



Leonard Sosnowski

1911 - 1986

**Inicjator badań w zakresie
fizyki półprzewodników
w Polsce**

**Powstanie „Polskiej Szkoły
Fizyki Półprzewodników”**

Warto odpowiedzieć na pytania:

Na jakim etapie rozwoju fizyki materii skondensowanej zaczęła się fizyka półprzewodników jako wyodrębniona dziedzina badań?

Jaki był stan fizyki półprzewodników w roku 1947, to jest w momencie kiedy badania w tej dziedzinie rozpoczęto w Polsce?

Rozwój mechaniki kwantowej stworzył teoretyczną podstawę opisu struktury materii skondensowanej

(1927) - *Walter Heitler i Fritz London* – pierwsze obliczenia wiązania chemicznego cząsteczki wodoru, początek chemii kwantowej.

(1927–31) - podstawy kwantowej teorii materii skondensowanej

Główni twórcy fizyki ciała stałego

1898-1905

Paul Drude, Hendrik Lorentz - klasyczna teoria przewodnictwa elektrycznego metali (także Edouard Riecke, Owen Richardson, J. J. Thomson, Niels Bohr)



1907-1912

Albert Einstein, Peter Debye ciepło właściwe ciał stałych



1926-1927

Wolfgang Pauli, Arnold Sommerfeld pierwsze zastosowanie statystyki Fermiego-Diraca do badania elektronów w metalach



1927-1928

M.J.O. Strutt - pasma energii

1928-1930

Felix Bloch, Léon Brillouin początek teorii pasmowej (metoda fal płaskich)



1928-1930

Felix Bloch, Rudolf Peierls - kwantowa teoria przewodnictwa elektrycznego metali

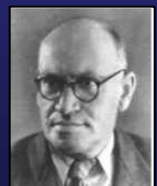


1928

Rudolf Peierls, Yakov Frenkel - przewodnictwo dziurowe

1930

Alan Wilson - klasyfikacja metali, dielektryków i półprzewodników według ich struktury pasmowej



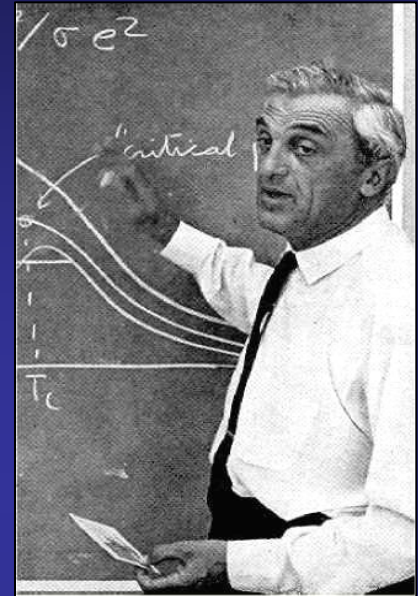
Niektórzy wybitni fizycy, np. Pauli, wyrażali się o fizyce ciała stałego z lekceważeniem, jako o „brudnej fizyce”, co nie przeszkadzało najwybitniejszym uczonym, włącznie z Paulim, pracować w tej dziedzinie.

„Historia fizyki półprzewodników nie jest historią wielkich heroicznych wysiłków teoretycznych, lecz starannej, inteligentnej pracy. Nie błyski geniuszu przynoszące wyniosłe budowle, ale wielka pomysłowość i niekończąca się zmienność nadziei i desperacji. Nie szerokie uogólnienia, lecz rozważna ocena granicy między wytrwałością i zawziętością. Tak więc historia fizyki ciała stałego, a szczególnie półprzewodników, jest nie tyle historią wielkich badaczy i ich wspaniałych dokonań, co historią nie opiewanych bohaterów tysięcy pomysłowych idei i zręcznych eksperymentów - postępu wytrwałego krocionoga, a nie lśniącego rumaka, a więc refleksją na temat epoki organizacji, a nie indywidualności.”

Ernest Braun, „*Selected topics from the history of semiconductor physics and its applications* (1992)” -
tłumaczenie A.K. Wróblewski

Kwantowy opis kryształu - funkcje Blocha

„Od początku byłem przekonany, że rozwiązanie, jeśli istnieje, może być znalezione tylko w falowej naturze elektronu... To, że istotną rolę może odgrywać periodyczność kryształu, przyszło mi na myśl, gdy przypominałem sobie doświadczenie pokazywane na wykładzie z fizyki elementarnej, kiedy to w wielu jednakowych, zawieszonych na pręcie w równych odstępach wahadłach sprzężonych ruch jednego z nich „wędrował” wzdłuż pręta od jednego wahadła do drugiego. Na początku stycznia [1928], mając tak ogólną ideę w głowie, powróciłem pewnego wieczoru do mojego wynajętego pokoju, wziąłem papier i ołówek i zacząłem rozważać najłatwiejszy przypadek pojedynczego elektronu w jednowymiarowym potencjale.



Felix Bloch
(1905-1983)

Stosując prostą analizę Fouriera znalazłem ku wielkiemu zadowoleniu, że rozwiązania równania Schrödingera różniły się od fali de Broglie'a cząstki swobodnej tylko przez modulację okresem potencjału. Uogólnienie na trzy wymiary było oczywiste...”

Bloch(1980)

Powolny początkowo rozwój fizyki ciała stałego. W latach trzydziestych spektakularne odkrycia w fizyce jądra i cząstek elementarnych.

Przełom i intensyfikacja badań po skonstruowaniu w 1947 roku pierwszego tranzystora (*John Bardeen, Walter Brattain i William Shockley*).

Początek rozwoju elektroniki kwantowej i wkrótce liczne zastosowania – mikroelektronika, optoelektronika, komputeryzacja i informatyka zmieniają życie w ostatnich dekadach XX wieku.

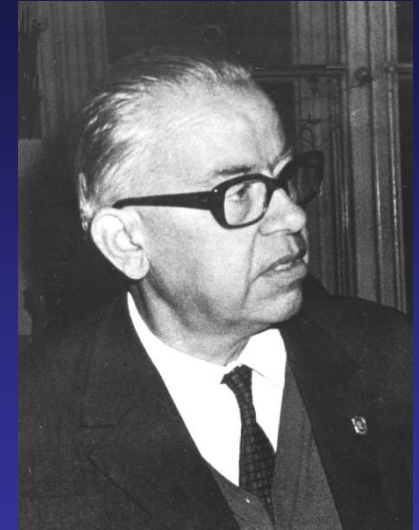
Skonstruowanie tranzystora stało się możliwe dzięki pojawieniu się idei i pierwszej technologii złącza półprzewodnikowego p-n i wyjaśnieniu procesów fizycznych w nim zachodzących (*Leonard Sosnowski; 1946 – 1947*)

Po zakończeniu wojny L. Sosnowski znalazł się w Anglii, gdzie zaproponowano mu pracę w Admiralty Research Laboratory w Teddington (1945 -1947).

Prace badawcze nad konstrukcją szybkich detektorów na bliską podczerwień do zastosowań wojskowych.

Zainteresowanie solami ołowiu, o których było wiadomo, że wykazują własności półprzewodnikowe i że mogą być użyteczne w detekcji promieniowania podczerwonego.

Warto wspomnieć, że kryształki galeny (PbS) były używane jeszcze przed wojną jako pierwsze półprzewodnikowe elementy detekcyjne fal radiowych. Wykorzystywano własności prostujące kontaktu typu metal-półprzewodnik (igła metalowa dotykająca kryształku galeny). W owym czasie wykorzystywano jedynie naturalne kryształy PbS. Technologia półprzewodników takich jak Ge czy Si jeszcze nie istniała. Kontakty ostrzowe stanowiły jedyny znany rodzaj złącz i były przedmiotem nader prostych rozważań teoretycznych i równie prostych doświadczeń.



Kluczowe prace

J. Starkiewicz, L. Sosnowski, O. Simpson,
Nature 158, 28 (1946).

L. Sosnowski, J. Starkiewicz, O. Simpson,
Nature 159, 818 (1947).

- Odkrycie silnego efektu fotowoltaicznego w złączach wykonanych z PbS.
- Opracowanie procedury technologicznej wykonania złącz p-n (taka nazwa pojawiła się później: w powyższych pracach używano pojęcia złącza nadmiarowo-niedomiarowego).
- prawidłowa identyfikacja źródła przewodnictwa typu n i p (nadmiarowy Pb i domieszki O).

Prace te otworzyły ogromne pole badań i zastosowań efektu fotowoltaicznego w półprzewodnikach.

Kluczowe prace

L. Sosnowski

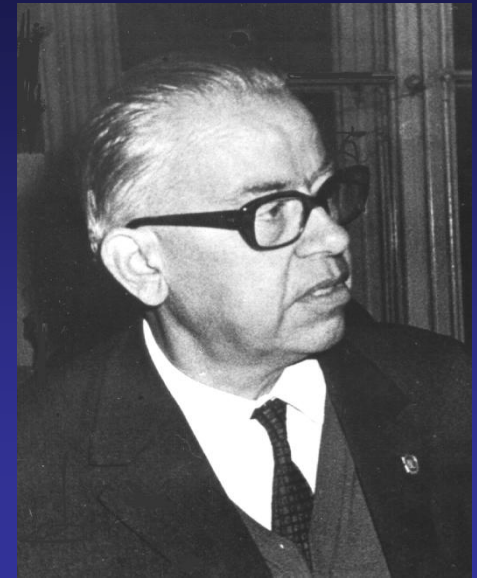
**“Excess-defect semiconductor contacts”
Phys. Rev. 72, 641 (1947).**

- Pierwsza historycznie praca tłumacząca zjawisko prostowania w złączach p-n i podająca przewidywaną ich charakterystykę prądowo-napięciową oraz zależność od temperatury.
- Pierwszy zarys zjawiska tunelowania kwantowego w ciele stałym, wyjaśnionego wiele lat później przez Esaki'ego za co otrzymał nagrodę Nobla. Niestety Sosnowski nie rozwinął tej idei na tyle poważnie, aby mógł być uznany za autora koncepcji tunelowania w złączach półprzewodnikowych.

Leonard Sosnowski

pierwsze prace z fizyki półprzewodników

Podsumowując 2 letnią działalność naukową (1945 – 1947) L. Sosnowskiego w Admiralty Research Laboratory w Teddington w Anglii można jednoznacznie stwierdzić, że:

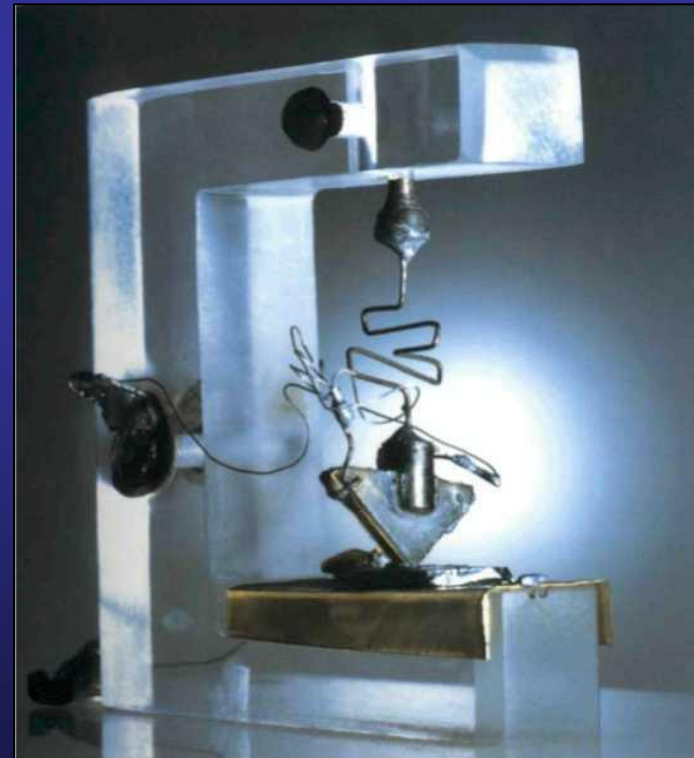
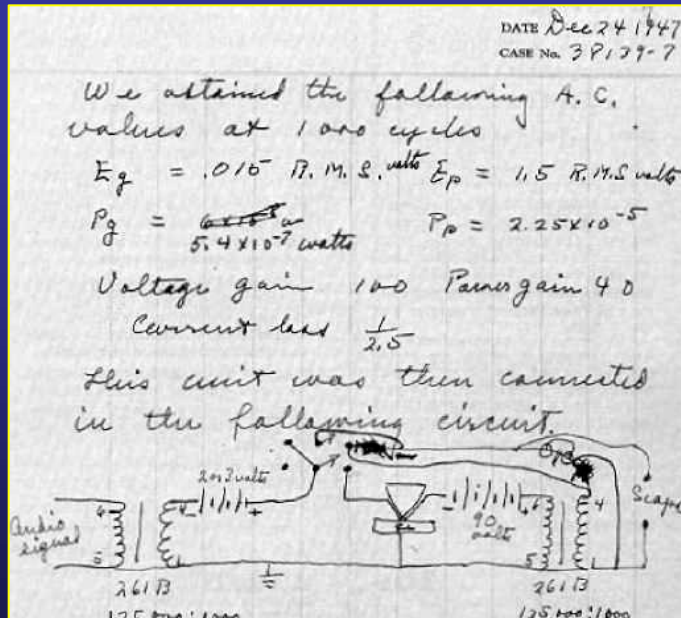
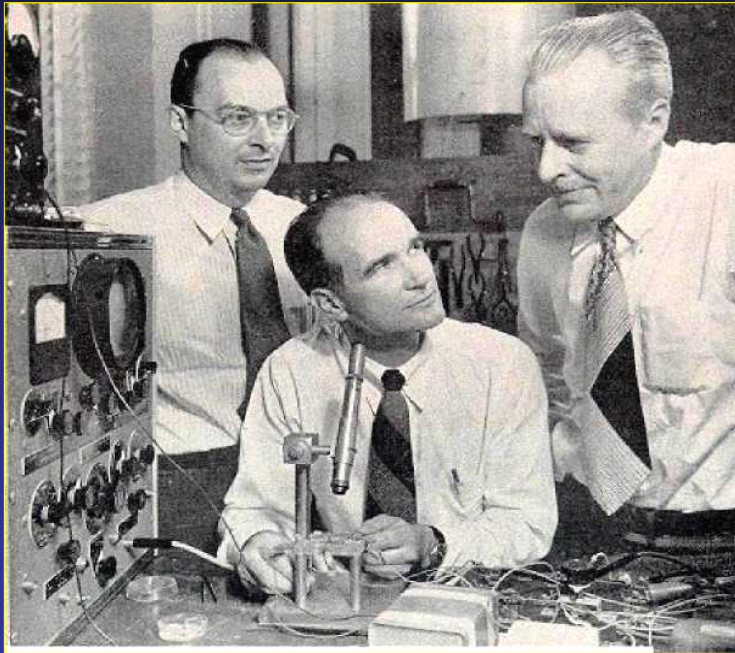


zapropował on pierwszy model tłumaczący ilościowo zjawisko prostowania oraz efekt fotowoltaiczny w złączu p-n. Wraz ze współpracownikami wykonał pierwsze “technologiczne” złącza p-n w półprzewodniku i wykorzystał je do konstrukcji wydajnych i szybkich detektorów podczerwieni. Były to prace pionierskie i tak są cytowane w literaturze (Schockley, Moss i inni).

Odkrycie tranzystora

**John Bardeen
William Shockley
Walter Brattain
1947 rok**

Nagroda Nobla - 1956 rok



Początkowe losy tranzystora

pewien morał

W 1953 roku Akio Morita, właściciel niewielkiej japońskiej firmy SONY, postanowił kupić licencję na odkryty niedawno tranzystor od właściciela patentu, którym był koncern Western Electric, i w którym uważano, że ten nowy wynalazek może mieć komercyjne zastosowanie wyłącznie w aparatach dla niedosłyszących bądź jako element wspomagający produkowane u Bella mechaniczne centrale telefoniczne. Morita zapłacił amerykańcom kwotę 25000 \$ i usprawniając w swoim laboratorium technologię wytwarzania tranzystorów zbudował pierwszy miniaturowy odbiornik radiowy uruchamiając jego produkcję na masową skalę. Elektronika użytkowa stała się impulsem dla dalszego rozwoju firmy SONY, która w krótkim czasie stała się wielkim koncernem o zasięgu globalnym.

Bezpośrednie konsekwencje skonstruowania pierwszego tranzystora

- dynamiczny rozwój mikroelektroniki półprzewodnikowej - początkowo na bazie Ge - tranzystory, diody, fotodiody itp.
- rozwój technologii wytwarzania wysokiej jakości monokryształów półprzewodnikowych - czystość, mała ilość defektów - wprowadzenie techniki czyszczenia strefowego i wykorzystanie metody Czochralskiego do wyciągania monokryształów.
- wielka intensyfikacja teoretycznych i eksperymentalnych badań podstawowych dotyczących przede wszystkim struktury pasmowej w realnych kryształach półprzewodnikowych, rekombinacji promienistej i bezpromienistej, własności fizycznych defektów sieci krystalicznej i zjawisk powierzchniowych.

Pierwsze obliczenia struktury pasmowej germanu i krzemu

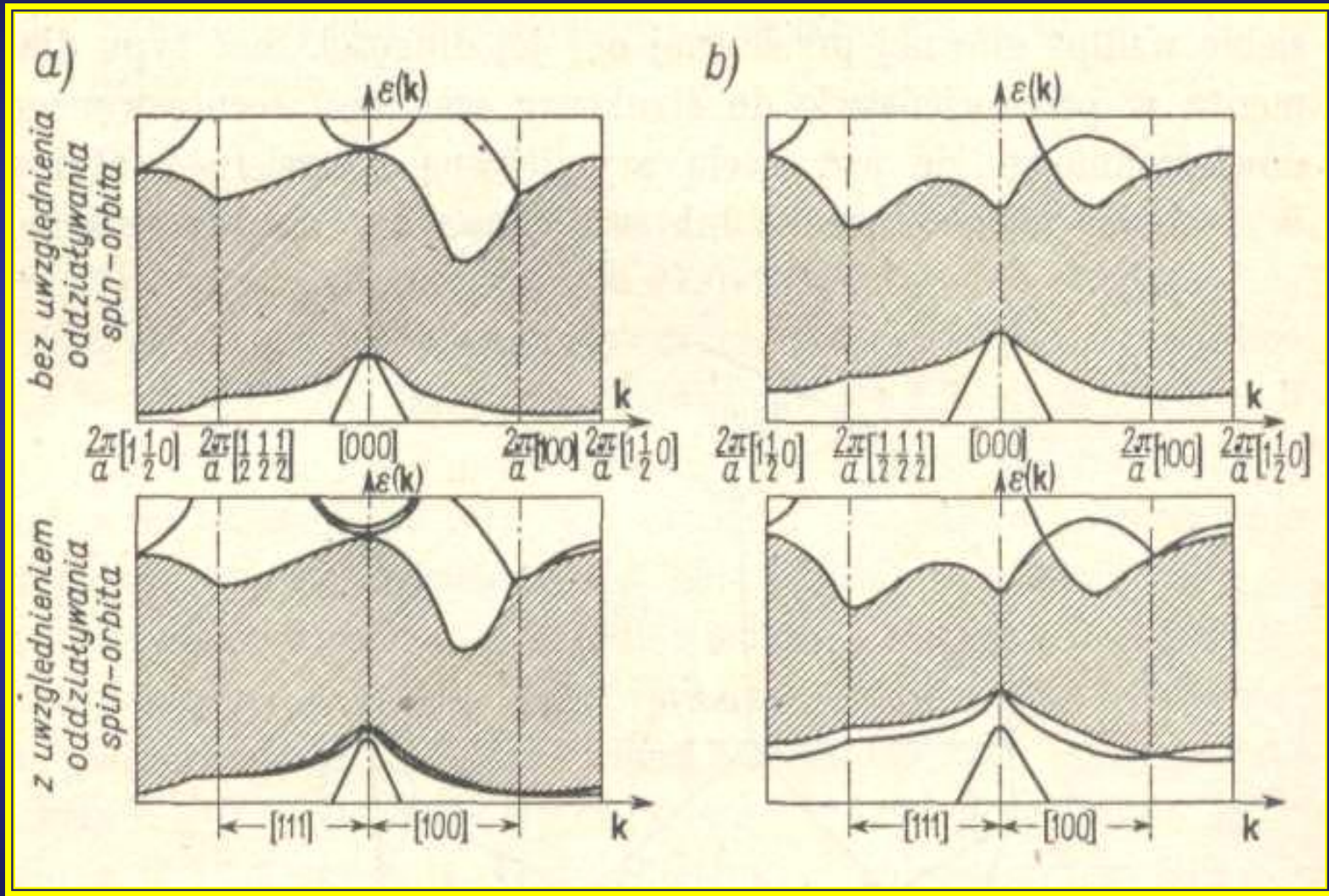
Herman (1953) - wykorzystanie metody **ortogonalizowanych fal płaskich (Herring 1940)** łączącej zalety metody prawie swobodnych i metody silnie związanych elektronów.

Rachunki ograniczono do wyliczenia energii tylko w niektórych symetrycznie rozłożonych punktach strefy Brillouina i zastosowano interpolację.

Nawet w tym przypadku należało rozwiązać numerycznie równanie 16 stopnia.

Dla dowolnie wybranego punktu w przestrzeni \mathbf{k} równanie wielokowe jest 146 stopnia

Struktura pasmowa Ge i Si



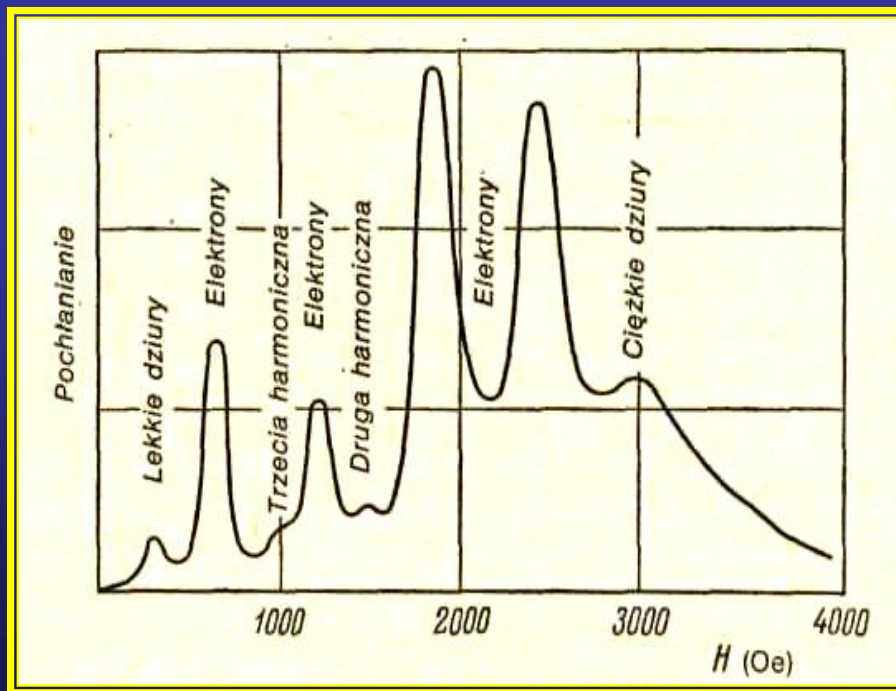
Si

Ge

Struktura pasm przewodnictwa Ge i Si, rezonans cyklotronowy

$$\varepsilon(\mathbf{p}) = \frac{p_1^2}{2m_1} + \frac{p_2^2}{2m_2} + \frac{p_3^2}{2m_3} = \frac{p_1^2 + p_2^2}{2m_1} + \frac{p_3^2}{2m_3} \quad (\text{dla } m_1 = m_2).$$

Z pomiarów rezonansu cyklotronowego otrzymano:



dla germanu

$$m_1 = m_2 = 0,082m, \quad m_3 = 1,58m$$

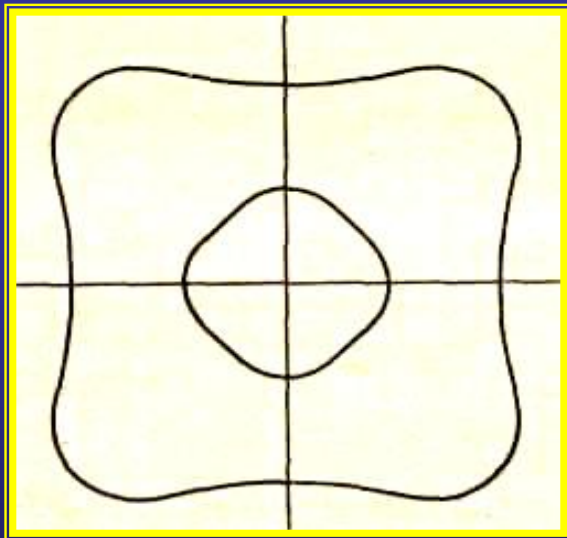
dla krzemu

$$m_1 = m_2 = 0,19m, \quad m_3 = 0,98m$$

Struktura pasm walencyjnych Ge i Si, rezonans cyklotronowy

$$\varepsilon_{1,2}(\mathbf{k}) = -\frac{\hbar^2}{2m} [Ak^2 \pm \sqrt{B^2k^4 + C^2(k_x^2k_y^2 + k_y^2k_z^2 + k_z^2k_x^2)}].$$

$$\varepsilon_3(\mathbf{k}) = -\varepsilon_{s0} - \frac{\hbar^2}{2m} Ak^2,$$



A , B i C - stałe bezwymiarowe
wyznaczone metodą rezonansu
cyklotronowego:

dla krzemu $A = 4,1$; $B = 1,4$; $C = 3,7$
dla germanu $A = 13,0$; $B = 8,7$; $C = 11,4$

przekrój płaszczyzną (100) powierzchni izoenergetycznych
pasm walencyjnych (powierzchnie pofałdowane – warped)

Rezonans cyklotronowy w Ge i Si

najważniejsze prace

Lax B., Zeiger H., Dexter R., Physica 20, 818, 1954.

Dresselhaus G., Kip A., Kittel C., Phys. Rev. 92, 827, 1953; 98, 368, 1955.

Lax B., Zeiger H., Rosenblum E., Phys. Rev. 93, 1418, 1954.

Dexter K., Zeiger H., Lax B., Phys. Rev. 95, 557, 1954.

Dexter R., Lax B., Kip A., Dresselhaus G., Phys. Rev. 96, 222, 1954.

Dexter R., Lax B., Phys. Rev. 96, 223, 1954.

Dexter R., Zeiger H., Lax B., Phys. Rev. 104, 637, 1956.

Początek fizyki półprzewodników w Polsce

W 1947 roku **Leonard Sosnowski** powraca do Polski na Uniwersytet Warszawski na stanowisko zastępcy profesora (od 1.09.1947), a w rok później (od 1.09.1948) profesora kontraktowego UW. Prace wykonane w Anglii stanowiły podstawę rozprawy habilitacyjnej obronionej w 1948r. „**Badania nad zjawiskami fotoelektrycznymi w półprzewodnikach**”, wydane przez Tow. Nauk. Warszawskie, 1949).

TOWARZYSTWO NAUKOWE WARSZAWSKIE
Wydział III Nauk matematyczno-fizycznych

LEONARD SOSNOWSKI

BADANIA NAD ZJAWISKAMI
FOTOELEKTRYCZNYMI
W PÓLPRZEWODNIKACH



WARSZAWA 1949

NAKŁADEM TOWARZYSTWA NAUKOWEGO WARSZAWSKIEGO
Z ZASŁĘKU PREZYDIUM RADY MINISTRÓW I WYDZIAŁU NAUKI MINISTERSTWA OŚWIATY

Początek fizyki półprzewodników w Polsce, pierwsi współpracownicy Sosnowskiego i tematyka

- *Ostrowski, Chęcińska, Chmielewski, Rzewuski, Wolska, Filiński, Figielski, Szymańska* inicjują badania półprzewodników kontynuując prace L. Sosnowskiego rozpoczęte w Anglii, tzn. badania zjawisk fotowoltaicznych w warstwach soli ołowiu i pochodnych.

- Zainicjowanie badań zjawisk fotoelektrycznych w złączach półprzewodnikowych i procesów rekombinacyjnych związanych z defektami (*Ostrowski, Filiński, Rzewuski i Figielski*).

Do ważniejszych wyników tego okresu należało udowodnienie zasadniczej roli efektu Augera na swobodnych nośnikach w rekombinacji niepromienistej w solach ołowiu (*J. Ostrowski*).

Response Time of Photoconductivity of Lead Selenide

by

L. SOSNOWSKI and M. CHMIELEWSKI

Communicated by L. SOSNOWSKI at the meeting of January 12, 1953

A method for investigating the relaxation processes in semiconductors was worked out and applied to the measurements of the response time of photoconductivity in lead selenide layers, prepared by H. Chęcińska [1].

The photoconductive layer was illuminated by means of short square-wave pulses of light. Voltage proportional to the photocurrent was applied to the vertical plates of an oscilloscope tube. The essential feature of this method consists in the use of an exponential time base i. e. the voltage on the horizontal plates keeps changing with time according to an exponential function.

Photoconductive Lead Telluride Layers

by

H. CHEĆIŃSKA and L. SOSNOWSKI

Presented by A. SOLTAN on June 21, 1954

Microcrystalline layers of lead telluride were obtained, showing, at liquid air temperature, high sensitivity to infra-red radiation.

Lead telluride was prepared by fusing pure elements *in vacuo*. Samples were used which contained either an excess of tellurium or of lead above the stoichiometric proportion. The best results were obtained with lead telluride containing a 3% excess of lead. This material was therefore subjected to further tests.

BULLETIN DE L'ACADÉMIE
POLONAISE DES SCIENCES
Cl. III — Vol. II, No. 8, 1954

EXPERIMENTAL PHYSICS

Kinetics of Photoconductivity in Thallium Sulphide

by

J. W. OSTROWSKI and L. SOSNOWSKI

Communicated by A. SOŁTAN at the meeting of June 21, 1954

Our investigations were concerned with microcrystalline layers of thallium sulphide prepared by a method described by A. Wolska [1].

BULLETIN DE L'ACADÉMIE
POLONAISE DES SCIENCES
Cl. III — Vol. III, No. 2, 1955

EXPERIMENTAL PHYSICS

Use of electric field pulses as a method
of investigating semiconducting films

by

H. RZEWUSKI and L. SOSNOWSKI

Presented by A. SOŁTAN on December 30, 1954

The properties of semiconductors are essentially dependent on the concentration and mobility of current carriers, on their life-time and on the density of surface states. The application of these properties is of great importance in transistor physics.

LEONHARD SOSNOWSKI*)

Determination of surface states in PbS crystals

With 5 figures

*) Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland.

Shockley and *Pearson* have in 1948 observed an influence of the transversal electric field on the conductivity of the thin layers of Ge. On this, so called, field effect, is based a method of determination of a number of important parameters of a semiconductor, which has been worked out by myself and my collaborator Mr. *H. Rzewuski*. This method enabled us to determine experimentally the surface characteristics of PbS crystals, such as the density of surface states.

Contribution of Current Carriers in the Reflection of Light from Semiconductors

LEONARD SOSNOWSKI

University of Warsaw, Warsaw, Poland

(Received May 24, 1957)

A NEW electro-optical phenomenon has been found by Filiński,¹ namely a modulation of the reflection of light from germanium by the injected current carriers. In the present note an attempt is made to interpret this effect.

The reflection coefficient R at normal incidence is connected with the complex index of refraction $n_c = n - ik$ by the well-known formula:

Leonard Sosnowski

organizator badań w zakresie fizyki półprzewodników
w Polsce

- Zorganizowanie w Instytucie Fizyki Doświadczalnej UW Katedry Elektroniki i Radiologii przekształconej później w Katedrę Fizyki Ciała Stałego.
- Gromadzenie wokół siebie zdolnych studentów i w rezultacie stworzenie jednej z najlepiej rozpoznawanych na świecie polskich szkół naukowych - fizyki półprzewodników.

Leonard Sosnowski

organizator badań w zakresie fizyki półprzewodników w Polsce

- Współorganizator a następnie wieloletni dyrektor powstałego w 1953 roku Instytutu Fizyki Polskiej Akademii Nauk.

Powstanie Instytutu Fizyki PAN umożliwiło:

- Intensyfikację badań w zakresie fizyki oraz zainicjowanie prac w dziedzinie technologii półprzewodników.
- Rozwój kadrowy grupy półprzewodnikowej dzięki nowym miejscom zatrudnienia dla wielu absolwentów wyższych uczelni, głównie Uniwersytetu Warszawskiego, który udostępniał początkowo nowemu Instytutowi swoją bazę laboratoryjną.

Znamiona szkoły naukowej

Oryginalna i aktualna tematyka badawcza

Dostatecznie liczna kadra naukowa
rozwijająca tę tematykę

Silne oddziaływanie inspirujące
na inne ośrodki naukowe

Kadrowy rozwój grupy półprzewodnikowej 1958-1973

1958

Jerzy Ginter - UW

Jerzy Kołodziejczak - IFPAN

1960

Sylwester Porowski – IFPAN

Ryszard Piotrkowski - IFPAN

1961

Robert Gałązka - IFPAN

Włodzimierz Zawadzki - IFPAN

Jan Blinowski - UW

Stefan Żukotyński - UW

Jan Chroboczek - IFPAN

1962

Marian Grynberg - UW

1963

Jacek Baranowski - UW

Jacek Łagowski - IFPAN

Przemysław Byszewski - IFPAN

Lucjan Śniadower - IFPAN

1964

Andrzej Mycielski - IFPAN

1966

Jan Gaj - UW

Kadrowy rozwój grupy półprzewodnikowej

1970

Jerzy Langer - UW

IFPAN od 1978

1973

IFPAN

Marta Gieburowska-Cieplak

Marek Cieplak

Tomasz Dietl

Marek Godlewski

Jacek Kossut

Jacek Majewski

Krystyna Jabłońska-Ławniczak

Kształtowanie się nowej tematyki badawczej w Polsce w latach 1958 - 1978

IF PAN + IFD UW

- *fizyka domieszek i defektów w półprzewodnikach*
- *półprzewodniki z wąską i zerową przerwą energetyczną*
- *półprzewodniki półmagnetyczne*

Powstanie technologii nowych materiałów półprzewodnikowych

Leonard Sosnowski od początku przywiązuje ogromną wagę do rozwoju technologii materiałów półprzewodnikowych. Z jego inspiracji prace badawcze w tej dziedzinie rozwijane są w Zakładzie Technologii IF PAN (*T.Niemyski, I.Pracka Z.Olempska*)

Dzięki stworzeniu przez *W. Giriata* w Instytucie Fizyki PAN laboratorium technologii półprzewodników i otrzymaniu przez niego całej klasy nowych materiałów półprzewodnikowych o wąskiej i zerowej przerwie energetycznej (InSb, GaSb oraz HgTe i krysztaly mieszane HgCdTe), otwiera się nowy kierunek badawczy, który wkrótce staje się polską specjalnością - **fizyka półprzewodników z wąską przerwą energetyczną.**

Początki rozwoju nowych technik eksperymentalnych i badań teoretycznych

- Pierwsze badania zjawisk transportu (*Zb.Kopeć*)
- Rozwój kriotechniki (*J.Rautuszkiewicz*)
i wykorzystanie temperatur azotowych oraz helowych.
- Rozwinięcie i wykorzystanie metod spektroskopowych w szerokim zakresie widmowym (*W.Wardzyński, I. Filiński, J.Rautuszkiewicz*).
- Rozwinięcie nowoczesnych metod badania struktury i defektów sieci (*J. Auleytner, M.Lefeld-Sosnowska, T.Figielski*)
- Zainicjowanie zaawansowanych prac teoretycznych (*M.Suffczyński, M.Miąsek, J.Mycielski*)
- Stworzenie i wykorzystanie do badań techniki wysokich ciśnień (*L.Sosnowski, S.Porowski*)
- Zorganizowanie Pracowni Obliczeń Numerycznych z maszyną ODRA 1013 (*J. Kołodziejczak*)
- Rozwój spektroskopii mikrofalowej (*K.Leibler*)

Kształtowanie się nowej tematyki badawczej

- Odkrycie w latach 50-tych własności półprzewodnikowych InSb (Niemcy, USA).
- Niespodziewane własności elektryczne tego materiału (bardzo mała masa efektywna elektronów i ich ogromne ruchliwości, gigantyczne efekty magneto-optyczne w podczerwieni).

Rozwój nowej tematyki w Polsce stał się możliwy dzięki wcześniejszemu stworzeniu przez

Witolda Giriata i rozwijanej następnie przez *R. Gałązkę* i *A. Mycielskiego* technologii wytwarzania nowych materiałów półprzewodnikowych $A_{III}B_V$ oraz $A_{II}B_{VI}$

Półprzewodniki z wąską przerwą energetyczną w Polsce od roku 1958

rok 1958

Istnienie już sporej liczby publikacji,
głównie amerykańskich, niemieckich i rosyjskich,
na temat podstawowych własności elektrycznych InSb,
głównie pomiary efektu Halla i przewodnictwa
w funkcji temperatury i koncentracji elektronów

W Instytucie Fizyki PAN
tą tematyką zajmuje się **Zbigniew Kopeć**
oraz rozwijana jest
baza technologiczna **Witolda Giriata**

Półprzewodniki z wąską przerwą energetyczną w Polsce od roku 1958

W roku 1958 w zakładzie *L.Sosnowskiego*
powstają pierwsze dwie prace magisterskie na
temat InSb

Jerzy Ginter

siła termoeletryczna w InSb w funkcji temperatury

Jerzy Kołodziejczak

efekt Halla i przewodnictwo elektryczne w InSb w
funkcji temperatury

Półprzewodniki z wąską przerwą energetyczną od roku 1958

Sygnalizowane w literaturze światowej problemy z interpretacją wyników doświadczalnych dotyczących InSb na gruncie istniejącej dotychczas teorii.

Masa efektywna wyznaczana z pomiaru różnych zjawisk przyjmowała różne wartości. Wydawała się zależeć od koncentracji elektronów i temperatury

Próby teoretycznego odtworzenia wyników eksperymentalnych nie dawały zgodności i często prowadziły do niezrozumiałych sprzeczności

Konieczność rewizji podstaw teoretycznych opisu zjawisk transportu elektronowego w InSb

J.Kołodziejczak

*rezygnacja z założenia o sferyczno – parabolicznym
kształcie pasma przewodnictwa*

$$\varepsilon = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$$

Wykorzystanie modelu Kane'a

(J.Phys.Chem.Solids 1, 249, 1957)

$$\varepsilon = \frac{\hbar^2 k^2}{2 m_0} + \frac{1}{2} \left\{ \left[\varepsilon_0^2 + \frac{8}{3} P^2 k^2 \right]^{1/2} - \varepsilon_0 \right\} .$$

Zjawiska transportu

transport ładunku i transport ciepła

$$J_{\alpha} = \sigma_{\alpha\beta} E_{\beta} - \Theta_{\alpha\beta} \frac{dT}{dx_{\beta}}; \quad Q_{\alpha} = \chi_{\alpha\beta} E_{\beta} - \xi_{\alpha\beta} \frac{dT}{dx_{\beta}}.$$

Tensory σ , Θ , χ , ξ opisują w sposób zupełny wszystkie zjawiska transportu

Znalezienie ich jawnej postaci wymaga rozwiązania równania Boltzmann'a dla dowolnej (nieparabolicznej) zależności energii od wektora falowego

Pierwsze prace

Acta Physica Polonica vol. XX (1961)

TRANSPORT OF CURRENT CARRIERS IN *n*-TYPE INDIUM ANTIMONIDE AT LOW TEMPERATURES

BY J. KOŁODZIEJCZAK

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw

(Received September 29, 1960; translated paper received November 25, 1960)

Acta Physica Polonica vol. XX (1961)

ON THE THEORY OF TRANSPORT PHENOMENA IN SEMICONDUCTORS

BY J. KOŁODZIEJCZAK

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw

(Received October 25, 1960; translated paper received December 17, 1960)

Acta Physica Polonica vol. XXI (1962)

THERMOELECTROMOTIVE FORCE AND NERNST-ETTINGSHAUSEN
EFFECT IN InSb

BY J. KOŁODZIEJCZAK AND L. SOSNOWSKI

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw

(Received July 14, 1961)

J. Kołodziejczak

$$\varepsilon = \frac{\hbar^2 k^2}{2 m_0} + \frac{1}{2} \left\{ \left[\varepsilon_0^2 + \frac{8}{3} P^2 k^2 \right]^{1/2} - \varepsilon_0 \right\}$$

$$m^* = m_n \sqrt{\Delta}$$

$$\Delta = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{2/3} \frac{\hbar^2}{\varepsilon_g^* m_n} n^{2/3}.$$

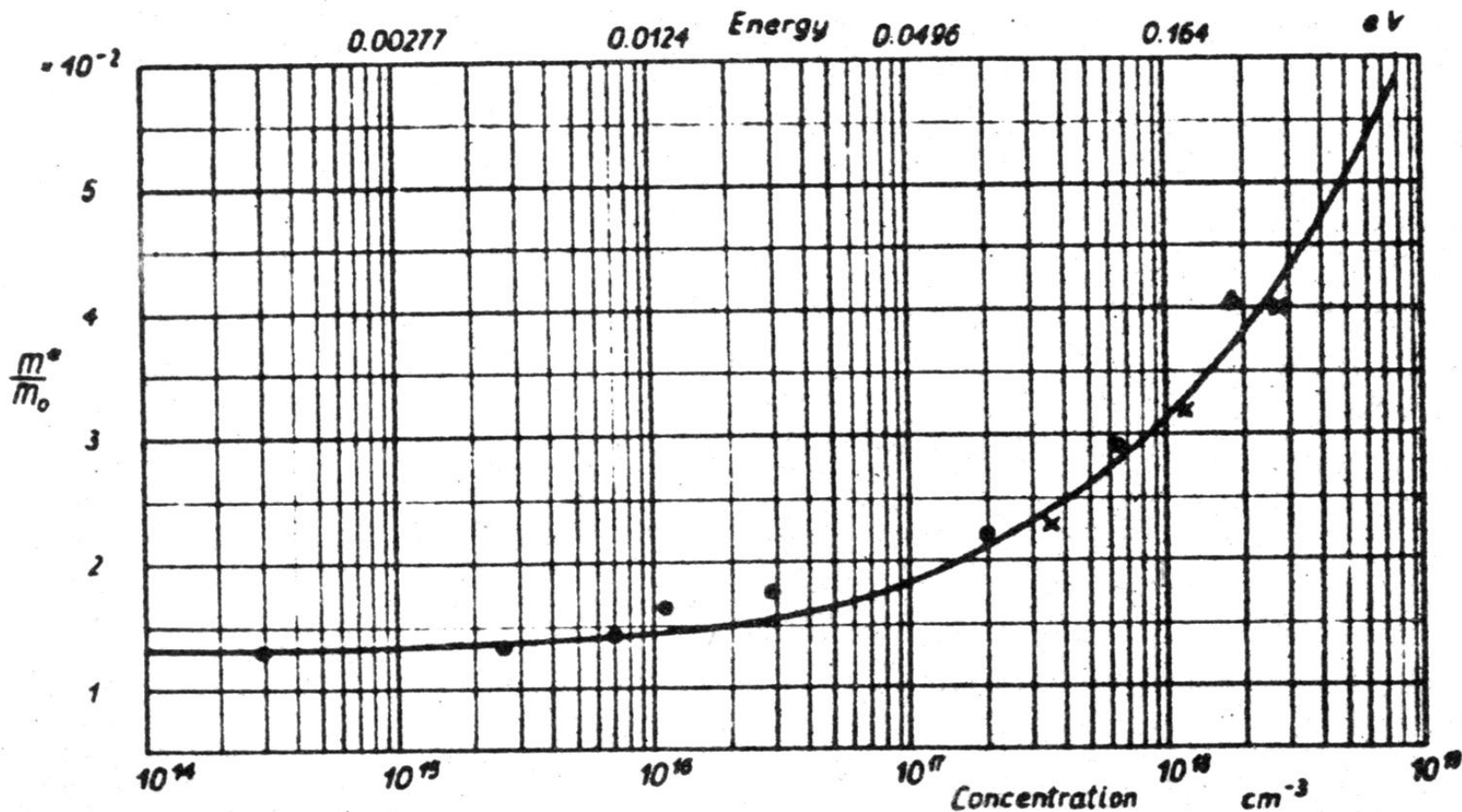
$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{\hbar^2 k} \frac{d\varepsilon}{dk}$$

$$u_r = u_0 k^r \left(\frac{d\varepsilon}{dk} \right)^2$$

$$n = \frac{8}{3\sqrt{\pi}} \left(\frac{2\pi m_n k_0 T}{h^2} \right)^{3/2} {}_0L_0^{3/2}$$

Masa efektywna elektronów w InSb w funkcji koncentracji

J.Kołodziejczak



J. Kołodziejczak

$$\alpha (H = 0) = - \frac{k_0}{e} \frac{\pi^{2/3} k_0 T m^*}{\hbar^2 (3n)^{2/3}} \frac{1}{3} \left(r + 5 - 6 \frac{n}{m^*} \frac{dm^*}{dn} \right)$$

$$\alpha (H = \infty) = - \frac{k_0}{e} \frac{\pi^{2/3} k_0 T m^*}{\hbar^2 (3n)^{2/3}},$$

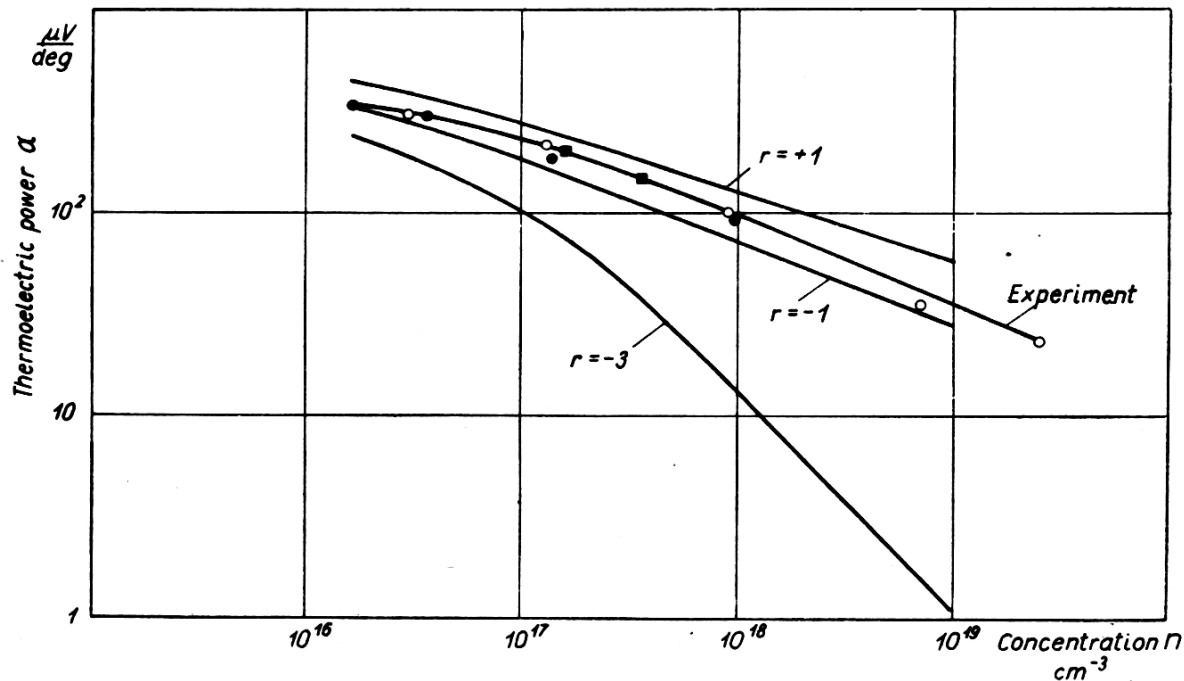


Fig. 4. Thermoelectromotive force *versus* the concentration: $r = +1$ — ionized impurities, $r = -1$ — optical phonons, $r = -3$ — acoustical phonons.

Experimental points: ● — J. Ginter, W. Szymańska, ■ — J. Tauc, M. Matyas, ○ — O. V. Yemel'yanenko *et al.*

Uogólnione całki Fermi'ego – Dirac'a

niezbędne w ilościowym opisie zjawisk transportu

J.Kołodziejczak

$${}^n L_k^m = \int_0^{\infty} \left(-\frac{df_0}{dx} \right) x^n (x + \beta x^2)^m (1 + 2\beta x)^k dx$$

η	n cm^{-3}	${}^0 \frac{3}{2}$ L_0	${}^1 1$ L_{-2}	${}^0 1$ L_{-2}	${}^1 2$ L_{-2}	${}^0 2$ L_{-2}	${}^1 3$ L_{-2}	${}^0 3$ L_{-2}
-1	1.6×10^{16}	0.678	0.319	0.180	1.224	0.428	7.450	1.820
0	3.7×10^{16}	1.630	0.751	0.379	3.096	1.022	19.62	4.647
+1	8.0×10^{16}	3.49	1.552	0.661	7.220	2.15	49.7	11.15
+2	1.5×10^{17}	6.75	2.76	0.958	15.47	4.04	118.6	24.5
+4	4.2×10^{17}	18.55	6.06	1.386	51.55	9.406	539.3	89.73
+6	8.9×10^{17}	39.1	9.916	1.606	126.0	18.38	1838	244.1
+8	1.6×10^{18}	70.7	13.91	1.720	251.7	29.05	5014	543.4
+10	2.6×10^{18}	115.4	17.94	1.785	440.9	41.82	11630	1054
+13	4.8×10^{18}	212.0	23.96	1.840	870.2	64.80	33150	2394

Reprinted from
REPORT OF THE
INTERNATIONAL CONFERENCE
ON
The Physics of Semiconductors
HELD AT
EXETER
JULY 1962

A theory of thermoelectric and thermomagnetic effects

J. KOŁODZIEJCZAK, L. SOSNOWSKI and W. ZAWADZKI
Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

**Proc. Int. Conf. on Physics of Semiconductors,
Paris, 341 (1964)**

**T1-0 TRANSPORT PHENOMENA IN SEMICONDUCTORS
WITH NON-STANDARD ENERGY BANDS**

L. SOSNOWSKI

**Institute of Physics, Polish Academy of Sciences and Warsaw University,
Warsaw, Poland.**

W latach 60-tych

**Półprzewodniki
z wąską przerwą energetyczną
stają się uznaną na świecie
polską specjalnością naukową**

i

**wiodącą tematyką badawczą
w Instytucie Fizyki PAN**

INSTITUTE OF PHYSICS, POLISH ACADEMY OF SCIENCES

R. Kowalczyk, J. Kołodziejczak, and W. Zawadzki

THE GENERALIZED FERMI-DIRAC INTEGRALS

WARSZAWA — 1965

INSTITUTE OF PHYSICS, POLISH ACADEMY OF SCIENCES

R. Kowalczyk, J. Kołodziejczak, and W. Zawadzki

THE GENERALIZED FERMI-DIRAC INTEGRALS

$${}^n L_k^m = \int_0^{\infty} \left(-\frac{df_0}{dx} \right) x^n (x + \beta x^2)^m (1 + 2\beta x)^k dx$$

WARSZAWA — 1965

phys. stat. sol. **10**, 513 (1965)

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw

The Generalized Fermi-Dirac Integrals

By

W. ZAWADZKI¹), R. KOWALCZYK, and J. KOŁODZIEJCZAK

$${}^n L_k^m(\eta, \beta) = \int_0^{\infty} \left(-\frac{\partial f_0}{\partial z} \right) z^n (z + \beta z^2)^m (1 + 2\beta z)^k dz$$

Główne kierunki badań półprzewodników z wąską przerwą energetyczną

- Weryfikacja modelu Kane'a poprzez badanie zgodności nowego opisu teoretycznego różnorodnych zjawisk transportu z uzyskiwanymi wynikami doświadczalnymi.
- Teoretyczna i doświadczalna analiza procesów rozpraszania elektronów uwzględniająca model Kane'a.

Pierwsze prace dotyczą Antymonku Indu :

J.Kołodziejczak, L.Sosnowski, W.Zawadzki, J.Ginter, S.Porowski, W.Szymańska, M.Grynberg, S.Żukotyński, P.Byszewski,

phys. stat. sol. 10, 231 (1967)

Subject classification: 14.5

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw

28. **On the Scattering Processes in Semiconductors**

By

J. KOŁODZIEJOZAK

The scattering processes in semiconductors are analysed for the purpose of the solution of a non-linear Boltzmann equation. The collision term in the Boltzmann equation is calculated for acoustic modes, and for polar and non-polar optical modes. The differential collision operators are obtained for the isotropic part of the distribution function. The calculations are carried out assuming possible nonparabolicity of the energy band.

phys. stat. sol. (b) **45**, 415 (1971)

Subject classification: 13.1 and 14.3; 6; 13.4; 22.2; 22.2.3

*Institute of Microelectronics, Warsaw (a),
and Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw (b)*

Elastic Electron Scattering in InSb-Type Semiconductors

By

W. ZAWADZKI (a)¹ and W. SZYMAŃSKA (b)

Relaxation times for elastic electron scattering in III-V compounds of InSb type are calculated taking into account consistently the nonparabolic structure of the conduction band, both in the density of states and electron wave functions. The calculations are based on the Kane model of band structure, including explicitly mixing of p-like components into the total wave function of the conduction band. Electron scattering by charged impurities and heavy holes, optical phonons (polar interaction), acoustic phonons, and piezo-acoustic modes are considered. Screening by free electrons is included in the long-range interactions and shown to play an important role at higher electron concentrations. Both spin-conserving and spin-flip transitions are considered for all modes. It is demonstrated that transverse branches participate appreciably in acoustic scattering at high electron energies. In all cases, the presented calculations give much higher values of the theoretical mobilities for heavily doped samples than those obtained up to now taking into account only the proper density of states.

ELECTRON SCATTERING AND TRANSPORT PHENOMENA IN *n*-InSb

W. ZAWADZKI

Institute of Electron Technology, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

and

W. SZYMAŃSKA

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

(Received 15 June 1970)

Abstract—Theory of electron transport phenomena in the relaxation time approximation, treating consistently the nonparabolic band structure of InSb, has been compared with available experimental data for various effects. Mixing of *p*-like components into the conduction band wave function in the nonparabolic region of energies has been incorporated into the theory of electron scattering by charged centers, polar optical phonons and acoustic phonons. In the limit of high degeneracy the analytical formulas for the mixed scattering mode have been obtained. Numerical values for the Hall mobility at 77, 300, 500 and 773°K, the thermoelectric power, and the longitudinal and transverse Nernst–Ettingshausen effects at room temperature for electron concentrations up to $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ have been computed for mixed scattering and compared with experimental data of various authors to obtain the best over-all fit, treating a controversial value of the deformation potential as an adjustable parameter. It has been found that all the effects, together with the free-carrier optical absorption, can be satisfactorily described with the deformation potential constant of 14.6 eV. Using this value it has been demonstrated that at room temperature the electron scattering at high electron concentrations is dominated by charged impurity and acoustic phonon modes, whereas at lower concentrations all three scattering mechanisms should be taken into account. The presented procedure can be readily applied to other III–V compounds.

ELECTRON SCATTERING

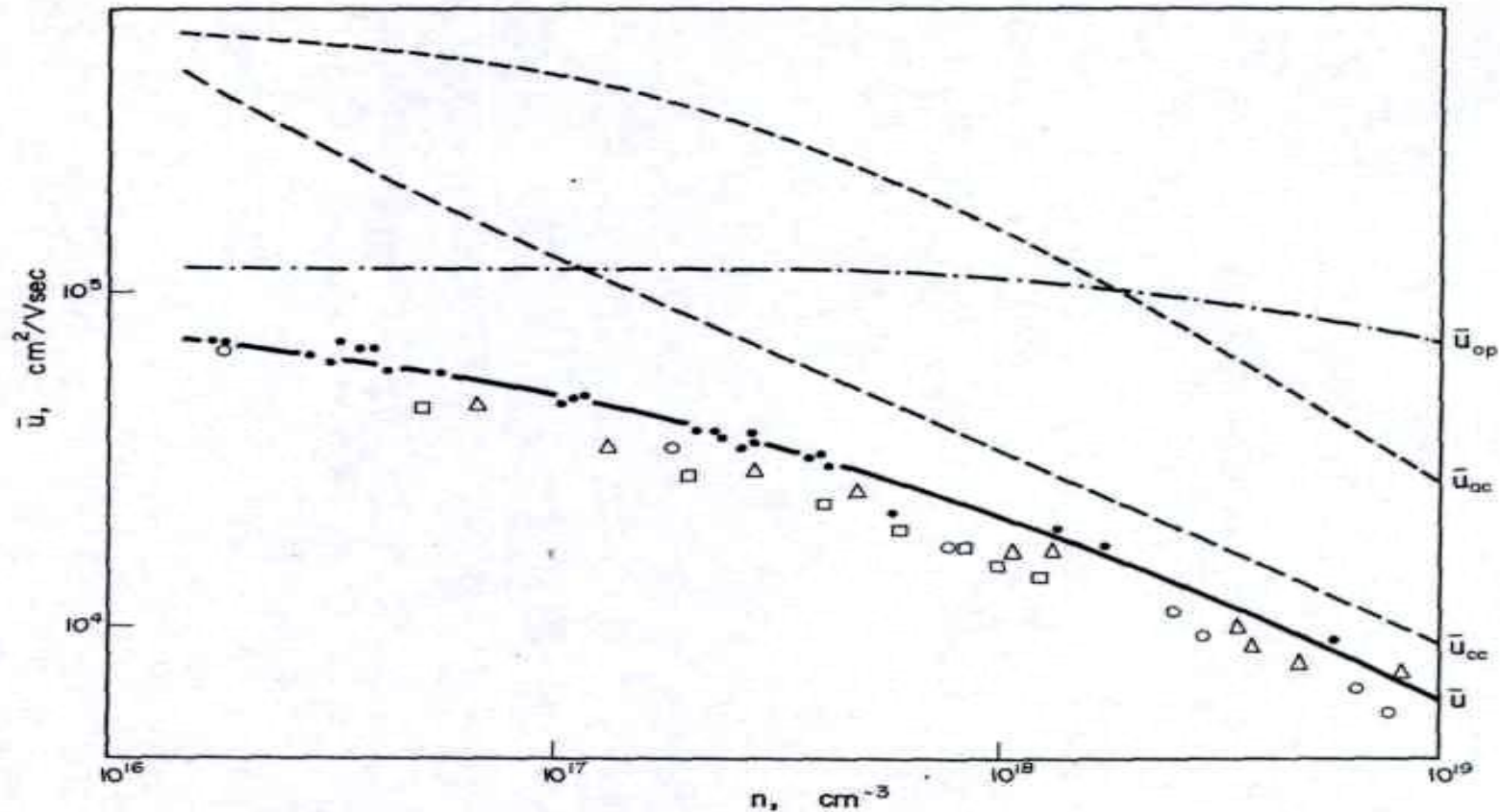
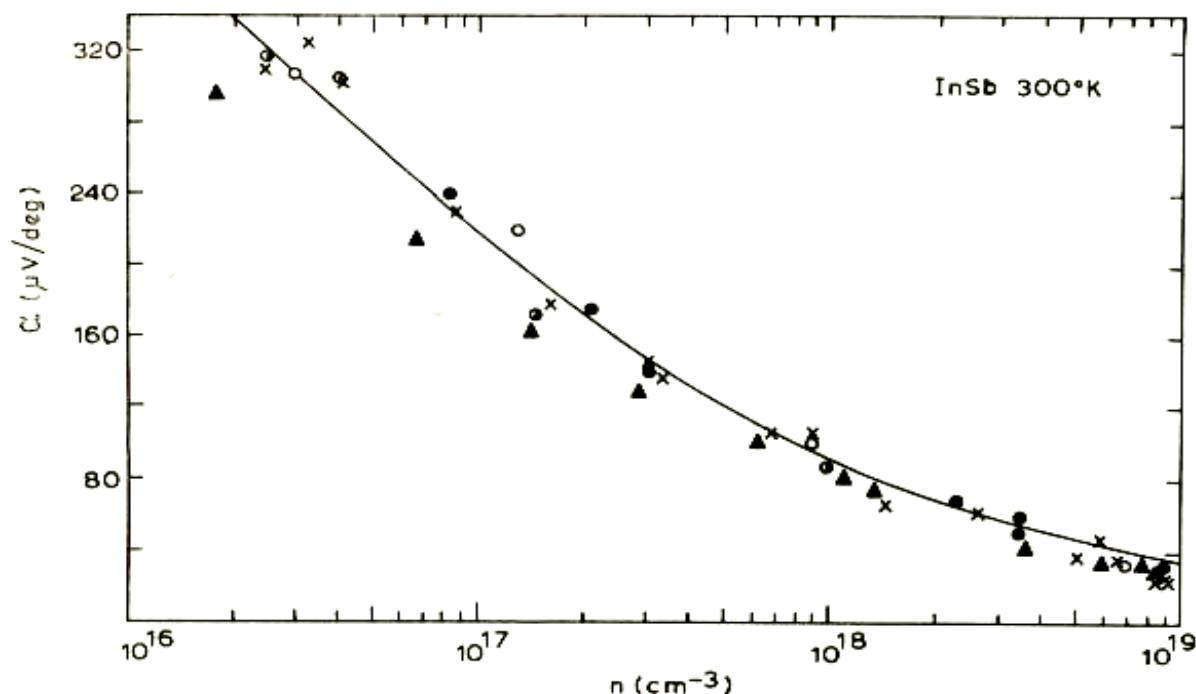


Fig. 1. Electron mobility in n -InSb vs. electron concentration at room temperature. Experimental data: \circ —Galavanov *et al.*[19], Δ —Barrie and Edmond[28], \bullet —Rupprecht *et al.*[64], \square —Kessler and Sutter[22]. Dashed lines denote the theoretical mobilities for various single scattering modes, solid line shows the theoretical mobility for the mixed mode calculated with the same values of material constants.

Analiza procesów rozproszeniowych w InSb typu n (*W. Zawadzki, W. Szymańska*)



Thermoelectric power in n-InSb at room temperature *versus* free electron concentration. The solid line is calculated for the mixed mode of charged centre, polar optical, and acoustic scattering. Experimental data : \blacktriangle Barrie and Edmond [3]; \circ O. V. Emelyanenko, F. P. Kesamanly, and D. N. Nasledov, 1961, *Fiz. Tverd. Tela*, **3**, 1161; \bullet J. Ginter, and W. Szymańska, 1961, *Bull. Acad. pol. Sci.*, **9**, 419; \bullet P. Byszewski, J. Kołodziejczak, and S. Żukotyński, 1963, *Phys. St. Solidi*, **3**, 1880; \times A. S. Filipchenko and D. N. Nasledov, 1967, *Phys. St. Solidi*, **19**, 535. (After Zawadzki and Szymańska [17].)

Zjawiska nieliniowe

37.

NONLINEAR EXCITATION OF ELECTRONS IN SEMICONDUCTORS

BY J. KOŁODZIEJCZAK

*Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw**

(Received July 25, 1967)

The effect of the nonlinear excitation of electrons in semiconductors in the presence of a strong a. c. electric field is discussed. This effect is associated with the generation of the higher harmonics in the current density. It is shown that there are two sources of the nonlinear excitation of electrons. One of these is the energy dependence of the relaxation time and the second one is the nonparabolicity of the band.

phys. stat. sol. 24, 323 (1967)

Subject classification: 19; 13.1, 14.3; 22

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw

36.

Magnetic Resonance in Higher Harmonics Generated by Free Carriers in Semiconductors

By

J. KOŁODZIEJCZAK

An effect of higher harmonics generation by free carriers in semiconductors is discussed. It is shown that a large enhancement of nonlinear effects due to resonance at high magnetic fields can be observed. The effects discussed in the paper are associated with a nonparabolicity of the band.

Zjawiska nieliniowe

OPTICAL MIXING BY MOBILE CARRIERS IN InSb

BY L. KOWALCZYK AND J. KOŁODZIEJCZAK

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw*

(Received April 28, 1977)

Optical frequency mixing of electromagnetic waves in InSb is investigated experimentally and analytically. Numerical results obtained from the general theory of nonlinear free carrier optical phenomena are compared with experimental results for the special case of mixing of two CO₂ laser beams in indium antimonide. The influence of nonparabolicity of the band and electron scattering processes on the measured nonlinear effect is considered. It is proved that nonlinearity associated with scattering of electrons by ionized impurities can in some cases be important in InSb.

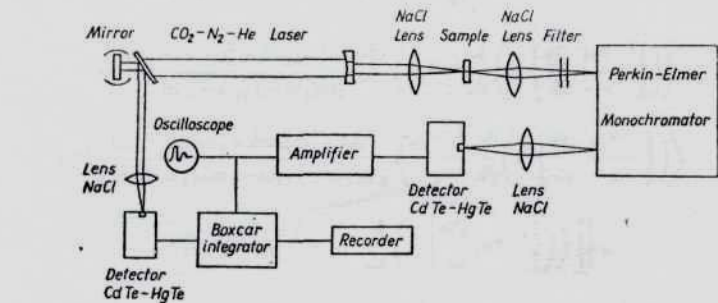
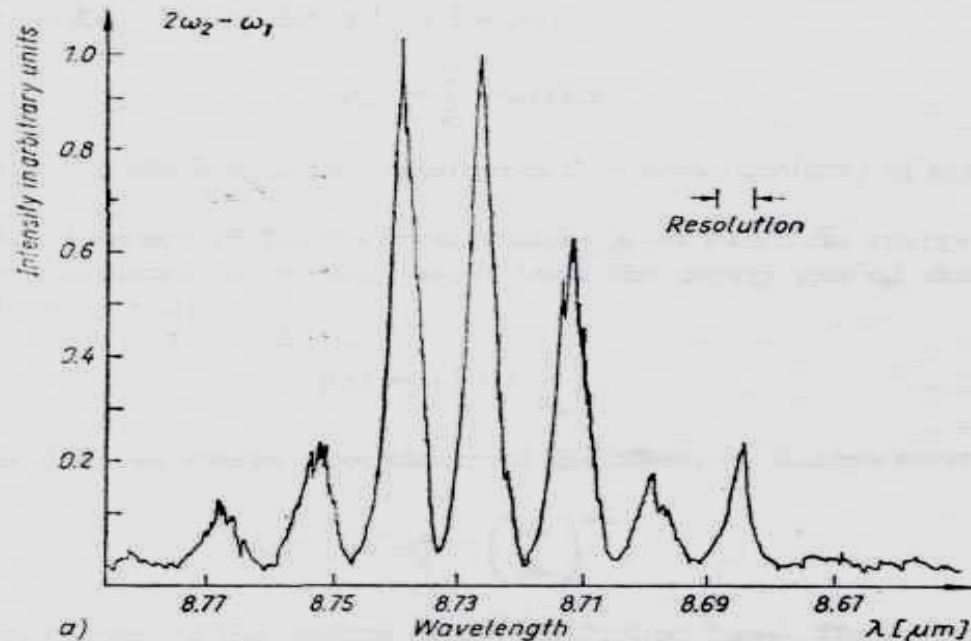
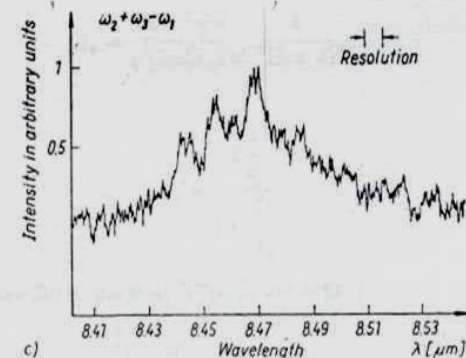
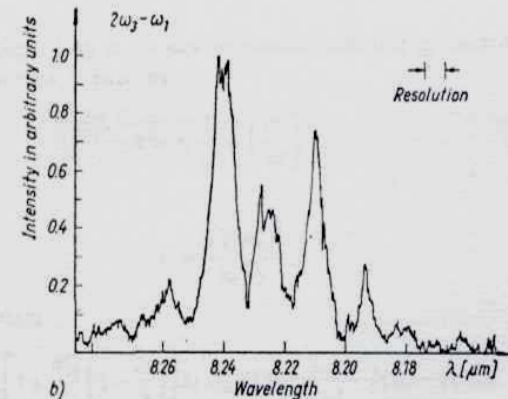


Fig. 2. Experimental set-up for studying optical frequency mixing of CO₂ laser radiation



Lata 60 - te

Dalszy rozwój technologii półprzewodników
z wąską przerwą energetyczną

Z. Dziuba, R. Gałązka

A. Mycielski, A. Pajączkowska

Pierwszy znaczący rezultat naukowy:
udowodnienie tzw. odwróconej struktury
pasmowej w HgTe

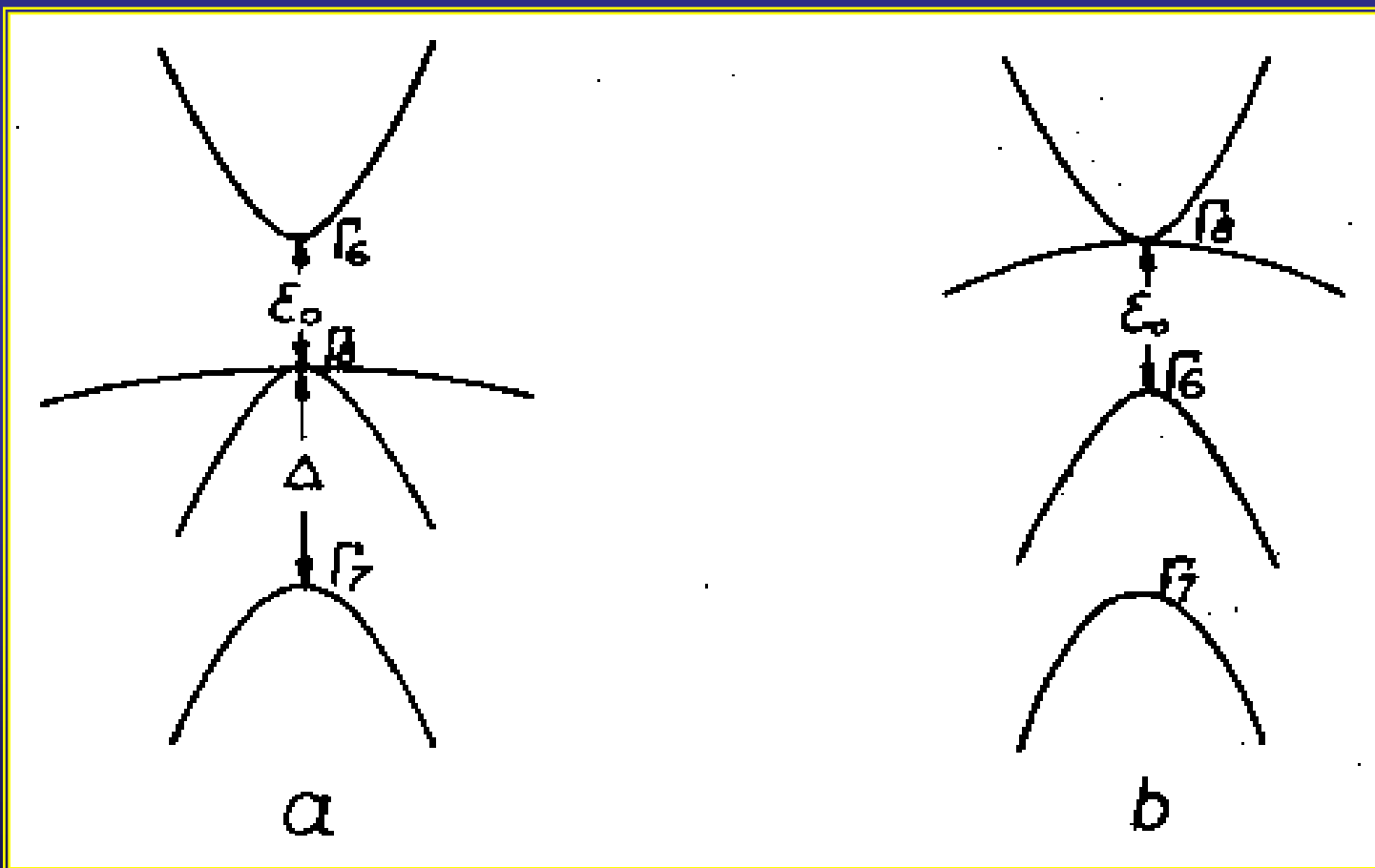
R. Piotrkowski, S. Porowski, Z. Dziuba,

J. Ginter, W. Giritat, L. Sosnowski

Normalna i odwrócona struktura pasmowa

a) Model Kane'a

b) Model Paul'a – Groves'a



**Proc. Int. Conf. on Physics of Semiconductors
Paris, 1251 (1964)**

M-19

**ELECTRICAL PROPERTIES
OF THE SEMICONDUCTING SYSTEM**



W. GIRIAT, Z. DZIUBA, R. R. GALAZKA, L. SOSNOWSKI, T. ZAKRZEWSKI*
Institut de Physique de l'Académie Polonaise des Sciences, Varsovie, Pologne

Short Notes

K135

phys. stat. sol. 8, K135 (1965)

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw

Band Structure of HgTe

By

R. PIOTRZKOWSKI, S. POROWSKI, Z. DZIUBA, J. GINTER,
W. GIRIAT, and L. SOSNOWSKI

**Udowodnienie tzw. odwróconej struktury
pasmowej w HgTe**

Dalsze najważniejsze rezultaty

udowodnienie otwierania się przerwy energetycznej w kryształach mieszanych CdHgTe, z przejściem przez zakres przerwy zerowej,

przy zmianie składu stechiometrycznego

R. Gałązka L. Sosnowski

pod wpływem ciśnienia hydrostatycznego

R. Piotrkowski, S. Porowski

phys. stat. sol. **20**, 113 (1967)

Subject classification: 13.1; 22.4.3

*Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw (a)
and Institute of Experimental Physics, Warsaw University (b)*

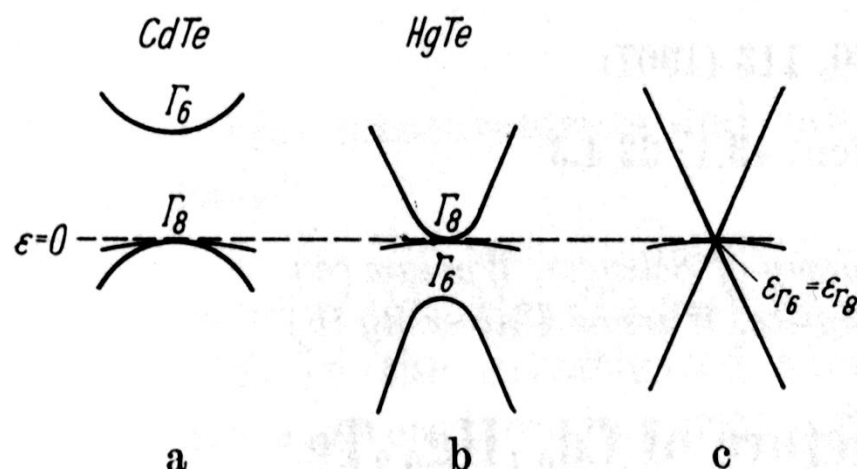
Conduction Band Structure of $\text{Cd}_{0.1}\text{Hg}_{0.9}\text{Te}$

By

R. R. GAŁAŻKA (a) and L. SOSNOWSKI (a, b)

**Odwrócona struktura pasmowa w
HgTe**

Udowodnienie otwierania się
przerwy energetycznej z przejściem
przez zakres przerwy zerowej, dla
której pasma przewodnictwa i
walencyjne mają kształt liniowy w
funkcji wektora falowego.

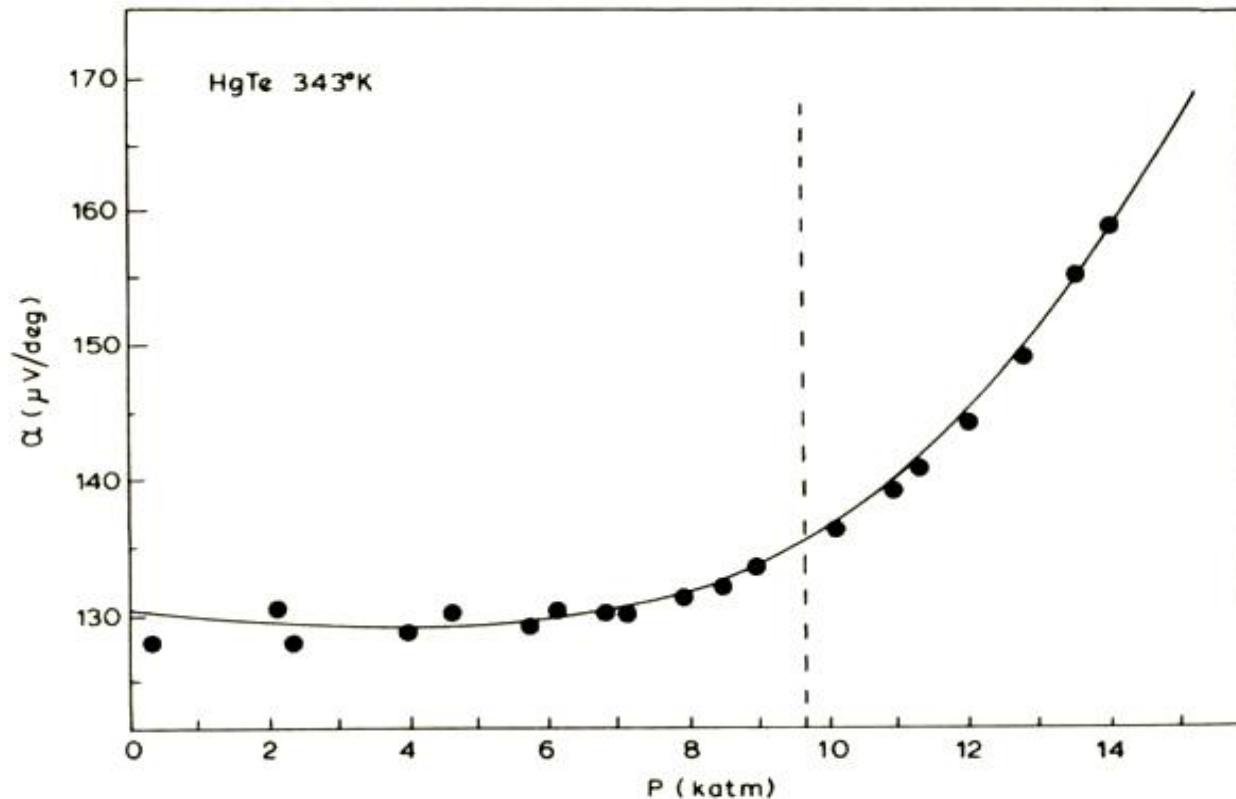


TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE BAND STRUCTURE OF HgTe
FROM PRESSURE MEASUREMENTS

R. PIOTRZKOWSKI and S. POROWSKI,
Institute of Physics, Polish Academy of Sciences
Warsaw, Poland

ABSTRACT

The thermoelectric power of pure HgTe was measured as a function of pressure at temperatures 288°K, 300°K, 322°K, and 343°K. Experimental results were compared with theoretical calculations based on the Groves-Paul model of the band structure. The results obtained show that the "effective mass band gap" $E_0 = E_1^c - E_1^v$ rises with temperature at the rate of $8.5 \cdot 10^{-4} \text{ eV}/^\circ\text{K}$. The values of $\frac{dE_0}{dp} = 14 \cdot 10^{-6} \text{ eV/atm}$ and $|E_0| \cdot \frac{m_0}{m_n} = 14.8 \text{ eV}$ were also obtained.



Thermoelectric power in intrinsic HgTe at 343 K *versus* hydrostatic pressure. The solid line is theoretical. A step increase of α above $P=9.6$ k atm is due to transition from HgTe-type level ordering [$\epsilon(\Gamma_6) < \epsilon(\Gamma_8)$] to InSb-type ordering [$\epsilon(\Gamma_6) > \epsilon(\Gamma_8)$]. (After R. Pietrzowski and S. Porowski, 1967, in D. G. Thomas (Ed.), *II-VI Semiconducting Compounds* (New York : Benjamin), p. 1090.)

Inne ważne rezultaty

Praca *M. Grynberga* na temat funkcji dielektrycznej (eksperyment oraz teoria) wykonana w laboratorium Balkanskiego w Paryżu.

Zagadnieniami wkładu różnych wzbudzeń do funkcji dielektrycznej zajmowali się również *Jan Blinowski, Jerzy Mycielski i Andrzej Mycielski*

Dielectric function in HgTe between 8 and 300°K

M. Grynberg,* R. Le Toullec, and M. Balkanski

*Laboratoire de Physique des Solides, de l'Université de Paris VI,
Laboratoire associé au Centre National de la Recherche Scientifique,
II, quai Saint-Bernard, Paris V, France*

(Received 6 March 1972)

Interband $\Gamma_6 \rightarrow \Gamma_8$ Magnetoabsorption in HgTe

Y. Guldner and C. Rigaux

Groupe de Physique des Solides, Ecole Normale Supérieure, Paris, France

M. Grynberg

Institute of Experimental Physics, Warsaw University, Warsaw, Poland

A. Mycielski

Institute of Physics, P.A.N., Warsaw, Poland

(Received 7 March 1973)

Inne ważne rezultaty

Skonstruowanie przez
J. Baranowskiego i A. Mycielskiego
jednego z pierwszych detektorów
chłodzonych z CdHgTe.

Detektory tego typu są obecnie
wytwarzane komercyjnie przez grupę
prof. Piotrowskiego

Uogólnienie teorii transportu na przypadek pasm niesferycznych o dowolnym stopniu nieparaboliczności

phys. stat. sol. 5, 145 (1964)

*Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw (a),
and Institute of Physics of Warsaw University (b)*

**Galvano- and Thermomagnetic Effects in Semiconductors
with Non-Spherical and Non-Parabolic Energy Bands**

By

J. KOŁODZIEJCZAK (a) and S. ŻUKOTYŃSKI (b)

$$\frac{1}{2} a_{\alpha\beta} k_{\alpha} k_{\beta} = \gamma(E)$$

$$J_{\alpha} = \sigma_{\alpha\beta} E_{\beta} - \Theta_{\alpha\beta} \frac{dT}{dx_{\beta}}; \quad Q_{\alpha} = \chi_{\alpha\beta} E_{\beta} - \xi_{\alpha\beta} \frac{dT}{dx_{\beta}}.$$

relacja Onsagera:

$$\chi_{\alpha\beta}(H) = T \Theta_{\beta\alpha}(-H)$$

$$\langle \chi \rangle = \frac{1}{3 \pi^2} \int_0^{\infty} \left(- \frac{df_0}{dE} \right) \chi(E) \gamma^{3/2}(E) dE$$

$$n = |a|^{-1/2} \langle 1 \rangle$$

$$|a| = \text{Det } a_{\alpha\beta},$$

phys. stat. sol. 6, 419 (1964)

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw

Transport Properties of Cubic Semiconductors with Nonparabolic Energy Bands

By

W. ZAWADZKI and J. KOŁODZIEJCZAK

Transport phenomena are considered in a semiconductor crystal having cubic symmetry and an arbitrary relation between energy and wave number. The theory is formulated in terms of three basic transport tensors. Expressions for galvanomagnetic and thermomagnetic effects in the limiting cases of weak and strong magnetic fields are obtained. The results apply both to the many-ellipsoid cubic energy bands of Si and Ge and to the nonparabolic band structure of III-V compounds.

phys. stat. sol. 6, 409 (1964)

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw

Thermodynamic Properties of Free Carriers in Semiconductors with Arbitrary Energy Bands

By

W. ZAWADZKI and J. KOŁODZIEJCZAK

Statistical properties, entropy, free energy, internal energy, and specific heat of free carriers in an energy band of arbitrary form are considered. All the properties are expressed in terms of generalized Fermi-Dirac functions. The general formulae are specified for spheroidal and spherical energy bands. It is shown that the nonparabolic conduction bands of III-V compounds may be regarded as a first approximation to general nonparabolic structures. The dependence of Fermi level on temperature, and the internal energy and specific heat are calculated numerically in the nondegenerate region. It is shown that nonparabolicity of the energy band strongly affects the properties discussed, for any degree of degeneracy.

$$\gamma(\varepsilon) = k^2 \Phi(\vartheta, \varphi) ,$$

phys. stat. sol. **9**, 549 (1965)

Institute of Physics, Warsaw University

**On the Theory of Transport Phenomena
with Anisotropic Scattering**

By

S. ŻUKOTYŃSKI and M. GRYNBERG

phys. stat. sol. **13**, 277 (1966)

Institute of Physics, Warsaw University

**Some Transport Properties of Semiconductors
under Uniaxial Stress**

By

M. GRYNBERG

THE MAGNETIC MOMENT OF CONDUCTION ELECTRONS IN $A_{III}B_V$ COMPOUNDS

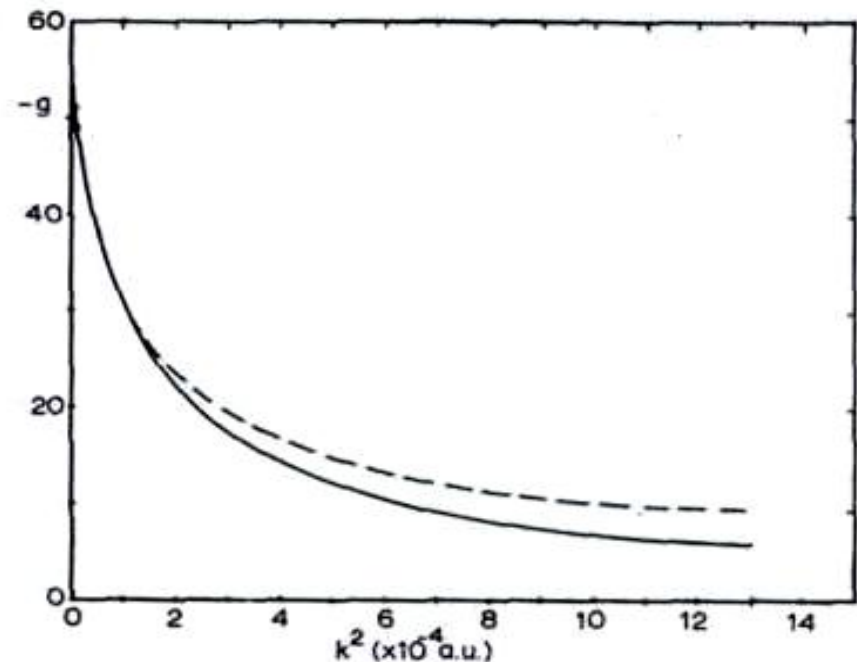
WŁODZIMIERZ ZAWADZKI

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw

Received 7 March 1963

$$g(k) = 2 \left\{ 1 - \left(\frac{m_0}{m^*(k)} - 1 \right) \frac{\Delta}{3\epsilon'(k) + 2\Delta} \right\},$$

The g -value of conduction electrons in InSb as a function of wave number (k^2) in atomic units (solid curve). $m_n = 0.013 m_0$, $\Delta = 0.9$ eV, $\epsilon_g = 0.23$ eV. The experimental points are from Bemski's paper ¹). The dashed curve as described in the text.



Półwzględność w półprzewodnikach*

Włodzimierz Zawadzki

Instytut Fizyki PAN, Warszawa

Semirelativity in semiconductors

Abstract: A theoretical and experimental analogy is traced between behaviour of electrons in narrow-gap semiconductors and that of relativistic electrons in vacuum. Beginning with the similarity of energy-momentum relations for both systems, we consider various effects in the presence of a magnetic field and in crossed electric and magnetic fields. Finally, the relativistic „Zitterbewegung” of electrons in semiconductors is described and its possible consequences are discussed.

Podsumowanie tematyki „wąskoprzerwowej”

Electron transport phenomena in small-gap semiconductors

By W. ZAWADZKI

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland

[Received 18 December 1973]

ACKNOWLEDGMENTS

It is my real pleasure to thank Professor J. Kołodziejczak for years of fruitful collaboration in the field reviewed in this article. I am obliged to Professor L. Sosnowski for encouragement and continuous interest in the subject. I have benefited from discussions with many of my colleagues in the Polish Academy of Sciences and the University of Warsaw. Particular thanks are due to Dr A. Jędrzejczak for making available his experimental results prior to publication, and to Dr J. Błocki for programming the computations. Finally, I would like to express my appreciation to Mrs L. Chomicka for infallible help in preparing the manuscript.

Półprzewodniki Półmagnetyczne nową klasą półprzewodników

Referat zaproszony, wygłoszony przez R. Gałązkę
na „XIV International Conference on Physics of
Semiconductors” w Edynburgu w 1978 roku.

w następstwie

pojawiły się liczne grupy badawcze we wszystkich
liczących się ośrodkach, które podjęły tę tematykę.
W tej chwili jest to dobrze ugruntowana dziedzina
badań w fizyce ciała stałego. Zorganizowano już 6
międzynarodowych konferencji poświęconych
półprzewodnikom półmagnetycznym.

Nowa polska specjalność

Półprzewodniki Półmagnetyczne

Inst. Phys. Conf. Ser. No. 43 © 1979: Chapter 4

133

SEMIMAGNETIC SEMICONDUCTORS BASED ON HgMnTe AND CdMnTe

Robert R Galazka

Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw,
Poland

Properties of alloys of semiconducting compounds and magnetic semiconductors are described. The theory of band structure takes into account exchange interaction between mobile carriers and localized spins of paramagnetic ions. Comparison of theoretical results with experimental data is presented for HgMnTe - transport phenomena and CdMnTe - optical properties.

Pierwsze najważniejsze prace

- **J. Kossut:** Ph. D. thesis, Institute of Physics, Polish Acad. Sci. Warszawa (1976),
- **M. Jaczyński, J. Kossut and R.R. Gałązka:** Phys. Stat. Sol. (b)88 (1978) 73.
- **J.A. Gaj, R.R. Gałązka and M. Nawrocki:** Sol. State Comm. 25(1978) 193.
- **J.A. Gaj, J. Ginter and R.R. Gałązka:** Phys. Stat. Sol. (b) 89 (1978) 655.
- **R.R. Gałązka:** Proc. XIV Int. Conf. Phys. Semicond., Inst. Phys. Conf. Ser. No. 43 (1979) 133.

phys. stat. sol. (b) 89, 655 (1978)

Subject classification: 13.1; 18.2; 22.8

*Institute of Experimental Physics, University of Warsaw (a)
and Institute of Physics, Polish Academy of Sciences, Warsaw (b)*

**Exchange Interaction of Manganese $3d^5$ States
with Band Electrons in $Cd_{1-x}Mn_xTe$**

By

J. A. GAJ (a), J. GINTER (a), and R. R. GALAŻKA (b)

Rozwój tematyki półprzewodników półmagnetycznych

Największy wkład w tę nową tematykę, obok Gałązki, wnieśli ***Gaj i Ginter*** (współautorzy z Gałązką pierwszej przełomowej pracy o anormalnie wielkim efekcie Faradaya w CdMnTe), a następnie ***Andrzej Mycielski, Dietl, Kossut*** w zakresie eksperymentu i ***Jerzy Mycielski, Dietl, Spalek oraz Blinowski*** w zakresie teorii.

Międzynarodowe uznanie „Szkoły Sosnowskiego”

Miarą uznania dla osiągnięć „Szkoły Sosnowskiego” było dwukrotne powierzenie Polsce organizacji Międzynarodowej Konferencji Fizyki Półprzewodników (w 1972 i 1988). Również lista cytowań w literaturze prac polskich fizyków jest ogromna.

