Сверхпроводимость

Программа курса

1. Введение. Открытие и история исследования сверхпроводимости.

2. Сверхпроводимость - макроскопическое квантовое явление.

Эффект Мейснера. Уравнение Лондонов. Эффект Мейснера и квантование магнитного потока как следствие квантования Бора. Фундаментальное отличие сверхпроводника от идеального классического проводника.

3. Теория Гинзбурга–Ландау.

Свободная энергия и уравнения Гинзбурга–Ландау. Параметр теории Гинзбурга–Ландау, глубина проникновения магнитного поля и длина когерентности. Сверхпроводники первого и второго рода. Критическое поле и критический ток тонкой пленки.

4. Сверхпроводники II рода.

Проникновение магнитного поля в сверхпроводящие сплавы. Фаза Шубникова. Многосвязное сверхпроводящее состояние. Губка Мендельсона. Решение Абрикосова. Первое H_{c1} и второе H_{c2} критическое поле. Вихрь Абрикосова как сингулярность в сверхпроводящем состоянии с фазовой когерентностью. Вихревая решетка. Два дальних порядка предсказанных в состоянии Абрикосова. Сопротивление, связанное с движением вихрей в состоянии Абрикосова. Пиннинг вихрей. Крип вихревой структуры.

5. Флуктуационные эффекты в сверхпроводниках.

Сверхпроводящие флуктуации выше сверхпроводящего перехода. Вклады Асламазова-Ларкина и Маки-Томпсона. Уменьшение размерности флуктуаций вблизи второго критического поля. Отсутствие фазового перехода второго рода в H_{c2}. Сверхпроводящее состояние без фазовой когерентности. Фазовый переход первого рода в состояние Абрикосова идеального трехмерного сверхпроводника.

6. Слабая сверхпроводимость. Эффекты Джозефсона.

Одночастичное туннелирование. Стационарный эффект Джозефсона. Виды слабых контактов. Нестационарный эффект Джозефсона. Резистивные характеристики. Туннельный контакт в магнитном поле. Квантовый интерферометр. ВЧ и ПТ СКВИДы.

7. Основы теории Бардина–Купера–Шриффера.

Куперовские пары. Основное состояние в теории БКШ. Функция состояний и плотность состояний. Энергетическая щель. Вывод уравнений Гинзбурга – Ландау. Туннелирование. Андреевское отражение.

8. Высокотемпературная сверхпроводимость.

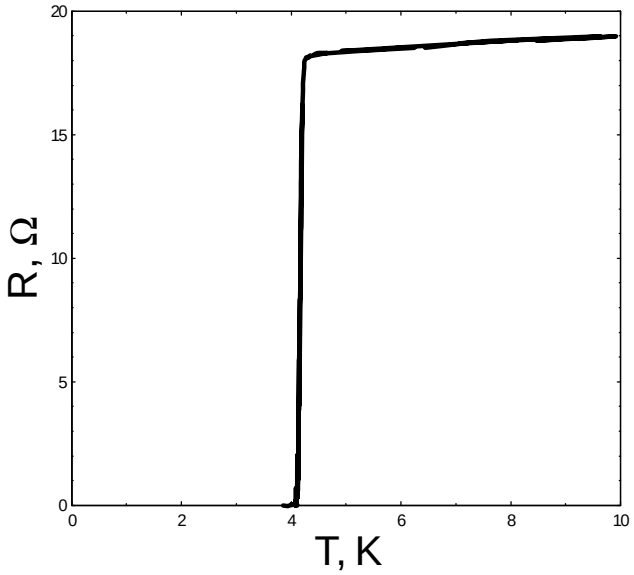
9. Сверхпроводниковые наноструктуры.

Сверхпроводниковая микро и нано-электроника. Возможные типы сверхпроводниковых транзисторов. Проблема создания квантового бита на основе сверхпроводниковых структур. Возможность существования суперпозиции макроскопических квантовых состояний. Разные типы возможных кубитов. Наблюдение осцилляций Раби в сверхпроводниковых наноструктурах. О возможности наблюдения корреляции Эйнштейна-Подольского-Розены в сверхпроводниках.

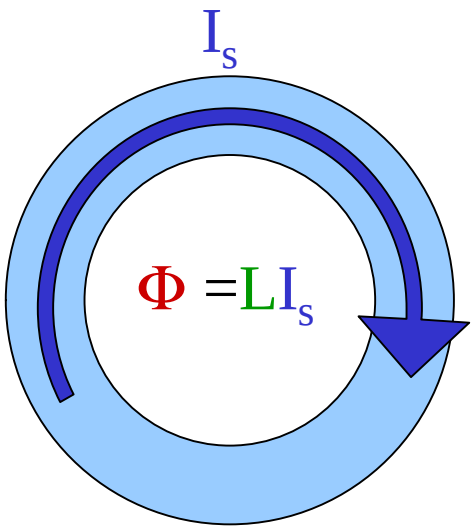
10. Заключение. Некоторые нерешенные проблемы и парадоксы.

Открытие сверхпроводимости

Получив в 1908 жидкий гелий, Г.Камерлинг-Оннес из Лейденского университета (Нидерланды) стал измерять сопротивление чистой ртути, погруженной в жидкий гелий, и обнаружил (1911), что при температурах жидкого гелия сопротивление ртути падает до нуля. H. Kamerling Onnes, Leiden Comm. p. 120b, 122b (1911).



Хейке Камерлинг-Оннес
1853-1926.
Нобелевская премия по физике 1913 год.

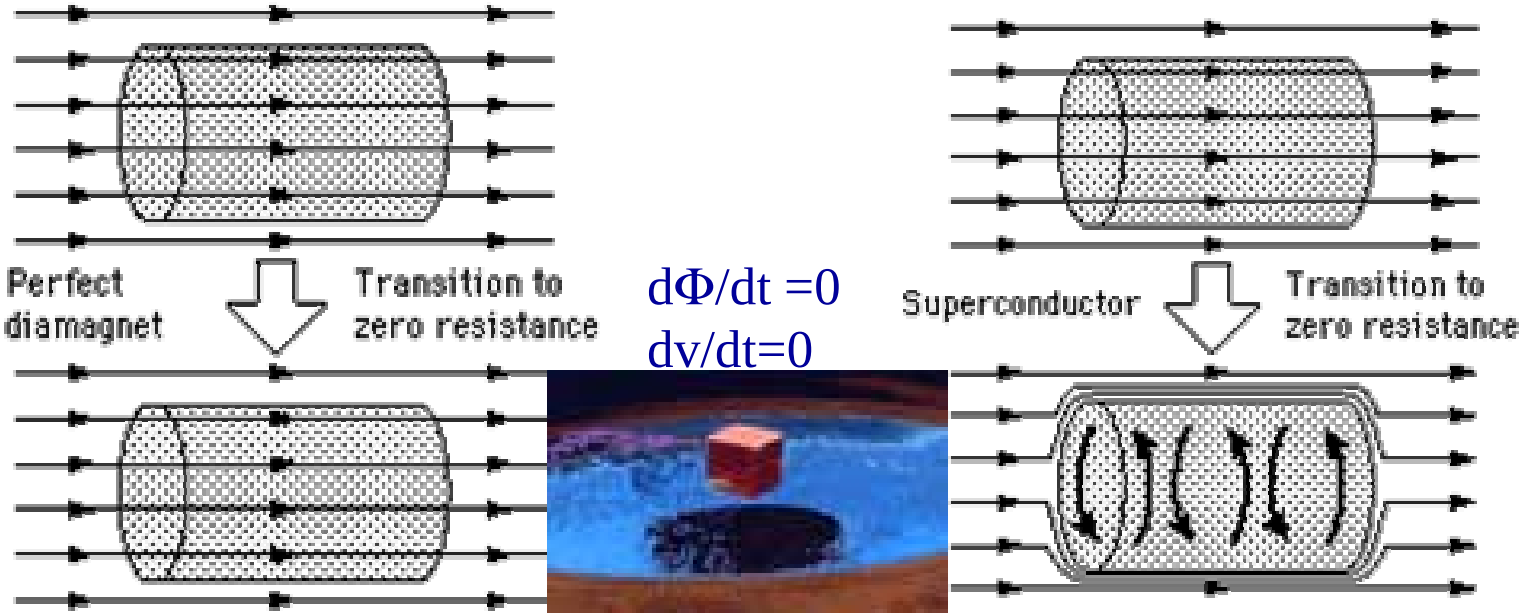


Экспериментально установленная нижняя граница характерного времени уменьшение сверхпроводящего тока равна 100000 лет.

$$\tau_{RL} = L/R$$

Открытие выталкивания магнитного потока из сверхпроводника.

W.Meissner and R. Ochscenfeld Naturwissenschaften, Bd 21, S. 787 (1933)



$d\Phi/dt = 0$
$dv/dt = 0$

$d\Phi/dt \neq 0$
$dv/dt \neq 0$

Эффект Мэйсснера является первым экспериментальным свидетельством существования макроскопического квантового явления. Сверхпроводящий ток не только не затухает, при определенных условиях он не может не существовать.

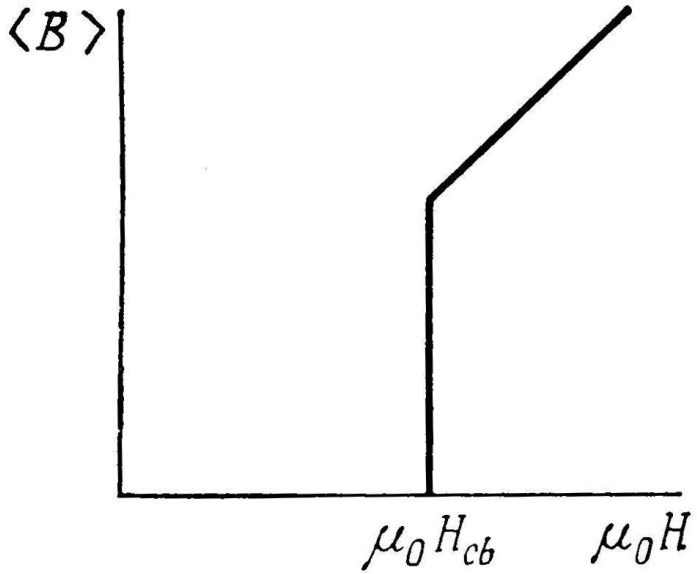
Уравнения Лондонов. F. London and H. London, Proc.Roy.Soc. (Lond.), A149, 71 (1935).
R. Becker, C. Heller, and F. Sauter, Zs. Phys., 85, 772 (1933).

$\lambda_L^2 \mathrm{rot}(dj/dt) + dB/dt = 0$ $\qquad$ $\lambda_L^2 = m/n_q q$ $\qquad$ $\lambda_L^2 \mathrm{rot}\, j + B = 0$

идеальный проводник $\qquad$ n_q- плотность носителей $\qquad$ сверхпроводник

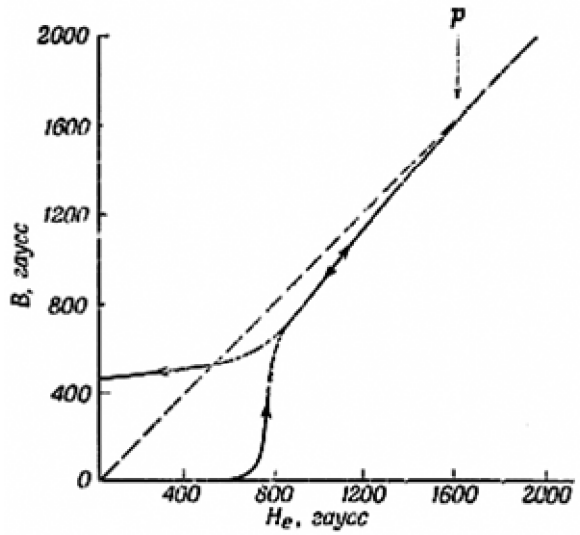
F. London, Superfluids, v.1, John Wiley, N. Y., 1950

Проникновение магнитного поля в сверхпроводящие сплавы. Фаза Шубникова.



Зависимость магнитной индукции B от величины внешнего поля H чистого сверхпроводника.

Л.В. Шубников, В.И. Хоткевич, Я.Д. Шепелев, Я.Н. Рябинин, Phys. Zs. Sowjetunion, 10, 581 (1936).



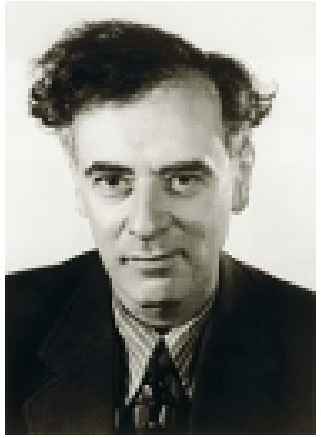
Зависимость магнитной индукции B от величины внешнего поля H сплава $Pb_{0.98}In_{0.02}$ при T = 1.95 K.

Губка Мендельсона.

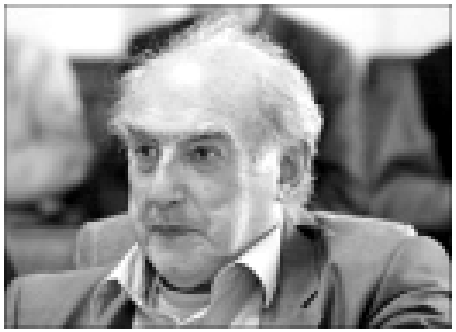
K. Mendelssohn, *Proc. Roy. Soc.* **152A**, 34 (1935)

Теория Гинзбурга-Ландау

ЖЭТФ, **20**, 1064 (1950)



Лев Давидович Ландау
1908 - 1968
Нобелевская премия по физике 1962 год

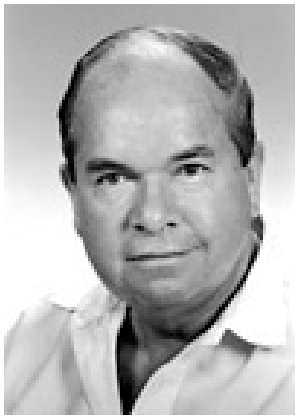


Виталий Лазаревич Гинзбург
1916
Нобелевская премия по физике 2003 год

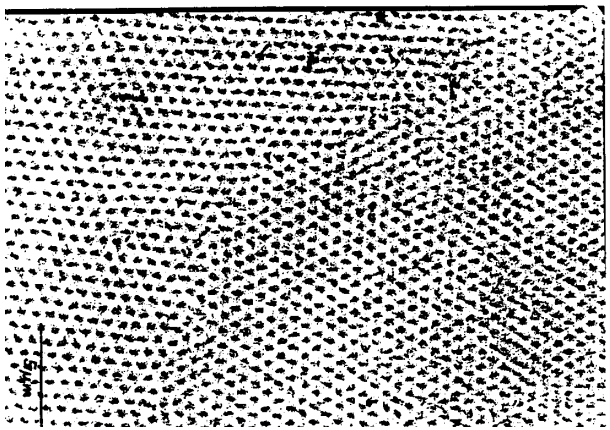
W.H.Kleiner, L.M.Roth, S.H.Autler, Phys.Rev. **133**, A1226 (1964).

Состояние Абрикосова

ЖЭТФ, **32**, 1442 (1957)



Алексей Алексеевич Абрикосов
1928
Нобелевская премия по физике 2003 год



Теория БКШ

J. Bardeen, L.N. Cooper, J.R. Schrieffer
Phys. Rev. 108, 1175 (1957)

Джон БАРДИН
1908–1991

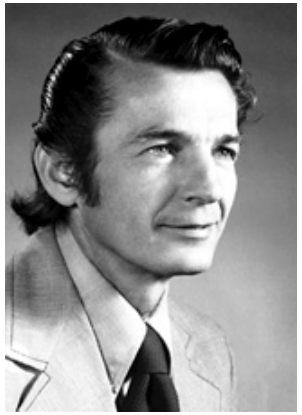
Леон КУПЕР
1930

Дж. Роберт ШРИФФЕР
1931

Нобелевская премия по физике
1972 год

Эксперименты по туннелированию.

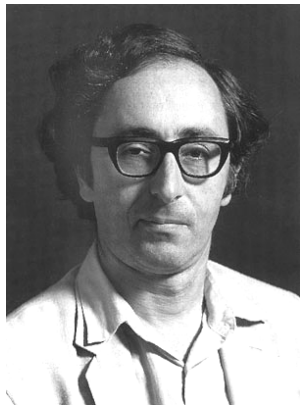
I. Giaever, Phys.Rev.Lett.
5, 464 (1960)



Айвар ДЖАЙЕВЕР
1929

Эффекты Джозефсона

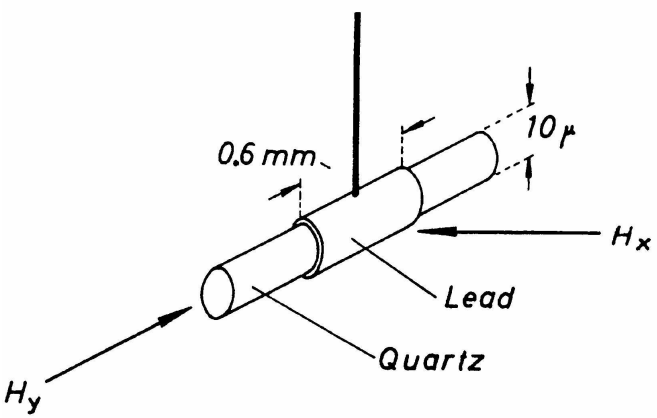
B.D. Josephson Phys. Lett.
1, 251 (1962)

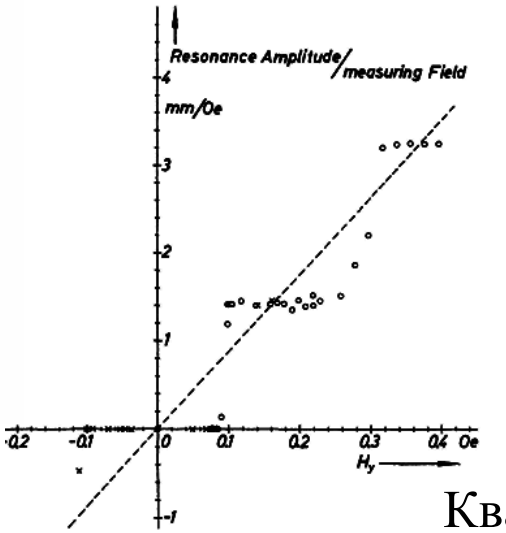


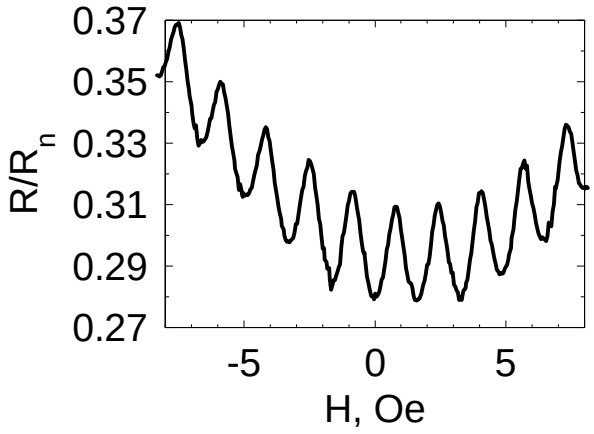
Брайан Дэвид Джозефсон
1940

Нобелевская премия по физике
1973 год

Эффекты квантования







Квантование магнитного потока.

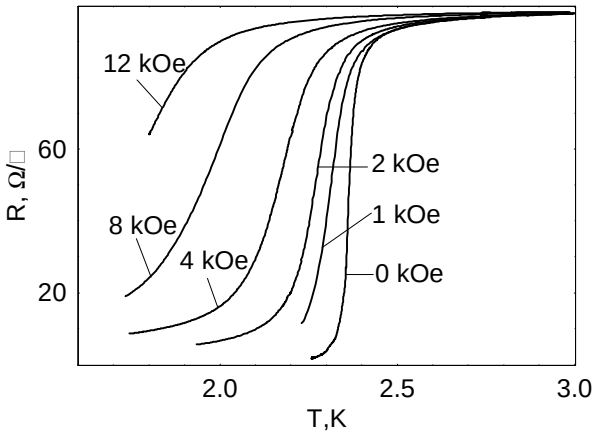
B.S. Deaver and W. M. Fairbank, *Phys. Rev. Lett.* **7**, 43 (1961)

R. Doll and M. Nabauer, *Phys. Rev. Lett.* **7**, 51 (1961)

Квантование циркуляции скорости сверхпроводящих пар

W. A. Little and R. D. Parks *Phys. Rev. Lett.* **9**, 9 (1962)

Квант магнитного потока $H_0S = H_0\pi r^2 = F_0 = 2\pi h/2e = 2.07\ 10^{-7}$ Oe cm^2 = 20.7 Oe mm^2



Флуктуационные эффекты в сверхпроводниках

Aslamazov-Larkin contribution

Л.Г.Асламазов, А.И. Ларкин, *ФНТ*, **10**, 1104 (1968)

Maki-Thompson contribution

K. Maki, *Prog. Theor. Phys.* **39**, 897 (1968)

R.S. Thompson, *Phys. Rev. B* **1** 327 (1970)

Открытие высокотемпературной сверхпроводимости

Алекс Мюллер 1927 — Георг Беднорц 1950

Нобелевская премия по физике 1987 год

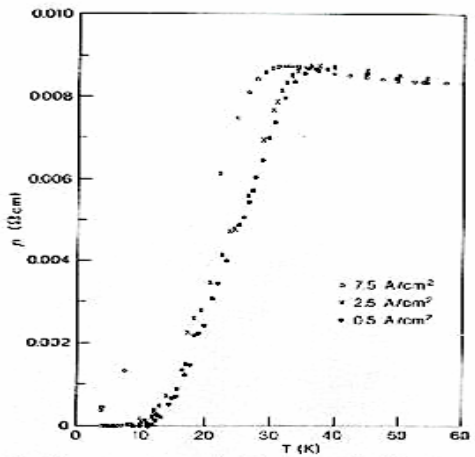
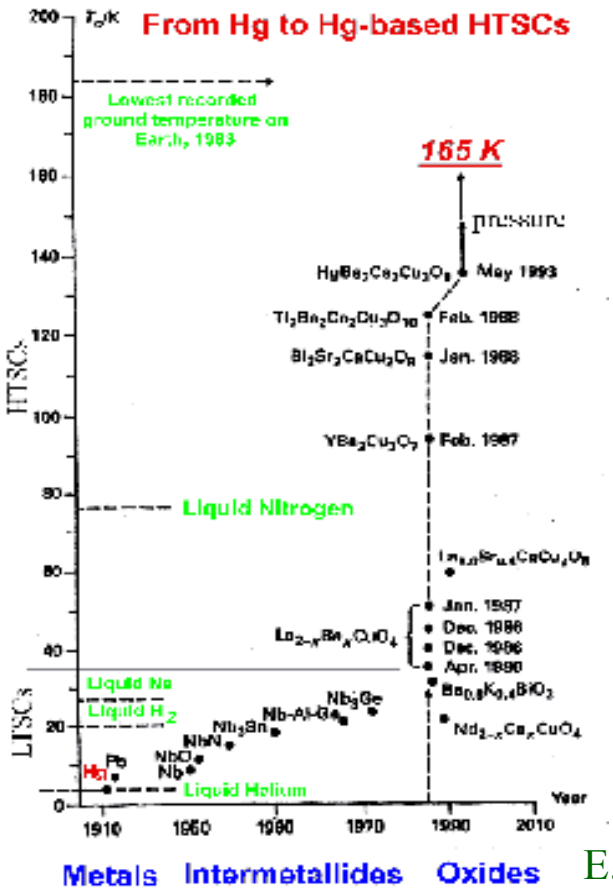


Fig. 3. Low-temperature resistivity of a sample with x(Ba) = 0.75, recorded for different current densities



до 1996 г. 23,2 К Nb_3Ge

$La_{2-x}Ba_xCuO_4$, Лазарев, Кахан и Шаплыгин 1978 г.

J.G. Bednorz, K.A. Muller, Z. Phys. 64, 189 (1986).

> 30 К

$YBa_2Cu_3O_{7-x}$ 93 К

февраль 1987 г. Чу и др.

$Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$ 108 К

январе 1988 г. Маеда и др.

$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$ 125 К

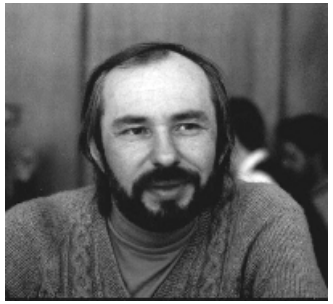
февраль 1988 г. Шенг и Херман

$HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+d}$ 135 К

давление 164 К = -109 ^{0}C

Е.В.Антипов

С.Н.Путилин



Сверхпроводниковая электроника

1960 годы, Сверхпроводниковые болометры, криотроны.
1970 годы, Сверхпроводниковые квантовые измерители магнитного потока на основе переходов Джозефсона.
1980-1990 годы, Интегральные схемы с переходами Джозефсона.

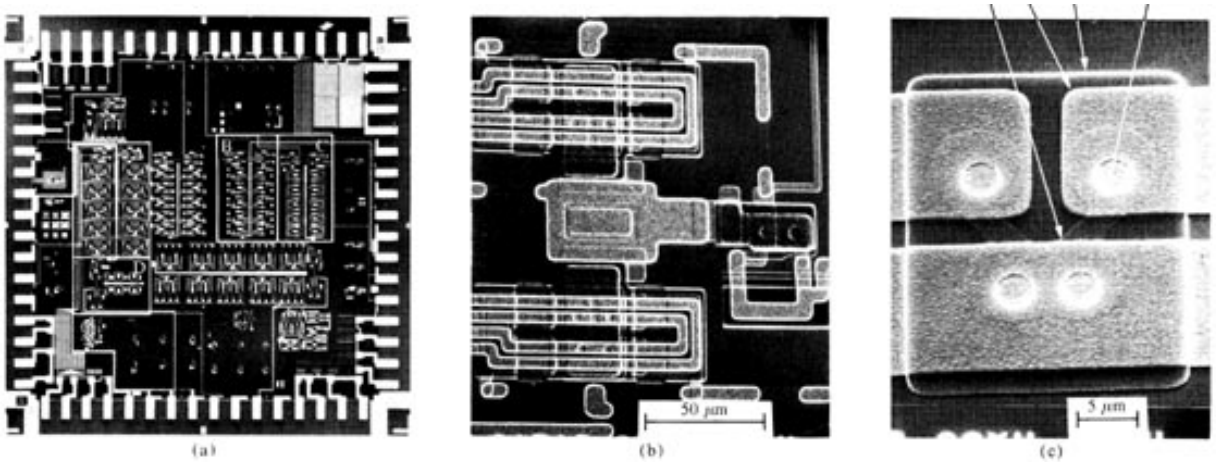


Figure 8 (a) Chip containing experimental current injection logic devices and circuits. Ten-stage chains of four-input AND circuits (A), four-input OR circuits (B), two-input AND circuits (C), and two-input OR circuits (D). (b) SEM of a portion of C showing two interconnected interferometers and a two-junction current injection gate (right, center). (c) SEM of the center portion of one interferometer after formation of its I_{2a} layer; ≈2.5-μm-diameter junction openings.

2000 годы, Квантовый компьютер и квантовые вычисления.