



Nobel 2009 z fizyki – detektory CCD

Wojciech Gawlik
Instytut Fizyki UJ

Tegoroczna Nagroda Nobla z fizyki została przyznana za odkrycia głęboko już zakorzenione w naszym codziennym życiu. Komitet Noblowski postanowił uhonorować połową nagrody Charlesa Kuen Kho za opracowanie światłowodów pozwalających na przesyłanie informacji na duże odległości, a drugą połową Willarda Sterlinga Boyle'a i George'a Elwooda Smitha za opracowanie cyfrowych czujników optycznych.



Willard Boyle i George Smith w czasie prac nad CCD

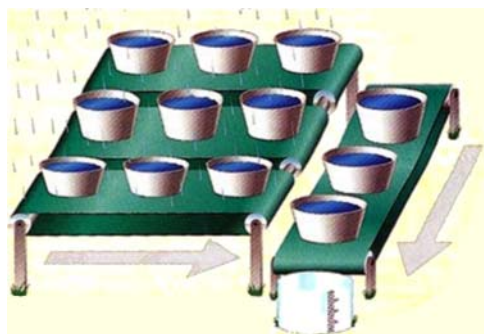
Inaczej niż w przypadku większości wcześniej nagradzanych odkryć fizycznych, niełatwych do objaśnienia laikom, tegoroczne nagrody przyznano za prace, których wyniki są powszechnie stosowane. Urządzenia te są już tak powszechne, że wiele osób było bardzo zaskoczonych decyzją jury.

Połowa tegorocznej nagrody została przyznana **Willardowi Sterlingowi Boyle'owi i George'owi Smithowi** za odkrycie, które zrewolucjonizowało technikę rejestracji obrazów optycznych – czujnik typu CCD. Nazwa jest skrótem tajemniczo brzmiącego określenia *Charge-Coupled Device* (urządzenie ze sprzężeniem ładunkowym). Pod tą zagadkową nazwą rozumiemy dziś w istocie elektroniczne oko – macierz (matrycę) elementów reagujących na światło i generujących impulsy elektryczne proporcjonalne do natężenia padającego światła. W oku tę rolę pełnią komórki pręcików i słupków tworzące siatkówkę, a wytworzone przez nie bodźce transportowane są do „centralnego procesora”, czyli do mózgu. O ile stosunkowo łatwo skonstruowano elektroniczne światło-

czułe czujniki – dzięki wczesnym pracom Einsteina znamy zjawisko fotoelektryczne i umiemy je wykorzystać w fotodiodach, o tyle poważne problemy stwarzała konieczność miniaturyzacji i odpowiednio szybkiego przesyłania sygnałów od poszczególnych fotodiod do układu procesora, w którym miały one zostać złożone w obraz. Odkryte przez tegorocznych noblistów CCD było pierwotnie systemem przekazywania informacji poszczególnych komórek matrycy.

Zauważmy, że w oku każdy pręcik i czopek przekazuje swe sygnały za pomocą pojedynczych neuronów do mózgu. Stopień miniaturyzacji, jaki osiągnęła natura jest znakomity. Gdyby podobną rolę miały przejąć tradycyjne połączenia elektryczne za pomocą drutów, rozmiary takiego sztucznego oka byłyby monstrualne! Rozwiązanie tego problemu stało się możliwe dzięki rozwojowi techniki produkcji miniaturowych układów półprzewodnikowych o wielkim stopniu integracji, tzw. *chipów* elektronicznych, które już wcześniej doprowadziły do rewolucji w elektronice i informatyce. W latach 70. możliwe stało się wyprodukowanie chipu z macierzami obejmującymi 100x100 fotoelementów (pikseli). Nadal jednak pozostawał nierozwiązany problem transportu ładunków elektrycznych, wygenerowanych światłem w każdym z tych elementów. Połączenie każdego z nich pojedynczym przewodem było wprawdzie możliwe, ale ponieważ liczba tych przewodów rosła kwadratowo ze wzrostem liczby fotoelementów i już dla macierzy 100 x 100 wynosiła 10 000, nie było to praktycznym rozwiązaniem.

W.S. Boyle i G.E. Smith pracujący wspólnie w sławnym *Bell Laboratories* w New Jersey rozwiązali ten problem przez zastosowanie do sczytywania ładunków zasady „łańcucha strażackiego” – gaszący pożar strażacy ustawieni w szereg przekazują wiadra z wodą kolejno od jednego do drugiego. (Rysunek przedstawia dwuwymiarową wersję takiej „organizacji pracy”). W istocie, to właśnie takiemu systemowi nadali oni nazwę CCD i mieli zamiar wykorzystywać go do pamięci półprzewodnikowych. Później dopiero rozwinęli oni (głównie G.E. Smith ze swoimi współpracownikami) zastosowania do przestrzennych czujników fotoelektrycznych – sensorów kamer fotograficznych. W czujniku CCD, ładunki wygenerowane w jednej linii macierzy fotoelementów są przekazywane za pomocą tranzystorów od diody do diody wzdłuż danej linii i odczytywane na brzegu macierzy. Odczytywanie sygnałów poszczególnych diod jest taktowane zegarem układu, co sprawia, że sygnał z całej linii macierzy na jej brzegu ma formę regularnych impulsów elektrycznych o różnych amplitudach, pozwalających na jednoznaczne przypisanie konkretnego impulsu konkretnej komórce czujnika. Z n^2 elementów macierzy obejmującej $n \times n$ pikseli, otrzymujemy więc sygnał od n linii, które w ten sam sposób można kolejno sczytać i przesłać pojedynczym przewodem do dalszej obróbki.



Ilustracja zasady dwuwymiarowego „łańcucha strażackiego” – podstawy sczytywania ładunków z poszczególnych pikseli czujnika kamery CCD za pomocą pojedynczego przewodu (ze strony www.nobelprize.org)

Ten sposób odczytu okazał się być bardzo skuteczny i szybko znalazł szerokie zastosowania. Macierze CCD stawały się coraz powszechniejsze, ich jakość systematycznie się poprawiała, a ceny malały. Szybko pojawiły się także macierze pozwalające na rejestrację obrazów kolorowych. W tym celu konieczne było opracowanie czujników reagujących w różny sposób na różne kolory światła (różne długości fali). Najprostszym, do dziś powszechnie stosowanym sposobem jest użycie filtrów transmisyjnych (odpowiednio barwionych materiałów syntetycznych), które w formie mozaiki przykrywają macierz fotodiod. Dla odtworzenia czułości ludzkiego oka na kolory, w mozaice tej połowa filtrów przepuszcza kolor zielony (G – *green*), $\frac{1}{4}$ czerwony (R – *red*) i $\frac{1}{4}$ niebieski (B – *blue*). Tworzone są grupki trzech sąsiadujących fotoelementów RGB, które dają informacje o rozkładzie natężenia różnych widmowych składowych światła na powierzchni macierzy, a w konsekwencji kolorowy obraz cyfrowy.

Czujniki i kamery CCD, jak wiadomo zrewolucjonizowały fotografię i kinematografię. Cyfrowe aparaty i kamery fotograficzne są już powszechnie montowane nawet w telefonach komórkowych. Poza domowymi potrzebami, zastosowań kamer CCD jest też bez liku. Wymieńmy tu przynajmniej dwa: Teleskop Hubble’a, którego znaczenie dla astronomii jest trudne do przecenienia, byłby mało przydatny, gdyby rejestrował obrazy na tradycyjnej kliszy fotograficznej bez możliwości ich natychmiastowego przesyłania na Ziemię. W medycynie coraz powszechniej stosowane są miniaturowe kamery wprowadzane do organizmu pacjenta, aby śledzić zmiany chorobowe, nadzorować przebieg zabiegów chirurgicznych dokonywanych w niewidocznych miejscach, a także w połączeniu z odpowiednimi programami, rejestrować niewidoczne gołym okiem zmiany chorobowe.

Powszechność i ważność zastosowań wynalazków dokonanych przez tegorocznych Laureatów świadczy o ich doniosłości i znakomicie odpowiada założeniom fundatora nagrody, który w swym testamencie (http://nobelprize.org/alfred_nobel/will/testamente.html) zapisał, że nagroda powinna być przyznawana tym, którzy *przynieśli ludzkości największe korzyści*.