w tej pracy także zawdzięczają swoją barwę defektom strukturalnym. W przypadku fluorytów (CaF_2) i ametystów (SiO_2) jest to wynik defektu Schottky'ego, czyli braku konkretnego jonu na jego miejscu w sieci krystalicznej. Na rysunku 7 przedstawiony został schemat powstawania elektronowych centrów koloru w kryształach fluorytu.



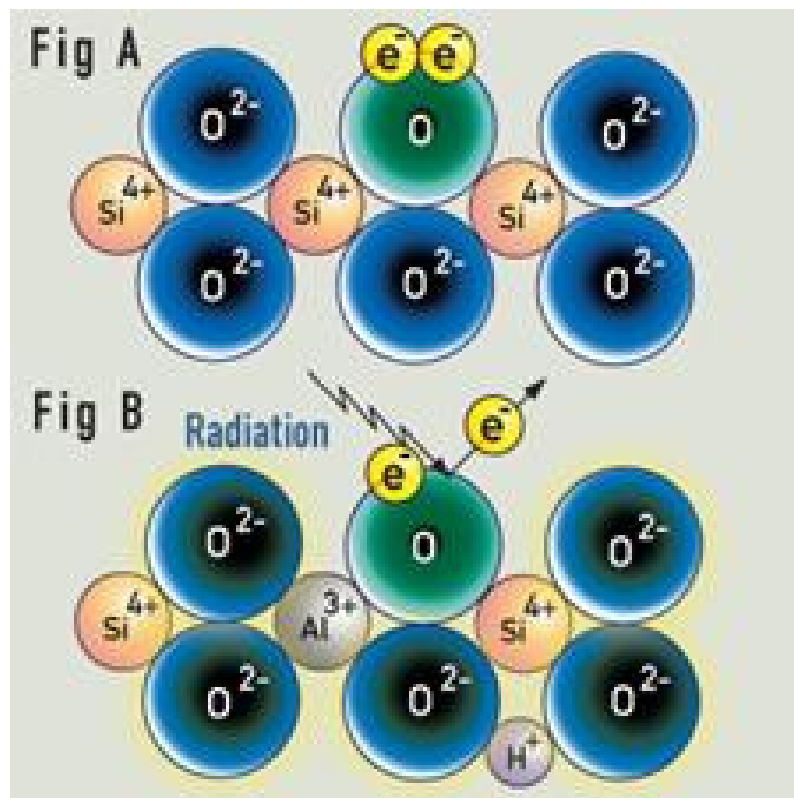
Rysunek 7: Powstawanie elektronowego centrum koloru we fluorycie[3]

Pod wpływem promieniowania jonizującego, ujemne jony fluoru są wybijane z sieci, a w pustkę którą po sobie zostawiają wpada wolny, niesparowany elektron, tworząc centrum koloru. Ten wolny elektron, który wpadł w pułapkę potencjału, poprzez absorpcję fotonów może teraz być wzbudzany do wyższych stanów ener-

tycznych, których nie mógł osiągnąć, gdy był związany z jądrem atomowym. Właśnie te nowe właściwości absorpcyjne powodują, że kryształ fluorytu czy ametystu nabiera koloru.

0.3.3 Hole color centre

– w przypadku kryształów górskich (czyli kwarcu - SiO_2 istnieje innego rodzaju źródło koloru. Na rysunku 8 przedstawiony został schemat powstawania dziurowego centrum koloru.



Rysunek 8: Powstawanie dziurowego centrum koloru w kwarcu[3]

Promieniowanie jonizujące wybija z orbit tlenu (2-) jeden z elektronów. Przeważnie elektron ten od razu wraca na swoje miejsce, ale czasem zdarza się, że w pobliżu znajdował się domieszany jon aluminium (3+). Wtedy jon aluminium zastępuje jon krzemu (4+) i aby zachować elektryczną neutralność kryształu, znajdujący się w pobliżu proton (H+) może związać wybity elektron, a tlenek aluminium tworzy w tym przypadku centrum koloru, pochłaniając większość światła i zabarwiając kryształ na kolor brązowo-szaro-czarny (tworząc tak zwane "dymne kryształy").

0.3.4 Zastosowanie promieniowania gamma w barwieniu kryształów

Jak zostało to wyżej opisane, niektóre kryształy zawdzięczają swoją barwę dziurowym, bądź elektronowym centrom koloru. Promieniowanie jonizujące oddziałując z elektronami znajdującymi się na powłokach atomów może powodować zwiększenie się ilości centrów koloru. Efekt zwiększenia się f-centrów pod wpływem promieniowania jonizującego jest największy dla promieniowania gamma, a w drugiej kolejności β , ponieważ kwanty γ przenikają całą strukturę kryształu. Cząstki β są pochłaniane na niewielkich głębokościach, a cząstki α wytracają praktycznie całą swoją energię na pierwszych warstwach atomowych kryształów. Pomimo tego każdy typ promieniowania jonizującego może brać udział w procesie tworzenia centrów koloru. Barwienie kryształów znalazło przede wszystkim zastosowanie w przemyśle jubilerskim, gdzie sztucznie otrzymuje się pożądaną, głęboką i nasyconą kolor minerałów.

0.3.5 Trwałość koloru

W przypadku elektronowych centrów koloru, barwa kryształu jest wynikiem elektronu złapanego w pułapkę potencjału. Poprzez zwiększenie temperatury sieci krystalicznej, np. poprzez podgrzanie kryształu, elektrony mogą zostać uwolnione z pułapki, emitując energię w postaci fotonów. Jest to zjawisko zwane termoluminescencją i może być wykorzystywane w detektorach biernych promieniowania - tak zwanych dawkomierzach. Ponieważ ilość utworzonych centrów koloru nie zależy od energii promieniowania jonizującego (musi być jedynie wystarczająca, by wybić elektron z powłoki atomowej), a od dawki przyjętej przez kryształ, podczas podgrzewania kryształu większa ilość elektronów zostanie uwolniona, a co za tym idzie - większa ilość fotonów wyemitowana - co może służyć jako wskaźnik dawki przyjętej w danym okresie czasu. Oczywiście dzisiaj stosowane jako dawkomierze są materiały o większej czułości na promieniowanie, na ogół jest to fluorek litu aktywowany magnezem i tytanem (LiF:Mg, Ti), oraz fluorek litu aktywowany magnezem, miedzią i fosforem (LiF:Mg, Cu, P).

0.4 Barwienie kryształów przy pomocy promieniowania jonizującego

W tej części opracowania zostały wyniki badań autora nad wpływem promieniowania jonizującego na kolor kryształów fluorytu, ametystu i kwarcu.

W tym celu widmo transmisyjne po oświetlaniu światłem białym odpowiednich kryształów, zostało zbadane, a następnie próbki zostały poddane działaniu pro-

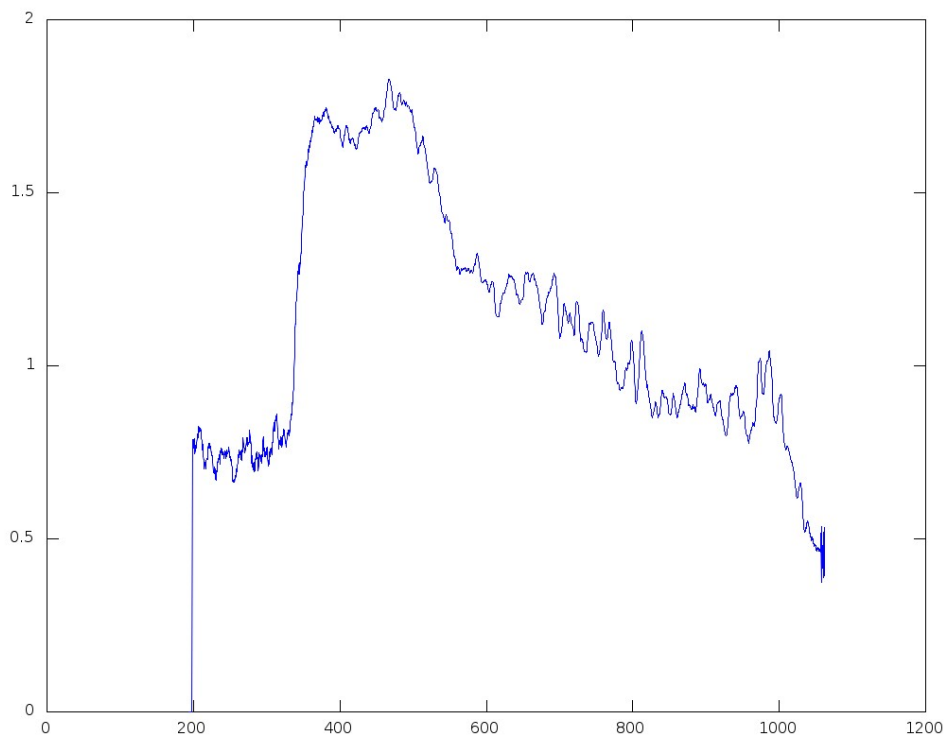
mieniowania jonizującego przez 24 godziny. Źródłem promieniowania był sód-21 o niewielkiej aktywności ok. 400 kBq. Na rysunku 9 przedstawione są badane próbki.



Rysunek 9: *Badane kryształy: 1 – kwarc nr 1; 2 – fluoryt zielony; 3 – kwarc nr 2; 4 – ametyst; 5 – fluoryt fioletowy*

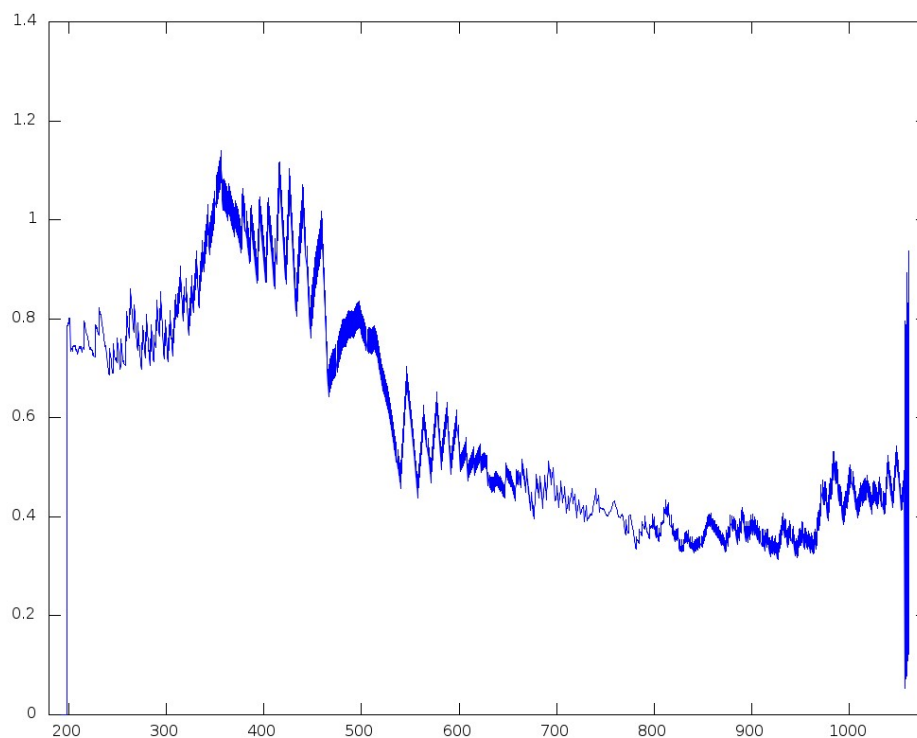
Ze względu na niewielką aktywność źródła kryształy nie zmieniły koloru na tyle, by można to było dostrzec bez stosowania aparatury pomiarowej. W celu zbadania zmian ponownie zostały zmierzone widma transmisyjne odpowiednich kryształów po oświetleniu tym samym źródłem światła białego. Następnie widma uzyskane po napromieniowaniu kryształów zostały podzielone przez te uzyskane przed ekspozycją na promieniowanie. Wyniki zamieszczone są poniżej.

Na rysunku 10 przedstawiony został stosunek widm dla fluorytu fioletowego. Widoczna jest zwiększona transmisja fal o długości od 350nm do 550nm. Jest to zakres odpowiadający przede wszystkim barwie fioletowej, czyli intensywność koloru wzrosła. Może to sugerować utworzenie się większej ilości f-centrów na skutek ekspozycji kryształu na promieniowanie jonizujące.



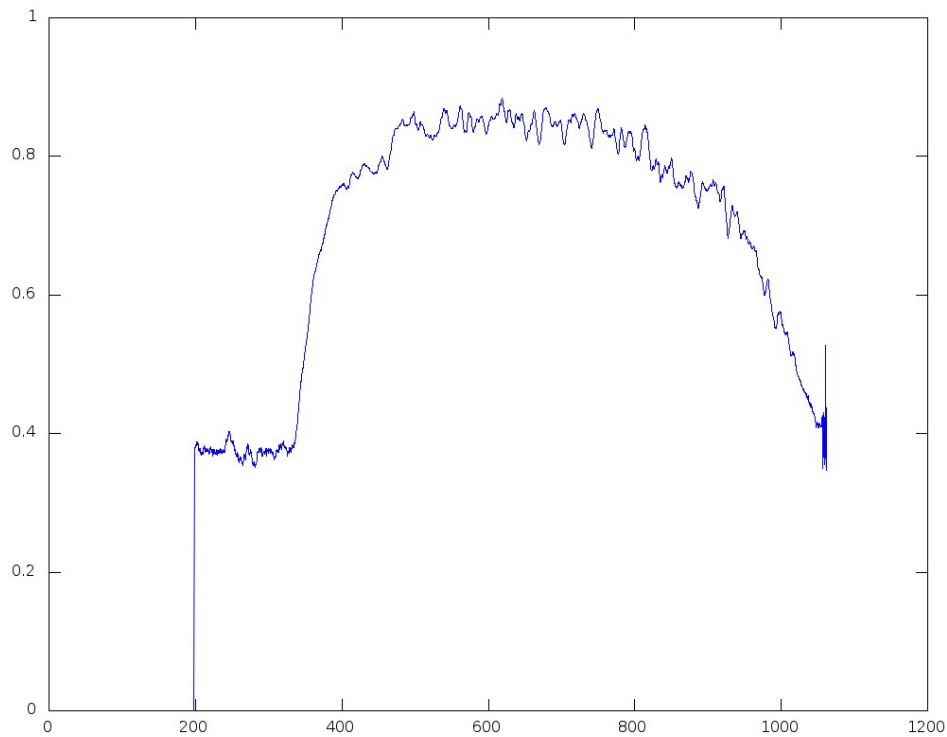
Rysunek 10: *Stosunek widm dla fluorytu*

Na rysunku 11 przedstawiony został stosunek widm dla fluorytu fioletowego zielonego. Wyróżniają się dwa obszary o mniejszej absorpcji fal – dla zakresu 350nm – 400nm, oraz dla 450nm – 550nm. Pierwszy obszar to zakres długości fal odpowiadający kolorowi fioletowemu, drugi zaś zielono-turkusowemu. Sugeruje to zwiększenie ilości elektronowych centrów koloru na skutek wybicia z sieci jonów fluoru, oraz dziurowych centrów koloru, poprzez podmianę w sieci krystalicznej domieszanych atomów nadających zielony odcień.



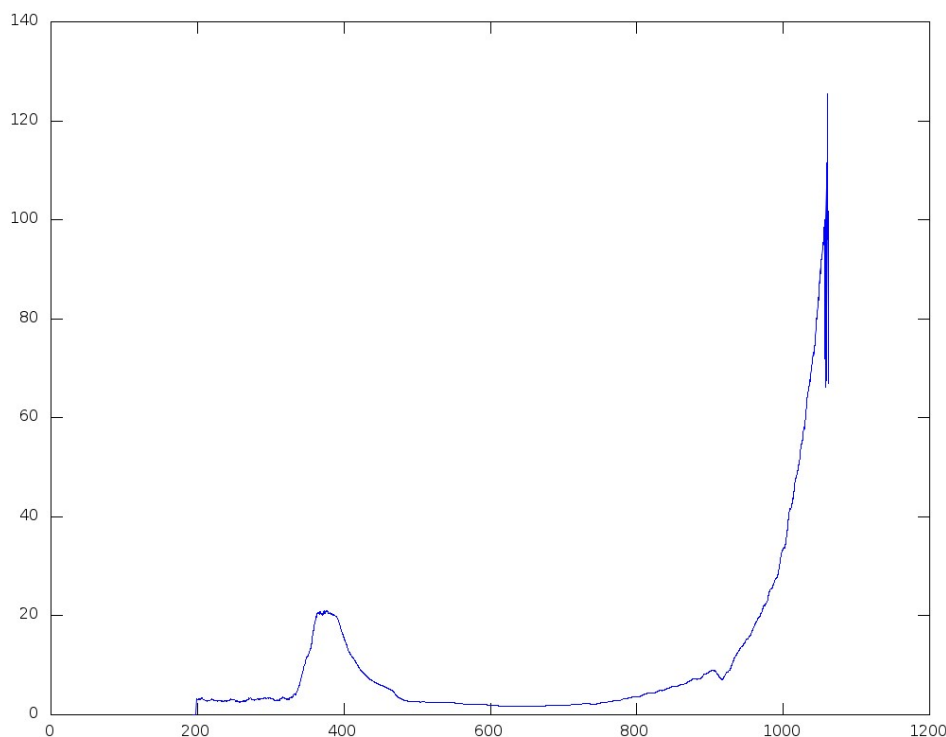
Rysunek 11: *Stosunek widm dla fluorytu zielonego*

Na rysunku 12 przedstawiony został stosunek widm dla kwarcu numer 2. Kryształ ten stracił na transmisyjności w całym spektrum światła widzialnego – zgodnie z teorią, łączące się domieszki jonów glinu z protonami tworzą coraz większą ilość dziurowych centrów koloru skutek wybijanych elektronów z powłok tlenu przez promieniowanie gamma. Największy wzrost absorpcji promieniowania jest obserwowany w ultrafiolecie i podczerwieni.



Rysunek 12: *Stosunek widm dla kwarcu*

Na rysunku 13 przedstawiony został stosunek widm dla Ametystu. Dobrze widoczny pik zwiększonej transmisyjności dla zakresu fal od 350nm do 450nm odpowiada najsilniejszemu dla wszystkich kryształów wzmocnieniu barwy fioletowej. Oprócz tego zwiększona została transmisja promieniowania podczerwonego.



Rysunek 13: *Stosunek widm dla ametystu*

0.5 Podsumowanie

Źródłem koloru w niektórych kryształach są elektronowe bądź dziurowe centra koloru. Ilość tych centrów może być zwiększona poprzez wystawienie kryształów na działanie promieniowania jonizującego, co skutkuje zwiększeniem nasycenia koloru. Ze względu na względnie wysoką przenikalność materii, promieniowanie gamma ma największy wpływ na tworzenie się f-centrów. Efekt ten znajduje zastosowanie głównie w przemyśle jubilerskim, aczkolwiek dzięki podobnemu zjawisku działają szeroko stosowane dawkomierze, będące biernymi detektorami promieniowania jonizującego. Przedstawione wyniki badań potwierdzają teorię wpływu promieniowania jonizującego na barwę kryształów.

Bibliografia

- [1] Krystyna Wosińska, *Wykłady*, źródło 4
- [2] Jan Pluta, *Wykłady z przedmiotu Metody i Techniki Jądrowe*, źródło 5, 6, 7
- [3] *Gemstone Colors From Defects*, źródło 8, 9
- [4] *Causes of Color* źródło 8
- [5] Kurt Nassau, *The Causes of Color*, *Scientific American*
- [6] Mirosław Makowiecki, *Wstęp do fizyki jądra atomowego*