



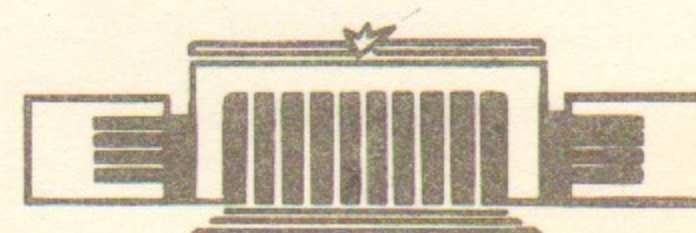
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

27

А. В. Бурдаков, В. В. Поступаев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ  
ПРИ ПОМОЩИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

ПРЕПРИНТ 84-136



НОВОСИБИРСК



А.В.Бурдаков, В.В.Поступаев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНО-БАРЬЕРНЫХ  
ДЕТЕКТОРОВ ПРИ ПОМОЩИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А Н Н О Т А Ц И Я

В работе описана методика определения эффективности регистрации мягкого рентгеновского излучения полупроводниковыми поверхностно-барьерными детекторами. Характеристики детекторов, работающих в токовом режиме, определяются по закономерностям поглощения рентгеновского излучения. Экспериментально определена толщина  $p-n$ -перехода. Для определения коэффициента поглощения рентгеновского излучения в "окне" детектора используется регистрация сигнала в зависимости от угла падения излучения на кристалл. По результатам измерений рассчитана эффективность детектора в зависимости от энергии рентгеновских квантов.

1. Одним из основных методов диагностики горячей плазмы является регистрация мягкого рентгеновского излучения, идущего либо непосредственно из плазменного объема /1/, либо с поверхности специальной мишени, помещенной в плазму /2/. Перспективными приемниками рентгеновского излучения являются поверхностно-барьерные детекторы (ПБД) на основе кремния, работающие в токовом режиме.

Для восстановления спектра излучения необходимо знать спектральные характеристики ПБД, которые определяются свойствами кристалла кремния и, кроме того, могут зависеть от геометрии эксперимента. Ток, проходящий через внешнюю цепь детектора при наличии напряжения смещения, пропорционален мощности рентгеновского излучения, поглощаемой в  $p-n$ -переходе:  $I = P/\epsilon_0 A$ , где  $P$  - мощность в Вт,  $\epsilon_0$  - энергия образования одной электронно-дырочной пары (3,61 эВ для кремния при 300°K /3/).

Эффективность регистрации рентгеновского излучения в области малых энергий фотонов определяется "окном" - слоем вещества, находящегося перед чувствительной зоной детектора. В нашем случае это фильтр, слой золота и лежащий под ним мертвый слой кремния (см.рис.1).

Ниже будет рассмотрена процедура калибровки детекторов, использовавшихся в экспериментах на установке ИНАР /4/.

2. Измерения проводились на специальном стенде (рис.2). Импульсное рентгеновское излучение длительностью 1 мкс создается при падении электронного пучка на мишень. Энергия электронов пучка могла меняться в пределах 0,5-20 кэВ. Источником импульса высокого напряжения служила кабельная двойная формирующая линия, работающая на согласованную нагрузку. Электронная пушка имела сеточный или кольцевой анод ( в зависимости от прикладываемого напряжения). Использовались катоды косвенного накала из гексаборида лантана диаметром 0,6 и 1 см, позволившие получить пучок с плотностью тока до 20 А/см<sup>2</sup>. Были проведены локальные зондовые измерения плотности тока пучка. Для транспортировки пучка создавалось однородное продольное магнитное поле с напряженностью до 1,5 кЭ при помощи катушек Гельмгольца.

В процессе измерений контролировался ток пучка, попадающий на мишень, напряжение на катоде и напряженность магнитного поля. Рабочий вакуум в объеме был не хуже  $1 \cdot 10^{-5}$  Торр. Калиб-



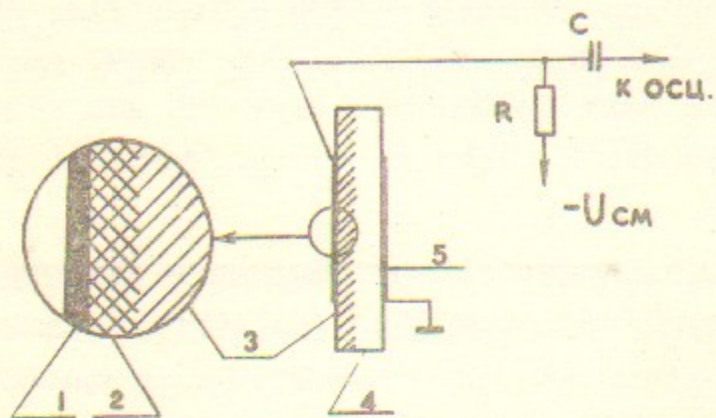


Рис.1. Схема поверхностно-барьерного детектора:  
 1 — слой золота, 2 — мертвый слой,  
 3 — p-n — переход, 4 — кристалл кремния,  
 5 — слой никеля

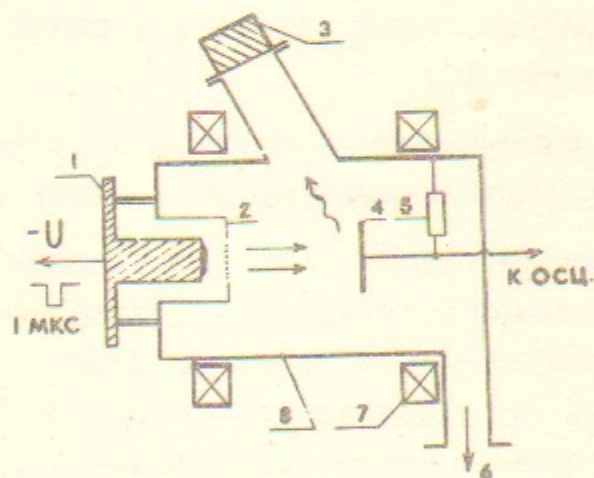


Рис.2. Схема калибровочной установки:  
 1 — катодный узел, 2 — анод, 3 — калибруемый  
 детектор, 4 — мишень, 5 — шунт, 6 — откачка,  
 7 — катушка магнитного поля, 8 — вакуумная  
 камера

ровочный стенд работал с частотой повторения импульсов 0,1 Гц.

3. Первая серия экспериментов была проведена для измерения толщины p-n-перехода. Для оценки этой величины можно использовать выражение /5/:  $d = 0,53 \sqrt{\rho(U+U_0)}$  мкм, где  $\rho$  — удельное сопротивление кремния в Ом·см,  $U_0 = 0,7$  В для кремния,  $U$  — напряжение смещения в В. Для измерения толщины p-n-перехода чаще всего применяются методы, основанные на измерении поглощаемой в чувствительной зоне энергии ускоренных заряженных частиц или фотонов /6/ или на измерении электротехнических характеристик p-n-перехода /7/.

Толщина слоя половинного ослабления потока фотонов с энергией в несколько кэВ в кремнии составляет десятки мкм, что сравнимо с толщиной детектора. Это даёт возможность провести измерения зависимости толщины p-n-перехода от напряжения смещения по поглощению монохроматического рентгеновского излучения. Такие измерения были проведены на калибровочном стенде с использованием линейчатого излучения K-серии титана. Измерялась величина сигнала детектора при различных напряжениях смещения. Полученные данные сравнивались с модельными расчетами, в которых варьировалась величина  $\rho$ . Независимо было проведено измерение  $d(U_{см})$  электротехническими методами. Полученное из результатов всех измерений  $\rho \approx 1150$  Ом·см близко к ожидаемому по технологии.

На основании полученного значения  $d(U_{см})$  была рассчитана зависимость сигнала ПБД от энергии электронов пучка для различных фильтров. В случае достаточно толстых фильтров влияние мертвого слоя на спектральные характеристики детектора не существенно. Были проведены измерения этих зависимостей в абсолютной шкале, показавшие хорошее согласие с расчетом (см. рис.3).

4. В области малых энергий фотонов спектральные характеристики ПБД определяются пропусканием "окна". Измерения толщины мертвого слоя затрудняется тем, что приходится иметь дело с тонким (толщиной до 1000 А) слоем вещества. Для определения пропускания "окна" обычно применяются методы, основанные на измерении поглощения или потерь энергии  $\alpha$ -частиц (/8/ и др.) Механизм торможения  $\alpha$ -частиц в веществе отличен от механизма поглощения рентгеновских лучей, поэтому получаемые из



таких измерений значения эффективности регистрации ультрамягкого рентгеновского излучения необходимо считать косвенными.

В этой работе предлагается другой метод – определение толщины мертвого слоя по эффективности регистрации мягкого рентгеновского излучения, падающего на кристалл под углом к нормали. Если толщина  $p-n$ -перехода много больше пробега излучения в кремнии, то при наклонном падении монохроматических рентгеновских лучей на кристалл, ток, протекающий через детектор, определяется выражением:

$$I = I_0 \exp[-(\mu_{Si} d_{Si} + \mu_{Au} d_{Au})(\sec \theta - 1)],$$

где  $I_0$  – ток при нормальном падении,  $\theta$  – угол между нормалью к детектору и падающим излучением,  $\mu$  и  $d$  – линейный коэффициент поглощения и толщина кремния и золота. По результатам измерения тока ПБД при различных углах поворота можно вычислить толщины мертвого слоя кремния и слоя золота, а по ним – и эффективность детектора в области малых энергий. Достоинство этого метода заключается в том, что фактически определяется величина поглощения излучения в "окне", то есть именно та величина, которая необходима для определения эффективности регистрации рентгеновского излучения детектором. Полученное значение толщины "окна" служит иллюстрацией возможностей метода и может быть использовано при применении детектора для регистрации другого вида излучения.

5. Для проведения измерений по описанной выше схеме был сконструирован специальный детектор, в котором угол падения рентгеновских лучей на кристалл мог изменяться от 0 до  $\pm 60^\circ$  по отношению к нормали. Поскольку при понижении напряжения на электронной пушке интенсивность рентгеновского излучения и ток пучка резко падают, то для увеличения тока ПБД телесный угол, захватываемый детектором, был максимально увеличен.

Схема этого детектора приведена на рис.4. Рентгеновское излучение возникает при попадании электронов пучка на мишень 4 и падает под углом  $\theta$  на кристалл 1, который может поворачиваться. Между детектором и мишенью может устанавливаться фильтр 3. Экран 6 предусмотрен для облегчения теплового режима детектора, находящегося вблизи катода пушки. Ток электронов на

мишень измеряется при помощи пунта 5.

Зависимость тока детектора от угла поворота измерялась с использованием мишеней из титана, графита и бериллия. Основной вклад в сигнал давало линейчатое излучение с энергиями порядка  $0,5+0,1$  кэВ (L-серия Ti, K-серия C, K-серия Be). При измерениях с графитовой мишенью использовался фильтр 0,3 мкм лавсана, остальные измерения велись без фильтров. Поскольку при этом видимый свет от катода и других источников мог попадать на кристалл, то контролировалась постоянная составляющая обратного тска детектора. Точность измерений определялась точностью установки угла и точностью регистрации сигнала ПБД и тока электронов, попадающих на мишень.

Бесфильтровая система регистрации приводит к тому, что кроме линейчатого на детектор попадает также и тормозное излучение. Зависимость тока детектора от угла поворота  $\theta$  в этом случае равна

$$I = \frac{I}{\epsilon_0} \left\{ P_L \exp[-\alpha(E_L) \sec \theta] + \int_{\epsilon_0}^{E_e} F_e \exp[-\alpha(E) \sec \theta] dE \right\},$$

где  $\epsilon_0 = 3,61$  эВ,  $P_L$  – интенсивность линии,  $F_e$  – спектральная интенсивность тормозного излучения,  $\alpha$  – коэффициент пропускания "окна",  $E_e$  – энергия электронов. При углах падения  $0+60^\circ$  отражение рентгеновского излучения с энергией выше 100 эВ не превышает нескольких процентов /9/, поэтому в нашем рассмотрении эффекты отражения не учитывались. Для уменьшения отношения мощности тормозного излучения к линейчатому измерению проводились при минимально возможной энергии электронов пучка.

Результаты измерений с различными мишенями представлены на рис.5. Точками показаны значения, полученные в эксперименте, линиями – кривые, подогнанные по наименьшему  $\chi^2$ . Из этих измерений получено значение толщины слоя золота  $100 \pm 40$  Å, толщины мертвого слоя кремния  $430 \pm 70$  Å при  $U_{см} = 56$  В. Полученное значение толщины мертвого слоя находится в хорошем согласии с теоретическими оценками /10/.

6. Используя полученные значения толщины мертвого слоя и  $p-n$ -перехода, можно рассчитать эффективность регистрации фотонов



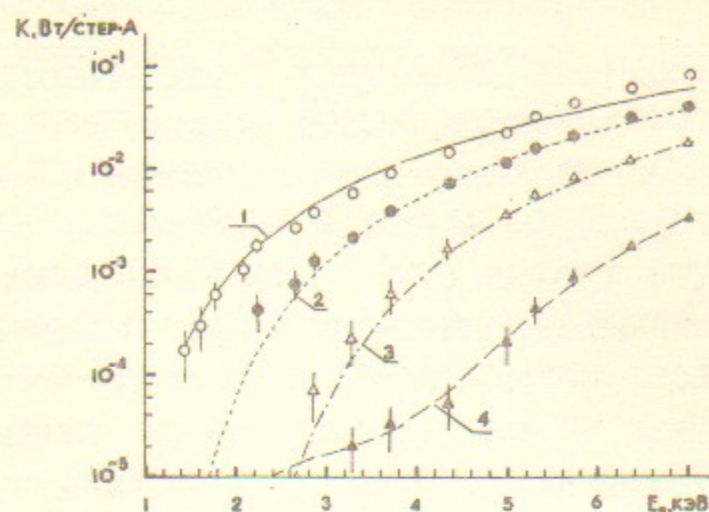


Рис.3. Зависимость мощности рентгеновского излучения, регистрируемого детектором ( $K$ ) от энергии электронов пучка, падающего на мишень из алюминия. Линии — расчетные зависимости, точки — экспериментальные данные. Используемые фильтры: 1 — 15 мкм Be, 2 — 100 мкм Be, 3 — 500 мкм Be, 4 — 36 мкм Al.

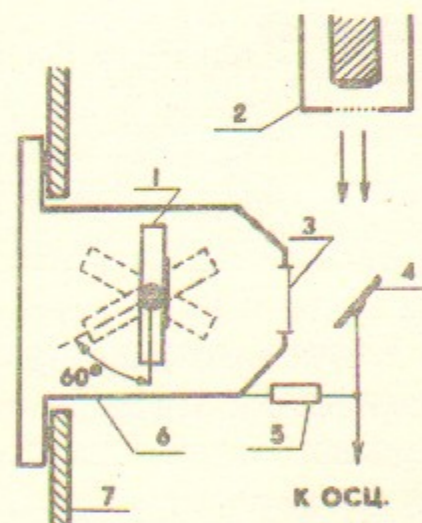


Рис.4. Схема измерений эффективности ПБД при наклонном падении рентгеновских лучей на детектор: 1 — кристалл кремния, 2 — электронная пушка, 3 — фильтр, 4 — мишень, 5 — шунт, 6 — тепловой экран, 7 — вакуумная камера

различных энергий. Эффективность детектора определяется формулой:

$$R(E) = \exp(-\alpha_F - \alpha_M - \alpha_{Au}) [1 - \exp(-\alpha_{pn})],$$

где  $\alpha$  — коэффициенты ослабления в фильтре, мертвом слое, золоте и  $p-n$ -переходе. Рассчитанная по результатам измерений эффективность ПБД, показана на рис.6.

Эффективность в области низких энергий определяется фильтрами и мертвым слоем. Практически в экспериментах на установке "ИНАР" /4/ использовались фильтры толщиной до 1 мм алюминия. Самые тонкие фильтры изготавливались из формвара ( $C_5H_8O_2$ ) толщиной 0,1 мкм, они эффективно подавляли чувствительность детектора к фотонам с энергией менее 50 эВ (кривая 2 на рис.6).

Эффективность ПБД в спадающей части характеристики зависит от толщины  $p-n$ -перехода (т.е. от напряжения смещения) и может варьироваться. В области высоких энергий пробег фотоэлектронов становится сравним с толщиной чувствительной зоны ( $d = 100$  мкм при  $E = 150$  кэВ /5/), поэтому часть фотоэлектронов успевает покинуть  $p-n$ -переход без полной потери энергии. Из-за того, что  $p-n$ -переход занимает не весь объем кристалла, этот эффект несколько ослабляется, хотя учесть его влияние становится трудно. В любом случае уход фотоэлектронов ухудшает эффективность регистрации жесткого рентгеновского излучения. При энергиях более 50 кэВ полученные результаты следует считать оценкой верхней границы эффективности детектора.

7. Таким образом, по зависимости сигнала ПБД от угла падения рентгеновских лучей на кристалл определена толщина "окна" поверхностно-барьерного детектора. По закономерностям поглощения рентгеновского излучения в кремнии определена толщина  $p-n$ -перехода, которая согласуется с другими измерениями. По полученным данным рассчитана эффективность регистрации рентгеновского излучения с помощью ПБД в широком диапазоне энергий.

Авторы выражают глубокую признательность В.С.Койдану за постоянный интерес к работе и полезные замечания, В.Н.Ротаеву за консультации и представление образцов детекторов.



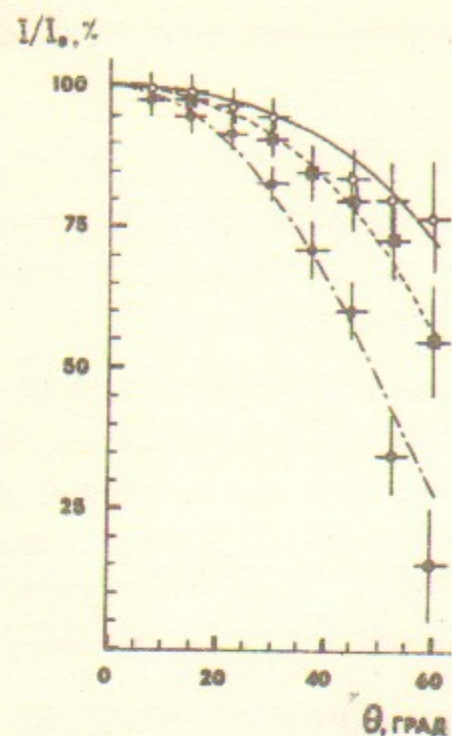


Рис.5. Зависимость тока детектора от угла падения рентгеновских лучей. Используемые мишени: ○ - титан, ■ - углерод, ● - бериллий; линии - расчет.

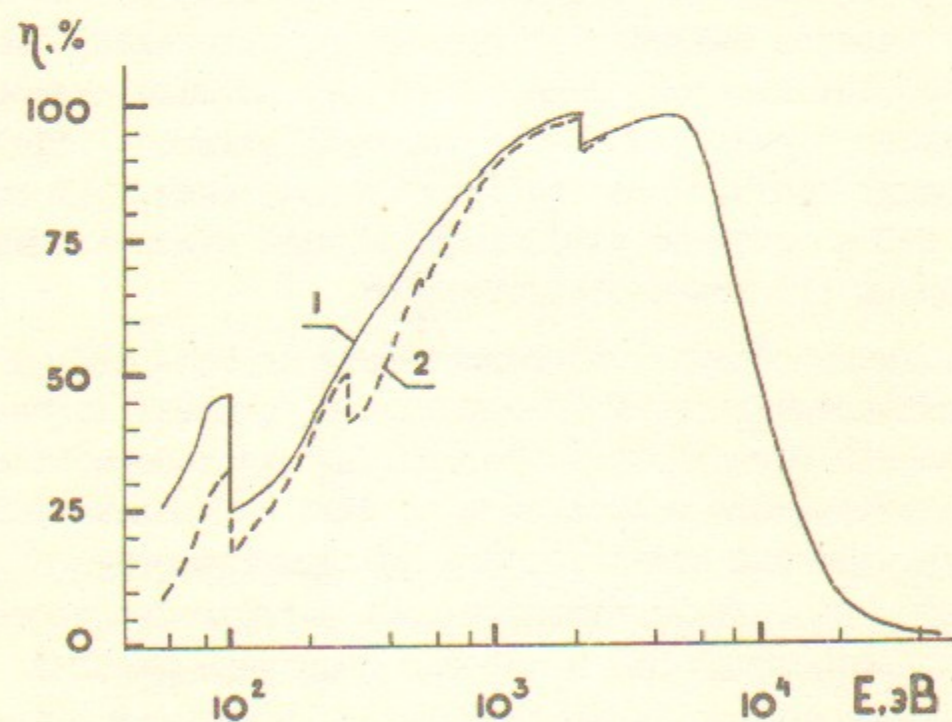


Рис.6. Эффективность ПБД в токовом режиме:  
1 - собственно ПБД, 2 - ПБД с фильтром 0,1 мкм формвара.

## ЛИТЕРАТУРА

1. F.C.Jahoda, E.M.Little, W.E.Quinn, G.A.Sawyer, T.F.Stratton. Continuum Radiation in the X-ray and Visible Regions from a Magnetically Compressed Plasma (Scylla). - Phys. Rev., 1960, v. 119, N 3, p. 843.
2. В.Ф.Алексин, В.А.Супруненко. О тормозном излучении с твердой мишени, помещенной в плазму. - Журн. Техн.физики, 1965, т.35, № 10, с.1902.
3. Р.С.Резников, К.Л.Сельдяков. "Промышленные полупроводниковые детекторы". - М., Атомиздат, 1975.
4. А.В.Бурдаков, В.С.Койдан, В.В.Поступаев, Е.М.Сырессин. Диагностика нагретой электронной компоненты по рентгеновскому излучению с мишени в экспериментах по взаимодействию релятивистских электронных пучков с плазмой. - В "Сб. докл. III Всесоюзного совещания по диагностике высокотемпературной плазмы", Дубна, ОИЯИ, с.74, 1983.  
A.V.Arzhannikov, A.V.Burdakov, V.S.Koidan, L.N.Vyacheslavov. Physics of REB-Plasma Interaction.-Physica Scripta, 1982, v. 22/2, p.303.
5. Дж.Дирли, Д.Нортроп. "Полупроводниковые детекторы ядерных излучений". - М., Мир, 1966.
6. А.А.Александров, И.В.Кирсанов, В.К.Ляпидевский, О.П.Федосеева. Определение толщины чувствительного слоя ПБД с помощью бета и гамма-источников. - ПТЭ, 1978, № 5, с.45.
7. H.J.Erasmuspe. Depletion Depth Determination in Semiconductor Radiative Detectors. - Nucl. Instrum. and Meth., 1970, v. 70, N 1, p. 175.
8. J.T.Watton, R.H.Pell, A.E.Larsh. Small area diffused junction X-ray detector. - IEEE Trans. on Nucl. Sci., 1982, v. NS-29, p. 755.
9. B.L.Henke, P.Lee, T.J.Tanaka, R.L.Shimabukuro, B.P.Fujikawa. Low-Energy X-ray Interaction Coefficients: Photoabsorption, Scattering and Reflection. - At. data and Nucl. data tables, 1982, v. 27, p. 1.
10. J.M.Saywood, C.A.Mead, J.W.Mayer. Influence of Carrier Diffusion Effects on Window Thickness of Semiconductor detectors. - Nucl. Instrum. and Meth., 1970, v. 79, p. 329.



А.В.Бурдаков, В.В.Поступаев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОВЕРХНОСТНО-  
БАРЬЕРНЫХ ДЕТЕКТОРОВ ПРИ ПОМОЩИ РЕНТГЕНОВСКОГО  
ИЗЛУЧЕНИЯ

Препринт  
№ 84-136

Работа поступила - 16 августа 1984 г.

---

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 23.X-1984 г. МН 06185

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.0,9 печ.л., 0,8 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ №136.

---

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г. Новосибирск, 90