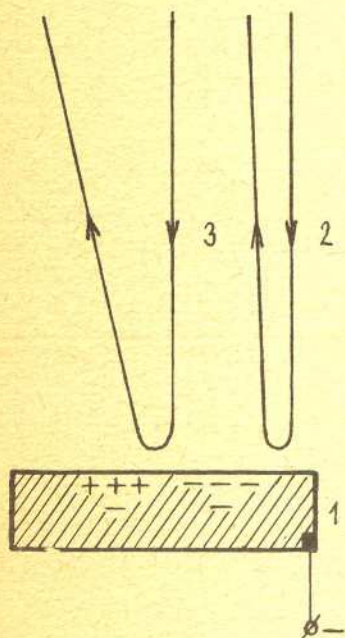


Nowe możliwości mikroskopii elektronowej

Doc. dr hab. Edmund IGRAS

MIKROSKOPIA ELEKTRONOWA POZWALA WIDZIEĆ PRZEDMIOTY NIEWIDZIALNE DLA MIKROSKOPII ŚWIETLNEJ

Szczególną cechą każdego mikroskopu jest możliwość zobaczenia przedmiotów niewidzialnych gołym okiem. Jednym z najważniejszych parametrów mikroskopu jest tak zwana zdolność rozdzielcza. Określa ona minimalne rozmiary detali budowy danego obiektu, które można jeszcze zaobserwować. Na przykład za pomocą mikroskopu świetlnego nie można obserwować wielu bakterii z powodu ich zbyt małych rozmiarów. Przyczyną fizyczną ograniczającą zdolność rozdzielczą mikroskopu świetlnego jest rozmycie szczegółów obrazu wskutek dyfrakcji światła. Im krótsze fale, tym mniejsze rozmycie, a więc — większa zdolność rozdzielcza. Z kolei w mikroskopie elektronowym bakterie i wirusy stają się widzialne. Mało tego, mikroskop elektronowy pozwala uzyskać obrazy szczegółów wewnętrznej budowy bakterii i wirusów. Dzieje się tak dlatego, że zdolność rozdzielcza współczesnych mikroskopów elektronowych osiąga wartość zaledwie kilku stumilionowych części centymetra (zdolność rozdzielcza mikroskopu świetlnego jest około 500 razy gorsza). Innymi słowy, mikroskop elektronowy pozwala obserwować mikroszczegóły około 500 razy mniejsze niż jest to możliwe przy użyciu mikroskopu świetlnego. Wiązkę elektronów, która w mikroskopie elektronowym zastępuje światło, można potraktować też jak falę. Długość fali elektronowej jest tym mniejsza, im szybciej biegają elektrony. Przyspieszając więc elektrony do odpowiedniej prędkości, otrzymujemy falę elektronową o odpowiedniej małej długości, dzięki czemu uzyskujemy znaczne polepszenie zdolności rozdzielczej.



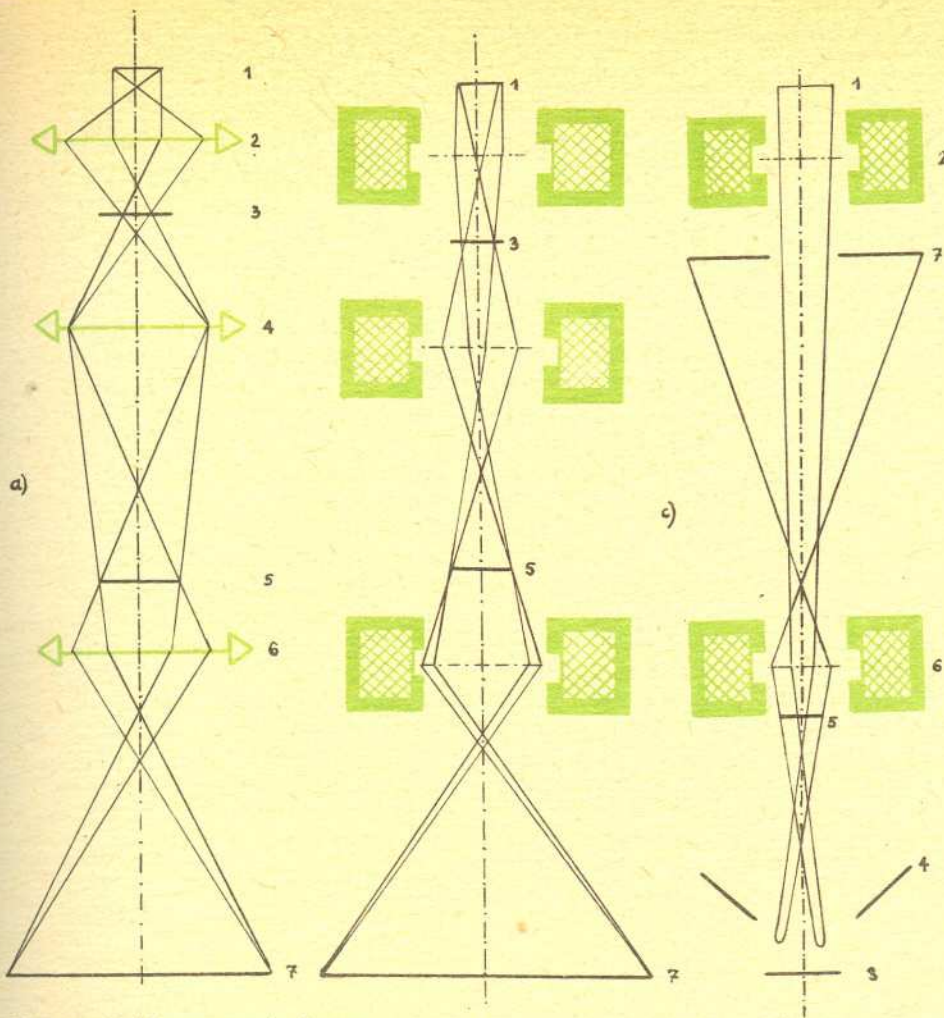
Uproszczony szkic powstawania obrazu lokalnego nagromadzenia ładunków elektrycznych przy powierzchni próbki oglądanej w zwierciadlanym mikroskopie elektronowym: 1 — próbka podłączona do ujemnego bieguna źródła napięcia elektrycznego; 2 i 3 — torzy elektronów dochodzących do powierzchni próbki i odchodzących od niej dzięki odpychającemu polu elektrycznemu; 2 — tor elektronu, którego ruch przy powierzchni próbki nie został zakłócony; 3 — tor elektronu, który został zakłócony przez obecność dodatnich i ujemnych ładunków elektrycznych na powierzchni próbki. W wyniku takiego zakłócenia torów elektronów przez niejednorodności elektryczne na powierzchni próbki — w różnych miejscach ekranu fosforescencyjnego mamy różną gęstość elektronów przynoszących informację. Dzięki temu ekran ten świeci w danym miejscu mniej lub bardziej intensywnie dając niejako mapę elektryczną próbki.

JAK ZBUDOWAĆ MIKROSKOP POZWALAJĄCY WIDZIEĆ SZCZEGÓŁY PRZEDMIOTÓW RÓŻNIĄCE SIĘ WŁAŚCIWOŚCIAMI ELEKTRYCZNYMI LUB MAGNETYCZNYMI*

Nie tylko zdolność rozdzielcza jest istotną cechą danego mikroskopu. Obecnie konstruowane są mikroskopy do celów specjalnych. Służą one do lokalizacji obszarów charakteryzujących się różnymi właściwościami fizyko-chemicznymi. Zdolność wykrywania takich obszarów jest również cennym parametrem mikroskopu. Można zbudować mikroskop, który będzie wytwarzać obrazy miejsc obiektu różniących się przewodnictwem elektrycznym i własnościami magnetycznymi; mikroskop taki wykryje na przykład różnice nagromadzenia ładunków elektrycznych, ukaże subtelne szczegóły struktury elektrycznej materiału próbki. W jaki sposób zbudować taki mikroskop i jakich cząstek użyć do oświetlenia obiektu? Oczywiście muszą to być cząstki, które będą oddziaływać z obszarami o wymienionych wyżej właściwościach. Takimi cząstkami są elektrony. Elektronom można nadawać różne prędkości. Czyni się to za pomocą dobierania odpowiednich wartości napięć elektrycznych przyspieszających ruch elektronów. Jeżeli chcemy wykryć bardzo słabe pole elektryczne lub magnetyczne za pomocą obserwacji zachowania się strumienia elektronów w pobliżu tych pól, to należy tak pokierować strumieniem elektronów, ażeby ich torzy zostały maksymalnie zakłócone. Można to uzyskać tylko wtedy, gdy prędkości elektronów będą minimalne w pobliżu poszukiwanych zakłóceń. Czas przebywania elektronów w pobliżu zakłóceń jest wtedy dłuższy, co powoduje silniejsze zakrzywienie ich torów.

POWOLNE ELEKTRONY DAJĄ NAJDOKŁADNIEJSZĄ INFORMACJĘ

Wyobraźmy sobie, że za pomocą odpowiedniego napięcia elektrycznego nadalimy strumieniowi elektronowemu określoną prędkość. Przypuśćmy, że ten strumień skierowany jest ku powierzchni pewnej próbki, do której możemy przykładać różne wartości napięcia elektrycznego. W szczególnym przypadku — gdy pole elektryczne wytworzone przy próbce posiada taki kierunek, że będzie działać siłą odpychającą na zbliżające się elektrony — przy odpowiednio dobranej wartości tego pola można nie dopuścić elektronów do powierzchni naszej próbki. Innymi słowy: można strumień elektronowy całkowicie wyhamować, zawrócić go i przyspieszyć w przeciwną stronę. W okolicach punktów, gdzie elektrony zmieniają silnie kierunek ruchu, posiadają one bardzo małe prędkości. Jeżeli punkty, w których następuje zmiana kierunku ruchu elektronów, leżą bardzo blisko powierzchni badanej próbki, to takie elektrony będą doskonałymi



Bieg promieni i powstawanie obrazu:

- a) w mikroskopie świetlnym;
- b) w prześwietleniowym mikroskopie elektronowym;
- c) w zwierciadlanym mikroskopie elektronowym

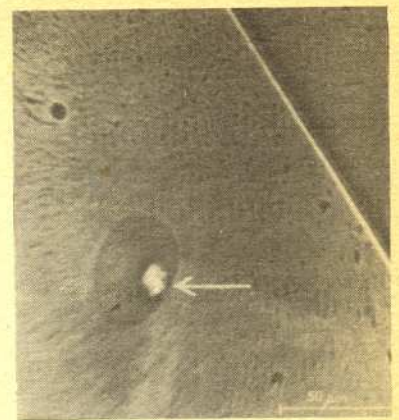
Rysunek przedstawia przekrój biegu promieni i soczewek

- 1 — źródło światła (w mikroskopie świetlnym) lub elektronów (w mikroskopie elektronowym);
- 2 — skupiająca światło soczewka kondensatora lub, w przypadku mikroskopu elektronowego, elektrony na oglądanym przedmiocie 3;
- 4 — soczewka obiektywu, dająca obraz 5 pierwszego stopnia powiększenia;
- 6 — soczewka projektora powiększająca dodatkowo obraz 5;
- 7 — obraz końcowy oglądany na odpowiednim ekranie

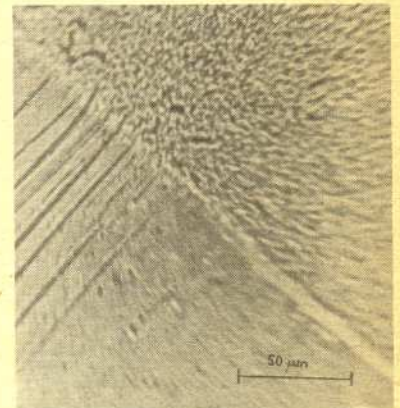
W przypadku mikroskopu elektronowego strumień elektronów skupiają soczewki magnetyczne

lub elektrostatyczne. Na rysunku wszystkie soczewki elektronowe, z wyjątkiem obiektywu mikroskopu zwierciadlanego, są typu magnetycznego. Soczewka obiektywu mikroskopu zwierciadlanego jest typu elektrostatycznego. Soczewka magnetyczna składa się z bardzo wielu (rzędu dziesiątek tysięcy) uzwojeń, przez które płynie stały prąd elektryczny. Uzwojenia w w soczewkach przedstawione są przez obszar zakreskowy. Uzwojenia te znajdują się w obudowie z magnetycznego materiału, np. żelaza (na rysunku — grube odcinki). Obudowa magnetyczna posiada przerwę. W obszarze przerwy pole magnetyczne dochodzi do przestrzeni strumienia elektronów i działa nań skupiająco. Odległość ogniskową soczewki można płynnie zmieniać przez zmianę natężenia pola magnetycznego, co realizuje się przez regulację natężenia prądu w uzwojeniach soczewki.

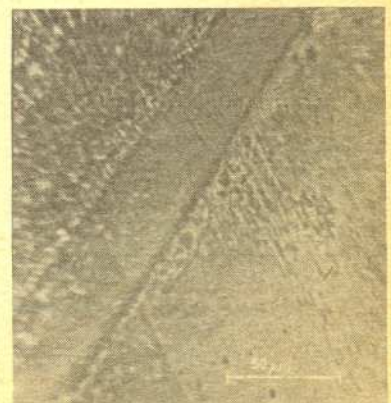
Soczewki elektrostatyczne — to odpowiedniego kształtu przesłony metalowe, do których przykładają się napięcia elektryczne. Pole elektryczne w pobliżu otworu przesłony decyduje o skupiających właściwościach soczewki tego typu.



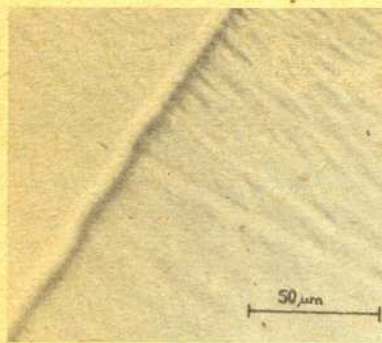
Obraz (elektryczny) złącza $p-n$ w krzemie. Złącze wykonano metodą implantacji boru w krzemie typu n (metoda implantacji polega na wstrzeliwaniu jonów domieszki, rozpedzonych w polu elektrycznym). Strzałka wskazuje niejednorodność elektryczną w części powierzchni typu p



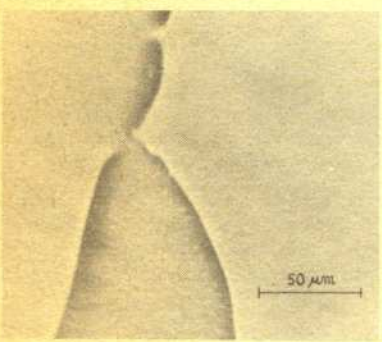
Granica między obszarami krzemiu o różnym przewodnictwie elektrycznym. Na powierzchni tych obszarów widoczna jest powierzchniowa struktura elektryczna



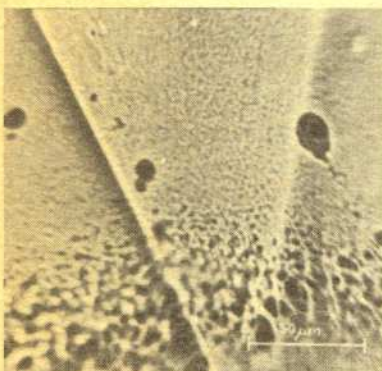
Obraz (elektryczny) powierzchni krzemiu z wąskim paskiem o odmiennym przewodnictwie elektrycznym niż części sąsiadujące



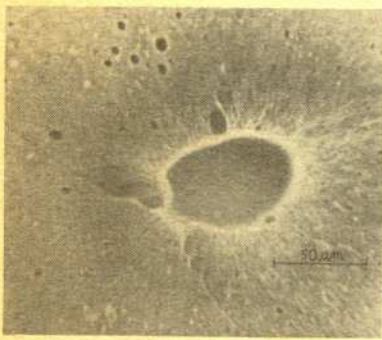
Obraz (elektryczny) bariery $p-n$ na powierzchni krzemu



Obraz (elektryczny) rozgałęzionego złącza $p-n$ w krzemie



Obraz (elektryczny) dwóch złączeń o różnym kontraście spowodowanym różną koncentracją domieszkowych atomów fosforu w krzemie typu p



Obraz części warstwy powierzchniowej krzemu, w której zmienił się typ przewodnictwa (obszar eliptyczny) w wyniku bombardowania jonami gazów. Jony te neutralizowały aktywność elektryczną domieszkowanych atomów galu, wprowadzonych uprzednio do warstwy powierzchniowej

informatorami o sytuacji dotyczącej rozkładu potencjału elektrycznego przy powierzchni próbki, wykryją ewentualne różnice namagnesowania różnych punktów powierzchni, lokalne nagromadzenia ładunków elektrycznych itp. W przypadku lokalnych zmian pola elektrycznego, przy obserwowanej powierzchni mamy do czynienia z elektrostatycznym przyciąganiem i odpychaniem powolnych elektronów. Tory tych elektronów będą pozmienniane zależnie od kształtu i rozkładu pól elektrycznych. W przypadku pola magnetycznego działa na elektrony tak zwana „siła Lorentza”, której wartość jest proporcjonalna do natężenia pola i składowej prędkości w kierunku prostopadłym do kierunku pola magnetycznego, a kierunek — prostopadły i do natężenia pola, i do kierunku ruchu elektronów.

CZY TO JUŻ NOWY RODZAJ MIKROSKOPU ELEKTRONOWEGO?

To, co powiedziano przed chwilą, określa zasadę działania specjalnego rodzaju mikroskopu elektronowego, zwanego mikroskopem zwierciadlanym. Za pomocą tego mikroskopu można uzyskiwać obrazy rozkładu ładunku elektrycznego na powierzchni próbki, zmian spadków napięć elektrycznych wzdłuż próbki, spowodowanych zmianami przewodnictwa, obrazy zmian namagnesowania itp. Ale w jaki sposób otrzymać powiększony obraz? W celu uzyskania powiększonego obrazu stosuje się specjalne soczewki elektronowe. Składają się one zwykle z zestawów kilku przesłon metalowych. Jeżeli do tych przesłon przyłoży się odpowiednie napięcia, to wytworzone między przesłonami pole elektryczne działa na elektrony skupiająco lub rozpraszająco, podobnie jak w przypadku fal świetlnych działają soczewki szklane. W celu skupienia wiązki elektronowej można również zastosować soczewki magnetyczne. Są to odpowiednio uzwojenia, przez które przepuszcza się prąd elektryczny. Wytworzone dzięki przepływowi prądu pole magnetyczne działa na elektrony jak soczewka. Takie soczewki powiększają niesiony przez strumień elektronowy obraz, który można oglądać na ekranie świecącym pod wpływem uderzających w niego elektronów (podobnie, jak się to dzieje na przykład na ekranie telewizora).

DO CZEGO JEST POTRZEBNY ZWIERCIADLANY MIKROSKOP ELEKTRONOWY?

Mikroskop ten potrafi uczynić widzialnym to, co jest niewidzialne przy zastosowaniu innych rodzajów mikroskopów, w tym również mikroskopów elektronowych. Mamy więc możliwość rozszerzenia badawczych perspektyw mikroskopii. Zwierciadlany mikroskop elektronowy posiada szczególne znaczenie przy badaniu powierzchni materiałów półprzewodnikowych. Jak wiadomo, materiały te stanowią podstawę współczesnej elektroniki. Większość przyrządów półprzewodnikowych działa na zasadzie wykorzystania efektów fizycznych występujących na stykach między częściami materiału o różnych własnościach elektrycznych. Mikroskop zwierciadlany pozwala dokładnie zbadać występujące na wspomnianych stykach pola elektryczne. Mikroskop zwierciadlany potrafi dać informację pozwalającą tak sterować technologią elektronicznych elementów półprzewodnikowych, ażeby elementy te miały lepsze parametry i były bardziej niezawodne.

MIKROSKOP ZWIERCIADLANY ODKRYWA NOWE ZJAWISKA

Dla pewnych celów na powierzchni kawałka półprzewodnika, na przykład typu n , wytwarza się cieniutką warstewkę typu p ; między warstewką a podłożem powstaje więc złącze $p-n$. Na przykład w krzemie typu n osiąga się taką zmianę przewodnictwa przez wprowadzenie doń atomów galu. Gal jest trójwartościowy, krzem natomiast — czterowartościowy. Atomy galu, zastępując atomy krzemu w sieci krystalicznej, odbierają więc tym ostatnim po jednym elektronie. W ten sposób powstaje luka w obsadzie stanów elektronowych. Nazywa się ją dziurą. W polu elektrycznym dziura taka zachowuje się jak dodatni nośnik prądu elektrycznego (na marginesie może warto przypomnieć, że w półprzewodniku typu n przeważają elektrony swobodne, w półprzewodniku typu zaś p — owe dziury).

Otóż, badając strukturę elektryczną takich warstewek w mikroskopie elektronowym w Katedrze Fizyki i Elektroniki Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie, udało się odkryć zupełnie nowe zjawisko fizyczne. Polega ono na bardzo nietypowym zachowaniu się domieszek galu w krzemie. Mianowicie atomy galu w krzemie, pod wpływem bombardowania (nawet bardzo słabego) powierzchni krzemu domieszkowanego galem, jonami lub innymi cząstkami o wysokiej energii, przestają być elektrycznie aktywne, czyli przestają wytwarzać dziury (nośniki



Rozwiązanie zadania M17.

Jeżeli n jest liczbą parzystą, to n jest liczbą parzystą większą od 2, a więc różnorodna.

Jeżeli zaś n jest liczbą nieparzystą, $n =$

$$= 2k + 1 \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \text{ to } n_{2k+1} =$$

$$= (2k + 1)^4 + 4^{2k+1} = (2k + 1)^4 + 4 \cdot 4^{2k} =$$

$$= (2k + 1)^4 + 4 \cdot (2^2)^{2k}. \text{ Zachodzi jednak}$$

tożsamość:

$$a^4 + 4b^4 = a^4 + 4a^2b^2 + 4b^4 - 4a^2b^2 =$$

$$= (a^2 + 2b^2)^2 - (2ab)^2 =$$

$$= (a^2 + 2ab + 2b^2)(a^2 + 2ab - 2b^2),$$

z której wynika, że n_{2k+1} jest iloczynem dwóch

liczb naturalnych. Może to więc być liczba

pierwsza tylko wtedy, gdy różniący

z czynników będzie miał wartość bezwzględną

równą 1, a więc gdy dodatnia liczba $(2k + 1)^2 +$

$$- 2(2k + 1) \cdot 2^k + 2 \cdot (2^k)^2 = (2k + 1 - 2^k)^2 +$$

$$+ (2^k)^2 \text{ będzie równa 1. Musi więc być } 2^k = 1$$

$k = 0$, i rzeczywiście $n_1 = 1^4 + 4^1 = 5$ jest

liczbą pierwszą, jedyną w ciągu liczb.

prądu) w krzemie (choć nie wpływa to na wygląd próbki). Łatwo to zauważyć w mikroskopie zwierciadlanym, gdyż ukazuje on nie sam widok powierzchni, lecz rozkład pola elektrycznego przy powierzchni. Łatwo też te efekty zmierzyć, gdyż zmianie liczby nośników prądu musi towarzyszyć zmiana oporu elektrycznego cienkiej warstwy powierzchniowej próbki (w tym miejscu, gdzie operuje wiązka jonów).

Zjawisko to tłumaczymy sobie następująco. Atomy galu wprowadzone do krzemu lokują się w węzłach sieci krystalicznej, zastępując tam atomy krzemu (a więc — tworząc też wiązania chemiczne z sąsiednimi atomami kryształu). Bombardujące próbkę jony lub cząstki wysokiej energii wdzierają się do niej i tam wybijają atomy galu z ich położeń w węzłach sieci do położeń międzywęzłowych. W takich położeniach atomy galu „czują się” jak przysłowiowe piąte koło u wozu. Nie zastępując już atomów krzemu w sieci, nie tworzą też wiązań chemicznych z innymi atomami, a więc nie wytwarzają dziur. Im więc silniejsze jest i dłużej trwa bombardowanie, tym więcej atomów galu jest wytrąconych z położeń węzłowych (do położeń międzywęzłowych); zmniejsza się więc liczba nośników prądu, a więc musi zmieniać się opór powierzchniowy próbki. Pomiaru zmian powierzchniowego oporu próbki krzemu z cieniutką warstewką zawierającą atomy galu umożliwiającą więc wyznaczenie dawki jonów (lub innych cząstek o wysokiej energii) pochłoniętych przez próbkę. O tę zasadę oparliśmy działanie nowego rodzaju bardzo czułego i bardzo małego dozymetru promieniowania jonizującego.

Jeśli próbka jest przez długi czas poddana działaniu dostatecznie silnego strumienia jonów, to oczywiście wszystkie atomy galu zostaną w niej elektrycznie zneutralizowane i cienka warstewka krzemu nasycona galem (a więc typu p) powróci do swych pierwotnych własności, czyli znów będzie typu n . W ten sposób odpowiednio cieniutką wiązką jonów można na niej „rysować”, niczym ołówkiem na papierze, „kreski” typu n , czyli — wytwarzać powierzchniowe złącza $n-p$ w bardzo dużych ilościach na bardzo małym obszarze. Być może znajdzie to zastosowanie do wytwarzania mikroskopijnych złąc $n-p$ lub do zapisu informacji. Zjawisko jest odwracalne w tym sensie, że skutki działania jonów na atomy galu w próbce można całkowicie zniweczyć. Wystarczy w tym celu podgrzać próbkę do temperatury około $+200^\circ\text{C}$. Wtedy, wskutek silniejszych drgań cieplnych, atomy galu znów „powskakują” do węzłów sieci i wszystko powróci do stanu sprzed bombardowania próbki jonami.

Nie wiemy jeszcze, dlaczego zjawisko to występuje tylko w krzemie domieszkowanym galem. Czyżby mogło ono powstawać jedynie w pewnych szczególnych warunkach, które spełnione są akurat w przypadku krzemu z galem jako domieszką, a w innych badanych przez nas przypadkach — nie? Jakie to ewentualnie mogą być warunki i w jaki sposób są określone przez wzajemne oddziaływanie atomów domieszki z atomami macierzystymi półprzewodnika?

Suwak od starej kurtki

również może być „przyborem” do uprawiania matematyki. Wytnijmy np. z grubszego filcu dwie jednakowe figury (jak na rysunku) i przyszyjmy jedną z części suwaka do pierwszej figury, a drugą do drugiej (również według wskazań rysunku). Wymiary figury ustalamy na podstawie długości suwaka. Linia przerywana oznacza załamanie filcu — aby je uzyskać, możemy złożyć wycięte figury wzdłuż tej linii i włożyć na pewien czas np. między książki albo przeprasować. Jeśli teraz zapniemy suwak, to otrzymamy czworościan.

Pytanie: Czy można (ewentualnie — jak?) uzyskać przez „zapinanie” sześciąt?

A inne wielościanny foremne?

Weźmy teraz wąski pasek jakiejś cieńszej materii, nieco dłuższy od połowy suwaka. Gdy zszyjemy pasek według rysunku, otrzymamy wstęgę Möbiusa. Figura ta odznacza się tym, że jest jednostronna — co nas zresztą tu nie interesuje — i ma tylko jeden brzeg, co jest istotne, bo przyszywamy doń jedną z części suwaka. Drugą przyszywamy do brzegu koła odpowiedniej wielkości (wyciętego z tego samego materiału). Proszę teraz zapiąć. Nie da się? — to dobrze, gdyby się bowiem zapięło, mielibyśmy w ręku figurę czterowymiarową. Choć właściwie i tak mamy ją w ręku, tylko nieco „rozpiętą”.

M.

Uwaga! Redakcja nie bierze odpowiedzialności za skutki używania suwaków z nowych kurtek.

